

Transport hydraulique de graviers et galets en conduite

The hydraulic transportation of gravel and pebbles in pipes

PAR ROBERT DURAND

INGÉNIEUR AUX ÉTABLISSEMENTS NEYRPIG

English synopsis, p. 578.

Nous avons étudié, au Laboratoire Dauphinois d'Hydraulique, depuis 1948, les conditions de refoulement hydraulique en conduite horizontale de différents matériaux. Nous exposerons ici les recherches effectuées sur des graviers et des galets à l'occasion de l'étude du circuit de refoulement d'une drague stationnaire à godets refouleuse, construite par les Ateliers et Chantiers de Bretagne pour la Compagnie Nationale du Rhône. Cette drague, destinée à travailler dans le périmètre de Donzère, doit refouler des déblais pouvant avoir jusqu'à 100 mm de diamètre.

La première partie de notre étude a porté sur le puits de reprise des déblais pour lequel une solution originale avait été proposée par les A.C.B. Cette solution a donné toute satisfaction et son étude fera l'objet d'une publication ultérieure.

La seconde partie a porté sur les conditions de refoulement proprement dites. La conduite prévue pour la drague avait pour diamètre 330 mm et pour longueur 400 m. La concentration envisagée était de 8,75 % en volume apparent, soit 140 gr/l.

L'échelle du modèle a été choisie de l'ordre

du 1/3, exactement 1/3,17, car nous avons adopté une tuyauterie de type standard de 104 mm de diamètre. Les matériaux utilisés pour l'étude provenaient des bancs de graviers de Donzère. Leurs dimensions ont été choisies à la même échelle du tiers. Il est à remarquer que ces matériaux sont les mêmes que ceux étudiés par Du Boys dans son article classique publié dans les *Annales des Ponts et Chaussées* en 1878.

Leur densité absolue moyenne était de 2,65 et leur densité apparente voisine de 1,60.

Les matériaux ont été triés grâce à des tamis à maille carrée en cinq catégories comprises entre les limites suivantes (vide de maille) 2,3 mm — 5,25 mm — 9,9 mm — 15,54 mm — 20 mm — 25 mm.

Ce triage était nécessaire du fait que notre modèle fonctionnait en circuit fermé. Nous renverrons pour ce point le lecteur à un article publié dans le n° 3 de mai 1951 de *la Houille Blanche*, ainsi que pour la définition des notions de concentration de transport et de concentration spatiale que nous utiliserons dans la suite de notre exposé.

I. — CONSIDÉRATIONS SUR LES VITESSES DE CHUTE DES ALLUVIONS DU RHONE

L'essai physique préliminaire essentiel pour l'étude du refoulement en conduite d'une mixture est la détermination de la vitesse de chute

de grains isolés dans un fluide au repos en milieu infini.

Un grain de maître couple principal S et de

pois apparent P_a dans un fluide de masse spécifique φ prend une vitesse de chute limite W .

$$P_a = C_x \varphi S \frac{W^2}{2}$$

Pour une sphère, on connaît bien la variation du coefficient de traînée C_x défini par l'équation précédente en fonction du nombre de REYNOLDS basé sur le diamètre de la sphère (voir fig. 1). Pour des nombres de REYNOLDS allant jusqu'à 1, on a :

$$C_x = \frac{24}{R}$$

$$C_x = \frac{24}{R} \quad W = K d^2$$

ce qui correspond au régime laminaire. Pour des nombres de REYNOLDS compris entre 10^3 et 10^5 , C_x reste sensiblement constant, ce qui correspond au régime turbulent.

Parallèlement, la courbe des vitesses de chute en fonction du diamètre présente également deux parties distinctes. Pour des grains de diamètre inférieur à 0,15 mm environ (grains de densité 2,65 en chute libre dans l'eau), on a la loi de STOKES de la forme (fig. 2) :

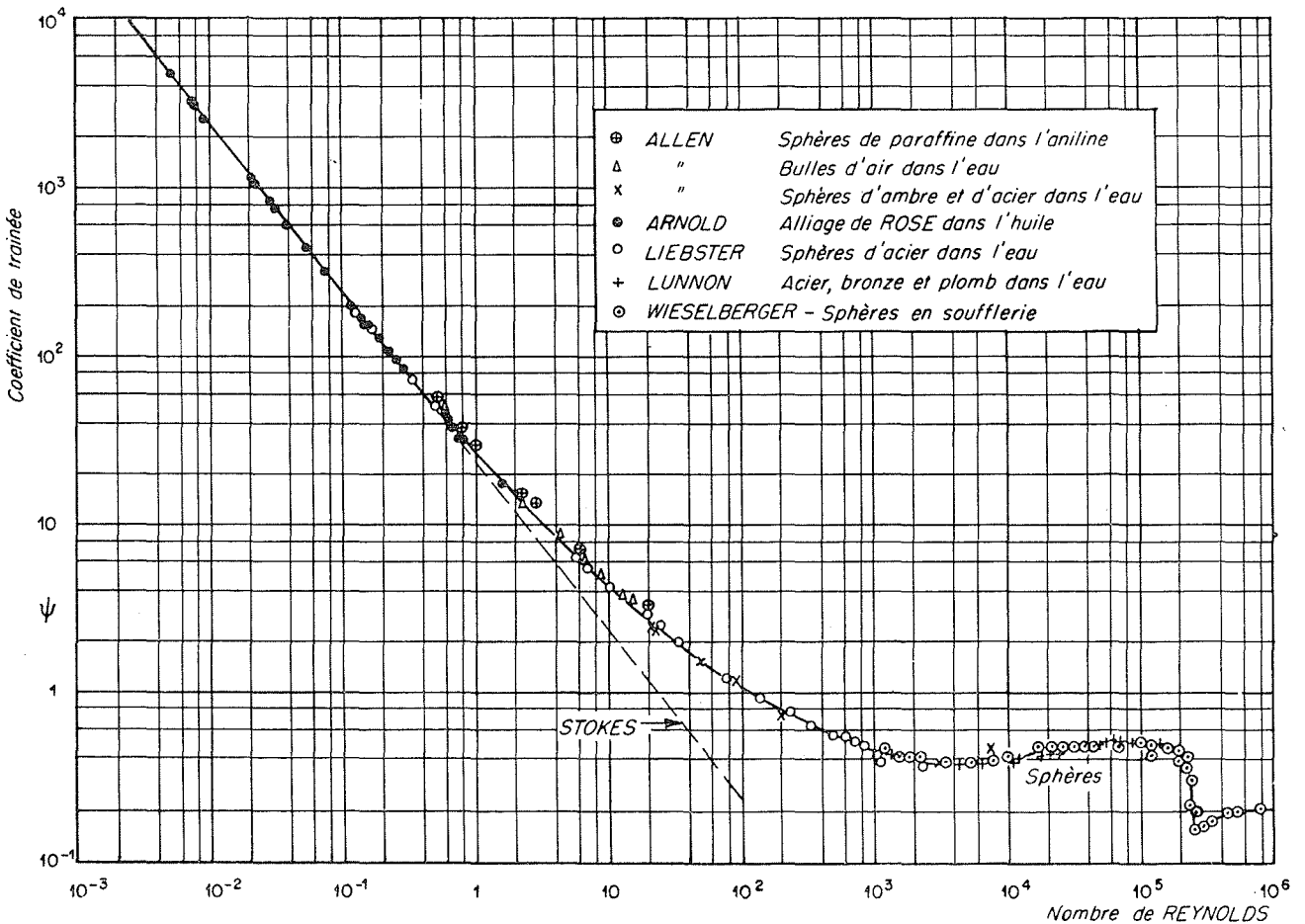


FIG. 1. — Variation du coefficient de traînée pour des sphères en fonction du nombre de REYNOLDS.

Cette classe correspond aux argiles, limons et sables fins.

Pour des grains de diamètre supérieur à 1,5 mm environ, on a une loi définie par RITTINGER comme étant de la forme :

$$C_x = C_0 \quad W = K\sqrt{d}$$

Il s'agit de déblais désignés communément sous le nom de graviers et galets.

Entre 0,1 et 1,5 mm, on a une loi de transition qui correspond à :

$$C_x = \frac{24}{R} + C_0$$

C'est sensiblement le domaine des sables grossiers.

Nous voyons donc que, de ce point de vue, les matériaux de densité 2,65 (densité la plus fré-

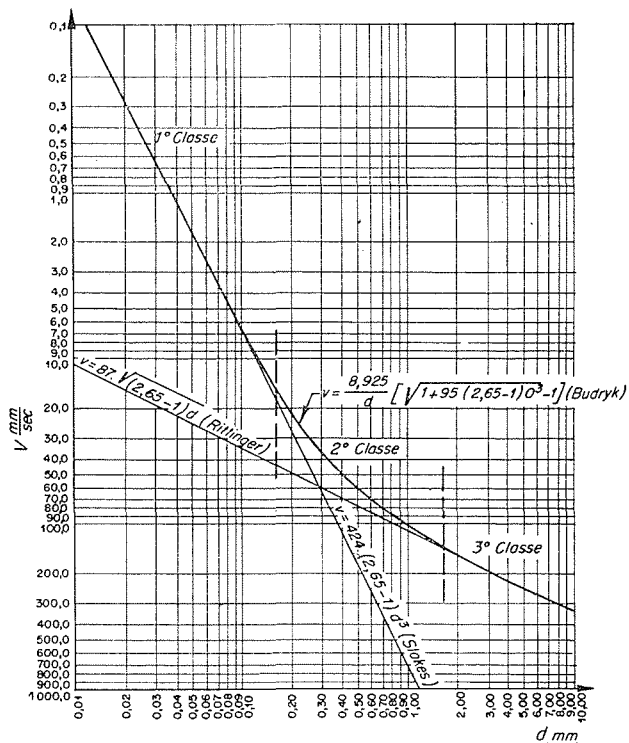


FIG. 2. — Vitesse de chute dans l'eau en fonction du diamètre nominal pour des grains de quartz de densité 2,65 (d'après BUDRYK, essais de RICHARDS).

quente des alluvions naturelles) se partagent en trois classes en fonction du diamètre, ces classes étant séparées approximativement par les valeurs 0,15 et 1,5 mm. Ce mode de classement a déjà été signalé par de nombreux auteurs et en particulier par Sir Claude INGLIS. Il est bien évident d'ailleurs que les valeurs numériques critiques indiquées ne correspondent pas à un changement brutal de propriétés.

Les considérations précédentes étaient valables dans le cas des sphères. Or, la forme des alluvions du Rhône s'écarte en moyenne notablement de celle de la sphère. Il fallait donc voir dans quelle mesure cette forme particulière influençait la vitesse de chute. De toute façon, pour permettre des recoupements ultérieurs avec des essais sur la drague réelle, il fallait définir et chiffrer la forme des galets étudiés.

Nous avons choisi comme critère le coefficient volumétrique C défini par les normes françaises. C'est le rapport du volume V du caillou (déduit d'une mesure de poids, la masse spécifique étant connue) au volume de la sphère ayant pour diamètre la plus grande dimension L du caillou :

$$C = \frac{V}{\frac{\pi}{6} L^3}$$

Le coefficient volumétrique C_m d'un mélange est égal au rapport du volume d'un certain nom-

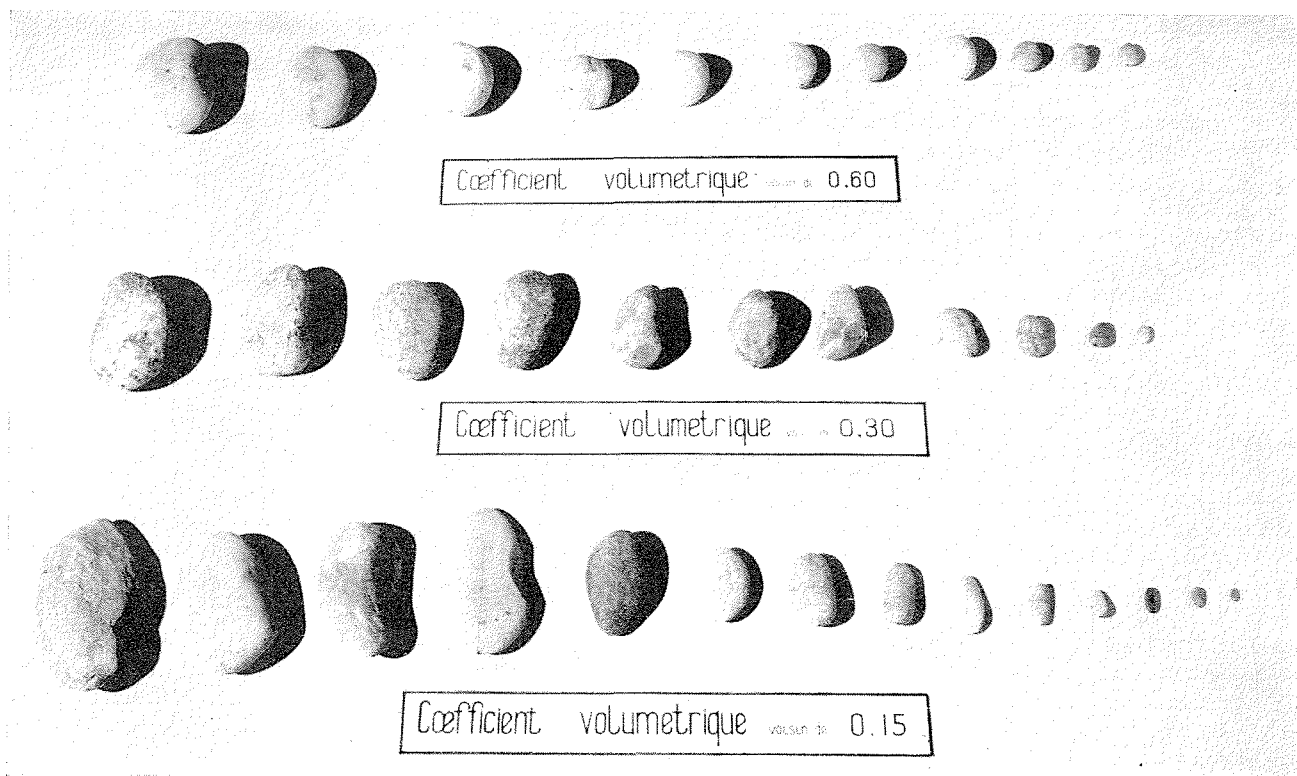


FIG. 3. — Galets du Rhône classés en fonction de la valeur du coefficient volumétrique.

bre de grains à la somme des $\frac{\pi L^3}{6}$ de chacun d'eux.

Les coefficients volumétriques moyens mesurés sont en général voisins de 0,3. L'ensemble de nos mesures a porté sur environ 750 galets.

Remarquons que la valeur moyenne de 0,3 semble normale. Pour le gravillon de la Seine, FAURY indique la valeur de 0,22 et pour la Moselle la valeur exceptionnelle de 0,4.

A priori, l'emploi du seul coefficient volumétrique peut sembler insuffisant pour définir le comportement d'un grain dans un écoulement. Mais les galets ayant été roulés par un fleuve dont le régime est relativement uniforme dans cette région, il doit exister, du fait de ce façonnement naturel, une relation implicite entre les divers coefficients de forme qui permettent de définir un grain.

Dans le but de vérifier ce point, nous avons trié à la main un certain nombre de galets. Ces galets ont été choisis de telle façon que leur coefficient volumétrique soit voisin de l'une des trois valeurs particulières suivantes : 0,6 — 0,3 — 0,2. Chacun d'eux a été caractérisé en outre

par son diamètre nominal d_n , c'est-à-dire par le diamètre de la sphère de même volume.

Si L est la plus grande dimension du galet entre plans parallèles, L' la plus grande dimension normale à la direction précédente et L'' la plus grande dimension normale aux deux précédentes, on peut appeler module d'allongement le rapport $\frac{L}{L'}$ et module d'aplatissement le rapport $\frac{L'}{L''}$. En moyenne, ces modules sont égaux

pour un caillou du Rhône donné, quel que soit son diamètre nominal et son coefficient volumétrique. A titre de contrôle, nous avons effectué les mêmes mesures sur les galets du Drac à Grenoble et nous n'avons pu dégager aucune relation entre ces deux modules. Il existe donc bien une certaine uniformité particulière dans la forme des galets du Rhône étudiés (voir fig. 3).

Nous avons alors réalisé des essais de vitesse de chute pour les différents galets particuliers choisis. Ces essais ont été effectués de façon assez sommaire dans un esprit pratique, c'est-à-dire sans s'attacher à une trop grande précision.

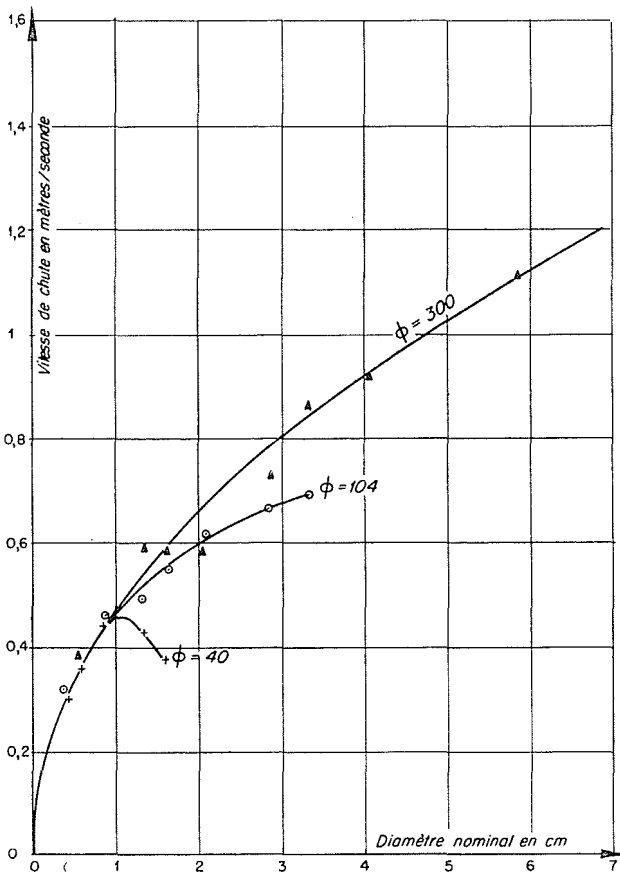


FIG. 4. — Variation de la vitesse de chute en fonction du diamètre nominal des galets. Coefficient volumétrique voisin de 0,30. Essais dans trois conduites de ϕ 40, 104, 300.

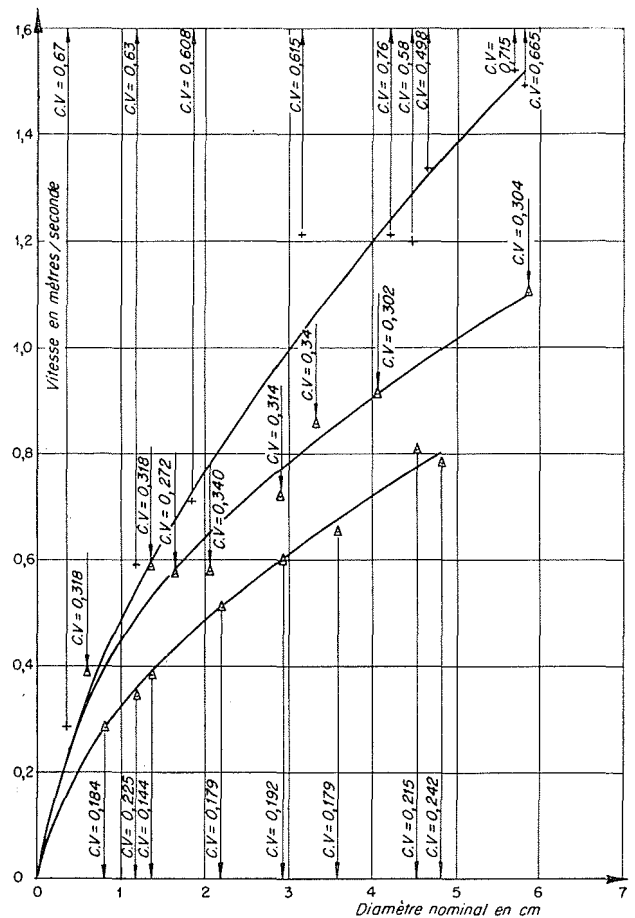


FIG. 5. — Vitesse de chute en fonction du diamètre nominal pour des galets du Rhône de coefficient volumétrique voisin de 0,60, 0,30, 0,20. (Diamètre de la conduite d'essai: 300 mm.)

Trois tuyauteries verticales de 7 m de hauteur ont été dressées. Elles avaient respectivement pour diamètre 40 mm — 104 mm — 300 mm. A trois mètres du sommet, se trouvaient des regards vitrés et le bas des conduites était obturé par un fond transparent en plexiglas. Ces conduites étant remplies d'eau, le galet était lâché successivement au sommet de chacune des conduites. Un premier observateur déclenchait un chronomètre électrique au passage du galet devant le premier regard. Un second observateur arrêtait le chronomètre lorsque le galet atteignait le fond. Nous avons ainsi pu tracer les courbes des figures 4 et 5. La figure 4 montre l'influence des parois sur la vitesse de chute pour des galets de coefficient volumétrique voisin de 0,3. On voit que cette influence devient nettement sensible lorsque le diamètre du galet est plus grand que le quart du diamètre de la conduite.

La figure 5 montre la valeur de la vitesse de

chute en fonction du diamètre nominal du grain (diamètre de la sphère de même volume) pour les essais dans la conduite du diamètre 300. Les points d'essais sont cotés suivant la valeur exacte du coefficient volumétrique. On voit que les points s'ordonnent assez bien autour de courbes moyennes pour chaque valeur moyenne du coefficient C. De même, si l'on exprime le coefficient de traînée en fonction du nombre de REYNOLDS, on constate qu'il demeure sensiblement constant pour chaque catégorie.

Ce résultat montre que le coefficient volumétrique suffit pour les galets du Rhône à caractériser la forme, du point de vue comportement des galets dans l'eau, et que leur vitesse de chute reste de la forme :

$$W = K\sqrt{d}$$

Par suite, la classification en trois catégories, établie pour les sphères, leur demeure applicable.

II. — DESCRIPTION DU RÉGIME DE SALTATION

Nous décrirons tout d'abord ce que nous a permis d'observer un élément vitré intercalé sur le circuit de refoulement de 104 mm de diamètre de notre modèle.

Considérons dans la conduite horizontale un dépôt uniforme de graviers de diamètre compris entre 2,3 et 5,25 mm (vide de maille).

Augmentons progressivement la vitesse de l'eau à partir de zéro. Au-delà d'une certaine vitesse V_1 , de l'ordre de 0,5 m/s, les graviers situés en surface du dépôt commencent à s'agiter, puis basculent les uns sur les autres. Tous les grains ne se mettent pas en mouvement simultanément car ils n'occupent pas initialement la même position les uns par rapport aux autres. En augmentant un peu la vitesse de l'eau, ces différences deviennent insensibles et le nombre de graviers mis en mouvement s'accroît régulièrement. Dès que la vitesse moyenne est légèrement supérieure à la valeur nécessaire pour assurer le basculement des grains, ces derniers se mettent à progresser par bonds, ce qui justifie le terme classique de saltation. Ce régime de transport a été souvent décrit, et plus particulièrement par M. BAGNOLD dans son livre sur le transport des sables par le vent. Alors qu'à la lecture de la plupart des ouvrages traitant de la saltation on peut croire qu'il s'agit là d'un phénomène transitoire, M. BAGNOLD insiste sur le fait que c'est pour les sables dans l'air un mode de transport caractéristique qui se maintient pour toutes les vitesses pour lesquelles le matériau est

nettement entraîné. C'est ce que nous avons pu également constater pour les graviers et galets dans l'eau, même pour des vitesses de l'ordre de 4,5 m/s. Le régime de saltation n'apparaît donc pas comme étant un mode transitoire de transport, mais comme fondamental pour les gros matériaux.

On distingue d'ailleurs très nettement, par observation directe à travers un regard vitré, si les matériaux sont en régime de suspension ou de saltation, même aux vitesses trop grandes pour que l'œil puisse suivre individuellement les grains. En régime de suspension, les particules visualisent les tourbillons de l'écoulement, ce qui produit une impression de grouillement absolument désordonné. En régime de saltation, on distingue des stries qui oscillent en donnant une impression de scintillement tout en restant en moyenne nettement dirigées suivant la direction de l'écoulement.

Essayons maintenant de donner une description plus détaillée du mécanisme de saltation. Pour un matériau homogène, à des vitesses peu supérieures à la vitesse d'entraînement, le gravier qui vient d'effectuer un bond peut, au moment où il rejoint le dépôt, soit ricocher sur un grain immobile pour décrire une nouvelle trajectoire, soit creuser dans le dépôt une sorte de petit cratère en éjectant d'autres grains auxquels il restitue une partie de l'énergie cinétique qui lui avait été communiquée par le fluide. A de plus grandes vitesses, l'énergie acquise par

les grains est suffisante pour leur permettre à la fois de ricocher et de mettre en mouvement les graviers qu'ils viennent de heurter. On arrive ainsi à avoir en dessous des couches supérieures progressant par bonds, une ou plusieurs couches progressant par glissement. La vitesse de chacune de ces couches en glissement décroît à mesure que l'on se rapproche de la partie du dépôt restée immobile. Leur nombre augmente avec la vitesse moyenne de l'eau. On retrouve là le schéma classique donné par Du Boys à propos, rappelons-le, des mêmes matériaux que ceux que nous avons observés. Mais alors que cet auteur considère que ce charriage est dû directement à l'effort tangentiel à la paroi exercé par l'écoulement, il se produit en fait par l'intermédiaire des grains en régime de saltation. Ces derniers progressent beaucoup plus rapidement que les couches en glissement et le débit solide correspondant au charriage (" surface creep " pour M. BAGNOLD) ne représente qu'une partie du débit solide total.

A ce phénomène de la saltation, qui est absolument général pour certaines catégories de matériaux que nous précisons plus loin, peut se superposer le phénomène particulier des dunes.

Si fortuitement un grain de la couche en charriage immédiatement en contact avec le dépôt vient à s'immobiliser, il tendra à arrêter les graviers au même niveau, situés plus à l'amont. Les couches supérieures seront ralenties de proche en proche et tout se passera finalement comme si l'on avait rajouté localement une couche de graviers, ces graviers étant prélevés sur le même débit solide permanent des régions supérieures en saltation. Si le même phénomène se reproduit au même endroit et plusieurs fois, il peut se former une dune car le rouleau à axe horizontal qui se forme à l'aval tend à la stabiliser. Dans notre installation en circuit fermé, ces dunes finissaient par s'individualiser au point de laisser entre elles des tronçons de conduite vides de graviers.

Une dune isolée présente alors l'aspect suivant : elle comporte un noyau immobile dont le front est incliné suivant une pente douce sensiblement uniforme. Cette pente augmente légèrement avec la vitesse moyenne de l'eau tant que les dunes demeurent distinctes. A mesure que l'on s'élève le long du talus, du fait de l'accroissement de vitesse résultant de l'obstruction croissante de la conduite, les graviers sont soumis de façon de plus en plus intense au phénomène de saltation. Si la dune est suffisamment importante, le talus amont est suivi d'un palier. A son extrémité aval, la dune présente un front raide à l'arrière duquel se développe un rouleau à axe horizontal. Les couches inférieures en mouvement, qui progressent par glissement, s'éboulent

directement suivant un angle voisin de l'angle de talus naturel, et en fait même un peu supérieur sous l'effet du courant de retour dû au rouleau. Les graviers progressant en saltation peuvent soit atteindre la conduite dans la zone d'action du rouleau, auquel cas ils sont ramenés vers le pied aval de la dune, soit plus loin. Ils continuent alors à progresser, mais leur vitesse de progression sur fond lisse est plus rapide que sur le corps de la dune et ils tendent à rattraper la dune suivante (fig. 6). Suivant les termes de

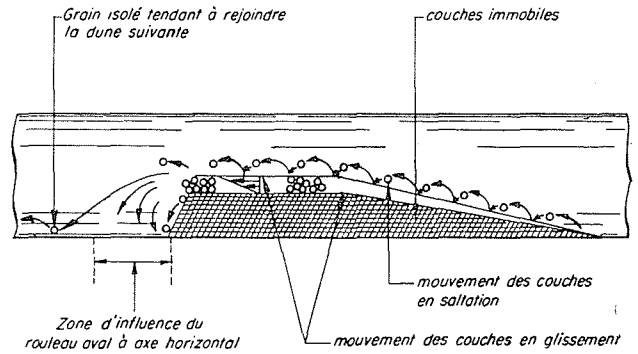


FIG. 6. — Aspect général d'une dune.

DU BUAT (1876), le gravier ou « le grain de sable, poussé par le courant, montre la pente douce du premier talus et arrive au sommet; il roule par son propre poids du haut en bas du talus opposé; là, il demeurera au repos, à l'abri de l'action du fluide, et il est recouvert par d'autres grains qui viennent à leur tour... Ces grains de sable ainsi enterrés restent en repos jusqu'à ce que toute la masse qu'ils avaient laissée en arrière ait passé en détail au-dessus d'eux ».

La vitesse fictive de progression de la dune est ainsi bien inférieure à la vitesse moyenne de l'eau.

Lorsqu'on augmente cette dernière notablement, le nombre de grains en saltation sur le dessus de la dune s'accroît ainsi que la proportion de grains qui échappent à l'influence du rouleau aval. L'individualité des dunes tend alors à s'atténuer pour ces deux raisons jusqu'au moment où la dernière couche du corps fixe de la dune se met à son tour à glisser. Nous désignerons le type de dune correspondant par l'expression de « dune limite ». La vitesse moyenne, dite vitesse critique, est alors de l'ordre de 2,2 m/s pour nos grains de 2,3 et 5,25 mm de diamètre dans une conduite de $\varnothing 104$ mm. Ils sont répartis de façon à peu près uniforme le long de la conduite. On a toujours saltation des couches supérieures et glissement des couches inférieures. Si quelques grains de la couche immédiatement en contact avec la génératrice inférieure viennent à s'immobiliser, les couches supérieures s'arrêtent à leur tour, créant une obstruction

dans la conduite. Les vitesses étant élevées, il apparaît à la fois une différence de pression entre les deux faces de l'obstacle et une dépression au sommet (par effet Venturi). L'ensemble, provisoirement immobile, glisse alors d'un bloc en se désagrégant sous l'effet de la dépression. En augmentant encore un peu la vitesse moyenne, ces instabilités disparaissent et le régime de salutation se conserve.

Il se conserve également pour les graviers plus gros que ceux considérés jusqu'à présent, à savoir 5-10, 10-15, 15-20, 20-25 et pour divers mélanges-types étudiés. On peut remarquer que, pour une même vitesse de l'écoulement, les trajectoires moyennes sont d'autant plus hautes et plus longues que les galets sont plus gros, dans la mesure bien entendu où la vitesse est suffisante pour les entraîner.

Si nous étudions alors le refoulement d'une mixture à granulométrie étendue, les gros graviers ayant des trajectoires plus tendues échappent plus facilement au rouleau aval. En moyenne, ces grains seront moins souvent immobilisés dans le corps fixe de la dune que les graviers plus fins et auront donc une vitesse moyenne supérieure. Du même coup, un débit solide important circulera constamment entre les

dunes et l'individualité de ces dernières tendra à s'atténuer. C'est ce qui explique que le phénomène n'ait pas été signalé nettement à notre connaissance dans la littérature technique. Cependant, G. H. HOWARD signale un processus analogue à l'occasion d'une étude portant sur le refoulement dans une conduite de 4 pouces de graviers dénommés "Pea Gravel", de granulométrie comprise entre 0,5 et 7 mm. Il qualifie l'écoulement de saccadé et le caractérise par le mot "jerking". M. DANIEL, dans une réponse à l'article de HOWARD, compare ce mouvement saccadé à un phénomène analogue observable sur les torrents de montagne.

Pour du sable, le transport par saltation joue dans une gamme plus réduite. Pour un régime correspondant à la disparition des dunes, la majorité des grains est alors en suspension et les phénomènes décrits précédemment à propos de la dune limite deviennent insensibles.

Pour les graviers, l'existence de dunes isolées en matériau homogène est évidemment facilitée par la conception en circuit fermé de notre modèle. Le phénomène doit être moins net en circuit ouvert où l'on réalise une alimentation régulière en tête de l'installation.

III. — SIMILITUDE ET RÉSULTATS D'ESSAIS

Il semble logique d'essayer de caractériser les écoulements de mixture par la valeur du rapport $\frac{W}{V}$, de la vitesse de chute d'une particule isolée en régime uniforme à la vitesse moyenne de l'écoulement.

Parmi les caractéristiques physiques d'un grain bien définies et relativement faciles à déterminer, c'est en effet celle qui semble la mieux appropriée au problème du transport du grain par l'eau.

Son emploi a d'ailleurs déjà été sanctionné par l'expérience puisque le nombre Z de la théorie de SCHMIDT-ROUSE caractérise le degré de mise en suspension des matériaux fins en faisant intervenir le même rapport $\frac{W}{V}$.

$$Z = \frac{CW}{0,4 V}$$

avec C , coefficient de CHÉZY.

Cette théorie a été vérifiée pour les canaux aux faibles concentrations. D'après les essais effectués par nous sur des particules fines de suies, l'emploi du nombre Z semble être également jus-

tifié en conduite circulaire et pour ces concentrations déjà importantes.

Nous allons examiner de plus près, en explicitant W en fonction des variables usuelles, quelle condition impose l'hypothèse que $\frac{W}{V}$ ou son inverse $\frac{V}{W}$ caractérise l'écoulement d'une mixture.

Pour des particules supposées sphériques :

$$W^2 = \frac{4}{3} \frac{gd}{C_r} \frac{\rho' - \rho}{\rho}$$

Pour les matériaux de la première classe (argiles, limons et sables fins) :

$$C_r = \frac{24}{R} \text{ avec } R = \frac{Wd}{\nu}$$

$$\text{et : } \frac{V}{W} = 18 \frac{\rho}{\rho' - \rho} \frac{V_\nu}{gd^2}$$

Pour les matériaux de la troisième classe (gra-

viers et galets) pour lesquels C_x est constant, on aura :

$$\left(\frac{V}{W}\right)^2 = \frac{3 C_x}{4} \frac{\rho}{\rho' - \rho} \frac{V^2}{gd}$$

Ainsi pour ces matériaux l'hypothèse suivant laquelle l'écoulement est caractérisé par $\frac{W}{V}$ se ramène, pour des matériaux de densité donnée dans l'eau, à prendre comme paramètre de similitude $\frac{V^2}{gd}$, nombre sans dimensions caractéristique de la similitude de FROUDE.

Le fait que pour de tels matériaux le coefficient de traînée est indépendant du nombre de REYNOLDS, donc de la viscosité, laisse d'ailleurs prévoir la similitude de FROUDE.

M. MEYER-PETER a donné depuis 1934 une formule qui vérifie en canal cette similitude à partir de ses propres essais et de ceux de GILBERT. Il est à remarquer que tous les matériaux qu'il avait considérés avaient un diamètre supérieur à 3 mm et appartenaient donc bien à la troisième classe au sens où nous l'avons définie.

Remarquons que pour les matériaux de la seconde classe (sables grossiers), il ne doit pas exister de lois intrinsèques. Les lois du transport hydraulique dans ce domaine doivent être une combinaison des lois valables dans les deux classes voisines.

On voit aussi que, pour une étude sur modèle, on devra utiliser des matériaux appartenant à la même classe que les matériaux de la nature. C'est pourquoi nous n'avons pu réduire l'échelle de notre modèle du circuit de refoulement de la drague en dessous du tiers, étant donné la granulométrie des déblais spécifiée au cahier des charges.

Remarquons enfin que, lorsque l'on change de fluide ou de matériaux, les diamètres critiques d_c doivent satisfaire à la relation obtenue en écrivant que le nombre de REYNOLDS $\frac{W d_c}{\nu}$ a une valeur constante R_c .

$$\frac{g d_c^3}{\nu^2} \times \left(\frac{\rho' - \rho}{\rho}\right) g = \text{Cste}$$

Il nous était d'ailleurs difficile d'essayer de vérifier l'application de la similitude de FROUDE pour les graviers et galets en faisant varier systématiquement l'échelle du modèle λ en même temps que celle des matériaux. Nous avons dû nous contenter tout d'abord de faire varier le diamètre des grains dans la même installation de 104 mm de diamètre.

Nous pouvons penser que la valeur du rapport $\alpha = \frac{C_T}{C_S}$ de la concentration de transport à

la concentration spatiale caractérisera l'écoulement et correspondra à une valeur de $\frac{V}{\sqrt{\lambda g}}$.

Nous pouvons également considérer que les graviers en régime de saltation décrivent des trajectoires moyennes types et possèdent une hauteur d'ascension verticale h pour chaque valeur de la vitesse moyenne et pour un diamètre de grain donné. Dans ces conditions, il peut sembler logique d'admettre que α est lié à la valeur de $\frac{h}{D}$. Par suite, en combinant les deux conditions précédentes, le paramètre $\frac{V}{\sqrt{\lambda g}}$ pour des matériaux à la même échelle que la conduite peut être remplacé par :

$$\frac{V\sqrt{d}}{gD}$$

et pour des matériaux différents dans la même conduite par :

$$V \times \sqrt{d}$$

Ceci peut sembler paradoxal. Pour conserver dans la conduite le même degré de transport, caractérisé par une valeur donnée de α , il faut diminuer la vitesse si l'on augmente le diamètre des graviers. C'est ce que nos observations nous avaient laissé pressentir et ce que nos mesures ont confirmé. En portant les valeurs expérimentales de α en fonction de $V \times \sqrt{d}$, les points se groupent avec une assez bonne approximation autour d'une courbe unique (fig. 7). Les

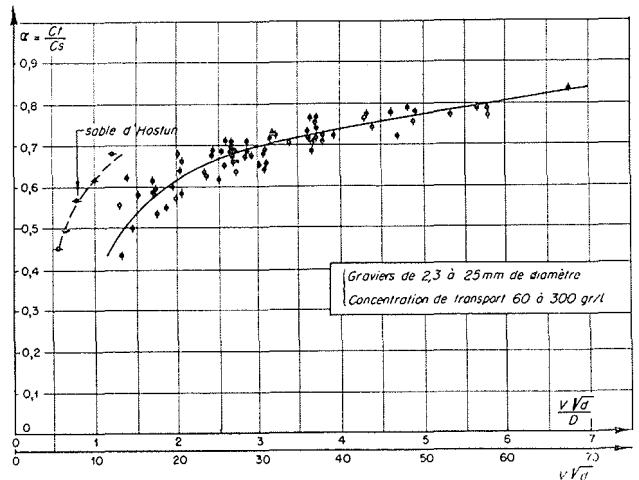


FIG. 7. — Variation de α en fonction de $(V \sqrt{d})$ dans une conduite de $\varnothing 104$ mm.

points correspondant à du sable grossier de 0,8 mm de diamètre moyen s'écartent nettement de cette courbe. Les régimes étudiés correspondent tous à des vitesses supérieures à la disparition de la « dune limite ».

Nous avons également effectué des essais sur une conduite de 40 mm de diamètre et en prenant comme paramètre $\frac{V \times \sqrt{d}}{gD}$ (fig. 8), les points se placent pour les deux modèles autour

de la même courbe. Le résultat est indépendant de la concentration dans la limite des essais (60 à 300 gm/l).

Mais il est bien évident que de telles lois ne sont valables que dans la mesure où la vitesse

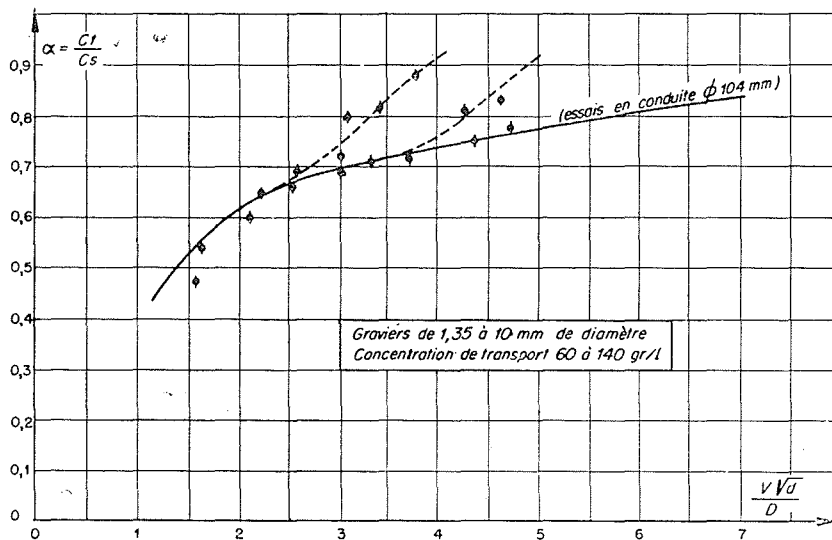


FIG. 8. — Variation de α en fonction de $\frac{V \sqrt{d}}{D}$ dans une conduite de $\varnothing 41$ mm.

est suffisante pour entraîner les galets. Pour des valeurs de α voisines de zéro, correspondant au début d'entraînement, on a en effet $\frac{V}{\sqrt{gd}} = Cste$ qui correspond toujours à FROUDE, mais indépendamment cette fois, en première approximation, de l'échelle de la conduite.

Par ailleurs, lorsque la portée verticale moyenne des bonds tend à dépasser la valeur du diamètre de la conduite, les grains sont réfléchis dans tous les sens et la pesanteur tend à s'éliminer. On arrive ainsi à un pseudo-régime de suspension. Ce phénomène a pu également être mis en évidence au cours de nos essais, et correspond aux courbes en tirets de la figure 8. Il est évidemment tout à fait particulier au cas des conduites en charge. Il ne présente sans doute pas d'intérêt pour les rivières et canaux où une telle paroi réfléchissante n'existe pas et où les vitesses sont en outre généralement trop faibles.

Il résulte de ces remarques que nos résultats d'essais doivent être appliqués avec prudence aux installations à grande échelle refoulant des galets. Si nous avons pu dégager un aspect des lois générales du phénomène, les limites d'application demeurent encore incertaines.

En ce qui concerne les pertes de charge, nous n'avons pas vérifié la loi, classique pour les sa-

bles fins, à savoir que la perte de charge est la même qu'en eau claire, à condition de l'exprimer en hauteur de mixture.

Pour les sables grossiers (0,8 mm) nous avons obtenu les résultats de la figure 9. Pour les gra-

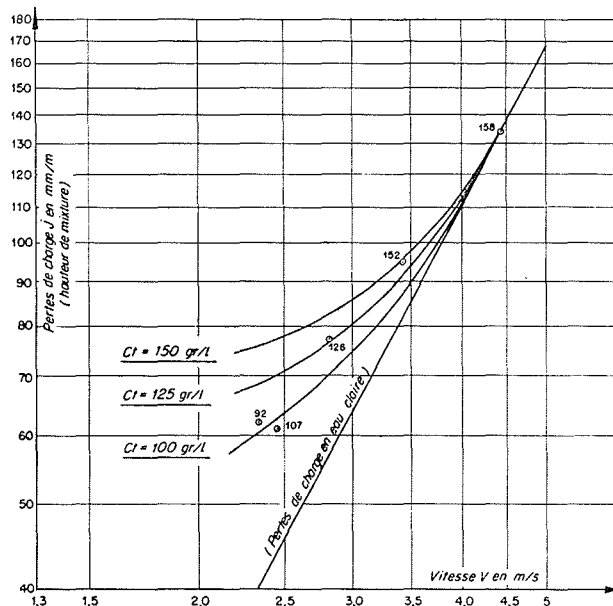


FIG. 9. — Pertes de charge pour du sable de 0,8 mm dans une conduite de 104 mm de diamètre.

viens, nous donnons à titre d'exemple la figure 10 correspondant à un diamètre compris entre 2,3 et 5,25 mm. Pour toutes les catégories de gra-

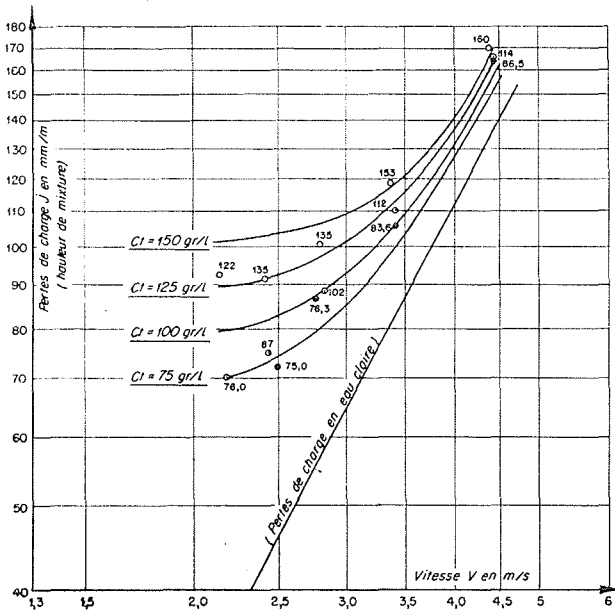


Fig. 10. — Pertes de charge pour des graviers de 2,3 à 5,25 mm dans une conduite de 104 mm de diamètre.

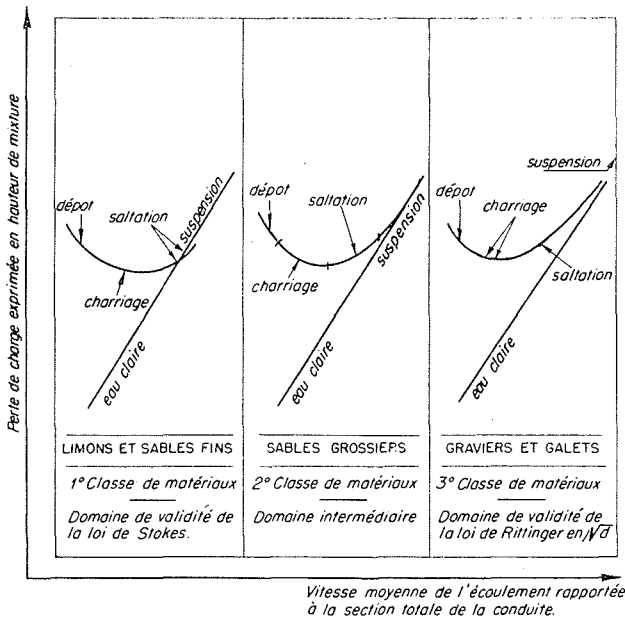


Fig. 11. — Allure des lois de pertes de charge à concentration de transport constante pour les trois classes de matériaux (coordonnées logarithmiques).

viens étudiées, le coefficient de pertes de charge varie avec la concentration, mais semble indépendant du diamètre moyen des grains.

L'allure des courbes de pertes de charge à concentration constante nous a conduits à la comparaison suivante schématisée par la figure 11 :

- En coordonnées logarithmiques pour les limons et sables fins, les courbes à C_T constant se raccordent à la droite d'eau claire en formant avec cette dernière un angle assez net.
- Pour de tels matériaux, le régime de saltation est pratiquement inexistant.
- Pour les sables grossiers, les courbes rejoignent la droite de l'eau claire de façon plus progressive. Dans cette zone de transition entre le charriage et la suspension, la saltation joue déjà un rôle important.
- Pour les graviers et sans doute également pour les galets, les courbes semblent asymptotiques à la droite d'eau claire. Le phénomène de charriage tend à devenir secondaire et transitoire. La saltation est prépondérante et dans la gamme des vitesses réalisées qui sont déjà importantes, la suspension véritable n'apparaît pas encore.

Il est assez normal que les pertes de charge soient plus fortes que pour des sables fins pour une même vitesse moyenne et que cet écart soit indépendant du diamètre des grains à partir d'une certaine limite. En effet, à chaque bond, le gravier dissipe de l'énergie lorsqu'il vient heurter la conduite ou un autre gravier, du fait que le choc n'est pas parfaitement élastique. C'est l'écoulement qui doit lui restituer l'énergie perdue, ce qui se traduit finalement par une majoration des pertes de charge. Les matériaux fins, au contraire, ont une trop faible inertie et un trop grand coefficient de traînée pour pouvoir prendre, par rapport au fluide, des vitesses relativement importantes. Les chocs à la paroi sont donc négligeables pour eux. Pour les graviers, les chocs répétés s'accompagnent d'un polissage parfait de la conduite (parfaitement lisse de NIKURADSE) et d'une usure très rapide de galets, ce qui nous a d'ailleurs gênés dans la conduite des essais. On conçoit que la majoration des pertes de charge peut, en première approximation, n'être fonction que de la nature des chocs et que, de ce fait, les pertes de charge peuvent varier avec la composition minéralogique des déblais et même avec la nature de la conduite. Nous citerons à ce propos l'expérience curieuse suivante :

Des graviers isolés sont introduits dans la conduite vide de matériaux. Quel que soit le diamètre des graviers et la vitesse de l'écoulement (à condition qu'elle puisse entraîner le

grain), la vitesse du grain par rapport à celle de l'eau reste de l'ordre de 0,96 dans la conduite de $\varnothing 104$ mm. Dans une conduite de $\varnothing 250$ mm, qui était restée tapissée intérieurement de suies qui s'étaient tassées et restaient immobiles, pro-légées par le film laminaire, les mêmes graviers avaient une vitesse relative de 0,78, également indépendante de leur diamètre. Ceci montre en outre que nos résultats ne sont plus valables pour de très faibles concentrations et que la vitesse d'entraînement sur fond lisse est différente de celle sur fond rugueux.

Il faut signaler également qu'une bille de verre ou d'acier isolée roule sans sauter sur le fond de la conduite, ce qui prouve qu'il est nécessaire que la forme des grains induise une portance sinon pour entretenir, du moins pour amorcer la saltation.

CONCLUSION

Cette étude, encore bien incomplète, montre cependant que la saltation est un mode de transport essentiel pour les matériaux qui possèdent un coefficient de traînée constant en essai de vitesse de chute. La similitude du transport hydraulique semble alors devoir être celle de FROUDE. Les résultats d'essais qui le prouvent justifient en même temps le classement des matériaux en trois domaines en fonction de la valeur du diamètre des grains. Nous continuons cette étude plus spécialement dans le domaine intermédiaire des sables grossiers à l'occasion de recherches en cours pour les Ponts et Chaussées de Nantes. Nous remercions les Ateliers et Chantiers de Bretagne d'avoir autorisé la communication de ces quelques résultats.

BIBLIOGRAPHIE

- R. A. BAGNOLD. — *The Physics of Blown Sand and Desert Dunes*. Bethuen (Londres).
— *British Journal of Applied Physics*, vol. 2, p. 29-34, février 1951.
- Ch. BLANCHET. — *La Houille Blanche*, n° 2, mars 1946.
- Du BOYS. — *Annales des Ponts et Chaussées* : Le Rhône et les rivières à fond affouillable. 1878.
- Du BUAT. — *Principes d'Hydraulique*. A l'imprimerie de Monsieur, 1786.
- BUDRYCK. — Théorie du Lavage. *Revue de l'Industrie Minière*, 1936.
- R. DURAND. — Transport hydraulique de matériaux solides en conduite. *La Houille Blanche*, n° 3, mai 1951.
- P. DUREPAIRE. — Contribution à l'étude du dragage et du refoulement des déblais à l'état de mixture. — Nouveau type de pompes à déblais « BERGERON-Ponts et Chaussées ». *Annales des Ponts et Chaussées*, 1939.

- M. ESCANDE. — C.R.A.S., 1949, page 613, page 701.
- C. HANOCQ. — *Revue Universelle des Mines*, février 1928.
- G. HALBRONN. — Mesure des concentrations et des vitesses dans un courant mixte d'air et d'eau. *La Houille Blanche*, mai 1951.
- G. W. HOWARD. — ASCE, 1939, volume 104.
- Sir C. INGLIS. — *The Behaviour and Control of Rivers and Canals*. POONA 1949.
- ISBACH. — Extrait des *Annales de l'Institut Hydrotechnique de Recherches Scientifiques en U.R.S.S.*, volume XVII, 1935.
- F. HJULSTROM. — UPSALA, 1935, *Bull. of the Geol. Institut*, volume XXV.
- MEYER-PETER. — *Schweizerische Bauzeitung*, 31 mars 1934.
- M. P. O'BRIEN et R. G. FOLSOM. — *The Transportation of Sand in Pipe Lines*. Université de Californie, 12 novembre 1937.

DISCUSSION

M. le Président remercie M. Robert DURAND et insiste sur les points suivants :

La communication porte sur un certain nombre d'observations et de résultats tirés des essais systématiques actuellement en cours sur les écoulements de mixtures en conduites. Ces essais portent sur des mixtures où tous les facteurs sont appelés à varier, grosseur et nature des grains, densité, concentration, vitesse, diamètre des conduites.

Dans l'exposé qui vient d'être fait il y a lieu d'attirer l'attention sur la notion originale du coefficient α rapport entre la concentration de transport et la concentration spatiale, étudié ensuite en fonction de la vitesse dans la conduite.

Cette représentation met en évidence d'une façon remarquable le comportement physique de chaque écoulement considéré. Permettant de ce fait l'analyse des phénomènes, elle doit faciliter la mise au point des lois de similitudes éventuelles.

M. DURAND vient d'en donner une preuve immédiate en envisageant l'existence probable d'une loi unique de α en fonction de $\frac{\sqrt{d}}{D}$ lorsque les conditions sont telles que les effets de la viscosité deviennent négligeables.

M. le Président félicite M. DURAND de ce premier résultat en espérant qu'il continuera à mettre méthodiquement de la clarté dans ces phénomènes rendus complexes par le grand nombre de variables.

M. SCHLAG signale que les essais de M. GREGORY ont été analysés par M. HANOCQ, professeur à l'Université de Liège, qui les a traduits dans la représentation graphique classique : $\lambda = f(R)$.

(Rappelons que ces essais ont été effectués sur une conduite de 4" de diamètre, avec une eau contenant de 0 à 35 % en poids de matériaux solides très fins, en suspension).

Les conclusions de M. HANOCQ peuvent se résumer comme suit :

On peut distinguer les deux régimes, laminaire et turbulent, mais la valeur du nombre critique du nombre de Reynolds qui les sépare croît avec la teneur de matières en suspension; il semble donc que la présence de particules solides tende à maintenir plus longtemps le régime laminaire.

Pour l'écoulement turbulent, le λ correspond à celui des tuyaux lisses, comme s'il se produisait sur la paroi un mince dépôt de matière transformant la paroi rugueuse en paroi lisse.