

# NOTE SUR LE DÉBIT SOLIDE DES COURS D'EAU

par Georges LABAYE

Ingénieur au Laboratoire National d'Hydraulique

## INTRODUCTION

Les problèmes posés par le débit solide des cours d'eau présentent une importance considérable dans de nombreuses branches de l'art de l'ingénieur.

Ils ont été abordés tout d'abord dans l'étude de la régularisation des rivières et des fleuves en vue de modifier et de stabiliser leur lit, soit pour maintenir un chenal navigable, soit pour protéger les propriétés riveraines contre les crues. La construction des canaux industriels ou agricoles a soulevé la question des vitesses limites d'érosion et du mécanisme des dépôts ou ensablements. La progression des deltas dans la mer et dans les lacs, et plus généralement, les recherches sur le « régime des côtes » se rattachent au même sujet.

Pour l'établissement des projets d'aménagements hydroélectriques, on est amené à étudier de près le débit solide des cours d'eau tant pour lutter contre l'engravement des réservoirs créés par les barrages artificiels et contre les remous solides qui en sont la conséquence, que pour défendre les prises d'eau contre l'entrée des sables et des graviers qui obstruent les ouvrages et usent les aubes des turbines. Les techniques de la clarification des eaux potables, de la décantation des eaux usées, du dépôt des limons fertilisants, certains procédés de classement des minerais ou de « lavage » des charbons, reposent aussi sur quelques unes des lois qui conditionnent le débit solide des cours d'eau.

La question est donc très importante et a fait l'objet de nombreux travaux : études théoriques, recherches expérimentales, observations dans la nature, mesures, évaluations, etc... En 1933, une bibliographie, d'ailleurs incomplète, établie aux Etats-Unis en vue du projet du All American Canal, donnait déjà plus de mille références. Les publications d'articles et d'ouvrages ont continué depuis à une cadence très rapide. Cela ne veut, cependant, pas dire qu'on ait abouti à une ex-

plication pleinement satisfaisante des phénomènes, ni même à des formules sûres.

Le but que s'était assigné la Société Hydrotechnique de France en faisant une étude bibliographique du problème <sup>(1)</sup> était de passer en revue les différents travaux pour dégager les principaux résultats et essayer d'en déduire l'orientation à imposer à des recherches ultérieures pour que celles-ci aient quelque chance de succès. A vraie dire cette étude n'était pas purement bibliographique puisque le Laboratoire de BEAUVERT de la Société Hydrotechnique de France avait étudié en 1942 et 1943, pour le Service d'aménagement de l'Isère, d'une part la mise au point d'un détecteur hydrophonique et d'une nasse à gravier, d'autre part les conditions de début d'entraînement des matériaux de l'Isère.

Le présent article constitue un résumé du travail effectué par la Société Hydrotechnique de France, augmenté de quelques réflexions ou analyses de travaux parus depuis.

Après quelques généralités sur les phénomènes, nous parlerons rapidement des mesures, pour passer ensuite au charriage de fond et terminer par la suspension.

## I. GÉNÉRALITÉS

Les diverses matières solides contenues dans les cours d'eau naturels proviennent en définitive de l'érosion de leur bassin versant sous l'influence des phénomènes météorologiques : pluie, gel, vent, etc... Aussi est-ce les géographes s'intéressant à la physique du globe, qui ont poursuivi les premiers travaux sur le débit solide des rivières. L'estimation **globale** de la valeur de ce dernier, durant une assez longue période, a pu être obtenue assez facilement par la cubature à

(1) Etat actuel de la question du débit solide des cours d'eau. Deux rapports non publiés.

intervalles réguliers des deltas qui se forment à l'embouchure de certaines rivières aboutissant dans un lac. Plus tard, la nécessité de recueillir des données sûres en vue de l'étude des aménagements hydroélectriques a conduit à faire des mesures **directes** de débit solide par échantillonnage sur divers cours d'eau de montagne notamment en Suisse et en Autriche.

Ces mesures directes ont conduit à diviser les matériaux transportés par les cours d'eau en trois catégories :

- 1°) les matières en suspension dans l'eau,
- 2°) les matières roulées sur le fond (charriage),
- 3°) les matières en dissolution.

En fait, la distinction entre ces trois modes de transport est assez vague : il n'y a pas de discontinuité brusque entre le charriage et la suspension ; certains matériaux peuvent être roulés sur le fond dans certaines conditions et transportés en suspension dans d'autres cas. La limite même entre les suspensions colloïdales et les solutions est très mal définie.

Si donc on veut essayer d'analyser le mécanisme d'un des phénomènes ou si l'on se contente de chercher à préciser la valeur de telle ou telle formule, on devra se placer dans le cadre d'hypothèses bien définies, limitant le phénomène et souvent même le domaine d'application des formules.

De toute façon les seuls modes de transport solide que nous étudierons, seront d'une part le charriage de fond, d'autre part la suspension « mécanique », à l'exclusion de tous les phénomènes chimiques, biologiques ou même colloïdaux.

## II. MESURES

### A) Exploitation des données bibliographiques.

Il est bien normal que dans l'abondante littérature technique traitant du débit solide des cours d'eau, on rencontre des chiffres indiquant les quantités de limons, de sable, ou de graviers, transportés par différentes rivières.

L'utilisation de ces données est souvent très délicate : il convient de savoir :

- 1°) Sous quelle forme on évalue les quantités intéressées.
- 2°) Dans quelles conditions ont été faites les mesures.

En effet, si l'on donne les chiffres en  $m^3$ , s'agit-il de matériaux séchés ou sous l'eau ? COLLET distingue trois densités différentes :

- 1°) **La densité réelle de l'alluvion desséchée**, soit le rapport du poids de la matière sèche au volume de l'eau déplacée, densité que nous désignerons par  $d = p/v$ ,
- 2°) **La densité réelle de l'alluvion déposée dans l'eau**, soit le rapport de la somme des poids de la matière solide et de l'eau d'imprégnation au volume total du dépôt, densité que nous désignerons par  $d' = p'/v'$ ,
- 3°) **La densité fictive** dont il faut tenir compte pour les calculs de colmatage, soit le rapport du poids de la matière sèche au volume total du dépôt, densité que nous désignons par  $D = p/v'$ .

Or, les deux dernières peuvent varier dans certains cas avec l'âge du dépôt.

Le débit solide est extrêmement variable, qu'il s'agisse de charriage ou de la suspension. Ces fluctuations, qui tiennent à la nature même des phénomènes, ont une amplitude considérable, surtout pour le charriage. Cependant, dans le cas où un cours d'eau charrie sur ses propres alluvions, le phénomène est, en moyenne, fidèle. L'écoulement étant en permanence saturé en matériaux de fond, à un débit liquide il correspond un charriage moyen donné.

Il n'en est pas de même pour la suspension qui n'atteint presque jamais la saturation. Si bien que suivant la localisation des orages et du ruissellement, à un même débit liquide, il peut correspondre des turbidités très différentes.

La variation instantanée, périodique ou non, et les vagues de troubles, constituent donc une première difficulté dans l'estimation à partir de mesures locales et discontinues des quantités totales charriées. Mais quels sont les moyens dont on dispose pour détecter d'abord, mesurer ensuite le débit solide ?

### B) Appareils de détection.

Si le problème de la détection de la suspension ne se pose guère parce que l'observation directe suffit dans la plupart des cas, il n'en est pas de même en ce qui concerne le charriage. Dans ce dernier cas, il est intéressant d'écouter le bruit causé par les chocs des galets entre eux

pour déterminer le moment où le charriage commence. Ce bruit n'est pas négligeable mais pour l'observer commodément, il faut l'amplifier. Un des premiers à utiliser ce procédé a peut-être été le D<sup>r</sup> MUHLHOFER qui expérimenta en 1931 et 1932 en Autriche un détecteur hydrophonique de son invention composé d'une chambre à l'intérieur de laquelle se trouvait un microphone. Celui-ci était relié à deux écouteurs téléphoniques.

L'immersion et la stabilisation de ce genre d'appareils dans des courants rapides posent des problèmes très délicats qui semblent avoir été résolus ici par un gouvernail de profondeur assez important, par un long empennage formant gouvernail de direction et par un câble de retenue distinct du câble de suspension.

Au moyen de son détecteur le D<sup>r</sup> MUHLHOFER a pu constater que sur l'Inn à Kirchbichl, le charriage sur le fond se poursuit avec une intensité variable mais sans interruption durant toute l'année ; il intéresse une fraction de la largeur du lit de la rivière d'autant plus faible que le débit est plus petit. Cette largeur active est de 10 à 14 m. seulement par une largeur au plan d'eau de 50 mètres lorsque le débit solide total  $G$  est de 0,5 à 1 kg./s. ; elle passe à 70 m. environ pour  $G = 430$  kg./s., la largeur au plan d'eau étant alors de 90 mètres. Ce résultat intéressant n'a pu être établi que grâce au grand nombre d'observations rendues possibles par le maniement facile du détecteur.

Plus tard, en 1942, le Service d'Aménagement de l'Isère a réalisé un détecteur hydrophonique qui fut ensuite étudié et mis au point au Laboratoire de Beauvert. Les modifications apportées au cours de cette étude ont permis d'aboutir à un appareil comportant toujours un boîtier muni d'une membrane vibrante en communication avec un microphone, mais la plaque réceptrice est séparée du boîtier afin de remédier à l'enfoncement de l'appareil dans les alluvions, principal inconvénient du modèle initial.

La plaque réceptrice est formée par une tôle de 4 mm. d'épaisseur de forme triangulaire qui supporte le boîtier par l'intermédiaire de trois tringles en fer rond. Nos essais ont montré que pour une distance verticale de 160 mm. entre la plaque ci-dessus et la face inférieure du boîtier, l'appareil n'introduit aucune perturbation notable dans les trajectoires des matériaux charriés. Les vibrations de la plaque réceptrice sous l'action du cheminement des graviers sont

transmises à la membrane vibrante par une lame d'acier à ressort boulonnée sur l'arête antérieure de la plaque ci-dessus et s'appuyant par un téton à tête arrondie sur le centre de la membrane vibrante (fig. 1).

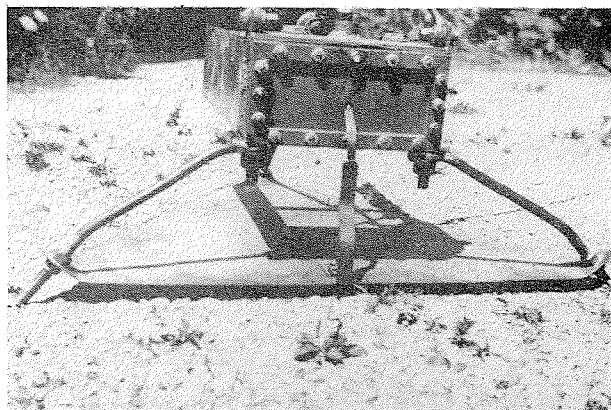


Fig. 1

La stabilité de l'appareil dans le courant et les efforts dans les câbles de suspension et de retenue ont été étudiés sur modèle jusqu'à des vitesses de 4 m./sec.

L'appareil ainsi modifié a été utilisé avec succès par le Service d'Aménagement de l'Isère.

Il semble enfin qu'on n'ait pas tiré tout le parti nécessaire des méthodes optiques. Il doit, en effet, être possible de photographier ou cinématographier le fond de certaines rivières, sous réserve que la turbidité ne soit pas trop grande. Une difficulté supplémentaire surgira cependant, du fait que le dispositif ne doit pas modifier le courant au point de provoquer l'entraînement par sa seule présence.

### C) **Mesure globale du débit solide.**

On peut mesurer dans certains cas les quantités totales de matériaux transportés, non seulement par charriage, mais aussi en suspension, pendant une ou plusieurs années, par un cours d'eau, en effectuant au début et à la fin de la période considérée un levé topographique du delta formé par ce cours d'eau dans un lac ou dans la mer. On a pu observer également le processus d'engrèvement de certaines retenues.

On a pu ainsi étudier l'accroissement du Delta du Rhin dans le lac de Constance, qui correspond à un débit solide de l'ordre de 450 m<sup>3</sup> par km<sup>2</sup> de bassin versant et par an.

L'engravement de la retenue du Motty sur le Drac a permis d'évaluer le débit solide de celui-ci à 310 m<sup>3</sup> par km<sup>2</sup> de bassin versant et par an.

**D) Mesure du débit solide roulé sur le fond.**

La mesure du débit solide charrié sur le fond est réalisée au moyen d'appareils dits **nasses à graviers**. Ils sont constitués (voir fig. 2 à 6) par une caisse prismatique à parois grillagées dont la face antérieure dirigée vers l'amont reste seule ouverte. La nasse est posée sur le fond du lit et les matériaux roulant sur le fond sur la largeur de la nasse sont arrêtés et captés dans la caisse. On détermine le poids P des matériaux ainsi recueillis durant un temps t ; on admet que le débit moyen charrié dans l'emprise de la nasse est  $Q = P/t$ .

Ceci suppose que la nasse n'apporte aucune perturbation à l'écoulement de l'eau et des graviers quel que soit son état de remplissage. En fait, cette perturbation est loin d'être négligeable et on est amené à étalonner l'appareil en déterminant au Laboratoire, sur modèle réduit, son « coefficient d'efficacité » défini comme le rapport de la quantité de matériaux captés à celle qui serait normalement passée dans la section d'entrée de la nasse en l'absence de cette dernière. Malgré les sérieuses études consacrées à cette question, le choix du coefficient d'efficacité introduit toujours une certaine incertitude dans les mesures.

Le maintien de la stabilité et de la bonne adhérence de la nasse sur le fond est aussi un problème délicat à résoudre dans certaines circonstances. Enfin, une grande difficulté de ce genre de mesures réside dans les énormes fluctuations dans le temps et dans l'espace du débit charrié. Des variations dans la proportion de 1 à 20 ne sont pas rares de sorte que pour déterminer le charriage moyen dans une section de cours d'eau, il faudrait poursuivre le captage des graviers pendant une cinquantaine d'heures.

On conçoit que peu d'expérimentateurs ont pu donner à leurs essais une telle ampleur et la précision des résultats obtenus doit s'en ressentir. Il est vrai que le jeu des moyennes peut améliorer quelque peu la situation.

Dès 1908 SCHAFFERNAK utilisait une nasse fixée à une perche verticale qu'on manœuvrait d'un bateau.

GONTSCHAROV a employé sur les cours d'eau de Russie un appareil original qui semble

ne pouvoir donner de bons résultats que sur des lits de sable fin. Il se compose d'une caisse en tôle non perforée qui s'enfonce plus ou moins dans le sable. L'ouverture de captage des matériaux n'a que 0,10 m. x 0,10 m ; les matériaux se rassemblent dans la chambre arrière de la nasse qui est surmontée d'une ouverture laissant un libre écoulement à l'eau ; derrière cette ouverture est placé un bathomètre de GLOUSCHKOV qui mesure simultanément la teneur en matières solides en suspension et la vitesse de l'eau au voisinage du fond (fig. 2). Plus que toute autre, cette nasse exige un bon étalonnage.

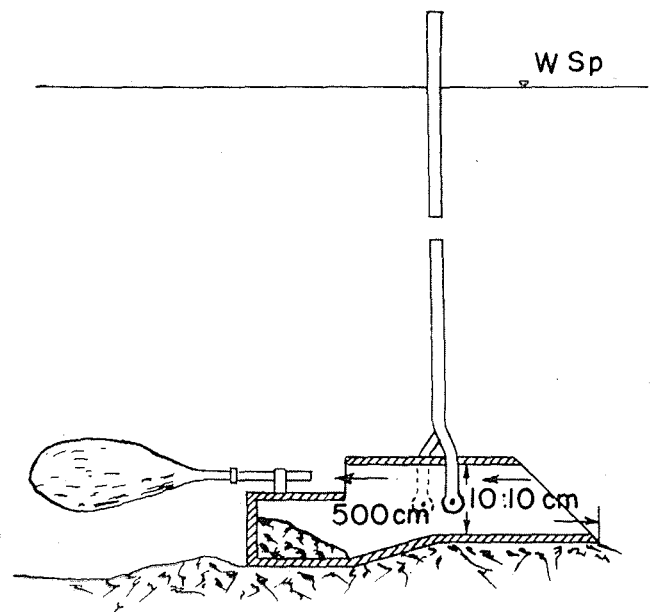


Fig. 2

En 1930 MUHLHOFER expérimenta une nasse nettement supérieure aux précédentes. Elle était munie de stabilisateurs et d'un gouvernail (fig. 3). Elle était suspendue à un câble. Ses dimensions étaient les suivantes :

Largeur .....	0.25 m.
Longueur .....	0.45 m.
Hauteur .....	0.135 m.

MUHLHOFER, le premier, a essayé de déterminer le « coefficient d'efficacité » de la nasse, coefficient implicitement admis égal à l'unité par ses prédécesseurs. Par des considérations théoriques et des observations faites sur les cours d'eau, il est arrivé aux conclusions suivantes :

- 1°) Le coefficient d'efficacité diminue progressivement en fonction du degré de remplissage de la nasse ;

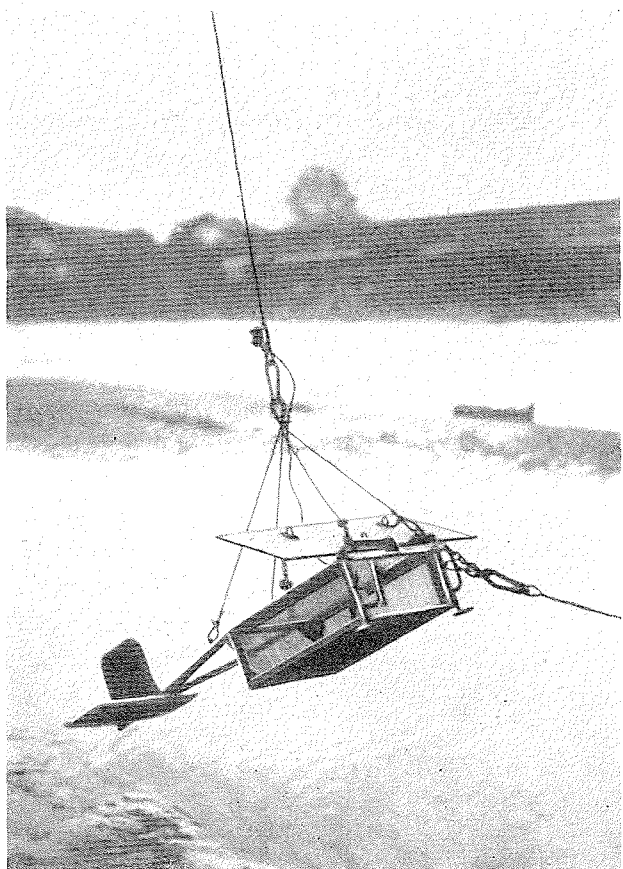


Fig. 3

2°) La valeur moyenne du coefficient d'efficacité est assez voisine de l'unité.

EHRENBERGER a utilisé sur le Danube, à Vienne, une nasse sensiblement plus grande :

Longueur .....	1,00 m.
Largeur .....	0,50 m.
Hauteur .....	0,25 m.

dont il a déterminé le « coefficient d'efficacité » par des essais en Laboratoire sur des modèles au 1/5<sup>e</sup> et 1/9<sup>e</sup> (fig. 4). Ses conditions expérimentales, très défectueuses, l'ont conduit à des conclusions très voisines de celles de MUHLÖFER.

Au cours de ces dernières années, des études très poussées ont été poursuivies par le Laboratoire de l'École Polytechnique de Zurich sur les nasses utilisées sur le Rhin. Celles-ci, assez semblables à celle de EHRENBERGER, en différaient cependant par le fait que le gouvernail de profondeur était remplacé par un lestage. La suspension prévue initialement par câble a été ensuite remplacée par une suspension par tube rigide fixé à la nasse au moyen d'une arti-

culatation. Les essais dans la nature avaient en effet montré que l'élasticité des câbles entraînait un effet de dragage qui faussait les résultats. Pour assurer un bon contact de la semelle de la nasse sur le lit du fleuve et vérifier en même temps ce contact, on enduisait de suif la barre inférieure de l'ouverture amont de la nasse.

La hauteur et la longueur optima de la nasse ont fait également l'objet d'essais poussés. Elles ont été respectivement fixées à 0,25 m. et 1 m. La largeur a été prise égale à 0,50 m.

La nasse a été ensuite étalonnée sur trois modèles réduits au 1/2,5, 1/5 et 1/10 (fig. 5).

Les résultats de ces étalonnages, qui ont porté sur une durée de plus d'un an, sont les suivants :

- 1°) Le coefficient d'efficacité **moyen** à appliquer à la nasse du Rhin ressort à :
- $$\eta = 45 \text{ pour } 100.$$

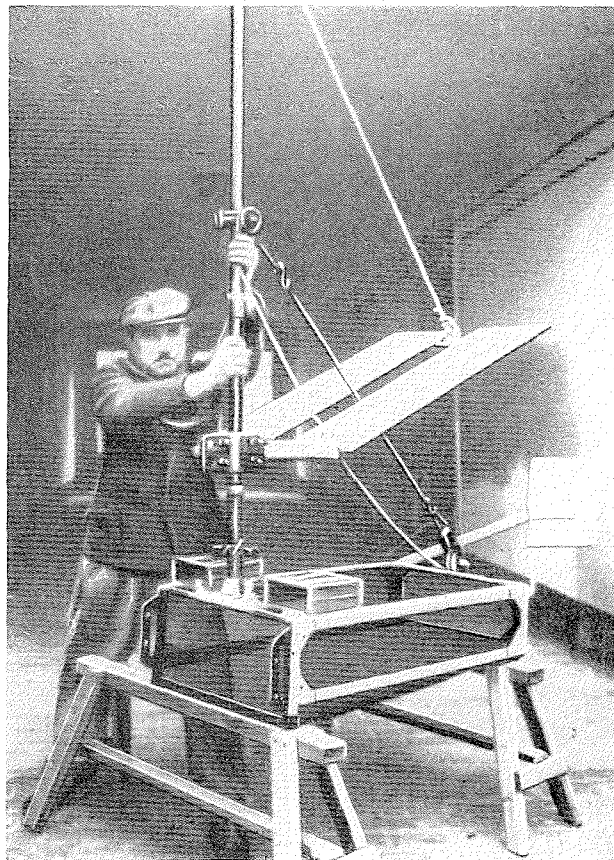


Fig. 4

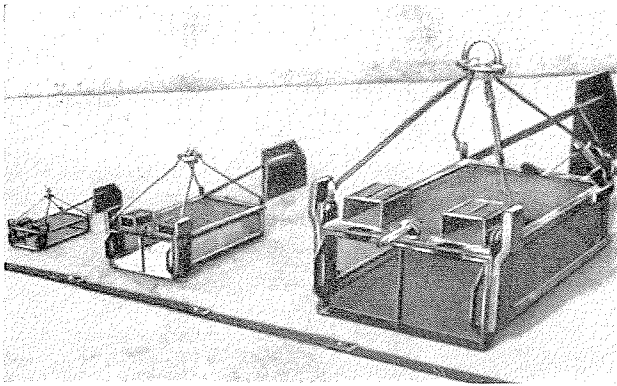


Fig. 5

- 2°) Le coefficient d'efficacité est indépendant du degré de remplissage de la nasse **jusqu'à une certaine limite** qui a été trouvée égale à :
- $$r = 33 \text{ pour } 100$$
- de la contenance totale de celle-ci et qu'il ne faudra pas dépasser sur le Rhin.
- 3°) Le degré d'efficacité n'est pas le même pour les grains de diamètres différents compris dans le mélange. Pour les forts débits solides, on capte davantage de grains fins que de gros. L'inverse se produit pour les faibles débits solides.

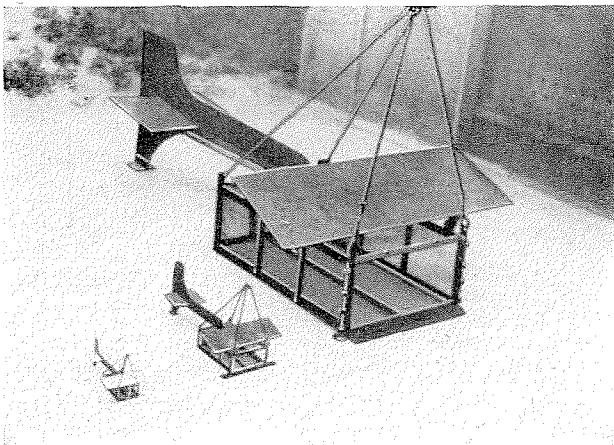


Fig. 6

En 1942 le Service d'Aménagement de l'Isère a demandé au Laboratoire de Beauvert de mettre au point un modèle de nasse. A la suite des essais, le modèle adopté (fig. 6) comprenait :

- Une corbeille réceptrice composée d'un cadre métallique tapissé sur 5 faces d'un grillage en fil de 0,7 mm. de diamètre formant des mailles carrées de 3,5 mm. de côté (section libre).  
Les dimensions de cette corbeille sont les suivantes :

Longueur	.....	0,75 m.
Largeur	.....	0,50 m.
Hauteur	.....	0,25 m.

- Un gouvernail de direction porté par un empennage axial assez surélevé par rapport au corps de la nasse ;
- Un gouvernail de profondeur à incidence réglable ;
- Deux empattements latéraux débordant de part et d'autre de l'arête inférieure de l'entrée de la nasse et dont le rôle sera expliqué plus loin ;
- Un système de suspension constitué par 4 tringles métalliques concourant au crapaud d'amarrage du câble de manœuvre.

L'ensemble différait assez peu de la nasse de MUHLHOFER.

Les empattements sont destinés à lutter contre les affouillements que produiraient de part et d'autre de la nasse les filets liquides partiellement déviés par la nasse.

Le gouvernail de profondeur qui avait été supprimé dans la nasse du Rhin a été conservé ici ; il allège en effet considérablement l'appareil. Toutefois, l'emploi de lestage doit vraisemblablement assurer une meilleure stabilité dans les régions fortement tourbillonnaires, au voisinage de piles de pont par exemple. De toute façon, çà n'est pas là un endroit indiqué pour des mesures de débit solide.

L'étalonnage de la nasse a été effectué sur deux modèles au 1/4 et 1/8, sur un fond de graviers. Les deux modèles étaient essayés simultanément dans le même canal.

La dispersion des résultats était du même ordre de grandeur que lors des essais faits à Zurich. Les conclusions ont été les suivantes :

- 1°) Le coefficient d'efficacité de la nasse est de l'ordre de 50 à 55 pour 100, soit en moyenne :
- $$\eta = 52,5 \text{ pour } 100.$$

Ce chiffre est supérieur à celui obtenu à Zurich (45 pour 100). Nous attribuons la différence à la présence du gouvernail de profondeur et, peut-être, aux empattements latéraux ;

- 2°) Le coefficient d'efficacité des deux nasses, au 1/4 et au 1/8, a été pratiquement le même, malgré la grande différence de leurs degrés de remplissage respectifs. Ceci confirme le résultat trouvé au Laboratoire de Zurich, selon lequel le coefficient d'efficacité est indépendant du degré de remplissage, jusqu'à une certaine limite, qui est de l'ordre de 35 pour 100 (soit 50 à 60 kg. pour la nasse S.A.I. — S.H.F.).

Les différents résultats que nous venons de voir ne sont guère encourageants. Les difficultés d'emploi des nasses, l'obligation d'effectuer des mesures nombreuses par suite des fluctuations du débit solide, la nécessité d'un étalonnage, font que leur utilisation entraîne des opérations longues et coûteuses pour des mesures dont la précision est médiocre. Il n'existe cependant guère d'autre méthode pour mesurer le charriage et si l'on a envisagé et même réalisé dans certains cas la construction d'une souille barrant un cours d'eau et nettoyée mécaniquement, c'est là une solution qu'il est difficile de concevoir pour une rivière importante.

#### E) Mesure du débit solide en suspension.

Le dosage des matériaux en suspension dans les eaux d'une rivière paraît relativement facile et a été tenté, dès 1859 sur la Durance à Mérindol (B.V. : 12.000, km<sup>2</sup>), par Hervé MANGON. Les méthodes ont été depuis perfectionnées notamment par les Services hydrologiques suisses et italiens puis par les américains.

De minutieuses précautions doivent être prises et un grand nombre de prélèvements effectués sous peine de commettre des erreurs très importantes. Cela tient essentiellement à la forte variation de la turbidité de l'eau suivant les fluctuations du débit, les conditions météorologiques, etc... Dans une même section, la teneur en limons varie fortement d'une région à une autre de sorte qu'il est nécessaire de mesurer les débits solides élémentaires en de nombreux points et d'en effectuer la sommation par une méthode analogue à celle utilisée pour le calcul des jaugeages au moulinet par exemple. Le fait qu'il existe généralement au voisinage du fond une zone à faible vitesse, fortement chargée de sables, interdit le procédé simple consistant à déterminer le débit solide total d'après la

moyenne arithmétique des teneurs en sable observées et le débit liquide global,

Voici d'après un mémoire de A. MELLI le mode opératoire à suivre pour obtenir des résultats suffisamment précis :

- 1°) Etudier au préalable le régime hydrométrique du cours d'eau en vue de déterminer le moment le plus favorable pour le prélèvement des échantillons ;
- 2°) Ces prélèvements seront plus ou moins fréquents suivant l'état des eaux. Durant la montée d'une crue, il peut être nécessaire de les effectuer à intervalles très rapprochés tandis qu'en basses eaux, un prélèvement journalier sera plus que suffisant ;
- 3°) Déterminer pour différents états des eaux le rapport entre la valeur du débit solide total en suspension déduit de l'analyse de nombreux échantillons d'eau prélevés en des points répartis sur toute la section et celle que l'on calculerait d'après un ou deux échantillons prélevés près de la surface ou en quelqu'autre point caractéristique de la section. Les prélèvements journaliers doivent, en effet, se borner à ces quelques points pour ne pas entraîner des frais exagérés ;
- 4°) Le prélèvement des échantillons d'eau en un point déterminé de la section doit être exécuté au moyen d'un appareil perturbant le moins possible le régime préexistant en ce point et susceptible de capter **instantanément** un certain volume d'eau (1 à 2 litres).
- 5°) Un échantillon d'un litre d'eau sera filtré sur un « filtre à précipité » (genre BERZELIUS). La détermination de la turbidité de l'eau (en poids de matériaux secs), sera faite à partir de la différence entre le poids de ce filtre après et avant cette opération. Avant et après celle-ci, le filtre sera soigneusement desséché dans une étuve entre 100 et 105° C. ; pour les pesées, eu égard aux turbidités habituelles, on recommande l'emploi d'une balance sensible au 1/10 de milligramme. Si les mesures ont pour objet le calcul du volume de matériaux susceptible d'être déposé par l'eau, il faudra en outre déterminer la densité apparente de l'alluvion déposée.

Ces quelques indications, très judicieuses pour la plupart, montrent la difficulté de telles études.

Il convient de plus de remarquer que, tout comme le débit roulé, la turbidité est soumise à des fluctuations d'amplitude relative peut-être moins importantes que dans le cas du charriage, mais non négligeables. Le fait d'opérer une prise instantanée n'est peut-être pas tellement souhaitable. Il vaut certainement mieux effectuer un prélèvement relativement long donnant la moyenne de la concentration au point étudié.

Nous allons passer rapidement en revue les appareils spécialement conçus pour les prélèvements d'eau turbide.

1°) **Bathomètre de GLOUSCHKOV.**

Nous dirons quelques mots de ce curieux appareil qui date du début du siècle et qui présente la particularité de donner simultanément pour un point donné du courant la vitesse moyenne de l'eau et sa teneur moyenne en matériaux en suspension.

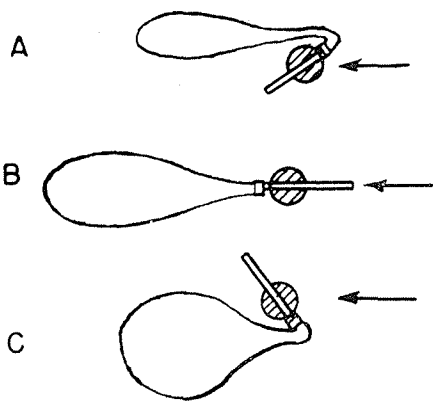


Fig. 7

La vessie de Glouschkov et ses différentes positions au cours du prélèvement

- A. Vessie en caoutchouc au bout d'une perche et fermée. La flèche indique le sens du courant et la zone hachurée, le bloc de fixation de la perche.
- B. Vessie après rotation, ouverte dans le sens du courant.
- C. Rotation après remplissage et remontée.

La fig. n° 7 représente le schéma de l'appareil qui est fort simple. Il se compose d'un tube en métal inoxydable de 4 à 6 mm. de diamètre et d'une vingtaine de centimètres de long ligaturé sur l'embouchure d'un ballon en caoutchouc souple (vessie de ballon de foot-ball par exemple). Cet ensemble est monté sur une perche métallique profilée et disposé de manière que le tube du bathomètre soit perpendiculaire à l'axe de celle-ci. Pour faire une mesure, on opère de

la façon suivante. Avant de plonger le bathomètre dans le courant, on s'assure que la vessie est bien « aplatie » de façon à ce qu'elle ne contienne ni eau ni air en quantité appréciable. L'appareil est amené au point de mesure en l'orientant comme l'indique le premier croquis de la fig. n° 6 afin que l'eau ne puisse pas pénétrer dans la vessie. Pour faire la mesure, on fait pivoter rapidement la perche de façon que l'orifice du tube du bathomètre se trouve face au courant et on déclenche en même temps un compte-secondes. On maintient l'appareil dans cette position pendant un certain temps t au bout duquel on fait tourner à nouveau la perche pour la replacer dans sa position initiale de façon à interrompre l'entrée de l'eau dans la vessie. On retire alors l'appareil de l'eau et on mesure par pesée au moyen d'une éprouvette graduée le volume d'eau A recueilli dans la vessie. Le débit moyen :

$$q = \frac{A}{t}$$

est relié à la vitesse moyenne de l'eau au droit du tube du bathomètre par une **courbe d'étalonnage** établie par comparaison avec un autre instrument hydrométrique (moulinet, pitot) ou par traînage en eau calme.

La quantité d'eau recueillie A n'est proportionnelle à t que si l'on ne dépasse pas un certain degré de remplissage (la moitié environ de la capacité en eau de la vessie). Nous avons eu l'occasion de construire et d'étalonner il y a quelques années dans notre Laboratoire de Beauvert un tel appareil. Moyennant un certain tour de main, il peut donner la vitesse de l'eau à 5 pour 100 près.

2°) **Sonde de COLLET.**

Au cours de ses nombreuses recherches sur le débit solide en suspension, le Professeur COLLET a mis au point un type de sonde qui a été utilisé dans divers pays.

La fig. 8 représente l'ensemble de l'appareil. Il se compose d'un corps cylindrique à axe horizontal dont les bases obliques peuvent être fermées par deux opercules munis d'une garniture d'étanchéité en caoutchouc et maintenus sur leur siège par deux forts ressorts. Ces opercules peuvent être ouverts par un système de commande par câble bien visible sur notre photographie.

Pour prélever un échantillon, l'instrument est fixé à l'extrémité inférieure d'une perche

profilée et immergé dans le courant, opercules ouverts, de façon à ce que l'axe du corps cylindrique se trouve suivant la direction moyenne des filets liquides.

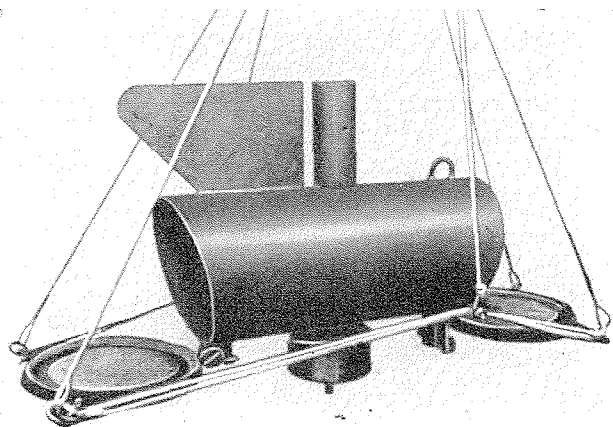


Fig. 8

Lorsque l'appareil est arrivé au point où doit se faire le prélèvement, l'opérateur manœuvre un dé clic qui provoque la fermeture simultanée et très rapide des 2 opercules ce qui assure le captage d'un volume d'eau d'environ 9,6 litres. Cette eau est soigneusement recueillie et la détermination de sa teneur en matières solides est effectuée comme il a été dit plus haut.

La sonde COLLET semble donner de bons résultats. On peut lui reprocher de ne pas se prêter facilement à une suspension sur câble qui permettrait de l'utiliser aux grandes profondeurs et aux fortes vitesses. Elle a été adoptée par le Service hydrologique italien qui en utilise deux modèles : l'un dont la capacité est légèrement supérieure à un litre et l'autre de contenance double. Elle a remplacé les bouteilles cylindrocôniques de 2 litres employées précédemment par ce service.

### 3°) Appareil à prélèvement continu par aspiration.

GLANGAUD a employé sur la Gironde une méthode qui lui permettait d'obtenir non une valeur instantanée mais une valeur moyenne de la turbidité en un point, en effectuant les prélèvements au moyen d'un tube de prise relié à une pompe dont il réglait le débit de façon que la vitesse à l'entrée du tube soit sensiblement égale à la vitesse du courant. La quantité

d'eau prélevée à chaque opération était de 200 litres environ.

Malgré cela, les valeurs trouvées en un même point variaient dans des limites relativement importantes ainsi que le montre la fig. n° 9.

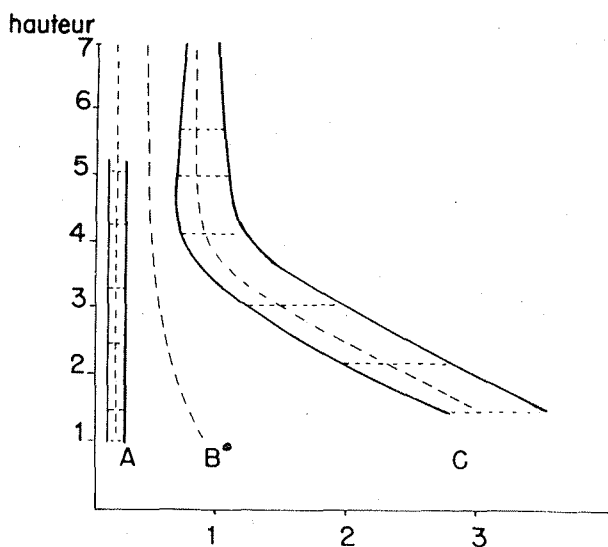


Fig. 9

### Variation verticale de la turbidité instantanée et moyenne dans l'estuaire de la Gironde (d'après L. Clangeaud).

Les lignes en tirets représentent la variation de turbidité moyenne en fonction de la profondeur. Les lignes en traits pleins, représentent les limites minima et maxima de la turbidité instantanée dans les mêmes observations. En ordonnées, les profondeurs en mètres ; en abscisses, turbidité en grammes par litres.

Mesures effectuées dans la Gironde, en face des ateliers du port autonome, au km. 2.850, à 50 m. de la rive gauche : A : 2 mai 1938, en basse mer, coeff. 94 ; B : 16 mai 1938, en basse mer, coeff. 78 ; C : 2 mai 1938, jusant 2 heures après pleine mer, coeff. 101.

En Angleterre, la Key Engineering Co a construit un appareil analogue, monté, ainsi que les appareils d'analyse des prélèvements, sur un camion. Ceci permet d'effectuer commodément les mesures sur le terrain.

### 4°) Turbidisonde.

Récemment, ont été mis au point, d'une part en Amérique, d'autre part en France, un certain nombre d'appareils sensiblement identiques appelés turbidisonde.

Ces appareils se composent d'un corps pisciforme, stabilisé dans le courant par leur forme elle-même et des ailerons. L'orifice de prise placé à l'extrémité amont du corps admet l'eau avec une vitesse qui est réglée automatiquement à une valeur égale à celle du courant.

Les turbidisondes américaines sont de deux types : l'un prélevant uniquement à un emplacement donné, l'autre permettant d'intégrer la

concentration le long d'une verticale en descendant l'appareil à une certaine vitesse déterminée à l'avance.

### 5°) Méthodes optiques.

On a cherché également à mesurer la concentration de l'eau en matières solides par des méthodes optiques. La sensibilité de la cellule photoélectrique semblait pouvoir permettre une bonne précision. Mais celle-ci est illusoire dans la pratique. Les études de RICHARDSON ont en effet, montré que la diminution du flux lumineux était proportionnelle à  $\sum n d^2$ ,  $n$  étant la concentration en nombre de particules par unité de volume,  $d$  le diamètre des particules ; loi valable de  $12 \mu$  à  $2 \text{ mm}$ .  $\sum n d^2$  représente d'ailleurs, à un facteur près, la surface opposée à la marche des rayons par l'ensemble des particules situées dans le faisceau lumineux. Si les matériaux en suspension ont sensiblement la même grosseur, on peut attendre de bons résultats des mesures. Il n'en est pas de même si on a affaire à un matériel dispersé et les résultats seront purement qualitatifs.

Cette méthode, utilisable dans certains cas au Laboratoire, ne peut suffire seule dans la nature.

### 6°) Analyse des échantillons.

Il est indispensable de connaître, pour chaque échantillon, non seulement la concentration en poids de matériaux solides par unité de volume d'eau, mais également la granulométrie. Cette opération n'est pas particulière à l'étude de la suspension.

Le tamisage à sec des limons filtrés et séchés ne permet guère de descendre au-dessous de  $50 \mu$ . L'analyse par centrifugation est, dans certains cas, insuffisante. Il en est de même avec les elutriateurs où l'eau chargée circule de bas en haut dans une série de tubes verticaux de diamètre croissant.

La détermination de la granulométrie d'un trouble par l'étude au moyen d'une cellule photoélectrique de la décantation dans une cuve vitrée exige un étalonnage préalable délicat et variant peut-être avec la nature des matériaux.

Enfin, l'étude au microscope permet de déterminer très exactement les dimensions des particules (on a même utilisé le microscope électronique pour photographier des grains de kaolin),

mais ne donne pas une grande précision sur les poids des diverses catégories de matériaux.

## III CHARRIAGE

### A) Observation des phénomènes.

Avant de chercher à déterminer les lois quantitatives du charriage, il est nécessaire d'observer très attentivement le mouvement d'un grain isolé ainsi que le mouvement d'ensemble du lit.

#### 1°) Mouvement d'un grain isolé.

Le mouvement d'un grain isolé peut se faire de 3 façons différentes : par glissement, roulement ou bond. Pour ce dernier mode de transport on emploie souvent le terme de saltation.

Un grain se déplacera d'une manière ou d'une autre suivant sa forme et les conditions dans lesquelles il se trouvera placé.

Il est très rare qu'un gravier glisse sur le fond d'un chenal, sauf s'il s'agit d'un grain reposant par une face assez plate sur un fond lisse inaffouillable et pour des vitesses de l'eau relativement faibles. Sur un fond composé de grains analogues à celui dont on suit le déplacement, on observera le plus souvent un roulement, mais pour un caillou de dimensions données, la vitesse de l'eau nécessaire à sa mise en route sera plus ou moins grande suivant que ce grain doit ou non escalader un bloc de même dimension que lui pour démarrer. C'est ainsi qu'il peut arriver qu'un gros gravier roule sur un fond de sable uniforme qui restera immobile. Si l'on étudie le mouvement d'un mélange à granulométrie assez continue, on remarquera que les gros éléments roulent alors que les fins se déplacent par bonds d'amplitude plus ou moins grande. Il peut arriver enfin, toujours dans le cas des mélanges, que certains blocs assez gros ne soient mis en mouvement qu'après déplacement, par les tourbillons qu'il engendre, des éléments fins qui le calaient à l'aval.

Un mode très important de transport qu'on rencontre dès que la vitesse de l'eau atteint une valeur suffisante (variable évidemment suivant la grosseur des matériaux de fond) est la saltation dont le domaine va du sautellement de bloc en bloc à la suspension — sans qu'on puisse en définir les limites avec précision — Afin de suivre facilement les grains dans leur course, GILBERT les observait par un trou carré ménagé

dans un écran qui se déplaçait avec une vitesse réglable devant la paroi vitrée de son canal. Il a remarqué que :

- 1°) La vitesse longitudinale des grains croît assez rapidement quand on s'élève au-dessus du fond ;
- 2°) Le gradient de vitesse (des grains) est d'autant plus petit que la hauteur au-dessus du fond est plus grande ;

Mais ceci est une conséquence de l'allure de la courbe de répartition des vitesses de l'eau au voisinage du fond.

Plus intéressante est l'observation que les bonds semblent dus à une impulsion initiale plutôt qu'à une action sustentatrice continue due par exemple à la courbure des lignes de courant autour du grain.

KOECHLIN d'ailleurs explique la saltation par la déviation brusque vers le haut d'une veine liquide rencontrant un obstacle.

A notre avis, il ne semble pas qu'une action sustentatrice telle que l'envisage JEFFREYS entraîne la saltation, mais, au contraire, une impulsion paraît nécessaire pour provoquer le bond d'un grain. Toutefois, il ne semble pas que l'hypothèse de KOECHLIN, non plus que celle de GILBERT qui en diffère peu (il envisage le départ d'un grain par dessus un obstacle) soit exclusive. Il est vraisemblable que la vitesse verticale initiale puisse être communiquée au grain par un tourbillon local auquel ce grain parvient à échapper, ce tourbillon à axe horizontal pouvant être causé soit par un bloc, soit par la face aval d'une dune.

## 2°) **Mouvement d'ensemble des matériaux constituant le lit affouillable.**

Le mouvement d'ensemble des matériaux passe par diverses phases quand la vitesse croît.

Du BUAT avait déjà noté l'apparition de dunes pour certaines valeurs de la vitesse. Plus tard DARWIN, FOREL, OWENS, GILBERT, HJULSTROM, etc... ont précisé ces observations. Le résultat de ces études peut se résumer de la façon suivante.

Quand on fait passer sur un fond formé par un matériau donné un courant d'eau dont on fait croître progressivement la vitesse, on observe les phases successives suivantes du transport :

a) Au-dessous d'une certaine vitesse limite  $V_0$  aucun grain n'est mis en mouvement ;

b) Si la vitesse croît et dépasse la valeur  $V_0$ , quelques grains isolés commencent à rouler, puis peu à peu, toute une couche superficielle se met en mouvement mais le fond reste lisse ;

c) Le déplacement par bonds ou saltation commence puis, pour une vitesse critique  $V_1$ , apparaissent les premières dunes (ou ripples marks) se déplaçant vers l'aval. Leur arête supérieure est transversale, mais n'est pas toujours rectiligne ni continue sur toute la largeur du canal d'essai. Les crêtes des dunes peuvent affecter l'allure de croissants disposés en quinconce. La pente de la face amont de la dune est plus douce que celle de la face aval, laquelle est presque verticale dans certains cas <sup>(1)</sup>. Dans le creux d'une dune, les grains se meuvent dans le sens rétrograde, entraînés par le tourbillon que la dune engendre ;

d) Les rides disparaissent, les matériaux plus ou moins mélangés d'eau se déplacent sur le fond en une couche uniforme. Ce phénomène apparaît à partir d'une certaine valeur  $V_2$  de la vitesse ;

e) Si la vitesse atteint une valeur  $V_3$  on voit réapparaître des dunes, mais celles-ci progressent maintenant en sens inverse du courant, par érosion de la face aval et apport de matériaux sur la face amont (antidunes). Pour les très grandes vitesses de l'eau et les petites profondeurs peuvent apparaître des sillons longitudinaux qui caractérisent l'érosion par ruissellement.

Les modes de transport d et e sont rares.

On a cherché à définir les caractéristiques de l'écoulement correspondant aux divers changements de phase. GILBERT donne pour  $V_2$  et  $V_3$  des formules en fonction du tirant d'eau  $H$ . MAC DOUGALL et ROUSE estiment que l'on passe de l'érosion par dunes à l'érosion par antidunes pour une vitesse voisine de la valeur critique, ce qui correspond à une formule  $V = \sqrt{gH}$  dont la courbe représentative se situe entre les courbes.

$$H = 0,0016 V_2^{2,3}$$

$$\text{et } H = 0,0040 V_3^{3,3}$$

données par GILBERT où  $H$  est en pieds

et  $V$  en pied/seconde.

Les différents stades de l'entraînement ne sont d'ailleurs pas nettement distincts les uns

(1) Dans les phénomènes de transport de neige ou de sable par le vent, on a souvent des dunes présentant un surplomb à l'aval.

des autres et leurs limites sont difficiles à observer avec précision. La granulométrie du matériau de fond intervient également dans la formation des dunes. KRAMER indique, d'accord avec KREY, que l'adjonction d'éléments fins à un matériau relativement grossier, facilite la formation des dunes.

Divers auteurs, AHLMANN, De CANDOLLE, CORNISCH, EXNER, TAYLOR, etc... ont échaudé diverses théories pour expliquer la formation des dunes, faisant intervenir soit la turbulence, soit les phénomènes qui se produisent à la surface de séparation de deux fluides (eau et mélange de sable et d'eau) en mouvement l'un par rapport à l'autre, soit des mouvements analogues à la houle. Mais, aucune théorie n'a pu s'imposer définitivement et il semble qu'il y ait là un champ d'expériences très intéressant.

**B) Paramètres.**

Le charriage est un phénomène très complexe et le nombre de paramètres qui interviennent est considérable. Ceux-ci intéressent soit l'écoulement, soit le matériau de fond lui-même ; ce sont :

**Pour l'écoulement :**

- 1°) La pente qui peut être :
  - soit la pente du fond .....  $i$
  - soit la pente superficielle .....  $I$
  - soit la pente de la ligne d'énergie...  $I_0$
- 2°) Le tirant d'eau .....  $H$
- 3°) La vitesse qui peut être :
  - soit la vitesse moyenne .....  $U$
  - soit la vitesse au fond .....  $U_f$
- 4°) Le débit .....  $Q$
- 5°) Le poids spécifique du fluide .....  $\gamma$
- 6°) L'uniformité du régime, caractérisée par la différence entre  $I$  et  $i$  ;
- 7°) La turbulence qu'il est malaisé de définir par un nombre ou même une fonction.

**b) Pour le matériau :**

- 1°) Le poids spécifique .....  $\gamma_1$   
en admettant qu'il est le même pour tous les grains.
- 2°) Le diamètre moyen des grains que l'on peut définir de plusieurs façons.

- 3°) Un ou plusieurs paramètres définissant la répartition des matériaux des différentes grosseurs, par exemple le module d'uniformité  $M$  introduit par KRAMER.
- 4°) La forme des matériaux, en admettant qu'un type domine.
- 5°) La cohésion qui dépend de la granulométrie, mais aussi des propriétés chimiques des matériaux.

Ces divers paramètres ne sont pas indépendants. Les différentes caractéristiques de l'écoulement sont liées entre elles et sont même fonction au besoin de celles du matériau. La turbulence par exemple dépend certainement de la vitesse, du tirant d'eau, mais aussi de la grosseur et de la forme du matériau de fond, au moins au voisinage de celui-ci. L'uniformité du régime dépendra de la pente du fond, du débit, du tirant d'eau et de l'état du fond.

On conçoit donc qu'une formule tenant compte de tous ces paramètres ne devra pas obligatoirement les contenir tous explicitement. Mais celles que l'on rencontre dans la littérature technique n'en contiennent en fait qu'un petit nombre, les autres intervenant implicitement sous forme de coefficients dont il faut bien ensuite étudier les variations. C'est pourquoi l'on trouve si fréquemment des travaux ayant uniquement pour sujet l'étude des coefficients de vieilles formules simples qui datent de l'ère de « l'hydraulique des coefficients », en reprenant une expression d'un hydraulicien contemporain.

De plus, les équations de transport de fond sont de deux types bien distincts :

- 1°) Les formules qui donnent, en fonction des caractéristiques du matériau de fond, celles de l'écoulement au moment de la fin ou du début d'entraînement (valeurs critiques) ;
- 2°) Celles qui expriment le débit solide en fonction des divers paramètres que nous avons énumérés plus haut, et quelquefois des caractéristiques critiques ci-dessus que nous distinguerons par l'indice  $c$

**C) Formules définissant le commencement d'entraînement.**

Leur nombre est trop important pour qu'on puisse les analyser toutes. On rencontre en effet

les formules de SAINJON, KUTTER, HOCHENBURGER, THIER, PENK, FLAMANT, WILHELM, VELIKANOV, KRAMER, KREY, EISNER, SCHOKLITSCH, CHANG, INDRI, de l'UNITED WATERWAYS EXPERIMENT STATION, etc... La formule de MEYER-PETER elle-même peut permettre de déterminer le début d'entraînement.

Nous nous contenterons, pour discuter ces formules, de rassembler et de dégager les principales hypothèses ainsi que les méthodes d'investigation les plus fréquentes.

Nous pouvons d'abord grouper, sans inconvénient, toutes les formules qui expriment la vitesse en fonction des propriétés du matériau, y compris la pente du lit.

Elles sont en effet presque toutes établies d'une façon théorique en supposant que la force **qui tend à entraîner un grain est proportionnelle au carré de la vitesse de l'eau.**

Mais cette hypothèse est restrictive et n'est valable que lorsque la vitesse atteint une valeur telle que le nombre de REYNOLDS **correspondant au grain** dépasse la valeur critique limite de l'écoulement turbulent. D'autre part, l'action d'un courant sur un corps est différente suivant que le champ des vitesses au voisinage de ce corps est ou non uniforme, près du fond le gradient de vitesse est loin d'être négligeable.

Enfin la vitesse que l'on mesure, sauf le cas très particulier de certains auteurs, est la vitesse moyenne ; il faut donc tenir compte du fait que celle-ci est différente de la vitesse des filets qui agissent sur le grain et introduire un coefficient dont le moins qu'on puisse dire est que sa détermination est malaisée et peu sûre.

Cette première hypothèse étant admise malgré tous les inconvénients qu'on vient de voir, il faut maintenant en faire d'autres sur la **résistance du grain à l'entraînement.** Certains auteurs admettent qu'il glisse sur le fond ce qui introduit un coefficient de frottement qu'il faudra déterminer et qu'on devra multiplier par le poids « apparent », c'est-à-dire diminué de la poussée hydrostatique. Mais cette dernière est-elle toujours seule à intervenir ? Le gradient de vitesse introduira encore une poussée qui sera différente suivant que le grain sera entièrement ou non compris dans le film laminaire. La présence de blocs plus gros peut créer des tourbillons qui soulèveront et parfois maintiendront en suspension les grains plus petits, ce qui res-

treindra l'application de la formule aux lits homogènes.

Une autre façon d'envisager l'action de l'eau sur un grain est de supposer que le grain bascule par dessus un appui fixe ; il faut alors évaluer le rapport des bras de levier au lieu du coefficient de frottement. Mais ceci ne nous dispense pas de savoir quelle est la force qui doit agir contre la poussée de l'eau et nous retombons sur les difficultés ci-dessus, sauf que l'évaluation du frottement est remplacée par celle du rapport des bras de levier.

Il est bien entendu que l'on doit envisager le problème d'une façon statistique. Mais si certaines déterminations (coefficient de frottement par exemple), sont susceptibles d'être **vraies en moyenne** quoique fausses d'un grain à un autre, il en est d'autres (poussées dues au gradient de vitesse, à la limite du film laminaire, ou aux tourbillons locaux) qui seront en liaison étroite avec les caractéristiques générales de l'écoulement du fluide et avec la composition granulométrique du lit. Les variations de ces dernières devront alors se manifester obligatoirement dans les coefficients que les formules ne manquent pas de comprendre et dont l'étude introduira de nouvelles fonctions qui viendront se greffer sur les équations initiales et les alourdir.

Quoiqu'il en soit, toutes ces formules, tant celles qui sont basées sur l'équilibre des forces (SAINJON, THIER, PENK, WILHELM) que celles qui reposent sur l'équilibre des moments (FLAMANT, AIRY) sont de la forme :

$$V = k \sqrt{d}$$

où  $k$  dépend du poids spécifique du matériau. Ce qui a conduit tout naturellement VELIKANOV à étudier les variations de l'expression sans dimension :

$$\frac{V^2}{g d}$$

$g$  étant l'accélération de la pesanteur.

Il a trouvé la formule :

$$\frac{V^2}{g d} = \alpha + \frac{\beta}{d}$$

ce qui semble prouver que la forme même :

$$V = k \sqrt{d}$$

est défectueuse, au moins pour les petites valeurs de  $d$ .

De plus, le coefficient  $\beta$  dépend, d'après VELIKANOV, du tirant d'eau  $H$ , ce qui recoupe

ce que nous disions plus haut sur l'influence des caractéristiques de l'écoulement

$$\beta = 0,051 H + 5,7$$

H en mm.

$\beta$  en mm.

Les essais de VELIKANOV ont porté sur des sables de 0,1 à 5 mm. et des tirants d'eau de 25 à 200 mm.

Toutes les expressions des caractéristiques critiques que nous allons voir maintenant, groupent celles-ci sous la forme de « **force tractrice critique** ». Nous devons donc d'abord définir rapidement la force tractrice dont l'introduction en hydraulique est déjà ancienne puisqu'elle remonte à Du BOYS. C'est la force par unité de surface qu'exerce un courant sur le fond. On l'obtient en écrivant l'égalité des forces qui agissent sur une tranche verticale d'un écoulement.

$$T = \gamma H I_0$$

T est la résistance (force) du fond par unité de surface.

$\gamma$  le poids spécifique du fluide en mouvement.

H le tirant d'eau.

$I_0$  la pente de la ligne d'énergie.

Sous cette forme, en prenant pour valeur de la pente celle de la ligne d'énergie, la force tractrice représente bien, dans le cadre des hypothèses admises pour son établissement, la résistance du fond. Il n'en serait pas de même si l'on prenait la pente du fond ou la pente superficielle.

Toutefois, la force tractrice ainsi définie ne suffit pas à déterminer toutes les caractéristiques critiques de l'écoulement. En effet, les matériaux de fond seront, toutes choses égales d'ailleurs, plus facilement mis et maintenus en mouvement par un écoulement très turbulent que par un autre qui le sera moins. Donc, pour une même valeur de  $\gamma H I_0$  le lit se déplacera ou non suivant que le courant sera plus ou moins turbulent.

De plus, l'établissement de l'expression de la force tractrice suppose que le mouvement d'une tranche verticale de l'écoulement se fait en bloc, c'est-à-dire que la vitesse au fond est la vitesse moyenne, ce qui n'est évidemment pas le cas. La vitesse des filets liquides diminuant quand on s'approche du fond, la force tractrice réelle sur le fond devra être plus grande que celle que l'on calcule par la formule  $T = \gamma H I_0$ . On pourrait penser, si cette objection était la

seule à s'élever qu'il est possible de raisonner sur cette expression, facile à calculer, au moins pour la comparaison des écoulements, mais il faudrait admettre la constance du rapport de la vitesse moyenne à celle des vitesses au fond qu'il faut envisager. Ce n'est malheureusement pas le cas.

Au lieu de considérer les forces en présence, il serait peut être préférable de prendre les puissances. C'est ce que MAC DOUGALL, entre autres, a fait pour établir son équation de transport solide, ainsi que nous le verrons plus loin. Mais ceci entraîne hors de la force tractrice et nous y reviendrons.

Enfin, le poids spécifique à considérer peut ne pas être celui de l'eau pure si le courant transporte des matériaux en suspension. Il faut alors prendre le poids spécifique moyen du mélange qui diffère de celui de l'eau pure et nous abordons par là le problème de l'interdépendance entre la suspension et le transport de fond, question qui est loin d'être résolue.

Voyons maintenant comment divers auteurs expriment la force tractrice critique en fonction des caractéristiques du matériau de fond. La formule la plus simple est évidemment celle de KREY :

$$T_c = \gamma \frac{d_m}{C}$$

Mais le seul fait que C varie de 8 à 20 montre que cette formule est incomplète et ne mérite pas qu'on s'y attarde.

SCHOKLITSCH présente la force tractrice sous la forme :

$$T_c = \sqrt{0,0385 (\gamma_1 - \gamma) \gamma_1 \lambda B}$$

où B est le volume en cm<sup>3</sup> des grains et  $\lambda$  un coefficient de forme.

Cette équation n'est pas homogène, le coefficient 0,0385 a donc des dimensions. Malgré sa complication apparente elle n'est guère plus complète que la précédente : elle introduit seulement le poids spécifique des grains et un rapport de forme à préciser. De plus, elle a été établie pour des grains uniformes et relativement petits.

Tout en conservant la notion de force tractrice, KRAMER a essayé de faire un pas nouveau en introduisant la notion de « module d'uniformité » du matériau qui est un nombre sans dimension que l'on calcule à partir de la courbe granulométrique cumulée de celui-ci. Si l'on porte en abscisse le diamètre des matériaux et

en ordonnée la proportion du matériau dont le diamètre est inférieur à l'abscisse correspondante, on obtient une certaine courbe (C). L'ordonnée 50 pour cent divise l'aire limitée par (C), l'axe des ordonnées et l'ordonnée 100 pour cent en 2 surfaces  $A_{0}^{50}$  et  $A_{50}^{100}$ . Le module d'uniformité M que KRAMER a introduit en s'inspirant des études de HUMMEL sur le béton est le rapport de ces deux surfaces :

$$M = \frac{A_{0}^{50}}{A_{50}^{100}} \text{ (voir figure 10)}$$

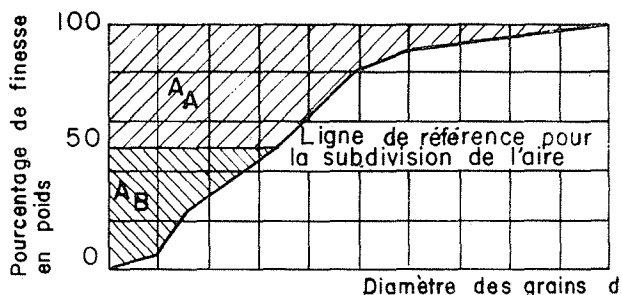


Fig. 10

Explication de l'évaluation de la courbe granulométrique

En désignant l'ordonnée par p (de 0 à 100) et l'abscisse par d :

On a :

$$M = \frac{\int_0^{50} d \, dp}{\int_{50}^{100} d \, dp}$$

Il est bien entendu que ce rapport ne saurait traduire intégralement toutes les propriétés de la courbe granulométrique, mais il constitue une première approximation de la représentation de l'allure de cette courbe, ce qui doit être suffisant, d'après KRAMER.

La forme même de l'équation proposée :

$$T_c = \frac{100 \gamma_1 - \gamma}{6 M} d_m$$

nous montre que l'homogénéité est respectée puisque M est un rapport sans dimension, mais nous permet aussi de constater que de toutes les caractéristiques de l'écoulement, seule la force tractrice est prise en compte, ce qui ne peut être rigoureusement vérifié, comme nous l'avons vu.

100

La valeur du coefficient  $\frac{100}{6}$  était d'ailleurs

provisoire et demandait la confirmation d'essais ultérieurs, ainsi que l'indique KRAMER lui-même.

Il faut remarquer de plus (fig. 11 et 12) que la formule ne s'applique pas à un certain nombre de points expérimentaux de KRAMER, ceux qui correspondent à des sables :

- a) dont tous les grains ont plus de 2 mm. de diamètre (sables D, C, B, U, V).
- b) dont la courbe granulométrique coupe l'abscisse 2 mm. (sables T, L, K, R).

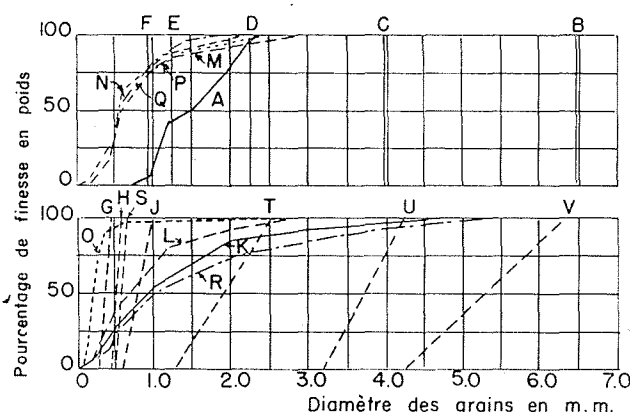


Fig. 11

Courbes granulométriques

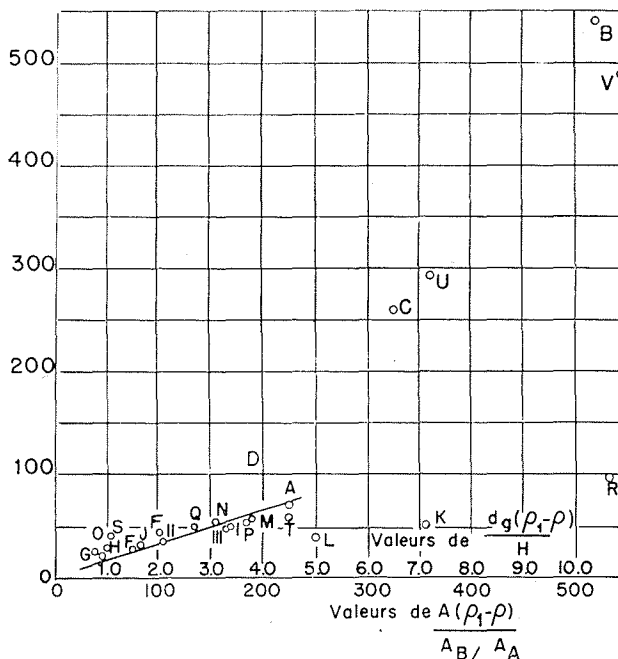


Fig. 12

Force tractive critique rapportée à l'évaluation des courbes granulométriques

Cette limite de 2 mm. est évidemment très approximative.

INDRI en cherchant à concilier les essais de KRAMER, de SCHOKLITSCH et de MEYER PETER, a été conduit à deux formules valables dans deux domaines différents, dont la limite correspond à une valeur du diamètre de l'ordre de 1 à 2 millimètres. Ces deux formules sont du même type que celle de KRAMER, à un terme constant près. Il faut cependant remarquer que pour avoir ses conclusions, INDRI a laissé systématiquement de côté les points aberrants des essais de KRAMER.

O'BRIEN relevant le résultat d'Indri pense qu'il faut lier les choix de l'une ou l'autre for-

mule à la valeur du rapport  $\frac{k}{\delta}$

k étant le diamètre des grains,  
 δ l'épaisseur du film laminaire.

Mais il calcule δ par la formule classique :

$$\delta = 11,5 \frac{\nu}{\sqrt{\frac{T_0}{\rho}}}$$

C'est-à-dire que δ est lié directement à T<sub>0</sub>. Sa remarque n'aurait peut-être pas une grande importance si elle n'introduisait la notion de **film laminaire** et, par conséquent, celle de **la turbulence au voisinage du fond**.

Nous sommes conduits à penser à un changement de la nature de l'écoulement autour des grains, au moment de l'entraînement, dès que le diamètre atteint une valeur suffisante. L'écoulement dans le canal d'essai sera toujours turbulent et il est possible que la discontinuité que l'on a remarquée pour la force critique d'entraînement provienne plus précisément d'un effet de rupture du film laminaire.

De toute façon, dans aucune de ces formules, nous n'avons vu intervenir la turbulence, qu'il est peut-être trop simple de considérer comme contenue implicitement dans les lois de l'écoulement liquide. Nulle part non plus il n'a été question de la cohésion des matériaux et la granulométrie elle-même a peut-être été introduite sous une forme trop schématique.

#### D) Formules de charriage.

Elles sont très nombreuses également. Certaines ont une forme simple, telles celles de MUHLHOFER, INDRI (pour le Pδ), WILHELM.

D'autres, plus nombreuses, font appel aux notions de caractéristiques critiques : ce sont les formules de Du BOYS, HOCHENBURGER, de GILBERT, SCHOKLITSCH, O'BRIEN et RINDLAUB, de l'UNITED WATERWAYS EXPERIMENT STATION, de CHANG, MAC DOUGALL, etc...

Celle de MEYER PETER enfin se présente sous une forme plus empirique, tandis que GAVRILENKO présente le résultat de ses études sous une forme originale, mais où deux coefficients ne sont pas déterminés.

Les formules de MUHLHOFER et d'INDRI sont purement empiriques et valables uniquement pour les cas où elles ont été établies.

La formule de WILHELM, par contre, est théorique, mais les hypothèses qu'on est obligé d'admettre pour l'établir sont si nombreuses que son emploi semble difficile.

Un certain nombre d'auteurs, dont Du BOYS qui en est le père, introduisent la force tractrice. Il faut remarquer que la force tractrice de l'écoulement n'est pas la force d'entraînement des matériaux. En gros, on peut dire qu'elle est égale à la somme de la résistance opposée par les matériaux en mouvement, et des frottements de l'eau sur les parties immobiles. Schématiquement la force d'entraînement sera donc égale à la différence entre la force tractrice T et la force tractrice critique T<sub>c</sub>. Mais ceci n'est qu'une approximation.

La manière dont Du BOYS établit sa formule est entièrement théorique et repose sur un certain nombre d'hypothèses discutables. Il suppose que le mouvement du sable se fait par couches de même épaisseur d'. La force de traction entre deux couches successives est égale à la force tractrice critique T<sub>c</sub>. Soit n le nombre de couches en mouvement. La force tractrice sur la couche supérieure sera :

$$n T_c = T$$

force tractrice du courant sur le lit en mouvement.

Par conséquent, la force tractrice croît linéairement de T<sub>c</sub> entre la dernière couche en mouvement et le lit fixe, à T = n T<sub>c</sub> entre le courant liquide et la première couche de matériau en mouvement.

Du BOYS suppose de plus que la vitesse des couches est encore une fonction linéaire de la hauteur. Si la dernière couche mobile se déplace à la vitesse v', la précédente se déplacera à la vitesse 2 v' et ainsi de suite jusqu'à la première

qui se déplacera à la vitesse  $n v'$ . Ceci est étroitement lié à la conception de la variation linéaire de la force tractrice dans le sable et de la constance du coefficient de frottement  $f$  entre deux couches. En effet, si l'on prend 2 couches successives quelconques, leur vitesse relative est  $v'$ , leur coefficient de frottement  $f$ , la force tractrice qu'elles exercent l'une sur l'autre est  $T_c$ .

De telle sorte que le débit solide par mètre de largeur sera :

$$q_s = \gamma_1 d' (v' + 2 v' + \dots + n v')$$

ou

$$q_s = \gamma_1 d' \frac{n(n-1)}{2} v'$$

et comme  $T = n T_c$

$$q_s = \gamma_1 \frac{d' T}{2 T_c} \left( \frac{T}{T_c} - 1 \right) v' = \frac{\gamma_1 d' v'}{2 T_c^2} T (T - T_c)$$

$$q_s = \Phi T (T - T_c)$$

En plus des hypothèses formulées pour établir cette formule, nous devons en relever une autre qui a été faite implicitement, à savoir :

On suppose que les diverses couches glissent les unes sur les autres, ce qui élimine en particulier le phénomène de saltation qui est pourtant un mode de transport très important.

La valeur de ces diverses hypothèses est certainement discutable. Leur mérite est de conduire d'une façon simple à une formule dont la forme a été reprise avec quelques modifications par différents auteurs.

O'BRIEN et RINDLAUD en concevant une variation non plus linéaire mais exponentielle de la force tractrice et de la vitesse des couches dans l'épaisseur du lit en mouvement, ont abouti à la formule :

$$q_s = \psi (T - T_c)^m$$

dont la différence avec celle de Du BOYS doit être marquée surtout pour les petits débits solides, pour lesquels elle indique nécessairement une croissance moins rapide.

L'UNITED STATES WATERWAYS EXPERIMENT STATION (Laboratoire de Wicksburg) a transformé légèrement cette formule en introduisant le  $n$  de MANNING :

$$q_s = \frac{1}{n} \left( \frac{T - T_c}{k} \right)^m$$

Le fait d'introduire  $n$  dans la formule correspond peut-être à la nécessité que les ingénieurs

de Wicksburg ont senti du rapport qui existe entre le transport de fond et la rugosité.

En examinant la forme de l'équation, on voit que de deux courants ayant la même force tractrice  $T$  et agissant sur un sable donné (ce qui détermine la valeur de  $T_c$ ), celui qui entraîne le plus de débit solide est celui pour lequel  $n$ , donc la rugosité, sera le plus faible. Ce qui semble en contradiction avec un certain nombre de résultats expérimentaux et en particulier avec des mesures directes effectuées sur le Rhin. C'est certainement une des raisons qui ont amené CHANG à proposer sa formule :

$$q_s = \frac{k n}{T_c^2} T (T - T_c)$$

qu'il défend contre celle de l'UNITED STATES WATERWAYS EXPERIMENT STATION en donnant la raison ci-dessus ; il ajoute toutefois : en admettant que l'exposant de  $n$  soit 1.

On voit, en effet, qu'il est difficile à CHANG d'être affirmatif quand on remarque la dispersion de ses points expérimentaux.

MAC DOUGALL, au lieu de considérer, comme Du BOYS, la répartition des forces en présence dans un écoulement, s'intéresse aux puissances. La puissance dépensée par unité de surface du fond est :

$$\gamma q I$$

$q$  étant le débit par unité de largeur.

Une partie seulement de cette puissance est affectée au transport solide.

C'est la différence entre  $\gamma q I$  et  $\gamma (q I)_c$   $k_2 = \gamma (q I)_c$  étant la puissance critique.

Il admet que le débit solide est proportionnel à cette différence et dépend de plus de la pente et d'un coefficient qui varie avec les propriétés des matériaux, d'où la formule finale :

$$q_s = k_1 I^{n-1} (q I - k_2)$$

où  $k_1$ ,  $k_2$  et  $n$  sont fonction du rapport  $\frac{M}{d_m}$

$M$  étant le module d'uniformité de KRAMER, et

$d_m$  le diamètre moyen des grains.

Les courbes  $k_1 \left( \frac{M}{d_m} \right)$  et  $n \left( \frac{M}{d_m} \right)$  sont des hyperboles.

La courbe  $k_2 \left( \frac{M}{d_m} \right)$  est une droite.

Les essais de JORISSEN ont confirmé ce résultat.

La formule de MEYER-PETER, établie à la suite d'expériences faites au Laboratoire de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Zurich, est la plus moderne, sinon la plus récente des formules de débit solide. Elle est empirique en ce sens qu'aucune théorie de l'entraînement des matériaux n'intervient dans sa forme. Elle apparaît donc comme l'ajustement mathématique d'une courbe expérimentale (ou plutôt d'une surface). Toutefois, elle vérifie les conditions de similitude de FROUDE, ce qui constitue une application de l'analyse des dimensions à la détermination des formules. Il faut bien remarquer cependant que ceci n'est un gage de la valeur de l'équation que tant que l'on admet que le phénomène de transport solide doit vérifier la similitude de FROUDE, ce qui n'est peut-être pas rigoureusement exact, si les matériaux de fond sont petits. Mais MEYER-PETER expérimentait sur des matériaux de diamètre assez grand : 5 mm. au moins, et s'est servi d'essais de GILBERT portant sur des sables de 3,17 mm. au moins.

L'examen de l'équation <sup>(1)</sup> :

$$\frac{0,462 q_s^{2/3}}{d (\gamma_1 - \gamma)^{7/9}} + 9,57 = \frac{I_0 q^{2/3}}{d (\gamma_1 - \gamma)^{10/9}}$$

fait ressortir le rapport 2/3 entre les exposants de  $q_s$  et  $I_0$  qu'on remarquait déjà dans la formule de SCHOKLITSCH. Mais on ne tient pas

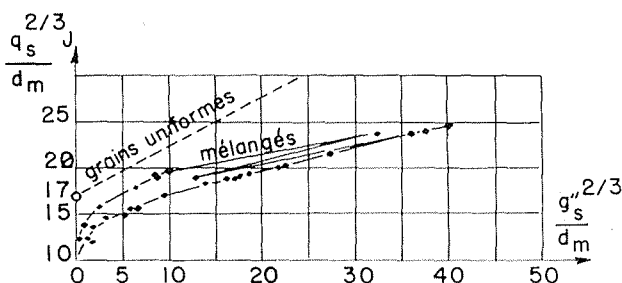


Fig. 13

compte de la granulométrie du matériau de fond. Si l'on a affaire à un sable non homogène, il faut, selon MEYER-PETER, prendre pour valeur de  $d$ , le diamètre des mailles du tamis laissant passer 35 pour 100 du sable (cette valeur est dite diamètre déterminant).

(1) Dans cette formule avec les coefficients 0,462 et 9,57 on désigne le débit solide « pesé sous l'eau », c'est-à-dire déduction faite de la poussée d'ARCHIMÈDE.

En fait, si l'application de cette formule est tout à fait justifiée pour un matériau de fond homogène, son emploi semble déconseillé pour les matériaux à granulométrie étendue (fig. 13).

Compte tenu de la remarque précédente, cette formule renferme un bon nombre des paramètres énumérés au début du paragraphe I. Elle est de plus valable strictement pour un régime uniforme et une pente du fond bien établie. Il est vraisemblable qu'elle est exacte dans les limites du domaine des expériences qui ont servi à l'établir. Il faudra certainement agir avec prudence si on veut l'appliquer à des sables fins.

Pour les formules de charriage comme pour celles de commencement d'entraînement, nous sommes obligés de constater que la turbulence, la cohésion des matériaux, leur granulométrie, n'ont peut-être pas été l'objet de toute l'attention nécessaire. De plus, il y aurait peut-être lieu de se demander si le changement de régime observé pour le commencement d'entraînement, ne se produit pas également pour le charriage.

On relève en effet qu'EGUIAZAROV, en essayant d'exprimer la pente du fond (égale à celle de la ligne d'énergie en régime uniforme) en fonction du diamètre  $d$  des grains du lit a trouvé la relation

$$i = \alpha d + \beta$$

lorsque les débits liquides et solides sont donnés.

Cette équation correspond bien à la formule de MEYER-PETER, mais elle n'est valable que pour des valeurs de  $d$  supérieures à 2 mm.

En opérant avec des matériaux plus fins, EGUIAZAROV a trouvé que  $i$  était indépendant de  $d$ .

#### IV. SUSPENSION

##### A) Considération générales.

Dans le transport en suspension les matériaux solides se rencontrent sur toute la hauteur (ou une partie) de l'écoulement liquide. Il est très difficile d'établir une limite précise entre la saltation et la suspension. Le seul critère qui puisse être valable ferait intervenir la forme des trajectoires des grains : il y aurait saltation lorsque les trajectoires des grains présenteraient une concavité unique, dirigée vers le bas, entre deux points de contact avec le lit. Mais ce critère serait très difficile à observer.

Dans le domaine des matériaux très fins, il est également très difficile d'établir la limite entre la suspension colloïdale et la suspension mécanique. Nous nous intéressons, pour le moment, à cette dernière, mais nous ne pouvons laisser complètement de côté deux phénomènes qu'on rencontre souvent : les solutions colloïdales et les courants de densité.

#### 1°) Solutions colloïdales :

Une importante propriété des solutions colloïdales est la possibilité de floculation sous l'influence de certains facteurs chimiques. La présence d'électrolyte qui peut, dans certains cas, favoriser la suspension, peut également déclencher la floculation. En particulier, **l'eau de mer provoque la floculation des argiles**. D'après les expériences de THOULET, une eau contenant un dixième d'eau de mer produit le même effet que l'eau de mer pure. Les résultats obtenus par PICHOT montrent qu'une proportion d'un trentième devrait suffire, le pouvoir peptisant du chlorure de sodium en présence de kaolin commençant à diminuer à la dose de 250 mmgr. par litre environ pour se transformer en pouvoir floculant total à partir de 1 gr. par litre. Comment se comportent alors les floculats au point de vue de la suspension ? D'après GLANGEAUD, les éléments floculés restent en suspension comme les grains ayant la même vitesse de chute.

Une propriété, peut-être non moins importante des solutions colloïdales est leur influence sur la viscosité. Celle-ci croît très vite avec la concentration, et il est possible que cette augmentation ait des conséquences remarquables sur la suspension et même sur le transport de fond. A ce sujet, on peut se demander s'il ne faut pas chercher dans cette voie une explication des résultats de CHILTON A. WRIGHT relatifs au BOULDER DAM. WRIGHT a trouvé sur un modèle réduit du BOULDER DAM que le fond du Colorado à l'aval de ce barrage était plus érodé par de l'eau claire que par de l'eau chargée de kaolin. Il est possible que l'augmentation de viscosité due au kaolin en suspension colloïdale ait changé l'allure de l'écoulement au voisinage du fond (augmentation de l'épaisseur du film laminaire en particulier). Cela constituerait une raison de plus de faire des réserves quant à la traduction sur l'ouvrage lui-même des résultats obtenus sur le modèle. Notons encore que certaines solutions colloïdales ont la propriété remarquable de voir leur viscosité changer avec le

gradient de vitesse. Mais ceci n'est peut-être pas vrai pour l'argile.

#### 2°) Courants de densité :

Il existe enfin un phénomène particulier que nous avons entièrement laissé de côté : les courants de densité. On observe parfois dans un grand fleuve dont l'eau est très claire l'arrivée d'un affluent très trouble dont **les eaux ne se mélangent pas à celles du réservoir ou du fleuve**, formant un courant distinct, plus dense, mais pouvant remonter en conservant son individualité jusqu'au niveau de vannes de chasse relativement élevées. L'eau trouble de l'affluent se comporte donc comme un fluide différent de l'eau claire, et très peu miscible à celle-ci. Ce phénomène est à rapprocher de l'écoulement de la lave de boue décrit par LECHALAS, où l'eau claire coule sur la lave. Dans les deux cas, la présence de sédiment fait varier les propriétés de l'eau : viscosité, tension superficielle et sans doute faut-il chercher dans ce sens une explication des courants de densité.

GROVE et HOWARD présentant en 1938 un rapport à l'American Society of Civils Engineers sur les courants de densité observés dans le Lake Mead, ne donnent guère, comme précision intéressante, que la finesse des particules composant les troubles : 90 % avaient un diamètre inférieur à 20  $\mu$ . Mais dans la discussion de ce rapport, PAGE fait remarquer que dans ce cas les sédiments présentent un caractère colloïdal et différent beaucoup de ceux qui sont normalement apportés. Ceux-ci sont de couleur sombre, abrasifs et relativement lourds : 98 % se déposent en moins de 2 heures. Tandis que les matériaux formant les courants de densité observés avaient une consistance argileuse, une couleur plus claire et étaient difficiles à séparer de l'eau, même par filtration. L'opinion de PAGE est qu'ils proviennent de régions argileuses et contiennent une forte proportion de sels. Il conclut en disant que leur aptitude à former des courants de densité, semble dériver de leurs propriétés colloïdales et chimiques.

#### B) Etude du maintien en suspension.

##### 1°) Vitesse de chute :

De quelque façon qu'on tente d'expliquer le phénomène de suspension dans l'eau courante de particules solides, on devra faire appel à la

vitesse de chute de celles-ci en eau calme. Leur présence à l'intérieur du fluide résultera, en effet, d'un équilibre entre l'action de la pesanteur (poids apparent des grains dans l'eau) et l'action sustentatrice des courants, que celle-ci soit due à une composante verticale de la vitesse, au gradient de vitesse ou à la turbulence. Il sera donc intéressant, chaque fois qu'on voudra caractériser les particules en suspension, de le faire au moyen de leur vitesse de chute en eau calme.

De nombreux auteurs ont étudié la chute de particules dans l'eau ou un fluide quelconque, soit en vue de recherches sur la suspension ou de la décantation, soit à propos de travaux sur le coefficient de résistance des corps en mouvement dans un fluide. Certains d'entre eux se sont uniquement occupés de sphères. Leurs résultats ne peuvent pas s'appliquer tels quels à l'étude de la suspension. Le mouvement d'une sphère tombant dans un liquide au repos est, en effet, plus régulier que celui d'un grain de forme irrégulière, dont le coefficient de résistance varie avec l'orientation et qui est par suite soumis à des fluctuations de la force exercée par le fluide. Toutefois, les courbes donnant la vitesse de chute en fonction du diamètre moyen ont la même allure pour des grains de sable que pour des sphères. Elles sont simplement décalées d'une quantité qui doit dépendre de l'irrégularité de la forme des grains. Les fig. 14 et 15, extraites d'un article de LANE paru dans Transactions of the American Geophysical Union en 1938 donnent les résultats d'essais obtenus par différents auteurs. Les résultats de

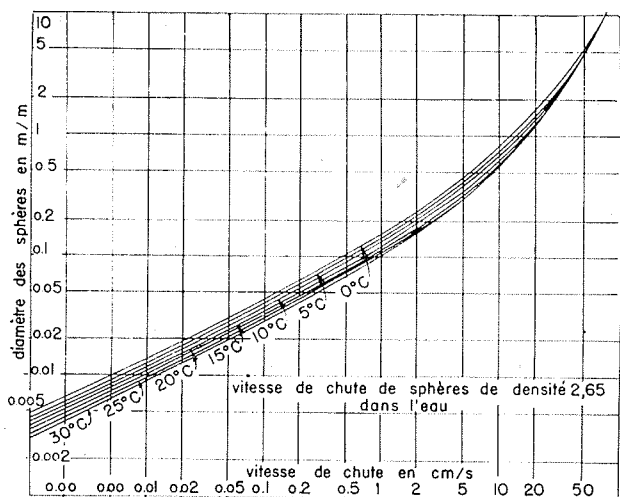


Fig. 14

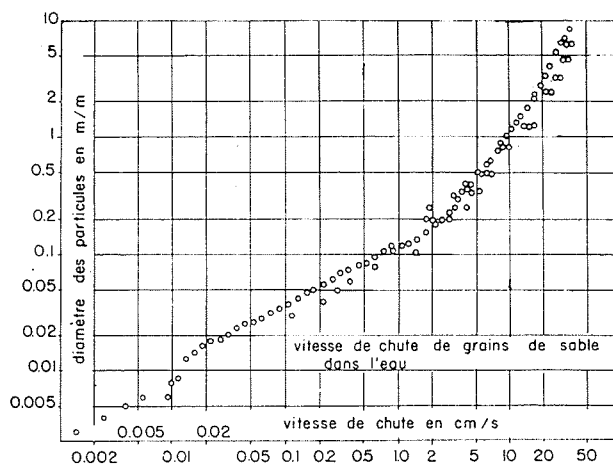


Fig. 15

SUDRY indiquent également des différences entre des sphères et des grains arrondis.

SUDRY note l'effet de la température. La vitesse de chute des grains fins augmente avec elle, alors qu'au-dessus d'une certaine dimension de grain, ses variations n'ont plus d'influence. Par exemple, pour des grains de 0,25 mm. de diamètre la vitesse de chute est doublée quand on passe de 10° à 35°. Or, pour de tels grains, en chute libre dans l'eau calme, le coefficient de résistance suit à peu près la loi de STOKES.

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

C coefficient de résistance défini par la formule :

$$F = C \rho A V^2$$

F résistance,

$\rho$  poids spécifique de l'eau,

A maître couple du corps en mouvement,

V vitesse.

$$R = \frac{VD}{\nu} \text{ nombre de Reynolds.}$$

On a donc sensiblement :  $F = k_1 \rho D V \nu$

Dans les deux cas F est égal au poids apparent, on doit donc avoir :

$$V \nu = \text{constante.}$$

Quand la température passe de 10° à 35°,  $\nu$  passe de 0,013 poises à environ 0,007, par conséquent V doit à peu près doubler. La **température agit par variation de la viscosité.**

La viscosité intervient également de façon prépondérante, selon SUDRY, dans la variation de vitesse de chute des grains dans l'eau en fonction de la teneur de celle-ci en kaolin. En effet, la seule augmentation de densité de l'eau

ne saurait expliquer que des grains de quartz de 0,11 mm. de diamètre moyen tombent à une vitesse de 0,100 cm/s. seulement dans une eau chargée de kaolin (densité de l'eau 1,150). Le résultat expérimental montre d'ailleurs que cette augmentation est très importante. Il est vraisemblable qu'une partie du kaolin se trouve en solution colloïdale et que c'est la viscosité de cette solution qui intervient. SUDRY donne une loi expérimentale reliant le diamètre des grains pouvant être tenus en suspension par un courant d'eau vertical ascendant de vitesse donnée, et la densité de l'eau plus ou moins chargée de kaolin. Cette loi est exprimée par l'équation suivante :

$$d_n = d_o [1 + 50 (\rho_n - \rho_o)^2] \quad (1)$$

$d_n$  diamètre du grain tombant à la vitesse  $V$  dans de l'eau trouble de densité  $\rho_n$

$d_o$  diamètre du grain de même densité tombant à la même vitesse  $V$  dans de l'eau pure de densité  $\rho_o$

Cette relation permettrait à la rigueur de calculer la variation de viscosité en fonction de la concentration en kaolin, celle-ci est définie par  $\rho_n - \rho_o$ . En nous bornant au domaine de la loi de STOKES, ce qui simplifie les équations, nous avons en effet la relation

$$(\rho_1 - \rho) d^2 = k \rho V \nu$$

qui exprime l'égalité entre le poids du grain de densité  $\rho_1$  et la résistance du fluide,

$$\text{d'où} \quad \frac{(\rho_1 - \rho_n) d_n^2}{(\rho_1 - \rho_o) d_o^2} = \frac{\rho_n \nu_n}{\rho_o \nu_o} \quad (2)$$

en éliminant  $\frac{d_n}{d_o}$  entre (1) et (2) on a  $\frac{\nu_n}{\nu_o}$  en fonction de  $\rho_n$  et  $\rho_o$ .

$$\frac{\nu_n}{\nu_o} = \frac{\rho_o}{\rho_n} \left[ 1 + 50 (\rho_n - \rho_o)^2 \right]^2 \frac{\rho_1 - \rho_n}{\rho_1 - \rho_o}$$

Cette équation montre que la viscosité croît très vite avec la concentration. C'est d'ailleurs une propriété générale des solutions colloïdales. Dans le traité de chimie organique de GRIGNARD et BAUD (Masson 1935) on trouve que la viscosité des solutions colloïdales croît exponentiellement avec la concentration.

La vitesse de chute d'un ensemble de grains de grosseur déterminée est différente de celle de chacun des grains isolés. Mais les résultats diffèrent suivant les expérimentateurs. En effet, SUDRY a trouvé que la vitesse de chute d'un

ensemble de grains est inférieure à celle d'un seul grain isolé, tandis que M. GHALI trouve un résultat qui semble contradictoire : « la vitesse de chute d'un grain déterminé croît avec le nombre de grains environnants ». Ces expériences ont été conduites différemment : SUDRY mesurerait en fait la vitesse d'un courant ascendant maintenant en suspension **un nuage de particules**, tandis que GHALI mesurerait la vitesse de chute **d'une particule** au milieu d'un nuage tombant également. Ce dernier a essayé d'indiquer explicitement le nombre de particules, ce qui est très difficile étant donné leur petitesse. Il a repris ensuite ses essais en opérant non plus sur des matériaux naturels en suspension, mais sur des billes d'acier ou de verre dans l'eau, de la glycérine ou une solution de saccharose. Il est difficile de tirer une conclusion pratique de ces résultats expérimentaux. En général, il a observé une augmentation de la vitesse de chute d'une bille tombant en compagnie d'une ou plusieurs autres billes analogues. Mais il a observé le contraire pour deux billes d'acier tombant simultanément dans de la glycérine (nombre de Reynolds correspondant égal à 2). Il apparaît donc que ce problème n'est pas encore résolu complètement.

Remarquons enfin qu'il y aurait certainement lieu d'étudier la chute d'un **grain isolé** dans un courant turbulent. L'action sustentatrice de la turbulence ne peut se faire sentir que sur un ensemble de grains, en imposant une répartition des concentrations ; mais un grain seul doit tomber au fond. Toutefois, sa vitesse de chute peut être, dans ce cas, différente de la vitesse de chute en eau calme. Il y aurait lieu de le vérifier. Les travaux de SUDRY, conduits en mesurant la vitesse d'un courant susceptible de maintenir des grains à un niveau donné, sont incomplets à cet égard puisque pour chaque particule ils imposent une turbulence donnée.

## 2<sup>o</sup>) Répartition des concentrations dans une section droite de courant :

Avec la répartition des concentrations dans une section droite de courant, nous abordons le problème même du mécanisme de la suspension. Une théorie correcte de celui-ci doit permettre de comprendre tous les cas rencontrés de distribution de sédiment dans un courant. Toutefois, avant d'expliquer les phénomènes, il est nécessaire d'en connaître les différents aspects. C'est le but de ce paragraphe de montrer par quelques

exemples la diversité des observations que les chercheurs ont eu à interpréter.

La concentration en trouble n'est pas constante sur une verticale. D'une façon générale elle augmente avec la profondeur, mesurée à partir de la surface libre. Mais cette augmentation n'est pas semblable dans tous les cas. Certains auteurs signalent des variations presque nulles de la concentration le long d'une verticale tandis que d'autres donnent des rapports de 10 et plus entre la concentration près du fond et celle de la surface. La variation semble d'autant plus importante que les grains sont plus gros. Ce résultat s'explique très bien par les théories modernes de la suspension, ainsi que nous le verrons plus loin.

Dans certains cas, l'augmentation n'est pas continue quand on s'éloigne de la surface libre. On observe des maxima de concentration pour une ou plusieurs profondeurs. Ce résultat semble a priori en contradiction avec les théories modernes. Cependant, celles-ci ont pour base la théorie de la turbulence, elles ont donc un caractère essentiellement statistique, et donnent les **concentrations moyennes**. Or, la plupart des mesures sont instantanées et peuvent différer largement des valeurs moyennes. GLANGEAUD a observé sur la Gironde des oscillations de turbidité entre 0,57 et 1,13 gr. par litre en quelques secondes et pour le même point. Il trace d'ailleurs (fig. n° 9) deux courbes limites de turbidité maxima et minima. Il est facile de voir qu'on peut, entre ces courbes, en tracer une qui présenterait un maximum. Il faut de plus faire intervenir les courants transversaux qui entraînent des perturbations de la distribution des concentrations dans la section. HJULSTROM a trouvé pour la rivière Fyris deux zones de maximum de trouble, situées de part et d'autre de l'axe de la rivière, plus près du fond que de la surface. FROLOW a remarqué la même chose sur l'Afrine. Il est possible que ces maxima soient dus à des courants transversaux.

Les concentrations en troubles présentent également des anomalies dans les coudes, ce qui est naturel. Là encore il semble que la répartition des sédiments dans la section dépende directement de la configuration de l'écoulement : courbure due aux coudes et courants hélicoïdaux.

En résumé, les singularités qui ont gêné de nombreux chercheurs peuvent certainement être expliquées dans beaucoup de cas :

1° par la différence de dimensions des particules ;

2° par les fluctuations de concentration ;

3° par les courants secondaires.

Si l'on examine des résultats qui semblaient contradictoires à la lumière de ces trois facteurs, il est vraisemblable que leur interprétation s'en trouvera simplifiée.

### 3°) Mécanisme du phénomène :

Nous n'avons pas cherché à rassembler un grand nombre de données numériques souvent sujettes à caution et dont on ne pourrait d'ailleurs se servir qu'à condition d'avoir une idée assez précise sur l'ensemble même du phénomène. C'est pour cette raison que nous nous sommes attachés surtout à comprendre **pourquoi et comment les cours d'eau maintiennent des matières en suspension**. Nous nous sommes de plus bornés à la suspension purement mécanique, en laissant de côté les phénomènes de solution, colloïdale ou autre.

Les observations faites dans la nature par de nombreux chercheurs ont montré que, pour un même débit liquide dans un cours d'eau donné, la concentration en éléments fins est extrêmement variable, et dépend surtout du ruissellement tandis que la concentration en éléments plus grossiers, c'est-à-dire plus près de la limite à partir de laquelle ils se déposent, semble dépendre de leur présence dans le lit. D'autre part, alors que la concentration des éléments très fins est pratiquement constante tout le long d'une verticale prise dans le courant, celle des particules de plus grande dimension diminue rapidement quand on s'éloigne du fond pour se rapprocher de la surface libre.

Ceci nous montre qu'on ne pourra pas déterminer le transport en suspension d'un matériau dans une rivière à partir des caractéristiques hydrauliques de celle-ci. Il faudra toujours faire une mesure de concentration, soit au sein de l'écoulement, soit pour les plus gros matériaux, dans le lit.

Voyons maintenant de quelles façons différentes on a essayé d'expliquer la suspension.

Pour ne pas reprendre en détail tous les travaux qui ont été faits sur la question, nous les diviserons en trois groupes principaux :

- a) ceux qui font appel à la vitesse du courant ;
- b) ceux qui font intervenir le gradient de vitesse ;
- c) ceux qui sont basés sur la turbulence.

Nous parlerons ensuite en d) de la Mise en Suspension.

#### a) Vitesse du courant :

On a remarqué, depuis longtemps, que plus un courant est rapide, plus il est susceptible de maintenir des particules solides en suspension. Pour expliquer ce fait, certains auteurs admettent l'existence d'une certaine « composante verticale de la vitesse » dirigée vers le haut,

$$v = \frac{V}{m} \text{ où } V \text{ est la vitesse du courant, et } m \text{ un}$$

certain coefficient. Et ces auteurs concluent : tous les matériaux dont la vitesse de chute  $c$  est supérieure à  $v$  se déposeront, alors que les autres pourront être transportés en suspension. Mais le coefficient  $m$  n'est pas constant et EGUIAZAROV, se servant des travaux de plusieurs auteurs, a donné une courbe de variation de  $m$  en fonction du tirant d'eau  $H$  (fig. 16).

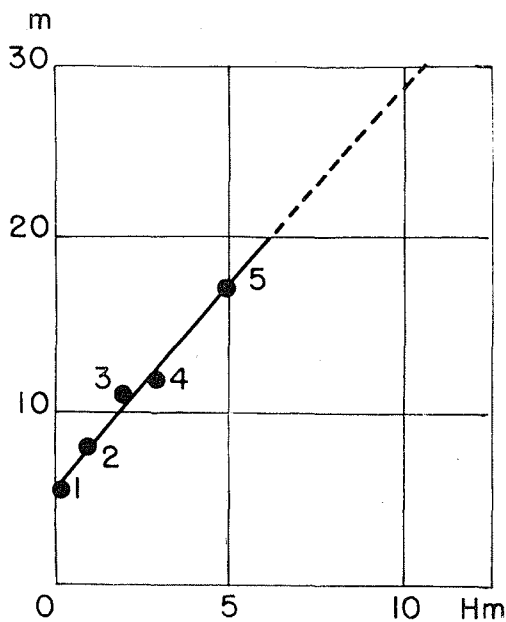


Fig. 16

Variation du coefficient  $m$  de la composante verticale de la vitesse, en fonction de la profondeur (d'après Eguiazaroff).  
1. Velikanov ; 2 et 3. Bestelly ; 4. Buchi ; 5. Bourkooff.

On voit tout de suite qu'il s'agit là d'une **relation** empirique plus que d'une **explication** du phénomène. L'expression même de « composante verticale de la vitesse » est déféctueuse, et il faut comprendre : tout se passe comme s'il existait une composante de la vitesse dirigée vers le haut.

La vitesse n'intervient d'ailleurs pas seule

puisqu'on a été amené à relier le coefficient  $m$  au tirant d'eau.

De plus, cette manière de voir les choses ne nous renseigne en aucune façon sur la répartition des concentrations le long d'une verticale. Enfin, ceci ne peut préciser que le cas limite du dépôt et ne permet pas d'évaluer les quantités transportées.

#### b) Gradient de vitesse :

FLAMANT a remarqué que, lorsqu'on s'éloigne du fond, la vitesse augmente alors que la concentration en troubles diminue ainsi que le gradient de vitesse. Il a donc pensé à relier les deux grandeurs. L'explication qualitative qu'il donne est assez contestable. En fait, il s'agit de variations concomitantes plutôt que d'une relation de cause à effet. Nous y reviendrons à propos de la turbulence. Il faut de plus remarquer :

- 1 — que le gradient de vitesse peut changer de sens sans que la concentration s'annule (fig. 17) ;

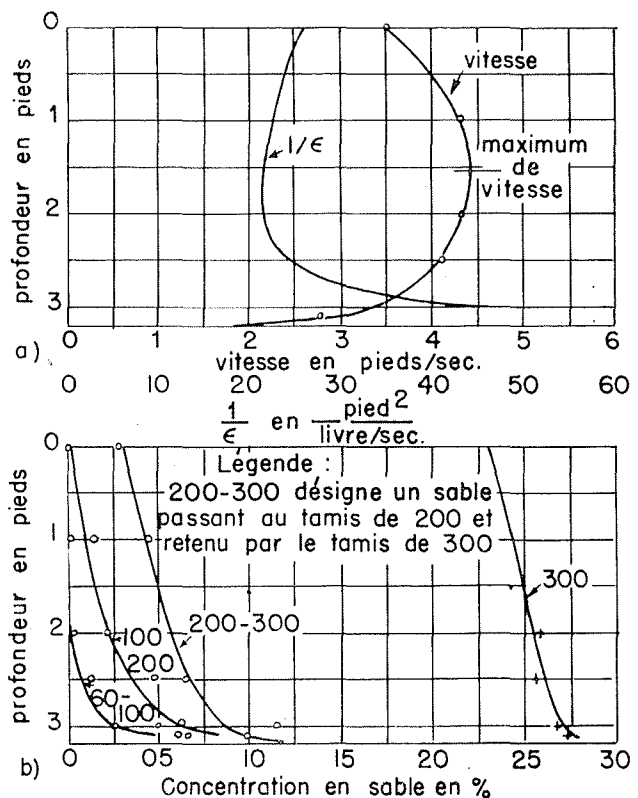


Fig. 17

- Courbe de répartition des vitesses suivant une verticale et courbe correspondante pour  $\frac{1}{\epsilon}$ .
- Répartition des concentrations pour différents sables. Les points correspondent aux expériences ; les courbes donnent les répartitions théoriques (théorie turbulente de la suspension).

2 — que FLAMANT pensait déjà que le gradient de vitesse n'était pas seul à intervenir et notait l'influence du coefficient cinématique de turbulence appelé  $\varepsilon$  par BOUSSINESQ.

c) **Turbulence :**

Si la théorie complète du maintien en suspension des particules solides par les courants à partir de la turbulence n'est pas encore tout à fait au point, elle semble assez avancée pour qu'on puisse la préciser rapidement.

Pour dégager l'essence du phénomène, il faut se placer dans des conditions qui impliquent certaines hypothèses restrictives. C'est ainsi que l'on considère ce qui se passe dans un écoulement à deux dimensions, en régime uniforme, en éliminant la zone située au voisinage immédiat du fond qui peut être le domaine de phénomènes de saltation. Dans ces conditions, on observera un état d'équilibre, c'est-à-dire que la courbe des concentrations en fonction de la cote sera, comme celle des vitesses, la même en moyenne dans les sections transversales successives. Il y a équilibre entre l'action de la pesanteur qui tend à faire descendre les grains, donc à augmenter la concentration des couches profondes, et celle de la turbulence qui tend à égaliser les concentrations.

Le raisonnement initial procède par analogie de la façon suivante :

La turbulence est caractérisée par des fluctuations, en **grandeur** et en **direction** de la vitesse, en un point donné, autour d'une valeur moyenne. Ces fluctuations entraînent le passage à travers une surface  $d\sigma$  parallèle à la vitesse moyenne  $V_x$ , de particules fluides dans un sens et dans l'autre. S'il existe un gradient de la **vitesse moyenne** le long de la perpendiculaire  $oz$  à  $d\sigma$  les particules qui passent dans un sens à travers  $d\sigma$  auront une vitesse moyenne différente de celles qui passent en sens inverse. Il y a donc échange de quantité de mouvement parallèle à la vitesse moyenne entre les couches situées de part et d'autre de  $d\sigma$  et ceci correspond à une force de frottement superficiel entre les deux couches.

$$\tau_{xz} = - \rho^2 \frac{dV_x}{dz}$$

$\tau_{xz}$  est la somme des quantités de mouvement parallèles à  $ox$  qui passent dans l'unité de temps à travers l'unité de surface perpendiculaire à  $oz$ .

D'autre part,  $\rho V_x$  est la quantité de mouvement parallèle à  $ox$  par unité de volume. C'est en quelque sorte une **concentration** en quantité de mouvement et l'égalité ci-dessus peut donc s'interpréter de la façon suivante :

« La somme  $\tau_{xz}$  des quantités de mouvement parallèles à  $ox$  qui passent sous l'action de la turbulence, pendant l'unité de temps, à travers l'unité de surface perpendiculaire à  $oz$  et dans le sens  $oz$ , est égale au produit par  $-\varepsilon$  de la dérivée par rapport à  $z$  de la concentration en quantité de mouvement parallèle à  $ox$  :

$$\rho \frac{dV_x}{dz} »$$

Cette force tangentielle est évidemment équilibrée par la cause, pesanteur ou pression, de l'écoulement.

**D'une façon analogue**, si l'on considère une grandeur définissant une propriété de l'eau, on peut lui appliquer l'énoncé précédent, convenablement transformé :

« **Sous l'action de la turbulence**, la somme de cette grandeur passant dans l'unité de temps à travers l'unité de surface perpendiculaire à  $oz$  et dans le sens  $oz$ , est égale au produit par  $-\varepsilon$  de la dérivée par rapport à  $z$  de la concentration de cette grandeur dans l'eau ».

Si l'on applique ce raisonnement aux particules en suspension dans un courant où l'on admettra, pour simplifier, que la verticale est perpendiculaire à la vitesse moyenne, on voit que :

La quantité (en poids, en nombre ou en volume) de matériaux qui passera **vers le haut** sous l'action de la turbulence pendant l'unité de temps à travers l'unité de surface horizontale sera égale au produit par  $-\varepsilon$  de la dérivée par rapport à la distance au fond  $z$  de la concentration  $n$  (en poids ou en nombre ou en volume) de ces matériaux dans l'eau.

$$-\varepsilon \frac{dn}{dz}$$

Si ces matériaux tombent dans l'eau avec la vitesse  $c$  il en passe la quantité  $cn$  **vers le bas** pendant l'unité de temps à travers l'unité de surface horizontale sous l'action de la pesanteur.

Si l'écoulement est en équilibre au point de vue de la suspension, on a donc :

$$cn = -\varepsilon \frac{dn}{dz}$$

C'est cette équation de base qui a été utilisée par de nombreux auteurs.

ROUSE, en particulier, l'a intégrée en reliant  $\epsilon$  à la force tangentielle sur le fond et à  $dV/dz$ .

$$\tau = \epsilon \rho \frac{dV}{dz} = \tau_0 \left(1 - \frac{z}{z_0}\right)$$

d'où

$$\epsilon = \frac{\tau_0 \left(1 - \frac{z}{z_0}\right)}{\rho \frac{dV}{dz}}$$

Il a admis ensuite une répartition exponentielle des vitesses :

$$\frac{dV}{dz} = \frac{1}{K} \frac{\sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}}}{z}$$

pour aboutir finalement, après un changement de variable destiné à éliminer une couche d'épaisseur  $z$  au voisinage  $a$  du fond  $\eta = z - a$  à l'équation :

$$\frac{n}{n_a} = \left( \frac{1 - \frac{\eta}{\eta_0}}{1 + \frac{\eta}{a}} \right)^p$$

avec

$$p = \frac{c}{K \sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}}}$$

$n_a$  est la concentration à la distance  $a$  du fond.  
 $\eta_0$  est la valeur de  $\eta$  qui correspond à la surface libre (fig. 18).

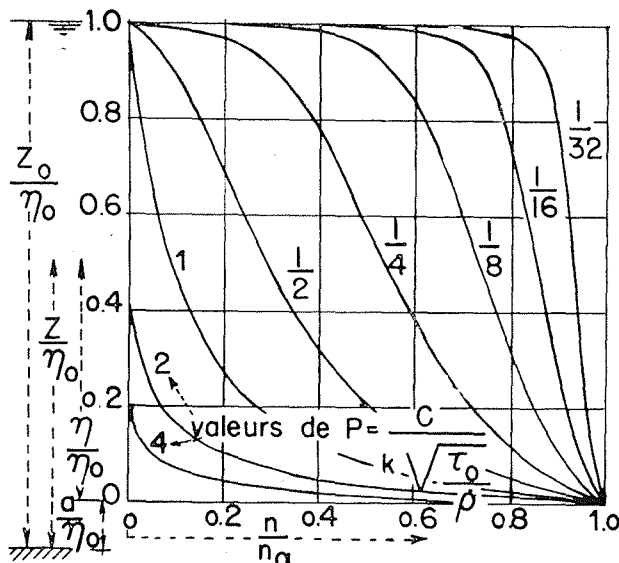


Fig. 18

Les courbes représentatives de cette équation, pour diverses valeurs de  $p$  montrent bien que la concentration des matériaux les plus fins est presque constante le long d'une verticale tandis que celle des éléments plus grossiers décroît rapidement quand on s'éloigne du fond, ce qui est conforme aux observations.

Revenons maintenant sur les hypothèses qui ont été faites, en remarquant que certaines ont été introduites implicitement par la plupart des gens qui se sont occupés de la question.

1°) L'écoulement doit être uniforme, à deux dimensions seulement et l'étude doit porter sur un état d'équilibre au point de vue de la suspension.

2°) On a admis, pour le calcul de la force tangentielle  $\tau$ , que la présence de matériaux ne changeait pas la densité de l'eau.

3°) Le mécanisme de la turbulence doit être semblable dans tout le secteur étudié, ce qui élimine une région plus ou moins importante au voisinage du fond.

4°) On a pris le même coefficient  $\epsilon$  pour l'étude de la suspension que pour celle des forces de frottement turbulent entre deux couches liquides.

5°) On a admis que la vitesse de chute d'un grain en eau calme était la même qu'en eau turbulente.

Les trois premières hypothèses sont faites dans le but de simplifier le problème, et pour se placer dans un cas idéal, réalisable avec plus ou moins de difficulté. Les deux dernières par contre sont beaucoup plus critiquables.

En effet, d'une part, il n'est pas évident que la chute d'un grain se fasse à la même vitesse en eau calme et en eau turbulente et cela demanderait une vérification. D'autre part, le coefficient cinématique de la turbulence  $\epsilon$  de BOUSSINESQ caractérise les molécules d'eau et plus précisément la rapidité avec laquelle une molécule passant d'une couche dans une autre perd les propriétés moyennes de son niveau initial pour acquérir celles de son niveau final. Or, par suite de leur inertie d'une part, de leur poids apparent d'autre part, les grains solides ne suivent pas tous les mouvements des particules fluides qui les entourent et le raisonnement par analogie présenté plus haut, n'est donc pas rigoureusement exact.

Cependant, HURST, abordant le problème de la suspension en s'inspirant de la théorie des

émulsions, a relevé les courbes de concentration en fonction de la hauteur dans un milieu d'agitation uniforme. Il a trouvé qu'elles correspondaient à la loi :

$$n = n_0 e^{-\alpha(z-a)}$$

ou en différenciant :

$$n = \frac{1}{\alpha} \frac{dn}{dz}$$

très semblable à l'équation :

$$n = \frac{\varepsilon}{c} \frac{dn}{dz} \text{ établie plus haut.}$$

Ceci veut peut-être dire que cette formule est valable à condition de revoir la définition de  $\varepsilon$  et de  $c$ .

On prendrait pour valeur de  $\varepsilon$  non pas celle qui caractérise l'agitation des molécules fluides, mais celle  $\varepsilon_1$  qui s'applique aux particules solides. La valeur de  $c$  elle-même pourrait varier avec la turbulence. Les résultats de HURST trop peu nombreux pour qu'on puisse en tirer des conclusions précises, semblent cohérents et paraissent montrer que  $\varepsilon_1$  n'est pas fonction seulement de  $\varepsilon$  mais aussi des dimensions des grains, ce qui est assez vraisemblable.

En résumé, la turbulence communique aux particules solides une agitation désordonnée qui suffit à expliquer le maintien en suspension suivant une loi de la forme

$$n = \frac{\varepsilon_1}{c_1} \frac{dn}{dz}$$

Il est vraisemblable que  $\varepsilon_1$  n'est pas égal à  $\varepsilon$  comme il est possible que  $c_1$  ne soit pas égal à  $c$ , mais ces quatre quantités seront liées entre elles et peut-être à d'autres propriétés des grains, au cas où la valeur de  $c$  par exemple ne suffirait pas à les représenter.

Des expériences relativement récentes de VANONI montrent d'ailleurs que  $\varepsilon_1$  n'est pas égal à  $\varepsilon$ .

Mais on voit que cette théorie du maintien en suspension dont on distingue maintenant les grandes lignes donnera uniquement **la courbe de la concentration le long d'une verticale en fonction de la valeur en un point**, qui peut être pris par exemple au voisinage du fond. C'est précisément pour essayer de déterminer cette valeur que certains auteurs ont étudié plus spécialement la mise en suspension des matériaux à partir du fond.

d) **Mise en suspension :**

LANE et KALINSKE ont abouti, après une

étude théorique et un calcul plus ou moins discutable, à une relation entre la concentration d'un matériau donné au voisinage du fond  $n_0$  et le pourcentage de ce matériau dans le fond  $\Delta F(c)$  en fonction d'un paramètre

$$t_c = \frac{c}{\sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}}}$$

Les observations dans la nature n'ont pas vérifié cette relation mais ont confirmé l'importance du paramètre  $t_c$  celui-ci semblait tendre vers 1 lorsque le rapport  $n_0/\Delta F(c)$  c'est-à-dire la concentration, tendait vers 0, ce qui voudrait dire qu'un courant ne transporterait pas en état d'équilibre des grains pour lesquels  $t_c$  supérieur à 1 (voir fig. 19). Toutefois, une étude expérimentale postérieure de KALINSKE et HSIA ont montré que le problème était moins simple : il interviendrait également le rapport du diamètre  $d$  des grains à l'épaisseur du film laminaire  $\delta$ . En donnant à  $\delta$  la valeur (fig. 20).

$$\delta = N \frac{\nu}{\sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}}}$$

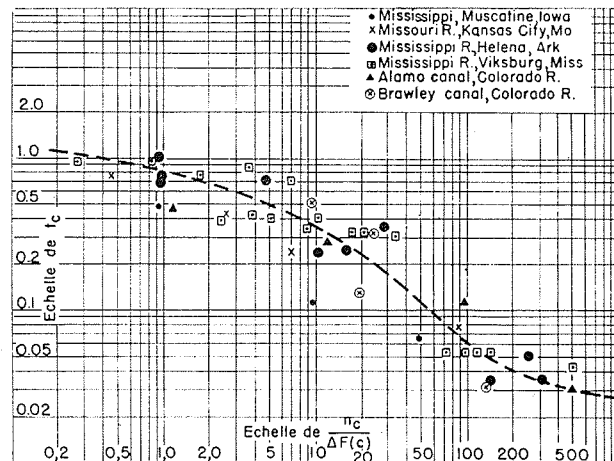


Fig. 19

Valeurs de  $\frac{n_0}{\Delta F(c)}$  en fonction de  $t_c$ .  
d'après les données naturelles

V. **CONCLUSION**

Nous ne pouvons, au terme de cette revue obligatoirement rapide et certainement incomplète des nombreux travaux qui ont été faits sur la question, prétendre avoir fait le point du problème du débit solide des cours d'eau.

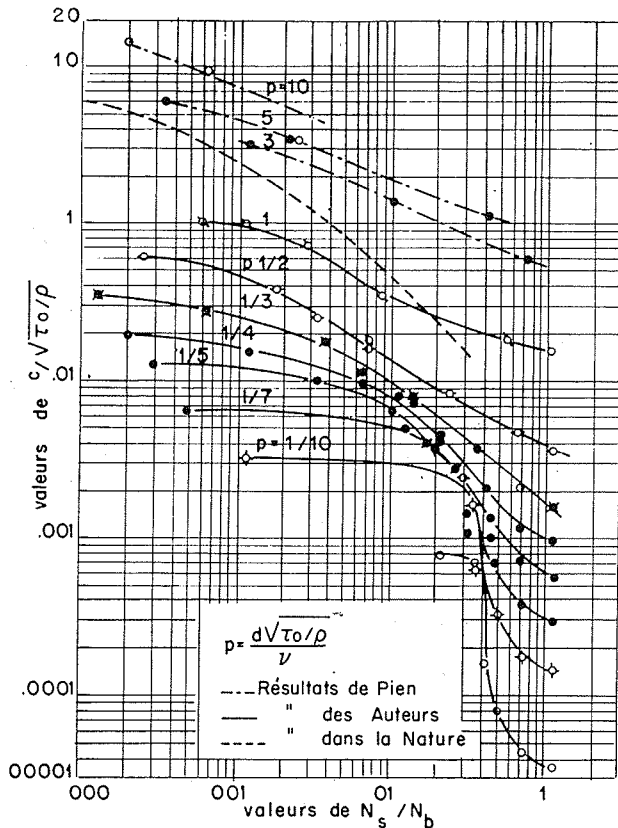


Fig. 20

Nous avons pu cependant nous rendre compte de la complexité des phénomènes et du nombre de paramètres qui entrent en jeu.

Nous avons vu que des mesures, dont certaines paraissent a priori très simples, exigent au contraire des précautions nombreuses et délicates, présentent d'énormes difficultés si l'on veut en déduire des résultats sinon précis, du moins utilisables.

Nous nous sommes aperçu que si certaines formules modernes de charriage, appuyées sur des expériences sérieuses et nombreuses, présenteraient toutes garanties dans le domaine où elles avaient été établies, il était dangereux de vouloir les extrapoler. Cela tient vraisemblablement au fait que certains paramètres fondamentaux, dont la prise en compte est malheureusement très délicate, ont été omis.

La turbulence en particulier influe beaucoup sur le charriage et les érosions que l'on observe à l'aval des diffuseurs de turbine en sont bien la preuve, encore que les tourbillons que l'on

observe alors dépassent peut-être le domaine proprement dit de la turbulence.

L'étude de la granulométrie des matériaux n'a peut-être pas été assez poussée, d'une part en ce qui concerne l'influence d'une granulométrie étendue sur le charriage, d'autre part en ce qui concerne l'influence des dimensions elles-mêmes des grains. Il semble bien, en effet, que les irrégularités des phénomènes, entraînant un changement de coefficient dans les formules sinon un changement total de formule de commencement d'entraînement aux environs de 1 à 2 mm., se répercutent sur le charriage lui-même, ainsi que le montrent les essais d'EGUIAZAROV.

Pour la suspension, si l'accord semble fait maintenant sur l'opinion émise en 1650 par VARENIUS (Geographic Generalis, Amsterdam, cité par LEIGHLY) que la présence de matières solides dans l'eau était due à « varia et perpetua particularum agitatio », il n'en reste pas moins à préciser :

— d'une part : l'influence de la turbulence sur la vitesse de chute d'un grain isolé ;

— d'autre part, la relation entre l'agitation des particules liquides et celle des particules solides.

Enfin, quand bien même le maintien en suspension dans un courant uniforme tant au point de vue de l'écoulement qu'au point de vue de la turbidité, serait parfaitement connu, il resterait encore à éclaircir le problème du dépôt.

Si les travaux de LANE, KALINSKE et HSIA tendent à mettre en évidence la grosseur limite à partir de laquelle des matériaux sont mis en suspension par un courant donné, on ne sait pas encore exactement comment ce même courant laissera se déposer les dits matériaux, ni surtout quelle sera la longueur nécessaire à ce dépôt.

Or, c'est là le problème essentiel de la décanation.

Actuellement, on est donc encore obligé d'avoir recours à l'expérience directe dans la nature. Mais on peut espérer que, dans un avenir assez proche, la théorie du phénomène sera suffisamment avancée pour qu'on puisse expliquer les résultats des constructeurs qui ont une longue expérience de ce genre d'ouvrage.



#### LA RETENUE DU SAUTET DURANT UNE VIDANGE

Les retenues des grands barrages permettent souvent des observations particulièrement fructueuses dans le domaine des transports solides. La photographie ci-dessus représente la retenue du barrage du SAUTET, sur le Drac, durant une vidange (en février 1948) : la vue est prise de la rive droite vers l'amont ; la cote de la retenue normale est au-dessus de la limite supérieure du cliché. En exploitation, cette zone est recouverte de plusieurs dizaines de mètres d'eau.

La rivière a creusé des méandres dans les dépôts et l'on voit nettement apparaître sur la rive droite, deux terrasses d'érosion.

Il est intéressant de constater que, même dans la partie amont de la retenue, on ne décèle pas encore d'accumulation de matériaux se déplaçant normalement sur le fond ; seuls les éléments fins normalement charriés en suspension ont occasionné des dépôts. Et pourtant, le barrage est en exploitation depuis près de quinze ans et le Drac est une rivière qui charrie relativement beaucoup.