Le Rhône à Lyon

Etude de l'entraînement des galets à l'aide de traceurs radioactifs

Essai pour l'extension de la formule de Meyer-Peter
au domaine du charriage partiel

A study of pebble movements in the Rhone by means of radioactive tracers

An attempt to extend the Meyer-Peter formula to the partial transport range

PAR

MM. RAMETTE ET HEUZEL

INGÉNIEURS AU LABORATOIRE NATIONAL D'HYDRAULIQUE, CHATOU

Illustration des techniques de « marquage » des galets à l'aide d'éléments de tantale radioactifs, d'immersion, puis de détection par un film réalisé à l'occasion d'une expérience effectuée dans le Rhône peu en aval du confluent de la Saône.

Examen du cheminement des galets détectés après des crues du Rhône par une série de campagnes. Détermination des forces tractrices de début d'entraînement en fonction des dimensions des galets qui varient entre 25 et 75 mm. Critère de début de charriage total à partir duquel les formules de charriage de Meyer-Peter sont applicables. Dans le domaine du charriage partiel, possibilité de donner un ordre de grandeur du débit solide par l'application des formules de Meyer-Peter à différentes tranches granulométriques, connaissant les conditions de début d'entraînement des éléments constituant ces tranches.

Description of techniques used in an experiment in the Rhone a short distance below its confluence with the Saone, whereby pebbles were marked with radio-active tantalum, placed in the river, and then followed by a photo-detection method.

Examination of recorded pebble travel data resulting from a series of measurements in the Rhone after a high water period. Determination of the forces required to set various pebble sizes in motion (between 25 mm and 75 mm). Identification of an initial total transport criterion, as from which the Meyer-Peter formulae are applicable. Within the partial transport range, an approximate value can be determined for the solid flow rate by applying the Meyer-Peter formulae to various grain size ranges, providing the conditions for the initial setting in motion of the materials in these ranges are known.

Dans le cadre des problèmes hydrauliques posés par l'aménagement de la chute de Pierre-Bénite, la Compagnie Nationale du Rhône a demandé au Laboratoire de Chatou d'étudier les transports solides par charriage sur les premiers kilomètres du Rhône en aval de son confluent avec la Saône.

Des problèmes identiques s'étaient posés à l'occasion de l'étude des aménagements du tiers central du Rhône à Donzère-Mondragon, Montélimar, Baix, etc. Ils avaient été résolus d'une

façon satisfaisante à partir des formules expérimentales de charriage de Meyer-Peter (1).

C'est donc à cette même formule que nous pensions recourir pour cette nouvelle étude.

Un des termes importants de la formule de Meyer-Peter est la force tractrice de début de

(1) Communication au 7^e Congrès de l'A.I.R.H. à Lisbonne en juillet 1957, par MM. GEMAEHLING, GINOCCHIO, CHABERT : « Comparaison entre les évaluations théoriques et expérimentales du débit solide dans le tiers central du Rhône ».

charriage généralisé : τ_0 qui entre dans la formule connue : $g = k(\tau - \tau_0)^{3/2}$. En général on adopte comme valeur de τ_0 la force tractrice correspondant à un débit tel qu'un appareil, du genre hydrophone par exemple, détecte un déplacement de fond des galets. Dire que ce déplacement affecte tous les galets est dans ces conditions difficile sinon impossible à déterminer; τ_0 est donc connu assez approximativement; une telle approximation a en fait assez peu d'importance si les valeurs de τ sont très supérieures à τ_0 . Il en est bien ainsi dans le tiers central du Rhône; dans la région lyonnaise par contre, les pentes du fleuve, et de ce fait les forces tractrices, sont beaucoup plus faibles; τ_0 devait donc être déterminé avec plus de précision.

La méthode dite des traceurs permet de déterminer τ_0 ; elle consiste à marquer des galets pour permettre d'en suivre les déplacements; si les dimensions des galets marqués couvrent l'étendue granulométrique des alluvions, la valeur de τ_0 cherchée correspondra au débit minimal pour lequel tous les galets seront en mouvement.

I. — Marquage des galets

Les galets dont on veut suivre le déplacement sont « marqués » à l'aide d'un élément de tantale 182 radioactif. Cet élément, qui se présente sous la forme d'un fil de 5/10^{es} de mm de

diamètre et 1 cm de longueur environ, est introduit dans un trou borgne percé dans le galet; le trou est ensuite obturé par de la paraffine.

Le tantale radioactif émet un rayonnement gamma; sa période est de 111 jours; l'expérience montre qu'un galet « marqué » par le tantale est repérable pendant plus de 6 mois à l'aide d'un détecteur classique : compteur Geiger, oscillographe, etc.

II. — Dimension et caractéristiques des galets « marqués »

Les galets marqués sont divisés en trois catégories, dont les caractéristiques sont les suivantes :

CATÉGORIES	DIMENSIONS MOYENNES SUIVANT LES TROIS AXES PRINCIPAUX (mm)	NOMBRE DE GALETS MARQUÉS
I — Gros galets....	80 60 40	30
II — Galets moyens...	55 40 30	125
III — Petits galets....	30 24 15	250

FIG. 1
Courbe granulométrique
du Rhône
à Pierre-Bénite.

FIG. 3

Les diamètres intermédiaires 60, 40, 24 mm correspondent sensiblement aux dimensions définies par tamisage.

Dans chacune des catégories, les valeurs minimale et maximale des diamètres intermédiaires sont les suivantes :

CATÉGORIES	DIAMÈTRE INTER-MÉDIAIRE MOYEN (mm)	DIAMÈTRE	
		minimal	maximal
I	60	50	75
II	40	35	45
III	24	22	25

Chacune des trois catégories est repérée par ses diamètres intermédiaires extrêmes sur la courbe granulométrique moyenne des alluvions du Rhône (fig. 1).

Le poids spécifique moyen des galets est de 1,6 pesé sous l'eau.

III. — Immersion des galets

Les galets ont été immergés le 10 décembre 1959 en trois points repérés A, B, C sur la figure 2.

- en A les galets catégorie I,
- en B les galets catégorie II,
- en C les galets catégorie III.

IV. — Détection des galets

La détection s'est effectuée à l'aide de cinq compteurs Geiger du type 13 G 14 montés dans une sonde étanche en forme de V déplacée et maintenue à proximité du fond à partir d'un bateau (fig. 3). Les compteurs sont reliés à un intégrateur connecté à un microampèremètre enregistreur qui décèle le passage de la sonde

à proximité d'un galet marqué; le repérage du bateau par triangulation sur des points de rive permet ainsi de situer la position du galet.

Trois campagnes de détection ont été effectuées :

- La première du 16 au 18 décembre 1959,
 - La seconde du 8 au 21 janvier 1960,
- toutes deux intéressant les trois catégories de galets;
- La troisième s'est effectuée en deux phases :
 - du 16 au 18 mars 1960 pour les galets de catégorie I,
 - du 6 au 13 avril 1960 pour les galets de catégories II et III.

L'évolution du débit du Rhône, pendant la période comprise entre l'immersion et la fin de la troisième détection, est représentée sur la figure 4.

V. — Repérage des galets

Les zones de dispersion des galets détectés au cours des deux dernières campagnes sont représentées sur la figure 2.

PREMIÈRE CONSTATATION :

Les galets déplacés de leur point d'immersion sont repérés dans certains cas par unité; c'est ainsi que la troisième campagne de détection a permis de repérer au moins 80 % des galets de la catégorie III.

Une partie des galets de catégorie II est entraînée vers les épis situés en R.D. et dans ce cas leur détection est plus difficile.

DEUXIÈME CONSTATATION :

Certains galets de la catégorie I sont restés à leur point d'immersion malgré les débits relativement forts survenus pendant la période expérimentale : 2 750 m³/s le 4 janvier 1960, 3 200 m³/s le 6 mars 1960; la crue maximale en année moyenne est de l'ordre de 2 700 m³/s.

Des crues supérieures aux crues moyennes

Fig. 4
Evolution du débit
au cours de l'expérience
« Traceurs ».

sont donc incapables de déplacer des galets de dimensions au maximum égales à 75 mm alors que le d_{90} des galets atteint 90 mm environ; autrement dit, en année moyenne le charriage n'est pas généralisé; l'application de la formule de Meyer-Peter sous son aspect classique est de ce fait impossible pour le calcul du débit solide.

Pour tourner la difficulté, nous avons cependant tenté de faire le calcul avec cette même formule en l'appliquant successivement à une suite de domaines partiels couvrant l'étendue du

domaine granulométrique des galets; cette méthode, que nous justifierons à la fin de cet exposé, nécessite la connaissance de la force tractrice moyenne de début d'entraînement des galets constituant chacun des domaines granulométriques considérés.

Les résultats de l'expérience « traceurs » et d'une campagne de mesure au sondeur hydrophone permettent de déterminer la force tractrice de début d'entraînement des trois catégories de galets immergés.

FORCES TRACTRICES DE DÉBUT D'ENTRAÎNEMENT DES GALETS

I. — Interprétation des résultats des deuxième et troisième campagnes de détection

— Après la crue de 2 700 m³/s, certains galets de la catégorie I sont restés au point A d'immersion.

— Les galets de la catégorie II se sont tous très nettement déplacés.

— Les galets de la catégorie III se sont tous déplacés; certains sont cependant restés à proximité immédiate de leur point C d'immersion.

On peut *a priori* poser que les gros galets se déplacent moins aisément que les galets de plus faible dimension, ce qui permet de dire, d'après les remarques précédentes, que les conditions d'écoulement au maximum de la crue de 2 700 m³/s étaient telles :

a) que les plus gros galets de la catégorie I n'ont pas été entraînés;

b) que les plus gros galets de la catégorie II ont tous été entraînés;

c) que les plus gros galets de la catégorie III étaient à la limite de leur stabilité.

Si τ_D est la force tractrice de début d'entraînement d'un galet de diamètre D et τ la force exercée sur ce galet, on peut écrire :

— *Galets de catégorie I :*

($D_{\max} = 75$ mm, $D_{\min} = 50$ mm) :

$$\left. \begin{array}{l} \tau_{75} > \tau \\ \tau_{50} < \tau \end{array} \right\} \text{ au point A pour 2 700 m}^3/\text{s};$$

— *Galets de catégorie II :*

($D_{\max} = 45$ mm) :

$$\tau_{45} < \tau \text{ au point B pour 2 700 m}^3/\text{s};$$

— *Galets de catégorie III :*

($D_{\max} = 25$ mm) :

$$\tau_{25} \# \tau \text{ au point C pour 2 700 m}^3/\text{s}.$$

De même, les résultats de la troisième campagne de détection montrent qu'après la crue de 3 200 m³/s, tous les galets se sont déplacés, sauf les plus gros galets de la catégorie I. On peut alors écrire :

— *Galets de catégorie I :*

$$\tau_{75} > \tau \text{ au point A pour 3 200 m}^3/\text{s};$$

— *Galets de catégorie II :*

$$\tau_{45} < \tau \text{ au point B pour 3 200 m}^3/\text{s};$$

— *Galets de catégorie III :*

$$\tau_{25} < \tau \text{ au point C pour 3 200 m}^3/\text{s}.$$

Notons, pour compléter les renseignements que la campagne de mesure avec traceurs nous a apportés, que des sondages effectués en mars 1957 à l'aide d'un détecteur hydrophonique dans la région de Pierre-Bénite, ont montré que le tout début d'entraînement des galets avait lieu pour un débit voisin de 1 500 m³/s.

II. — Détermination des forces tractrices aux points d'immersion pour les débits de 2 700 et 3 200 m³/s

Les pentes moyennes de la ligne d'énergie pour les débits de 2 700 m³/s et 3 200 m³/s dans la région du lit intéressée par l'expérience sont les suivantes :

$$Q = 2\,700 \text{ m}^3/\text{s} \quad J = 0,325 \cdot 10^{-3}$$

$$Q = 3\,200 \text{ m}^3/\text{s} \quad J = 0,342 \cdot 10^{-3}$$

Si l'on tient compte du fait que la perte d'énergie totale de l'écoulement est due au frottement sur les berges, aux irrégularités des

fonds (dunes, épis) et, ce qui nous intéresse, au travail dépensé pour le déplacement des matériaux de fond, l'expérience montre que la pente J_e de la ligne d'énergie à prendre en compte est égale à :

$$J = \frac{Q_s}{Q} \left(\frac{k_s}{k_r} \right)^{3/2}$$

Q est le débit total;

Q_s est le débit qui participe au charriage sur le fond;

k_s est le coefficient global de rugosité de Strickler;

k_r est le coefficient de rugosité de Strickler des matériaux de fond.

k_r est de l'ordre de 40, c'est la valeur obtenue par la relation connue :

$$k = \frac{26}{D_{90}^{1/6}} ;$$

c'est aussi la valeur déterminée à partir des caractéristiques des écoulements à faible débit dont l'énergie n'est effectivement dépensée que par frottement sur les galets.

k_s est aisément calculable pour les débits considérés :

$$k_s = \frac{Q}{SR^{2/3} J^{1/2}}$$

Q_s/Q est plus délicat à déterminer; nous sommes restés dans la gamme des valeurs calculables dans des cas simples, et pour 2 700 ou 3 200 m³/s nous avons adopté $(Q_s/Q) = 0,86$; l'erreur relative probable sur cette valeur n'excède certainement pas 10 %.

En définitive, les pentes J_e calculées pour les débits de 2 700 et 3 200 m³/s sont sensiblement les mêmes et égales à $0,24 \cdot 10^{-3}$ à moins de 10 % près.

Les forces tractrices τ_s aux points A, B, C d'immersion, égales à $h J_e$ (h hauteurs d'eau en mètres), sont les suivantes :

Q m ³ /s	τ (tonnes/m ²)		
	A	B	C
2 700	$1,78 \cdot 10^{-3}$	$1,76 \cdot 10^{-3}$	$1,40 \cdot 10^{-3}$
3 200	$1,93 \cdot 10^{-3}$	$1,91 \cdot 10^{-3}$	$1,54 \cdot 10^{-3}$

En outre la force tractrice maximale pour le débit de 1 500 m³/s à partir duquel on détecte un début de charriage est :

$$\tau = h_{\max} J_e = 6,15 \cdot 0,238 \cdot 10^{-3} = 1,50 \cdot 10^{-3} \text{ t/m}^2$$

En admettant comme peu probable que ce début de charriage concerne des éléments supérieurs à 45 mm, les inégalités citées précédemment s'écrivent alors de la façon suivante :

$$\begin{aligned} \tau_{75} &> 1,93 \cdot 10^{-3} > 1,78 \cdot 10^{-3} \\ 1,50 \cdot 10^{-3} &< \tau_{50} < 1,78 \cdot 10^{-3} \\ 1,50 \cdot 10^{-3} &< \tau_{45} < 1,76 \cdot 10^{-3} \\ \tau_{25} &\# 1,40 \cdot 10^{-3} \end{aligned}$$

On peut encore écrire, en supposant les valeurs de τ peu différentes des moyennes arithmétiques des deux membres de chaque inégalité :

$$\begin{aligned} \tau_{75} &> 1,93 \cdot 10^{-3} \\ \tau_{50} &\# 1,64 \cdot 10^{-3} \\ \tau_{45} &\# 1,63 \cdot 10^{-3} \\ \tau_{25} &\# 1,40 \cdot 10^{-3} \end{aligned}$$

A partir de ces valeurs moyennes, le coefficient d'entraînement A , qui entre dans la relation admise par de nombreux auteurs :

$$\tau = A \bar{\omega}_s'' D,$$

a été calculé pour les différents diamètres :

— Pour $D = 75$ mm :

$$A > \frac{1,93 \cdot 10^{-3}}{\bar{\omega}_s'' \times 75 \cdot 10^{-3}} = 0,016 \text{ avec } \bar{\omega}_s'' = 1,6 \text{ t/m}^3;$$

— Pour $D = 50$ mm :

$$A \# \frac{1,64 \cdot 10^{-3}}{\bar{\omega}_s'' \times 50 \cdot 10^{-3}} = 0,0205;$$

— Pour $D = 45$ mm :

$$A \# 0,0226;$$

— Pour $D = 25$ mm :

$$A \# 0,0350.$$

III. — Premières conclusions tirées des essais

1. En admettant que pour $D = 75$ mm, A ne dépasse pas la valeur 0,02, on constate que A est décroissant au fur et à mesure que le diamètre augmente pour tendre probablement vers une valeur constante peu différente de 0,02.

Autrement dit, la stabilité relative des galets varie en raison inverse de leur diamètre, ce qui peut s'expliquer par la « protection » qu'assurent les gros galets vis-à-vis des galets de moindre dimension.

2. Pour les débits inférieurs à 1 500 m³/s, 1 300 m³/s par exemple, aucun charriage n'est détecté; à ce débit de 1 300 m³/s, la force tractrice maximale dans la région intéressée par l'expérience est de 1,30.10⁻³ t/m² environ; si l'on adopte une valeur constante du coefficient d'entraînement, soit $A = 0,0350$ par exemple, tous les galets dont le diamètre est inférieur à :

$$D = \frac{1,30 \cdot 10^{-3}}{\bar{\omega}_s \times 0,035} = 24 \text{ mm}$$

devraient se déplacer; or il n'en est rien, ce qui confirme bien la première remarque : A ne peut être constant; pour les faibles diamètres, il croît au fur et à mesure que D décroît.

Nous verrons quelle loi $A = f(D)$ il est possible d'adopter, puis, de quelle façon utiliser les résultats trouvés pour déterminer le débit solide de charriage à partir des hypothèses et des résultats expérimentaux exposés au chapitre suivant.

HYPOTHÈSES POUR LE CALCUL DU DÉBIT SOLIDE DANS LE DOMAINE DU CHARRIAGE PARTIEL

Soit τ_x la répartition de force tractrice dans une section transversale moyenne du lit de la rivière.

τ_0 la force tractrice de début de charriage d'une catégorie de galets $D_0 D_1$.

n le pourcentage en poids des galets de catégorie $D_0 D_1$, c'est-à-dire compris entre les diamètres D_0 et D_1 . n est déterminé à partir de

la courbe granulométrique moyenne de l'ensemble des alluvions.

Le débit solide total g , dans l'hypothèse où le lit serait constitué uniquement de galets de catégorie $D_0 D_1$, est de la forme :

$$g = \int_{x=0}^{x=l} k (\tau - \tau_0)^{3/2} dx$$

FIG. 5
Granulométrie des alluvions
sur le modèle de la Tinée.

en désignant par l la largeur du lit sur laquelle τ est plus grand que τ_0 . En fait, le pourcentage en poids de la catégorie D_0D_1 étant n , il paraît logique d'adopter :

$$g_{D_0D_1} = n \int_{x=0}^{x=l} k (\tau - \tau_0)^{3/2} dx$$

Ce même calcul peut être répété pour chacune des catégories D_0D_1 , D_1D_2 etc., couvrant l'ensemble du domaine granulométrique; le débit solide total est alors égal à la somme des débits partiels ainsi calculés :

$$G = \Sigma g$$

APPLICATION DE LA MÉTHODE A UN CAS CONCRET.

Une telle méthode est-elle justifiée?

Pour la vérifier, nous l'avons appliquée au calcul du débit solide d'un torrent dont la représentation sur modèle à une échelle relativement grande, 1/12,5, avait permis l'étude expérimentale précise des débits solides précisément dans le domaine du charriage partiel. Il s'agit de la Tinée à Isola représentée sur modèle pour l'étude de la chute de Valabres.

Pour le détail de cette étude nous reportons à la note de MM. Braudeau et Nizery parue dans les « *Proceedings* » de septembre 1953 et intitulée « Variation in grain size distribution of bed load in a river section ».

La courbe granulométrique des alluvions de la Tinée est représentée sur la figure 5.

Pour un débit de 27 l/s modèle, l'expérience a montré que le débit solide total du modèle était de 0,019 kg/s; les débits solides partiels par tranche granulométrique sont les suivants :

D (mm)	% EN POIDS DES ÉLÉMENTS CHARRIÉS	DÉBIT SOLIDE (kg/s)
30 < D < 40	0	0
20 < D < 30	0	0
10 < D < 20	8	8
5 < D < 10	7	1,3 · 10 ⁻³
3 < D < 5	10	1,9 · 10 ⁻³
2 < D < 3	13	2,5 · 10 ⁻³
1 < D < 2	30	5,7 · 10 ⁻³
0,5 < D < 1	40	7,6 · 10 ⁻³
Total	100 %	19 · 10 ⁻³

Sans entrer dans le détail des calculs, disons qu'en appliquant la méthode proposée, nous avons cherché à déterminer la valeur de τ_0 pour chacune des catégories de galets : 30 < D < 40, 20 < D < 30, etc., de façon à ce que les valeurs

du débit solide calculé par catégorie de galets soient égales aux valeurs expérimentales trouvées.

Les valeurs de τ_0 ainsi déterminées et les valeurs du coefficient d'entraînement qui s'en déduisent sont les suivantes :

D_m	τ_0 (t/m ²)	D_{moyen} (mm)	$A = \frac{\tau_0}{\bar{\omega}''_s D_{moyen}}$
30 < D < 40	> 4,8 · 10 ⁻⁴	35	> 0,012
20 < D < 30		25	
10 < D < 20	4,8 · 10 ⁻⁴	15	0,020
5 < D < 10	2,7 · 10 ⁻⁴	7,5	0,0225
3 < D < 5	2,1 · 10 ⁻⁴	4	0,0327
2 < D < 3	1,85 · 10 ⁻⁴	2,5	0,0460
1 < D < 2	1,85 · 10 ⁻⁴	1,5	0,077
0,5 < D < 1	1,75 · 10 ⁻⁴	0,75	0,145

Les valeurs de τ_0 trouvées sont acceptables si le calcul du débit solide effectué avec ces mêmes valeurs et pour des conditions d'écoulement différentes donne des résultats proches des résultats expérimentaux.

Pour un débit de 91 l/s, en admettant une valeur constante 0,02 du coefficient A pour les catégories 20 < D < 30 et 30 < D < 40, les calculs ont donné les résultats suivants, que nous comparons aux valeurs expérimentales :

D (mm)	DÉBIT SOLIDE MESURÉ EN (10 ⁻² kg/s)	DÉBIT SOLIDE CALCULÉ (10 ⁻² kg/s)
30 < D < 40	0	0
20 < D < 30	2,25	0,4
10 < D < 20	6,75	5,2
5 < D < 10	5,85	10,4
3 < D < 5	5,40	5,8
2 < D < 3	4,95	5,3
1 < D < 2	9,45	12,9
0,5 < D < 1	10,35	13
Total	45 · 10 ⁻² kg/s	53 · 10 ⁻² kg/s

On constate localement certains écarts, mais les débits solides globaux expérimentaux et calculés sont équivalents à 15 % près. Cette différence relativement faible entre l'expérience et le calcul nous a paru justifier l'utilisation de notre méthode au calcul du charriage du Rhône.

Une première synthèse des études et expériences qui viennent d'être relatées est auparavant nécessaire :

1. Il apparaît que les premières conclusions tirées des expériences « traceurs » dans le Rhône se confirment; en effet A croît inversement au

diamètre et tend vers la même limite 0,02 pour les plus gros éléments.

2. Les éléments les plus fins de la courbe granulométrique commencent à se déplacer pour une même valeur de la force tractrice :

$$1,80 \cdot 10^{-4} \text{ t/m}^2$$

environ dans le cas particulier du modèle de la Tinée à Isola. C'est-à-dire que pour les valeurs du diamètre d inférieures à une certaine limite D , le coefficient d'entraînement A est une fonction hyperbolique de d :

$$A = \frac{\tau_0}{\omega'' d}$$

Cette observation est importante; en effet la force tractrice de tout début de charriage du Rhône est, nous l'avons noté précédemment, de l'ordre de $1,40$ à $1,50 \cdot 10^{-3} \text{ t/m}^2$; la force tractrice de début d'entraînement des galets de

25 mm est précisément de $1,40 \cdot 10^{-3} \text{ t/m}^2$, c'est-à-dire que tous les galets de diamètre inférieur à 25 mm se déplacent simultanément pour une valeur de τ_0 égale à $1,40 \cdot 10^{-3} \text{ t/m}^2$.

Ces constatations permettent de compléter les données nécessaires au calcul du charriage du Rhône à Pierre-Bénite, en particulier d'établir la relation $\tau_0 = f(D)$.

$$\text{pour } D \geq 50 \text{ mm } \tau_0 = 0,02 \omega'' D \text{ (D en mètres)} \\ = 0,032 D$$

$$\text{pour } D = 45 \text{ mm } \tau_0 = 1,63 \cdot 10^{-3} \text{ t/m}^2$$

$$\text{pour } D \leq 25 \text{ mm } \tau_0 = 1,40 \cdot 10^{-3} \text{ t/m}^2$$

VALEURS DU DÉBIT SOLIDE DU RHÔNE.

En définitive, les valeurs calculées du débit solide du Rhône à Pierre-Bénite pour cinq catégories de galets et en fonction du débit liquide, sont les suivantes :

Q (m³/s)	DÉBIT SOLIDE (en tonnes/jours)					DÉBIT SOLIDE TOTAL (en t/j)
	$1 < D < 25$	$25 < D < 45$	$45 < D < 60$	$60 < D < 85$	$85 < D < 120$	
1 500	# 0					0
2 000	130					130
2 500	540	150				690
3 000	1 060	400	10			1 470
4 000	3 400	1 640	220			5 260
5 300	6 550	3 950	955	240	25	11 720

Le débit solide annuel, calculé à partir de la courbe moyenne des débits liquides classés, serait ainsi de 35 000 tonnes; ce chiffre est très faible comparé à la valeur du débit solide dans le tiers central du Rhône, qui a été évalué par

voies expérimentale et théorique à 700 000 tonnes en moyenne; les pentes plus faibles et les débits moins élevés du Rhône dans la région lyonnaise expliquent cette différence de capacité de charriage.

CONCLUSION

L'expérience réalisée dans le Rhône à l'aide de galets marqués a donc permis de mettre en évidence qu'à l'intérieur d'une famille de galets ayant une granulométrie suffisamment étendue, le coefficient d'entraînement A varie en raison inverse du diamètre et tend vers une limite voisine de 0,020 pour les galets les plus gros. Une telle conclusion n'est d'ailleurs pas en contradiction avec ce qui est connu; dire par exemple, avec Meyer-Peter, que le début de charriage total a lieu pour une force tractrice :

$$\tau_0 = 0,047 \omega'' d_{\text{moyen}}$$

A ce propos, il nous paraîtrait plus juste de définir la valeur de τ_0 non pas à partir de d_{moyen} , qui est fonction de la courbe granulométrique toujours très indéterminée dans la gamme des faibles diamètres, mais à partir d'une dimension caractéristique des gros diamètres, en général mieux connus, et par exemple du d_{95} .

On aurait ainsi $\tau_0 = 0,020 \omega'' d_{95}$, expression

plus satisfaisante, qui exprime que, pour cette valeur de τ_0 , les galets de diamètre égal à d_{95} sont à la limite de leur stabilité et que τ_0 correspond bien en conséquence au seuil du charriage généralisé.

Par ailleurs, l'application de la méthode de calcul du débit solide au cas particulier de la Tinée est satisfaisante précisément si le coefficient d'entraînement varie en fonction du dia-

mètre des galets selon une loi analogue à celle qui a été déduite de l'expérience « traceurs ». On ne peut prétendre *a priori* qu'une telle analogie justifie dans tous les cas les hypothèses de calcul formulées; elle est cependant suffisamment nette dans le cas étudié pour que se poursuive la vérification de la méthode de calcul proposée, qui pourra sans doute être complétée ou améliorée.

DISCUSSION

Président : M. de ROUVILLE

M. le Président remercie M. RAMETTE qui a présenté la communication et estime que la technique exposée requiert des moyens financiers assez importants.

M. RAMETTE indique que cette technique nécessite effectivement un matériel assez coûteux; ce matériel, maintenant mis au point, est cependant utilisable pour de nombreuses détections en mer ou en rivière; son prix peut donc être amorti rapidement.

M. le Président signale que ce procédé est plus simple à appliquer en rivière qu'en mer où les galets se déplacent en dents de scie et sont donc plus difficiles à suivre avec des vedettes.

M. RAMETTE dit qu'en rivière le cheminement des galets est moins indéterminé qu'en mer, ce qui facilite en effet leur détection; par contre, les vitesses souvent plus importantes en rivière rendent plus difficiles les manœuvres du bateau.

Sur la demande de M. le Président, M. RAMETTE souligne que le coefficient d'entraînement des galets qu'il a déterminé est en général plus fort pour les faibles diamètres mais plus faible vers les diamètres élevés que la valeur donnée par Meyer-Peter : 0,047, qui entre dans la relation $\tau_0 = 0,047 \bar{w}'' d_{moyen}$; c'est-à-dire qu'en moyenne il ne semble pas y avoir de contradiction. La formule de charriage de Meyer-Peter reste valable lorsque les forces tractrices sont sensiblement supérieures à celles de début d'entraînement de tous les galets; lorsqu'elles en sont voisines ou inférieures, il est nécessaire de considérer les conditions d'entraînement des différentes tranches granulométriques; c'est ainsi que l'on a constaté que les gros galets étaient relativement moins stables que les petits galets.

M. le Président pense qu'il y a une grosse influence de l'imbrication des galets en surface.

M. RAMETTE répond qu'il y a, en effet, lorsque le charriage n'est pas généralisé, un effet de « pavage » des gros éléments; ce même phénomène est d'ailleurs observé sur modèle; les hypothèses formulées pour le calcul du débit solide en tiennent implicitement compte, puisque les comparaisons entre le calcul et l'expérience sont satisfaisantes; il est certain que de nombreuses applications de la méthode proposée seront encore nécessaires avant de pouvoir tirer une conclusion définitive s'il en est une dans ce domaine complexe.

M. PARDÉ estime que le charriage annuel de 35 000 tonnes, trouvé par M. RAMETTE à Pierre-Bénite, est très peu élevé.

M. RAMETTE dit que le faible charriage du Rhône dans la région de Pierre-Bénite est confirmé par l'observation : une souille de dragage creusée dans le Rhône en amont du confluent avec la Saône ne recueille que fort

peu d'alluvions : la Saône n'apporte, elle aussi, que peu d'éléments; la majorité des éléments charriés en aval du confluent est arrachée aux fonds qui se creusent progressivement.

M. RAMETTE, sur la demande de M. PARDÉ, dit que le calcul du débit solide a été effectué sur un tronçon de 1 km environ, dont les profils en travers se ressemblaient suffisamment pour justifier le choix d'un profil moyen.

M. PARDÉ rappelle que les débits solides évalués à Donzère-Mondragon étaient sensiblement inférieurs aux chiffres prévus, et que ceux qu'on trouve ici, environ 30 000 t par an, sont encore beaucoup plus faibles.

M. RAMETTE pense en effet que les calculs donnent en général une limite supérieure du débit solide réel, qui est atteinte seulement s'il y a possibilité de saturation en matériaux charriés; dans le cas d'une capacité de charriage peu importante, comme à Pierre-Bénite, la saturation est plus facilement atteinte qu'à Donzère-Mondragon, c'est-à-dire que la valeur de 35 000 tonnes calculée est tout à fait vraisemblable.

M. GEMAEHLING rappelle d'abord les raisons pour lesquelles la Compagnie Nationale du Rhône a entrepris, au voisinage de la future chute de Pierre-Bénite, une campagne spéciale de mesures basées sur le cheminement des galets radioactifs.

La seule mesure directe du débit solide de charriage qui ait été entreprise jusqu'ici sur le fleuve, a été rendue possible par la présence des barrages de retenue du tiers central du Bas-Rhône. Nous avons déjà rendu compte au Comité Technique de la S.H.F. (séance du 28 juin 1957) du résultat des cinq premières années de mesures faites à Donzère. Le charriage moyen annuel ainsi déterminé par le sondage périodique des fonds a été de l'ordre de 350 000 m³ pendant la période 1952-1957. Depuis, les observations continuent tant à Donzère qu'à Montélimar et à Baix-le-Logis-Neuf, et on a entrepris de plus une étude systématique du débit solide de suspension en amont et en aval du confluent de l'Isère.

Grâce aux mesures faites, on a pu déterminer les constantes d'ajustement qui permettent l'application de la formule de Meyer-Peter dans la région de Donzère (voir communication D 21 au 7^e Congrès de l'A.I.R.H.). Appliquée brutalement à Pierre-Bénite, cette formule n'aurait donné que des résultats décevants pour la raison suivante. Le débit solide est en effet fonction de la différence de deux termes. L'un fait intervenir la force tractrice τ pour le débit considéré; l'autre, la force tractrice τ_0 correspondant au débit liquide Q_0 de début d'entraînement. Or, les crues qui comptent le plus, dans le charriage annuel moyen, ne sont pas, comme on serait tenté de le croire, les plus grandes crues, mais les crues moyennes, de beaucoup les plus fréquentes, et qu'on

peut appeler pour simplifier « crues efficaces ». Compte tenu de la fréquence respective des différents débits aux deux stations considérées, le débit efficace Q_e est de l'ordre de $2\,000\text{ m}^3/\text{s}$ à Pierre-Bénite situé en amont, et de $3\,000\text{ m}^3/\text{s}$ à Donzère, où le bassin versant est plus important. Ces débits sont entre eux approximativement dans le même rapport que les débits moyens. Or des essais à l'hydrophone ont montré qu'il n'en est pas de même pour les débits de début d'entraînement Q_0 ; ceux-ci sont pratiquement égaux ($1\,500\text{ m}^3/\text{s}$) pour les deux stations, les pentes étant beaucoup plus faibles à Pierre-Bénite qu'à Donzère.

Il en résulte les conséquences suivantes : à Donzère, où l'écart $Q_e - Q_0$ est notable ($1\,500\text{ m}^3/\text{s}$), le charriage moyen, qui est une fonction rapidement croissante de $\tau_e - \tau_0$, est important, et la formule de Meyer-Peter le donne avec une bonne précision. A Pierre-Bénite, où $Q_e - Q_0$ est plus modeste ($500\text{ m}^3/\text{s}$), le charriage est faible sans doute (il semble qu'il soit de l'ordre du vingtième du précédent), mais la formule le donne avec très faible précision. C'est pourquoi il y avait lieu de procéder à une détermination directe du débit solide à Pierre-Bénite même, et notamment une mesure précise de τ_0 .

Les mesures qui ont été faites, et dont M. RAMETTE a rendu compte, ont montré qu'il subsiste une deuxième source d'erreurs dans la détermination du charriage pour les débits peu supérieurs à Q_0 .

Il semble, en effet, que le coefficient d'entraînement A ne soit pas constant comme on l'admet ordinairement, mais dépende du diamètre des grains. D'après les chiffres qui viennent d'être cités, quand le diamètre des

matériaux double, la force tractrice de début d'entraînement τ_0 , au lieu d'augmenter de 100 % comme on l'admet souvent, semble ne croître que de 30 % sur la Tinée et de 15 % à Pierre-Bénite. Il convient de remarquer à ce sujet que, dans la granulométrie naturelle, il n'est pas exclu que la forme des grains varie en moyenne en fonction de la grosseur, ce qui pourrait expliquer certaines des différences constatées.

Quoi qu'il en soit, lorsque le charriage à étudier correspond à une granulométrie étendue, et qu'on se trouve dans un domaine de débits voisins de Q_0 , il y a intérêt à ne pas se contenter d'appliquer une formule globale où intervient un seul diamètre utile (le diamètre moyen par exemple), comme on le fait habituellement, mais à étudier le cheminement de chaque classe de matériaux. C'est la méthode fine qui vient d'être préconisée ici.

Les mesures faites à Pierre-Bénite ont permis de préciser le problème qui avait été posé (détermination du débit solide de charriage pour les débits modérés du Rhône), mais elles ouvrent des perspectives nouvelles qui mériteraient d'être confirmées ou précisées par de nouvelles expériences dans la nature ou sur modèle réduit.

M. CAULLEUX demande le pourcentage des galets retrouvés.

M. RAMETTE répond qu'on a retrouvé, environ, 80 % de galets moyens. Dans la région des épis, il était très difficile d'utiliser la sonde sans risque de l'endommager, et l'on a détecté relativement moins de galets.

M. le Président remercie et félicite M. RAMETTE de cette importante communication.

IMPORTANT BUREAU D'ÉTUDES

recherche :

JEUNE INGÉNIEUR HYDRAULICIEN

ayant expérience hydraulique agricole

pour poste Paris, comportant missions outre-mer

Ecrire à B 306 PRESS, 31, boulevard Bonne-Nouvelle, Paris (2°)