

Puissance hydraulique et dépôt de sédiments en eaux courantes

M. P. BORDAS, A. L. de O. BORGES

Institut de Recherches Hydrauliques (IPH), Université Fédérale du Rio Grande do Sul (UFRGS), CP 530, 90001 Porto Alegre, RS, Brésil

P. MEDEIROS,

Université de Maringá, PR, Brésil

Résumé La capacité maximum de transport solide d'un écoulement est une grandeur fondamentale pour le calcul des bilans sédimentologiques car elle régit la propagation des sédiments de fond dans le lit des cours d'eau. Elle est généralement estimée à partir de formules de charriage dont l'emploi est problématique, tant les résultats qu'elles fournissent peuvent diverger. Cherchant à remédier à cette difficulté une recherche fondamentale a été entreprise à l'IPH pour définir les conditions hydrauliques d'écoulement qui président à la formation de dépôts en eaux courantes. Ces recherches ont permis d'établir des relations plus précises que celles des formules de charriage classiques, entre la capacité maximum de transport, la puissance hydraulique de l'écoulement, la taille des sédiments transportés et la rugosité du fond du lit.

Stream power and sediment deposition in flowing water

Abstract Knowledge of maximum solid load in a streamflow is essential for the calculation of sediment budgets, since it governs bed load routing on the stream bed. It is generally estimated using bed load formulae which are difficult to apply since their results may vary greatly. In an attempt to solve this problem, basic research was begun at IPH to define the hydraulic streamflow conditions which govern sediment deposition in flowing water. From these studies, relations were defined between maximum sediment load, stream power, grain size of sediments transported, and bed roughness with a higher precision than classical bed load formulae.

NOTATION

A, B	coefficients
d_i	diamètre des particules solides transportées (L)
d_f	diamètre caractéristique des aspérités du fond (L)
g	accélération de la pesanteur ($L T^{-2}$)
h	profondeur moyenne de l'écoulement (L)

I	penne de la ligne d'énergie
L	longueur du dépôt de fond (L)
q	débit liquide par unité de largeur ($L^2 T^{-1}$)
q_v	débit solide volumique par unité de largeur ($L^2 T^{-1}$)
R	coefficient de corrélation
V	vitesse moyenne de l'écoulement ($L T^{-1}$)
X	$= q_v/v$: adimensionnel caractérisant le débit solide
Y	$= \gamma q I / \gamma_s v$ ou $\tau g^{1/3} / \gamma_s v^{2/3}$ ou $V / (vg)^{1/3}$ selon le cas; adimensionnels caractérisant l'écoulement
Z_i	$= d_p g^{1/3} / v^{2/3}$; adimensionnel caractérisant les particules solides transportées
Z_f	$= d_f g^{1/3} / v^{2/3}$; adimensionnel caractérisant les aspérités du fond
Λ	$= Y Z_i^{-0.73} Z_f \alpha$
α	exposant caractérisant la rugosité du fond (voir Λ)
γ	poide spécifique du liquide ($M L^{-2} T^{-2}$)
γ_s	poide spécifique sec des particules solides ($M L^{-2} T^{-2}$)
Δt	temps d'injection des sédiments (T)
η	taux de dépôt sur le fond (0)
μ	viscosité dynamique ($M L^{-1} T^{-1}$)
ν	viscosité cinématique ($L^2 T^{-1}$)
ρ	masse spécifique du liquide ($M L^{-3}$)
ρ_s	masse spécifique des particules transportées ($M L^{-3}$)
τ	tension de cisaillement au fond ($M L^{-1} T^{-2}$)
$\phi(\dots)$	fonction de ...

INTRODUCTION

Le dépôt de sédiments en eaux courantes est l'un des deux phénomènes fondamentaux qui régissent le comportement du lit des cours d'eau, et, plus généralement, déterminent le bilan sédimentologique d'un bassin versant. Un calcul précis de ce bilan requiert la connaissance des conditions hydrauliques qui président à la formation des dépôts.

Or le phénomène du dépôt est bien moins connu que le processus inverse qu'est l'érosion. Ce manque d'intérêt apparent semble surtout découler d'une conception incomplète des phénomènes de transport solide, selon laquelle le débit solide par charriage correspondrait toujours au maximum de la capacité de transport de l'écoulement. Dans cette optique un dépôt se produira dès que la charge solide dépassera la capacité de transport donnée par une formule de charriage. Malheureusement la prolifération et l'imprécision de ces formules constituent une première et sérieuse difficulté pour apporter une réponse au problème.

Dans ces conditions, il semble logique de prendre le problème à l'envers et de chercher à définir directement l'expression de la capacité maximum de transport en partant du fait observable qu'est la formation d'un dépôt. Il est alors possible de caractériser les conditions hydrauliques pour lesquelles a lieu le dépôt et d'établir les relations qui permettront de prédéterminer sa

formation.

Une méthode d'étude systématique de la formation des dépôts basée sur cette idée est ici présentée, ainsi que les résultats les plus récents qu'elle a permis d'obtenir.

FORMATION DE DÉPÔT DE SÉDIMENTS EN EAUX COURANTES

Bases d'une méthode d'étude

Identification du dépôt La première difficulté consiste en définir le moment où l'on peut affirmer que le dépôt a commencé à se former. Ainsi qu'on ne peut dire, en pratique, que l'érosion d'un fond correspond à la mise en mouvement de quelques grains, on ne saurait identifier un dépôt par l'arrêt d'un grain isolé sur le fond! La définition finalement retenue est qu'il y a formation de dépôt lorsque "les particules solides transportées viennent au contact du fond, y demeurent au repos et le recouvrent d'une couche continue d'épaisseur à peu près égale à leur diamètre moyen".

Cette définition — sans doute restrictive pour les applications pratiques — a l'avantage (surtout lorsque le fond est fixé) de permettre de visualiser aisément le phénomène, et même de le quantifier. Cela a été fait par Costa (1974) qui définit pour ce faire un taux de dépôt:

$$\eta = 1.5 (q_v \cdot \Delta t / L d_i) \quad (1)$$

d'usage facile du fait que sa valeur critique correspond à une singularité de la courbe (q_v, η) (voir Fig. 1) qui coïncide presque toujours avec l'appréciation visuelle du débit du dépôt sur la définition qui en est donnée ci-dessus.

Lorsque le fond est mobile il n'en va plus ainsi et l'on doit recourir à des mesures de son profil pour identifier le début de formation du dépôt.

Conditions hydrauliques Par conditions hydrauliques qui président à la formation du dépôt on entend qu'il s'agit, pour un écoulement bidimensionnel permanent uniforme à surface libre (seul cas étudié jusqu'ici):

- soit de la vitesse V et de la profondeur h moyennes — ou de grandeurs associées (tension de cisaillement sur le fond τ , par exemple);
- soit du débit unitaire q — ou de grandeurs associées comme la puissance hydraulique unitaire $(\gamma q l)$.

Du fait que ces dernières sont des variables indépendantes relativement faciles à quantifier dans l'étude de bassins versants, la méthode leur donne préférence pour les avantages qui ont fait préconiser leur emploi par plusieurs chercheurs (Bagnold, 1960; Yang, 1972; par exemple, et pour les meilleurs résultats qu'elles permettent d'obtenir, comme il sera vu plus avant.

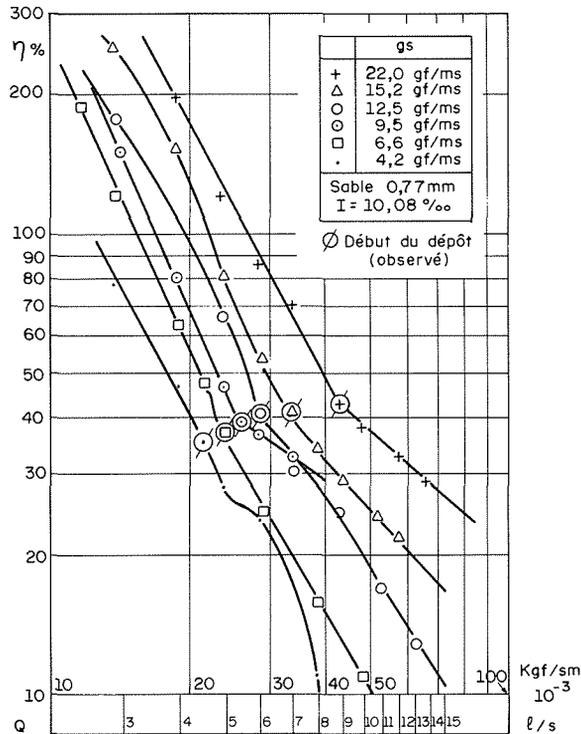


Fig. 1 Début de formation d'un dépôt; valeurs critiques du taux de dépôt.

Expression générale du dépôt La définition donnée au dépôt le fait dépendre directement du débit solide maximum transporté et permet, du fait qu'elle considère seulement ce qui advient après que les particules soient entrées en contact avec le fond, de réduire le nombre de variables à prendre en compte dans l'analyse du phénomène. Ainsi la formation du dépôt sera exprimée par une relation entre neuf variables, pour un fond non-cohésif de même nature que le sédiment transporté.

$$\phi_1 (q(\text{ou } h, \text{ ou } V), \rho, \mu, q_v, g, I, \rho_s, d_z, d_f) = 0 \tag{2}$$

Après emploi des techniques classiques de l'analyse dimensionnelle, l'expression précédente devient:

$$\phi_2 (q\sqrt{v}, q/v, I, \gamma/\gamma_s, d_g^{1/3}/v^{2/3}, d_f g^{1/3}/v^{2/3}) = 0 \tag{3}$$

ou plus simplement, en faisant apparaître la puissance hydraulique

$$\phi_3 (q\sqrt{v}, \gamma q I/\gamma_s v, d_g^{1/3}/v^{2/3}, d_f g^{1/3}/v^{2/3}) = 0 \tag{4}$$

Simplifiant les notations, la relation cherchée devient

$$\phi_3 (X, Y, Z_i, Z_f) = 0 \quad (5)$$

Lorsque les variables dépendantes sont utilisées, Y devient $\tau g^{1/3} / \gamma_s v^{2/3}$ ou $V/(vg)^{1/3}$.

Méthodologie La détermination des relations (5) propres à chaque cas est exclusivement expérimentale. Les essais pour ce faire consistent à injecter un débit solide constant dans un écoulement permanent uniforme et à en provoquer le dépôt par réduction progressive du débit liquide. La pente du canal varie d'une séquence d'essais à l'autre.

RECHERCHES EFFECTUEES

Gamme des variables étudiées Trois sables de granulométrie uniforme ont été utilisés tant pour revêtir les parois du canal que pour constituer les charges solides: $d_m = 0.77, 1.22$ et 1.98 mm avec des coefficients d'uniformité valant respectivement 1.24; 1.25; 1.20 et des poids spécifiques entre 2630 et 2700 kgf m⁻³. Les débits solides et liquides allaient de 1.10 à 22.5×10^{-3} kgf s⁻¹ m⁻¹ d'une part, et 1.70 à 15 l s⁻¹ m⁻¹ de l'autre. La pente des canaux variaient de 4 à 10 ‰ et les puissances hydrauliques de 0.10 à 1.23 W m⁻².

Les expériences réalisées par Pedroli (1963) à l'ETH de Zürich ont également été utilisées. Celles-ci étaient menées sur fond lisse avec des sables et graviers de diamètre compris entre 2.6 et 11.1 mm.

Programme Trois ensembles d'essais ont été exécutés pour étudier séparément les effets: (a) de la taille des grains transportés; (b) de la rugosité du fond du canal; (c) de la mobilité du fond.

Dans les deux premiers cas le fond du canal était fixé. Les résultats obtenus ont fait l'objet de publications auxquelles le lecteur intéressé est renvoyé: Bordas *et al.* (1985) pour (a); Bordas & Medeiros (1987) pour (b) et Borges (1987) pour (c). Les résultats ici présentés sont fruits de la synthèse de ces trois ensembles.

RESULTATS

Confiaabilité des variables exprimant la formation de dépôts

Dans toutes les séries d'expériences effectuées, la puissance hydraulique s'est révélée être la variable la plus fiable pour exprimer le début de formation des dépôts. Quelle que soit la variable utilisée le coefficient de corrélation R défini comme

$$R = \frac{\sum |(x - \bar{x}) - (y - \bar{y})|}{\sqrt{\sum (x - \bar{x})^2 \sum (y - \bar{y})^2}} \tag{6}$$

présente des valeurs élevées, ce qui paraît confirmer le bien fondé de la méthode préconisée. Ces résultats apparaissent au Tableau 1 pour les deux formes de la relation $Y = \phi(X)$ qui paraissent les plus appropriées pour traduire les résultats obtenus avec les trois sables utilisés dans le cas où $d_i = d_f$.

Table 1 Valeur du coefficient de corrélation R pour différentes expressions du débit des dépôts

		<i>Expression du type:</i>			
		$Y = AX + B$		$Y = AX^B$	
$d_i = d_f$	<i>Nature</i>	$Y = \frac{V}{(\nu g)^{1/3}}$	$Y = \frac{\tau g^{1/3}}{\gamma_s \nu^{2/3}}$	$Y = \frac{y q l}{\gamma_s \nu}$	$Y = \frac{\gamma q l}{\gamma_s \nu}$
(mm)	<i>du fond</i>				
1.98	<i>Fixe</i>	0.94	0.89	0.97	0.94
	<i>Mobile</i>	0.44	0.81	0.84	0.90
1.22	<i>Fixe</i>	0.97	0.98	0.99	0.96
	<i>Mobile</i>	0.79	0.83	0.91	0.88
0.77	<i>Fixe</i>	0.97	0.94	0.98	0.98
	<i>Mobile</i>	0.59	0.71	0.90	0.89

Modalités du transport de fond

Les données des expériences, rapportées sur un même graphique (X,Y) (Fig. 2), montrent que le transport sur le fond peut assumer trois modalités différentes selon le nombre de particules en mouvement. Chacune des modalités est caractérisée par une loi propre de croissance de la puissance hydraulique nécessaire au transport du débit de charriage à évacuer:

Modalité 1: "Transport de grains isolés" Pour les faibles valeurs du débit solide ($X < 1$ ou 2), la puissance hydraulique nécessaire au maintien du mouvement paraît ne pas varier avec le débit solide. Comme il est normal, les plus grosses particules exigent une puissance supérieure pour être

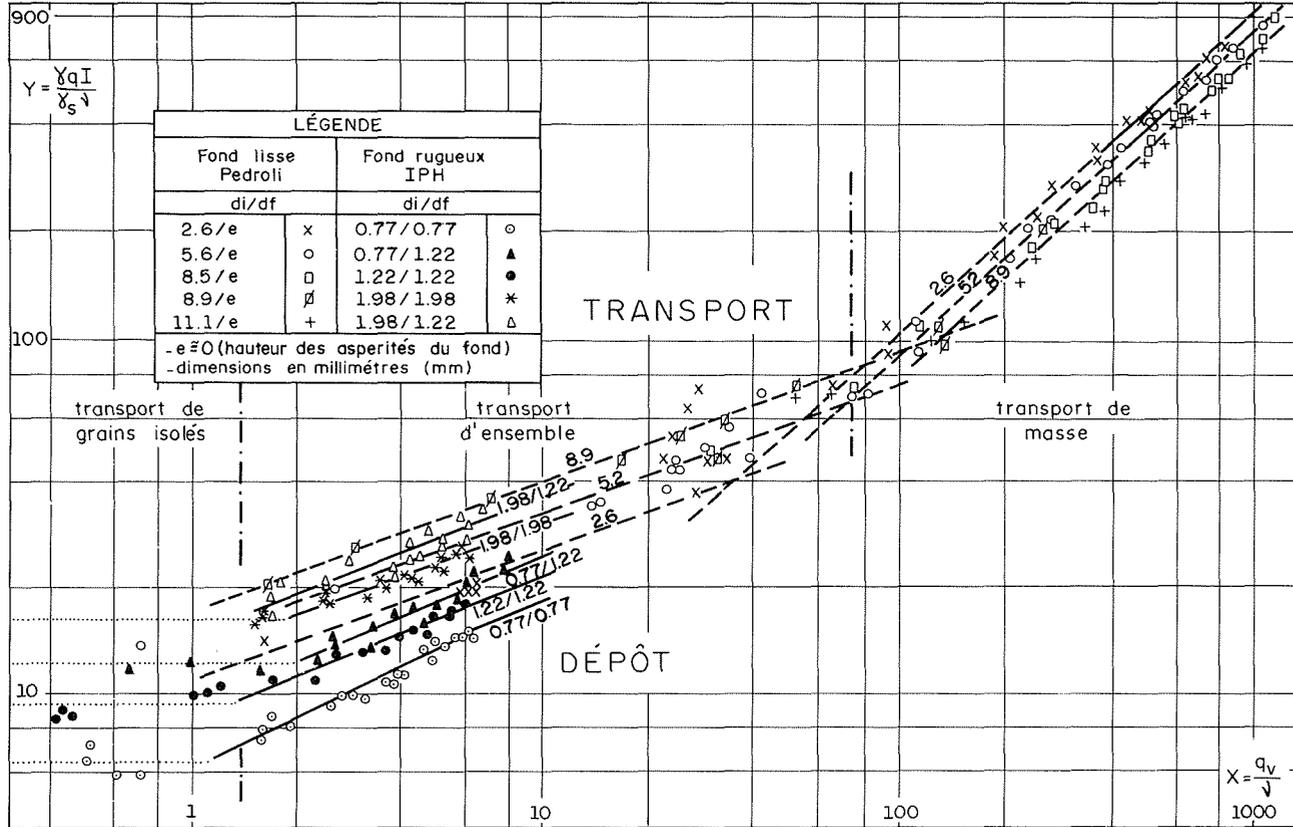


Fig. 2 Conditions de dépôt pour les diverses modalités de transport solide de fond (selon Medeiros, 1986).

maintenues en mouvement. La valeur limite maximum de X est plus élevée pour les grosses particules (2 pour 1.98 mm) que pour les plus fines (1 pour 0.77 mm) ce qui paraît également normal. Pour cette modalité, le poids de la particule est le principal facteur dont dépend la formation du dépôt.

Modalité 2: "Transport d'ensemble" Pour une gamme moyenne de débit solide (en gros $2 < X < 100$) la puissance hydraulique pour maintenir le mouvement croît avec le débit solide selon une fonction puissance dont l'exposant est voisin de 0.4. Comme pour les grains isolés, les plus grosses particules exigent des puissances hydrauliques plus élevées, à débit solide identique. La limite supérieure de X dépend du nombre de grains en mouvement: la valeur critique de ce dernier est de 200 pour $d_i = 2.6$ mm. On peut en conclure que pour cette modalité, la capacité maximum de transport dépend de la taille des grains à transporter et de leur nombre.

Modalité 3: "Transport de masse" Pour des valeurs de X supérieures aux limites de la modalité 2, les besoins en énergie pour maintenir le mouvement diffèrent des situations antérieures:

- d'une part par le fait que leur croissance en fonction du débit solide est beaucoup plus rapide. La loi qui régit cette modalité est toujours de puissance mais avec un exposant voisin de 1 — soit 2.5 fois supérieur à celui du "transport d'ensemble";
- d'autre part, par celui que ce ne sont plus les plus grosses particules qui exigent le plus d'énergie pour être maintenues en mouvement, mais bien les plus petites — à l'inverse des deux modalités antérieures.

Ces deux observations, ainsi que le fait que la valeur de X qui marque la limite de cette modalité est d'autant plus basse que le grain est fin (donc que le nombre en est élevé), suggèrent que les pertes d'énergie par chocs intergranulaires prédominent, dans cette modalité, sur la taille et le nombre des particules transportées. D'où le nom de "transport de masse" donné à cette modalité, qui est proche des notions introduites par Bagnold (1966).

Expression de la capacité maximum de transport

La parallélisme des droites de la Fig. 2, ainsi que les résultats obtenus avec les essais $d_i = d_f$ à fond mobile suggèrent qu'existe entre X , Y et Z , une relation du type:

$$YZ_i^{-0.73} = AX^B \quad (7)$$

Une première synthèse en ce sens apparaît sur le Fig. 3 dont la principale différence d'avec la Fig. 2 est de présenter des courbes parfaitement ordonnées selon les valeurs décroissantes de d_i . Elle montre également que les modalités de transport "d'ensemble" et de "masse"

sont les plus fréquentes et que l'exposant B qui les caractérise serait nul pour le transport de grains isolés et voisin de 0.3 pour le transport de masse.

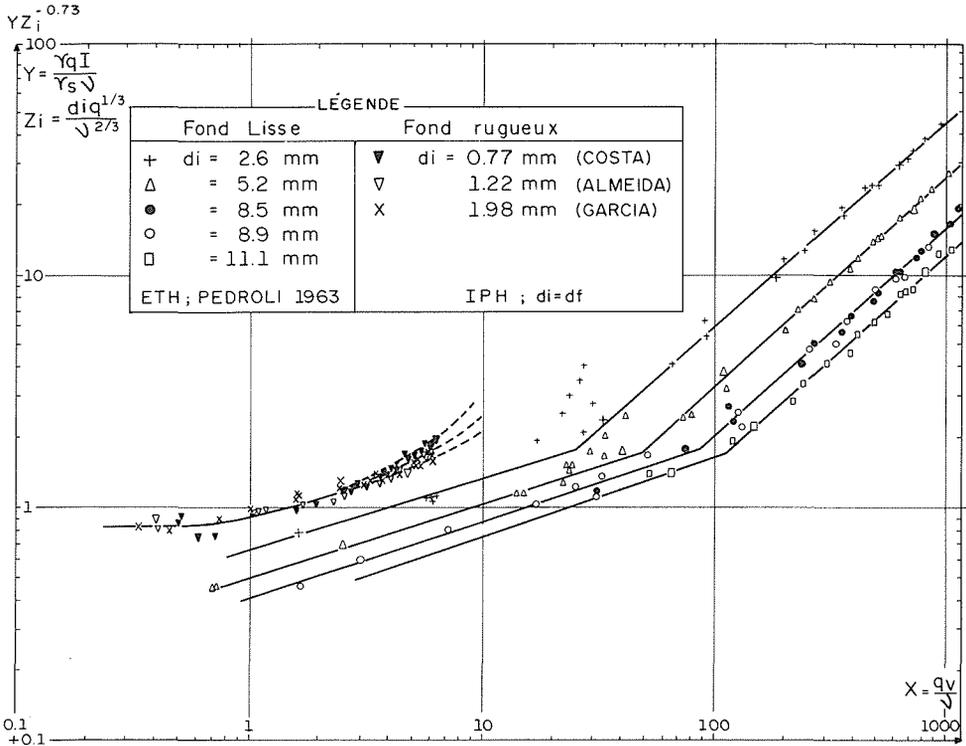


Fig. 3 Dépôt sur fond fixe. Relation préliminaire $X = \phi(YZ_i^{-0.73})$.

Les affinités évidentes entre les courbes de la Fig. 3 suggèrent un pas supplémentaire dans la recherche d'une synthèse, qui serait en rapport avec les grains en mouvement. On en est venu ainsi à travailler avec l'adimensionnel XZ^{-1} , qui conduit à des résultats nettement supérieurs comme il apparaît sur la Fig. 4:

- tous les résultats d'essais avec $d_i \neq d_f$ sur fond fixe, sont regroupés sur une même courbe;
- l'arrangement des courbes $d_f = d_i$ suggère l'emploi d'un adimensionnel $\Lambda = YZ_i^{-0.73} Z_f^\alpha$, équivalent à un rendement énergétique, pour rendre compte de l'augmentation de puissance qui accompagne la croissance de taille des grains.

L'emploi du nouveau groupement adimensionnel Λ conduit aux résultats de la Fig. 5, étape ultime de la synthèse recherchée. Ils permettent de proposer que la capacité maximum de transport (ou la loi de formation de dépôt) soit exprimée par une équation générale du type

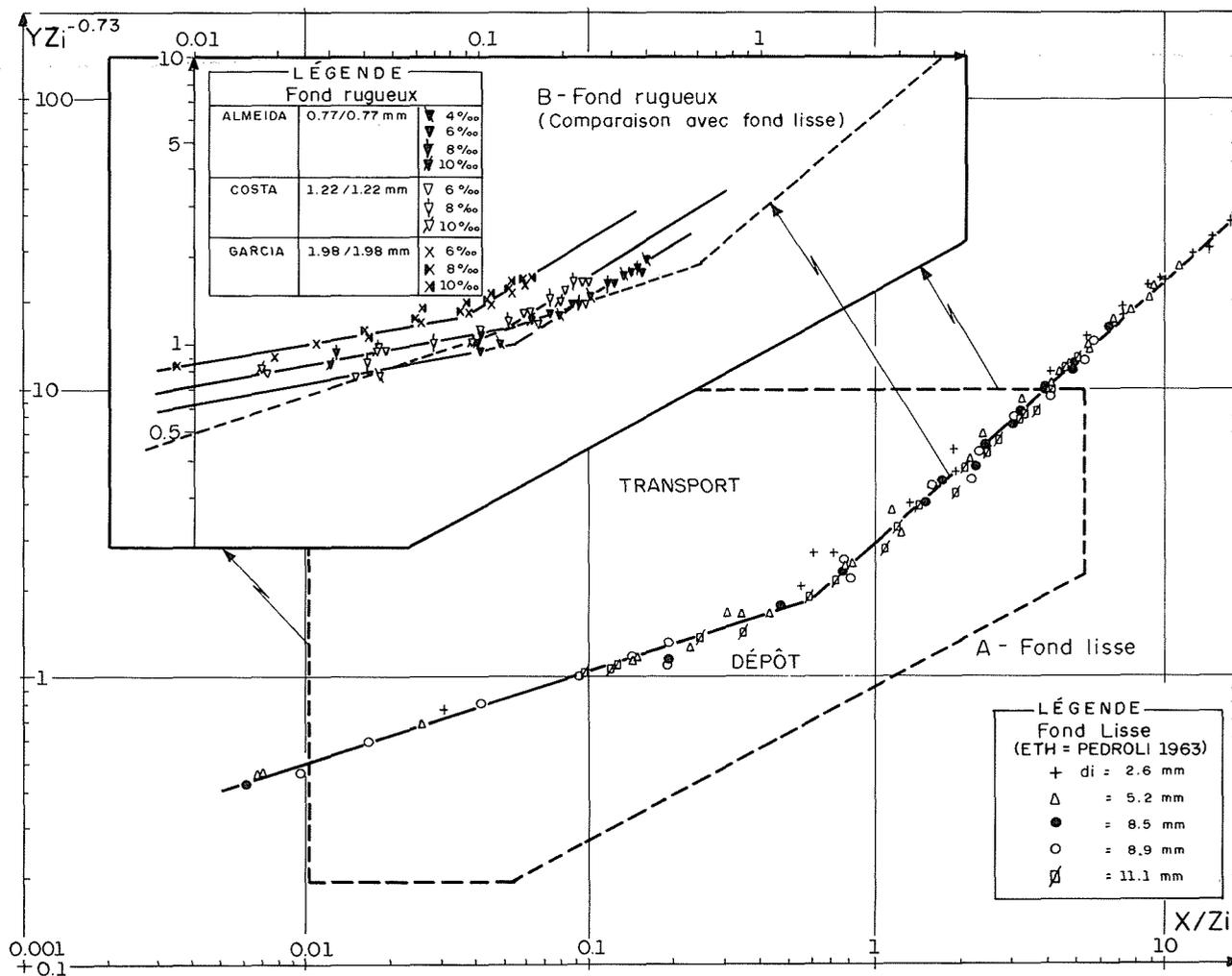


Fig. 4 Dépôt sur fond fixe. Relation améliorée $XZ_i^{-1} = \phi(YZ_i^{-0.73})$.

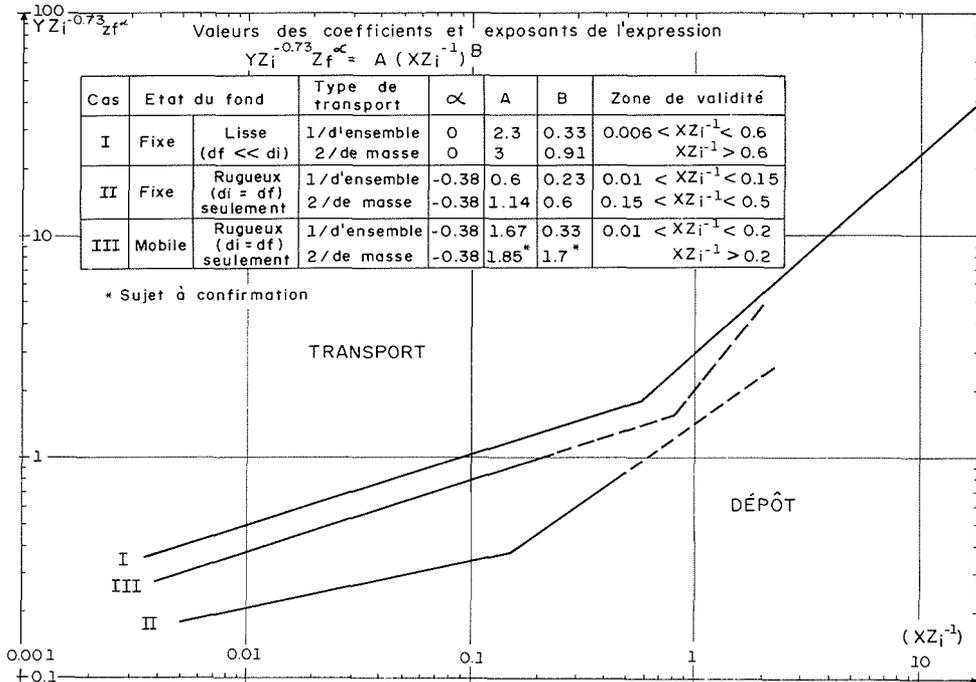


Fig. 5 Loi généralisée de formation de dépôt en canal.

$$YZ_i^{-0.73} Z_f^\alpha = A (XZ_i^{-1})^B \quad (8)$$

dans laquelle α traduit l'effet de la rugosité du fond, et A ; B varient en accord avec le type de transport et l'état du fond. Les valeurs de ces trois grandeurs et les zones de validité des équations correspondantes sont rapportées sur l'encadré de la Fig. 5.

Substituant α , A et B par les valeurs appropriées à chaque cas, on obtient les expressions simplifiées de la capacité maximum de transport et de la puissance hydraulique minimum nécessaire au transport d'une charge solide donnée qui sont indiquées au Tableau 2.

CONCLUSIONS

La capacité maximum de transport d'un écoulement peut être déterminée avec une précision supérieure à l'habituelle en partant de la formation de dépôts sur le fond du lit. Une méthode expérimentale a été mise au point en laboratoire pour ce faire et a donné jusqu'ici tout satisfaction — malgré quelques difficultés mineures pour les faibles pentes (1‰) et les sédiments les plus grossiers. Elle a permis: d'établir que la puissance hydraulique unitaire (γqI) est la variable la plus fiable pour exprimer le maximum de charriage; d'indiquer la forme générale de cette

Tableau 2 Expressions de la capacité maximum de transport et de la puissance hydraulique minimum pour éviter la formation de dépôt

Etat du fond	Type de transport de fond	Capacité maximum de transport $X = q_v \sqrt{U}$	Puissance hydraulique minimum $Y = \gamma q_l / \gamma_s U$
I. Fixe et lisse ($d_f \ll d_i$)	(a) d'ensemble	$0.08 Y^3 Z_i^{-1.2}$	$2.3X^{0.33} Z_i^{0.4}$
	(b) de masse	$0.3 Y^{1.1} Z_i^{0.2}$	$3X^{0.91} Z_i^{-0.18}$
II. Fixe et rugueux (pour $d_i = d_p$)	(a) d'ensemble	$9.23 Y^{4.35} Z_i^{-3.83}$	$0.6X^{0.23} Z_i^{-0.88}$
	(b) de masse	$0.84 Y^{1.67} Z_i^{-0.85}$	$1.14X^{0.6} Z_i^{0.51}$
III. Mobile (pour $d_i = d_p$)	(a) d'ensemble	$0.22 Y^3 Z_i^{-2.34}$	$1.67X^{0.33} Z_i^{0.78}$
	(b) de masse	$(0.7 Y^{0.6} Z_i^{0.35})^*$	$(1.85X^{1.7} Z_i^{-0.59})^*$

*Sujet à confirmation, vu le petit nombre d'essais effectués.

expression (équation (8)) et même d'avancer des équations plus précises pour plusieurs cas particuliers (Tableau 2).

La méthode a également permis d'identifier trois modalités différentes de transport de fond (grains isolés, mouvement d'ensemble, mouvement de masse) caractérisées par des lois différentes de consommation d'énergie.

L'allure générale des variations de la capacité maximum de transport en fonction de la puissance hydraulique unitaire (Fig.5) rappelle celle des courbes de charriage proposées par Kalinske (1947), Einstein (1950) et Brown (1950). Cette ressemblance, ajoutée aux possibilités qu'offre la méthode proposée pour l'étude des bilans énergétiques d'un écoulement alluvial, ouvre des perspectives prometteuses pour d'étude de la formation des dépôt en eaux courantes et le calcul des bilans sédimentologiques.

Remerciements L'appui du Conseil National de Développement Scientifique et Technique brésilien (CNPq) a été précieux pour mettre en route le programme de recherche dont fait partie le présent travail et le sera encore plus pour la suite qui lui sera donnée.

REFERENCES

- Bagnold, R. A. (1960) Sediment discharge and stream power. A preliminary announcement. *Geol. Survey Circular* 421.
- Bagnold, R. A. (1966) An approach to the sediment transport problem from general physics. *USGS Prof. Pap.* 422-J.
- Bordas, M. P., Almeida, L. E. & Garcia, E. P. (1985) Sediment deposition in low stream power flow with fixed bed. *Proc. 6th Brazilian Symposium of Hydrology and Water Resource (Sao Paulo, Brésil, novembre 1985), vol.1, 57-67.*
- Bordas, M. P. & Medeiros, P. (1987) Influence de la rugosité du fond d'un

- canal revêtu sur la formation de dépôts de sable (en portugais). *VII Symposium Brésilien d'Hydrologie et Ressources en Eau* (Salvador, Brésil).
- Borges, A. L. (1987) Détermination de la capacité maximum de transport par charriage d'un écoulement à fond mobile (en portugais). Dissertation de maîtrise, IPH/UFRGS, Porto Alegre, Brésil.
- Brown, C. B. (1950) *Engineering Hydraulics* (ed. by H. Rouse). John Wiley.
- Costa, A. R. (1974) Contribution à la prévision du dépôt de sédiments en canal à fond fixe (en portugais). Dissertation de maîtrise, IPH/UFRGS, Porto Alegre, Brésil.
- Einstein, H. A. (1950) The bed-load function for sediment transportation in open-channel flows. *USDA Soil Conservation Service Tech. Bull. no. 1026*.
- Kalinske, A. A. (1947) Movement of sediment as bed-load in rivers. *AGU Trans.* 28.
- Medeiros, P. (1986) Effet de la rugosité de fond sur la formation des dépôts en canal à fond fixe rugueux (en portugais). Dissertation de maîtrise, IPH/UFRGS, Porto Alegre, Brésil.
- Pedroli, R. (1963) Transporto di materiale solido in canali a fondo fisso e liscio. Tesi di Laurea, Scuola Politecnica Federale in Zurigo, Svizzera.
- Yang, C. T. (1972) Unit stream power and sediment transport. *J. Hydraul. Div. ASCE* 99 (HY10), Proceedings paper 10067, 1679-1704.

