

TRANSPORT DES SEDIMENTS

(logiciel)

SOMMAIRE

I) INTRODUCTION.....	P1
II) LEXIQUE DES VARIABLES UTILISEES.....	p2
III) NOTICE D'UTILISATION.....	p3
IV) PRESENTATION DES DIFFERENTES FORMULES.....	P4
A) Transport par charriage et saltation.....	p4
1) formules de type DuBoys	
2) formules de Einstein	
3) formules en termes de vitesse moyenne	
4) autres	
5) remarques	
B) Transport en suspension.....	p17
C) Transport total.....	p19
V) CONCLUSION.....	P22
VI) ANNEXES.....	p23

I) INTRODUCTION :

Le but du stage est d'établir un logiciel capable de donner une évaluation, par méthode informatique, du débit des sédiments transportés dans les rivières. Les modes de transport étant le charriage et la saltation d'une part et la suspension d'autre part.

On dit qu'il y a charriage quand il y a progression de tout ou partie des granulats dans le sens du courant en glissant et roulant (ou bien en sautant légèrement) sur le fond.

On dit par contre, qu'il y a saltation quand il y a une suite d'envols et de retombées successifs à des distances relativement appréciables.

On dit, enfin, qu'il y a suspension quand les granulats progressent dans le sens du courant au sein même du liquide sans jamais retomber, sauf très épisodiquement, sur le fond.

La distinction entre ces trois types de transports procède donc d'éléments relativement subjectifs, puisqu'elle dépend de ce qu'on entend par bonds successifs dans les transports par saltation, vis-à-vis des transports par charriage qui ne comportent que de rares envols, et des transports en suspension qui ne comportent que de rares retombées. Mais les hydrauliciens ne divergent généralement pas trop dans leurs appréciations des transports par charriage et saltation d'une part, des transports en suspension de l'autre, dans chaque cas particulier, et l'on peut essayer par suite de trouver le moyen d'évaluer à l'avance le débit de granulats transportés dans les deux cas pour un écoulement donné.

Pour effectuer l'étude, je me suis appuyé sur 2 ouvrages:

- Hydraulique et Granulats de J.Larras
- Sedimentation Engineering de l'American Society of Civil Engineers (ou A.S.C.E)

et les calculs qui sont présentés plus loin à partir de la référence "J.Larras" utilisent comme système d'unité, le système international (m-k-s) et ceux présentés sous la référence "A.S.C.E" utilisent principalement les unités anglaises (ft-lb-s).

remarque : Pour chaque mode de transport, plusieurs formules sont présentées et ont chacune leur propre domaine de validité.

II) LEXIQUE DES VARIABLES UTILISEES :

- C : concentrations de fines (ppm)
- d : diamètre médian des sédiments du fond (ft ou m)
- ds : diamètre médian des sédiments en suspension (ft ou m)
- d65 : diamètre pour lequel 65% des granulats du fond sont d'un poids inférieur (ft ou m)
- d65s : d65 des granulats en suspension
- d90 : diamètre pour lequel 90% des granulats du fond sont d'un poids inférieur (ft ou m)
- delta : facteur $= 11.6 * \nu / u'^*$
- f : coefficient de Darcy-Weisbach $= 8 * g * L * h * j_1 / (u^2 * P_m)$
- F1 : paramètre utilisé entre autre par Einstein

$$= (2/3 + 36 * \nu^2 / (g * d^3 * ((p_1/p) - 1)))^{0.5} - (36 * \nu^2 / (g * d^3 * ((p_1/p) - 1)))^{0.5}$$
- g : pesanteur (ft/s² ou m/s²)
- h : hauteur de l'écoulement (ft ou m)
- j1 : pente de l'écoulement (ft/ft ou m/m)
- ks : = d65
- L : largeur de l'écoulement
- nu : viscosité cinématique de l'eau (ft²/s ou m²/s)
- p : masse volumique de l'eau (lb/ft³ ou kg/m³)
- p1 : masse volumique des granulats (lb/ft³ ou kg/m³)
- Pm : périmètre mouillé (ft ou m)
- q : débit de l'eau (ft³/s ou m³/s)
- qsb : débit des sédiments sur le fond (lb/ft³ ou kg/m³)
- qss : débit des sédiments en suspension (lb/ft³ ou kg/m³)
- qst : débit total des sédiments (lb/ft³ ou kg/m³)
- Rh : rayon hydraulique (ft ou m)
- rho : masse spécifique de l'eau (lb.s²/ft⁴ ou kg.s²/m⁴)
- T : température de l'eau (°F ou °C)
- t0 : tension de frottement au fond $= p * R_h * j_1$
- tc : tension critique de frottement (définie en annexe 1) pour laquelle on a un début d'entraînement des granulats du fond
- tcs : tension critique pour les granulats en suspension
- t* : tension étoilée $= t_0 / ((p_1 - p) * d)$
- t0' : (part de la résistance des grains du fond sur t0)

$$= \rho * u^2 / 58 * (d/h)^{1/3} \text{ (lb/ft}^2 \text{ ou kg/m}^2\text{)}$$
- t0's : t0' pour les sédiments en suspension
- u : vitesse moyenne d'écoulement (ft/s ou m/s)
- uc : vitesse moyenne critique d'écoulement pour laquelle on a un début d'entraînement des granulats $= 0.177 * (h/d)^{1/7} * (g * d * (p_1 - p) / p)^{0.5}$
- u* : vitesse étoilée $= (t_0 / \rho)^{0.5}$
- u'* : vitesse étoilée influencée par la rugosité des grains du fond $= (t_0' / \rho)^{0.5}$
- u'*s : u'* pour les sédiments en suspension
- w : vitesse de chute des sédiments du fond $= F_1 * (((p_1/p) - 1) * g * d)^{0.5}$ (ft/s ou m/s)
- ws : w pour les sédiments en suspension *idem*

III) NOTICE D'UTILISATION :

Pour une utilisation directe du logiciel:

Une fois "EXCEL" connecté, ouvrez le répertoire "sédiment", et demandez la feuille de calcul "transpor" après avoir ouverte celle qui s'appelle "transpot". Sur cette feuille, qui vous apparaît, on distingue 3 parties:

1) paramètres demandés : vous devez, ici, entrer les valeurs qui correspondent à votre cas de rivière. Ces valeurs sont à remplir dans la zone ombrée prévue à cet effet et dans le système d'unité international (m-k-s)

2) paramètres arbitraires : vous pouvez modifier les valeurs qui ne vous conviennent pas (et ceci toujours dans la zone ombrée et en système u.s.i)

3) résultats : différentes évaluations des débits de granulats charriés vous sont données avec en commentaire leur validité et d'éventuelles remarques.

Pour admettre un résultat dont la validité n'est pas contestée sur le logiciel (apparaît en réponse de la validité: "oui ?"), il est souhaitable de vérifier, en plus, l'"origine" (et parfois aussi le "domaine de validité") de la formule (présente dans ce rapport). Ceci, en complément des domaines de validité des différentes formules qui ne sont pas toujours bien définis.

Pour connaître le détail des calculs:

Fermez la feuille "transpor" si celle-ci est ouverte, et conservez celle qui s'intitule "transpot". Dans cette feuille, sont présentés dans l'ordre:

- les paramètres demandés
- les paramètres arbitraires
- les paramètres intermédiaires
- le transport par charriage et saltation
- le transport total
- le transport en suspension

rem: Certains calculs sont faits à partir de la discrétisation des différents diagrammes qui sont présentés dans les annexes

IV) PRESENTATION DES DIFFERENTES FORMULES :

A) TRANSPORT PAR CHARRIAGE ET SALTATION :

Les méthodes actuelles de calcul du débit solide des transports par charriage et par saltation reviennent à poser que ce débit dépend essentiellement d'un des cinq éléments suivants, à l'exclusion pratique des quatre autres : tension de frottement à la paroi, vitesse moyenne d'écoulement, vitesse étoilée, couple ϕ , pli de Einstein (Cf plus loin : présentation des formules), énergie détruite par unité de temps (puissance).

Formules présentées dans cette partie:

- Formule de DuBoys
- Formule de Meyer-Peter
- Formule de Schoklitsch
- Formule de Shields
- Formule de Meyer-Peter et Muller
- Formule de Laursen
- Formule de I.I.Lévi
- Formule de A.Schoklitsch
- Formule de K.Shinohara et T.Tsubaki
- Formule de Equiazarov
- Formule de L.Muhlofer
- Formule de Einstein-Brown
- Formule de Einstein (Bed Load)
- Les relations de Colby
- Formule de Inglis-Lacey
- Formule de A.F.Koudriachov
- Formule de Engelund-Hansen
- Formule de Toffaleti
- Formule de A.A.Kalinske

Ces formules sont classées en plusieurs groupes suivant la forme de l'équation:

- Neuf des vingt formules sont du type Duboys. Elles contiennent des termes de la forme $t_0 - t_c$ ou $q - q_c$ ou $u - u_c$ (ou autre forme équivalente) et indiquent que le mouvement des sédiments cesse brutalement quand les conditions de seuil sont atteintes, c'est à dire $t_c = t_0$ ou $q_c = q$ ou encore $u_c = u$. De plus, elles donnent des résultats négatifs lorsque $t_c > t_0$ ou $q_c > q$ ou $u_c > u$, ce qui est sans signification et qui les rend inutilisables pour de telles valeurs de t_0 , q et u .

- Les deux formules de Meyer Peter sont également similaires à celles du type DuBoys. En effet les termes 9.94 , dans l'une, et $0.047 \cdot (p_1 - p) \cdot d$, dans l'autre,

expriment en fait la tension critique de frottement. Elles indiquent également que le mouvement des sédiments cesse quand la tension de frottement qui règne au fond est approximativement égale à la valeur critique.

- Les deux formules de Einstein, quant à elles, donnent des valeurs continues du débit des sédiments, même à de faibles taux, et diffèrent pour cela des précédentes. Elles sont basées sur la fluctuation hasardeuse des forces du fluide dues à la structure turbulente de l'écoulement. Cela induit qu'une petite quantité de sédiments bouge de manière aléatoire (par des sauts ou en escaliers) même quand les forces hydrauliques du fond sont très faibles.

- Les formules de Inglis-Lacey, de Koudriachov et de Colby sont en termes de vitesse moyenne. Dans les équations de Inglis-Lacey et de Koudriachov, le débit des sédiments varie à la puissance cinq de la vitesse. Dans la relation de Colby, l'exposant de la vitesse varie comme on peut le voir en annexe 6: Pour une taille des sédiments et une hauteur d'eau données, l'exposant décroît continuellement quand la vitesse et le débit des sédiments augmentent.

1) Formules du type DuBoys (ou équivalentes):

a) Formule de DuBoys : (réf : A.S.C.E)

$$q_{sb} = L * d_{ub} * t_0 * (t_0 - t_c)$$

Le paramètre d_{ub} a été obtenu par Straub comme une fonction du diamètre médian des sédiments du fond (annexe 2).

origine :

Cette formule a été établie à partir des expériences de Gilbert (1914; Johnson, 1943) dans de petits canaux.

b) Formule Meyer-Peter : (réf : A.S.C.E)

$$q_{sb} = L * [39.25 * q^{2/3} * j - 9.95 * d]^{1.5}$$

q en $\text{ft}^3/\text{s.ft}$ of width

origine :

Les constantes de l'équation ont été déterminées pour s'ajuster aux données de cinq rivières aux sédiments bien classés de diamètres médians rangés de 3.1 à 28.6 millimètres. Les expériences avec trois de ces sédiments, ont été faites par Gilbert dans des canaux de 20, 30 et 40 centimètres de large avec des profondeurs d'écoulement classées de 2.5 à 15 centimètres. Les expériences avec le sédiment de 28.6 millimètres de diamètre et un autre encore, avaient été réalisées dans des canaux de deux mètres de large. Ces gros sédiments ne donnaient pas de forme

désordonnée du lit de l'écoulement, si bien que dans ces expériences la résistance à l'écoulement était due essentiellement à la rugosité des grains.

domaine de validité :

La formule présentée n'est donc valable que pour des fonds où reposent des sédiments relativement gros pour lesquels la résistance à l'écoulement due à la forme du fond est une petite partie de la résistance totale.

c) Formule de Schoklitsch : (réf : A.S.C.E)

$$q_{sb} = L * (25.3/d^{0.5}) * j^{1.5} * (q - q_c)$$

q et q_c en ft³/s.ft of width

avec $q_c = 0.638 * d / j^{4/3}$: valeur critique de q pour laquelle on a un début d'entraînement des granulats

origine :

Cette formule a été établie principalement à partir de données d'expériences de Gilbert dans de petits canaux où les sédiments étaient bien triés et classés avec un diamètre médian rangé de 0.3 à 5 millimètres.

domaine de validité :

La formule a donné de bons résultats dans le cas de deux rivières européennes qui présentaient un fond de graviers. Cela suggère donc que cette formule ne devrait pas être appliquée dans le cas des courants sur fond de sable où les sédiments sont emportés en suspension dans des quantités considérables.

d) Formule de Shields : (réf : A.S.C.E)

$$q_{sb} = 10 * q * j^{1.5} * (t_0 - t_c) / (((p_1/p) - 1)^2 * d)$$

origine :

Cette formule est basée sur les données de deux canaux de largeurs respectives 40 et 80 centimètres, avec cinq sédiments de poids spécifiques rangés de 1.06 à 4.2. Le plus léger des sédiments était composé de particules de couleur ambre avec un diamètre médian de 1.56 millimètres. Les autres sédiments étaient bien classés avec des diamètres médians rangés de 1.7 à 2.5 millimètres. On avait l'apparition de rides sur le lit de l'écoulement, sans que celles-ci soient importantes. Et parce que les sédiments des expériences étaient gros et que la tension étoilée était basse, tous les déplacements de ces sédiments demeuraient sur le fond.

e) Formule de Meyer-Peter et Muller : (réf : A.S.C.E)

$$q_{sb} = L * ((k_{r1}/k_{r2})^{1.5} * p * R_h * j^{1-0.047(p_1-p)} * d / (0.25(p/g))^{1/3} * ((p_1-p)/p_1)^{2/3})^{1.5}$$

$$\begin{aligned} -kr1 &= u / (Rh^{2/3} \cdot j^{0.5}) \\ -kr2 &= 26 / d^{1/6} \end{aligned}$$

origine :

Cette formule est basée sur les données d'expériences réalisées dans des canaux classés sur des largeurs de 15 centimètres à 2 mètres, des pentes de fond allant de 0.0004 à 0.02 et des profondeurs d'eau allant de 1 à 120 centimètres. Les diamètres médians des sédiments se situaient entre 0.4 et 30 millimètres.

domaine de validité :

L'avantage de cette formule, vis à vis de la vieille formule de Meyer-Peter, est qu'elle peut être utilisée pour des sédiments placés dans des conditions d'écoulement qui permettent l'apparition de dunes (ou autres formes) sur le fond. La plupart des données, sur lesquelles repose la formule, étaient obtenues dans des écoulements avec peu ou pas de matière en suspension, ce qui laisse à penser que la formule n'est pas valide pour les écoulements avec une charge importante d'éléments en suspension.

f) Formule de Laursen : (réf : A.S.C.E)

$$qsb = q \cdot 0.01 \cdot p \cdot (d/h)^{7/6} \cdot ((t_0'/tc) - 1) \cdot (\text{fonction de } (u^*/w))$$

avec fonction de $(u^*/w) = 10.57 \cdot (u^*/w)^{0.25}$ (annexe 3)

origine :

Laursen a utilisé d'une part les données, qu'il a obtenu de la part d'investigateurs, sur un canal de 27 centimètres de large et de 12 mètres de long, et d'autre part celles à partir d'un canal de 90 centimètres de large et de 27 mètres de long. Tous les sédiments avaient un poids spécifique de 2.65 et un diamètre médian variant de 0.011 à 4.08 millimètres.

domaine de validité :

Laursen a comparé les résultats donnés par sa formule avec les valeurs observées sur trois petits courants d'eau. La rivière Niobrara près de Cody, Mountain Creek dans la Caroline du sud, et West Goose Creek au Mississippi. Ces écoulements avaient des profondeurs allant de 0.04 à 0.4 mètres et des sédiments de fond de diamètres médians respectivement égales à 0.277, 0.86 et 0.287 millimètres. Les résultats s'accordaient bien dans le cas de la rivière Niobrara, mais restaient relativement passables pour les deux autres rivières.

g) Formule de I.I.Lévi : (réf : J.Larras)

$$qsb = L \cdot p_1 \cdot 0.002 \cdot ((u / (g \cdot d)^{0.5})^3) \cdot d \cdot (u - u_c) \cdot (d/h)^{0.25}$$

domaine d'application :

Cette formule ne vaut que pour les transports de sable quartzeux par charriage et saltation dans l'eau lorsque la profondeur relative d'écoulement h/d est supérieure à 300 ou, peut-être même, à 1 000.

h) Formule de A.Schoklitsch : (réf : J.Larras)

$$q_{sb} = L \cdot p_1 \cdot 0.54 \cdot t_0 \cdot (t_0 - t_c) / (p_1 - p)$$

origine :

La formule a été réalisée à partir d'essais systématiques de laboratoire sur des sables quartzeux.

i) Formule de K.Shinohara et T.Tsubaki :(réf : J.Larras)

$$q_{sb} = L \cdot p_1 \cdot 25 \cdot (\phi - 0.8 \cdot \phi_{ic}) \cdot (p_1 - p)^{0.5} \cdot d^{1.5}$$

- $\phi = t_0^2 / ((p_1 - p) \cdot d \cdot t_c)$
- $\phi_{ic} = t_c^2 / ((p_1 - p) \cdot d \cdot t_c)$

origine :

K.Shinohara et T.Tsubaki ont tiré cette formule adimensionnelle empirique des essais de G.k.Gilbert et E.C.Murphy, de L.G.Straub, de H.R.Liu et d'eux même.

domaine d'application :

Cette formule ne vaut que pour les transports de granulats quartzeux dans l'eau. Les résultats que l'on obtient ne sont relativement acceptables que dans le cas d'assez fortes pentes de sable quartzeux d'un diamètre relativement moyen dans l'eau. C'est dû, sans doute, à ce que la formule ne correspond pas à un débit solide q_{sb} rigoureusement nul pour les régimes faibles voisins du début d'entraînement des matériaux où l'on a : $\phi = \phi_{ic}$

j) Formule de I.V.Equiazarov : (réf : J.Larras)

$$q_{sb} = ((p_1/p) / ((p_1/p) - 1)) \cdot q \cdot 0.015 \cdot j_1^{0.5} \cdot p_1 \cdot (t_0 - t_c) / t_c$$

origine :

Cette formule résulte d'une tentative d'ordre théorique pour relier le débit solide des transports par charriage et par saltation à la tension tangentielle de l'écoulement et à la pente de la ligne d'énergie.

Le raisonnement part de l'idée que le débit liquide q_{sb} dépend du débit liquide q et de l'énergie $(t_0 - t_c) \cdot u$ que l'écoulement dépense par unité de surface du fond (en plus de celle qui lui est strictement nécessaire pour provoquer le début d'arrachement des granulats).

Or, la vitesse moyenne d'écoulement u est proportionnelle à la racine carrée de la pente de la ligne d'énergie dans le cas d'un écoulement complètement turbulent, et le poids q_{sb} de granulats débités est évidemment proportionnel à leur poids volumique.

domaine de validité :

L'expérience montre que la formule donne d'assez bons résultats pour les transports de granulats quartzeux 2.5 à 10 millimètres de diamètre par charriage et saltation dans l'eau quand l'écoulement est complètement turbulent.

Mais l'examen systématique de treize formules fondées sur treize critères de similitude différents n'a pas permis d'obtenir d'aussi bons résultats dans le cas d'un régime d'écoulement et de transport absolument quelconque (parce qu'on ne se trouve plus alors dans le cas particulièrement simple des lois de résistance quadratique de l'écoulement complètement turbulent). Les résultats les moins mauvais qu'on ait obtenus l'ont été en multipliant le coefficient 0.015 de la formule précédente par un "coefficient de mobilité" que I.V. Equiazarov a donné les moyens d'évaluer en fonction de trois nombres et de trois paramètres sans dimensions liés aux caractéristiques particulières de l'écoulement et des fonds. Mais l'auteur a reconnu lui-même que "la dispersion reste grande", et l'on doit considérer plutôt ses recherches comme un essai particulièrement intéressant d'amélioration des conditions de similitude sur modèles réduits, plutôt que comme l'énoncé d'un nouveau moyen de calcul des transports de granulats.

k) Formule de L.Muhlofer : (réf : J.Larras)

$$q_{sb} = L * Y * (((p_1/p) - 1) * g * p_1^2 * d^3)^{0.5}$$

- $Y = 9.579 * (X - 0.045) * (X^{0.5} - 0.045^{0.5})$
- $X = 0.045 * t_0 / t_c$

origine :

- La formule de L.Muhlofer résulte d'un calcul théorique dont on fixe les coefficients arbitraires après coup par la voie de l'expérience.

Le calcul part de cette constatation évidente que le poids sec q_{sb} de granulats charriés par unité de largeur de l'écoulement dans l'unité de temps est proportionnel au nombre moyen de granulats en cours de mouvement par unité de surface du fond, à l'épaisseur moyenne de la couche qu'ils constituent, à leur poids moyen, et à leur vitesse moyenne u_s d'entraînement vers l'aval.

- Le nombre de granulats en cours de mouvement par unité de surface face au fond est proportionnel à la différence $(t_0 - t_c)$ puisque celle-ci représente la somme des résistances individuelles, toutes identiques, qui s'opposent à l'entraînement de chaque granulat par le liquide.

Il n'est d'autre part pas illégitime d'admettre que l'épaisseur de la couche de granulats en mouvement est proportionnelle à leur diamètre médian d .

On peut tenir, enfin, le même genre de raisonnement que A.A.Kalinske (Cf plus loin) pour dire que l'on a la relation suivante:

$$u_s = u - u_c$$

entre les vitesses moyennes d'écoulement du liquide et d'entraînement, ou de début d'entraînement, des granulats. Or, les tensions tangentielles t_0 , t_c sont proportionnelles aux carrés des vitesses moyennes d'écoulement u , u_c qui leur correspondent dans la mesure où l'on peut considérer la lois de Chézy comme rigoureusement exacte dans le cas qui nous occupe. La vitesse moyenne u_s d'entraînement des granulats vers l'aval est donc proportionnelle, dans la même mesure, à:

$$t_0^{0.5} - t_c^{0.5}$$

- L'ensemble des hypothèses et des approximations précédentes conduit finalement à considérer le poids sec q_{sb} de granulats charriés par unité de largeur de l'écoulement dans l'unité de temps proportionnel à:

$$(t_0 - t_c) * (t_0^{0.5} - t_c^{0.5}) * ((p_1/p) - 1) * g * p_1^2 * d^3)^{0.5}$$

où $((p_1/p) - 1)$ représente la densité des granulats dans l'eau

et L.Muhlofer a donc, sur ces bases, proposé sa formule

domaine de validité :

✓ Cette formule cadre bien avec l'expérience, mais dans le cas bien précis du transport des granulats quartzes de 3.17 à 7.01 millimètres de diamètre par charriage et saltation dans l'eau, et rien n'indique qu'il puisse s'agir là d'une formule de portée vraiment universelle.

2) Formules de Einstein :

a) Formule de Einstein-Brown : (réf : A.S.C.E)

$$q_{sb} = L * \phi * p_1 * F_1 * (g * ((p_1/p) - 1) * d^3)^{0.5}$$

ϕ étant définie en annexe 4

origine :

Cette formule est basée sur des données de Gilbert pour des canaux et des données de Meyer-Peter et Muller avec des sédiments bien classés. Les données de Gilbert ont été obtenues dans des petits canaux avec des sédiments de rivières de diamètres médians allant 0.3 à 7 millimètres. Les autres données utilisées étaient

obtenues dans le cas d'un canal de deux mètres de large contenant du gravier de 28.6 millimètres de diamètre et dans le cas d'un autre canal plus petit avec des sédiments (gravier, barytine, charbon) de 5.21 millimètres de diamètre. Le poids spécifique de la barytine et du charbon étant respectivement 4.2 et 1.25

b) La formule de Einstein (Bed Load) : (réf : A.S.C.E) (annexe 5)

$$q_{sb} = L \cdot \phi' \cdot p_1 \cdot \left(\frac{p}{(p_1 - p) \cdot g \cdot d^3} \right)^{-0.5}$$

- ϕ' = fonction de (ϕ_i') définie à la 4ème figure de l'annexe
- ϕ_i' étant lui même fonction de x , X , Y , e et $R'h$
- x , e et Y définis respectivement à la 1ère, 2ème et 3ème figure
- $X = 0.77 \cdot d_{65} / x$ si $d_{65} / (x \cdot \Delta) > 1.8$
 $= 1.398 \cdot \Delta$ si $d_{65} / (x \cdot \Delta) < 1.8$
- $R'h = u'^2 / (g \cdot j_1)$

origine et validité:

Les données reportées dans la figure 1 ont été obtenues dans des canaux d'expérimentation avec deux sédiments bien classés de diamètres médians respectivement égales à 28.65 et 0.785 millimètres. Elles ont toutes été reportées pour bien montrer que la théorie s'accorde bien avec l'expérience. Les coefficients de l'expression de ϕ_i' ont été établis à partir de données d'expériences faites dans un canal de 27 centimètres de large et de 12 mètres de long avec un haut taux de transport de fines.

3) Formules en termes de vitesse moyenne :

a) Les Relations de Colby : (réf : A.S.C.E) (annexe 6)

$$q_{sb} = L \cdot [1 + (k_1 \cdot k_2 - 1) 0.01 \cdot k_3] \cdot q_1$$

- q_{sb} en tons/day.ft of width
- k_1 : facteur de correction de température (Cf l'annexe)
- k_2 : facteur de correction de concentration (Cf l'annexe)
- k_3 : facteur de correction de diamètre (Cf l'annexe)
- q_1 : débit non corrigé des sédiments (1ère figure de l'annexe)

origine :

Les relations ont été établies à partir des données sur de nombreux écoulements sur lesquels ont travaillé Einstein, Colby...

domaine de validité :

La formule est à utiliser pour des diamètres de fond assez petits allant de 0.1 à 0.8 millimètres.

b) Formule de Inglis-Lacey : (réf : A.S.C.E)

$$qsb = L * 0.562 * ((\nu * g)^{1/3} / w) * (u^2 / (g * h)) * (p * u^3 / g)$$

origine :

Cette relation est basée sur des données à partir de larges et stables canaux d'irrigation.

c) Formule de A.F.Koudriachov : (réf : J.Larras)

$$qsb = L * p1 * 0.0075 * q * (u^2 / g * h)^2$$

origine :

Cette formule résume les résultats de mesure de seize équipes d'expérimentateurs généralement russes.

domaine d'application :

Tout ceci ne vaut que pour les transports par charriage de granulats quartzeux dans l'eau, et les résultats sont assez dispersés. Mais la formule de A.F.Koudriachov s'applique dans une gamme de variation très étendue:

hauteur d'eau	: 2.25 à 1300 cm
vitesses d'écoulement	: 20 à 270 cm/s
diamètres des granulats	: 30 à 250 000 microns
débites solides	: 0.016 à 225 kg/m.s
nombre de Froude	: 0.0016 à 3.005

4) Autres :

a) Formule de Engelund-Hansen : (réf : A.S.C.E)

$$qsb = L * 0.05 * p1 * u^2 * (d / (g * ((p1/p) - 1)))^{0.5} * t^{3/2}$$

origine :

La formule repose sur les données de quatre échantillons de relevés faits sur le même canal dont la largeur est de 2.50 mètres et la longueur de 40 mètres. Le diamètre médian des sédiments étant respectivement de 0.19, 0.27 et 0.93 millimètres.

domaine de validité :

Cette relation n'est valable que dans le cas où le nombre de Reynolds $u^2 * d / \nu$ excède la valeur 12 (en utilisant les unités Anglaises). Elle n'est non plus pas à appliquer dans les fonds ondulés ou ridés. Ces auteurs ne la recommandent pas si le diamètre médian est inférieur à 0.15 millimètres.

b) Formule de Toffaleti : (réf : A.S.C.E) (annexe 7)

$$qsb = M * (2 * d)^{1 + \nu} - 0.758 * z$$

- qsb en tons/day.ft
- $nv = 0.1198 + 0.00048 * T$
- $z = w * u / (cz * h * j1)$
 - $cz = 260.67 - 0.667 * T$
- $M = 0.6 / ((Tt * A * k4 / u^2)^{5/3} * (ds / 0.00058)^{5/3})$
 $* (1 + nv - 0.758 * zs) / ((h / 11.24)^{1 + nv - 0.758 * zs} - (2ds)^{1 + nv - 0.756 * zs})$
 - $zs = ws * u / (cz * h * j1)$
 - A = fonction de cte, défini dans l'annexe
 - $k4 =$ fonction de $(cte * 10^5 * j1 * d65s)$
 - fonction étant définie dans l'annexe
 - $cte = (10^5 * nu)^{1/3} / (10 * u' * s)$
 - $Tt = 1.10(0.051 + 0.00009 * T)$

origine :

Cette formule est basée sur de vastes données, de sept rivières et de plusieurs canaux, apportées par quatre investigateurs. Ces rivières sont le Mississippi à St Louis, le Rio Grande à Barnalillo, le Middle Loup, le Niobrara, et trois rivières du bassin bas du Mississippi. Ces sept rivières ont des profondeurs partant de moins de 1 ft jusqu'à 50 ft et des sédiments de fond qui sont des fines.

c) Formule de A.A.Kalinske : (réf : J.Larras)

$$qsb = L * p1 * d * u^{**2.5} * (\text{fonction de } (tc/t0)) * (tc/t0)$$

fonction de $tc/t0$ définie annexe 8.

origine :

- La formule résulte d'un calcul théorique qui tient compte des fluctuations locales des vitesses d'écoulement sur le fond et qu'on peut résumer comme suit:

Les actions hydrodynamiques qui maintiennent la persistance du mouvement d'entraînement d'un granulat vers l'aval résultent de la différence qui sépare la vitesse instantanée us du granulat de la vitesse instantanée u du liquide à son contact. A.A.Kalinske a donc supposé que la différence de vitesses instantanées qui maintient la persistance du mouvement était égale à la vitesse uc qui provoquerait la mise en route du mouvement:

$$u - us = uc$$

bien que cela revienne à négliger les phénomènes de saltation et l'inertie des granulats.

Le rapport us/u entre la vitesse moyenne du granulat et celle du liquide à son contact est donc une fonction du rapport uc/u entre la vitesse moyenne du liquide au contact du granulat, puisqu'il résulte de l'égalité précédente que l'on a:

$$(u_s/u) = 1 - (u_c/u)$$

pour les valeurs instantanées de ces vitesses. Or, le rapport u_c/u entre les vitesses moyennes est lui même fonction du rapport t_0/t_c entre les tensions tangentielles qui leur correspondent, dans la mesure où l'on peut considérer la lois de Chézy comme rigoureusement exacte dans le cas qui nous occupe:

$$t_c/t_0 = h c_j c / h j_1 = (u_c/u)^2$$

Le rapport u_s/u entre les vitesses moyennes du granulat et du liquide à son contact est donc une fonction du rapport t_0/t_c entre les tensions tangentielles qui leur correspondent:

$$u_s/u = (\text{fonction de } (t_c/t_0)) * t_c/t_0$$

et la forme de cette fonction ne dépend que de la loi de répartition des fluctuations locales des vitesses d'écoulement du liquide sur le fond.

A.A.Kalinske a calculé la fonction de (t_c/t_0) en admettant que ces fluctuations locales étaient des fluctuations gaussiennes, avec un écart quadratique de l'ordre du quart de la valeur moyenne, et l'on a donc la courbe représentative de la fonction ainsi obtenue en annexe 8.

- Reste à relier le débit solide q'_{sb} à la fonction de (t_c/t_0) :

Le poids moyen des granulats est proportionnel à leur poids volumique p_1 et au cube de leur diamètre médian d . Le nombre de granulats par couches et par unité de surface du fond est inversement proportionnel à leur encombrement, donc au carré de leur diamètre médian.

Le poids total p_t de granulats par couche et par unité de surface du fond est donc proportionnel à leur poids volumique et à leur diamètre médian d . Et le poids sec q'_{sb} de granulats charriés par unité de largeur dans l'unité de temps est proportionnel au produit $p_t * u_s$ si l'on admet (ce qui n'est qu'est qu'une hypothèse) que le transport solide met toujours le même nombre de couches de granulats en jeu, quel que soit le débit du liquide qui s'écoule:

$$q'_{sb} = m * p_1 * d * u_s$$

Il résulte de là que l'on a:

$$q'_{sb}/p_1 * d * u = m * u_s/u$$

et par suite:

$$q'_{sb}/p_1 \cdot d \cdot u^* = m_1 \cdot (\text{fonction de } (t_c/t_0)) \cdot t_c/t_0$$

- Le coefficient m_1 vaut 2.5 dans le cas le plus habituel où les granulats comportent 35% de vides dans chaque couche.

Et l'on a donc la formule énoncé au départ.

domaine de validité :

La formule s'accorde bien avec les résultats obtenus par cinq équipes d'expérimentateurs en laboratoire, puis par A.A.Kalinske lui-même sur deux rivières d'Amérique, pour le transport de sables quartzeux par charriage et saltation dans l'eau.

Mais l'expérience et la théorie divergent pour les plus gros débits, et c'est probablement dû dans ce cas: soit à l'importance particulière des phénomènes de saltation par rapport aux phénomènes de charriage que la théorie de A.A.Kalinske prend seuls en compte, soit à l'importance particulière des erreurs provenant des hypothèses, des approximations et des simplifications consenties.

5) remarques :

a) Les formules et les diagrammes que nous avons passés en revue dans le présent chapitre ne permettent pas d'évaluer la valeur réelle mais la valeur maximale des quantités de granulats qu'un écoulement peut transporter avec lui. Les granulats qui tapissent les fonds n'occupent en effet pas des volumes illimités, et l'écoulement peut finir par mettre des fonds non érodables à nu, ce qui réduit d'autant l'étendue des zones d'alimentation des transports de granulats.

b) Les formules et les diagrammes que nous avons passés en revue dans le présent chapitre ne permettent pas d'évaluer le débit solide des écoulements qui ne seraient pas rectilignes uniformes. Leurs indications peuvent donc se trouver complètement en défaut dans le cas, par exemple, d'une décrue rapide qui laisserait subsister des ondulations du fond d'un type incompatible avec les nouvelles caractéristiques de l'écoulement.

c) Les formules et les diagrammes que nous avons passés en revue dans le présent chapitre ne donnent, enfin, pas toujours de bons résultats pour les granulats de diamètre non uniforme: soit que les lois exprimées ne conviennent réellement qu'à des matériaux de diamètre uniforme (comme la formule de Einstein), soit qu'on connaisse mal les limites de validité de ces lois, soit qu'on ne soit pas bien en mesure d'évaluer la valeur conventionnelle de d (diamètre) qui permettrait de représenter telle ou telle courbe de répartition granulométrique par un seul chiffre.

Ces problèmes ont fait l'objet d'un nombre considérable de recherches, parmi lesquelles nous signalerons plus spécialement celles de Einstein et Ning Chien sur les mélanges de granulats quartzeux et de M.Remilleux sur les mélanges de granulats de

densités différentes. Mais on n'a pratiquement pas pu sortir du domaine de la technologie dans ce genre de recherches, et l'on doit mettre surtout à leur actif la construction de modèles réduits sans ondulations ni ségrégations parasites dans certains laboratoires.

d) On est encore loin de disposer d'une méthode de calcul satisfaisante, et sans doute cela provient-il du nombre insuffisant de variables prises en compte dans les formules.

e) Il faut rajouter à cela les problèmes de fluctuations du débit solide dans le temps par:

- le caractère aléatoire des changements de position des granulats. Parmi les théories mathématiques qui ont vu le jour, on peut citer l'étude que Einstein a développé à partir des conséquences des hypothèses suivantes en 1937:

- la probabilité pour qu'un granulat en mouvement poursuive son chemin est proportionnelle au chemin parcouru.

- la probabilité pour qu'un granulat à l'arrêt continue d'y rester est proportionnelle au temps écoulé.

- les probabilités précédentes sont conformes à la loi de Galton.

Mais toutes les théories existantes n'ont pas permis de dégager des lois physiques nouvelles à l'échelle des phénomènes macroscopiques dont s'occupent les hydrauliciens.

- Le hasard des envois et des retombées de granulats. Chaque granulat n'occupe en effet la place d'un autre qu'après le départ de ce dernier vers l'aval, puisque les ondulations conservent la même forme extérieure au cours du temps. Mais l'envol d'un granulat vers l'aval ne résulte pas du départ préalable de celui dont le hasard lui procurera finalement la place, et l'on n'est par suite pas dans le cas d'un ordre de succession bien défini dans des files parfaitement indépendantes.

- Les effets cumulés du hasard et, peut-être même, de certains phénomènes de relaxation. Ces fluctuations sont liées à la présence (où l'apparition) d'ondulations sur le fond.

- Le fait que les matériaux du fond comportent une granulométrie étendue, et qu'ils ne reçoivent pas suffisamment d'éléments fins de l'amont. Il arrive alors, en effet, qu'il s'écoule de plus en plus d'éléments fins vers l'aval, et qu'il ne finisse plus par rester qu'un "pavage" de gros éléments, pratiquement immobiles, sur le fond ainsi dégarni.

B) TRANSPORT EN SUSPENSION :

Formules présentées dans cette partie :

- Fonction de Einstein (Bed Load)
- Formule de Laursen
- Formule de Toffaleti
- Formule de S.C.Abalianz
- Formule de J.Larras
- Formule de F.Engelund

a) Formule de Einstein (Bed Load) : (réf : A.S.C.E)

$$q_{ss} = q_{st} - q_{sb}$$

- q_{st} qui est donné ultérieurement (voir transport total)
- q_{sb} qui a déjà été donné (Cf: transport par charriage et saltation)

Pour l'origine de la formule, se référer à ce qui a été dit pour le transport par charriage et saltation.

b) Formule de Laursen : (Réf : A.S.C.E)

$$q_{ss} = q_{st} + q_{sb}$$

- q_{st} qui est donné ultérieurement (voir transport par charriage et saltation)
- q_{sb} qui a déjà été donné (Cf: transport par charriage et saltation)

Pour l'origine de la formule, se référer à ce qui a été dit pour le transport par charriage et saltation

c) Formule de Toffaleti : (réf : A.S.C.E)

$$q_{ss} = q_{ssl} + q_{ssm} + q_{ssu}$$

- q_{ssl} : débit des sédiments en suspension sur la partie basse de la section

$$q_{ssl} = M * ((h/11.24)^{1+nv-0.758*zs} - (2*ds)^{1+nv-0.756*zs}) / (1+nv-0.756*zs)$$
- q_{ssm} : débit des sédiments sur la partie située à mi-hauteur de la section

$$q_{ssm} = M * (h/11.24)^{0.244*zs} * ((h/2.5)^{1+nv-zs} - (h/11.24)^{1+nv-zs}) / (1+nv-zs)$$
- q_{ssu} : débit des sédiments sur la partie haute de la section

$$q_{ssu} = M * (h/11.24)^{0.244*zs} * (h/2.5)^{0.5*zs} * (h^{1+nv-1.5*zs} - (h/2.5)^{1+nv-1.5*zs}) / (1+nv-1.5*zs)$$
- M , nv et zs ont déjà été définis pour le transport par charriage et saltation

Pour l'origine d'application de la formule, se référer à ce qui a été dit pour le transport par charriage et saltation

d) Formule de S.CH.Abalianz : (réf : J.Larras)

$$q_{ss} = q \cdot 26 \cdot u^3 / (h^{3/4} \cdot w_s)$$

origine :

Cette formule résume assez bien l'ensemble des résultats obtenus par les ingénieurs russes à l'époque (1958) sur les crues des rivières d'Asie Centrale.

e) Formule de J.Larras : (réf : J.Larras)

$$q_{ss} = q \cdot 200 \cdot (j_1 \cdot h / d_s)^5 \cdot 10^{-6}$$

origine :

Cette formule résulte d'une recherche de la valeur moyenne C_1 du taux de concentration des granulates sur toute la hauteur du liquide en s'appuyant sur les considérations suivantes.

La répartition des vitesses turbulentes au sein du liquide ne dépend, comme on le sait, que de la vitesse étoilée de l'écoulement. Aussi lui a-t-il semblé que le taux de concentration moyen des granulates C_1 ne devait dépendre que du nombre de Froude étoilé $u^* / (g \cdot d_s)^{0.5}$ par lequel on peut caractériser l'intensité de la turbulence au sein du liquide à l'échelle du grain. Et il a effectivement trouvé la relation empirique citée ci-dessus.

f) Formule de F.Engelund : (réf : J.Larras)

$$q_{ss} = q \cdot 0.00056 \cdot (u^* / w_s)^4$$

domaine de validité :

Cette formule s'applique à des concentrations volumétriques de 0.6 à 10% de granulates quartzeux de 0.10 à 0.28 millimètres de diamètre, avec une erreur moyenne quadratique relative de l'ordre de 15%.

g) remarque :

On peut aborder la mécanique des phénomènes de suspension par les équations générales de la mécanique des fluides, de la mécanique de l'équilibre des phases, ou de la mécanique statistique.

C) TRANSPORT TOTAL :

IL y a deux façon d'évaluer le débit solide total:

- soit par l'addition de deux évaluations distinctes. Mais on laisse échapper ainsi toute la partie du transport solide qui ne participe ni du charriage et de la saltation à l'état pur, ni de la suspension également à l'état pur, et cela peut conduire à des erreurs considérables dans le cas de certains cours d'eau naturels.

- soit d'un seul bloc, au moyen de formules ou de diagrammes spéciaux, ce qui est fait dans le présent chapitre.

Dans cette partie sont présentés :

- Fonction de Einstein (Bed Load)
- Formule de Laursen
- Formule de Toffaleti
- Méthode de E.M.Laursen
- Méthode 1 de R.J.Garde et J.Dattatri
- Méthode 2 de R.J.Garde et J.Dattatri
- Méthode de F.Engelund et E.Hansen

a) Fonction de Einstein : (réf : A.S.C.E)

$$q_{st} = q_{sb}(Pr^{*I_1 + I_2 + 1})$$

- $Pr = 2.3 \cdot \log(30.2 \cdot x \cdot Rh / d_{65})$
- q_{sb} et x ont déjà été donnés (Cf: charriage et saltation)
- I_1 et I_2 sont définis en annexe 9

Pour l'origine de la fonction, se référer à ce qui a été dit pour le transport par charriage et saltation

b) Formule de Laursen : (réf : A.S.C.E)

$$q_{st} = q \cdot 0.01 \cdot p \cdot (ds/h)^{7/6} \cdot ((t_0's/tcs) - 1) \cdot \text{fonction de } (u^*/ws)$$

fonction de (u^*/ws) définie en annexe 3

Pour l'origine de la formule, se référer à ce qui a été dit pour le transport par charriage et saltation

c) Formule de Toffaleti : (réf : A.S.C.E)

$$q_{st} = q_{sb} + q_{ssl} + q_{ssm} + q_{ssu}$$

- q_{sb} qui a déjà été donné (Cf transport par charriage et saltation)

- qssl, qssm, qssu qui ont déjà été donnés (Cf: transport en suspension)

Pour l'origine de la formule, se référer à ce qui a été dit pour le transport par charriage et saltation

d) Méthode de E.M.Laursen : (réf : J.Larras)

$$qst = p_1 \cdot \text{fonction de } (u^*/ws) \cdot q \cdot (ds/h)^{7/6} \cdot (t_0's - tcs) / (tcs \cdot 100 \cdot ((p_1/p) - 1))$$

avec fonction de u^*/ws définie en annexe 10

origine :

E.M.Laursen s'est penché sur les résultats d'essais de dix équipes d'expérimentateurs en laboratoire, dont trois portant sur des transports par charriage et saltation, deux sur des transports en suspension, et cinq sur des transports mixtes comprenant les deux types de transports à la fois

Cet examen l'a conduit à trouver une relation empirique entre le rapport $100 \cdot ((p_1/p) - 1) \cdot qst / (q \cdot (ds/h)^{7/6} \cdot ((t_0's - tcs) / tcs))$ et le rapport u^*/ws , en désignant par qst le débit total par unité de largeur de l'écoulement, par q le débit liquide correspondant, par u^* la vitesse étoilée par $t_0's$ la partie de la tension tangentielle qui correspond à des transports de granulates, par tcs la tension tangentielle critique, par h la hauteur du liquide qui s'écoule, par ds le diamètre des granulates, par $((p_1/p) - 1)$ leur densité par rapport au liquide, et par ws la vitesse de chute libre des granulates isolés dans le liquide.

domaine de validité :

E.M.Laursen a traduit cette relation empirique par le diagramme situé en annexe 10, et considéré ce diagramme comme valable pour les transports de granulates quartzeux de 0.011 à 4.08 millimètres de diamètre dans l'eau, avec des valeurs du rapport $100 \cdot ((p_1/p) - 1) \cdot qst / q$ comprises entre 0.001 et 11.1. Mais son diagramme manque de précision pour les gros granulates qui correspondent à des valeurs de u^*/ws inférieures à 1. Et R.J.Garde et J.Dattatri ont montré par la suite, à partir de cinq autres séries de mesure et d'essais sur des granulates quartzeux de 0.064 à 33 millimètres de diamètre, que le diagramme de E.M.Laursen conduisait à des valeurs beaucoup trop faibles du débit solide total pour les granulates quartzeux de moins de 0.10 millimètres de diamètre, mais beaucoup trop élevées pour les granulates les plus gros.

e) Méthode 1 de R.J.Garde et J.Dattatri : (réf : J.Larras)

$$qst = L \cdot p_1 \cdot 35 \cdot u^{**} \cdot ds \cdot ((t_0 - tcs) / ((p_1 - p) \cdot ds))^{3.5}$$

origine :

R.J.Garde et J.Dattatri ont étudié les résultats d'essais de six équipes d'expérimentateurs en laboratoire, et les résultats de sept séries de mesure en rivière,

sur les transports totaux de granulats quartzeux de 0.011 à 7.0 millimètres de diamètre dans l'eau, pour des hauteurs d'eau de 3.65 à 1 710 cm et des débits liquides de 0.007 à 73 000 litres par seconde. Cette analyse les a conduit à leur formule empirique présentée ci-dessus.

domaine de validité :

La formule donne d'assez bons résultats, bien qu'elle néglige l'influence probable de la profondeur relative h/ds (en désignant par h la hauteur du liquide qui s'écoule) et l'influence probable du nombre de Reynolds du mouvement de chute libre des granulats dans le liquide.

f) Méthode 2 de R.J.Garde et J.Dattatri (réf : J.Larras)

$$q_{st} = p_1 * (q/100) * (u^{**}h / (nu * \text{fonction de } (h/(ds * \phi'''))^{1.5}))^3$$

la fonction de $(h/(ds * \phi'''))^{1.5}$ est définie en annexe 11

origine :

R.J.Garde a montré que le transport solide total des écoulements rectilignes uniformes dans les tuyaux était justiciable d'une relation empirique entre :

- le rapport $100 * ((p_1/p) - 1) * q_{st}/q$
- le nombre de Reynolds étoilé de l'écoulement $u^{**}h/nu$
- la profondeur relative de l'écoulement h/ds
- une fonction ϕ' du diamètre des granulats

R.J.Garde et J.Dattatri se sont inspirés de ce travail pour essayer de voir si les écoulements rectilignes uniformes à surface libre ne seraient pas justiciables d'une relation empirique analogue. Leurs recherches en ce sens les ont conduits à remplacer la fonction ϕ' du diamètre des granulats par une fonction ϕ''' du nombre de Reynolds $ws * ds/nu$ du mouvement de chute libre des granulats dans le liquide.

domaine de validité :

La relation vaut pour les transports totaux de granulats quartzeux de 0.011 à 7.0 millimètres de diamètre dans l'eau, pour des hauteurs d'eau de 3.65 à 1 710 cm et des débits liquides de 0.007 à 73 000 litres par seconde.

g) Méthode de F.Engelund et E.Hansen : (réf : J.Larras)

$$q_{st} = L * p_1 * \phi * (((p_1/p) - 1) * g * ds^3)^{0.5}$$

$$\phi = 0.1 * \text{téta}^{2.5} / f$$

$$\text{téta} = t_0 / ((p_1 - p) * ds)$$

domaine de validité :

Cette relation vaut pour le débit solide total des granulats quartzeux de 0.19 à 0.93 millimètres de diamètre dans l'eau.

remarque: Il vaut mieux se fier à la référence "A.S.C.E" pour la formule de Laursen, car le diagramme qu'elle donne est plus exploitable.

V) CONCLUSION :

On dispose à présent d'un outil capable de nous fournir plusieurs évaluations du débit des sédiments transportés dans les cours d'eau.

Pour un cas donné bien précis, il ne faudra prendre en compte, comme évaluations, que celles pour lesquelles on ne sort pas de leur domaine d'application.

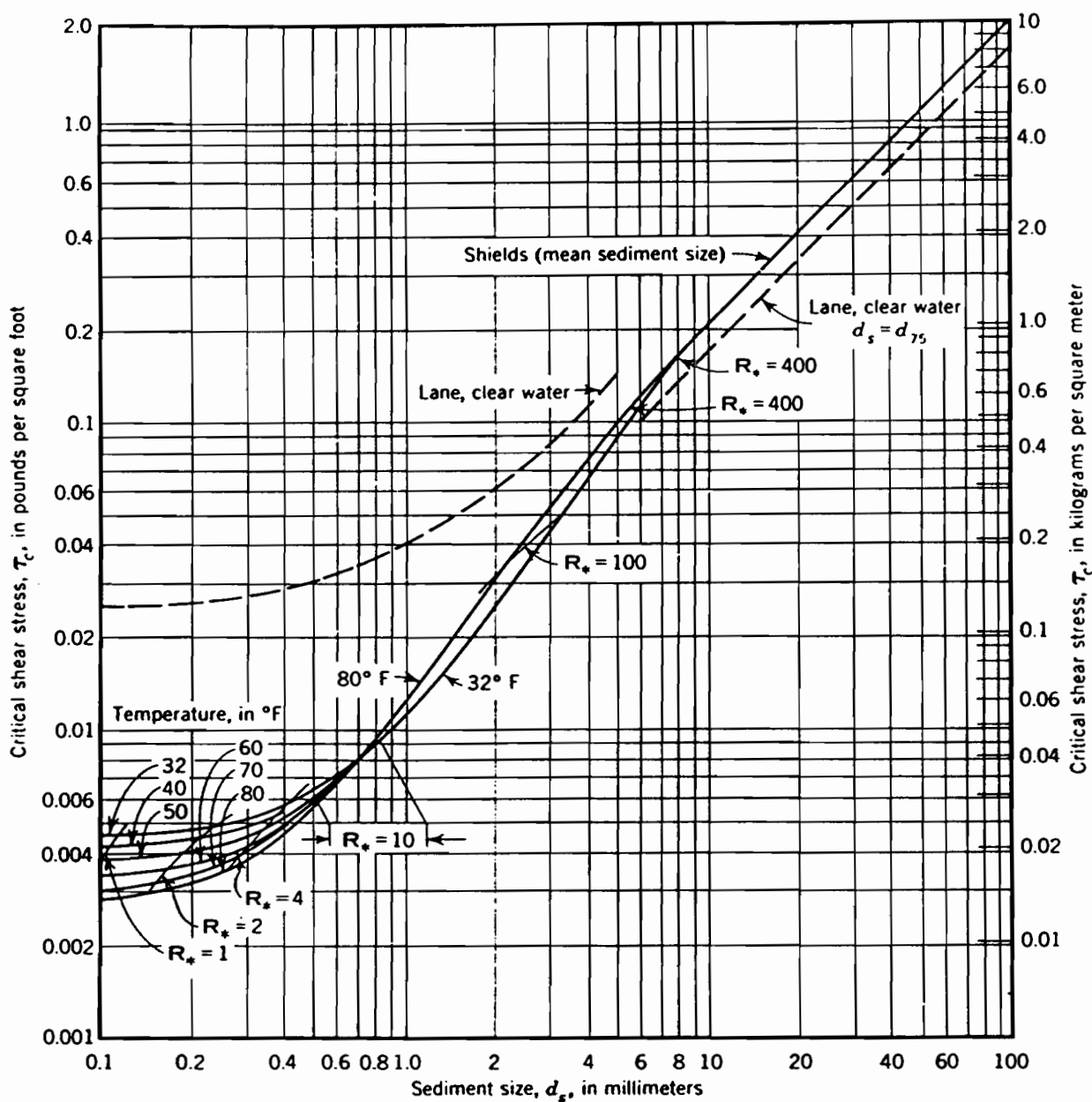
On a pu constater que les théories, du transport des sédiments, affluent surtout dans le cas du charriage et de la saltation. Ce qui est tout à fait intéressant, puisque c'est le débit des sédiments par ce mode de transport qui est le plus difficile à mesurer sur les cours d'eau.

VI) ANNEXES :

annexe 1: tension critique de frottement.....	p24
annexe 2: paramètre dub utilisé par DuBoys.....	p26
annexe 3: fonction de (u^*/w) utilisée par Laursen.....	p28
annexe 4: paramètre phi de Einstein-Brown.....	p30
annexe 5: paramètres de Einstein Bed Load Function.....	p32
annexe 6: paramètres de Colby.....	p36
annexe 7: paramètres de Toffaleti.....	p40
annexe 8: fonction de t_c/t_0 utilisée par A.A.Kalinske.....	p42
annexe 9: paramètres I1 et I2 de Einstein Bed Load.....	p44
annexe 10: diagramme de E.M.Laursen.....	p47
annexe 11: fonction utilisée pour la méthode 2 de R.J.garde et J.Dattatri.....	p49
annexe 12: présentation de la feuille de calcul "transpor".....	p51
annexe 13: présentation de la feuille de calcul "transpot".....	p54

ANNEXE 1

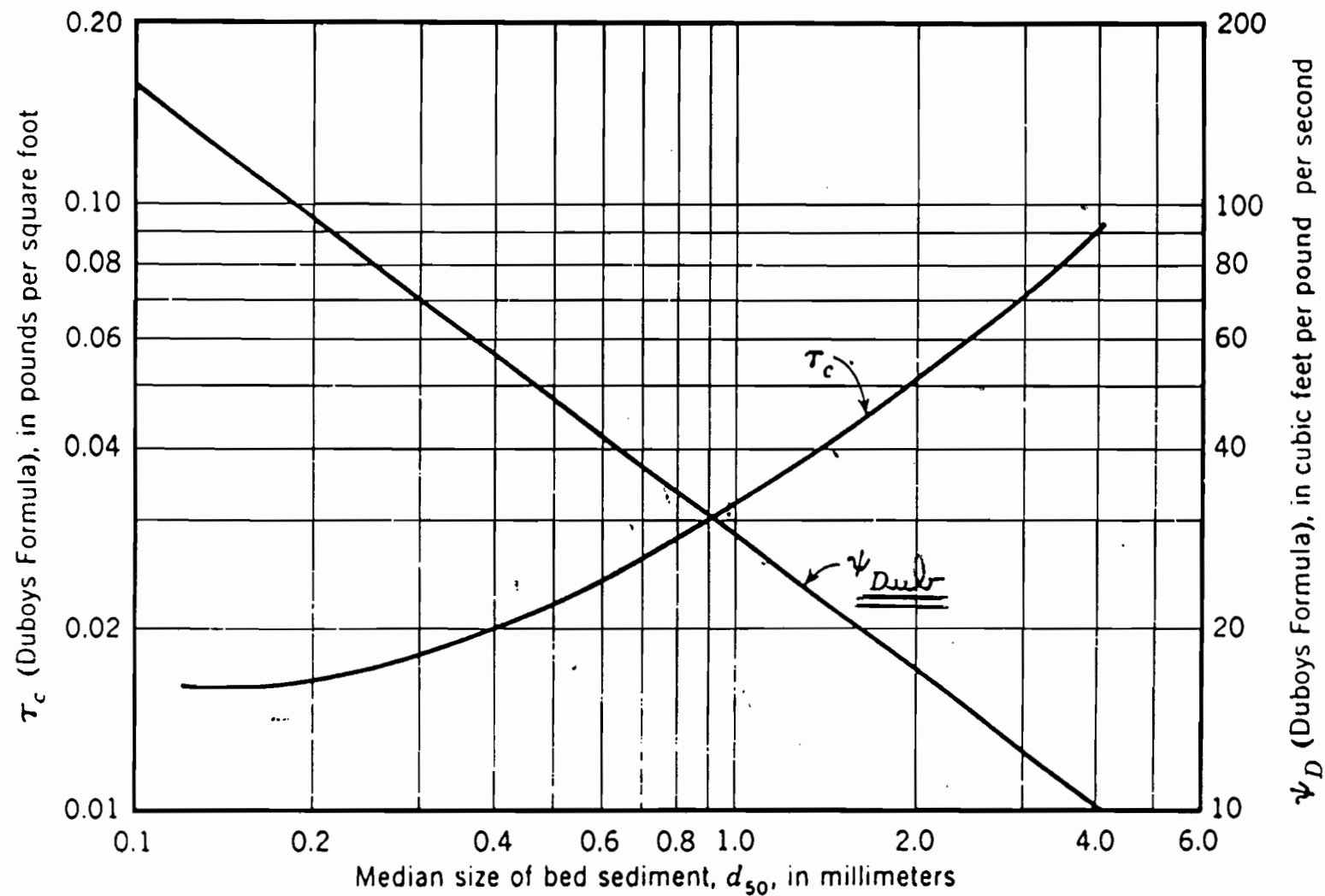
tension critique de frottement t_c



—Critical Shear Stress for Quartz Sediment In Water as Function of Grain Size; Shields (1936) and Lane (1955)

ANNEXE 2

paramètre dub utilisé par DuBoys



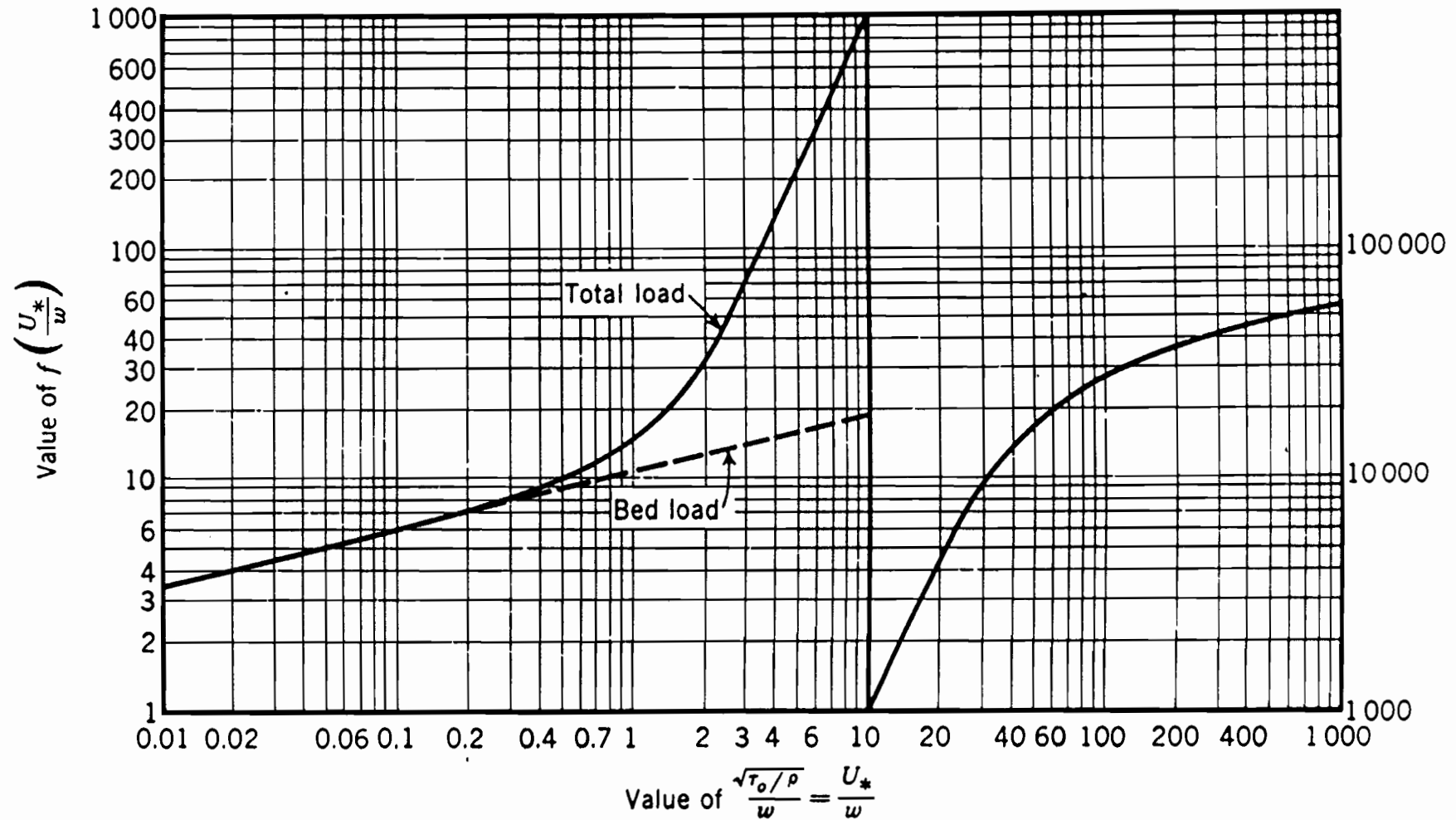
—Coefficient Ψ_D and Critical Shear Stress τ_c for DuBoys
Functions of Median Size of Bed Sediment

as

ANNEXE 3

fonction de (u^*/w) utilisée par Laursen

SEDIMENT TRANSPORTATION MECHANICS

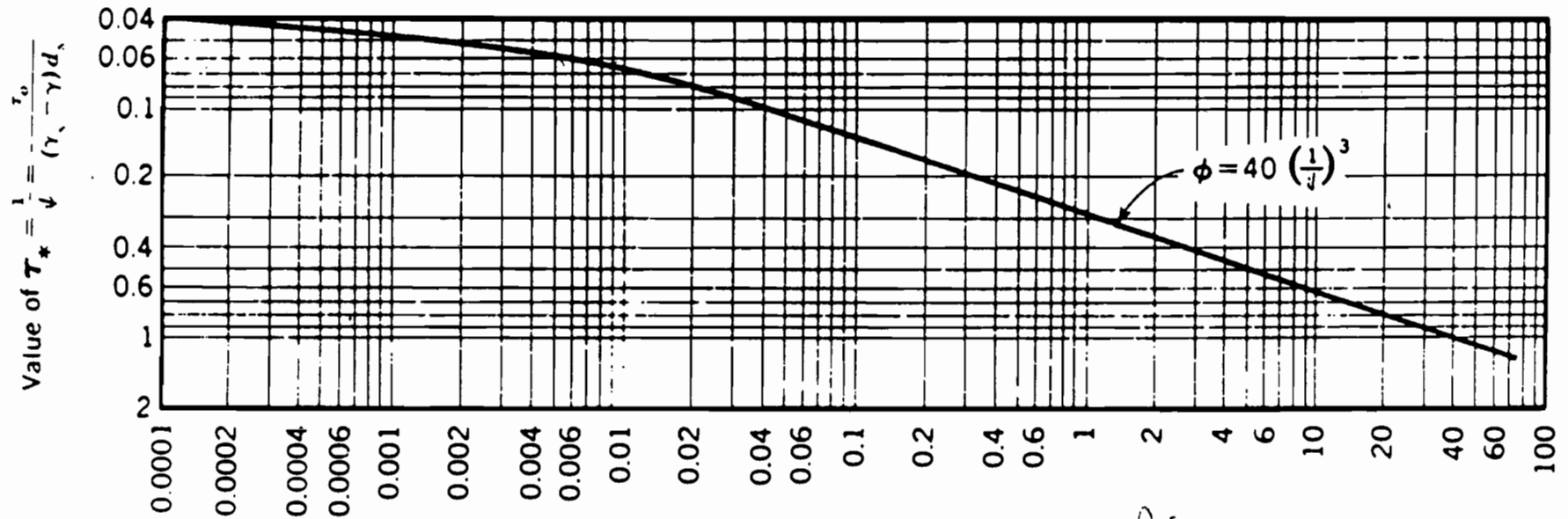


—Function $f(U_*/w)$ for Laursen Formula

ANNEXE 4

paramètre phi de Einstein-Brown

SEDIMENT TRANSPORTATION MECHANICS



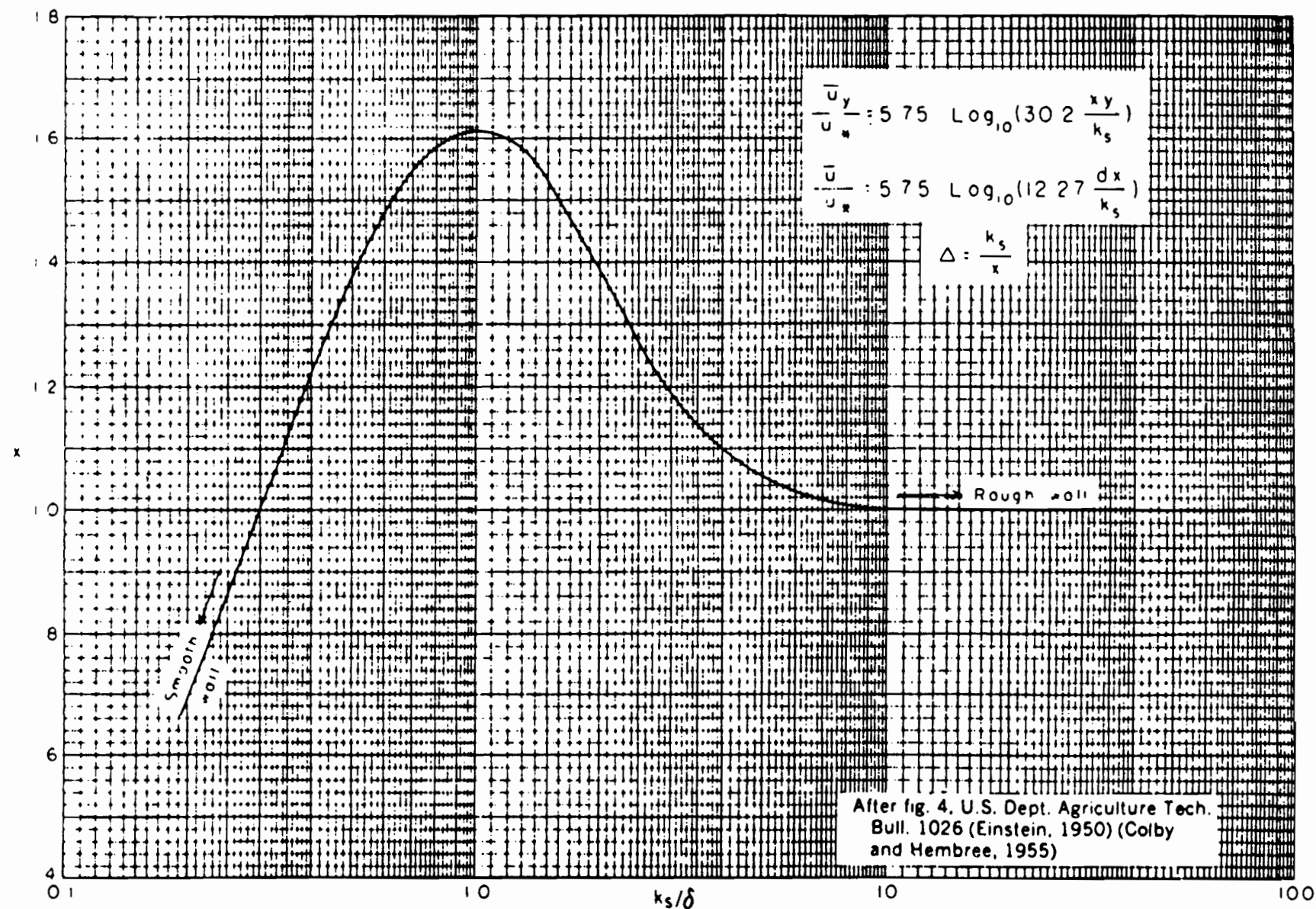
$$\text{Value of } \phi = \frac{v_s}{\gamma_s F \sqrt{g} \left(\frac{\gamma_s}{\gamma} - 1 \right) d_s^3} = \text{phi}$$

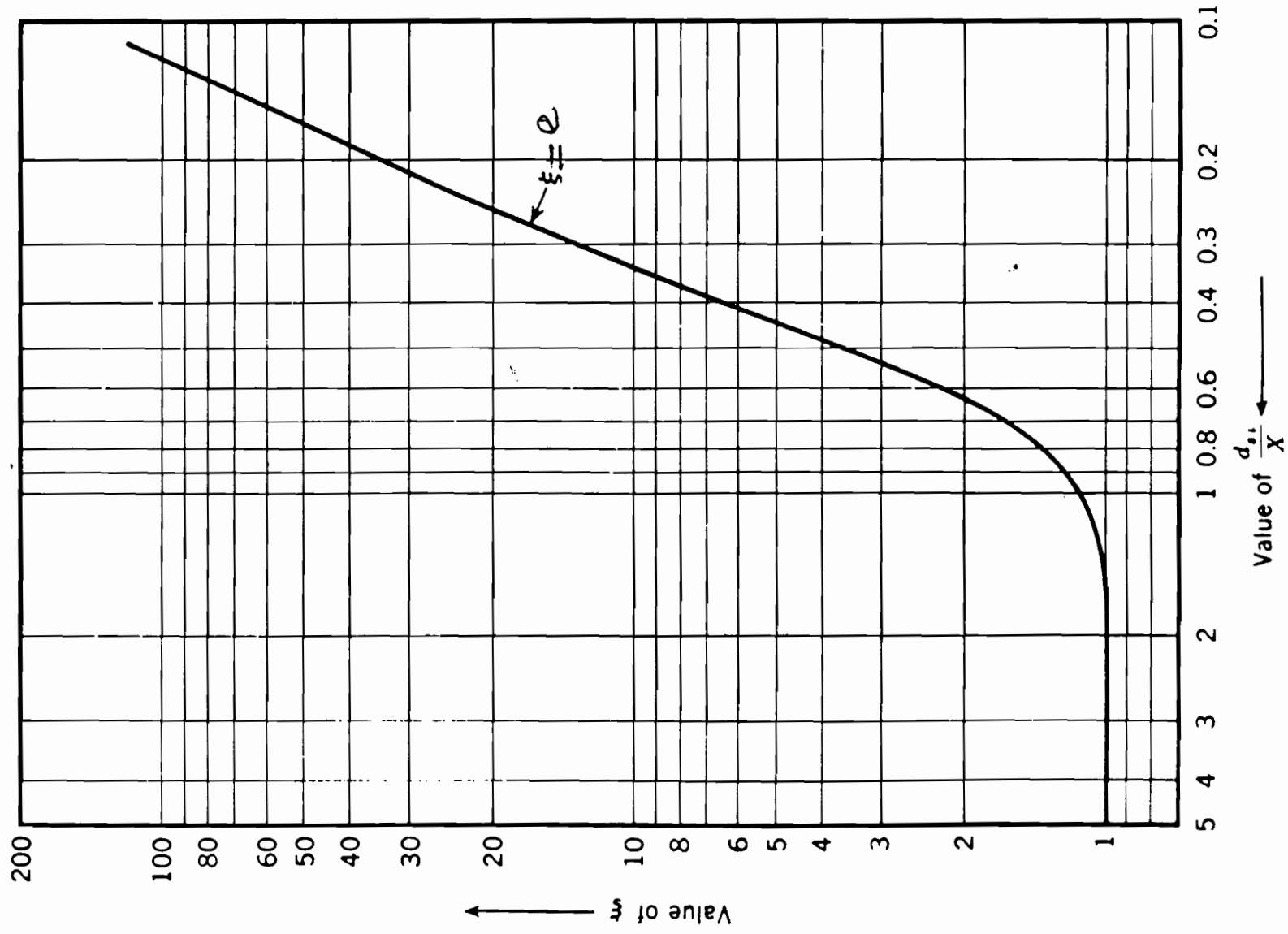
—Function $\phi = f(1/\Psi)$ for Einstein Brown

ANNEXE 5

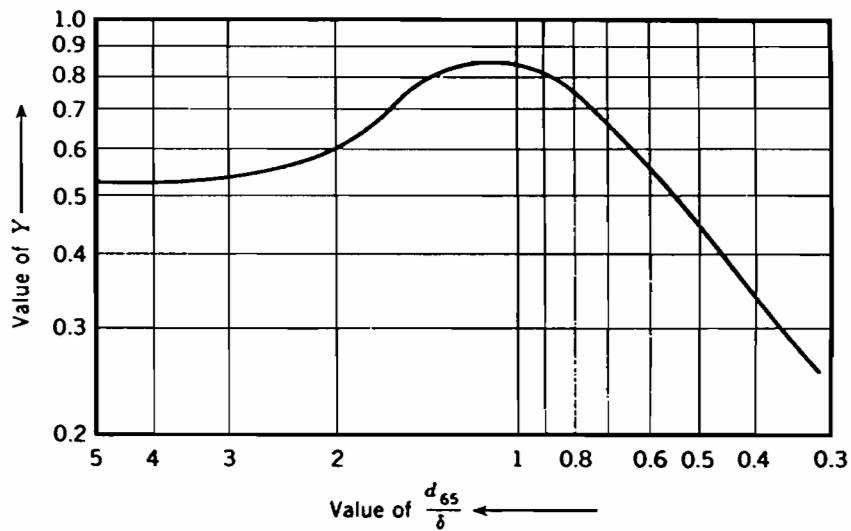
paramètres de Einstein Bed Load

- 1ère figure: paramètre x
- 2ème figure: paramètre e
- 3ème figure: paramètre Y
- 4ème figure: paramètre ϕ'

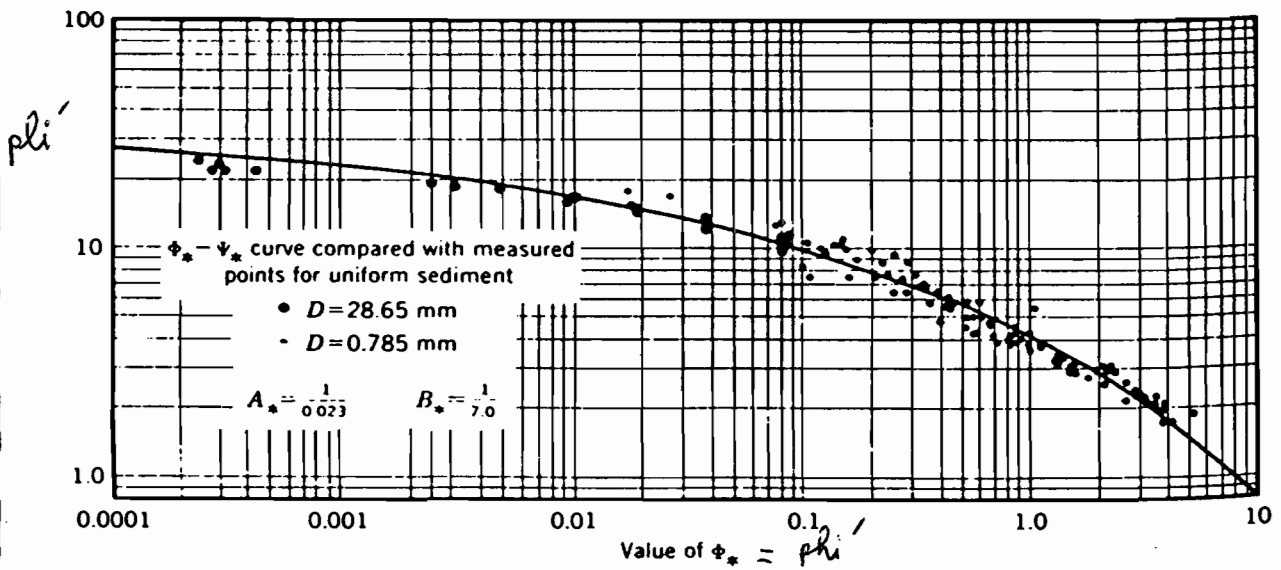




SEDIMENTATION ENGINEERING



— Factor Y in Einstein's Bed Load Function (Einstein, 1950)



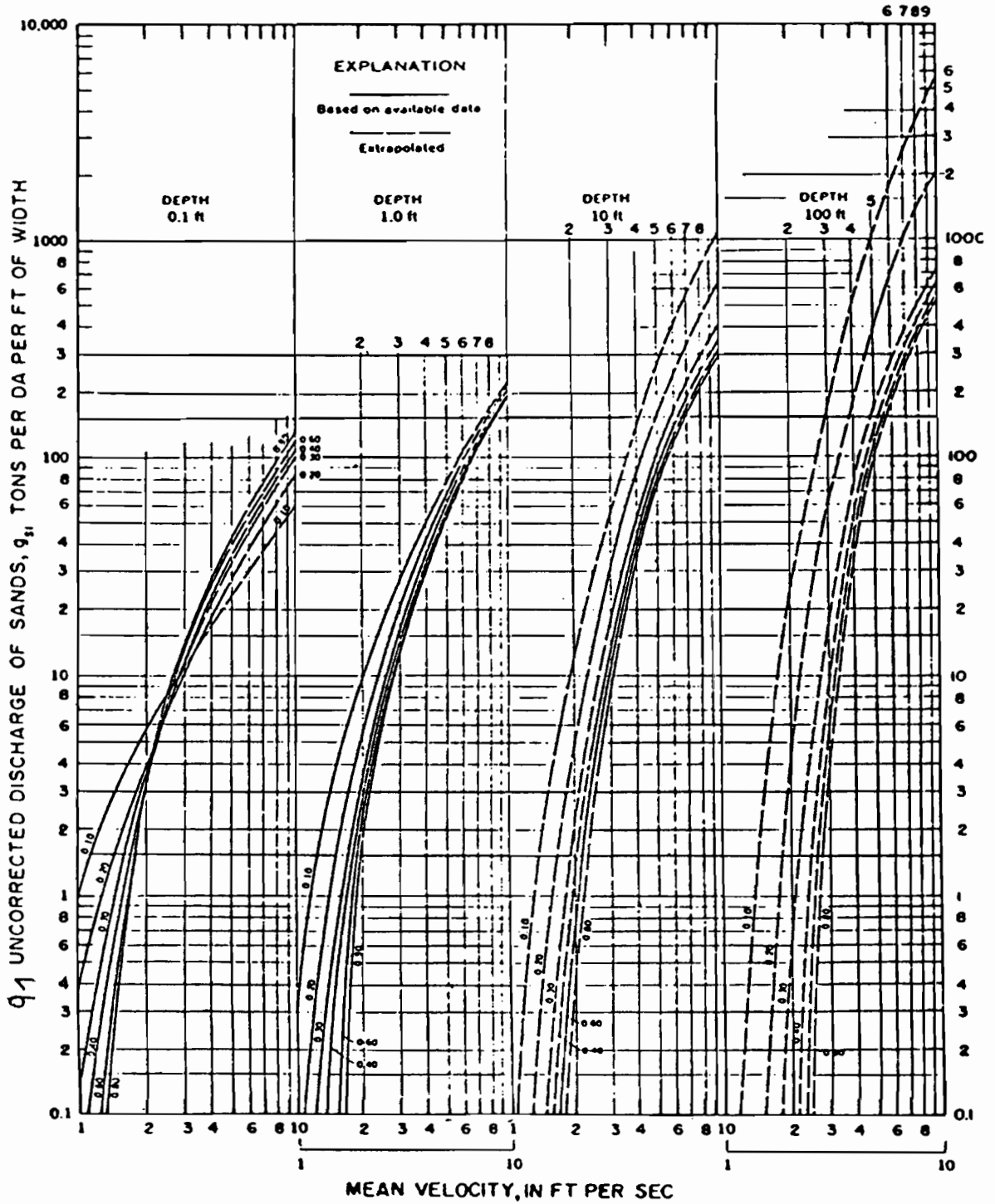
— Einstein's $\Phi_* - \Psi_*$ Bed Load Function (Einstein, 1950)

ANNEXE 6

paramètres de Colby

- 1ère figure: débit non corrigé des sédiments
- explication pour la détermination de q_1
- facteurs k_1 , k_2 et k_3

SEDIMENTATION ENGINEERING

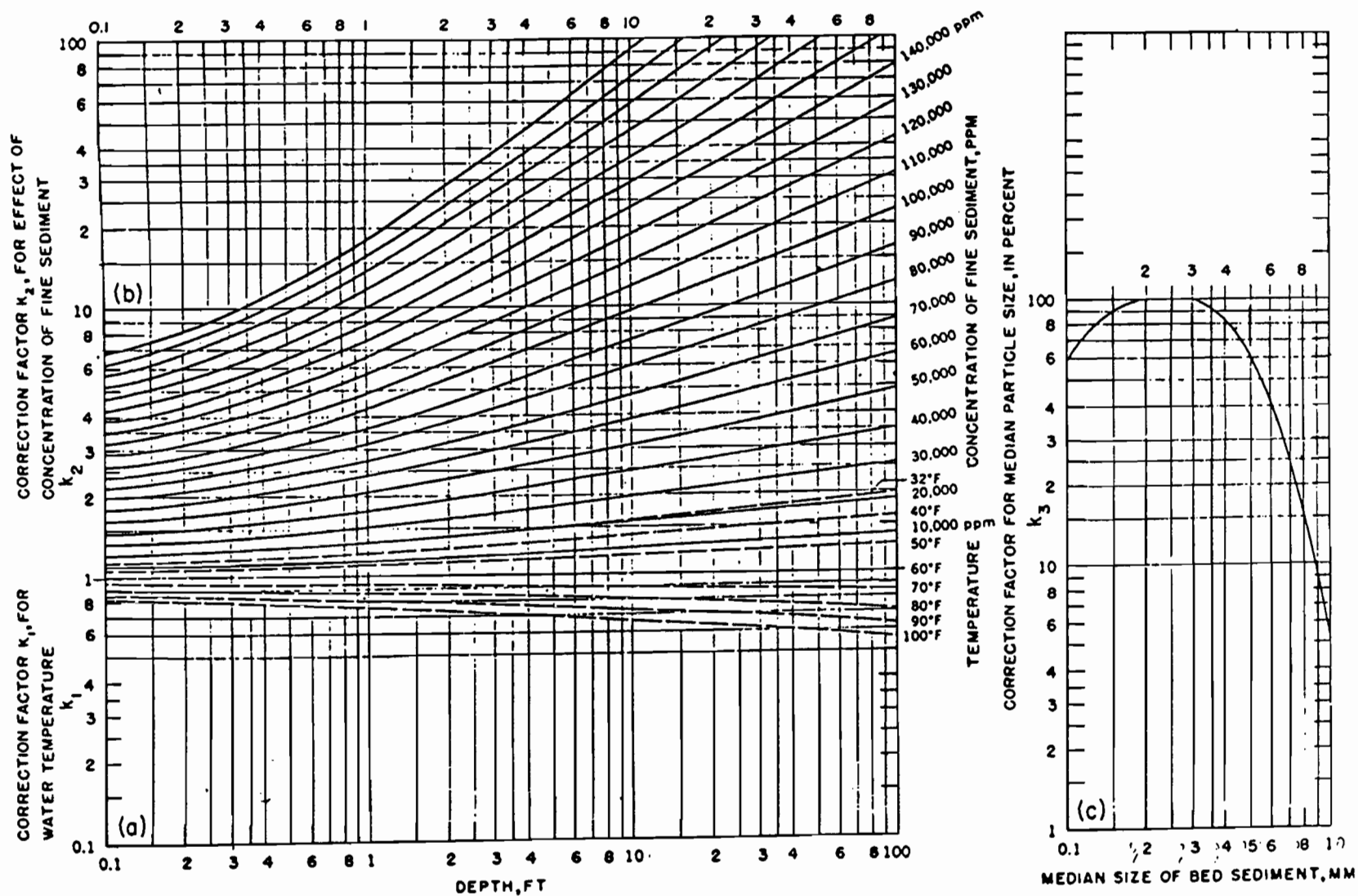


—Colby's (1964b) Relationship for Discharge of Sands in Terms of Mean Velocity for Six Median Sizes of Bed Sands, Four Depths of Flow, and Water Temperature of 60° F

Méthode pour la détermination de q_1 :

On a à sa disposition quatre sous-diagrammes qui permettent de déterminer des valeurs pour des hauteurs respectives d'écoulement de 0.1, 1, 10, 100ft.

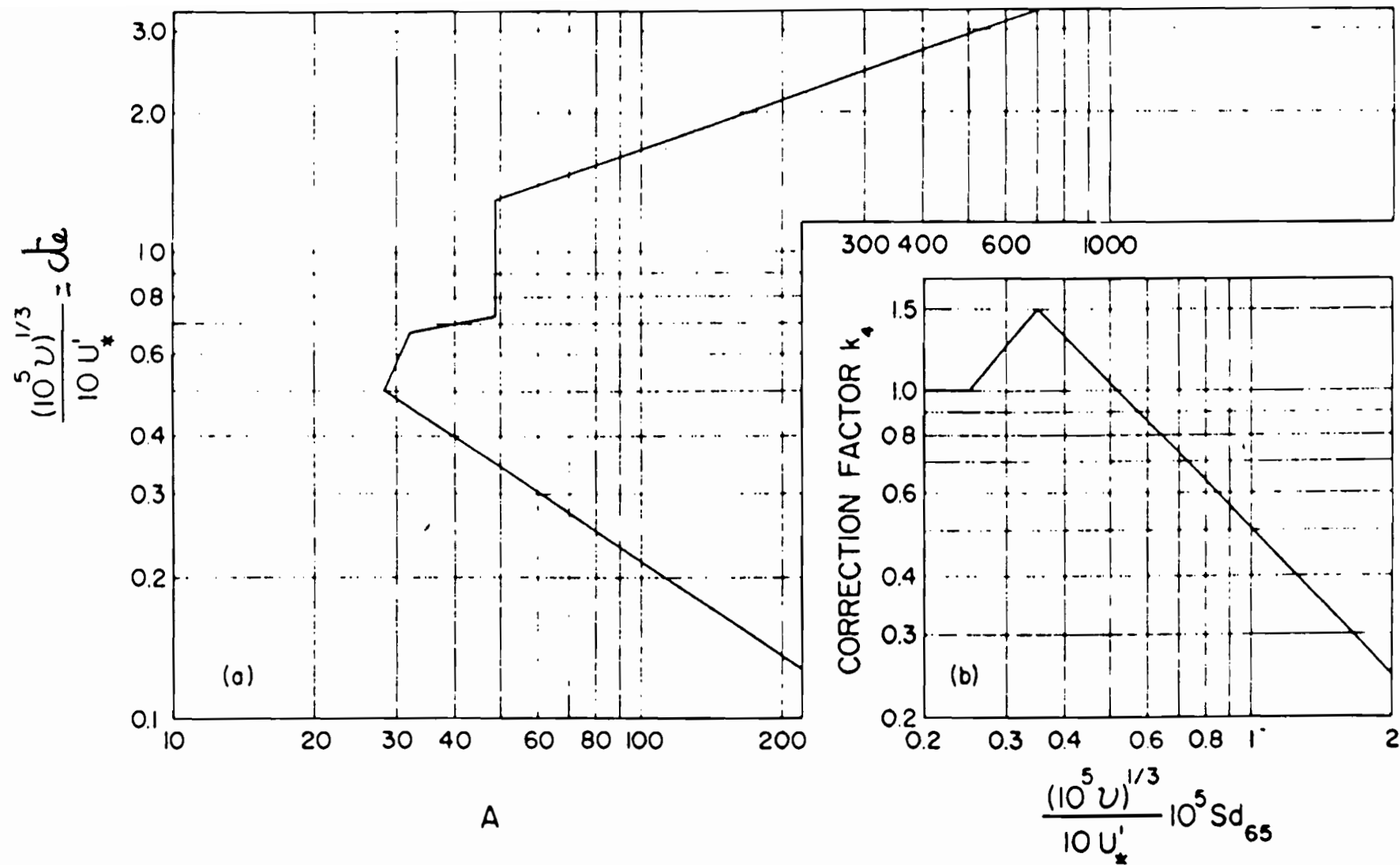
Pour une vitesse d'écoulement et un diamètre médian (de 0.10 à 0.80 millimètres) donnés, on calcule q_1 en utilisant les deux sous diagrammes qui entourent la hauteur d'eau concernée. A partir de là on procède à une interpolation logarithmique suivant la hauteur pour trouver la bonne valeur de q_1 .



—Colby's (1964b) Correction Factors for Effect of Water Temperature, Concentration of Fine Sediment, and Sediment Size to be Applied to Uncorrected Discharge of Sand

ANNEXE 7

Paramètres de Toffaleti

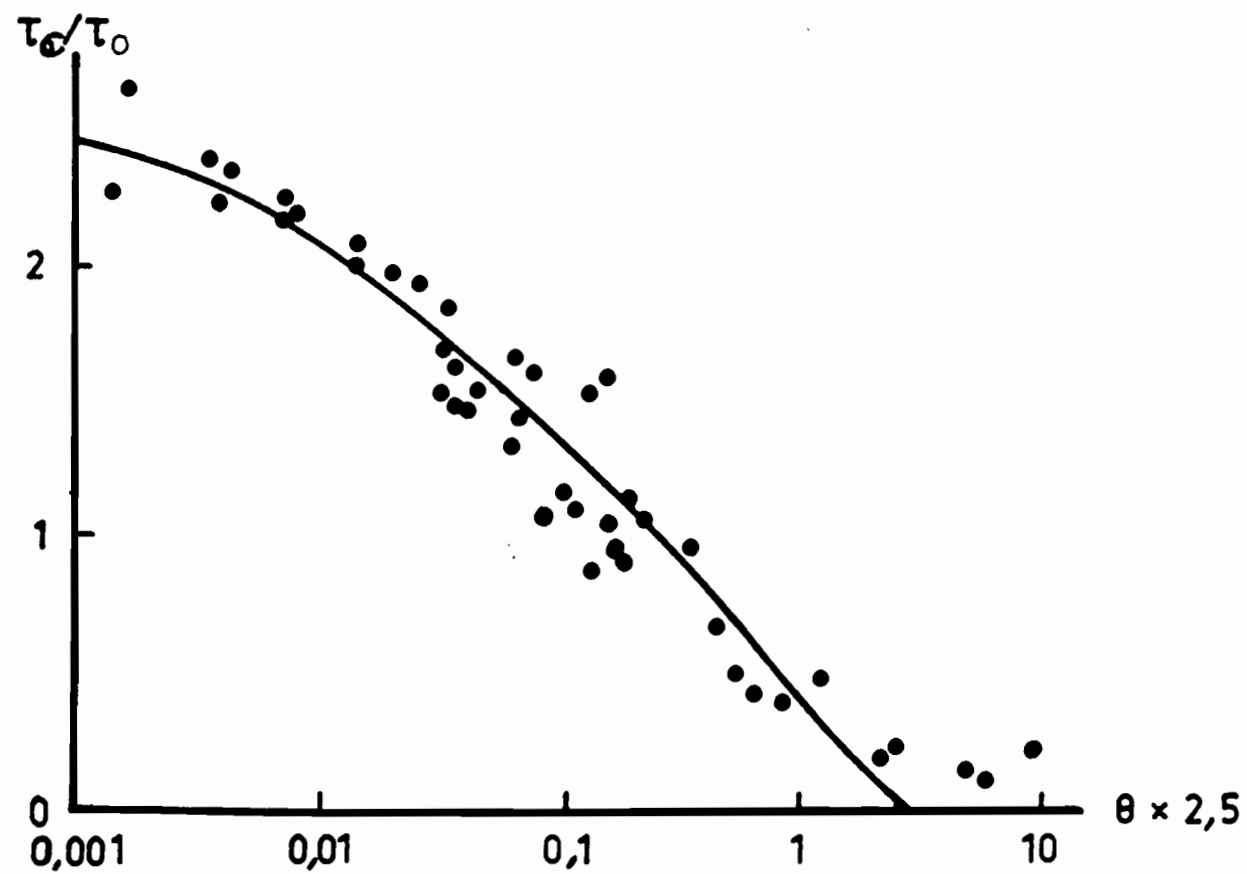


—Factors in Toffaletti Relations: (a) Factor A
 rection Factor k_4

(b) Cor-

ANNEXE 8

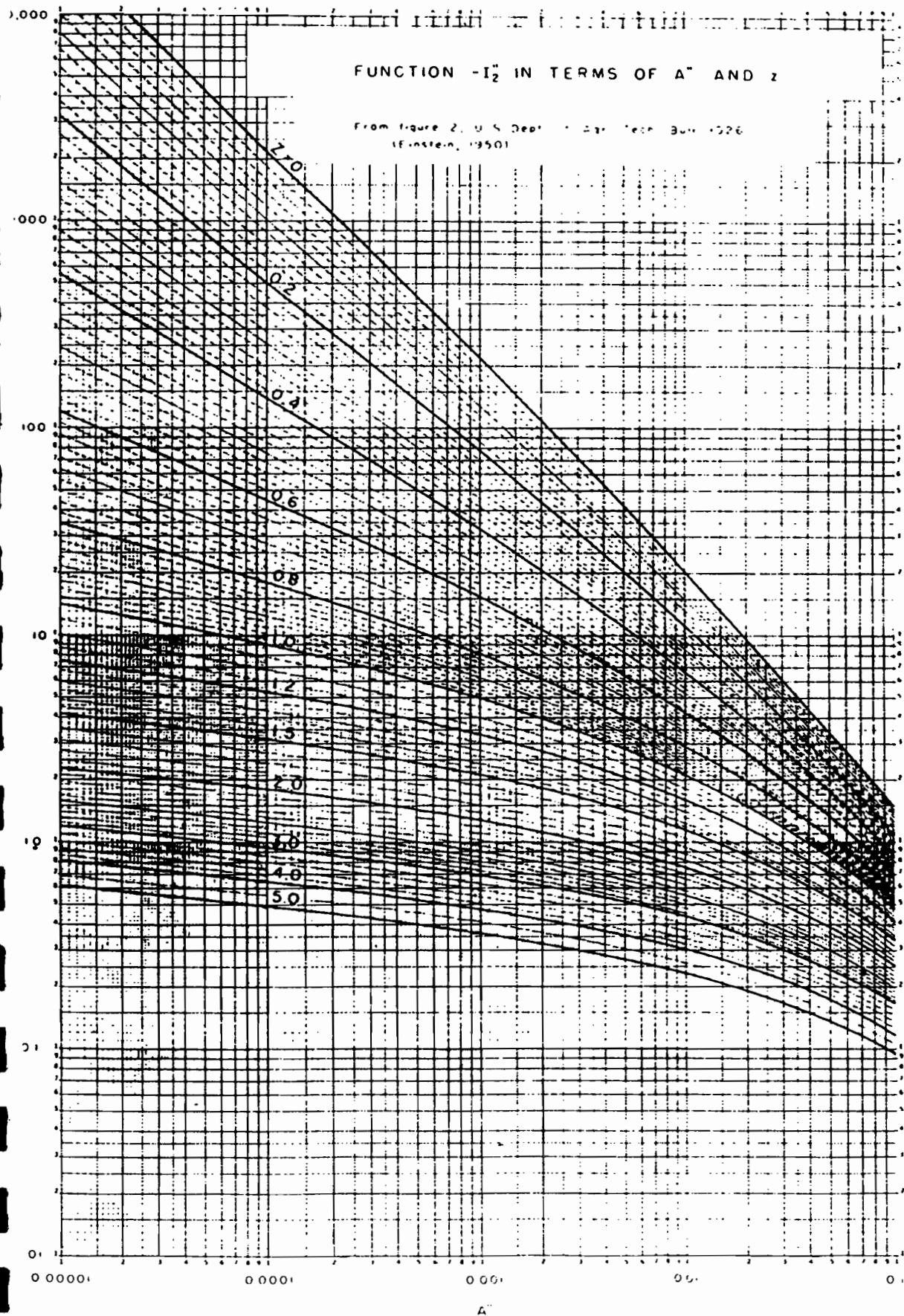
Fonction de t_c/t_0 utilisée par A.A.Kalinske



ANNEXE 9

paramètres I1 ET I2 de Einstein Bed Load Function

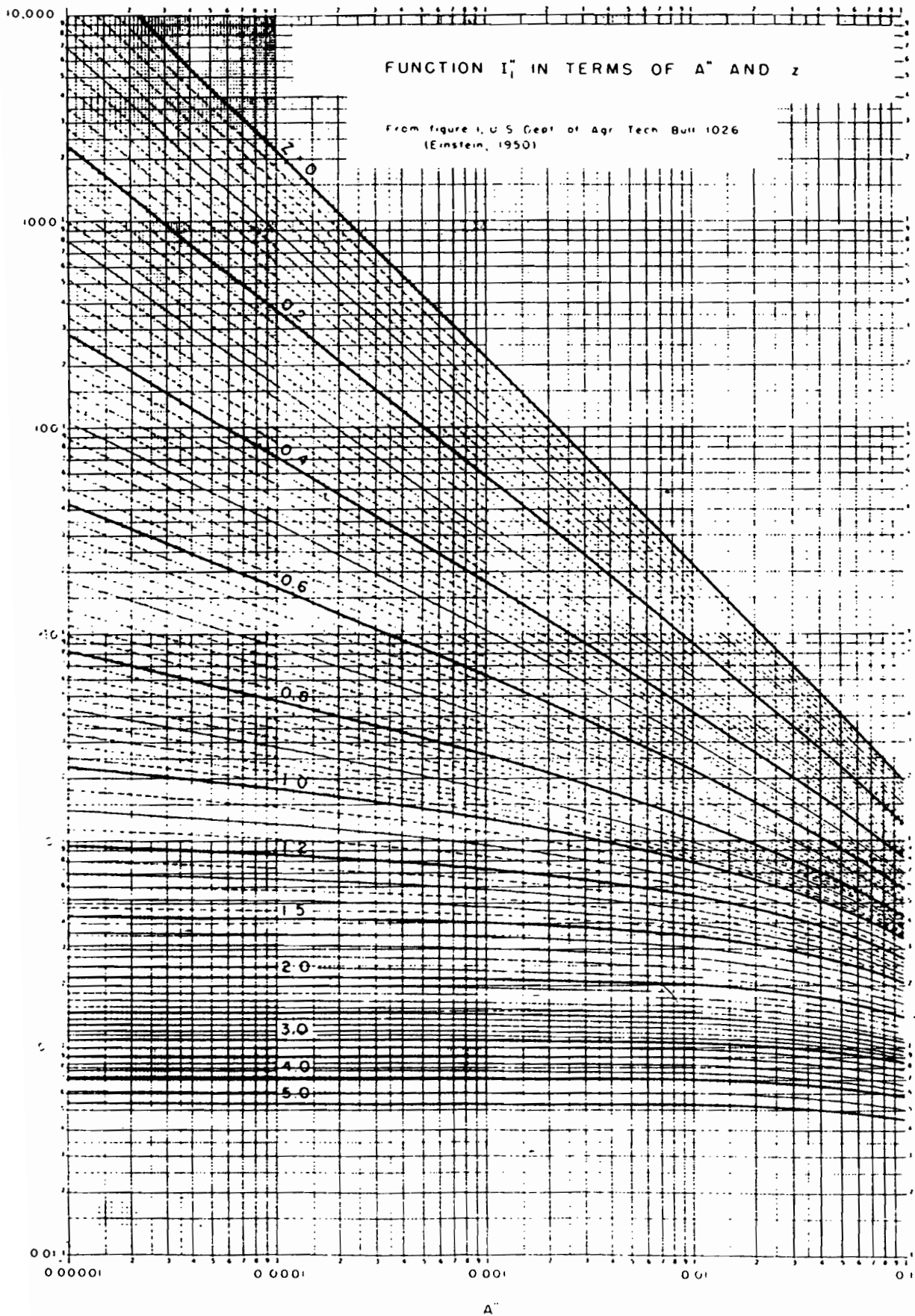
SEDIMENTATION ENGINEERING



-Integral I_2 In Terms of Exponent z

Einstein (1950)

SEDIMENT TRANSPORTATION MECHANICS



ANNEXE 10

diagramme de E.M.Laursen

TRANSPORT SOLIDE TOTAL

$$100 \delta Q_s / q (d/h)^{7/6} [(\tau_i - \tau_o) / \tau_o]$$

100 000

10 000

1000

100

10

1

0.01

0.1

1

10

100

1000

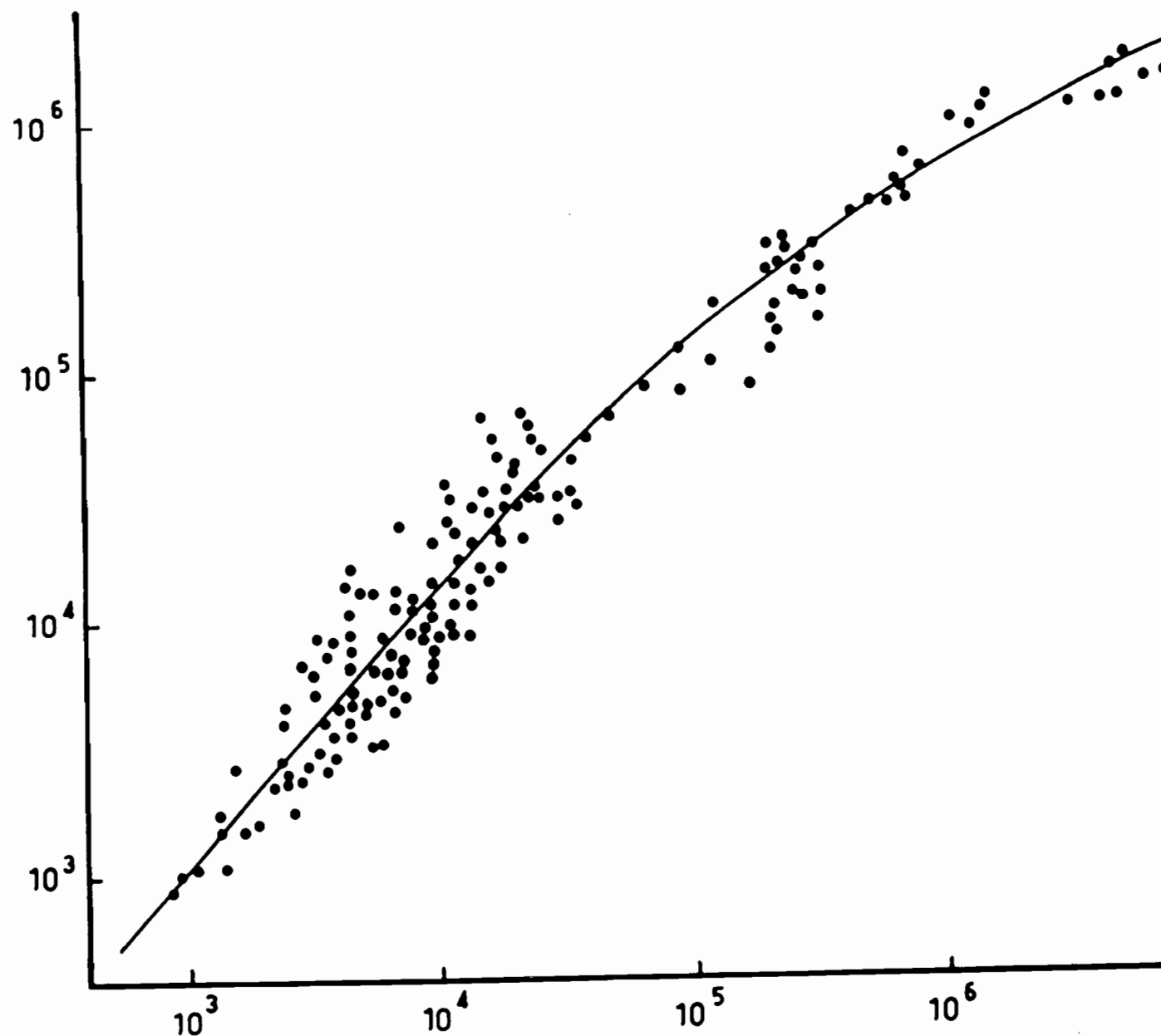
V_* / w_s



ANNEXE 11

fonction de $(h/(ds*\phi''))^{1.5}$ utilisée pour la méthode 2 de R.J.Garde et J.Dattatri

$$[V_h/\gamma] / [100 Q_s/q]^{1/3}$$



$$(h/\sqrt{\psi'})^{3/2}$$

ANNEXE 12

présentation de la feuille de calcul "transpor"

TRANSPORT DES SEDIMENTS

paramètres demandés

q : débit eau	183663	ft ³ /s	5.200	m ³ /s
u : vitesse moyenne d'écoulement	16	ft/s	05	m/s
d : diamètre médian des sédiments du fond	1.31E-01	ft	4.000E-02	mm
ds : diamètre médian des sédiments en suspen	1.48E-04	ft	4.500E-05	mm
d90 : 90% de granulats d'un poids inférieur	1.64E-01	ft	5.000E-02	mm
d65=ks : 65% de granulats d'un poids inférie	1.48E-01	ft	4.500E-02	mm
d65s : d65 (pour sédiments en suspension)	1.64E-04	ft	5.000E-05	mm
h : hauteur d'eau	16.41	ft	05	m
T : température de l'eau	90	°F	32	°C
j1 : pente du fond	0.000%	ft/ft	0.000%	m/m
C : concentration de fines en ppm	300	lb/ft ³	300	g/m ³

paramètres arbitraires

g : pesanteur	32.19	ft/s ²	9.81	m/s ²
rho : masse spécifique de l'eau	1.94	b.s ² /ft ⁴	102	kg.s ² /m ⁴
nu : viscosité cinématique de l'eau	1.09E-05	ft ² /s	1.01E-06	m ² /s
p : masse volumique de l'eau	62.43	lb/ft ³	1000	kg/m ³
p1 : masse volumique des granulats (quartz)	165.44	lb/ft ³	2650	kg/m ³

TRANSPORT PAR CHARRIAGE ET SALTATION

		validité ?	
FORMULES DE TYPE DuBoys:			
DuBoys Formula (1950) (ref : A.S.C.E)	-368 lb/s	non	-167 kg/s
Meyer-Peter Formula (1948) (ref : A.S.C.E) rem: pour des sédiments relativement gros	00 lb/s	oui ?	00 kg/s
Schoklitsch Formula (1935) (ref : A.S.C.E) rem: pour des sédiments grossiers (graviers)	-1.990 lb/s	oui ?	-902 kg/s
Shields Formula (1936) (ref : A.S.C.E)	-846 lb/s	oui ?	-384 kg/s
Meyer-Peter and Muller Formula (1948) (ref : A.S.C.E) rem: pour des écoulements qui ont peu ou pas de matière en suspension	00 lb/s	oui ?	00 kg/s
Laursen Formula (1958) (ref : A.S.C.E)	-1.052 lb/s	oui ?	-477 kg/s
I.I.LEVI (ref : J.Larras) rem: dans le cas des sables quartzeux dans l'eau	10.819 lb/s	non	4.907 kg/s
A.Schoklitsch (ref : J.Larras)	-2.886 lb/s	oui ?	-1.309 kg/s
K.Shinohara et T.Tsubaki (ref : J.Larras) rem: pour des granulats quartzeux (dans l'eau) de diamètre relativement moyen et pour les écoulements à forte pente	-2.887 lb/s	oui ?	-1.309 kg/s
Equiazarov (ref : J.Larras) rem: pour le transport des granulats quartzeux dans un écoulement complètement turbulent (dans l'eau)	-7.276 lb/s	non	-3.300 kg/s
L.Muhlofer (ref : J.Larras) rem: pour des granulats quartzeux dans l'eau	845 lb/s	non	383 kg/s

TRANSPORT DES SEDIMENTS

paramètres demandés

q : débit eau	190 727	ft ³ /s	5 400	m ³ /s
u : vitesse moyenne d'écoulement	09	ft/s	03	m/s
d : diamètre médian des sédiments du fond	1.31E-01	ft	4 000E-02	mm
ds : diamètre médian des sédiments en suspension	1.48E-04	ft	4 500E-05	mm
d90 : 90% de granulats (de fond) d'un poids inférieur	1.64E-01	ft	5 000E-02	mm
d65=ks : 65% de granulats (de fond) d'un poids inférieur	1.48E-01	ft	4 500E-02	mm
d65s : (pour les sédiments en suspension)	1.64E-04	ft	5 000E-05	mm
h : hauteur d'eau	16	ft	05	m
T : température de l'eau	77	°F	25	°C
j1 : pente du fond	0 000%	ft/ft	0 000%	m/m
C : concentration de fines en ppm	300	lb/ft ³	300	g/m ³

paramètres arbitraires

g : pesanteur	32.19	ft/s ²	9.81	m/s ²
rho : masse spécifique de l'eau	1.94	b.s ² /ft ⁴	102	kg.s ² /m ⁴
nu : viscosité cinématique de l'eau	1.09E-05	ft ² /s	1 010E-09	m ² /s
p : masse volumique de l'eau	62.43	lb/ft ³	1000	kg/m ³
p1 : masse volumique des granulats (quartz)	165.44	lb/ft ³	2650	kg/m ³

paramètres intermédiaires

L : largeur de l'écoulement	1 312	ft	400	m
Pm : périmètre mouillé = L+2*h	1 345	ft	410	m
Rh : rayon hydraulique=section/périmètre mouillé	1 600E-02	ft	4 878E-03	m
uc : vitesse moyenne critique d'écoulement	9 314E-04	ft/s	2 839E-04	m/s
$uc=0.177*((h/d)^{(1/7)})*(g*d*(p1-p)/p)^{0.5}$				
t0 : tension de frottement au fond =p*Rh*j1	4 296E-04	lb/ft ²	2 098E-03	kg/m ²
tc : tension critique de frottement pour les sédiments du fond	00 001	lb/ft ²	0 004	kg/m ²
$=tc2*10^{(log(tc1/tc2)*(T-32)/48)}$				
a) pour T=80°F	00 001	lb/ft ²		
$tc1=10^{-2.306*d^{0.279}}$ quand $d<0.27$				
$tc1=0.01*d^{0.867}$ quand $0.27<=d<0.7$				
$tc1=0.013*d^{1.281}$ quand $0.7<=d<6mm$				
$tc1=10^{-1.7*d}$ quand $6<=d$				
b) pour T=32°F	00 001	lb/ft ²		
$tc2=10^{-2.16*d^{0.2}}$ quand $d<0.4mm$				
$tc2=10^{-2*d^{0.61}}$ quand $0.4<=d<0.9mm$				
$tc2=10^{-1.98*d^{1.29}}$ quand $0.9<=d<6mm$				
$tc2=10^{-1.7*d}$ quand $6<=d$				
tcs : tension critique de frottement pour les sédiments en suspension	00 000	lb/ft ²	0 000	kg/m ²
$=tc2*10^{(log(tc1/tc2)*(T-32)/48)}$				
a) pour T=80°F	00 000	lb/ft ²		
$tc1=10^{-2.306*ds^{0.279}}$ quand $ds<0.27$				
$tc1=0.01*ds^{0.867}$ quand $0.27<=ds<0.7$				
$tc1=0.013*ds^{1.281}$ quand $0.7<=ds<6mm$				
$tc1=10^{-1.7*ds}$ quand $6<=ds$				
b) pour T=32°F	00 000	lb/ft ²		
$tc2=10^{-2.16*ds^{0.2}}$ quand $ds<0.4mm$				
$tc2=10^{-2*ds^{0.61}}$ quand $0.4<=ds<0.9mm$				
$tc2=10^{-1.98*ds^{1.29}}$ quand $0.9<=ds<6mm$				
$tc2=10^{-1.7*ds}$ quand $6<=ds$				

Transpot

F1 : paramètre d'Einstein= $(2/3+36*\nu^2/(g*d^3((p1/p)-1)))^0.5-(36*\nu^2/(g*d^3((p1/p)-1)))^0.5$	8 163E-04			
t* : tension étoilée= $t0/((p1-p)*d)$	3 178E-05		3 178E-05	
t0':(résistance grains du fond)= $\rho*u^2*(d/h)^{(1/3)}/58$	5 252E-04	lb/ft2	2 564E-03	kg/m2
t0's : t0' pour les sédiments en suspension	5 462E-05	lb/ft2	2 666E-04	kg/m2
u* : vitesse étoilée $=(t0/\rho)^0.5$	4 705E-04	ft/s	1 434E-04	ft/s
u'* : vitesse étoilée influencée par la rugosité des grains du fond= $(t0'/\rho)^0.5$	5 202E-04	ft/s	1 585E-04	ft/s
u's : vitesse étoilée influencée par la rugosité des grains en suspension= $(t0's/\rho)^0.5$	1 678E-04	ft/s	5 113E-05	ft/s
w : vitesse de chute des sédiments du fond	2.16E+00	ft/s	6 568E-04	m/s
w=F1* $((p1/p)-1)*g*d^0.5$: Rubey Formula (1933)				
ws : vitesse de chute des sédiments en suspension	7.23E-02	ft/s	2 203E-05	m/s
ws=F1* $((p1/p)-1)*g*ds^0.5$: Rubey Formula (1933)				
delta : facteur $=11.6*\nu/u^*$	2 424E-07			
ks/delta	6 090E-01			
f : coefficient de Darcy-Weisbach $=8*g*L*h*j1/(u^2*Pm)$	2.26E-02		2 258E-05	

TRANSPORT PAR CHARRIAGE ET SALTATION

I.J.LEVI (ref : J.Larras)	10 819	lb/s	4 907	kg/s
$qsb=L*p1*0.002((u/(g*d)^0.5)^3)*d*(u-uc)*(d/h)^0.25$				
A.F.Koudriachov (ref : J.Larras)	5 227	lb/s	2 371	kg/s
$qsb=p1*0.0075*q(u^2/g*h)^2$				
A.Schoklitsch (ref : J.Larras)	-2 886	lb/s	-1 309	kg/s
$qsb=L*p1*0.54*t0*(t0-tc)/(p1-p)$				
K.Shinohara et T.Isubaki (ref : J.Larras)	-2 887	lb/s	-1 309	kg/s
$qsb=L*p1*25*\phi^1.3*(\phi-0.8*\phi_{ic})*((p1-p)^0.5*d^1.5)$				
avec $\phi=t0^2/((p1-p)*d*tc)$			1 711E-05	
et $\phi_{ic}=tc^2/((p1-p)*d*tc)$			5 903E-05	
A.A.Kalinske (ref : J.Larras)	623	lb/s	283	kg/s
$qsb=L*p1*d*u^*2.5*(fonction\ de\ (tc/t0))*tc/t0$				
avec 2.5*fonction=			2 502E-05	
$=10^{(-1.13*(tc/t0-0.44))}$ si $tc/t0 \leq 1.94$				
$=0.01*10^{(-2.38*(tc/t0-2.08))}$ si $tc/t0 > 1.94$				
Equiazarov (ref : J.Larras)	-7 276	lb/s	-3 300	kg/s
$qsb=((p1/p)/(p1/p-1))*q*0.015*j1^0.5*p1*(t0-tc)/tc$				
L.Muhlofer (ref : J.Larras)	845	lb/s	383	kg/s
$qsb=L*Y*[(p1/p-1)*g*p1^2*d^3]^0.5$				
avec $Y=9.579*(X-0.045)*(X^0.5-0.045^0.5)$			1 124E-05	
avec $X=0.045*t0/tc$			2 423E-05	
DuBoys Formula (1950) (ref : A.S.C.E)	-368	lb/s	-167	kg/s
$qsb=L*dub*t0(t0-tc)$				
avec $dub=10^{-1.45*d^{-0.75}}$			0 002	t3/lb.s
			0.53	m3/kg.s
Meyer-Peter Formula (1948) (ref : A.S.C.E)	00	lb/s	00	kg/s
$qsb=L*[39.25*q^{(2/3)}*j1-9.95d]^1.5$				
q en ft3/s.ft of width				
Schoklitsch Formula (1935) (ref : A.S.C.E)	-1 990	lb/s	-902	kg/s
$qsb=L*(25.3/d^0.5)*j1^1.5*(q-qc)$				
q et qc en ft3/s.ft of width				
avec $qc=0.638*d/j1^{(4/3)}$ =valeur critique de q			2 580	
			240	
Shields Formula (1936) (ref : A.S.C.E)	-846	lb/s	-384	kg/s
$qsb=10q*j1(t0-tc)/((p1/p-1)^2*d)$				
Meyer-Peter and Muller formula (1948) (ref : A.S.C.E)	00	lb/s	00	kg/s
$qsb=L*((Kr1/Kr2)^1.5*p*Rh*j1-0.047(p1-p)*d/$				

FORMULES DE Einstein:		
Enstein-Brown Formula (1950) (ref : A.S.C.E)	01 lb/s	non 01 kg/s
Einstein Bed Load Function (1950) (ref : A.	673 lb/s	oui ? 305 kg/s
FORMULES EN TERME DE VITESSE:		
Colby Relations (1964) (ref : A.S.C.E)	00 lb/s	non 00 kg/s
Inglis-Lacey Formula (1968) (ref : A.S.C.E)	4 833 lb/s	oui ? 2 192 kg/s
A.F.Koudriachov (ref : J.Larras) rem: pour des granulats quartzeux dans l'eau	5 227 lb/s	non 2 371 kg/s
AUTRES:		
Engelund-Hansen Formula (1966-1967) (ref : rem: ne pas appliquer à des fonds ondulés ou ridés	240 lb/s	oui ? 109 kg/s
Toffaletti Formula (1968)-(1969) (ref : A.S.	5 908E+06 lb/s	oui ? 2 680E+06 kg/s
A.A.Kalinske (ref : J.Larras) rem: pour des sables quartzeux dans l'eau ne pas appliquer pour les plus gros débits	623 lb/s	oui ? 283 kg/s

TRANSPORT	EN	SUSPENSION
		validité ?
Einstein Bed Load Function (1950) (réf : A.S.C.E)	lb/s	kg/s
Laursen Formula (1958) (réf : A.S.C.E)	2 480E+00 lb/s	oui ? 1 125E+00 kg/s
Toffaletti Formula (1968, 1969) (réf : A.S.C.	5 678E+02 lb/s	oui ? 2 575E+02 kg/s
S.C.Abalianz (1958) (réf : J.Larras)	8 272E+04 lb/s	oui ? 3 751E+04 kg/s
J.Larras (réf : J.Larras)	5 929E+05 lb/s	oui ? 2 689E+05 kg/s
F.Engelund (1970) (réf : J.Larras)	1 197E+01 lb/s	non 5 428E+00 kg/s

TRANSPORT	TOTAL
	validité ?
Einstein Bed Load Function (1950) (réf : A.S.C.E)	lb/s kg/s
Laursen Formula (1958) (réf : A.S.C.E)	oui ? 6 476E-01 kg/s
Toffaletti Formula (1968, 1969) (réf : A.S.C.	oui ? 2 680E+06 kg/s
Méthode de E.M.Laursen (réf : J.Larras) rem: pour des granulats quartzeux dans l'eau ne pas appliquer aux les granulats les plus gros	non 1 337E+00 kg/s
Méthode n°1 de R.J.Garde et J.Dattatri (réf	oui ? 2 819E+04 kg/s
Méthode n°2 de R.J.Garde et J.Dattatri (réf rem: pour les granulats quartzeux dans l'eau	non 7 278E+00 kg/s
Méthode de F.Engelund et E.Hansen (réf : J.L rem: pour les granulats quartzeux dans l'eau	non 2 418E+01 kg/s

ANNEXE 13

présentation de la feuille de calcul "transpot"

$(0.25(p/g)^{(1/3)}((p1-p)/p1)^{(2/3))}^{1.5}$
 avec $Kr1=u/(Rh^{(2/3)}*j1^{0.5})$
 et $Kr2=26/d90^{(1/6)}$

4 527E-02
 4 284E-02

Einstein-Brown Formula (1950) (ref : A.S.C.E)	01	lb/s	01	kg/s
qsb=L*phi*p1*f1*(g*((p1/p)-1)*d^3)^0.5				
avec phi=fonction de (1/pli)	2.10E-05			
=10^-10.3*(1/pli)^10 pour 1/pli<0.05				
=10^-3.11*(1/pli)^4.43 pour 0.05<=1/pli<0.09				
=40*(1/pli)^3 pour 0.09<=1/pli				
avec 1/pli=t*	0 000			
Einstein Bed Load function (1950) (ref : A.S.C.E)	673	lb/s	305	kg/s
qsb=L*phi^1*p1*(p/((p1-p)*g*d^3))^-0.5				
avec phi=fonction de (pli')	000 000			
=10^14.6*pli'^-13 pour 20<pli'				
=794*pli'^-4 pour 8<pli'<=20				
=25.4*pli'^-2.4 pour 3<pli'<=8				
=7.59*pli'^-1.21 pour pli'<=3				
avec pli'=e*Y(log 10.6/log (10.6*x*X/d65))^2	17.26			
*(p1-p)*d/(p*Rh^1*j1)				
avec x=fonction de (ks/delta)	10			
=10 pour 8<(ks/delta)				
=13*(ks/delta)^-0.125 pour 3.8<(ks/delta)<=8				
=17.3*(ks/delta)^-0.34 pour 1.3<(ks/delta)<=3.8				
=16 pour 0.8<(ks/delta)<=1.3				
=17*(ks/delta)^0.27 pour 0.48<(ks/delta)<=0.8				
=25*(ks/delta)^0.79 pour (ks/delta)<=0.48				
avec X=0.77*d65/x si d65/(x*delta)>1.8	1.14E-02			
=1.398*delta si d65/(x*delta)<1.8				
avec Y=fonction de (d65/delta)	0.53			
=0.53 pour 2.65<=(d65/delta)				
=0.97*(d65/delta)^-0.61 pour 1.25<=(d65/delta)<2.65				
=0.8*(d65/delta)^0.24 pour 0.75<=(d65/delta)<1.75				
=1.06*(d65/delta)^1.2 pour (d65/delta)<0.75				
avec e=fonction de (d/X)	1			
=1 pour 1.3<(d/X)				
=1.26*(d/X)^-0.9 pour 0.65<(d/X)<=1.3				
=0.59*(d/X)^-2.6 pour (d/X)<=0.65				
avec Rh'=u'^2/(g*j1)	1.96E+01			
Laursen Formula (1958) (ref : A.S.C.E)	-1 052	lb/s	-477	kg/s
qsb=q*0.01*p*(d/h)^(7/6)*((t0'/tc)-1)*fonction de(u*/w)				
avec fonction de(u*/w) =10.57*(u*/w)^0.25	07			
Colby Relations (1964) (ref : A.S.C.E)	00	lb/s	00	kg/s
qsb=L*[1+(k1*k2-1)0.01*k3]*q1				
qsb en tons/day.ft of width				
avec k1: facteur de correction de température	0.83			
=k12*10^((log(k11/k12)*(T-80)/20) pour 80<T<=100°F				
=10^((log(k12)*(T-60)/20) pour 60<T<=80				
=k13*10^((log(1/k13)*(T-40)/20) pour 32<T<=60				
avec a) pour 100°F	0.64			
k11=0.745*h^-0.0446 pour h<=4ft				
k11=0.77*h^-0.0675 pour 4<h				
b) pour 80°F	0.81			
k12=0.86*h^-0.02065 pour h<=11				
k12=h^-0.0774 pour 11<h				
c) pour 60 °F	1.00			
d) pour 40°F	1.42			
k13=1.19*h^0.0223 pour h<=1.2				
k13=1.167*h^0.0705 pour 1.2<h				
avec k2 : facteur de correction de concentration	0 001			
de fines =10^((log k21*C/140000)				
avec k21 pour 140 000ppm	30.92			
=5.92*h^0.182 pour h<=0.27ft				
=7.63*h^0.385 pour 0.27<h<=1.5				
=7.3*h^0.516 pour 1.5 <h				
avec k3 : facteur de correction pour le diamètre m	0			
=600*d pour d<=0.15mm				
=10^-7.85*d^8.37 pour 0.15<d<=0.2				
=100 pour 0.2 <d<=0.3				

$=53.8*d^{-0.515}$ pour $0.3 < d \leq 0.4$
 $=20*d^{-1.53}$ pour $0.4 < d \leq 0.6$
 $=6*d^{-3.71}$ pour $0.6 < d$
 avec q_1 : débit non corrigé de sédiments 0.00
 q_1 en tons/day.ft of width
 $q_1 = (q_{12} - q_{11}) * \log(h/0.1) + q_{11}$ si $0.1 \leq h \leq 1$ ft
 $q_1 = (q_{13} - q_{12}) * \log(h) + q_{12}$ si $1 < h \leq 10$
 $q_1 = (q_{14} - q_{13}) * \log(h/10) + q_{13}$ si $10 < h \leq 100$
 A) pour $h = 0.1$ ft 1.24E+10
 $q_{11} = q_{111} * 10^{(\log(q_{112}/q_{111}) * (d-0.1)/0.2)}$ si $0.10 \leq d \leq 0.30$ mm
 $q_{11} = q_{112} * 10^{(\log(q_{113}/q_{112}) * (d-0.3)/0.1)}$ si $0.30 < d \leq 0.40$
 $q_{11} = q_{113} * 10^{(\log(q_{114}/q_{113}) * (d-0.4)/0.4)}$ si $0.40 < d \leq 0.80$
 a) pour $d = 0.10$ mm 51.30
 $q_{111} = 1.1 * u^{2.48}$ pour $u \leq 2$ ft/s
 $q_{111} = 2.1 * u^{1.465}$ pour $2 < u$
 b) pour $d = 0.30$ mm 81.94
 $q_{112} = 0.15 * u^{5.086}$ pour $u \leq 1.8$
 $q_{112} = 0.5 * u^{2.86}$ pour $1.8 < u \leq 3.4$
 $q_{112} = 2.29 * u^{1.64}$ pour $3.4 < u$
 c) pour $d = 0.40$ mm 95.61
 $q_{113} = 0.083 * u^{5.83}$ pour $u \leq 1.8$
 $q_{113} = 0.4 * u^{3.01}$ pour $1.8 < u \leq 3.3$
 $q_{113} = 2.07 * u^{1.757}$ pour $3.3 < u$
 d) pour $d = 0.80$ mm 115.46
 $q_{114} = 10^{-1.89 * u^{7.87}}$ pour $u \leq 2.1$
 $q_{114} = 0.6 * u^{2.84}$ pour $2.1 < u \leq 3.5$
 $q_{114} = 2.276 * u^{1.8}$ pour $3.5 < u$
 B) pour $h = 1$ ft 2088.41
 $q_{12} = q_{121} * 10^{(\log(q_{122}/q_{121}) * (d-0.1)/0.2)}$ si $0.10 \leq d \leq 0.30$ mm
 $q_{12} = q_{122} * 10^{(\log(q_{123}/q_{122}) * (d-0.3)/0.1)}$ si $0.30 < d \leq 0.40$
 $q_{12} = q_{123} * 10^{(\log(q_{124}/q_{123}) * (d-0.4)/0.4)}$ si $0.40 < d \leq 0.80$
 a) pour $d = 0.10$ mm 191.02
 $q_{121} = 0.4 * u^{5.64}$ pour $u \leq 1.4$ ft/s
 $q_{121} = 1.45 * u^{2.63}$ pour $1.4 < u \leq 3.6$
 $q_{121} = 5 * u^{1.67}$ pour $3.6 < u$
 b) pour $d = 0.30$ mm 176.29
 $q_{122} = 0.0364 * u^{6.78}$ pour $u \leq 1.9$
 $q_{122} = 0.433 * u^{3.21}$ pour $1.9 < u \leq 4.3$
 $q_{122} = 3.63 * u^{1.78}$ pour $4.3 < u$
 c) pour $d = 0.40$ mm 158.30
 $q_{123} = 0.014 * u^{8.15}$ pour $u \leq 1.85$
 $q_{123} = 0.29 * u^{3.48}$ pour $1.85 < u \leq 3.7$
 $q_{123} = 2.35 * u^{1.93}$ pour $3.7 < u$
 d) pour $d = 0.80$ mm 162.48
 $q_{124} = 10^{-2.65 * u^{9.38}}$ pour $u \leq 2.15$
 $q_{124} = 0.3 * u^{3.32}$ pour $2.15 < u \leq 4.4$
 $q_{124} = 3 * u^{1.83}$ pour $4.4 < u$
 C) pour $h = 10$ ft 0.00
 $q_{13} = q_{131} * 10^{(\log(q_{132}/q_{131}) * (d-0.1)/0.2)}$ si $0.10 \leq d \leq 0.30$ mm
 $q_{13} = q_{132} * 10^{(\log(q_{133}/q_{132}) * (d-0.3)/0.1)}$ si $0.30 < d \leq 0.40$
 $q_{13} = q_{133} * 10^{(\log(q_{134}/q_{133}) * (d-0.4)/0.4)}$ si $0.40 < d \leq 0.80$
 a) pour $d = 0.10$ mm 975.28
 $q_{131} = 0.1 * u^9$ pour $u \leq 1.7$ ft/s
 $q_{131} = 0.66 * u^{3.93}$ pour $1.4 < u \leq 4$
 $q_{131} = 6.05 * u^{2.33}$ pour $4 < u$
 b) pour $d = 0.30$ mm 322.06
 $q_{132} = 6.59 * 10^{-3} * u^{8.27}$ pour $u \leq 2.2$
 $q_{132} = 0.356 * u^{3.5}$ pour $2.2 < u \leq 5.3$
 $q_{132} = 7.08 * u^{1.75}$ pour $5.3 < u$
 c) pour $d = 0.40$ mm 299.95
 $q_{133} = 10^{-2.86 * u^{10.1}}$ pour $u \leq 2.1$
 $q_{133} = 0.1 * u^{4.38}$ pour $2.1 < u \leq 4.3$
 $q_{133} = 2.91 * u^{2.125}$ pour $4.3 < u$
 d) pour $d = 0.80$ mm 245.63
 $q_{134} = 5.86 * 10^{-4} * u^{9.44}$ pour $u \leq 2.4$
 $q_{134} = 0.0416 * u^{4.75}$ pour $2.4 < u \leq 4.5$
 $q_{134} = 3.13 * u^2$ pour $4.5 < u$
 D) pour $h = 100$ ft 0.00
 $q_{14} = q_{141} * 10^{(\log(q_{142}/q_{141}) * (d-0.1)/0.2)}$ si $0.10 \leq d \leq 0.30$ mm
 $q_{14} = q_{142} * 10^{(\log(q_{143}/q_{142}) * (d-0.3)/0.1)}$ si $0.30 < d \leq 0.40$
 $q_{14} = q_{143} * 10^{(\log(q_{144}/q_{143}) * (d-0.4)/0.4)}$ si $0.40 < d \leq 0.80$
 a) pour $d = 0.10$ mm 4416.42

Transpot

$q_{141}=0.046 \cdot u^{-10.35}$ pour $u \leq 1.7 \text{ ft/s}$ $q_{141}=u^{-4.47}$ pour $1.7 < u \leq 4.4$ $q_{141}=18.5 \cdot u^{-2.51}$ pour $4.4 < u$				
b) pour $d=0.30 \text{ mm}$	585.64			
$q_{142}=10^{-3.38} \cdot u^{-10.23}$ pour $u \leq 2.3$ $q_{142}=0.04 \cdot u^{-5.4}$ pour $2.3 < u \leq 4.4$ $q_{142}=6 \cdot u^{-2.1}$ pour $4.4 < u$				
c) pour $d=0.40 \text{ mm}$	533.53			
$q_{143}=10^{-5.2} \cdot u^{-13.35}$ pour $u \leq 2.8$ $q_{143}=0.021 \cdot u^{-5.6}$ pour $2.8 < u \leq 4.8$ $q_{143}=4.3 \cdot u^{-2.21}$ pour $4.8 < u$				
d) pour $d=0.80 \text{ mm}$	424.28			
$q_{144}=10^{-6.6} \cdot u^{-15.5}$ pour $u \leq 3.1$ $q_{144}=5.32 \cdot 10^{-3} \cdot u^{-6.23}$ pour $3.1 < u \leq 4.8$ $q_{144}=3 \cdot u^{-2.27}$ pour $4.8 < u$				
Engelund-Hansen Formula (1966-1967) (ref : A.S.C.E)		240	lb/s	109 kg/s
$q_{sb}=L \cdot 0.05 \cdot p_1 \cdot u^2 \cdot (d / (g \cdot ((p_1/p) - 1)))^{0.5} \cdot t^{(3/2)}$				
Ingalls-Lacey Formula (1968) (ref : A.S.C.E)		4 833	lb/s	2 192 kg/s
$q_{sb}=L \cdot 0.562 \cdot ((n \cdot g)^{(1/3)} / w) \cdot (u^2 / (g \cdot h)) \cdot (p \cdot u^3 / g)$				
Ioffe-Lati Formula (1968)-(1969) (ref : A.S.C.E)		5 908E+06	lb/s	2 680E+06 kg/s
$q_{sb}=M \cdot (2 \cdot d)^{(1+nv-0.758 \cdot z)}$ qs en tons/day.ft avec $nv=0.1198+0.00048T$ 1 568E-04 avec $z=w \cdot u / (cz \cdot h \cdot j_1)$ 1 293E-02 avec $cz=260.67-0.667 \cdot T$ 2 093E-01 avec $M=0.6 / ((Tt \cdot A \cdot k_4 / u^2)^{(5/3)} \cdot (ds / 0.00058)^{(5/3)} \cdot (1+nv-0.756 \cdot zs) / ((h/11.24)^{(1+nv-0.758 \cdot zs)} - (2 \cdot ds)^{(1+nv-0.756 \cdot zs))}$ 1.68E+03 avec zs défini ultérieurement (Cf suspension) avec A=fonction de (cte) 31 avec k_4 =fonction de (cte $\cdot 10^{-5} \cdot j_1 \cdot d_{65} \cdot s$) 1.00 avec cte=($10^{-5} \cdot nu$) $^{(1/3)} / (10 \cdot u^{1 \cdot s})$ 0.61 avec $Tt=1.10(0.051+0.00009 \cdot T)$ 6.37E-02				

TRANSPORT		TOTAL		
Méthode de E.M.Laursen (réf : J.Larras)		2 949E+00	lb/s	1 337E+00 kg/s
$q_{st} = p_1 \cdot \text{fonction de } (u^*/ws) \cdot q \cdot (ds/h)^{(7/6)} \cdot (t_0 \cdot s - tcs) / (tcs \cdot 100 \cdot ((p_1/p) - 1))$				
avec fonction de $(u^*/ws) =$				
$6.92 \cdot (u^*/ws)^{0.182}$ pour $(u^*/ws) < 1.05$				
$10.5 \cdot (u^*/ws)^{2.05}$ pour $1.05 \leq (u^*/ws) < 40$				
$476 \cdot (u^*/ws)^{0.39}$ pour $40 \leq (u^*/ws)$				
avec $(u^*/ws) =$				
		6 509E-03		
Méthode n°1 de R.J.Garde et J.Dattatri (réf : J.Larras)		6 215E+04	lb/s	2 819E+04 kg/s
$q_{st} = L \cdot p_1 \cdot u^{*ds} \cdot 35 \cdot ((t_0 - tcs) / ((p_1 - p) \cdot ds))^{3.5}$				
Méthode n°2 de R.J.Garde et J.Dattatri (réf : J.Larras)		1 605E+01	lb/s	7 278E+00 kg/s
$q_{st} = p_1 \cdot (q/100) \cdot (u^{*h} / (nu \cdot \text{fonction de } (h / (ds \cdot \phi^{11})))^{1.5})^{1.5}$				
avec fonction de $(h / (ds \cdot \phi^{11}))^{1.5} =$				
$= 0.6 \cdot \text{interm}^{1.074}$ pour $\text{interm} < 10^{-5}$				
$= 167 \cdot \text{interm}^{0.593}$ pour $\text{interm} \geq 10^{-5}$				
avec $\text{interm} = (h / (ds \cdot \phi^{11}))^{1.5}$				
avec $\phi^{11} = 3 \cdot (ws \cdot ds / nu)^{(-4/7)}$				
Méthode de F.Engelund et E.Hansen (réf : J.Larras)		5 332E+01	lb/s	2 418E+01 kg/s
$q_{st} = L \cdot p_1 \cdot \phi^{11} \cdot (((p_1/p) - 1) \cdot g \cdot ds^{-3})^{0.5}$				
avec : $\phi^{11} = 0.1 \cdot t \cdot \phi^{11} \cdot 2.5 / f$				
avec : $t \cdot \phi^{11} = t_0 / ((p_1 - p) \cdot ds)$				
Einstein Bed Load Function (1950) (réf : A.S.C.E)			lb/s	kg/s
$q_{st} = q_{sb} \cdot [Pr^{11} + 12 + 1]$				
avec: - q_{sb} et x déjà définis (Cf: chariage et saltation)				

- $Pr=2.3 \cdot \log(30.2 \cdot x \cdot Rh/d65)$
avec x déjà défini (Cf charriage et saltation)
- I1 et I2 définis en annexe 9

Laursen Formula (1958) (réf : A.S.C.E)	1 428E+00	lb/s	6 476E-01	kg/s
qst=q*0.01*p*(ds/h)^(7/6)*((t0's/tcs)-1)*fonction de(u*/ws)				
avec : fonction de(u*/ws)=				
=7062*(u*/ws)^0.306 pour 100<(u*/ws)				
=470*(u*/ws)^0.89 pour 28<(u*/ws)<=100				
=6.365*(u*/ws)^2.183 pour 1.85<(u*/ws)<=28				
=15.45*(u*/ws)^0.888 pour 0.78<(u*/ws)<=1.85				
=13.9*(u*/ws)^0.477 pour 0.35<(u*/ws)<=0.78				
=10.57*(u*/ws)^0.25 pour (u*/ws)<=0.35				
avec : (u*/ws)=				
6.51E+00				
Toffaletti Formula (1968, 1969) (réf : A.S.C.E)	5 909E+06	lb/s	2 680E+06	kg/s
qst=qsb+qssl+qssm+qssu				
avec : - qsb:déjà calculé précédemment				
- qssl+qssm+qssu : caculés ultérieurement				
	5 909E+06	lb/s	2 680E+06	kg/s
	5 678E+02	lb/s	2 575E+02	kg/s

TRANSPORT EN SUSPENSION

S.C. Aballanz (1958) (réf : J.Larras)	8 272E+04	lb/s	3 751E+04	kg/s
qss=q*26*u^3/(h^(3/4)*ws)				
J.Larras (réf : J.Larras)	5 929E+05	lb/s	2 689E+05	kg/s
qss=q*200*(j1*h/ds)^5*10^-6				
F.Engelund (1970) (réf : J.Larras)	1 197E+01	lb/s	5 428E+00	kg/s
qss=q*0.00056*(u*/ws)^4				
Einstein Bed Load Function (1950) (réf : A.S.C.E)		lb/s		kg/s
qss=qst-qsb				
avec qst et qsb étant déjà calculés précédemment				
Laursen Formula (1958) (réf : A.S.C.E)	2 480E+00	lb/s	1 125E+00	kg/s
qss=qst-qsb				
avec qst et qsb étant déjà calculés précédemment				
Toffaletti Formula (1968, 1969) (réf : A.S.C.E)	5 678E+02	lb/s	2 575E+02	kg/s
qss=qssl+qssm+qssu				
avec : - qssl=M*((h/11.24)^(1+nv-0.758*zs)-(2*ds)^(1+nv-0.756*zs))/(1+nv-0.756*zs) (tons/days.ft)				
- qssm=M*(h/11.24)^(0.244*zs)*(h/2.5)^(1+nv-zs)-(h/11.24)^(1+nv-zs))/(1+nv-zs) (tons/days.ft)				
- qssu=M*(h/11.24)^(0.244*zs)*(h/2.5)^(0.5*zs)*((h^(1+nv-1.5*zs)-(h/2.5)^(1+nv-1.5*zs)))/(1+nv-1.5*zs) (tons/days.ft)				
avec zs=ws*u/(cz*h*j1)				
4 337E-04				
rem: les coefficients M, nv et cz ont déjà été définis précédemment				

Rubio Olivier

Transport des sédiments : logiciel

Montpellier : ORSTOM, 1991, 62 p. multigr.