

LA PERTE DE CHARGE DANS LES CANAUX A FOND MOBILE

EXAMEN DE L'EFFET DES FORMES DU FOND

M.HASBAIA

Département d'hydraulique, Faculté de Technologie
Université de M'sila
hasbaia_moud@hotmail.com

RESUME

Le calcul des écoulements dans les canaux à fond mobile est effectué souvent par des formules de type Strickler qui ignore le frottement dû aux formes des fonds. Depuis les travaux d'Einstein et Barbarossa (1952), de multiples formules et approches ont été proposées pour tenir compte du frottement des formes des fonds. Dans ce travail, nous avons utilisé les données de 2790 expériences de laboratoire pour expliciter l'effet des formes des lits sur la résistance à l'écoulement, en comparant les profondeurs d'eau calculées par les deux formules de Strickler et de Karim (1995) (qui tiennent compte des différentes formes des lits) aux profondeurs mesurées. Les résultats obtenus par la formule de Strickler sont meilleurs sur les fonds plats, elle explique 71% des données avec des erreurs inférieures à 20% ; quant à la formule de Karim (1995) ce pourcentage est de l'ordre de 65%. Sur les fonds avec formes c'est plutôt le contraire, la formule de Karim (1995) explique 74% des données avec des erreurs inférieures à 20% par contre la formule de Strickler n'explique que 56% de ces mêmes données. En fait, en l'absence d'une formule universelle, la prise en charge du frottement dû aux formes des lits est incontournable.

MOT CLÉS: Canaux, fortement, perte de charge, fond mobile.

ABSTRACT

The open channel flow is often calculated by a typical formula (as Strickler formula) that ignores the friction due to the bedforms, since the works of Einstein and Barbarossa (1952), several formulas and approaches have been proposed to express this friction. In this article we used 2790 flume data to show the effect of the bedforms on flow resistance, in this way, we compare the flow depths calculated by the formulas of Strickler and Karim (1995) (taking into account bedforms) to the measured flow depths. In the flat beds, the results obtained by Strickler formula are the best, it explains 71% of data with errors less than 20%, for Karim (1995) formula this percentage is just 65%. For bed with bedforms, it is rather the contrary; the formula of Karim (1995) explained 74% of the data with error less than 20%, against Strickler's formula which explains only 56% of the same data. In fact, in the absence of a universal flow resistance formula, the bedforms friction consideration is unavoidable

KEY WORDS: friction, mobile bed, open channel, energy dissipation

1 INTRODUCTION

Les lits des cours d'eau naturels ne gardent pas une même configuration. Ils changent de forme d'un lit plat à un lit avec formes (dunes, rides, antidunes, ..), ces derniers sont variables dans l'espace et dans le temps, et sont fonction du type d'écoulement et de la nature des sédiments constituant le fond. Les rides et les dunes se développent dans un régime faible dit « Lower regime », par contre les

antidunes se développent dans un régime rapide dit « upper regime », entre ces deux régimes le fond ne garde pas une forme unique. Les limites de ces trois régimes ne sont pas définies par un seul paramètre (Fr), chaque auteur propose des limites propres à son approche.

La vitesse de l'écoulement dans un lit avec dunes peut être à 60 % plus petite que celle dans un lit rigide et plat (Yu et Lim 2003), la contrainte due aux formes dans les lits en

gravier est plus grande à celle due à la peau de ces mêmes lits de trois fois la contrainte critique de Shields en écoulement fluvial et 5 fois en écoulement torrentiel Griffiths (1989).

(Einstein et Barbarossa 1952), ont proposé la première formule qui tient compte de l'effet des formes dans la résistance à l'écoulement dans les cours d'eau naturels. Ils ont proposé de calculer séparément un coefficient de perte de charge dû aux formes et aux sédiments. Dans la même démarche (Engelund et Hansen 1967), (Alam et Kennedy 1969), Griffiths (1989) ont proposé d'autres formules empiriques et semi-empiriques. (Richardson et Simons 1967), (Garde et Ranga Raju 1966), (Chu et Mustafa 1979), (White et Bettes 1979), Brownlie (1983), Jarret (1984), Karim (1995), et (Wu W et al 1999) proposent de calculer d'une manière globale le coefficient de frottement dû à la fois aux sédiments et aux formes du lit. Bien que le charriage est pris en compte indirectement, par la résistance additionnelle induite par les déformations des fonds, certains auteurs ont étudié, (souvent expérimentalement), son effet sur le coefficient de frottement Recking (2006), et (Recking et al. 2008), (Gao et Abrahams 2004).

(López et al., 2007) énumèrent de nombreux travaux basés sur l'évaluation de la résistance à l'écoulement sans l'estimation explicite du coefficient de frottement. Les différentes approches de l'estimation de perte de charge dans les cours d'eau naturels sont résumées dans Yen (2002) et Hasbaia (2011).

Dans cet article, nous examinons l'effet des deux rugosités (dues aux grains solides et aux formes des lits) sur la perte de charge dans les écoulements dans les canaux naturels. Pour cela, on calcule la profondeur d'eau sur un large jeu de données expérimentales par les deux formules suivantes : une formule (celle de Strickler) qui ne considère que la rugosité des sédiments et celle de Karim (1995) qui tient compte des deux rugosités dues aux grains solides et aux formes de ces mêmes fonds. Cette dernière formule est choisie parmi les multiples formules citées dans la littérature parce qu'elle est développée en tenant compte de tous les types de formes des fonds des cours d'eau naturels (rides, dunes, antidunes et même en période de régime transitoire) sur des fonds en sables et en gravier (d_{50} entre 0.08 et 26.8 mm) avec des expériences de laboratoires et des mesures de terrain (en période de crues également).

Tableau 1 : Paramètres des expériences sur des canaux de laboratoire à fond mobile plat

Author	d_{50} [mm]	h [m]	J [%]	B [m]	N_d
Gilbert (1914)*	0.506-7.1	0.017-0.17	0.34-2.25	0.201- 0.597	314
Casey (1935)*	1, 2.46	0.97-0.0091	0.12-	0.4, 0.52	79
HoPang-Yang (1939)*	1.4-6.28	0.036-0.262	0.1-0.5	0.4	73
Mavis et al. (1937)*	1.41-4.18	0.009-0.133	0.14-1	0.82	261
Bogardi and Yen (1939)*	6.85-15.19	0.343-0.137	1.04-2.45	0.3, 0.83	44
Myer-Peter and Muller (1948)*	1.17-28.65	0.01-1.092	0.1-2.3	0.15-2	105
Einstein and Chien (1955)*	0.274-1.3	0.142-0.108	1.24-2.58	0.307	16
Paintal (1971)*	2.5-22.8	0.213-0.045	0.12-1.03	0.914	71
Smart and Jaeggi (1983)	2-10.5	0.02-0.0893	3-20	0.2	78
Cao (1985)	11.5-44.3	0.0218-0.26	0.5-9	0.6	106
Rickenmann (1990)	10	0.0316-0.0856	7-20	0.2	46
Julien and Raslan (1998)	0.2-0.6	0.038-0.136	0.187-0.53	1.3	28
Hu and Abrahams (2005)	0.74, 1.16	0.0032-0.0081	5.1, 11.4	0.4	38
Recking (2006)	2.3-3.68	0.083-0.0084	1-9	0.05-0.25	207
Total					1466

(*) Résumé dans Brownlie (1981)

Tableau 2: Paramètres des expériences sur des canaux de laboratoire à fond mobile avec rides et dunes

Author	d ₅₀ [mm]	h [m]	J [%]	B [m]	N _d
Barton and Lin (1955) *	0.180	0.091-0.420	0.044-0.126	1.129	17
Chyn (1935) *	0.509-0.840	0.047-0.100	0.110-0.300	0.610	30
Costello (1974) *	0.510-0.790	0.140-0.156	0.047-0.100	0.915	08
Davies (1971) *	0.150	0.076-0.300	0.0248-0.267	1.372	34
Onishi et al.(1976) *	0.250	0.075-0.135	0.109-0.267	0.914	12
Pratt (1970)*	0.478	0.076-0.457	0.061-0.287	1.372	49
Znamenskaya (1963)*	0.800	0.050-0.204	0.118-0.520	0.500	29
Singh (1960)*	0.620	0.0147-0.20	0.100-0.500	0.253-0.753	210
Mutter (1971)*	0.260	0.016-0.100	0.050-0.700	1.219	24
Nordin (1976)*	0.250,1.140	0.256-0.860	0.014-0.577	2.830	39
Stein (1965)*	0.399	0.091-0.366	0.061-0.400	1.219	29
Straub (1954, 1958)*	0.163,0.191	0.047-0.076	0.235-0.362	0.305	10
Taylor (1971)*	0.228	0.100-0.180	0.050-0.209	0.851	12
Vanoni and Brooks (1957)*	0.088-1.520	0.057-0.168	0.039-0.350	0.267, 0.850	37
Vanony and Hwang (1965)*	0.206, 0.230	0.370-0.070	0.0455-0.29	0.267, 1.100	16
Waterways Exp. Sta. (1963B)*	0.354-1.203	0.074-0.281	0.100	0.305	223
Waterways Exp. Sta. (1965A)*	0.18-4.1	0.018-0.209	0.1-0.45	0.705, 0.736	255
Williams (1970)*	0.1-1.349	0.087-0.896	0.027-1.04	0.076-1.219	121
Wang and White (1993)	0.076, 0.76	0.082-0.365	0.0059-0.51	0.917, 1.2	41
Total					1196

(*) Résumé dans Brownlie (1981)

Tableau 3: Paramètres des expériences sur des canaux de laboratoire à fond mobile avec antidunes

Author	d ₅₀ [mm]	h [m]	J [%]	B [m]	N _d
Nordin (1976)*	0.250	0.238-0.457	1.6-4.49	2.38	06
Stein (1965)*	0.399	0.0914-0.247	0.327-1.695	1.219	18
Straub (1954, 1958)*	0.191	0.0347-0.2387	0.056-0.7347	0.305, 0.914	14
Williams (1970)*	1.349	0.027-0.893	0.416-2.62	0.076-0.61	61
Willis et al. (1972)*	0.100	0.1036-0.244	0.102-0.204	1.219	17
Wang and White (1993)	0.076, 0.76	0.114-0.22	0.162-1.07	0.917, 1.2	12
Total					128

(*) Résumé dans Brownlie (1981),

Pour les fonds avec formes, un autre jeu de 1324 données est sélectionné dont 1196 cas correspond à des fonds avec rides ou dunes (tableau 2), et le reste, soit 126 correspond à des fonds avec antidunes (tableau 3).

Dans chaque expérience, pour calculer les profondeurs d'eau par la formule de Karim (1995), on suit la même démarche décrite par l'auteur, par contre pour la formule de Strickler, on procède à un calcul itératif. On suppose une profondeur d'eau proposée, et on calcule la vitesse

d'écoulement correspondante, si la comparaison de cette vitesse à celle mesurée vérifie une précision imposée on retient cette valeur de profondeur d'eau calculée, sinon on suppose une autre profondeur d'eau et ainsi de suite jusqu'à la vérification de la précision imposée. Pour l'évaluation de la qualité des résultats on compare la profondeur d'eau calculée par l'une des deux formules (Strickler et Karim (1995)) à celle mesurée en introduisant la notion de l'erreur normalisée définie comme suit :

$$EN = (H_{\text{mesurée}} - H_{\text{calculée}}) / H_{\text{mesurée}}$$

Sur l'ensemble de jeu de données, on définit l'erreur moyenne normalisée par la formule suivante :

$$EMN = \frac{\sum_{i=1}^N EN_i}{N}$$

2 RÉSULTAT ET DISCUSSION

Pour le premier jeu de données relatif aux fonds mobiles plats, la formule de Karim (1995) explique 64.84% des données avec une erreur moyenne normalisée < 20%. Quant à la formule de Strickler (1923), elle explique 71,34% des données avec une erreur moyenne normalisée < 20 % ; sur cette plage de données, elle est meilleure que celle de Karim (1995) (proposée pour les formes).

Tableau 4: Comparaison des profondeurs d'eau calculées et mesurées sur des fonds mobiles plats

Formule	Nd	% des profondeurs d'eau expliquées suivant les marges d'erreur		
		±10%	±20%	±30%
Strickler	1466	28.31	71.34	91.43
Karim		33.01	64.16	79.21

Pour les expériences sur les fonds avec formes, dans une première étape, on a groupé 1196 cas avec dunes ou rides et 120 cas sur des antidunes dans un seul groupe (tableau 5). Sur l'ensemble des données de ce groupe la formule de Karim (1995) donne les meilleurs résultats, elle explique 82 % des 1324 cas étudiés avec des erreurs relatives < 30%.

Pour le cas de la formule de Strickler (1923) elle n'explique que 55.89% des cas pour des erreurs relatives < 20%, cela explique sa négligence de la résistance des formes.

Tableau 5 Comparaison des profondeurs d'eau calculées et mesurées sur des fonds mobiles avec formes

Formules	Nd	% des profondeurs d'eau expliquées suivant les marges d'erreur		
		±10%	±20%	±30%
Strickler	1324	34.2	55.89	79
Karim (1995)		48.56	73.56	82

Dans une deuxième étape, on a séparé les rides et les dunes (qui se développent en lower regime) des antidunes (qui se développent en upper regime).

Pour le sous-groupe des 1196 cas avec dunes (ou rides), les résultats de la formule de Karim (1995) se sont améliorés à 88.12 % par rapport à ceux enregistrés précédemment (82%). Les résultats de la formule de Strickler restent dans le même ordre de grandeur.

Tableau 6: Comparaison des profondeurs d'eau calculées et mesurées sur des fonds mobiles avec rides et dunes

Formules	Nd	% des profondeurs d'eau expliquées suivant les marges d'erreur		
		±10%	±20%	±30%
Strickler	1196	31.85	53.68	78.09
Karim (1995)	Rides et dunes	52.17	79.1	88.12

Tandis que pour les 128 cas avec antidunes, les résultats de la formule de Karim (1995) sont médiocres, du fait qu'elle n'explique que 25% des cas étudiés avec des erreurs < 30%. Cela est dû à ce que les antidunes ont des formes différentes par rapport aux dunes et par conséquent elles ne participent pas de la même façon dans la résistance à l'écoulement. Les formules qui prennent la taille des formes comme paramètre de calcul de leur résistance à l'écoulement comme celle de Karim (1995), négligent ce détail ce qui explique ses erreurs. La formule de Strickler donne de bons résultats pour les antidunes, elle a expliqué plus de 75% des données avec des erreurs < 20%. Ce constat n'est pas valable dans tous les cas, les antidunes ne gardent pas une forme et une taille unique, elles sont très variables à cause de la rapidité du régime « upper regime ».

Formules	Nd	% des profondeurs d'eau expliquées suivant les marges d'erreur		
		±10%	±20%	±30%
Strickler	128	56.6	76	86.82
Karim (1995)	antidunes	17	22	25

3 CONCLUSION

Le calcul des écoulements dans les canaux à fond mobile comme les cours d'eau naturel est fortement dépendant de la formule de perte de charge. Depuis les années cinquante plusieurs formules et approches sont proposées pour évaluer la dissipation d'énergie en tenant compte à la fois de la rugosité des sédiments et des formes des lits. Les codes de calcul hydrauliques utilisent souvent des formules de type Strickler qui ignore la rugosité due aux formes des lits. Cette négligence peut considérablement réduire la précision des résultats. Dans ce travail nous avons utilisé

2490 expériences de laboratoire pour montrer l'effet des formes sur le calcul de la profondeur d'eau, ces données sont réparties en 1324 expériences sur des fonds mobiles plats et 1466 expériences sur des fonds avec formes. Le calcul des profondeurs d'eau est effectué par des les deux formules de Strickler et de Karim 1995 (qui tiennent compte des formes). Les résultats du premier jeu de données (fonds plat), la formule de Strickler donne les meilleurs résultats, elle explique 71,34% des données avec une erreur moyenne normalisée EMN < 20 %, quant à la formule de Karim (1995), elle n'explique que près de 65% des données avec la même EMN. Pour le deuxième jeu de données (fond avec forme), c'est plutôt le contraire, les deux formules de Karim (1995) et de Strickler expliquent 74% et 56% des données avec EMN \square 20%, respectivement.

Le choix de la formule de perte de charge joue un rôle déterminant dans le calcul des écoulements dans les canaux à fond mobile, la prise en charge de la dissipation d'énergie due aux configurations des lits peut améliorer (ou fausser) les résultats de plus de 20%. Quoiqu'aucune formule universelle ne soit proposée, la littérature est riche de formules tenant compte de l'ensemble des paramètres de frottement. Le bon choix et/ou couplage entre ces formules peut améliorer le calcul, surtout dans les codes de calcul hydrauliques qui offrent la possibilité de programmer plusieurs formules.

NOTATION

B = Largeur du canal

d_{50} = diamètre médian des sédiments du fond

Fr = nombre de Froude

h = profondeur d'eau

N_d = nombre de donnée (expériences).

Q = débit

R_h = rayon hydraulique

J = la pente énergétique

U = vitesse moyenne d'écoulement

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Alam, A. M. Z., and Kennedy, J. F., 1969, Friction factor for flow in sand-bed channels, Journal of Hydraulics division., ASCE, 95(6), pp.1973-1992
- [2] Barton, J. R., and Lin, P.N., 1955. A Study of the Sediment Transport in Alluvial Channels, Report No. CEF 55JRB2, Colorado State University, Fort Collins, Colorado, , 41 pp.
- [3] Bogardi J. and Yen C. H., 1939. Tractation of pebbles by flowing water, p. 66.
- [4] Brownlie, W. R., 1981. Computation of alluvial channel data: laboratory and field, California Institute of Technology, Pasadena, California, Report KH-R-43B, p.213.
- [5] Brownlie, W. R., 1983, Flow depth in sand-bed Channels, , Journal of hydraulics Engineering, Vol. 109 No.7, pp. 959-991
- [6] Cao H., 1985. Résistance hydraulique d'un lit à gravier mobile à pente raide; Etude expérimentale. Phd thesis, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, p. 285.
- [7] Casey H. J., 1935. Uber Geschiebebewegung, *Preuss. Versuchsanst. Fur Wasserbau und Schiffbau, Berlin, 19*, p. 86
- [8] Chu, H., and Mustafa, M. G., 1979, A mathematical model for alluvial channel stability, Proceeding of engineering workshop on sediment hydraulics, California state university, Long Beach, Feb.3, pp. 130-150
- [9] Chyn, S.D., 1935. An Experimental Study of the Sand Transporting Capacity of the Flowing Water on Sandy Bed and the Effect of the Composition of the Sand, thesis presented to the Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts, 33 pp.
- [10] Costello, W.R., 1974. Development of Bed Configuration i n Coarse Sands, Report 74-1, Department of Earth and Planetary Science, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts.
- [11] Davies, T. R, 1971. Summary of Experimental Data for Flume Tests over Fine Sand, Department of Civil Engineering, University of Southampton.
- [12] Einstein, H. A., and Barbarossa, N. L., 1952, River channel roughness, Trans. ASCE, 117, PP. 1121-1146
- [13] Engelund, F., and Hansen, E., 1967, A monograph on sediment transport in alluvial streams, Teknisk Forlag, Copenhagen, Danemark. p. 63
- [14] Einstein H. A. and Chien N., 1955. Effects of heavy sediment concentration near the bed on velocity and sediment distribution, MRD series N°8, University of California.
- [15] Engelund, F., and Hansen, E., 1967, A monograph on sediment transport in alluvial streams , Teknisk Forlag, Copenhagen, Danemark. p. 63
- [16] Gao, P., and Abrahams A. D., 2004, Bedload transport resistance in rough open channel flows, Earth surface process and landforms, 29, pp. 423-435.
- [17] Garde, R. R., and Ranga Raju, K. G., 1966, Resistance relationships for alluvial channel low, Journal of Hydraulics division, ASCE, Vol. 92, No. HY4, pp. 77-100.
- [18] Griffiths, G. A. 1989. Flow Resistance in Coarse Gravel Bed Rivers, Journal of the Hydraulics Research, Vol 107, N°. HY7, pp. 899-918.

- [19] HoPang-Yung, 1939. Abhängigkeit der geschlebebewegung von der kornform und der temperature, *Preuss. Versuchsanst. Fur Wasserbau und Schiffbau, Berlin*, 37, p. 43.
- [20] Hasbaia M. 2011. Etude critique du transport solide et ses conséquences dans les cours d'eau naturels, thèse de doctorat soutenu à l'université des sciences et de Technologie Mohamed Boudiaf d'Oran USTO.
- [21] Hu, S., and Abrahams A. D., (2005). "The effect of bed mobility on resistance to overland flow." *Earth Surf. Process. LandForms*, 30, 1461-1470.
- [22] Gilbert G. K., 1914. The transportation of Debris by Running water, US Geological Survey, Professional paper 86.
- [23] Jarrett, R. D., 1984, Hydraulics of high gradient streams., *Journal of hydraulics engineering.*, ASCE, vol. 110, No. 11, pp. 1519-1539
- [24] Julien P. Y., 1995. Erosion and sedimentation, C. U. press., Cambridge university press, p. 280.
- [25] Julien P. Y., and Raslan, Y. (1998). "Upper-Regime plane bed." *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, 124(11),1086-1096.
- [26] Karim F., 1995, Bed configuration and hydraulic resistance in alluvial-channel flows, *Journal of hydraulics Engineering*, Vol. 121, No. 12, pp. 15-25
- [27] Mavis F. T., Liuand E. Soucek, 1937. The transportation of detritus by flowing Water-II, Iowa university studies in engineering, Bulletin 11, p. 28.
- [28] Meyer Peter E. and Muller R., 1948. Formulas for bed-load transport, IAHSR, Stockholm, 39-64.
- [29] Mutter, Douglas Gerald, 1971. A Flume Study of Alluvial Bed Configurations, Masters thesis submitted to the Faculty of Graduate Studies, University of Alberta.
- [30] Nordin, C. F., 1976. Flume Studies with Fine and Coarse Sands, Open File Report 76-762, U.S. Geological Survey, Washington, D.C., 18 pp.
- [31] Onishi, Y., Jain, S. C. and Kennedy, J. R., 1976. Effects of Meandering In alluvial Channels, *Journal of the Hydraulics Division*, ASCE; Vol. 102, No. HY7, pp. 899-917.
- [32] Paintal A. S., 1971. Concept of of critical shear stress in loose boundary open channel, *Journal of Hydraulic research*, 1, 90-113.
- [33] Pratt , C. J., 1970. Summary of Experimental Data for Flume Tests over 0.49 mm Sand, Department of Civil Engineering, University of Southampton.
- [34] Recking, A., (2006). "An experimental study of grain sorting effects on bedload." Ph.D. thesis, 261pp., Univ. of Lyon, Lyon, France (available at www.lyon.cemagref.fr/doc/these/recking/)
- [35] Recking, A., Frey, P., Paquier, A., Belleudy, P., and Champagne, J. Y., (2008). "Feedback between bed load transport and flow resistance in gravel bed rivers." *Water Resources Research*, Vol. 44, W05412, doi:10.1029/2007WR006219.
- [36] Richardson, E. V., and Simons., D. B., 1967, Resistance to flow in sand channels, *Proceeding 12th congress of IAHR*, Vol. 1, pp. 141-150
- [37] Rickenmann D., 1990. Bed-load transport capacity of slurry flows at steep slopes, *Versuchsanst für wasserbau, Hydrologie und glaziologie der eidenössischen*, Zurich, p. 249.
- [38] Singh, B., 1960. Transport of Bed-Load in Channels with Special Reference to Gradient Form, PhD thesis presented to the University of London, London, England.
- [39] Smart G. and Jaeggi M., 1983. Sediment transport on steep slopes, Nr. 64, *Mitteilungen der versuchsanstalt für wasserbau, Hydrologie und glaziologie*, zurich, p. 191.
- [40] Stein, R. A., 1965. Laboratory Studies of Total Load and Apparent Bed Load, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 70, No. 8, pp. 1831-1842.
- [41] Straub, L. G., Anderson, A. G. and Flammer, G. H., 1958. Experiments on the Influence of Temperature on the Sediment Load, M.R.D. Sediment Series No. 10, St. Anthony Falls Hydraulic Laboratory, Minneapolis, Minnisota.
- [42] Straub, L. G., 1954. Transportation Characteristics Missouri River Sediment, M.R.D. Sediment Series No. 4, St. Anthony Falls Hydraulic Laboratory, Minneapolis, Minnisota.
- [43] Taylor, B. D., 1971. Temperature Effects in Alluvial Streams, W. M. Keck Laboratory of Hydraulics and Water Resources Report KH-R-27, California Institute of Technology, Pasadena, California, 204 pp.
- [44] United States Army Corps of Engineers, U. S. Waterways Experiment Station, Vicksburg, Mississippi, 1936B. Flume Tests of Synthetic Sand Mixture(sand No. 1 o) , Technical Memorandum 95-1 (unpublished), 1936B, 21 pp.
- [45] United States Army Corps of Engineers, U.S. Waterways Experiment Station, Vicksburg, Mississippi, 1935B. Effect of Turbidity on Sand Movement, unpublished report of experiments.
- [46] Vanoni, V. A., and Brooks, N. H. , 1957. Laboratory Studies of the Roughness and Suspended Load of Alluvial Streams, M.R.D. Sediment Series No. 11, California Institute of Technology Sedimentation
- [47] Laboratory, 121 pp.
- [48] Vanoni, V. A., and Hwang, Li San, 1967. Relation Between Bed Forms and Friction in Streams, *Journal of the Hydraulics Division*, ASCE, Vol. 93, No. HY3, Proc. Paper 5242, pp. 121-144.
- [49] Wang, S., and White, W. R., (1993). "Alluvial resistance in transition regime." *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, 119(6), 725-741
- [50] Williams, G. P., 1970. Flume Width and Water Depth Effects in Sediment Transport Experiments, U.S. Geological Survey, Professional Paper 56 2-H.
- [51] Willis, J. C., Coleman N. L., and Ellis, W. M. (1972). "Laboratory study f transport of fine sand." *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, 98(3), 489-501.

- [52] White, W. R., Paris, E., and Bettes, R., 1979, A new general method for predicting the frictional characteristics of alluvial streams, Report No. IT187, Hydraulics' research station, Wallingford, England
- [53] Wu, W., and Wang, S. S. Y., (1999). "Movable bed roughness in alluvial rivers." *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, 125(12), 1309-1312"
- [54] Yen, B. C., 2002, Open channel flow resistance, *J. Hydraul. Eng.*, Vol. 128, No. 1, pp.20-39
- [55] Yu Guoliang, and Lim Siow-Yong, 2003, Modified Manning formula for flow in alluvial channels with sand-beds, *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 37 NO. 3, pp 303-312
- [56] Znamenskaya, N. S., 1963. Experimental Study of the Dune Movement of Sediment, *Transactions of the State Hydrologic Institute (Trudy GGI) No. 108*, pp. 89-111. Translated by L. G. Robbins