



Transport solide par charriage sous une interaction houle-courant

Benoît Camenen^(a) et Magnus Larson^(b)

^(a) ^(b)
*Dr, Professeur, Lund University,
Dpt. of Water Resources EngBox 118, 22100 Lund, Suède.
Tel : +46 46 222 89 81, Fax : +46 46 222 44 35
Email : benoit.camenen@tvrl.lth.se*

Résumé

Cet article présente une nouvelle formule de transport par charriage dans le cas d'une interaction entre un courant et une houle. Une première comparaison avec des données expérimentales en courant permanent a permis de confirmer la dépendance du charriage avec le paramètre de Shields à la puissance 1,5, puis d'introduire une fonction exponentielle pour la prise en compte de la contrainte minimum de début d'entraînement des sédiments. Cette formulation a été étendue et généralisée pour prendre en compte l'effet des flux oscillants ainsi qu'une interaction houle-courant. Le transport par charriage a ainsi été traité de manière quasi-permanente en utilisant la moyenne quadratique du paramètre de Shields instantanée sur chacune des demi-périodes de la houle. Une très bonne corrélation est observée entre le modèle et l'ensemble des données expérimentales.

Abstract

A bed-load transport formula was investigated for steady flows, oscillatory flows and combined steady and oscillatory flows. The relationship between the bed-load transport and the total Shields parameter to the power 1.5 was first confirmed for the steady flows. An exponential function to take into account the effect of the critical Shields parameter was introduced. The proposed formula for the steady current was expanded and generalized to take into account the effects of oscillatory flows as well as oscillatory flows with a superimposed current at an arbitrary angle. The time-dependent bed-load transport was treated in a "quasi-steady" manner using the quadratic value of the instantaneous Shields parameter for the two half periods of the wave. A good correlation was found between the bed-load model and the measurements for colinear oscillatory and steady flows.

Mots clés: transport sédimentaire, charriage, courant, houle, littoral.

1. Introduction

La prévision des taux de transport de sédiments est un élément fondamental pour les études morphologiques fluviales et côtières. Deux modes de transport se distinguent : le charriage se réalisant près du fond et supporté par les collisions inter-granulaires (Wilson, 1996[1]), et la suspension dominée par la turbulence du guide et se réalisant sur l'ensemble de la colonne d'eau (Fredsoe & Deigaard 1994[2]).

Les premières formules de transport par charriage sont principalement basées sur le concept que le taux de transport de sédiments pour un écoulement uniforme est directement lié à l'effort

de cisaillement sur le fond (Meyer-Peter & Muller, 1948[3]; Einstein, 1950[4]). Dans le cas d'un environnement côtier, les processus deviennent particulièrement complexes du fait de l'interaction entre les flux permanents liés aux courants et oscillants induits par les vagues. Dans le cas du transport solide dans la direction de la houle, une approche moyennée sur la période de la houle est insuffisante du fait du rôle dominant des phénomènes non-linéaires liés au mouvement oscillant des sédiments au fond. Bagnold (1966[5]) a développé un modèle énergétique dans lequel le transport solide instantané est relié à la dissipation d'énergie instantanée. Plusieurs modèles sont aujourd'hui basés sur cette approche (Bailard & Inman, 1981[6], Ribberink, 1998[7]).

L'objectif de cette étude est de développer une formule globale et fiable pour la prédiction du transport solide par charriage sous une interaction entre un courant et une houle. Pour cette étude, un large éventail de données expérimentales a été compilé et analysé (plus de 800 données dans le cas de courant permanent et environ 400 données dans le cas d'une interaction houle-courant). Plusieurs formules existantes ont été également étudiées en utilisant ces données. Dans le cas du courant permanent, l'étude est basée sur le concept introduit par Meyer-Peter & Muller (1948[3]) avec une attention toute particulière sur l'effet de la contrainte de cisaillement critique de mise en mouvement des sédiments. Dans le cas des flux oscillants, suivant le modèle Ribberink (1998[7]), le transport solide est ainsi traité d'une manière quasi-stationnaire (i.e., des effets non-linéaires tels que le retard de phase entre les concentrations en sédiment et les vitesses du fluide sont négligés).

2. Transport solide par charriage sous un courant permanent

2.1. Formules existantes

Le transport solide par charriage est généralement représenté par l'intermédiaire du paramètre adimensionnel :

$$\Phi = \frac{q_{sb}}{\sqrt{(s-1)g} d_{50}^3} \quad (1)$$

Où q_{sb} est le débit solide volumétrique, s la densité relative du sédiment ($s = \rho_s/\rho$, avec ρ_s et ρ les masses volumiques du sédiment et de l'eau), g l'accélération de la pesanteur, et d_{50} diamètre médian des sédiments.

De nombreuses formules de transport ont été proposées où le débit solide est directement fonction du paramètre de Shields :

$$\theta_c = \frac{\tau_c}{(\rho_s - \rho)gd_{50}} = \frac{\frac{1}{2}f_c U_c^2}{(s-1)gd_{50}} \quad (2)$$

Avec τ_c la contrainte de cisaillement au fond, f_c le coefficient de frottement et U_c la vitesse moyenne du courant. Trois formulations ont été plus particulièrement étudiées :

$$\text{Meyer-Peter \& Muller (1948[3])} \quad \Phi = 8 (\theta_c - \theta_{cr})^{3/2} \quad (3)$$

$$\text{Nielsen (1992[8])} \quad \Phi = 12 \theta_c^{0.5} (\theta_c - \theta_{cr}) \quad (4)$$

$$\text{Ribberink (1998[7])} \quad \Phi = 11 (\theta_c - \theta_{cr})^{1.65} \quad (5)$$

où θ_{cr} est le paramètre de Shields critique. Celui-ci sera par la suite déterminé à l'aide de la formule de Soulsby & Whitehouse (1997[9]), voir aussi Soulsby, 1997, p.104-110).

2.2. Comparaison avec des données expérimentales

Une large partie des données expérimentales étudiées provient de la compilation réalisée par Brownlie (1981[11]). Celui-ci ne précisant pas si le charriage est prédominant sur la suspension mais uniquement les formes du fond (si disponible), seules les données où le fond est plat ont été conservées (charriage alors suppose prédominant). Parmi ces données se distinguent les études de Gilbert (1914[12]), de l'U.S. Waterways Experiment Station (1935-36), et de Willis et al. (1972[13]). Smart (1984[14], 1997[15] avec Nikora, 1999[16]) a accompli de nombreuses études sur le charriage de sédiments grossiers. Enfin, Wilson (1966[1]) et Nnadi & Wilson (1992[17]) ont étudié le charriage sous de très fortes contraintes dans une conduite.

Le tableau 1 indique le pourcentage de données expérimentales correctement prédites avec un intervalle de tolérance d'un facteur 2 ou 5. Les trois formules étudiées présentent un comportement similaire ; i.e. une prédiction correcte pour les fortes contraintes de cisaillement mais une nette surestimation lorsque les contraintes se rapprochent de la contrainte critique de mise en mouvement des sédiments. Dans le cas particulier des données expérimentales de Willis et al., où un sédiment très fin a été utilisé ($d_{50} = 0.1$ mm), la sous-estimation induite par l'ensemble des formules apparaît être due au fait que le transport par suspension n'était pas négligeable.

Tableau. 1 Prédiction du transport solide par charriage sous un courant permanent avec une tolérance d'un facteur 2 ou 5.

<i>Auteurs(s)</i>	<i>toutes les données</i>		<i>idem sans Willis et al</i>	
	<i>Pred. x2</i>	<i>Pred. x5</i>	<i>Pred. x2</i>	<i>Pred. x5</i>
Meyer-Peter & Muller	61 %	82 %	68 %	92 %
Nielsen	52 %	71 %	57 %	81 %
Ribberink	64 %	84 %	70 %	96 %
Eq.6	72 %	88 %	81 %	99 %

Il apparaît clairement que la prise en compte du paramètre de Shields critique comme une valeur limite exclusive induit une nette surestimation lorsque $\theta_c < 3\theta_{cr}$, et ne permet pas de transport solide lorsque $\theta_c < \theta_{cr}$ alors qu'il existe une certaine marge d'erreur sur la prédiction de ce dernier. Pour éviter une telle limitation, une approche "probabilistique" est introduite pour l'effet du paramètre de Shields critique à l'aide d'une expression exponentielle. Le calibrage avec les données expérimentales a abouti à l'expression suivante pour le transport par charriage:

$$\Phi = a \theta_c^{1.5} \exp\left(-b \frac{\theta_{cr}}{\theta_c}\right) \quad (6)$$

avec $a=12$ et $b=4.5$

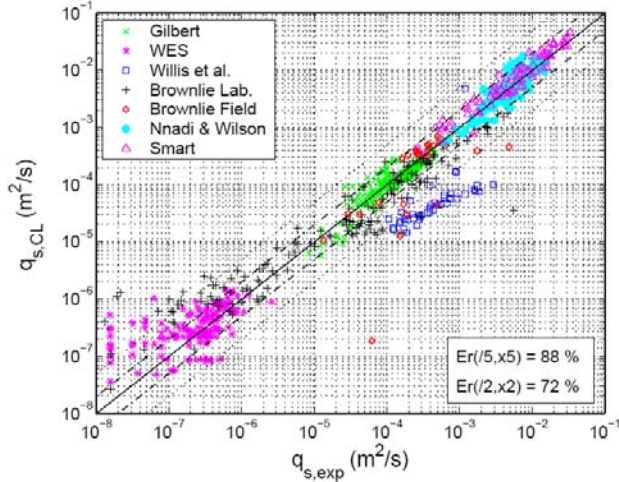


Figure 1: Comparaison entre les débits solides par charriage prédits selon l'équation 6 et mesures expérimentales (les termes $Er(2 \times 2)$ et $Er(5 \times 5)$ correspondent au pourcentage de données correctement prédites avec une tolérance d'un facteur 2 ou 5 respectivement).

3. Généralisation de la formule à l'environnement côtier

Dans le cas de l'environnement côtier, il est nécessaire de pouvoir prendre en compte l'effet d'une houle asymétrique et de l'interaction entre une houle et un courant afin de permettre une prédiction correcte du transport solide selon la direction de la houle (perpendiculaire à la cote), et donc, de mieux modéliser la formation de la barre pré littorale.

3.1. Développement d'une nouvelle formule dans le cas d'une interaction entre un courant et une houle

Comme l'a proposé Ribberink (1998[7]), le transport sédimentaire instantané peut être relié au paramètre de Shields instantané défini comme suit :

$$\theta(t) = \frac{\frac{1}{2} f_{cw} |u(t)| u(t)}{(s-1) g d_{50}} \quad (7)$$

où $u(t)$ est la vitesse instantanée (cf. figure 2) et f_{cw} le coefficient de frottement pour une interaction houle-courant, obtenu selon une combinaison linéaire des deux coefficients f_c et f_w telle que $f_{cw} = X f_c + (1-X) f_w$ avec $X = |U_c| / (|U_c| + w)$ (Madsen & Grant, 1976[18]). Le coefficient de frottement pour une houle seule f_w est considéré constant sur une période de la houle et peut être ainsi défini via le paramètre de Shields pour une houle seule :

$$\theta_w = \frac{\tau_w}{(\rho_s - \rho) g d_{50}} = \frac{\frac{1}{2} f_w U_w^2}{(s-1) g d_{50}} \quad (8)$$

Suivant l'idée de Dibajnia & Watanabe (1992[19]), l'utilisation d'une valeur moyenne de la contrainte de cisaillement pour chacune des demi-périodes de l'interaction houle-courant ($u(t) > 0$ ou $u(t) < 0$) permet de simplifier largement le problème tout en permettant la prise en compte de l'asymétrie de la houle.

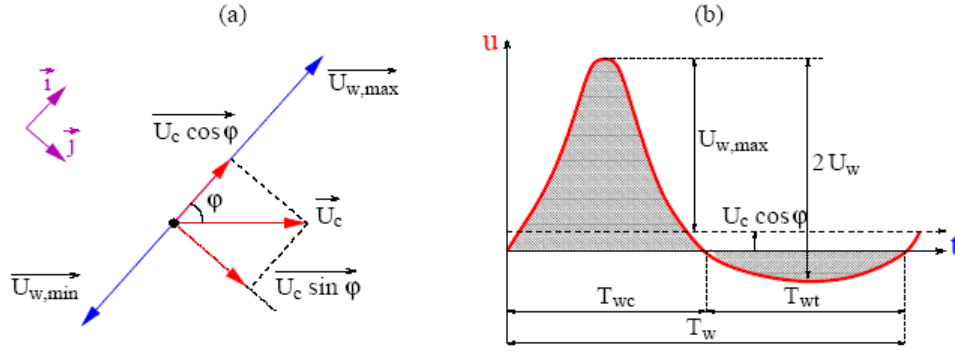


Figure.2 – (a) Notation pour une interaction entre un courant et une houle et (b) profil temporel des vitesses instantanées dans la direction de la houle en tenant compte d'un possible courant permanent.

Une équation généralisée est donc proposée pour le transport de sédiments sous une interaction houle-courant :

$$\begin{cases} \Phi_i = a_i \sqrt{\theta_{cw,m-on} - \theta_{cw,m-off}} \theta_{cw,m} \exp\left(-b \frac{\theta_{cr}}{\theta_{cw}}\right) \\ \Phi_j = a_j \sqrt{\theta_c \sin \varphi} \theta_{cw,m} \exp\left(-b \frac{\theta_{cr}}{\theta_{cw}}\right) \end{cases} \quad (9)$$

où i, j correspondent respectivement à la direction de la houle et sa normale; $\theta_{cw,m-on}$, $\theta_{cw,m-off}$ et $\theta_{cw,m}$ sont les valeurs moyennes quadratiques du paramètre de Shields instantané (valeur absolue) dans les directions “onshore”, “offshore” et sur une période de la houle (Dans le cas d’une houle sinusoïdale sans courant, $\theta_{cw,m-on} = \theta_{cw,m-off} = \theta_{cw,m} = 1/2\theta_w$); θ_{cw} est le paramètre de Shields maximum dû à l’interaction entre la houle et le courant ($\theta_{cw} = \sqrt{\theta_c^2 + 2\theta_w \theta_c \cos \varphi}$), et enfin θ est l’angle entre les directions de la houle et du courant (cf. figure 2).

3.2. Comparaison avec des données expérimentales

Les premières expériences sur le transport solide dû à un flux oscillant ont été obtenues à l’aide d’un banc mobile (Kalkanis, 1964[20]; Abou Seida, 1965[21]; Sleath, 1978[22]). De nombreuses études ont ensuite été réalisées dans des tunnels oscillants (“Oscillating Water Tunnel”) permettant d’atteindre de très fortes vitesses orbitales tout en limitant le transport par suspension du fait des faibles vitesses verticales induites par ces expériences (Horikawa et al., 1982[23]; Sawamoto & Yamashita, 1986[24]; Ahilan & Sleath, 1987[25]; Watanabe & Isobe, 1990[26]; King, 1991[27]; Dibajnia & Watanabe, 1992[19], Ribberink & Chen, 1993[28]; Ribberink & Al Salem, 1994[29]; Dohmen-Jansen, 1999[30]; Ahmed & Sato, 2003[31]). Il faut aussi noter que plusieurs de ces expériences ont été effectuées sur une période de la houle, ne permettant donc pas l’obtention d’un débit solide net ($\theta_{cw,m-off} = 0$). Un autre point important est que les contraintes de cisaillement au fond n’ont pas été mesurées au cours de ces expériences. Le coefficient de frottement f_w a ainsi été estimé en utilisant la formule de Wilson (1987[32]) pour la détermination de la hauteur de rugosité ($ks/d50 = \max(2, 5\theta)$).

En utilisant les données expérimentales avec une houle seule, il est apparu que l’équation 9 induisait une surestimation du transport sédiment avec $a_i = 12$. Un coefficient $a_i = 6$ permet d’améliorer notablement les résultats (valeur moyenne logarithmique des a_i , exp, cf. Fig. 3). Cette remarque avait déjà été observée par Soulsby (1997[10], pp.163) qui avait utilisé la formule de

Meyer-Peter & Muller pour estimer le transport solide sous une période de houle.

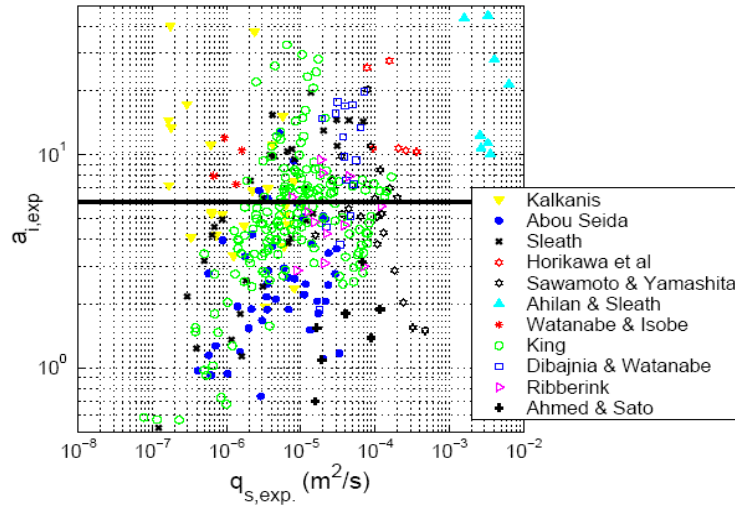


Figure. 3: Calibration de la variable a_i dans le cas d'une houle seule.

Dans le cas d'une interaction houle-courant, les coefficients a_i et a_j ont donc été légèrement modifiés par rapport à l'équation 6 :

$$a_i = 6 + 6 Y \quad \text{avec} \quad Y = \frac{\theta_c}{\theta_c + \theta_w} \quad \text{et} \quad a_j = 12 \quad (10)$$

La figure 4 présente une comparaison entre les débits solides par charriage prédits selon l'équation 9 et mesures expérimentalement (données houle-courant). L'équation 9 offre en général des résultats tout à fait corrects bien que plus disperses que pour le cas d'un courant seul. Ceci peut être facilement expliqué du fait de l'incertitude sur la prédiction des contraintes de cisaillement.

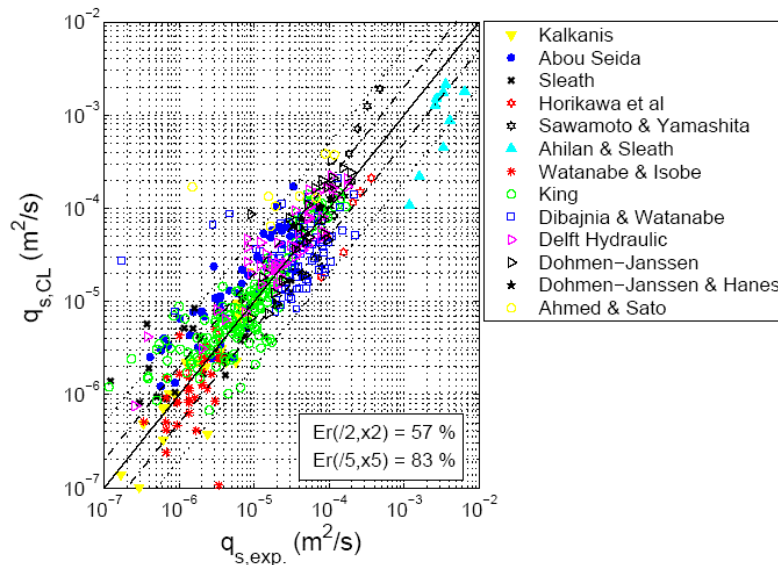


Figure.4: Comparaison entre les débits solides par charriage prédits selon l'équation 9 (hauteur de rugosité calculée par intermédiaire de la formule de Wilson) et mesures expérimentalement.

A titre de comparaison, trois autres formules permettant la prédiction du transport solide par charriage sous une interaction houle-courant ont été étudiées : les formules de Bailard & Inman (1981[6]), Dibajnia & Watanabe (1992[19]) et Ribberink (1998[7]). Ces formules largement utilisées ont été choisies du fait de leur différente méthode (cf. Camenen & Larroude, 2003[33]). Le tableau 2 présente l'ensemble des résultats obtenus dans le cas d'une interaction entre un courant et une houle colinéaire, avec en particulier les données expérimentales réalisées sur un cycle complet de la houle ou le phénomène de retard de phase des sédiments ("phase-lag") peut apparaître. La formule 9 permet le plus souvent une meilleure prédiction du débit solide par charriage à l'exception des cas où le phénomène de "phase-lag" est important (celui-ci n'étant pas pris en compte). Dans ce dernier cas, la formule de Dibajnia & Watanabe est la plus performante. Cette formule présente par contre de moins bons résultats dans les autres cas du fait de l'absence d'une prise en compte du frottement au fond. La formule de Bailard & Inman induit des résultats équivalents à l'équation 9 mais avec une plus large dispersion. Ceci est en partie dû au fait que cette formule ne prend pas compte de la contrainte de cisaillement critique. Enfin, la formule de Ribberink indique généralement une très forte surestimation du transport solide. Ribberink (1998[7]) a en effet généralisé sa formule pour l'ensemble des cas (courant seul, houle seule, houle et courant) avec un coefficient de calibration constant contrairement à l'équation 9 (ai variable).

Tableau.2 Prédiction du transport solide par charriage sous une interaction houle-courant avec une tolérance d'un facteur 2 ou 5.

Auteurs(s)	toutes les données		Données avec cycle complet	
	Pred. x2	Pred. x5	Pred. x2	Pred. x5
Bailard & Inman	47 %	73 %	44 %	66 %
Dibajnia & Watanabe	38 %	74 %	43 %	75 %
Ribberink	25 %	64 %	19 %	45 %
Eq.9	57 %	83 %	48 %	72 %

4.Conclusion

Une nouvelle formule pour l'estimation du transport solide par charriage a été développée avec pour principale hypothèse la proportionnalité entre le débit solide et la contrainte de cisaillement au fond à la puissance 3/2. L'équation 9 présente de très bons résultats dans le cas d'un courant seul, et des résultats prometteurs dans le cas d'une interaction entre un courant et une houle. Une difficulté apparaît cependant dans ce dernier cas pour la calibration de la formule: l'estimation de la contrainte de cisaillement totale ou plus précisément de la rugosité de fond est sujet à une forte dispersion, celle-ci ne pouvant être directement obtenue à partir des résultats expérimentaux. En son état actuel, l'équation proposée permet une bien meilleure prédiction du transport solide par charriage par rapport aux formules existantes.

Une nette amélioration pourra encore être obtenue par la suite grâce à la prise en compte du retard de phase des sédiments Celle-ci pourra être réalisée par l'ajout d'un coefficient α_{pl} modifiant les contraintes caractéristiques sur chacune des périodes ($\theta_{cw,m-on}$ et $\theta_{cw,m-off}$).

5. Remerciement

La majeure partie du travail présentée dans ce papier est soutenue par le programme Humor finance par la Communauté Européenne, l'université Joseph Fourier (Grenoble, France) et l'université de Lund (Suède).

6. Références

- 1.** K.C. Wilson: Bed-load transport at high shear stress. *J. Hydraulic Eng. (Hydr. Division)*, 92(11) :49–59, 1966.
- 2.** J. Fredsøe and R. Deigaard.: *Mechanics of coastal sediment transport*, volume 3 of *Advanced Series on Ocean Engineering*. World Scientific Publication, 1994.
- 3.** E. Meyer-Peter and R. Muller. Formulas for bed-load transport. In *Rep. 2nd Meet. Int. Assoc. Hydraul. Struc. Res.*, pages 39–64, Stockholm, Sweden, 1948.
- 4.** H.A. Einstein. The bed-load function for sediment transportation in open channel flows. Technical Report 1026, U.S. Dept. of Agriculture, Techn. Bulletin, Washington D.C., USA, 1950.
- 5.** R.A. Bagnold.: An approach of sediment transport model from general physics. Technical Report 422-I, US Geol. Survey Prof. Paper, 1966.
- 6.** J.A. Bailard and D.L. Inman.: An energetics bedload model for a plane sloping beach : local transport. *J. Geophysical Res.*, 86(C11) :10938–10954, 1981.
- 7.** J.S. Ribberink. Bed-load transport for steady flows and unsteady oscillatory flows. *Coastal Eng.*, 34 :52–82, 1998.
- 8.** Nielsen. *Coastal bottom boundary layers and sediment transport*, volume 4 of *Advanced Series on Ocean Engineering*. World Scientific Publication, 1992.
- 9.** R.L. Soulsby and R.J.S.W. Whitehouse. Threshold of sediment motion in coastal environment. In A. Tørum and O.T. Gudmestad, editors, *Water Wave Kinematics*, pages 413–428. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 1997.
- 10.** R.L. Soulsby.: *Dynamics of marine sands, a manual for practical applications*. Thomas Telford, ISBN 0-7277-2584X, H.R. Wallingford, England, 1997.
- 11.** W.R. Brownlie. *Compilation of alluvial channel data : laboratory and field*. Technical Report KH-R-43B, California Institute of Technology, Pasadena, California, U.S.A., 1981.
- 12.** G.K. Gilbert.: *The transportation of debris by running water*. Technical Report 86, U.S. Geological Survey, Professional Paper, 1914.
- 13.** G.P. Willis, N.L. Coleman, and W.M. Ellis. Laboratory study of transport of fine sand. *J. Hydraulic Eng. (Hydr. Division)*, 98(3) :801–816, 1972.
- 14.** G.M. Smart. Sediment transport formula for steep channels. *J. Hydraulic Eng.*, 111(3) :267–276, 1984.
- 15.** V.I. Nikora and G.M. Smart.: Turbulence characteristics of New Zealand gravel-bed rivers. *J. Hydraulic Eng.*, 123 :764–773, 1997.
- 16.** G.M. Smart. Turbulent velocity profiles and boundary shear in gravel bed rivers. *J. Hydraulic Eng.*, 125(2) :106–116, 1999.
- 17.** F.N. Nnadi and K.C. Wilson.: Motion of contact-load particules at high shear stress. *J. Hydraulic Eng.*, 118(12) :1670–1684, 1992.
- 18.** O.S. Madsen and W.D. Grant. *Sediment transport in the coastal environment*. Technical Report 209, M.I.T., Cambridge, Massassuchetts, USA, 1976.
- 19.** M. Dibajnia and A. Watanabe. Sheet flow under nonlinear waves and currents. In *Proc. 23rd Int. Conf. Coastal Eng.*, pages 2015–2029, Venice, Italy, 1992. ASCE.

- 20.G. Kalkanis.**: Transportation of bed material due to wave action. Technical Memo 2, Coastal Engineering Research Center, U.S. Army Corps of Engineers, Washington, D.C., 1964.
- 21.M.M. Abou-Seida.**: Bed load function due to wave action. Technical Report HEL-2-11, Hydraulic Engineering Laboratory, University of California, Berkeley, California, 1965.
- 22.J.F.A. Sleath.** Measurements of bed load in oscillatory flow. *J. Waterways, Port, Coastal and Ocean Eng. (-Division)*, 10(4) :291–307, 1978.
- 23.K. Horikawa, A. Watanabe, and S. Katori.** Sediment transport under sheet flow conditions. In Proc. 18th Int. Conf. Coastal Eng., pages 1335–1352, Cape Town, South Africa, 1982. ASCE.
- 24.M. Sawamoto and T. Yamashita.**: Sediment transport rate due to wave action. *J. of Hydroscience and Hydraulic Eng.*, 4(1) :1–15, 1986.
- 25.R.V. Ahilan and J.F.A. Sleath.** Sediment transport in oscillatory flow over flat beds. *J. Hydraulic Eng.*, 113(3) :308–322, 1987.
- 26.A. Watanabe and M. Isobe.**: Sand transport rate under wave-current action. In Proc. 22nd Int. Conf. Coastal Eng., pages 2495–2506, Delft, the Netherlands, 1990. ASCE.
- 27.D.B. King.**: Studies in oscillatory flow bedload sediment transport. PhD thesis, University of California, San Diego, 1991.
- 28.J.S. Ribberink and Z. Chen.**: Sediment transport of fine sand under asymmetric oscillatory flow. Delft Hydraulics, Report H840, part VII, The Netherlands, 1993.
- 29.J.S. Ribberink and A.A. Al Salem.** Sediment transport in oscillatory boundary layers in cases of rippled beds and sheet flow. *J. Geophysical Res.*, 99(C6) :707–727, 1994.
- 30.M. Dohmen-Janssen.**: Grain size influence on sediment transport in oscillatory sheet flow, phase-lags and mobile-bed effects. PhD thesis, Delft University of Technology, ISBN 90-9012929-4, The Netherlands, 1999.
- 31.A.S. Ahmed and S. Sato.**: A sheet-flow transport model for asymmetric oscillatory flow, part I: uniform grain size sediments. *Coastal Eng. J. (in Japan)*, 45(3) :321–337, 2003.
- 32.K.C. Wilson.** Analysis of bed-load motion at high shear stress. *J. Hydraulic Eng.*, 113(1) :97–103, 1987.
- 33.B. Camenen and P. Larroude.** Comparison of sediment transport formulae for a coastal environment. *Coastal Eng.*, 48 :111–132, 2003.