

Transport solide en suspension sous une interaction houle-courant

Benoît Camenen¹ et Magnus Larson²

¹ : *Dr, DPRI, Kyoto University*

Gokasho, Uji, Kyoto 611-0011, Japon

Email : benoit@rcde.dpri.kyoto-u.ac.jp

² : *Professeur Lund University, Dpt. of Water Resources Eng.*

Box 118, 22100 Lund, Suède.

Résumé

Cet article présente une nouvelle formule de transport en suspension développée en utilisant un large éventail de données expérimentales pour les sédiments non-cohésifs et dans le cas d'une interaction entre un courant et une houle. Cette formulation basée sur un profil exponentiel de concentration et une vitesse constante sur la hauteur d'eau est particulièrement adaptée pour les modèles numériques 2DH. Les principaux paramètres sont ainsi le coefficient de diffusion vertical et la concentration de référence au fond. Le premier est supposé égal à la somme linéaire des effets du courant, de la houle et du déferlement alors que le second est une fonction du paramètre de Shields. Dans le cas de rides de fond, une prise en compte des effets de retard de phase est proposée. L'équation obtenue donne de meilleurs résultats que les formules usuelles auxquelles elle est comparée.

Abstract

A simple and robust suspended load transport formula is presented for non-cohesive sediments in a wave and current interaction. The formula based on an exponential profile for the concentration and a constant velocity over the depth is especially adapted for 2DH models. The sediment diffusivity and the bottom reference concentration are thus the two main parameters. The sediment diffusivity is estimated assuming a linear combination of the mixing due to breaking waves and energy dissipation in the bottom boundary layer from the mean current and/or waves. The bottom reference concentration is a function of the Shields parameter. In case of ripples, a modification of the formula is proposed to take the possible phase-lag effects into account. Overall, the proposed equation yields a better agreement with the compiled data in comparison with existing formulas.

Mots clés

transport sédimentaire, sédiments non-cohésifs, suspension, coefficient de diffusion, concentration, courant, houle, déferlement, 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, confiné près du fond et forcé par les collisions

inter-granulaires (Camenen & Larson, 2005[5]), et la suspension, dominée par la turbulence du fluide et affectant l'ensemble de la colonne d'eau (Fredsoe & Deigaard 1992[8]). Le transport solide en suspension prédomine souvent dans le cas des sédiments fins ($d_{50} < 0.5$ mm) et la présence de formes de fond. Le débit solide volumétrique est donné par l'intégrale du produit de la vitesse u et de la concentration c entre le sommet de la couche de charriage $z = z_R$ et la hauteur d'eau $z = h$:

$$q_{ss} = \int_{z_R}^h c(z)u(z)dz \quad (1)$$

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. A l'équation 1, il faut rajouter un terme correspondant au produit des fluctuations temporelles de la concentration et de la vitesse. L'influence de la houle est cependant souvent introduite comme un terme augmentant la contrainte de cisaillement au fond et le coefficient de diffusion vertical (Bijker, 1968[4]; Van Rijn, 1993[16]).

L'objectif de cette étude est de développer une formule globale et fiable pour la prédiction du transport solide en suspension 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 200 profils de concentration dans le cas d'un courant permanent et environ 900 dans le cas d'une interaction houle-courant), correspondant principalement à la compilation réalisée sous le programme SEDMOC (2001[17]). Plusieurs formules proposées par d'autres auteurs ont été également confrontés à ces données.

2 Développement d'une formule de transport en suspension

En supposant le coefficient de diffusion ϵ constant sur la verticale, un profil de concentration suivant une loi exponentielle s'obtient aisément à partir de l'équation de conservation de la matière :

$$c(z) = c_R \exp\left(-\frac{W_s}{\epsilon}z\right) \quad (2)$$

où c_R est la concentration de référence au fond et W_s la vitesse de chute du sédiment (W_s/ϵ détermine les conditions de suspension). L'étude des profils de concentration expérimentaux a de plus confirmée les propos de Nielsen (1992[11]) montrant qu'un profil exponentiel décrit aussi bien le profil de concentration que le profil de Rouse, les principales différences s'observant au fond proche de la couche de charriage. Suivant l'approche de Madsen *et al.* (2003[10]), les variations verticales de la vitesse peuvent être négligées. En supposant le profil de concentration connu, celles-ci induisent en effet une réduction maximale du flux solide total inférieure à 10% dans le cas d'un courant seul (profil logarithmique avec des vitesses proches de zéro au fond où les concentrations sont les plus fortes) et inférieure à 20% dans le cas de profils de vitesse plus complexes (courant de retour). Le transport solide par suspension peut ainsi s'exprimer de la

manière suivante :

$$q_{ss} = U_c c_R \frac{\epsilon}{W_s} \left[1 - \exp \left(-\frac{W_s h}{\epsilon} \right) \right] \quad (3)$$

avec U_c le courant permanent moyenné sur la verticale.

Dans le cas d'un flux oscillant périodique (houle), l'équation 3 a été modifiée (dans la direction de la houle uniquement) en utilisant une vitesse caractéristique (moyenne quadratique) pour chacune des demi-périodes de la houle (où $u > 0$ - $U_{cw,onshore}$ - et $u < 0$ - $U_{cw,offshore}$ -, respectivement). Cette formulation permet ainsi la prise en compte d'une possible asymétrie de la houle (*cf.* Camenen & Larson, 2006[6]). U_c est ainsi remplacé par $U_{c,net}$:

$$U_{c,net} = U_{cw,onshore} + U_{cw,offshore} \quad (4)$$

3 Estimation du coefficient de diffusion verticale

Afin de tenir compte des effets du courant, de la houle, et de la houle déferlante, le coefficient de diffusion est relié à la dissipation d'énergie totale D comme proposé par Battjes & Janssen (1978[2]) :

$$\epsilon = \left(\frac{D}{\rho} \right)^{1/3} h \quad (5)$$

D peut ainsi être définie comme la somme des dissipations au fond due au courant (D_c), à la houle (D_w), et de la dissipation due à la houle déferlante (D_b) :

$$D = k_b^3 D_b + k_c^3 D_c + k_w^3 D_w \quad (6)$$

avec k_b un coefficient d'efficacité, et k_c et k_w des coefficients liés au nombre de Schmidt σ (rapport entre le coefficient diffusion et la viscosité turbulente). Les dissipations au fond peuvent s'écrire comme le produit de la contrainte de cisaillement τ et de la vitesse de frottement u_* : $D_{c/w} = \tau_{c/w} u_{*c/w}$ (où les indices c et w indiquent que la variable se réfère au courant ou à la houle respectivement).

En supposant un profil parabolique comme l'approche la plus correcte pour le coefficient de diffusion vertical (profil de Rouse, 1938[13]), sa valeur moyenne dans le cas d'un courant s'écrit :

$$\epsilon_c = k_c \left(\frac{D_c}{\rho} \right)^{1/3} h = \frac{\sigma_c}{6} \kappa u_{*,c} h \quad (7)$$

Dans le cas d'une houle supposée sinusoïdale, une moyenne temporelle induit la relation suivante pour le coefficient de diffusion moyenné sur la verticale :

$$\epsilon_w = k_w \left(\frac{D_w}{\rho} \right)^{1/3} h = \frac{2 \sigma_w}{\pi 6} \kappa u_{*,w} h \quad (8)$$

On obtient ainsi $k_c = \sigma_c/6 \kappa$ et $k_w = \sigma_w/(3\pi) \kappa$.

3.1 Nombre de Schmidt dans le cas d'un courant permanent

En approximant les profils de concentration expérimentaux par une fonction exponentielle et en utilisant l'équation 7 (avec ϵ_c estimé expérimentalement avec la pente de la courbe d'interpolation), il est possible d'estimer le nombre de Schmidt. Suivant les travaux de Van Rijn (1984[15]), σ_c a été estimé en fonction du coefficient W_s/u_{*c} . Lorsque $W_s/u_{*c} \gg 1$, la suspension est quasi nulle; les sédiments en suspension n'influencent donc plus l'écoulement; et le nombre de Schmidt doit être égal à 1. L'équation suivante est ainsi proposée pour le nombre de Schmidt :

$$\sigma_c = \begin{cases} A_1 + A_2 \sin^2 \left(\frac{\pi W_s}{2 u_{*c}} \right) & \text{if } \frac{W_s}{u_{*c}} \leq 1 \\ 1 + (A_1 + A_2 - 1) \sin^2 \left(\frac{\pi u_{*c}}{2 W_s} \right) & \text{if } \frac{W_s}{u_{*c}} > 1 \end{cases} \quad (9)$$

avec $A_1 = 0.4$ and $A_2 = 3.5$.

TAB. 1 – Prediction du nombre de Schmidt dans le cas d'un courant seul ($f(\sigma_c) = \log |\sigma_{c,pred}/\sigma_{c,meas}|$).

Auteur(s)	Pred. x2	Pred. x5	mean(f(σ_c))	std(f(σ_c))
Van Rijn (1984[15])	78%	100%	-0.02	0.25
Rose & Thorne (2001[12])	75%	95%	-0.04	0.32
Eq. 9	76%	99%	-0.04	0.26

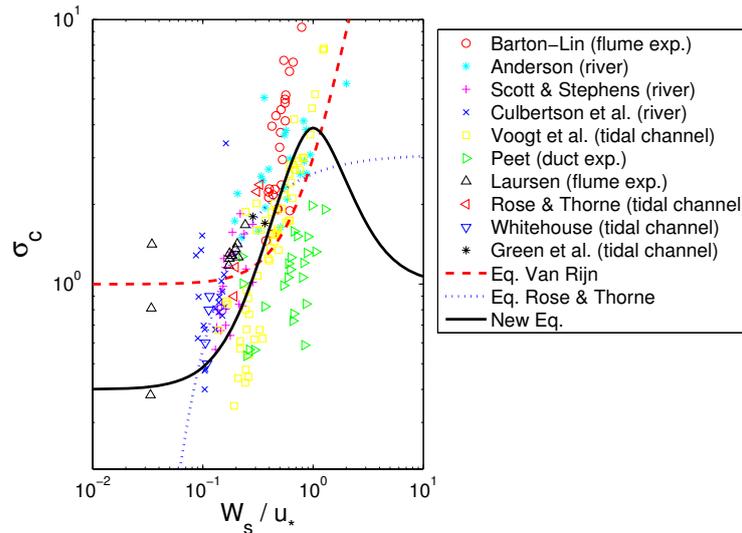


FIG. 1 – Estimation du nombre de Schmidt σ_c en fonction du rapport W_s/u_{*c} .

Même si une large dispersion existe, l'équation 9 améliore sensiblement les résultats par rapport aux formules existantes (*cf.* Fig. 1 et Tab. 1). Les résultats des expériences en conduite (“Peet”) sont cependant généralement surestimés.

3.2 Nombre de Schmidt dans le cas d'une houle

En étudiant de manière identique les données expérimentales de profils de concentration avec une houle seule et en utilisant l'équation 8, des résultats similaires ont été obtenus. Le nombre de Schmidt dans le cas d'une houle seule peut être décrit par l'équation 9 en choisissant des coefficients plus faibles $A_1 = 0.15$ et $A_2 = 1.5$. Il faut toutefois noter que dans le cas d'une houle, la contrainte de cisaillement au fond (et donc u_*) ne peut être calculée directement à partir des données expérimentales mais doit être estimée à partir de formulations empiriques pour le calcul de la rugosité au fond. Ceci induit une plus grande dispersion des résultats (*cf.* Tab. 2 and Fig. 2).

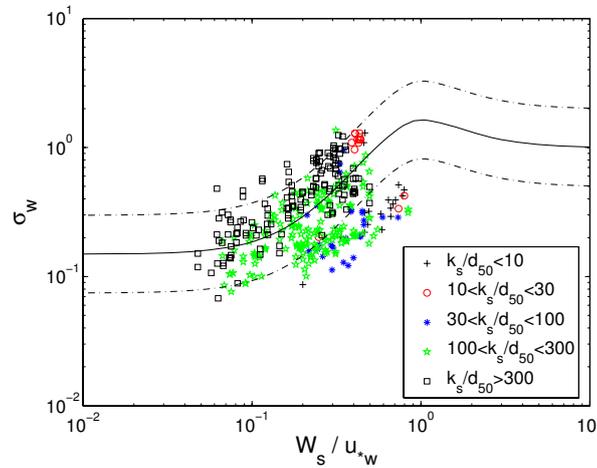


FIG. 2 – Estimation du nombre de Schmidt σ_w en fonction du rapport W_s/u_{*w} .

Dans le cas d'une houle seule, il existe de nombreuses expressions empiriques donnant une estimation du coefficient de diffusivité. Aucune ne faisant référence au nombre de Schmidt, une comparaison avec les données expérimentales est réalisée directement sur le coefficient de diffusivité (*cf.* Tab. 2). Les équations 8 et 9 induisent une bien meilleure prédiction du coefficient de diffusion par rapport aux formulations existantes.

TAB. 2 – Prédiction du coefficient de diffusivité dans le cas d'une houle seule ($f(\epsilon_w) = \log |\epsilon_{w,pred}/\epsilon_{w,meas}|$).

Auteur(s)	Pred. x2	Pred. x5	mean($f(\epsilon_w)$)	std($f(\epsilon_w)$)
Dally & Dean (1984[7])	14%	51%	0.67	0.32
Nielsen (1992[11])	56%	90%	-0.31	0.57
Van Rijn (1993[16])	38%	76%	0.29	0.52
Eqs. 8 and 9	69%	100%	0.09	0.28

Dans le cas d'une interaction entre la houle et le courant, un unique nombre de Schmidt doit être utilisé pour l'estimation des coefficients de diffusion dus

au courant et à la houle. En première approximation, une simple relation de proportionnalité avec les contraintes de cisaillement est proposée :

$$\sigma_{cw} = X_t \sigma_c + (1 - X_t) \sigma_w \quad (10)$$

avec $X_t = \theta_c / (\theta_c + \theta_w)$.

3.3 Coefficient de diffusion dû à une houle déferlante

En utilisant les données expérimentales où la houle houle déferlait et en assumant que le déferlement produit l'essentiel de la dissipation d'énergie, il a été possible d'estimer le coefficient d'efficacité k_b . Une valeur constante $k_b = 0.010$ induit des résultats tout aussi bons que dans le cas d'une houle seule (Pred x2 = 72%, Pred x5 = 96%).

4 Estimation de la concentration de référence

L'estimation de la concentration de référence dépend très largement des hypothèses sur le profil de concentration. L'utilisation d'un profil exponentiel pour la concentration donnant une valeur finie pour $z = 0$, il est donc inutile de définir une hauteur de référence arbitraire à l'instar du modèle de Rouse. Suivant Madsen (1993[9]), la concentration de référence est une fonction du charriage, en faisant l'hypothèse que ce dernier correspond au produit de la concentration de référence par la vitesse de la couche de charriage supposée proportionnelle à la vitesse de frottement au fond. En reprenant les résultats de Camenen & Larson (2005[5]), la formulation suivante est donc obtenue :

$$c_R = A_{cR} \theta_T \exp\left(-4.5 \frac{\theta_{cr}}{\theta_M}\right) \quad (11)$$

où θ_T est un paramètre de Shields de "transport", θ_M le paramètre de Shields maximum, θ_{cr} le paramètre de Shields critique de mise en mouvement des sédiments et A_{cR} un coefficient. Dans le cas d'un courant seul, $\theta_M = \theta_T = \theta_c$ avec θ_c paramètre de Shields dû au courant moyen.

En utilisant les données expérimentales avec un courant seul, le coefficient A_{cR} a été obtenu comme une fonction du diamètre sédimentologique $d_* = \sqrt[3]{(s-1)g/\nu^2} d_{50}$:

$$A_{cR} = 1.5 \cdot 10^{-3} \exp(-0.2d_*) \quad (12)$$

L'équation obtenue permet ainsi l'obtention de meilleurs résultats comparé aux formules existantes (*cf.* Tab. 3 et Fig. 3).

Dans le cas d'une houle seule, le paramètre de Shields moyen dû à la houle, $\theta_{w,m}$, à été utilisé en tant que paramètre de Shields de "transport" θ_T (Dans le cas d'une houle sinusoïdale, $\theta_{w,m} = 1/2 \theta_w$, où θ_w est le paramètre de Shields maximal dû à la houle). Les équations 11 and 12 donnent des résultats aussi satisfaisants que dans le cas d'un courant seul (*cf.* Tab. 3). Dans le cas d'une interaction entre un courant et une houle, ces dernières induisent des résultats toujours corrects mais avec une plus forte dispersion dans le cas des données de terrain (Nielsen, 1992[11]; Bayram *et al.*, 2001[3]; *cf.* Fig. 4(a)) et une légère

TAB. 3 – Prédiction de la concentration de référence dans l’hypothèse d’un profil de concentration exponentiel et d’un courant seul (terme de gauche) ou d’une interaction entre un courant et une houle non-déferlante (terme de droite).

Auteur(s)	Pred. x2	Pred. x5	mean($f(c_R)$)	std($f(c_R)$)
Nielsen (1992[11])	13%/28%	50%/45%	0.64/−0.06	0.43/1.08
Madsen (1993[9])	27%/03%	50%/26%	0.75/1.03	0.83/0.48
Eqs. 11 and 12	38%/52%	83%/82%	−0.12/0.17	0.55/0.53

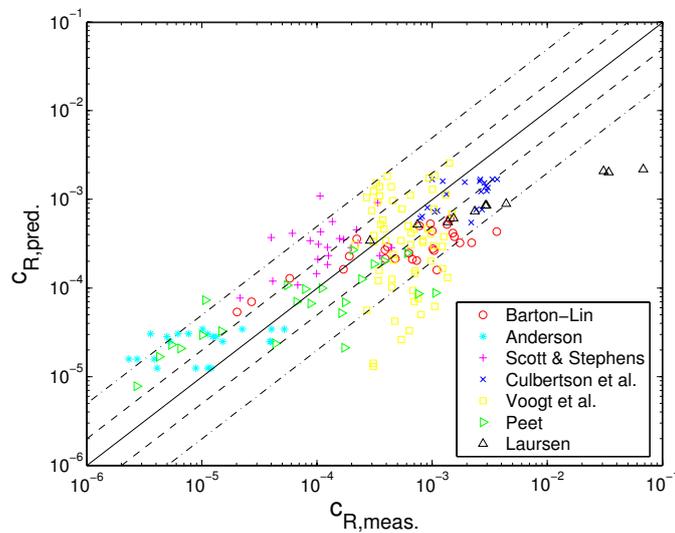


FIG. 3 – Comparaison entre la concentration de référence prédite par les équations 11 and 12 et les données expérimentales pour un courant seul dans l’hypothèse d’un profil de concentration exponentiel.

surestimation des prédictions. Lorsque la houle est déferlante, les résultats restent bons, mais la tendance observée s’inverse : Les équations 11 and 12 sous-estiment légèrement les résultats expérimentaux. En effet, dans le cas d’un déferlement plongeant, il est fort possible que la concentration de référence soit accrue du fait des jets turbulents

5 Transport solide en suspension

Le transport solide en suspension peut donc être estimé par l’intermédiaire des équations 3, 5 et 11. Dans le cas d’un courant seul, des prédictions bien meilleures que celles données par d’autres formules de transport classiques comme celles de Bijker (1968[4]), Bailard (1981[1]), ou Van Rijn (1984[15]) sont obtenues. Près de 40% (80%) des données expérimentales sont prédites correctement avec une tolérance d’un facteur 2 (5). On peut tout de même noter une légère surestimation des flux (*cf.* Tab. 4).

Dans le cas d’une interaction entre un courant et une houle, les résultats sont tout aussi bons que dans le cas d’un courant seul, et surpassent les trois

TAB. 4 – Prédiction du transport en suspension dans le cas d’un courant seul.

Auteur(s)	Pred. x2	Pred. x5	mean($f(q_{ss})$)	std($f(q_{ss})$)
Bijker (1968[4])	24%	45%	0.60	1.04
Bailard (1981[1])	33%	72%	0.32	0.69
Van Rijn (1984[15])	30%	69%	-0.27	0.98
Eqs. 3, 5 et 11	37%	79%	-0.10	0.57

autres formulations (*cf.* Tab. 5). Il existe cependant une certaine dispersion des résultats pour certains jeux de données (“Kroon”, “Grote Speurwerk (35m)”, *cf.* Fig. 4). Cette dispersion résulte généralement de la dispersion existante dans la prédiction de la concentration de référence. L’estimation de la rugosité au fond (en particulier due aux rides) induit en effet de larges incertitudes. De plus, comme observé précédemment, le transport solide est souvent sous-estimé lorsque la houle déferle. Les formules de Bijker et principalement de Bailard offrent de meilleurs résultats dans ce cas. Ceci s’explique du fait qu’elles ont été spécialement calibrées pour cette zone. De plus, la formule de Bailard n’étant pas fonction du paramètre de Shields induit une dispersion moins importante par rapport aux autres formules (dispersion en grande partie due à l’estimation du frottement au fond).

TAB. 5 – Prédiction du transport en suspension dans le cas d’une interaction entre un courant et une houle (en parenthèse figurent les résultats pour une houle déferlante).

Auteur(s)	Pred. x2	Pred. x5	mean($f(q_{ss})$)	std($f(q_{ss})$)
Bijker (1968[4])	10(23)%	40(59)%	0.83(0.43)	0.60(0.70)
Bailard (1981[1])	19(30)%	58(74)%	0.65(0.47)	0.52(0.51)
Van Rijn (1993[16])	30(23)%	70(62)%	-0.22(-0.03)	0.74(0.69)
Eqs. 3, 5 et 11	44(42)%	77(76)%	0.23(-0.05)	0.61(0.60)

6 Prise en compte des effets des rides de fond

L’ensemble des résultats expérimentaux présentés dans cet article correspondent au transport sédimentaire en suspension relié au courant moyen. Les effets des fluctuations temporelles de la concentration et des vitesses ne sont donc pas prises en compte, bien que fondamentales dans la zone proche du littorale où la houle est fortement asymétrique. Van der Werf & Ribberink (2004[14]) ont clairement montré expérimentalement que les rides de fond induisent un retard de phase très important de la concentration en sédiments sur la vitesse du fluide. Ceci résulte dans le cas où le courant moyen est faible en un transport solide net opposé à la direction de la houle. Van der Werf & Ribberink (2004[14]) ont proposé d’utiliser un paramètre de suspension fonction de la hauteur des

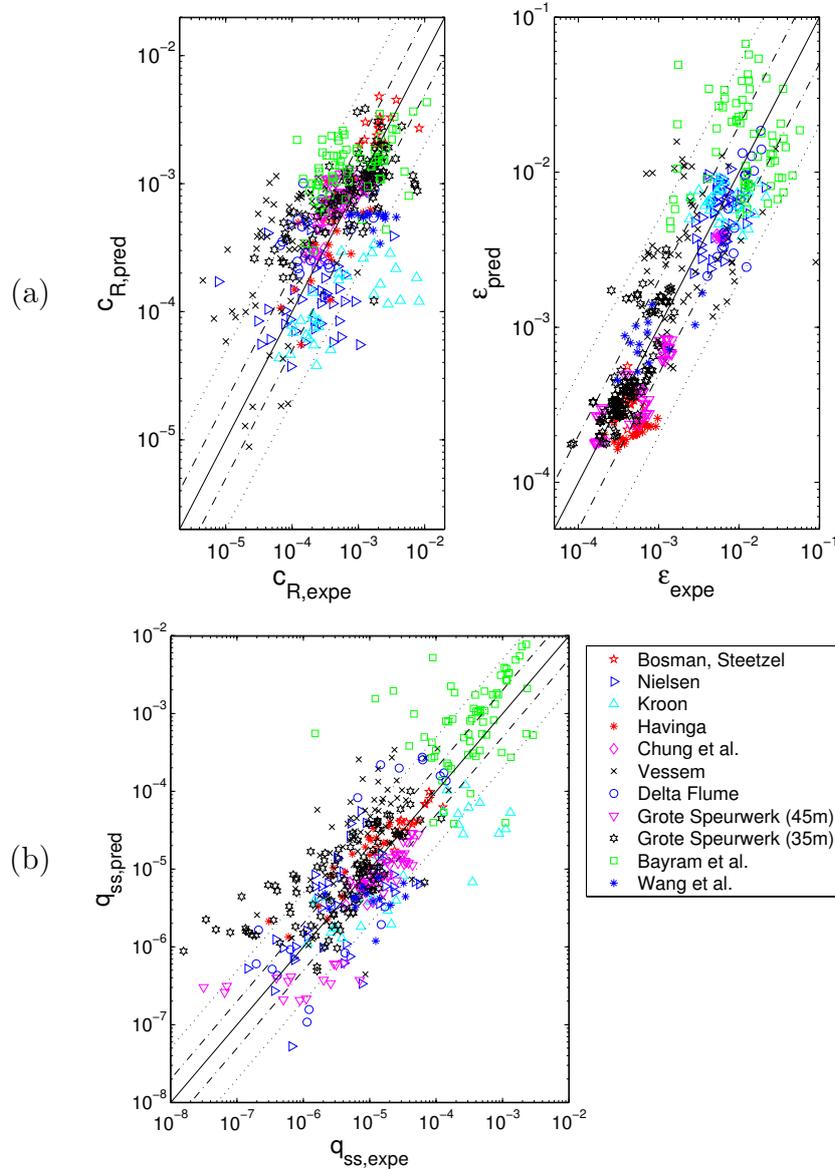


FIG. 4 – Comparaison entre les valeurs observées et prédites de la concentration de référence c_R et du paramètre de diffusivité (a) ainsi que le transport solide par suspension résultant (b) pour une interaction entre la houle et le courant.

rides H_r :

$$p_{WR} = \frac{H_r}{d_{50}} \quad (13)$$

La figure 5 montre que pour $p_{WR} > 70$, le transport solide net est généralement dirigé vers la large. Il est assez surprenant que le courant moyen ne soit pas pris en compte dans une telle étude. Cependant, il est très rare d'observer un courant moyen dirigé dans la même direction de la houle. Celui-ci est au contraire le plus souvent opposé (courant de retour) et relativement faible comparé à la vitesse orbitale de la houle.

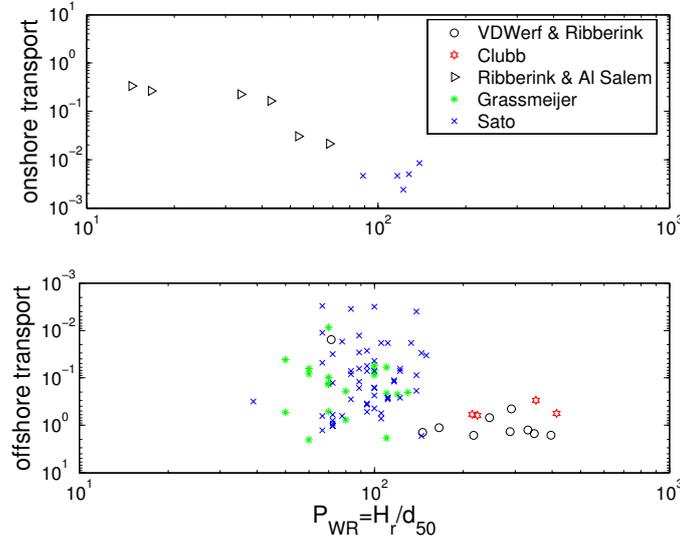


FIG. 5 – Transport solide en suspension adimensionné par le coefficient $\sqrt{(s-1)gd_{50}^3}$ en fonction du paramètre de suspension p_{WR} .

Afin de tenir compte de cet effet, l'équation 4 a été modifiée en introduisant un coefficient $\alpha_{pl,s}$ permettant une réduction de la vitesse caractéristique “onshore” et un accroissement de la vitesse “offshore” en cas de retard de phase des sédiments :

$$U_{c,net} = (1 - \alpha_{pl,s})U_{cw,onshore} + (1 + \alpha_{pl,s})U_{cw,offshore} \quad (14)$$

La formule suivante est proposée pour le coefficient $\alpha_{pl,s}$ (cf Camenen & Larson, 2006[6]) :

$$\alpha_{pl,s} = (D_{pl,onshore} - D_{pl,offshore}) \exp \left[-0.25 \left(\frac{p_{WR,cr}}{p_{WR}} \right)^4 \right] \quad (15)$$

où pour chaque demi-période, $D_{pl,i}$ (i correspond à *onshore* ou *offshore*) a été obtenu en fonction des deux paramètres adimensionnels $\varpi_i = U_{cw,i}/W_s$ et $p_i = H_r/(T_{w,i}W_s)$. Une analyse de la sensibilité de $D_{pl,i}$ à ces deux paramètres a finalement donné :

$$D_{pl,i} = 0.7 \varpi_i^{0.5} p_i^{0.25} \quad (16)$$

Par l'intermédiaire de cette équation, la relation de transport solide en suspension (Eqs. 3, 14 and 15) offrent des résultats très satisfaisants (cf. Tab. 6).

7 Conclusion

Une nouvelle formule pour l'estimation du transport solide par suspension a été développée avec pour principales hypothèses un profil exponentiel de la concentration en sédiments et une vitesse du fluide constante sur la verticale. La qualité d'une telle formulation dépend principalement de la qualité de la prédiction de la concentration de référence et du coefficient de diffusivité. L'équation

TAB. 6 – Prédiction du transport en suspension dans la direction de la houle dans le cas d'un fond ridé.

Auteur(s)	Pred. x2	Pred. x5	mean($f(q_{ss})$)	std($f(q_{ss})$)
V.d.Werf & Ribberink (2004)	20 %	34 %	-2.8	2.50
Eqs. 3 and 4	06 %	16 %	-3.6	2.40
Eqs. 3, 14 et 15	46 %	69 %	-0.7	1.93

3 présente de très bons résultats dans le cas d'un courant seul, et des résultats très 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 sujette 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 meilleure prédiction du transport solide en suspension par rapport aux formules existantes. Une meilleure estimation de la concentration de référence dans le cas d'une houle déferlante est cependant nécessaire. Dans le cas d'un lit ridé, où un possible retard de phase de la suspension peut apparaître dans la direction de la houle incidente, la modification proposée pour la vitesse caractéristique améliore largement la qualité de prédiction de la formule. Une telle formule est ainsi tout particulièrement adaptée pour les modèles morphodynamiques moyennés sur la hauteur d'eau (2DH).

8 Remerciement

La majeure partie du travail présentée dans ce papier est soutenue par la Société Japonaise pour la Promotion de la Science (JSPS).

Références

- [1] J.A. Bailard. An energetic total load sediment transport model for a plane sloping beach. *J. Geophysical Res.*, 86(C11) :10938–10954, 1981.
- [2] J.A. Battjes and J.P.F.M. Janssen. Energy loss and set-up due to breaking of random waves. In *Proc. 16th Int. Conf. Coastal Eng.*, pages 569–587. ASCE, 1978.
- [3] A. Bayram, M. Larson, H.C. Miller, and N.C. Kraus. Cross-shore distribution of longshore sediment transport : comparison between predictive formulas and field measurements. *Coastal Eng.*, 44(C5) :79–99, 2001.
- [4] E.W. Bijker. Littoral drift as function of waves and current. In *Proc. 11th Int. Conf. Coastal Eng.*, pages 415–435, London, United Kingdom, 1968. ASCE.
- [5] B. Camenen and M. Larson. A bedload sediment transport formula for the nearshore. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 63 :249–260, 2005.
- [6] B. Camenen and M. Larson. Phase-lag effects in sheet flow transport. *accepté pour publication à "Coastal Eng."*, 2006.

- [7] W.R. Dally and R.G. Dean. Suspended sediment transport and beach profile evolution. *J. Waterways, Port, Coastal and Ocean Eng.*, 110(1) :15–33, 1984.
- [8] J. Fredsøe and R. Deigaard. *Mechanics of coastal sediment transport*, volume 3 of *Advanced Series on Ocean Engineering*. World Scientific Publication, 1992.
- [9] O.S. Madsen. Sediment transport outside the surf zone. unpublished technical report, Waterways Experiment Station, U.S. Army Corps of Engineer, Vicksburg, Mississippi, USA, 1993.
- [10] O.S. Madsen, Y. Tajima¹, and B.A. Ebersole. Longshore sediment transport : a realistic order-of-magnitude estimate. In *Coastal Sediments Conf. Proc.* ASCE, 2003.
- [11] P. Nielsen. *Coastal bottom boundary layers and sediment transport*, volume 4 of *Advanced Series on Ocean Engineering*. World Scientific Publication, 1992.
- [12] C.P. Rose and P.D. Thorne. Measurements of suspended sediment transport parameters in a tidal estuary. *Continental Shelf Res.*, 21 :1551–1575, 2001.
- [13] H. Rouse. Experiments on the mechanics of sediment suspension. In *5th Int. Cong. Appl. Mech. Proc.*, volume 55, New York, 1938. Wiley & Sons.
- [14] J.J. Van der Werf and J.S. Ribberink. Wave induced sediment transport processes in the ripple regime. In *Proc. 29th Int. Conf. Coastal Eng.*, pages 1741–1753, Lisbon, Portugal, 2004. ASCE.
- [15] L.C. Van Rijn. Sediment transport, part II : suspended load transport. *J. Hydraulic Division*, 110(11) :1613–1641, 1984.
- [16] L.C. Van Rijn. *Principles of sediment transport in rivers, estuaries and coastal seas*. Aqua Publications, The Netherlands, 1993.
- [17] L.C. Van Rijn, A.G. Davies, J. Van der Graff, and J.S. Ribberink, editors. *Sedmoc : Sediment Transport Modelling in Marine Coastal Environments*. Aqua Publications, ISBN 90-800346-4-5, Amsterdam, The Netherlands, 2001.