UN MODELE DIPHASIQUE POUR SIMULER LES INTERACTIONS ENTRE L'ECOULEMENT ET LES SEDIMENTS COHESIFS

C. Teisson, O. Simonin

Laboratoire National d'Hydraulique - 6 quai Watier - 78400 Chatou

ABSTRACT

Turbulence is the factor responsible for maintaining in suspension very fine sediment, but is still crudely represented in cohesive sediment transport models. Thanks to a two phase-flow model, a better insight is tentatively given to the vertical distribution of sediment concentration, flow-sediment interaction, stratification and inhibition of vertical mixing. Treated as an interaction, the settling velocity of particles, hindered or not, is one of the results of this model. This model, standing concentrations as large as 60 g/l, enables to describe the vertical profile of sediment in its continuity, from the water surface down to/through the "bed", without any definition of the bed water interface.

1. INTRODUCTION

De nombreux modèles numériques ont été développés au cours de la dernière décennie pour reproduire le transport des sédiments cohésifs. D'un point de vue mathématique, le transport des sédiments cohésifs en suspension est décrit par l'équation bien connue d'advection-diffusion, avec le dépôt ou l'érosion de sédiments au niveau du fond jouant le rôle de termes source ou puits (TEISSON et LATTEUX, 1986).

Ces modèles fournissent aujourd'hui des résultats appréciables, mais seulement qualitatifs ; en pratique, l'utilisation des modèles se réduit souvent à des analyses de sensibilité (FRITSCH et al, 1989). Il ne sera pas possible de faire des prédictions avec une précision suffisante tant que les processus de base du transport de sédiment cohésifs n'auront pas été approfondis, en lien étroit avec les besoins des modèles numériques (TEISSON, 1991).

Même si l'advection des sédiments est en général l'objectif ultime de ces modèles, ce sont bien les termes source-puits, ainsi que la répartition induite de sédiments dans la colonne d'eau qui contribuent au budget de sédiment, et donc au résultat final du modèle. Ceci plaide pour de nouveaux modèles de recherche, traitant de la répartition verticale des sédiments et de l'interaction sédiment écoulement. Dans ce contexte, la turbulence est apparue le principal facteur responsable du profil vertical de concentration, s'opposant au dépôt, favorisant l'érosion ou assurant le mélange dans la colonne d'eau. De plus ce facteur est en général grossièrement représenté dans les modèles actuels de transport de sédiments cohésifs.

Cette recherche sur la turbulence dans les écoulements chargés en sédiments est conduite grâce à un modèle diphasique. Les modèles classiques font l'hypothèse que la concentration reste "modérée", et qu'il n'y a en général pas d'interaction sur l'écoulement. Au contraire, ce type de modèle s'intéresse aux interactions : ceci doit permettre de mieux traiter les écoulements très chargés en sédiments, comme il s'en rencontre en estuaires - le bouchon vaseux-, ou les suspensions mobiles très concentrées près du fond - la crème de vase-.

Les modèles classiques savent mal répondre à la question: " où est le fond?" Dans le meilleur des cas, l'évolution du lit de vase est représenté par un modèle de consolidation; la définition de l'interface eau/sédiments déposés/ reste toutefois arbitraire: les dépôts commencent-ils à 100, 200, 300 g/l ? Le modèle diphasique permet de décrire le profil vertical de concentration dans sa continuité, de la surface libre jusqu'au "fond", voire à travers ce fond, sans avoir recours à une notion particulière d'interface eau/sédiments déposés.

2. LE MODELE DIPHASIQUE

Le transport de sédiments cohésifs peut être étudié comme un écoulement à deux phases, c'est-à-dire l'écoulement d'une phase liquide - l'eau- et l'écoulement d'une phase solide - les particules de vase-. En écrivant l'équation de continuité et l'équation de quantité de mouvement pour chaque phase, avec les termes appropriés de taux de transfert de quantité de mouvement entre phases, la formulation diphasique permet de décrire comment la présence des particules modifie les caractéristiques de l'écoulement de la phase fluide, et réciproquement comment l'écoulement agit sur le mouvement des particules (SIMONIN et VIOLET, 1990).

Bilan de masse:

$$\frac{\partial}{\partial t} \alpha_k \rho_k + \frac{\partial}{\partial x_i} \alpha_k \rho_k U_{k,i} = 0 \quad (1)$$

où, $U_{k,i}$ est la composante i de la vitesse moyenne pour la phase continue ($k=1$) et pour la phase dispersée ($k=2$), respectivement α_k est la fraction volumique et ρ_k la masse volumique moyenne.

Bilan de quantité de mouvement :

$$\alpha_k \rho_k \frac{\partial}{\partial t} U_{k,i} + \alpha_k \rho_k U_{k,j} \frac{\partial}{\partial x_j} U_{k,i} = - \alpha_k \frac{\partial}{\partial x_i} P_1 + \alpha_k \rho_k G_i - \frac{\partial}{\partial x_j} \alpha_k \langle p u''_i u''_j \rangle_k + l_{k,i} \quad (2)$$

où, u''_i est la partie fluctuante de la vitesse instantanée locale et $\langle . \rangle_k$ l'opérateur de moyenne associé à la phase k ,

$$\alpha_k \rho_k U_{k,i} = \alpha_k \langle p u_i \rangle_k \quad \langle p u''_i \rangle_k = 0$$

P_1 est la pression moyenne de la phase continue, $l_{k,i}$ est la partie du taux de transfert de quantité de mouvement à l'interface entre phases qui demeure après soustraction des contributions de la pression moyenne et qui satisfait l'équation d'équilibre local,

$$\sum_{k=1}^2 l_{k,i} = 0$$

Echange interfacial de quantité de mouvement :

Ce terme peut s'écrire (SIMONIN, 1990):

$$l_{1,i} = - l_{2,i} = \alpha_2 \rho_1 F_D V_{r,i} - \rho_1 \langle u''_{1,i} u''_{2,j} \rangle_2 \frac{\partial}{\partial x_j} \alpha_2 + \alpha_2 \rho_1 C_A \left[\frac{\partial V_{r,i}}{\partial t} + U_{2,j} \frac{\partial V_{r,i}}{\partial x_j} \right] + \frac{\partial}{\partial x_j} \alpha_2 \rho_1 C_A \langle u''_{2,j} v''_{r,i} \rangle_2 \quad (3)$$

Le premier terme du membre de droite représente la force de trainée, le second la corrélation entre la distribution instantanée de particules et les fluctuations de pression du fluide non perturbé, et le dernier le terme de masse ajoutée.

$V_{r,i}$, la moyenne pondérée de la vitesse relative locale entre chaque particule et le fluide environnant, peut s'exprimer en fonction de l'écart entre les vitesses moyennes des deux phases $U_{2,i} - U_{1,i}$ et d'une vitesse de dérive $V_{d,i}$ qui prend en compte les effets de dispersion des particules lié au transport par le mouvement fluctuant du fluide.

$$V_{r,i} = (U_{2,i} - U_{1,i}) - V_{d,i} \quad (4)$$

La turbulence est modélisée en utilisant une viscosité turbulente prescrite par un modèle de transport à deux équations (k- ϵ), avec un traitement différent de la turbulence de la phase continue et de la phase dispersée.

3. APPLICATIONS

Les vitesses moyennes et les caractéristiques turbulentes de la phase solide peuvent différer de celles de la phase liquide, spécialement pour les fortes concentrations. Ainsi, la vitesse de chute des particules n'est pas prescrite mais est un résultat du modèle; la vitesse de chute entravée peut être représentée avec l'expulsion d'eau en conséquence.

Le modèle diphasique a traité le cas suivant :

- phase liquide :

hauteur d'eau	1 m
vitesse moyenne de l'écoulement	0.5 m/s

- phase solide :

masse volumique	1070 kg/m ³
diamètre	165 μ
concentration moyenne	0 (eau claire) à 8 g/l

Les sédiments cohésifs sont connus pour former des agrégats: la densité et le diamètre des particules ont été choisis pour représenter un macro-agrégat dont la vitesse de chute théorique est de 1 mm/s, ce qui correspond pratiquement à la taille et vitesse de chute maximum qui peuvent être rencontrées en nature (VAN LEUSSEN, 1986)

Sur la verticale, le modèle diphasique permet d'établir clairement la distinction entre V_r , la vitesse relative locale, qui n'est rien d'autre que la vitesse de chute classique, et la vitesse moyenne des particules solides, représentée par U_2 (la vitesse que verrait un observateur extérieur). Aux faibles concentrations, la turbulence complètement développée équilibre le dépôt: alors que V_r , qui est un résultat du modèle, atteint 1 mm/s, la vitesse de chute attendue pour des flocons de ce diamètre et cette densité, U_2 reste voisin de zéro, ce qui signifie que nous nous trouvons en situation d'équilibre (fig.1).

Le modèle diphasique fournit ainsi la vitesse verticale des particules en présence de la turbulence : U_2 peut être orienté vers le bas (turbulence trop faible pour s'opposer au dépôt) ou valoir zéro (conditions d'équilibre) voire même être orienté vers le haut (par exemple, lors du mélange dans la colonne d'eau en période d'accélération du courant).

L'amortissement de la turbulence est décelable dès que la concentration atteint 1 g/l, et l'extinction de la turbulence survient sur la fig.2 entre 4 et 8 g/l (en concentration moyenne). Dans ces conditions le profil de diffusivité turbulente est très éloigné du profil parabolique en eau claire (fig. 2). Comme la turbulence est étouffée par les forts gradients de concentration au voisinage du fond, les flocons ne peuvent plus se maintenir en suspension et chutent près du fond, réenforçant l'amortissement de la turbulence.

L' évolution temporelle du profil vertical de concentration volumique α_2 (volume de la phase solide/volume total) est présentée sur la fig.3, pour une concentration moyenne initiale de 8 g/l dans la colonne d'eau; dans l'état final, il ne reste virtuellement plus aucun flocon dans la partie supérieure de la colonne d'eau, tandis qu'un fort gradient s'est développé près du fond, où α_2 atteint jusqu'à 0.6, ce qui correspond à une concentration de 68 g/l pour ce genre de flocons. Ainsi, le modèle diphasique peut traiter de très fortes concentrations et éviter la définition de l'interface "eau-fond".

Les fortes concentrations près du fond génèrent une résistance à l'écoulement. Concernant la phase liquide, la fig.4 illustre la façon dont le profil logarithmique classique en eau claire est modifié par la présence de sédiments, avec une sévère réduction près du fond, le débit global étant conservé.

Une expression appropriée de la force de trainée dans le terme de transfert interfacial dans l'équation de quantité de mouvement permet de tenir compte de l'interaction entre particules pour les fortes concentrations : le modèle peut reproduire la vitesse de chute entravée. Sur la fig.5 sont tracées la concentration volumique α_2 (le profil final de la fig.3) et la vitesse relative associée : V_r diminue depuis 1 mm/s dans la partie supérieure de la colonne d'eau, où α_2 est très faible, jusqu'à pratiquement zéro près du fond où l'on observe les fortes concentrations. Dans ce cas, la turbulence est complètement amortie (cf. fig.2, profil pour 8 g/l) et ne s'oppose plus au dépôt : V_r et U_2 sont pratiquement confondus (fig.6) alors qu' U_2 était pratiquement nul en conditions d'équilibre sur la fig 1.

L'effet de la présence des particules sur la turbulence de l'écoulement est notable même à "faibles " concentrations, de l'ordre de 1 g/l. Par contre, les caractéristiques turbulentes de la phase dispersée ne sont pas différentes des caractéristiques turbulentes de la phase continue: les particules sont trop petites, avec une densité trop proche de celle de l'eau, pour générer de tels écarts.

A partir du profil final de la figure 3 (où α_2 atteint 0.6), obtenu pour une vitesse moyenne de l'écoulement de 0.5 m/s, qui peut être interprété comme un "dépôt" dans la partie inférieure de la colonne d'eau, un test qualitatif d'érosion a été réalisé en augmentant graduellement la vitesse horizontale de l'écoulement. A 0.7 m/s, le profil de concentration demeure inchangé: la turbulence est toujours amortie et incapable d'homogénéiser le profil. La vitesse est alors augmentée jusqu'à 1.2 m/s: la turbulence se reconstitue lentement, et avec un effet retard le profil de concentration retrouve le profil initial de la figure 3. Dans ce test, les particules n'étaient absolument pas liées entre elles près du fond, alors qu'elles le sont certainement en nature; même en l'absence de ces liens, le "dépôt" offre une certaine résistance à l'érosion, en raison du niveau de turbulence à atteindre pour vaincre les effets de stratification.

Les applications du modèle diphasique en sont juste à leur début dans le cas des sédiments cohésifs; les potentialités du modèle, couramment utilisé au LNH pour les écoulements à bulles, l'injection de charbon pulvérisé, n'ont pas encore été complètement explorées dans ce nouveau domaine. Pour l'instant, le diamètre et la densité des inclusions (les flocons de vase) sont supposés constants. Mais ces deux paramètres sont en fait des variables du modèle. On peut imaginer d'obtenir les variations de densité et de diamètre des flocons sur la verticale en fonction du niveau de turbulence, si l'on sait écrire les forces de

cohésion entre particules ou une loi d'équilibre local entre le niveau de la turbulence et la taille des flocons. Le modèle diphasique offre un formalisme rigoureux, qu'il reste à compléter par notre connaissance des sédiments cohésifs. Même le phénomène de consolidation (les équations de mécanique des sols régissant l'expulsion d'eau et l'évolution de l'indice des vides) peut être obtenu avec le formalisme diphasique, en tenant compte des mécanismes d'interaction particule-particule (les contraintes effectives), ainsi que l'a montré ALEXIS (1991). Le modèle ne pourra évidemment jamais tenir compte de la variabilité des propriétés de la vase rencontrée en nature et les lois empiriques seront toujours nécessaires pour refléter la diversité des propriétés physico-chimiques de la vase. Mais c'est une tentative d'étudier rigoureusement les processus, d'identifier les paramètres appropriés et de n'utiliser les lois empiriques que là où elles sont indispensables.

CONCLUSION

Le modèle diphasique apparaît prometteur par sa capacité à gérer les fortes concentrations en sédiments cohésifs et à reproduire proprement l'interaction sédiment-écoulement. Ce modèle permet de traiter le profil vertical de concentration dans sa continuité, de la surface libre jusqu'au fond, sans définition de l'interface eau-fond. La vitesse de chute, la vitesse de chute entravée, la chute en présence de turbulence sont inclus dans le modèle et ne nécessitent aucune spécification complémentaire.

Ainsi, ce modèle contribue à une meilleure compréhension de l'interface au voisinage du fond et des processus associés qui n'avaient été jusqu'alors que peu explorés : les phénomènes de dépôt ou d'érosion sont approchés rigoureusement sous l'angle de l'interaction entre les sédiments et l'écoulement. Il reste à vérifier ce modèle auprès de données fournissant des mesures de concentration au voisinage immédiat du fond.

REMERCIEMENTS

Cette étude est entreprise dans le cadre du projet "G6 Coastal Morphodynamics" du programme européen de recherche MAST. Elle est financée en partie par la Commission des Communautés Européennes, Direction Générale pour la Science, Recherche et Développement sous le contrat n° MAST 0035-C, et par le Secrétariat d'Etat Français à la Mer.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- (1) ALEXIS A. (1991) : Study of consolidation of soft marine soils. Part 1 : Bibliographic study. Abstract to MAST G6 Coastal Morphodynamics Workshop, Edinburgh, 16-20 Sep. 1991.

- (2) FRITSCH D., TEISSON Ch. MANOHA B. (1989) : Long term simulation of suspended sediment transport : Application to the Loire Estuary. Proceeding of IAHR 23e Congress - Ottawa, Canada. Aug. 89 Technical Session C, p. C277 C284..

- (3) SIMONIN O. and VIOLLET P.L. (1990): Modelling of turbulent two-phase jets loaded with discrete particles. Proc. of Phase Interface Phenomena in Multiphase Flow. Dubrovnik, 14-18 May 1990.

- (4) TEISSON Ch. and LATTEUX B. (1986), A depth - integrated bidimensional model of suspended sediment transport. Proceedings of the 3rd International Symposium on River Sedimentation, Jackson, April 1986, pp 421-429.

- (5) TEISSON Ch. (1991) : Cohesive suspended sediment transport: feasibility and limitations of numerical modelling 15 p. (à paraitre dans Special Maritime Issue of IAHR Journal)

- (6) VAN LEUSSEN W. (1986) : Aggregation of particles, settling velocity of mud flocs: a review. Physical processes in Estuaries. Springer -Verlag. pp 347-403

Fig.1 : Vitesse moyenne relative V_r (en trait plein) et vitesse moyenne de la phase dispersée U_2 (en tiretés, pour une concentration de 1 g/l. On observe une vitesse de chute non entravée (V_r constante) et des conditions d'équilibre (U_2 voisin de zéro)

Energie cinétique turbulente

Viscosité turbulente

Fig. 2 : Propriétés turbulentes de la phase continue (l'eau) en eau claire (trait plein), ou avec une concentration moyenne de 4g/l (tiretés) ou 8g/l (pointillés)

Fig. 3 : Evolution temporelle du profil vertical de α_2 , fraction volumique de la phase solide, à partir d'une concentration moyenne de 8 g/l (soit α_2 de l'ordre de 0.07 à $t=0$; trait plein).

Fig. 4 : Profil vertical des vitesses de la phase liquide en eau claire (pointillés) et en présence de sédiments cohésifs avec une concentration moyenne de 4 g/l (tiretés) ou 8g/l (trait plein).

Fig. 5 : Profil vertical de α_2 , fraction volumique de la phase solide (tiretés), et de la vitesse verticale relative V_r (trait plein)

Fig. 6 : Vitesse moyenne relative V_r (trait plein) et vitesse moyenne de la phase dispersée U_2 (en tiretés), pour une concentration de 8g/l.
On observe une vitesse de chute entravée pour V_r , et l'absence de conditions d'équilibre (U_2 voisin de V_r).