

APPROCHES NUMERIQUES ET EXPERIMENTALES EN APPUI A LA GESTION DURABLE DES SEDIMENTS

Modelling as a support for sustainable sediment management

Benjamin J. Dewals*, Sébastien Erpicum, Pierre Archambeau et Michel Pirotton

Université de Liège, Département ArGEnCo, Unité d'Hydrologie, Hydrodynamique Appliquée et Constructions Hydrauliques

* Chargé de recherches du F.R.S.-FNRS

Institut de Mécanique et Génie civil - Chemin des Chevreuils 1, Bât. B52/3+1 - 4000 Liège, Belgique

Tél: +32 (0)4 366 95 96, Fax: +32 (0)4 366 95 58, e-mail: B.Dewals@ulg.ac.be, hach@ulg.ac.be

Dans une communication récente [1], nous décrivions un système de modélisation hydrosédimentaire capable de simuler efficacement le transport solide et les remaniements topographiques concomitants tant à court qu'à long terme. Nous fournissons ici davantage de détails concernant (i) la discrétisation spatiale du modèle, (ii) le traitement numérique de zones rigides ainsi que (iii) les propriétés de convergence du processus itératif de prédiction de profils d'équilibre. En outre, la présente communication expose la généralisation du système de modélisation au transport solide hors équilibre, sur base de deux approches complémentaires (eulérienne et lagrangienne). Les potentialités pratiques offertes par cette dernière sont illustrées dans le cadre de la simulation des dépôts à l'embouchure d'un chenal, configuration pour laquelle des données expérimentales permettent de démontrer l'adéquation entre prédictions numériques et observations en ce qui concerne la localisation des dépôts, pourtant régie par des écoulements particulièrement complexes.

In a previous paper [1], we described a modelling system for flow and sediment transport, able to simulate efficiently both short- and long-term bed evolutions. The present paper provides more comprehensive information on (i) the space discretization of the model, (ii) the numerical handling of non-erodible areas, as well as (iii) the convergence properties of a numerical procedure dedicated to iteratively compute long-term equilibrium bed profiles. In addition, we present here the extension of the modelling system to the simulation of non-equilibrium sediment transport, by means of two complementary approaches (Eulerian and Lagrangian). The practical applicability of the later model is shown in the case of the simulation of sediment deposition occurring at the mouth of a canal into a shallow reservoir, for which reference experimental data are available. Although the location of deposits is strongly affected by a particularly complex flow field, a satisfactory agreement was found between simulated and observed global deposition patterns.

I INTRODUCTION

Afin d'assurer la pérennité de la navigabilité et des capacités de rétention face à des processus de sédimentation tout en respectant les contraintes environnementales, il convient de concevoir et édifier des aménagements adaptés, ainsi que d'élaborer des modes de gestion durable des sédiments. Etant donné la complexité des processus physiques déterminants et considérant les incertitudes sur les données d'entrées, il importe de disposer d'outils d'analyse prédictifs, tels que des modèles numériques, à même de fournir des éléments quantitatifs et rationnels d'aide à la décision.

Nous exposons ici un système de modélisation et d'analyse dédié notamment au support de la gestion durable des sédiments. Il s'agit du système de modélisation *WOLF*, développé et continuellement amélioré à l'Université de Liège, dont les caractéristiques et applications possibles sont détaillées ci-après.

Comme nous l'avons présenté dans une communication précédente [1], ces modèles numériques relèvent le défi de la prise en compte de la très grande hétérogénéité des échelles temporelles affectant les phénomènes à simuler, qu'il s'agisse d'un ensablement progressif ou des remaniements topographiques rapides au cours d'opérations de chasse. Grâce à la grande flexibilité dans les niveaux de couplage entre sous-modèles hydrodynamique et sédimentaire, des solutions stables et précises sont obtenues en un temps CPU réaliste pour des prédictions à court et moyen terme.

Néanmoins, l'ensemble des modèles sédimentaires bidimensionnels présentés précédemment traitaient exclusivement le transport solide à l'équilibre, postulant une égalité à tout instant entre le débit solide et la capacité de transport de l'écoulement [1]. A contrario, dans de nombreuses conditions de transport en

suspension et d'écoulements variés, il importe que le modèle reproduise également le caractère hors équilibre du transport, i.e. l'existence d'un délai de chargement ou de sédimentation, qui conduit à un décalage spatio-temporel entre toute variation des grandeurs hydrodynamiques et l'adaptation correspondante du débit solide.

C'est pourquoi, outre de nouvelles précisions concernant le modèle de transport solide à l'équilibre, l'article détaille la généralisation du système de modélisation à la prise en compte du transport hors équilibre. En particulier, la complémentarité entre descriptions eulérienne et lagrangienne du transport hors équilibre est soulignée. De plus, la présente communication décrit un traitement numérique original de zones non érodables, indispensable pour garantir l'applicabilité du modèle à des cas réels qui présentent souvent des zones partiellement rigides. De plus, afin de poursuivre la validation et l'amélioration du système de modélisation hydrosédimentaire, des essais expérimentaux au Laboratoire d'Hydraulique des Constructions de l'Université de Liège sont régulièrement exécutés en appui à des exercices de validation (ex. [2, 3]). Un exemple est décrit ici, portant sur la distribution spatiale des dépôts à l'embouchure d'un chenal, où l'écoulement présente une typologie particulièrement complexe.

II MODÈLE D'ÉCOULEMENT

II.1 Equations de conservation, lois constitutives et modélisation de la turbulence

La qualité de la modélisation du transport solide reste directement tributaire de la précision du modèle hydrodynamique. C'est pourquoi, la formulation 2D du modèle d'écoulement exploité ici repose sur les équations des eaux peu profondes complètes, sans hypothèse simplificatrice [4] :

$$\frac{\partial \mathbf{s}}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{f}}{\partial x} + \frac{\partial \mathbf{g}}{\partial y} + \frac{\partial \mathbf{f}_d}{\partial x} + \frac{\partial \mathbf{g}_d}{\partial y} = \mathbf{S}_0 - \mathbf{S}_f, \quad (1)$$

avec le vecteur des inconnues conservatives ainsi que les flux advectifs et diffusifs définis comme suit :

$$\mathbf{s} = \begin{pmatrix} h \\ hu \\ hv \end{pmatrix}, \quad \mathbf{f} = \begin{pmatrix} hu \\ hu^2 + \frac{1}{2} gh^2 \\ huv \end{pmatrix}, \quad \mathbf{g} = \begin{pmatrix} hv \\ huv \\ hv^2 + \frac{1}{2} gh^2 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{f}_d = -\frac{h}{\rho} \begin{pmatrix} 0 \\ \sigma_x \\ \tau_{xy} \end{pmatrix}, \quad \mathbf{g}_d = -\frac{h}{\rho} \begin{pmatrix} 0 \\ \tau_{xy} \\ \sigma_y \end{pmatrix}, \quad (2)$$

tandis que les termes de pente de fond et de frottement sont donnés par :

$$\mathbf{S}_0 = -gh \begin{bmatrix} 0 & \partial z_b / \partial x & \partial z_b / \partial y \end{bmatrix}^T \quad \text{et} \quad \mathbf{S}_f = \begin{bmatrix} 0 & \tau_{bx} \Delta \Sigma / \rho & \tau_{by} \Delta \Sigma / \rho \end{bmatrix}^T. \quad (3)$$

Les notations suivantes ont été utilisées : t = le temps ; x, y = les coordonnées spatiales, h = l'épaisseur de la couche d'écoulement, u et v = les composantes de vitesse selon x et y , z_b = le niveau du fond, g = l'accélération de la gravité, ρ = la masse volumique du mélange, τ_{bx} et τ_{by} = les composantes de la tension de cisaillement au fond (par unité de surface du fond), σ_x et σ_y = les tensions turbulentes normales et τ_{xy} = la tension turbulente de cisaillement. En outre, l'influence de l'accroissement de la surface de frottement sur une topographie irrégulière est prise en compte de manière cohérente avec les formulations de Hervouet [5] et de Wu [6] :

$$\Delta \Sigma = \sqrt{1 + (\partial z_b / \partial x)^2 + (\partial z_b / \partial y)^2}, \quad (4)$$

qui vaut l'inverse du cosinus de la plus grande pente en un point.

Plusieurs lois de frottement sont implantées au sein du modèle numérique décrit ci-après (Manning, Chézy, Colebrook, Barr, Bathurst), parmi lesquelles la loi de Manning reste la plus utilisée pour des applications pratiques en régime turbulent rugueux. Sur les mailles jouxtant un bord de simulation imperméable, la tension de cisaillement est calculée en tenant compte non seulement de la contribution du frottement au fond mais également de celle du frottement sur les parois verticales (*wall friction*) :

$$\frac{\tau_{bx}}{\rho gh} = u \left[\sqrt{u^2 + v^2} \frac{n_b^2}{h^{4/3}} + \sum_{k_x=1}^{N_x} \frac{4 u_{k_x} n_w^2}{3 h_{k_x}^{1/3} \Delta y} \right] \quad \text{et} \quad \frac{\tau_{by}}{\rho gh} = v \left[\sqrt{u^2 + v^2} \frac{n_b^2}{h^{4/3}} + \sum_{k_y=1}^{N_y} \frac{4 v_{k_y} n_w^{3/2}}{3 h_{k_y}^{1/3} \Delta x} \right], \quad (5)$$

où n_b et n_w représentent respectivement le coefficient de rugosité du fond et des parois, tandis que N_x et N_y désignent le nombre de côtés de la maille de calcul qui sont en contact avec une paroi verticale. Les

expressions (5) ont notamment été appliquées par Dewals *et al.* [7] (section IV.2), Erpicum *et al.* [8] ainsi que Roger *et al.* [9].

La dissipation turbulente au sein du fluide en mouvement est évaluée sur base de l'hypothèse de Boussinesq [10, 11] :

$$\frac{\sigma_x}{\rho} = 2(\nu + \nu_T) \frac{\partial u}{\partial x}, \quad \frac{\sigma_y}{\rho} = 2(\nu + \nu_T) \frac{\partial v}{\partial y}, \quad \frac{\tau_{xy}}{\rho} = \frac{\tau_{yx}}{\rho} = (\nu + \nu_T) \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right), \quad (6)$$

avec ν la viscosité cinématique moléculaire et ν_T la viscosité cinématique turbulente ($\nu \ll \nu_T$). Selon l'application considérée, la viscosité turbulente ν_T est évaluée sur base du modèle de fermeture le plus adéquat parmi plusieurs formulations, soit algébriques (type Fisher ou Smagorinsky), soit impliquant la résolution d'une ou deux équations de transport additionnelles, dont le modèle $k-\varepsilon$ intégré sur la hauteur présenté par Erpicum *et al.* [8] et exploité entre autres par Dewals *et al.* [7] ainsi que Roger *et al.* [9].

Le cas échéant, des coefficients de Boussinesq peuvent être utilisés dans la formulation des flux advectifs \mathbf{f} et \mathbf{g} , afin de tenir compte de l'inégale répartition des vitesses sur l'épaisseur de la lame d'écoulement [9].

II.2 Discrétisation numérique

Le système de modélisation *WOLF* repose sur un schéma numérique volumes finis de type *cell-centred*, appliqué à des maillages cartésiens multiblocs [12]. Ces derniers offrent une grande flexibilité dans la discrétisation de géométries complexes, tout en préservant les avantages inhérents à un maillage régulier, à savoir la typologie simple de celui-ci conduisant à un ordre de précision accru ainsi qu'à des réductions tant en temps de calcul qu'en espace mémoire nécessaire.

Pour la discrétisation spatiale du système d'équations (1), les flux advectifs \mathbf{f} et \mathbf{g} sont évalués au moyen du fractionnement des flux suivant, décrit par Erpicum *et al.* [12] :

$$\mathbf{f}^+ = \begin{pmatrix} hu \\ hu^2 \\ huv \end{pmatrix}, \quad \mathbf{f}^- = \begin{pmatrix} 0 \\ gh^2/2 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{g}^+ = \begin{pmatrix} hv \\ huv \\ hv^2 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{g}^- = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ gh^2/2 \end{pmatrix}, \quad (7)$$

où les exposant « + » et « - » désignent respectivement un décentrement vers l'aval et vers l'amont. Ce schéma est stable quel que soit le régime d'écoulement (fluvial ou torrentiel) ainsi qu'en présence de changements de régime continus ou sous la forme de ressauts. Le sens de décentrement ne dépend que du sens de la vitesse et reste donc indépendant du régime. Les flux turbulents \mathbf{f}_d et \mathbf{g}_d sont quant à eux simplement évalués de manière centrée, ce qui se justifie par leur nature diffusive.

L'adéquation de la discrétisation du terme de pression avec les gradients topographiques est assurée exactement pour un fluide au repos sur topographie quelconque, grâce au respect des conditions de compatibilité numérique définies par Nujic [13].

Au contraire de nombreux schémas de type « solveur de Riemann », ce fractionnement des flux offre l'avantage de permettre une extension particulièrement directe à d'autres modèles, dont ceux de transport solide [1], le modèle de turbulence $k-\varepsilon$ intégré sur la hauteur [8], ou encore un modèle incluant l'effet de la courbure du fond [14]. De nombreuses applications à grande échelle ont été menées avec succès sur base de ce schéma numérique, entre autres en matière de simulation 2D d'écoulements d'inondation [15, 16] et consécutifs à des ruptures de barrages [12, 17].

III TRANSPORT À L'ÉQUILIBRE : MODÉLISATION DU CHARRIAGE

III.1 Modèle mathématique et évaluation des flux sédimentaires

Le modèle de transport solide à l'équilibre est basé sur l'équation de continuité pour les matériaux solides du fond, dite équation d'Exner [18] :

$$(1-p) \frac{\partial z_b}{\partial t} + \frac{\partial q_{bx}}{\partial x} + \frac{\partial q_{by}}{\partial y} = D - E, \quad (8)$$

où z_b représente le niveau du lit, tandis que q_{bx} et q_{by} désignent les débits solides spécifiques selon les directions x et y . Les termes sources D et E sont considérés comme nuls à ce stade, mais ils permettent en toute généralité le couplage entre le transport solide près du fond et celui en suspension (section IV).

Les flux sédimentaires q_{bx} et q_{by} incluent deux contributions, représentant respectivement le débit solide induit par l'écoulement et celui généré par la gravité. La première contribution est évaluée par le biais de lois de capacité de transport empiriques, telles que celles de Meyer-Peter et Müller, Ackers et White [19] ou encore Rickenmann [20] en ce qui concerne des chenaux à forte pente, abstraction faite de tout délai de chargement ou de déchargement. La seconde contribution rend compte de flux solides brusques engendrés par des instabilités de pentes. Mis à part quelques exceptions (ex. [21, 22]), ces flux sont rarement incorporés dans les modèles numériques hydrosédimentaires. Ils le sont ici sur base d'un formalisme géométrique analogue à celui introduit par Fåh [21], faisant intervenir un angle critique d'instabilité γ_{cr} ainsi qu'un angle naturel de talus γ_{nat} . Lorsque la pente locale de la topographie excède γ_{cr} , un flux sédimentaire est généré de sorte que la pente locale diminue jusqu'à atteindre γ_{nat} .

III.2 Modélisation sédimentaire transitoire : niveaux de couplage entre sous-modèles

Comme nous l'avons exposé précédemment [1], deux niveaux de couplage numérique sont envisageables entre le sous-modèle d'écoulement (1)-(3) et le sous-modèle sédimentaire (8).

La première possibilité consiste à assurer un couplage étroit entre les deux sous-modèles par le biais de la résolution d'un système complet incluant les équations (1)-(3) et (8), de sorte que le vecteur des inconnues conservatives s'écrit : $\mathbf{s} = [h \quad hu \quad hv \quad z_b]^T$. Cette approche offre la plus large gamme d'applicabilité, y compris en présence de changements de régime d'écoulement, mais se révèle également la plus exigeante en ressources informatiques et requiert une extension au schéma numérique (7). Celui-ci devient :

$$\mathbf{f}^+ = \begin{pmatrix} hu \\ hu^2 \\ huv \\ q_{bx}/(1-p) \end{pmatrix}, \quad \mathbf{f}^- = \begin{pmatrix} 0 \\ gh^2/2 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{g}^+ = \begin{pmatrix} hv \\ huv \\ hv^2 \\ q_{by}/(1-p) \end{pmatrix}, \quad \mathbf{g}^- = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ gh^2/2 \\ 0 \end{pmatrix}. \quad (9)$$

Un tel modèle couplé fournit comme résultat la chronique complète de l'évolution tant du niveau du fond que des hauteurs d'eau et vitesses d'écoulement. Comme détaillé par Dewals [1], la simulation de chasses hydrauliques constitue une application typique de ce type de modèle, à même de reproduire à la fois l'écoulement accéléré en amont de l'organe de régulation et la décélération, généralement brusque avec ressaut hydraulique, de l'écoulement en aval de l'ouvrage considéré. Hervouet et Villaret [23] ont montré par plusieurs exemples numériques les avantages que procure une telle approche totalement couplée, tant en termes de stabilité que de précision des résultats.

Néanmoins, une seconde approche couramment adoptée pour la résolution numérique du modèle hydrosédimentaire repose sur un traitement séquentiel du sous-modèle d'écoulement (1)-(3) puis de l'équation de continuité pour les sédiments. Dans ce cas, le système hydrodynamique (1)-(3) est résolu jusqu'à obtention d'un état stationnaire à chaque pas de temps de l'équation d'Exner. Ceci revient à supposer une adaptation instantanée de l'écoulement à toute modification de la morphologie du fond. Il s'agit là d'une stratégie de résolution permettant une réduction considérable du temps de calcul et ouvrant dès lors la porte à des simulations à beaucoup plus long terme (ex. alluvionnement de réservoirs [1]), au prix d'une perte de généralité puisqu'elle ne s'applique pas lorsque l'écoulement présente des changements de régime. En effets, la célérité mathématique représentative de la vitesse de propagation des perturbations du niveau du fond devient très mal approximée par une résolution séquentielle des sous-modèles dès lors que le nombre de Froude de l'écoulement se situe dans la plage $0.7 < Fr < 1.3$ [1]. Le résultat d'une telle modélisation découplée inclut certes la chronique complète du niveau du fond mais fournit uniquement une succession d'états stationnaires pour les grandeurs hydrodynamiques.

III.3 Traitement numérique de zones non érodables

Comme le détaillent Malcherek [24] et Malcherek *et al.* [25], il convient d'appliquer un traitement numérique approprié pour représenter des zones non érodables, sur lesquelles des flux sédimentaires peuvent transiter et des dépôts sont susceptibles de se former. La stratégie adoptée ici consiste à résoudre l'équation

de continuité pour les sédiments en limitant les débits solides sortant des mailles concernées, de sorte que la divergence des flux solides ne conduise pas à une érosion en deçà du niveau du fond rigide. Ce processus est bien entendu itératif puisque la limitation du débit de sortie d'une maille revient à réduire l'apport dans la maille voisine. Cette problématique avait déjà été appréhendée par Hervouet *et al.* [26] et implantée dans le cadre d'un modèle éléments finis, tandis que nous avons adapté le traitement au schéma volumes finis décrit ci-dessus.

III.4 Prédiction d'un profil d'équilibre

Outre la simulation dynamique de l'évolution morphologique du fond, la prédiction d'un profil sédimentaire d'équilibre est également possible sur base des équations (1)-(3) et (8). Pour ce faire, l'équation (8) est exploitée sans terme instationnaire et résolue de manière itérative par approximations successives du niveau du fond z_b .

Etant donné l'analogie formelle entre l'équation (8) et l'équation de continuité pour l'écoulement, une relation de proportionnalité lie les débits spécifiques solide q_b et hydrodynamique q en régime stationnaire : $q_b = \alpha q$, le coefficient de proportionnalité α étant déterminé à partir des conditions limites d'apports en sédiments à l'entrée du domaine de simulation. Le nouvel itéré du niveau du fond peut être déduit sur base de cette relation, combinée à une loi empirique de capacité de transport et considérant figés au cours d'une itération la distribution des débits spécifiques hydrodynamiques ainsi que le niveau de surface libre. Entre chacune des ces itérations, les équations hydrodynamiques (1)-(3) sont résolues jusqu'à l'obtention d'un écoulement en régime stationnaire, tout comme dans le cas de la stratégie de résolution séquentielle des modèles d'écoulement et de transport solide.

Les performances de ce type de processus itératif peuvent être analysées en première approximation en adoptant une vision unidimensionnelle de l'écoulement et sur base d'une linéarisation des équations complètes autour de la solution convergée. La condition de stabilité obtenue s'écrit :

$$|\rho| \approx \left| Fr_0^2 / (1 - Fr_0^2) \right| < 1 \Leftrightarrow Fr_0 < \sqrt{2}/2 \approx 0.7 \quad (10)$$

où $Fr_0 = u_0 / (gh_0)^{0.5}$ désigne le nombre de Froude à l'équilibre et l'influence de la variation de la pente de frottement a été négligée en première approximation. En conclusion, ce processus itératif de calcul du profil d'équilibre du fond s'avère convergent pour une large gamme d'écoulements infracritiques. Des essais numériques ont démontré que l'influence du frottement ne modifie pas substantiellement la valeur limite du nombre de Froude maintenant la convergence du calcul.

IV TRANSPORT HORS ÉQUILIBRE : MODÉLISATION DU TRANSPORT EN SUSPENSION

Deux approches sont disponibles au sein du système de modélisation *WOLF* pour reproduire le transport solide en suspension, soit selon une description eulérienne couplée au calcul de l'écoulement, soit selon une vision lagrangienne découplée.

IV.1 Approche eulérienne

La méthode la plus directe pour reproduire le transport solide dans la phase liquide revient à recourir au système (1)-(3) augmenté d'une équation d'advection-diffusion des matériaux en suspension (MES) :

$$\frac{\partial hC}{\partial t} + \frac{\partial huC}{\partial x} + \frac{\partial hvC}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(h\varepsilon_s \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(h\varepsilon_s \frac{\partial C}{\partial y} \right) + E - D, \quad (11)$$

avec C la concentration moyenne sur la hauteur, ε_s la diffusivité turbulente des sédiments (la diffusion moléculaire étant négligée), E et D les taux d'érosion et de déposition par unité de surface horizontale. Ces derniers sont à évaluer au moyen de lois semi-empiriques [27-29].

En présence de transport solide, les équations de bilan (1)-(3) restent valables pour décrire l'écoulement diphasique du mélange eau-sédiments pour autant que la concentration en matériaux en suspension demeure faible, de sorte que la masse volumique et la viscosité du mélange s'apparentent à celles de l'eau, que la vitesse de chute des sédiments dans le mélange ne s'éloigne pas de celle dans l'eau pure et que $1 - C \approx 1$.

La diffusivité ε_s est supposée proportionnelle à la viscosité moléculaire ν_T : $\varepsilon_s = \nu_T / \sigma$, avec σ le nombre de Schmidt, dont la valeur est discutée par Wu [6] (p. 94). Ceci permet de tirer pleinement parti des

fermetures turbulentes disponibles au sein du modèle d'écoulement (section II.1), y compris le modèle $k-\varepsilon$ complet. Il s'agit là d'un élément clé pour l'obtention de prédictions fiables et précises du transport solide hors équilibre, celui-ci s'avérant particulièrement tributaire de la modélisation de la turbulence au sein de l'écoulement car cette dernière conditionne directement la diffusion des sédiments en suspension.

Le couplage avec l'évolution du niveau du lit est assuré par l'intermédiaire des flux d'entraînement E et de sédimentation D , présents à la fois dans les équations (11) et (8). La mise à jour de la morphologie du lit par l'équation (8) assure à son tour la rétroaction du transport solide sur l'écoulement.

IV.2 Approche lagrangienne

La seconde possibilité pour reproduire le mouvement des matériaux solides en suspension dans l'écoulement revient à simuler la trajectoire de ces particules ou groupes de particules sur base directement du bilan des forces qui s'y exercent. Une étude détaillée de ce bilan est exposée notamment par Maxey et Riley [30] et exploitée par Dufresne *et al.* [31]. Ici, nous adoptons une approche plus simple, postulant que les particules solides sont advectées à la vitesse de l'écoulement, perturbée par une fluctuation stochastique, dépendant de l'état local de turbulence, et que selon la direction verticale agit également la vitesse de chute :

$$\mathbf{v}_s = (u + \zeta_x \tilde{u}) \mathbf{e}_x + (v + \zeta_y \tilde{u}) \mathbf{e}_y + (-w_s + \zeta_z \tilde{w}) \mathbf{e}_z, \quad (12)$$

avec \mathbf{v}_s = le vecteur vitesse de la particule solide ; \mathbf{e}_x , \mathbf{e}_y et \mathbf{e}_z = les vecteurs unitaires selon les directions x , y et z ; ζ_x , ζ_y , ζ_z = trois variables aléatoires comprises entre 0 et 1 ; \tilde{u} et \tilde{w} = des valeurs caractéristiques de fluctuations turbulentes de vitesse selon l'horizontale et selon la verticale. Ces dernières peuvent être déduites de k si un modèle de type $k-\varepsilon$ est exploité ou, à défaut, à partir de la *vitesse de friction* $u_* = (\tau_b/\rho)^{0.5}$ qui rend compte du cisaillement de la lame fluide. La composante stochastique prise en compte dans (12) reproduit la diffusion des sédiments au sein de l'écoulement, vu que les trajectoires des particules solides ne s'identifient pas simplement aux lignes de courant stationnaires de l'écoulement moyen.

IV.3 Exemple d'application

Le modèle ci-dessus a été appliqué à la prédiction des dépôts à l'embouchure d'un chenal dans différents réservoirs rectangulaires peu profonds. La géométrie du domaine consiste en un canal d'entrée, un élargissement brusque suivi, au terme d'un tronçon large, d'un rétrécissement brusque et d'un canal de sortie (Figure 1). En dépit de la géométrie simple du domaine, des écoulements particulièrement complexes s'y développent, présentant des recirculations de taille et disposition très variables selon la géométrie du réservoir. En particulier, comme le discutent en détail plusieurs auteurs [7, 32, 33], des écoulements dissymétriques ont été observés malgré la symétrie géométrique et hydraulique du dispositif expérimental. Ce comportement a pu être expliqué au moyen d'une analyse de stabilité présentée par Dewals *et al.* [7] et, bien entendu, influence très significativement les dépôts à l'embouchure du chenal et dans le réservoir.

Les résultats numériques présentés ici visent à localiser les zones de dépôts potentiels à court terme et non prédire l'évolution de la bathymétrie du fond, puisqu'aucune rétroaction n'est assurée avec le modèle d'écoulement. D'un point de vue pratique et opérationnel, cette localisation des zones sujettes à dépôts constitue l'information clé pour orienter des modes de gestion de tels ouvrages et planifier d'éventuelles opérations de curage préalablement à toute agglomération substantielle de sédiments dans le fond.

Comme le montre la Figure 1, l'allure générale des dépôts est reproduite par le modèle numérique, qui démontre sa capacité à distinguer les différents types d'écoulements stables (symétriques ou non symétriques) en fonction de la géométrie du bassin, bien qu'une fermeture turbulente de type algébrique ait été utilisée [7]. La diffusion des matériaux en suspension apparaît sous-estimée dans les résultats numériques et son évaluation pourra être améliorée grâce au recours au modèle $k-\varepsilon$. Des essais hydrosédimentaires impliquant davantage de configurations géométriques sont actuellement en cours à l'Université de Liège sur un dispositif expérimental décrit par Dufresne *et al.* [3]. Ces essais seront complétés par des modélisations numériques correspondantes.

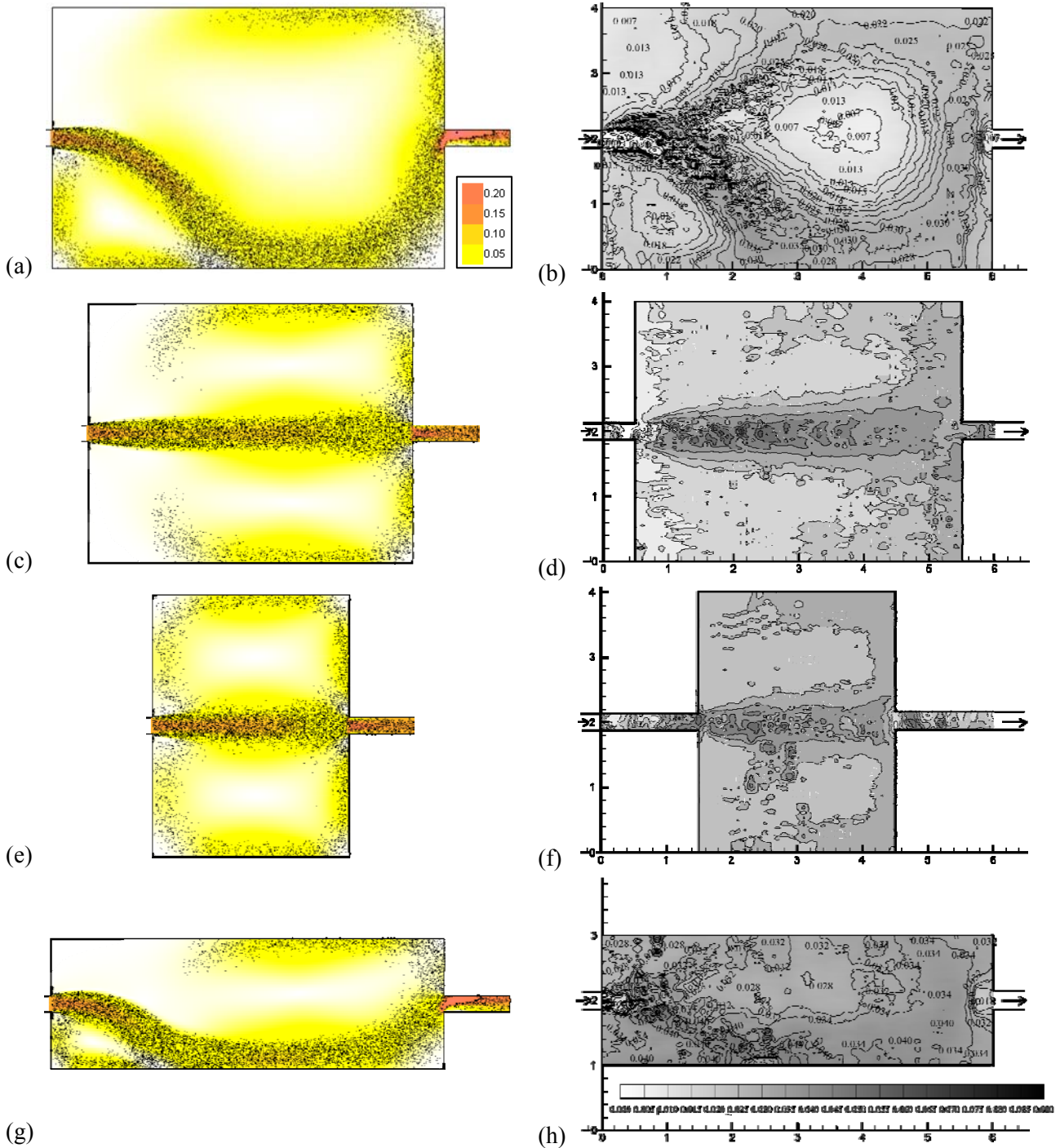


Figure 1. Comparaisons entre localisation des dépôts simulée (a, c, e, g) et observée par Kantoush [33] (b, d, f, h). Sur les résultats de simulation, le dégradé de couleur représente le paramètre de Shields, tandis que sur les résultats expérimentaux, il représente l'épaisseur des dépôts.

V CONCLUSION

Un système de modélisation hydrosédimentaire étendu a été présenté. Il se distingue non seulement par un schéma numérique performant et unifié, mais aussi par sa remarquable généralité, tant en ce qui concerne les échelles temporelles reproduites, que les niveaux de couplage numérique et physique, ainsi que les modes de transport solide pris en compte. En complément à une communication antérieure [1], nous avons exposé ici une procédure numérique originale pour le traitement de zones rigides ainsi que les caractéristiques d'un processus itératif de prédiction de profils d'équilibre. Enfin, la généralisation du système de modélisation à la simulation du transport solide hors équilibre a été décrite, tant selon une approche eulérienne que lagrangienne. L'applicabilité de cette dernière a été démontrée dans le cadre de la détermination des dépôts à l'embouchure d'un chenal, configuration pour laquelle des données expérimentales étaient disponibles.

VI REFERENCES

- [1] Dewals, B.J., S. Erpicum, P. Archambeau, S. Detrembleur & M. Pirotton (2008). *Hétérogénéité des échelles spatio-temporelles d'écoulements hydrosédimentaires et modélisation numérique*. Houille Blanche-Rev. Int. **5**, 109-114.
- [2] Dewals, B.J., N. Brasseur, S. Erpicum, P. Archambeau & M. Pirotton (2009). *Flushing operations with limited sediment availability*, in *Proc. 33rd IAHR Congress: Water Engineering for a Sustainable Environment*: Vancouver, Canada.
- [3] Dufresne, M., M. Pirotton, B.J. Dewals, S. Erpicum & P. Archambeau (2009). *Experimental investigation of flow and deposit patterns in rectangular shallow reservoirs: preliminary analysis*, in *Proc. International Workshop on Environmental Hydraulics - Theoretical, Experimental and Computational Solutions*. Taylor & Francis: Valencia, Spain.
- [4] Chaudhry, M.H. (2008). *Open-Channel Flow*: Springer. 523.
- [5] Hervouet, J.-M. (2003). *Hydrodynamique des écoulements à surface libre - Modélisation numérique avec la méthode des éléments finis*. Paris: Presses de l'école nationale des Ponts et Chaussées. 311.
- [6] Wu, W. (2008). *Computational river dynamics*. London: Taylor & Francis. 494.
- [7] Dewals, B.J., S.A. Kantoush, S. Erpicum, M. Pirotton & A.J. Schleiss (2008). *Experimental and numerical analysis of flow instabilities in rectangular shallow basins*. Environ. Fluid Mech. **8**, 31-54.
- [8] Erpicum, S., T. Meile, B.J. Dewals, M. Pirotton & A.J. Schleiss (2009). *2D numerical flow modeling in a macro-rough channel*. Int. J. Numer. Methods Fluids. Published online: 13 Feb 2009.
- [9] Roger, S., B.J. Dewals, S. Erpicum, D. Schwanenberg, H. Schüttrumpf, J. Köngeter & M. Pirotton (2009). *Experimental und numerical investigations of dike-break induced flows*. J. Hydraul. Res. **47**, 349-359.
- [10] ASCE Task Committee on Turbulence Models in Hydraulic Computations (1988). *Turbulence modeling of surface water flow and transport: Part I*. J. Hydraul. Eng.-ASCE. **114**, 970-991.
- [11] Rodi, W. (1984). *Turbulence models and their application in hydraulics - A state of the art review*. Delft: IAHR. 104.
- [12] Erpicum, S., B.J. Dewals, P. Archambeau & M. Pirotton (2009). *Dam-break flow computation based on an efficient flux-vector splitting*. J. Comput. Appl. Math., accepté.
- [13] Nujic, M. (1995). *Efficient implementation of non-oscillatory schemes for the computation of free-surface flows*. J. Hydraul. Res. **33**, 101-111.
- [14] Dewals, B.J., S. Erpicum, P. Archambeau, S. Detrembleur & M. Pirotton (2006). *Depth-integrated flow modelling taking into account bottom curvature*. J. Hydraul. Res. **44**, 787-795.
- [15] Dewals, B.J., S. Detrembleur, P. Archambeau, S. Erpicum & M. Pirotton (2008). *Detailed 2D hydrodynamic simulations as an onset for evaluating socio-economic impacts of floods considering climate change*, in *Flood Risk Management: Research and Practice*, P. Samuels, et al., Eds. Taylor & Francis: London. 125-135.
- [16] Erpicum, S., P. Archambeau, S. Detrembleur, B. Dewals & M. Pirotton (2007). *A 2D finite volume multiblock flow solver applied to flood extension forecasting*, in *Numerical modelling of hydrodynamics for water resources*, G.-N. Pilar & P. Enrique, Eds. Taylor & Francis: Londres. 321-325.
- [17] Dewals, B.J., S. Erpicum, P. Archambeau, S. Detrembleur & M. Pirotton (2006). *Numerical tools for dam break risk assessment: validation and application to a large complex of dams*, in *Improvements in reservoir construction, operation and maintenance*, H. Henry, Ed. Thomas Telford: London. 272-282.
- [18] Spasojevic, M. & F.M. Holly (2008). *Two- and three-dimensional numerical simulation of mobile-bed hydrodynamics and sedimentation*, in *Sedimentation engineering : processes, measurements, modeling, and practice*, H.G. Marcelo, Ed. American Society of Civil Engineers. 683-761.
- [19] Ackers, P. & W.R. White (1973). *Sediment transport: new approach and analysis*. Journal of the Hydraulics Division. **99**, 2041-2060.
- [20] Rickenmann, D., M. Chiari & K. Friedl (2006). *SETRAC - A sediment routing model for steep torrent channels*, in *River Flow 2006*, Ferreira, et al., Eds. Taylor & Francis: London. 843-852.
- [21] Faeh, R. (2007). *Numerical modeling of breach erosion of river embankments*. Journal of Hydraulic Engineering. **133**, 1000.
- [22] Nagata, N., T. Hosoda & Y. Muramoto (2000). *Numerical analysis of river channel processes with bank erosion*. J. Hydraul. Eng.-ASCE. **126**, 243.
- [23] Hervouet, J.-M. & C. Villaret (2004). *Integrated approaches for modeling sediment transport*, in *Proc. 2nd Int. Conf. on Fluvial Hydraulics: River Flow 2004*, G. Massimo, C. Armando, & R. Della Morte, Eds. Balkema: Leiden, etc. 495-500.
- [24] Malcherek, A. (1997). *Application of bed evolution models over loose and rigid areas*. International Journal of Sediment Research. **12**, 291-299.
- [25] Malcherek, A., F. Piechotta & D. Knoch (2005). *Mathematical module SediMorph - Validation document*. The Federal Waterways Engineering and Research Institute (BAW). 86.
- [26] Hervouet, J., C. Machet & C. Villaret (2003). *Calcul des évolutions sédimentaires : le traitement des fonds rigides*. Revue Européenne des Éléments Finis. **12**, 221-234.
- [27] Armanini, A. & G.D. Silvio (1988). *A one-dimensional model for the transport of a sediment mixture in non-equilibrium conditions*. J. Hydraul. Res. **26**, 275-292.
- [28] Galappatti, G. & C.B. Vreugdenhil (1985). *A depth-integrated model for suspended sediment transport*. J. Hydraul. Res. **23**, 359-375.
- [29] Zhou, J. & B. Lin (1998). *One-Dimensional Mathematical Model for Suspended Sediment by Lateral Integration*. J. Hydraul. Eng.-ASCE. **124**, 712-717.
- [30] Maxey, M.R. & J.J. Riley (1983). *Equation of motion for a small rigid sphere in a nonuniform flow*. Physics of Fluids. **26**, 883.
- [31] Dufresne, M., A. Terfous, A. Ghenaïm, J.B. Poulet & J. Vazquez (2008). *Prévoir l'efficacité des bassins d'orage par modélisation 3D: du bassin expérimental à l'ouvrage réel*. La Houille Blanche. 92-98.
- [32] Dufresne, M. (2008). *La modélisation 3D du transport solide dans les bassins en assainissement : du pilote expérimental à l'ouvrage réel*. Université Louis Pasteur de Strasbourg, Institut National des Sciences Appliquées de Strasbourg (INSA).
- [33] Kantoush, S.A. (2008). *Influence of the geometry of shallow reservoirs on flow pattern and sedimentation process by suspended sediment*. Thèse de doctorat. EPFL. 536.