ETUDE D'UNE RUPTURE DE BARRAGE AVEC UN LIT EROSIF PAR LA METHODE SPH

L. ZIANE*, M.C.KHELLAF* A. AMICARELLI**

*Université des sciences et de la technologie Houari Boumediene - USTHB - Faculté de génie civil, BP 32 El Alia 16111, Bab Ezzouar 16111, Algérie, latifa.ziane@hotmail.fr

**Ricerca sul Sistema Energetico - RSE SpA, Department SFE, via Rubattino, 54, 20134, Milan, Italy

Résumé: Dans cette étude le transport solide est abordé par une approche lagrangienne avec la méthode SPH. Une étude de sensitivité est appliquée à un cas démonstratif d'une rupture de barrage érosive en 2D. Le matériel granulaire saturé (mixture eau-sédiments) est un fluide bi-phasique de Bingham composé d'une phase liquide (eau pure) et d'une phase solide (grains solides). Les simulations numériques ont été réalisées dans le but d'évaluer la sensibilité de la solution numérique aux variations de deux paramètres d'ordre numérique: le nombre de Courant-Friedrichs-Lewy (CFL) et l'espacement "dx" entre les particules SPH. Les résultats des simulations sont évalués par rapport à une simulation de référence. La valeur moyenne des écarts absolus est calculée pour les paramètres étudiés afin de mesurer l'incidence de leur variation sur la hauteur de la surface libre et celle de l'interface "eau pure - mixture".

Mots clefs: SPH, méthode sans maillage, rupture de barrage érosive, transport solide au fond, fluide de Bingham.

1. INTRODUCTION

Les écoulements dus à une rupture d'un barrage s'accompagnent d'une érosion de son fond chargé de sédiments ainsi que l'érosion des dépôts de limons à l'aval. Le milieu est constitué par des sédiments saturés et par un fluide pur, d'ou la nécessité d'approcher le comportement de cette mixture par un modèle de fluide de Bingham.

La méthode SPH ("Smoothed Particle Hydrodynamics")est une méthode lagragienne sans maillage (e.g., Monaghan, 2005). La méthode SPH découpe le fluide en un ensemble d'éléments appelés particules pour lesquels sont résolues les équations de bilan de la mécanique des fluides.

Dans l'espace, une fonction et sa première dérivée sont approximées par la convolution de la fonction considérée pesée par une fonction analytique de lissage (noyau) sur un volume d'influence V_h (le support du noyau) autour du point de calcul (x₀).

L'approximation SPH intégrale ($>_I$) d'une fonction *f* donne:

$$\langle f \rangle_{I,x_0} = \int_{V_h} f W dx^3 \tag{1.1}$$

L'approximation de la dérivée première (selon la direction "_i") de la fonction f est obtenue en remplaçant *f* par sa dérivée dans (1.1) et en appliquant une intégration par parties: $\langle \frac{\partial f}{\partial x_i} \rangle_{I,x_0} = \int_{A_h} f W n_i dx^2 - \int_{V_h} f \frac{\partial W}{\partial x_i} dx^3$ (1.2)

Le terme surfacique de (1.2) est calculé sur la frontière du support du noyau et est nul loin des parois.

Sous forme discrète, et loin des parois, l'approximation SPH particulaire de la première dérivée donne: $\langle \frac{\partial f}{\partial x_i} \rangle_{x_0} = -\sum_b f_b \left(\frac{\partial W}{\partial x} \right)_b \omega_b$ (1.3)

Ou $\omega = m/\rho$ est le volume de la particule SPH. Les indices "o" et "b" désignent la particule computationnelle et les particules voisines respectivement.

Cette simple formulation, toujours soumise à une correction/méthode de consistance et/ou de conservation, est utilisée pour approximer les dérivées dans les équations de bilan de la quantité de mouvement et de la masse.

Les équations de Navier-stocks
$$\frac{d\mathbf{x}}{dt} = \mathbf{V} \qquad (eq.2.4);$$
$$\frac{d\rho}{dt} + \rho \, div \, \mathbf{V} = 0 \qquad (eq.2.5);$$
$$\frac{d\mathbf{V}}{dt} = \mathbf{g} + div \, \boldsymbol{\sigma} \qquad (eq.2.6)$$

Pour l'application de ces équations à un fluide de Bingham détaillée; voir [5]

2. ANALYSE DE SENSITIVITE

Le code SPH SPHERA v.8.0 (RSE SpA) est utilisé (en activant les schémas de Di Monaco et al., 2011, et Amicarelli & Agate,2014) pour effectuer une analyse de sensitivité sur une rupture de barrage en présence d'un lit en aval amovible. La Figure 1 schématise la géométrie initiale du cas étudié (t=0s)-; le canal est composé de frontières solides contenant un réservoir de fluide pure (l'eau, en bleu) et un lit de mixture composée d'eau et de sédiments (rouge). La rupture du barrage se fait par le relèvement de la paroi mobile.

Les simulations ont été réalisées dans le but d'évaluer la sensibilité de la solution numérique aux variations de deux paramètres: le nombre de courant *CFL*, l'espacement entre les particules dx (taille des particules SPH) étroitement liés à la convergence de la solution. La sensitivité des simulations aux paramètres considérés a été évaluée par rapport à une simulation de référence (*CFL*=0.05, dx=0.005m). La figure 1 montre les résultats de cette simulation: le panneau "(a)" montre l'évolution temporelle des fractions volumiques, le panneau "(b)" la forme de la surface libre et celle de l'interface "eau pure - mixture", lors de l'impact.



Figure 1 : Simulation de référence.(a) Evolution temporelle des fractions volumiques des phases (eau 20 bleu; mixture en rouge). (b)Hauteur de la surface libre et de l'interface «eau pure - mixture» (t=0.35s).

2.1. Nombre de Courant-Friedrichs-Lewy (CFL)

Dans les calculs numériques, pas de temps dt est directement proportionnel au CFL(le schéma d'intégration temporel du code de référence et le schéma Leapfrog). Le CFL peut être éventuellement augmenté en fonction du cas test choisi pour réduire le temps de calcul, toute en restant dans les limites imposées par le critère de stabilité de Courant-Friedrichs-Lewy.

Vingt valeurs de *CFL* variant de 0.05 à 1.00 ont été alternativement imposées comme paramètres d'entrée (la valeur du CFL=0.05 est considérée comme référence dans cette étude) .La Figure 2 montre que pour les valeurs minimale et maximale du *CFL* simulées la forme de la surface libre et de l'interface ne semble pas être sensible à cette variation. La Figure 3 montre qu'au voisinage de la valeur *CFL*=0.95, une nette détérioration du champ de pression apparait. Ces anomalies sont dues principalement aux erreurs d'intégration temporelle qui se propagent dans le temps.



Figure 2. Evolution spatiale de la surface libre (panneaux à gauche) et de l'interface «eau pure - mixture» (panneaux à droite) avec *CFL*=0.05 et *CFL*=0.95 (0.35s)



Figure 3. Evolution du champ de pression à t=0.25s pour différentes valeurs du *CFL*:(a) *CFL*=0.10, (b) *CFL*=0.85, (c) *CFL*=0.90 et (d) *CFL*=0.95.

2.2. L'espacement inter-particulaire "dx"

Ce paramètre caractéristique des méthodes particulaires est lié directement à la précision des résultats. Quatre valeurs (dx=0.0025m,0.005m,0.010m,0.020m) ont été testées. La Figure 4 montre l'influence de la résolution spatiale sur la dynamique des interfaces. La valeur dx=0.005m permet une bonne description de la surface libre et de l'interface «eau pure - mixture».



Figure 4. Influence de la résolution spatiale sur la dynamique de l'interface entre le fluide pure (bleu) et le couche de transport solide au fond (rouge).dx=0.0025m(a),0.005m(b), 0.010m (c),0.020m(d) à t=0.35s.

2.3. Valeur moyenne "D" des écarts absolus

La Figure 5 montre que l'erreur D(calculée par rapport à la simulation de référence) relative à la variation du CFL (Fig.5-a) est inférieur à 5% dans la reproduction de la position de la surface libre et de l'ordre de 0.6% pour l'interface «eau pure - mixture». Quant à l'espacement inter-particulaire (Fig.5-b), on constate que l'erreur ne dépasse pas le 5% pour la surface libre et le 15% pour l'interface. Ces résultats montre une performance discrète de la méthode SPH avec des résolutions spatiales grossières (dx=0.02m pour ce cas test) et que la position de l'interface «eau pure - mixture» est faiblement sensible au CFL, même pour des valeurs très élevés de ce paramètre.



Figure 5. Valeur moyenne des écarts absolus observés "D" relatives à la variation du CFL (a)et dx (b) pour la définition des positions de la surface libre et de l'interface « eau pure - mixture».

3. CONCLUSIONS

L'analyse de sensitivité pour le cas d'une rupture de barrage érosivea démontré l'applicabilité de la méthode SPH à la simulation de la couche de transport solide au fond. L'étude a montré que pour l'ensemble des valeurs des CFL simulées les écarts constatés sur les profils de la surface libre et de l'interface «mixture - eau pure» sont minimes par rapport aux valeurs de référence tant que le CFL reste inférieur à 0.90 (avec un schéma d'intégration temporelle Leapfrog), où le champ de pression manifestent des anomalies caractéristiques dues aux erreurs de propagation avec un CFL trop élevé. Pour le paramètre dx, il serait intéressant d'effectuer une simulation multi-échelle avec un espacement inter-particulaire variable, qui serait assez larges sur l'ensemble du domaine et un autre plus réduit de part et d'autre de l'interface «eau pure -mixture», ce qui permet de réduire considérablement le temps de calcul.

References

- [1] Amicarelli A., G. Agate; 2014; SPH modelling of granular flows; 9th SPHERIC ERCOFTAC International ERCOFTAC Workshop, Paris: 17-24
- [2] Di Monaco A., Manenti S., Gallati M., Sibilla S., Agate G., Guandalini R.; 2011; SPH modeling of solid boundaries through a semianalytic approach; Eng. Applicat. of Computational Fluid Mechanics, 5(1):1–15.
- [3] Monaghan J.J.; 2005; Smoothed particle hydrodynamics; Rep. Prog. Phys. 68, 1703–1759.
- [4] SPHERA v.8.0 (RSE SpA), https://github.com/AndreaAmicarelliRSE/SPHERA
- [5] Amicarelli A., B. Stefanova, G. Agate, S. Sibilla, J. Grabe; A 3D 2-phase Smoothed Particle Hydrodynamics model for bed-load transport; to be submitted; Computers & Fluids.

Acknowledgements

The contribution of the RSE author has been financed by the Research Fund for the Italian Electrical System under the Contract Agreement between RSE SpA and the Italian Ministry of Economic Development for the of RdS period 2012-2014 (and analogous following contract), in compliance with the Decree of November 9, 2012.

We acknowledge the CINECA award under the ISCRA initiative, for the availability of High Performance Computing resources and support. In fact, the HPC simulations related to this study refer to the following ISCRA-C HPC research project:HPCEFM15.