

# Quantification de la vulnérabilité d'un pilier exposé aux lahars avec un couplage DEM-CFD

CHEHADE Rime<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Université Clermont Auvergne, CNRS, Clermont Auvergne INP, Institut Pascal, F-63000 Clermont-Ferrand, France

**RESUME** Les lahars génèrent des dégâts humains et matériels importants, en particulier lorsqu'ils sont amenés à traverser des zones urbanisées. Les outils existants pour modéliser ces écoulements restent imprécis dans l'estimation des pressions d'impact surtout si on s'intéresse à la contribution des blocs. Un modèle numérique discret est développé pour évaluer les pressions d'impact des coulées de débris (DF) à l'échelle locale d'une structure. Les particules solides (blocs) sont modélisées explicitement à l'aide de la méthode des éléments distincts (DEM) et les particules fines sont intégrées dans une phase fluide qui génère deux effets sur le mouvement des particules : la force d'Archimède et la force de traînée. Le champ de vitesse du fluide et la surface libre sont calculés à l'aide d'un code CFD (Computational Fluid Dynamics), puis importés dans la simulation DEM selon un schéma de couplage unidirectionnel. L'influence des caractéristiques de l'écoulement (hauteur, vitesse, granulométrie) sur les forces d'impact générées sur l'obstacle sont étudiées. La pression des DF, y compris la taille du bloc, peut finalement être utilisée pour améliorer les dommages d'obstacle et quantifier sa vulnérabilité.

**Mots-clefs** coulées de débris, DEM, CFD, couplage, vulnérabilité

## I. INTRODUCTION

Les phénomènes de coulées de boue, crues éclairs ou lahars sont de plus en plus fréquents sous nos latitudes à cause notamment du dérèglement climatique et exposent les zones urbanisées à un risque important. C'est le cas par exemple de la ville d'Arequipa (Pérou) (

**FIGURE 2**) qui est située à 17 km au sud-ouest du sommet du volcan El Misti (**FIGURE 1**). Par définition, les lahars sont des écoulements gravitaires composés d'un mélange d'eau et de dépôts

volcaniques de tailles variées. Ce sont des phénomènes naturels de haute énergie, ayant un pouvoir destructeur important et difficiles à contrôler. Le terme lahar inclut deux types d'écoulement : les coulées de débris (DF) et les écoulements hyperconcentrés (HCF). Les DF sont un mélange de débris et d'eau avec une concentration en sédiments supérieure à 50 % en volume et une densité apparente comprise entre 1800 et 2300 kg/m<sup>3</sup>. D'autre part, les HCF présentent une concentration en sédiments comprise entre 20 et 50 % en volume et des densités comprises entre 1300 et 1800 kg/m<sup>3</sup>. Les lahars passent des HCF aux DF à une concentration solide supérieure à 50 % en volume (Manville et al., 2013). Afin de mieux prendre en compte les risques liés à ces événements, il est nécessaire premièrement d'être capable d'évaluer l'intensité de ces écoulements sur les structures pour pouvoir par la suite estimer leur vulnérabilité.



**FIGURE 1.** Volcan El Misti



**FIGURE 2.** Lahars à Arequipa

## II. OBJECTIFS

Dans ce travail de recherche, l'approche générale est basée sur trois objectifs :

- Développement d'un modèle numérique simulant les lahars et prenant en compte l'effet des blocs ;
- Modélisation de l'interaction entre écoulement et obstacle (ouvrage) afin de mesurer les pressions d'impact ;
- Quantification de la vulnérabilité de l'ouvrage exposé.

Dans cette étude, on propose un modèle numérique discret (DEM) qui modélise un DF de caractéristiques connues dans un canal de géométrie simple. Une fois les paramètres de ce modèle déterminés, il est utilisé pour mesurer l'impact de DF sur des structures. En présence d'un obstacle, un couplage DEM-fluide est pris en compte pour mesurer la pression d'impact de DF en tenant compte des deux phases solide et fluide. L'influence des paramètres macroscopiques de l'écoulement (hauteur (h), vitesse (v), granulométrie) sur la pression d'impact sont présentés ainsi que leur influence sur la vulnérabilité de la structure considérée.

## III. METHODOLOGIE

Plusieurs méthodes, numériques ou expérimentales, existent pour évaluer l'impact de DF sur des obstacles. Ces méthodes sont basées sur différentes approches allant de : (1) modèles purement granulaires simulant des écoulements granulaires secs utilisant la DEM (Albaba et al., 2019); (2)

modèles fluide-granulaire simulant le mélange fluide-grain en couplant par exemple DEM et méthode Lattice Boltzman (LBM) (Leonardi et al., 2016); (3) modèles purement fluides utilisant par exemple la méthode SPH (Smoothed Particle Hydrodynamics) (Dai et al., 2017). Les approches monophasiques (fluide seul ou granulaire seul) sont généralement efficaces numériquement, contrairement aux approches couplées qui ont des temps de calcul plus élevés.

Le modèle numérique proposé ici est :

- Un modèle à 2 phases granulaire-fluide basé sur la DEM, utilisant des résultats de calcul CFD (Computational Fluid Dynamics) obtenus préalablement,
- Un modèle capable d'estimer l'impact de DFs sur des obstacles et en particulier la contribution de la partie solide (à l'échelle locale de la structure),
- Un modèle permettant d'obtenir des résultats dans des temps de calcul acceptables.

#### *A. Modélisation granulaire-fluide*

La phase solide représente des blocs modélisés par le code *PFC3D* (Particle Flow Code in 3 Dimensions). Elle est modélisée par des particules sphériques réparties dans quatre classes granulométriques, distribuées entre un diamètre minimal  $d_{\min}$  de 0.1 m pour limiter le nombre de petites particules dans la simulation et un diamètre maximal  $d_{\max}$  de 0.4 m. On suppose que  $d_{\min}$  est le seuil entre les particules fines et les blocs afin de réduire le temps de calcul.

La phase fluide est constituée d'un mélange d'eau avec des particules fines dont le champ de vitesse dépend de la géométrie du canal considéré et de la présence ou non d'un obstacle.

L'effet du fluide sur les blocs est considéré en tenant compte de la force d'Archimède et d'une force de traînée  $F_d$ . Toutes les autres interactions sont négligées (Zhao et al., 2014). La force de traînée  $F_d$  représente l'effet du fluide sur une particule résultant de la différence de vitesse entre eux.  $F_d$  est définie comme suit (Pudasaini, 2012):

$$F_d = \frac{1}{2} c_d \rho_f \frac{\pi d^2}{4} \|v_f - v_b\| (v_f - v_b) \quad (1)$$

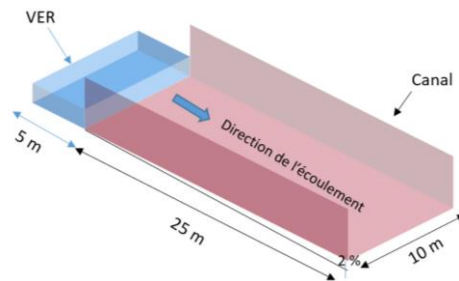
Avec  $\rho_f$  est la densité du fluide ( $\text{kg/m}^3$ ),  $d$  est le diamètre de la particule (m),  $c_d$  est le coefficient de traînée exprimé en fonction du nombre de Reynolds particulaire,  $v_f$  le vecteur vitesse du fluide et  $v_b$  la vitesse de la particule immergée.

Un facteur de correction  $n^{-\zeta+1}$  est proposé pour prendre en compte la fraction solide ( $n$ ) dans l'écoulement, et est appliqué à  $F_d$ , avec  $\zeta$  est un coefficient compris entre 3.4 et 3.7. La force de traînée corrigée  $F_{d\text{corrigé}}$  est finalement prise en compte (Zhao et al., 2014) :

$$F_{d\text{corrigé}} = \frac{1}{2} c_d \rho_f \frac{\pi d^2}{4} \|v_f - v_b\| (v_f - v_b) n^{-\zeta+1} \quad (2)$$

#### *B. Génération de l'écoulement*

Un volume élémentaire représentatif (VER) de la matière constituant l'écoulement est d'abord créé et positionné en amont immédiat du chenal (9537 particules pour une longueur de 5 m). On suppose que tous les éléments de ce VER ont initialement une vitesse identique parallèle à l'axe du chenal. Ensuite, les particules de ce VER sont injectées progressivement dans le canal en fonction de leur position dans le VER et de la vitesse initiale choisie des particules. Les blocs peuvent ensuite se déplacer librement dans le canal et des interactions fluide-blocs sont appliquées (FIGURE 3). Le VER est répété de manière périodique afin d'assurer un approvisionnement constant du chenal.



**FIGURE 3.** Génération de DF par un VER

#### C. Paramètres physiques et mécaniques du modèle

Les caractéristiques d'écoulement que nous avons choisies de simuler sont données au tableau 1 sur la base des mesures évaluées sur le site d'Arequipa (Mead et al., 2017). Cependant, ces paramètres peuvent être facilement réglés à des valeurs différentes dans le modèle.

**TABLEAU 1.** Caractéristiques de l'écoulement de référence

| Fraction solide vol% | Densité (kg/m <sup>3</sup> ) | Débit (m <sup>3</sup> /s) | v (m/s) | h (m) | Nombre de Froude (Fr) |
|----------------------|------------------------------|---------------------------|---------|-------|-----------------------|
| 50-55                | 1800-1900                    | 35-55                     | 3       | 1.5   | 0.78                  |

Les caractéristiques étudiées et la stratégie utilisée sont présentées dans la FIGURE 4. Une étude paramétrique est réalisée pour analyser l'influence de chacun des paramètres testés : la densité des particules, la densité du fluide, la viscosité dynamique, le coefficient de frottement (particule-particule et particule-paroi) et la résistance au roulement. Après avoir réalisé une étude paramétrique basée sur 12 cas de simulation, les paramètres numériques sont calibrés. Finalement, cet ensemble de paramètres permet d'atteindre l'écoulement suivant : une concentration solide de 55%, une densité apparente de 1867 kg/m<sup>3</sup> et un débit de 40 m<sup>3</sup>/s. Sur la base de ces ordres de grandeurs, le cas des DF est pris en compte dans cette étude (par opposition aux HCF).

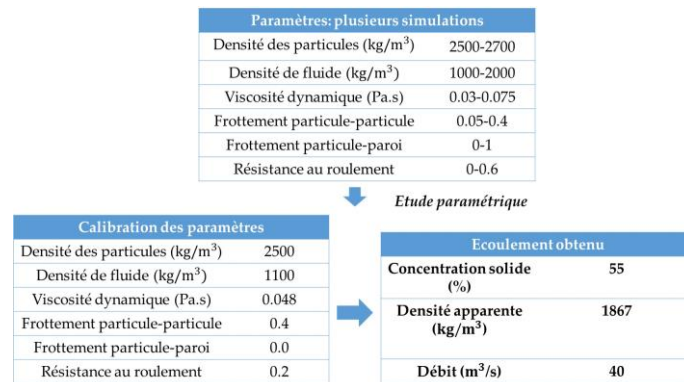


FIGURE 4. Paramètres du modèle

#### IV. Résultats : Mesure de la pression d'impact

##### A. Couplage DEM-fluide

Une fois les paramètres de l'écoulement déterminés, le modèle est utilisé pour mesurer la pression totale du DF sur un pilier. Dans ce cas, le pilier est de forme carrée (1 m × 1 m) et situé à 15 m par rapport à l'entrée du canal (FIGURE 5). Avec un obstacle, le champ de vitesse et la hauteur du fluide ne sont plus constants dans le canal. Il est nécessaire de modéliser la phase fluide. Le code *Telemac3D* (Eléments finis pour les écoulements à surface libre) est utilisé pour effectuer un calcul fluide préalable permettant d'obtenir le champ de vitesses et la surface libre du fluide. Le calcul CFD est effectué une seule fois avant le calcul DEM. Ensuite, ces résultats sont considérés figés pour le fluide puis importés dans *PFC3D* pour calculer les forces de traînée et d'Archimède pour toute particule présente dans le chenal et obtenir ainsi les interactions blocs-fluide en continu.

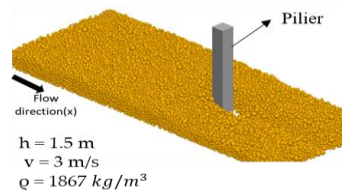


FIGURE 5. Simulation de DF dans un canal avec obstacle

##### B. Mesure de la pression d'impact de DF

Plusieurs simulations avec différentes valeurs de  $h$ ,  $v$  et  $d_{\max}$  sont réalisées. Un cas de référence est défini pour  $h = 1.5$  m,  $v = 3$  m/s et un  $d_{\max} = 0.4$  m. Le tableau 2 présente les paramètres correspondant à chaque cas. Pour ce cas, on a calculé la pression maximale totale  $P_{\max}$  (bloc + fluide) exercée sur le pilier. Un modèle hydro-dynamique de Hübl et al. (2009) est utilisé pour valider le résultat de cas de référence.

$$P_{\max} = 5\rho v^{0.8} (gh_2)^{0.6} \quad (3)$$

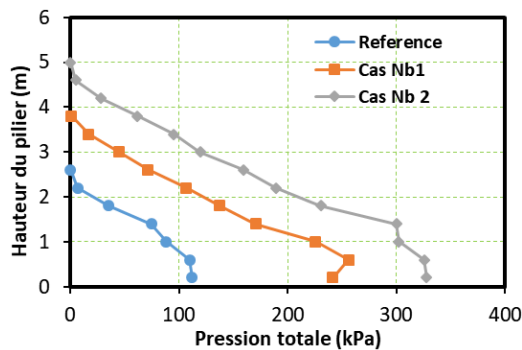
avec  $\rho$  la densité apparente du DF,  $v$  sa vitesse et  $h_2$  la hauteur maximale du DFs au pied de l'obstacle.

Avec le modèle numérique  $P_{\max}$  (PFC) est égale à 112 kPa (FIGURE 6) et avec le modèle de Hübl  $P_{\max}$  est égal à 150 kPa avec  $h_2 = 2.4$  m et  $v = 3$  m/s. Cette valeur de pression maximale coïncide avec le modèle numérique :  $P_{\max}$  (PFC) ne dépasse pas  $P_{\max}$  du modèle de Hübl pour un écoulement ayant ces caractéristiques.

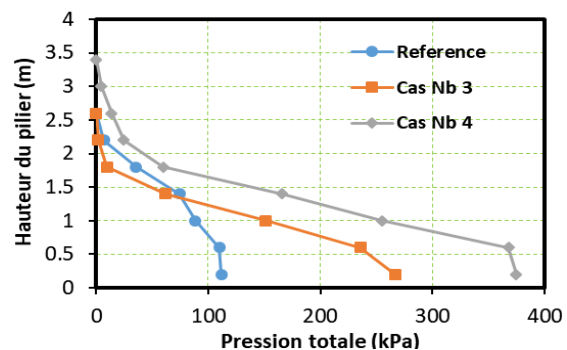
**TABLEAU 2. Simulations montrant l'influence de  $h$ ,  $v$  et  $d_{\max}$  sur la pression  $P$**

| Cas            | Référence | Nb 1 | Nb 2 | Nb 3 | Nb 4 | Nb 5 | Nb 6 | Nb 7 | Nb 8 |
|----------------|-----------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| $h$ (m)        | 1.5       | 3    | 4    | 1.5  | 1.5  | 1.5  | 1.5  | 1.5  | 1.5  |
| $v$ (m/s)      | 3         | 3    | 3    | 4.5  | 6    | 3    | 3    | 3    | 3    |
| $d_{\max}$ (m) | 0.4       | 0.4  | 0.4  | 0.4  | 0.4  | 0.7  | 1    | 1.5  | 2    |
| Fr             | 0.78      | 0.55 | 0.49 | 1.18 | 1.56 | 0.78 | 0.78 | 0.78 | 0.78 |

La FIGURE 6 montre l'influence de la hauteur d'écoulement qui varie entre 1.5 et 4 m sur  $P$ . Chaque courbe obtenue représente la pression  $P$  moyenne (calculée entre 9 et 12 s) de 4 calculs du même écoulement mais en utilisant des générations aléatoires différentes des particules solides dans le VER.  $P$  augmente avec la hauteur d'écoulement : avec une hauteur plus importante, la surface de contact avec le pilier est plus grande et par conséquent la pression d'impact augmente. De plus, la variation de hauteur de l'écoulement entraîne une variation du nombre de Froude (Fr) entre 0.49 et 0.78. On remarque que la pression augmente lorsque Fr diminue et ce qui est conforme avec les modèles de (Hübl et al., 2009) et celui de (Wang et al., 2018). Ce graphique indique aussi la hauteur maximale au pied de l'obstacle pour chaque cas. La FIGURE 7 montre également que la vitesse d'écoulement influence la pression d'impact sur les différentes parties de l'obstacle : plus la vitesse du fluide est élevée, plus la turbulence est importante autour du pilier ce qui influence le mouvement des particules et a pour conséquence une augmentation de  $P$ .



**FIGURE 6. Influence de  $h$  sur  $P$**

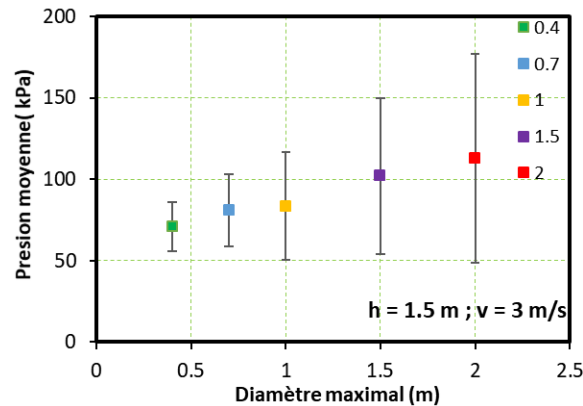


**FIGURE 7. Influence de  $v$  sur  $P$**

### C. Influence de $d_{\max}$ sur la pression et vulnérabilité

Afin d'étudier l'influence du diamètre maximal des particules solides, la courbe granulométrique a été dilatée en gardant le même  $d_{\min}$  et en faisant varier  $d_{\max}$ . L'écoulement sans obstacle conserve

les mêmes caractéristiques de densité et de concentration solide. La [FIGURE 8](#) montre l'évolution de la pression moyenne des particules sur le pilier en fonction de  $d_{\max}$ , pour les cas Nb 5 jusqu'à Nb 8. L'écart-type de chaque pression est calculée entre 9 et 12 s. On constate que la pression d'impact augmente avec le  $d_{\max}$  des particules. En effet, les différentes répartitions granulométriques influencent plusieurs paramètres des particules comme : la taille, le volume, la masse... Par conséquent, la position et la vitesse sont changées et également leur pression d'impact exercée sur le pilier.



**FIGURE 8. Pression moyenne de DF en fonction de diamètre maximal**

La vulnérabilité de la structure dépend de l'intensité de l'écoulement liée aux paramètres  $h$ ,  $v$  et  $P$ . De nombreuses fonctions de vulnérabilités existent dans la littérature. On a choisi le modèle de (Kang and Kim, 2016) qui calcule la vulnérabilité en fonction de la pression d'impact (Eq. 4). La pression  $P$  est choisie comme intensité car elle intègre indirectement les intensités  $h$ ,  $v$  et  $d_{\max}$ .

$$V = 1 - e^{-0.0005P^{1.69}} \quad (4)$$

Si on compare le cas de référence et les cas présentant différents  $d_{\max}$  (entre 0.4 et 2 m) et en utilisant les pressions moyennes calculées pour chaque cas ([FIGURE 8](#)): on obtient une vulnérabilité qui varie entre 0.48 et 0.77 pour des écoulements qui présentent pourtant les mêmes caractéristiques macroscopiques. Cette variation montre l'importance de la taille des blocs présents dans l'écoulement. Dans l'exemple présenté, l'état de dommage du pilier peut varier d'un état modéré jusqu'à une destruction complète. Dans la littérature, on ne trouve pas de modèle empirique capable d'évaluer l'effet de la taille de la particule sur les pressions. Dans les prochains travaux, on propose d'améliorer et d'adapter la fonction de vulnérabilité existante pour mieux quantifier l'intensité en tenant compte du diamètre maximal des blocs.

## V. Conclusions

Un modèle numérique de DF a été proposé. Ce modèle est capable de :

1. Considérer deux phases d'écoulement : les blocs modélisés par DEM et la phase fluide modélisée pour estimer le champ de vitesse et la hauteur du fluide ;



2. Reproduire un écoulement avec des paramètres d'entrées spécifiques : hauteur, vitesse, densité, fraction solide de l'écoulement ;
3. Evaluer la pression d'impact totale (celle liée aux blocs et celle du fluide) d'un DF et obtenir la répartition des forces d'impact sur la structure.

Plusieurs paramètres d'écoulement ( $h$ ,  $v$ , granulométrie) et de la structure (forme, orientation...) peuvent être étudiés pour montrer leur influence sur la pression d'impact de l'écoulement et donc la vulnérabilité de la structure.

## Remerciement

Ce travail de recherche est financé par la Région Auvergne Rhône Alpes, dans le cadre du Pack Ambition Recherche 2018 « projet Quorum ».

## REFERENCES

- Albaba, A., Schwarz, M., Wendeler, C., Loup, B., Dorren, L., 2019. Numerical modeling using an elastoplastic-adhesive discrete element code for simulating hillslope debris flows and calibration against field experiments. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 19, 2339–2358. <https://doi.org/10.5194/nhess-19-2339-2019>
- Dai, Z., Huang, Y., Cheng, H., Xu, Q., 2017. SPH model for fluid–structure interaction and its application to debris flow impact estimation. *Landslides* 14, 917–928.
- Hübl, J., Suda, J., Proske, D., Kaitna, R., Scheidl, C., 2009. Debris flow impact estimation. *Elev. Int. Symp. water Manag. Hydraul. Eng.* 137–148.
- Kang, H. sub, Kim, Y. tae, 2016. The physical vulnerability of different types of building structure to debris flow events. *Nat. Hazards* 80, 1475–1493. <https://doi.org/10.1007/s11069-015-2032-z>
- Leonardi, A., Wittel, F.K., Mendoza, M., Vetter, R., Herrmann, H.J., 2016. Particle-Fluid-Structure Interaction for Debris Flow Impact on Flexible Barriers. *Comput. Civ. Infrastruct. Eng.* 31, 323–333. <https://doi.org/10.1111/mice.12165>
- Manville, V., Major, J., & Fagents, S. 2013. Modeling lahar behavior and hazards. In S. Fagents, T. Gregg, & R. Lopes (Eds.), *Modeling Volcanic Processes: The Physics and Mathematics of Volcanism* (pp. 300-330). Cambridge: Cambridge University Press.
- Mead, S.R., Magill, C., Lemiale, V., Thouret, J.C., Prakash, M., 2017. Examining the impact of lahars on buildings using numerical modelling. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 17, 703–719.
- Pudasaini, S.P., 2012. A general two-phase debris flow model A general two-phase debris flow model. <https://doi.org/10.1029/2011JF002186>
- Wang, D., Chen, Z., He, S., Liu, Y., Tang, H., 2018. Measuring and estimating the impact pressure of debris flows on bridge piers based on large-scale laboratory experiments. *Landslides* 15, 1331–1345. <https://doi.org/10.1007/s10346-018-0944-x>
- Zhao, T., Houlsby, G.T., Utili, S., 2014. Investigation of granular batch sedimentation via DEM–CFD coupling. *Granul. Matter* 16, 921–932. <https://doi.org/10.1007/s10035-014-0534-0>