

# Cinétique de croissance d'une cheminée fluidisée par modélisation DEM-LBM

P. PHILIPPE<sup>a</sup>, J. NGOMA<sup>b</sup>, J.-Y. DELENNE<sup>c</sup>, S. BONELLI<sup>a</sup>

a. Unité OHAX, IRSTEA, Aix en Provence

[pierre.philippe@irstea.fr](mailto:pierre.philippe@irstea.fr) ; [stephane.bonelli@irstea.fr](mailto:stephane.bonelli@irstea.fr)

b. UMR IATE, INRA/CIRAD/Supagro/Université de Montpellier 2, Montpellier

[delenne@supagro.inra.fr](mailto:delenne@supagro.inra.fr)

c. Institut Jean Lamour, CNRS-Université de Lorraine, Nancy

[jeff.ngoma@univ-lorraine.fr](mailto:jeff.ngoma@univ-lorraine.fr)

## Résumé :

*Au-delà d'un certain seuil, un écoulement fluide ascendant à débit constant, injecté à travers une section de petite dimension, parvient à générer une fluidisation sur toute la hauteur d'une couche de grain, le long d'une cheminée fluidisée. La fluidisation est amorcée à proximité directe de l'injection puis la zone fluidisée croît progressivement vers le haut jusqu'à la surface supérieure de l'empilement granulaire. Nous présentons ici des résultats numériques pour cette cinétique de croissance de cheminée fluidisée dans un lit granulaire immergé en s'appuyant sur une simulation bidimensionnelle couplant la Méthode aux Eléments Discrets et la Méthode Lattice Boltzmann (DEM-LBM). Une étude paramétrique a été menée et une analyse dimensionnelle nous a permis de proposer des lois d'échelle pour le seuil de fluidisation et pour la taux de croissance de la zone fluidisée.*

## Abstract:

*Beyond a given threshold, an upward fluid flow at constant flowrate, injected through a small size section, is able to generate a fluidization along a vertical chimney over the entire height of a granular assembly. Fluidization is first initiated in the immediate vicinity of the injection hole and then the fluidized zone grows gradually until reaching the upper surface of the granular packing. In this work, we present numerical results on the kinetics of chimney fluidization in an immersed granular bed based on a two-dimensional simulation coupling the Discrete Element and Lattice Boltzmann Methods (DEM-LBM). A parametric study is carried out and a dimensional analysis allows proposing scaling laws for both threshold and growth rate of the fluidized zone.*

**Mots clefs : Fluidisation, couplage fluide-grains, matériaux granulaires, DEM, LBM.**

## 1 Introduction

La fluidisation de particules est largement utilisée dans l'industrie pour des procédés comme le séchage, le mélange et l'agglomération et présente des applications allant par exemple de la gazéification de la biomasse aux processus d'échange d'ions en passant par le stockage du gaz carbonique. Malgré cette grande diversité de domaines d'application et la très vaste littérature associée, il n'y a pas beaucoup d'informations sur les étapes initiales de la fluidisation, notamment lorsque celle-ci est induite par une injection fluide localisée. Cette configuration spécifique est rencontrée par exemple dans les lits fluidisés à jaillissement [1] ou dans certaines structures géologiques naturelles ayant été générées par un écoulement fluide ascendant [2]. C'est aussi une situation que l'on retrouve parfois au pied d'un ouvrage hydraulique de type digue et qui peut initier une érosion interne par le processus plus spécifique d'érosion régressive [3]. Récemment, des expériences et des développements théoriques [4, 5] ont permis de mieux comprendre cette fluidisation de cheminée et notamment la relation entre le seuil de fluidisation et la hauteur initiale de l'empilement. En particulier, une loi d'échelle a été proposée pour ce seuil puis étendue à des mesures obtenues pour le taux d'expansion verticale de la cavité fluidisée [5].

Dans ce travail, nous avons développé une modélisation numérique bidimensionnelle capable de simuler de façon réaliste le comportement d'un empilement de grains soumis à un écoulement fluide. Pour rendre compte du couplage entre le fluide et les particules solides, le modèle numérique utilise simultanément la Méthode aux Eléments Discrets (DEM) pour reproduire le comportement mécanique d'une assemblée de grains et la Méthode Lattice Boltzmann pour résoudre l'écoulement fluide inter-granulaire. Une étude récente de la fluidisation localisée basée sur la même approche numérique a déjà démontré la validité de ce type de modèle [6]. Celle-ci est confirmée ici, notamment par confrontation plus systématique à plusieurs cas classiques d'écoulement fluide et de couplages simples entre fluide et grains [7]. Cet exposé se concentrera spécifiquement sur une étude de la cinétique de croissance de la zone fluidisée durant laquelle on a fait varier de façon systématique les principaux paramètres du problème.

## 2 Etude paramétrique et analyse dimensionnelle

La fluidisation d'un empilement de grains est obtenue lorsque la force de traînée générée par l'écoulement fluide atteint puis dépasse les forces inter-granulaires qui, dans le cas présent de grains non cohésifs, correspondent à des interactions frictionnelles et sont donc directement reliées au poids de la couche de granulaire supérieure. Les paramètres physiques du problème se réduisent ainsi au diamètre des grains  $d$ , à la viscosité cinématique du fluide  $\nu_f$ , à la masse volumique des grains  $\rho_g$  et du fluide  $\rho_f$  et enfin à la gravité  $g$ . Le paramètre de contrôle hydrodynamique correspond lui à la vitesse caractéristique du fluide  $U$  dans la zone d'injection tandis que les paramètres géométriques de la configuration étudiée sont la hauteur initiale  $H_0$  de l'empilement et la largeur  $D$  de la zone d'injection (figure 1a). Onze jeux de paramètres différents ont été utilisés afin de faire varier de façon significative les grandeurs physiques suivantes :  $\nu_f$ ,  $\rho_g$ ,  $g$  et  $d$ . Deux valeurs de la hauteur initiale  $H_0$  ont été utilisées tandis que la largeur  $D$  a été maintenue constante dans cette étude.

Une analyse de la phase transitoire de croissance de la zone fluidisée permet de déterminer, après construction d'un diagramme spatio-temporel (figure 1b), le temps  $T_0$  au bout duquel la hauteur de la zone fluidisée atteint la hauteur initiale  $H_0$ . On en déduit un taux de croissance moyen  $V_0 = H_0/T_0$ . La relation entre  $T_0$  et la vitesse d'injection  $U$  est compatible avec une loi de puissance présentant une divergence en  $U = U_c$ , ce qui permet de définir quantitativement le seuil de fluidisation  $U_c$ . Celui-ci varie sur plusieurs ordres de grandeur selon les jeux de paramètres considérés.

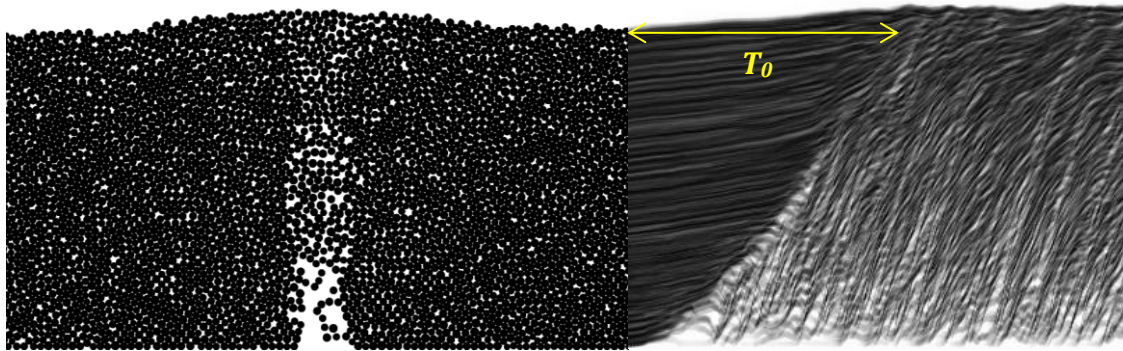


Figure 1: (a) Configuration étudiée avec cheminée de fluidisation obtenue après un régime transitoire. (b) Diagramme spatio-temporel de la zone au-dessus de l'injection pendant le régime transitoire et permettant de définir le temps  $T_0$ .

En tenant compte de la poussée d'Archimède, les paramètres physiques du problème se réduisent à la gravité réduite  $g^*=g(\rho_g/\rho_f-1)$  ainsi qu'à la viscosité cinématique  $\nu_f$ , la vitesse d'injection  $U$  et le diamètre des grains  $d$ . D'un point de vue dimensionnel, les nombres sans dimension qui peuvent être construits sont donc le nombre de Reynolds  $Re=Ud/\nu_f$  et le nombre d'Archimède  $Ar=g^*d^3/\nu_f^2$ . Comme suggéré par cette analyse, en traçant le nombre de Reynolds critique  $Re_c$  en fonction du nombre d'Archimède  $Ar$ , il est effectivement possible de regrouper tous les points sur une même courbe (figure 2). On remarque par ailleurs que la relation obtenue est compatible avec une simple loi de puissance de la forme :  $Re_c \propto Ar^{3/4}$ . La dépendance avec les paramètres géométriques  $H_0$  et  $D$  est ainsi contenue entièrement dans la valeur du coefficient de proportionnalité.

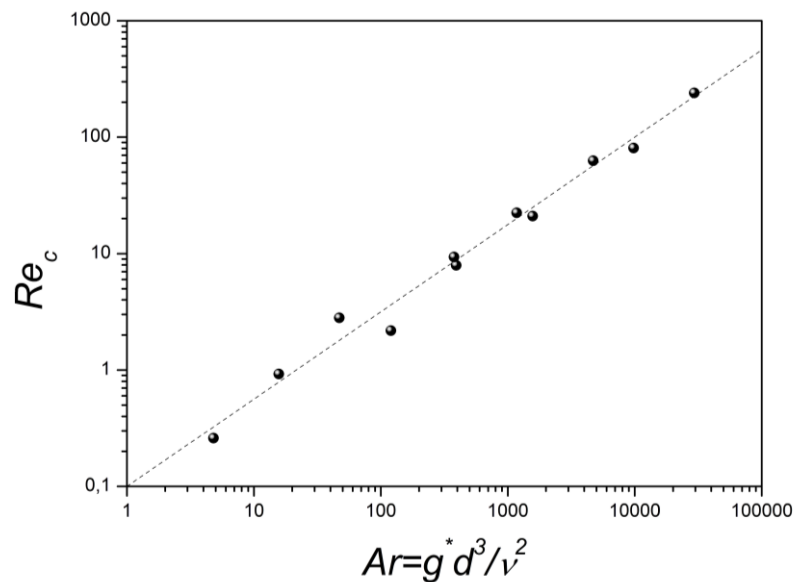


Figure 2: Loi d'échelle obtenue entre le nombre de Reynolds critique  $Re_c=U_c d/\nu_f$  et le nombre d'Archimède  $Ar=(\rho_g/\rho_f-1)gd^3/\nu_f^2$ . La droite en pointillé correspond à la loi de puissance  $Re_c=0,1Ar^{3/4}$ .

L'utilisation des nombres sans dimension peut être menée plus avant afin d'analyser non seulement le seuil de l'instabilité de fluidisation localisée mais aussi sa cinétique de croissance. On utilise pour cela trois nombres de Reynolds différents,  $Re$ ,  $Re_c$  et  $Re_0$ , construits respectivement à partir de la vitesse d'injection du fluide  $U$ , de la valeur seuil de cette vitesse  $U_c$  et du taux de croissance moyen  $V_0$ . Tracer le rapport  $Re_0/Re_c$  en fonction du rapport  $Re/Re_c$  permet là encore de regrouper

l'ensemble des données (figure 3) et la loi d'échelle ainsi obtenue est très bien approchée par une loi de puissance de la forme :  $Re_0/Re_c \propto (Re/Re_c - 1)^{3/5}$ .

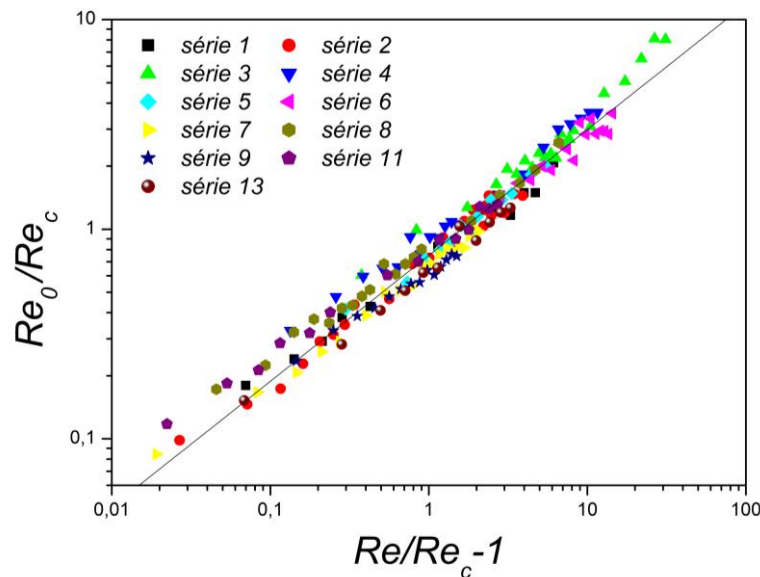


Figure 3: Loi d'échelle obtenue pour  $Re_0/Re_c$  en fonction de  $Re/Re_c$ . La droite en trait plein correspond à la loi de puissance  $Re_0/Re_c = 0.75(Re/Re_c - 1)^{3/5}$ .

### 3 Conclusion

Une modélisation numérique 2D couplant les méthodes DEM et LBM nous a permis de mener une étude paramétrique de la cinétique de croissance d'une instabilité de type cheminée de fluidisation. Par analyse dimensionnelle, il est possible de regrouper l'ensemble des données, relatives aussi bien au seuil de mise en fluidisation qu'à la cinétique d'expansion observée au-dessus de ce seuil. Des expressions empiriques simples ont pu être proposées pour les deux lois d'échelle ainsi obtenues.

### Références

- [1] K. Mathur and N. Epstein, Spouted Beds, Academic Press, New-York, NY, USA (1974)
- [2] R.J. Nichols, R.S.J Sparks, C.J.N Wilson, Experimental studies of the fluidization of layered sediments and the formation of fluid escape structures. Sedimentology 41(2), 233-253 (1994)
- [3] S. Bonelli, Erosion in Geomechanics Applied to Dams and Levees, ISBN 978-1-84821-409-5, Wiley-ISTE, March 2013
- [4] F. Zoueshtiagh, A. Merlen, Effect of a vertically flowing water jet underneath a granular bed, Phys. Rev. E 75(5), 053613 (2007)
- [5] P. Philippe and M. Badiane, Localized fluidization in a granular medium, Phys. Rev. E 87, 042206 (2013)
- [6] X. Cui, H. Li, A. Chan, D. Chapman, A 2D DEM-LBM study on soil behaviour due to locally injected fluid, Particuology 10, 242-252 (2012)
- [7] J. Ngoma, Etude numérique et expérimentale de la déstabilisation des milieux granulaires immergés par fluidisation, PhD thesis, Aix-Marseille University (2015)