



**HAL**  
open science

## Simulation 3D instationnaire d'un jet tombant de particules avec un modèle hybride granulaire-cinétique

Zafer Zeren, Renaud Ansart, Hervé Neau, Olivier Simonin, Emmanuel Belut

### ► To cite this version:

Zafer Zeren, Renaud Ansart, Hervé Neau, Olivier Simonin, Emmanuel Belut. Simulation 3D instationnaire d'un jet tombant de particules avec un modèle hybride granulaire-cinétique. 6emes Journées Francophones sur les Réacteurs Gaz-Liquide et Gaz-Liquide-Solide - GLS6, May 2012, Marrakech, Morocco. pp.0. hal-04104481

**HAL Id: hal-04104481**

**<https://hal.science/hal-04104481>**

Submitted on 24 May 2023

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



## Open Archive TOULOUSE Archive Ouverte (OATAO)

OATAO is an open access repository that collects the work of Toulouse researchers and makes it freely available over the web where possible.

This is an author-deposited version published in : <http://oatao.univ-toulouse.fr/>  
Eprints ID : 6834

**To cite this document** : Zeren, Zafer and Ansart, Renaud and Neau, Hervé and Simonin, Olivier and Belut, Emmanuel *Simulation 3D instationnaire d'un jet tombant de particules avec un modèle hybride granulaire-cinétique*. (2012) In: 6emes Journées Francophones sur les Réacteurs Gaz-Liquide et Gaz-Liquide-Solide - GLS6, 8-11 mai 2012, Marrakech, Morocco

Any correspondance concerning this service should be sent to the repository administrator: [staff-oatao@inp-toulouse.fr](mailto:staff-oatao@inp-toulouse.fr)

# Simulation 3D instationnaire d'un jet tombant de particules avec un modèle hybride granulaire-cinétique

ZEREN Zafer<sup>a,c\*</sup>, ANSART Renaud<sup>b,c</sup>, NEAU Hervé<sup>a,c</sup>, SIMONIN Olivier<sup>a,c</sup> et BELUT Emmanuel<sup>d</sup>

<sup>a</sup> Université de Toulouse ; INPT, UPS ; IMFT

2 Allée du Professeur Camille Soula, F-31400 Toulouse, France

<sup>b</sup> Université de Toulouse ; INPT, UPS ; LGC ;

4 Allée Émile Monso BP 84234 31432 Toulouse Cedex 4, France

<sup>c</sup> CNRS ; Fédération de recherche FERMaT ; F-31400 Toulouse, France

<sup>d</sup> Département IP INRS – Centre de Lorraine

Rue du Morvan CS 60027 54419 Vandoeuvre cedex - France

\* Auteur/s à qui la correspondance devrait être adressée : zafer.zeren@imft.fr, olivier.simonin@imft.fr

## Résumé

L'écoulement 3D d'un jet tombant de particules fines sortant librement d'un silo est simulé en utilisant l'approche à deux fluides, dite Euler-Euler, et les résultats sont comparés à des données expérimentales. Les simulations montrent que la prise en compte de la viscosité frictionnelle entre les particules et du frottement entre les particules et la paroi a une grande influence sur le débit des particules en sortie du silo et permet de retrouver les valeurs expérimentales. Cependant, la vitesse moyenne verticale des particules en air libre est mal prédite. Les particules tombent en masse, pratiquement sans interaction avec l'air environnant. En revanche, si les événements disposés sur la partie haute du silo sont fermés, les simulations montrent un ralentissement marqué de la vitesse du jet de particules proche des données expérimentales. Cet effet est lié à la remontée de bulles d'air dans le silo dues à la conservation de volume du mélange qui entraîne une dispersion radiale des particules.

Mots-clés : Modèle de la viscosité frictionnelle, écoulement granulaire quasi-statique

## 1. Introduction

Quand des matériaux pulvérulents sont manipulés ou emballés, il est presque inévitable qu'une partie soit dispersée dans l'atmosphère environnante, ce qui conduit à des dépôts sur les surfaces et à la mise en suspension dans l'air de particules. Dans ce papier, une étude numérique est menée sur le déversement de poudre d'un silo qui est la phase générant le plus d'émission de poussières lors de la manipulation de poudre. Les mesures par la Vélocimétrie par Images de Particules (PIV), effectuées par Ansart (2009) à l'Ecole des Mines d'Albi (EMAC), ont permis de caractériser le panache de particules formé en sortie du silo. Une dispersion latérale de poussière a été observée, elle est associée à l'entraînement d'air dans le panache qui provoque ainsi son expansion. Des simulations numériques 2D en Euler-Euler, avec le débit de particules imposé en sortie de silo, réalisées par Belt et Simonin (2009) ont mis en évidence la déstabilisation à grande échelle du jet de particules qui conduit à l'entraînement de l'air et finalement au ralentissement de la chute de particules. Suite à cette étude, des simulations ont été réalisées en 3D, toujours avec le débit imposé. Ces simulations n'ont pas permis de retrouver le comportement observé en 2D malgré des tests de sensibilité au maillage et aux conditions d'alimentation en particules.

Dans ce papier, le jet tombant est cette fois généré directement par le déversement des particules du silo, les simulations intégrant la modélisation de l'écoulement granulaire amont. L'objectif d'une telle

configuration est de permettre la formation d'instabilités dans l'écoulement granulaire amont qui déclencheraient la dispersion latérale des poussières après la sortie du silo. Ces simulations ont été rendues possibles par la mise en œuvre d'un modèle de viscosité frictionnelle pour la phase solide en régime quasi-statique dans le code NEPTUNE\_CFD.

## 2. Modèle mathématique

Les simulations sont réalisées avec le code NEPTUNE\_CFD qui est un code du type Euler-Euler. La turbulence du gaz est traitée par le modèle 'k-ε' et l'agitation de la phase particulaire est traitée par un modèle basé sur la théorie cinétique des milieux granulaires en écoulement rapide (' $q_p^2$ - $q_{fp}$ '). Pour le transfert de quantité de mouvement entre les phases, la loi de traînée de Wen & Yu limitée par Ergun pour les écoulements denses est utilisée (Gobin et al, 2003). Ce modèle est théoriquement inadapté aux écoulements denses à faible vitesse comme observés dans le silo pour lequel les contacts entre particules sont de longue durée. Dans ces régimes d'écoulement, les transferts de quantité de mouvement entre particules sont alors dominés par l'action des forces de contact, en particulier, les effets de friction. Ces mécanismes peuvent être pris en compte via le tenseur de contraintes de la phase particulaire à l'aide de modélisation semi-empirique Johnson et Jackson (1985). Ces modèles sont utilisés, en particulier, dans le contexte de la mécanique des sols pour modéliser les avalanches, le glissement de terrain, etc. Le modèle mis en œuvre dans le code NEPTUNE\_CFD pour les résultats présentés dans ce papier est l'approche de Srivastava et Sundaresan (2003).

## 3. Simulations

Les simulations effectuées sont présentées dans tableau 1.

Table 1. Les cas de simulation ('Sim1' est le cas de référence)

Simulations	Interaction particules-paroi	Modèle frictionnel des particules	Condition d'entrée du gaz (cheminées)
Sim1	Glissement	Pression	Pression imposée
Sim2	Adhérence	Pression	Pression imposée
Sim3	Adhérence	Pression+viscosité	Pression imposée
Sim4	Glissement	Pression	Paroi étanche

### 3.1 Configuration numérique et maillage

Une coupe du domaine de calcul utilisé dans les simulations numériques ainsi que le maillage sont présentés sur la figure 1. Les cheminées en haut du domaine, le silo et le bas du domaine sont représentatifs du dispositif expérimental. Le maillage contient des éléments fins près de l'axe central où la dynamique de l'écoulement est complexe. Lorsque l'on se rapproche des parois, des raccordements non conformes sont utilisés pour limiter le nombre de mailles (460 000 éléments) et leur facteur de forme (qualité du maillage).

### 3.2 Conditions initiales et aux limites

A l'entrée des cheminées, on a imposé deux conditions différentes :

- soit une pression d'arrêt  $P_0$  égale à la pression atmosphérique,
- soit une paroi solide pour empêcher l'entrée du gaz.

Sur parois verticales, nous avons utilisé soit une condition de glissement soit une condition d'adhérence pour les particules et une condition de friction pour le fluide. En sortie du domaine, une condition de sortie libre est imposée aux deux phases avec une surpression imposée de 20 Pa par rapport à la pression atmosphérique correspondant à la pression hydrostatique sur la hauteur du domaine (139 cm). Les particules sont initialement au repos dans le silo à  $t = 0$  s.

La fraction volumique initiale de particules est  $\alpha_p = 0,6$ . Le fluide est au repos partout dans le domaine en incluant la chambre de dispersion à  $t = 0$  s.

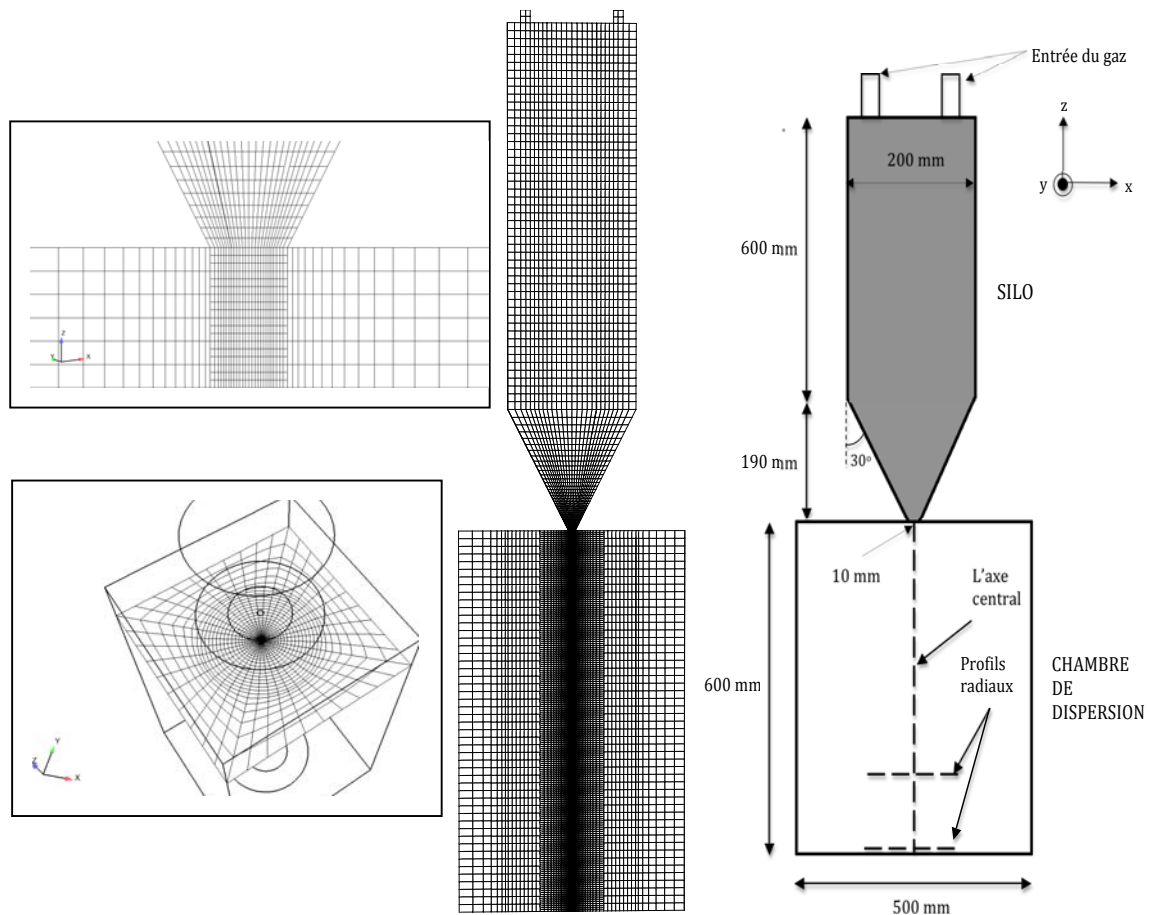


Figure 1. A gauche : les zooms sur le maillage, au milieu : section radiale du maillage, à droite : la configuration et les profils présentés dans ce papier

### 3.2 Propriétés physiques

La phase particulaire est monodisperse, le diamètre moyen des particules est pris égal à  $60 \mu\text{m}$  et la masse volumique des particules est de  $1000 \text{ kg/m}^3$ . La phase continue est de l'air avec une masse volumique de  $1,2 \text{ kg/m}^3$  et une viscosité dynamique de  $1,8 \cdot 10^{-5} \text{ kg/m.s}$ . Seules les forces de trainée, d'Archimède et de pesanteur sont prises en compte dans l'équation de quantité de mouvement des deux phases.

### 3.3 Déroulement des simulations et performances

Les simulations se déroulent en trois étapes. La première permet aux particules de se tasser dans le silo pendant que l'orifice du silo est fermé. Cette phase a été fixée à 10 secondes de temps physique. La deuxième étape est une étape transitoire allant de l'ouverture de l'orifice à l'établissement de l'écoulement (stationnaire). La durée de cette étape varie en fonction des simulations. La troisième étape dure 12 secondes physiques pendant lesquelles nous calculons les statistiques des deux phases. Les simulations sont effectuées en parallèle avec 64 cœurs du supercalculateur CALMIP. La durée des calculs varie entre 2 et 6 jours en fonction de la durée de deuxième étape.

## 4 Résultats

### 4.1 Débit de particules en sortie du silo

Les prédictions des modèles sont caractérisées à partir du débit de particules en sortie du silo et de la vitesse moyenne des deux phases dans la chambre de dispersion en aval. La figure 2 présente l'évolution temporelle du débit des particules en sortie du silo. Nous remarquons tout d'abord que le débit de particules est le plus élevé dans le cas 'Sim1' et très supérieur aux données expérimentales (environ 40

fois). Ceci s'explique donc directement par l'absence du ralentissement des particules lié au frottement sur les parois. D'autre part, le débit ne reste pas stationnaire et diminue au cours du temps.

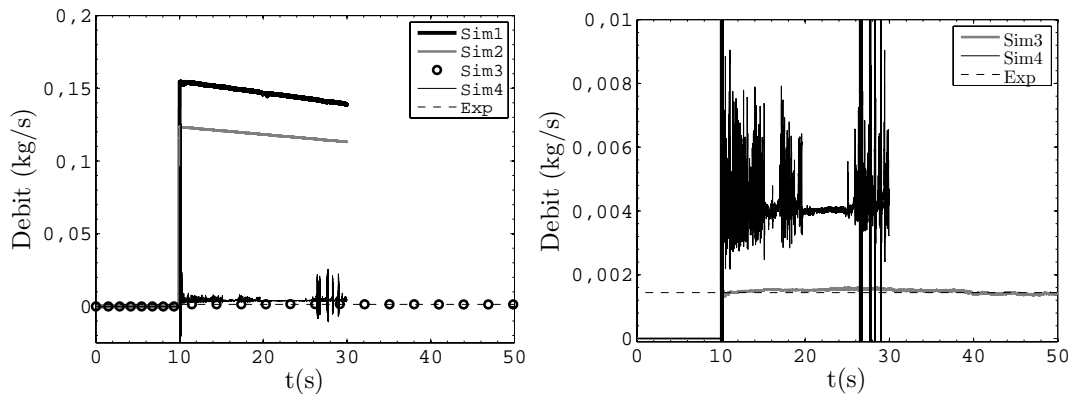


Figure 2. Débit de particules sortantes du silo (kg/s), 'Sim1' est le cas de référence, à droite : le zoom sur les simulations 'Sim3' et 'Sim4'. La valeur expérimentale présentée est une valeur moyenne mesurée par Ansart (2009)

La figure 2 présente également les résultats des simulations 'Sim2' qui intègre l'effet de frottement des particules sur les parois (condition d'adhérence) sans prise en compte des effets frictionnels. On constate que la prise en compte du frottement sur les parois réduit le débit d'environ 20% par rapport au cas 'Sim1'. Cependant le débit reste toujours largement surestimé et varie au cours du temps. La prise en compte de la viscosité frictionnelle et du frottement sur les parois pour le cas 'Sim 3' entraîne une diminution drastique du débit par rapport aux cas 'Sim1' et 'Sim2' très proche de la valeur expérimentale. Dans le cas 'Sim4' avec les cheminées bouchées, malgré des conditions de glissement aux parois, le débit de particules est également très proche de la valeur expérimentale, le mouvement de solide étant limité par l'écoulement à contre courant de l'air. De plus, on observe des fluctuations temporelles du débit en sortie très élevées.

#### 4.2 Vitesses moyennes verticales

##### Les profils axiaux :

Les profils axiaux de la vitesse verticale de la phase particulaire et de la phase gazeuse sont présentés sur la figure 3 pour les cas 'Sim3' et 'Sim4'. Le profil axial de la vitesse verticale des particules mesurée (PIV) par Ansart (2009) est également présenté sur cette figure. Cette vitesse correspond à une moyenne d'ensemble calculée à partir des valeurs récoltées pendant approximativement 12 s. On constate que l'évolution axiale de la vitesse verticale des particules dans le cas 'Sim3' est fortement surestimée par rapport aux mesures expérimentales. Nous avons d'ailleurs comparé les vitesses prédites dans les simulations à la vitesse de chute dans le vide. La vitesse prédite est très légèrement inférieure à la vitesse de chute dans le vide dans le cas 'Sim3'. On peut noter que la vitesse du gaz présentée dans la figure de droite montre que l'accélération du gaz au centre du jet est aussi élevée que celle des particules. Cette accélération élevée correspond à un faible élargissement du jet. Les particules tombent alors en masse, ce qui empêche l'air ambiant d'interagir radialement. Pour le cas 'Sim4', le résultat est complètement différent, un comportement plus proche des expériences est constaté. Les particules se dispersent radialement dès la sortie du silo du fait des rentrées d'air gaz par la sortie du silo, dues à la conservation du volume du mélange (les entrées d'air en tête de silo étant bouchées dans ce cas). Cette dispersion engendre un entrainement vertical d'air moins important que dans le cas 'Sim3', et une interaction avec l'air environnant de la chambre de dispersion beaucoup plus importante, d'où des vitesses prédites du gaz bien inférieures à celles du cas 'Sim3'. Le gaz entraîné freine ensuite les particules, et la vitesse des deux phases parvient alors à un plateau, ainsi qu'on le constate sur la figure 3.

##### Les profils radiaux :

La figure 4 (figure de gauche) montre la comparaison entre les profils radiaux des vitesses simulées et les profils expérimentaux. On constate que la vitesse des particules est fortement surestimée au centre du jet et sous-estimée à la périphérie. De plus, l'élargissement du jet n'est pas aussi élevé que dans l'expérience.

Les mesures expérimentales montrent que les vitesses des particules au centre du jet ne varient pas d'une façon significative entre 40 cm et 60 cm après la sortie du silo.

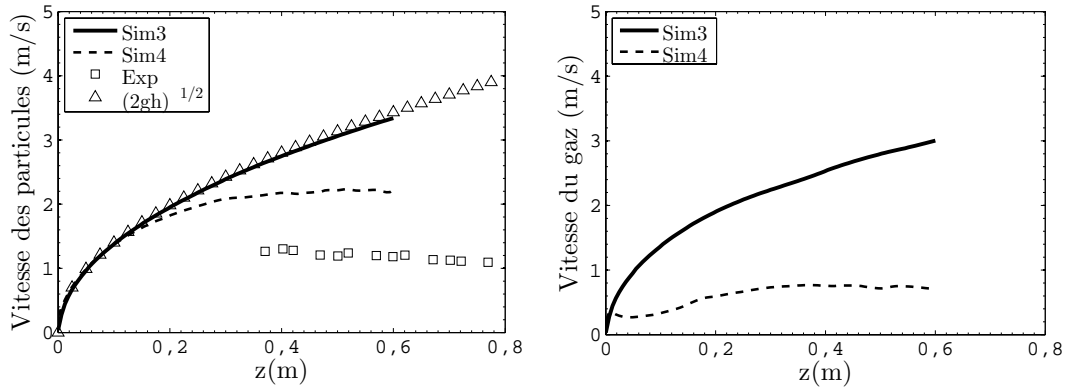


Figure 3. Les profils axiaux des vitesses verticales des deux phases

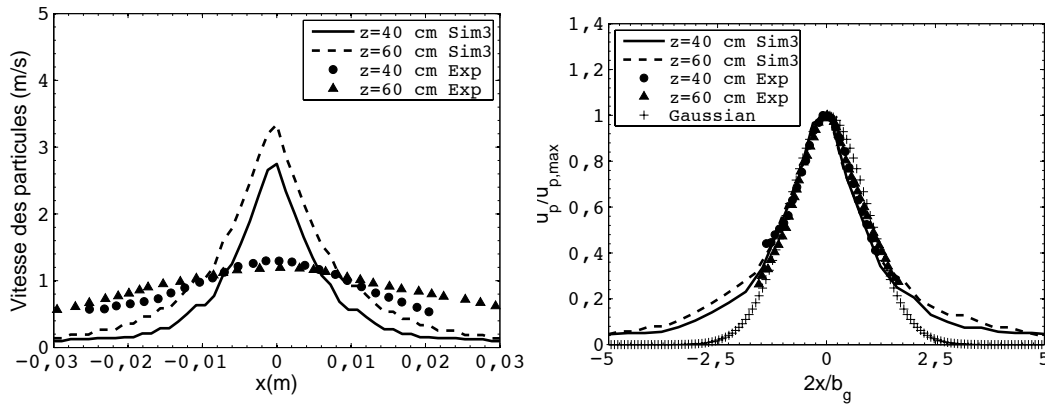


Figure 4. Les profils radiaux des vitesses verticales des particules en comparaison avec les mesures expérimentales (à gauche) et avec les distributions Gaussiennes calculées à partir de l'équation (1) (à droite).

A droite, les profils de vitesse axiale normalisés par la vitesse maximale sont comparés aux distributions Gaussiennes correspondantes. Une façon de caractériser le comportement du jet est en effet de l'approcher par la Gaussienne définie comme :

$$u_p = u_{p,\max} \exp\left(-\ln 2 \left(\frac{2x}{b_g}\right)^2\right) \quad (1)$$

où  $u_{p,\max}$  est la vitesse maximale du jet au centre,  $b_g$  est la largeur du jet à la moitié de la valeur de la vitesse maximale au centre du jet. On remarque que les profils radiaux suivent bien la distribution Gaussienne, en particulier au près du centre du jet. Toutefois, l'équation Gaussienne sous-estime la vitesse en périphérie du jet.

## 5 Conclusions

L'écoulement de particules en chute libre d'un silo avec une section convergente est simulé en utilisant l'approche à deux fluides. Même si le débit de particules en sortie du silo est correctement prédit en prenant en compte les interactions frictionnelles entre les particules et le frottement des particules sur les parois, les vitesses verticales des deux phases dans la chambre de dispersion sont fortement surestimées du fait d'un trop faible élargissement du jet. Une dispersion radiale similaire à l'expérience a été obtenue

en fermant les événements du silo. Dans ce cas, la dispersion radiale est induite par la fluctuation de débit de particules en sortie du silo liée à l'écoulement d'air contre-courant qui vient prendre la place des particules sortantes.

### Références

- Ansart, R., de Ryck, A., Dodds, J. A., Roudet, M., Fabre, D. and Charru, F., 2009, Dust emission by powder handling: Comparison between numerical analysis and experimental results, *Powder Technology*, 190, p274-281
- Belt, R. and Simonin, O., 2009, Personal communication
- Gobin, A., Neau, H., Simonin, O., Llinas, J. R., Reiling, V. et Selo, J. L., 2003, Fluid dynamic numerical simulation of a gas phase polymerization reactor, *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 43, pp. 1199-1220
- Johnson, P.C. et Jackson, R., 1987, Frictional-collisional constitutive relations for granular materials, with application to plane shearing, *J. Fluid Mech.*, 176, p67-93
- Srivastava, A. et Sundaresan, S., 2003, Analysis of a frictional-kinetic model for gas-particle flow, *Powder Technology*, 129, p72-85

### Remerciements

Ce travail a été réalisé en utilisant les ressources HPC (High Power Computing) du CALMIP sous l'allocation 2012 – P0111

## 3D Unstationary Simulations of a Free-Falling Particle Jet Using A Granular-Kinetic Hybrid Model

ZEREN Zafer<sup>a,c\*</sup>, ANSART Renaud<sup>b,c</sup>, NEAU Hervé<sup>a,c</sup>, SIMONIN Olivier<sup>a,c</sup> et BELUT Emmanuel<sup>d</sup>

<sup>a</sup> Université de Toulouse ; INPT, UPS ; IMFT

2 Allée du Professeur Camille Soula, F-31400 Toulouse, France

<sup>b</sup> Université de Toulouse ; INPT, UPS ; LGC

4 Allée Émile Monso BP 84234 31432 Toulouse Cedex 4, France

<sup>c</sup> CNRS ; Fédération de recherche FERMaT ; F-31400 Toulouse, France

<sup>d</sup> Département IP INRS – Centre de Lorraine

Rue du Morvan CS 60027 54419 Vandoeuvre cedex - France

### Abstract

3D flow of fine particles falling from a silo under the effect of gravity is simulated using a two-fluid approach, Euler-Euler, and results are compared to the experimental measurements. The simulations show that taking into account the frictional viscosity between the particles and the friction between the particles and the walls have large influence on the mass flux of particles exiting the silo. However, the vertical mean velocity of particles is not modified by the so-told interactions, particles fall as if they were in a vacuum environment. Nevertheless, if the chimneys for air-breathing on the upper part of the silo are blocked, the simulations show a deceleration of particles on the center of the jet. In this case, the instability is related to the formation of air bubbles close to the outlet of the silo due to the conservation of the volume of the gas-particle mixture.

**Keywords :** Frictional viscosity, Quasi-static granular flow, NEPTUNE\_CFD