

**INTERNATIONAL CONGRESS FOR APPLIED MECHANICS JET'2018  
2, 3 et 4 mai 2018, Marrakesh Maroc**

**CALIBRATION DE MODELES DISCRETS DANS LE CAS  
D'ECOULEMENT GRANULAIRE DANS UN SILO**

**Salma Ben Turkia<sup>1, 2, 3</sup>, Nicolin Govender<sup>2, 4</sup> Patrick Pizette<sup>2, 3</sup>, Nor-Edine Abriak<sup>2, 3</sup>,  
Daniel N. Wilke<sup>5</sup>**

<sup>1</sup>Université Arabe des Sciences, Tunis, Tunisie; <sup>2</sup>IMT Lille Douai, Institut Mines – Télécom, EA 4515 -LGCgE- Laboratoire de Génie Civil et géo-Environnement, Civil Engineering & Environmental Department, F-59508 Douai, France; <sup>3</sup>Université de Lille, F-59000 Lille, France; <sup>4</sup>Research Center Pharmaceutical Engineering, GmbH, Graz , Austria ; <sup>5</sup>Centre for Asset and Integrity Management, University of Surrey, United Kingdom <sup>5</sup>University of Pretoria, Pretoria, 0086, South Africa

**Mots clés:** Méthode des éléments discrets, Comportement mécanique, Optimisation, Calibration

**Keywords:** Discrete Element Method, Mechanical behavior, Optimization, Calibration

**Résumé**

Les applications de transformation, de transport, de stockage et de mélange des matériaux granulaires sont soumises à plusieurs phénomènes comme la ségrégation, problème de maniabilité et de blocage qui se révèlent très problématiques pour les industriels, Ainsi, la prédiction de la dynamique des matériaux granulaires est importante dans la conception et l'optimisation de tels processus. L'explication des propriétés macroscopiques des milieux granulaires nécessite une bonne maîtrise du comportement mécanique du matériau et donc une bonne compréhension des mécanismes mis en jeu à l'échelle locale (des grains). L'approche proposée par la méthode des éléments discrets (DEM, Discrete Element Method) traite d'une manière individuelle le comportement de chaque particule, en prenant en compte les forces de contact entre particules entre ces dernières. Cependant, le calcul DEM est très coûteux en temps de calcul réduisant le potentiel de ce type de modélisation.

Dans le cadre de cette étude, nous utilisons les approches sous GPUs (Graphic Processing Units) ce qui permet d'augmenter considérablement les capacités de calcul d'un point de vue nombre de particules et temps de calcul permettant d'ouvrir des nouvelles voies de la DEM pour des applications aux grandes échelles via l'utilisation du code de calculs BLAZE-DEM GPU. Cependant, l'efficacité du modèle discret dépend fortement du processus de calibration des modèles des forces de contact permettant d'assurer une meilleure concordance entre la réponse expérimentale et celle du modèle numérique. Le processus que nous proposons dans cette étude repose sur la conception des expériences et sur les stratégies d'optimisation afin de trouver les paramètres optimaux du modèle. En particulier, deux approches expérimentale et numérique sont montrées afin de vérifier la prédictibilité des modèles de DEM pour des applications à l'échelle du laboratoire et pour des applications futures à l'échelle industrielle.

## **Abstract**

The processing, handling and storage of granular materials is part of the production process in numerous industries. Thus reliably predicting the dynamics of granular materials is important in design and optimization of such processes where the material is subjected to several phenomena such as segregation, arching, and jamming which are problematic for manufacturers. The dynamics of granular media is complex and cannot be described by a close form solution on the macroscale in a general sense. Hence numerical simulation on the micro scale (individual particles) is the only way to accurately predict the dynamics of granular material in all conditions. However it is not computationally feasible to simulate all the forces acting on the micro-scale, such as gravitational, electrostatic, molecular and other long range forces. Fortunately by considering just the gravitational force we can accurately simulate a large number of materials using the Discrete Element Method (DEM) which simulates the motion of each particle individually by taking into by modeling the mechanical forces between them. However, the DEM is computationally expensive and realistic simulations take many months to run on a CPU. In the framework of this study, we use the GPUs (Graphic Processing Units) on which the DEM is hundreds of times faster to provide a tremendous increase to the computation workspace (number of particles and computation duration) available to the DEM creating new opportunities to solve problems that previously were too computationally expensive to investigate with traditional methods. In this study, we make use of the BLAZE-DEM GPU framework to perform the simulations of these large scale problems. The efficiency of the discrete element model strongly depends on the calibration process of the model to ensure a better match between the experimental response and the numerical model response. The process we proposed relies on the design of experiments and optimization strategies to find the optimal parameters of the model. In particular, two experimental and numerical approaches are shown to verify the predictability of DEM models for laboratory scale applications and future industrial applications.

## **1. Introduction**

La consommation irrégulière de la récolte des produits alimentaires (sucre, farine, etc.) ou d'une large gamme de production industrielle tels que les granulats et les poudres pharmaceutique a mené à la réalisation de stocks permettant une meilleure répartition des produits. Les silos et les trémies de stockage s'avèrent les plus utilisés dans ce type d'application allant du stockage de quelques tonnes à des millions de tonnes.

Les problèmes liés aux installations de stockage, de dosage, de transport de ces matériaux représentent malheureusement un enjeu majeur pour les industriels. Généralement, on a tous les moyens techniques et matériels afin de concevoir un dispositif rentable et à prix réduit mais les causes des phénomènes de ségrégation et de maniabilité lors du stockage des matériaux granulaire nécessitent encore plus de recherche.

Les écoulements granulaires peuvent constituer une véritable filière de valorisation et surtout permettre de contribuer dans la démarche du développement durable si on arrive à répondre aux différentes problématiques. L'ambiguïté ainsi confère aux propriétés particulières des particules. Lors de la vidange de silo, différents paramètres sont susceptibles d'influencer l'écoulement granulaire. La simulation numérique est la seule façon de prédire avec précision la dynamique du matériau granulaire.

Plusieurs approches sont possibles pour décrire et tenter de modéliser les milieux granulaires [1] . La méthode par éléments discrets (DEM) qui consiste à modéliser les particules à l'échelle des grains semble être la plus appropriée pour l'étude d'un milieu granulaire considéré comme un ensemble de grains indépendants, de tailles et de formes diverses, pouvant avoir des propriétés de surface très différentes.

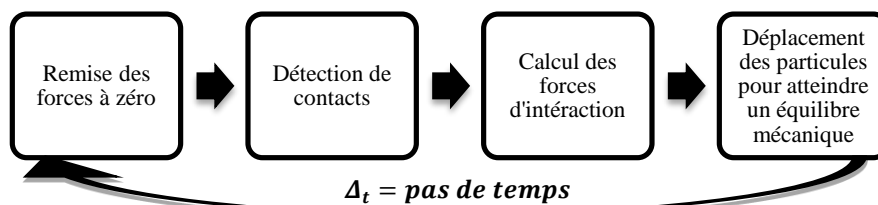
Les calculs par éléments discrets s'appuient principalement sur des plates-formes de calcul par unité de traitement (CPU) avec des processeurs multi-cœurs [2]. Dans ce cas, le nombre de particules pouvant être simulé est limité afin d'avoir des délais réalistes sur des stations de travail typiques [3]. Dans le cadre de ce travail, nous étudions l'écoulement granulaire sur des systèmes composés de milliers de particules sphériques mono-disperses via l'utilisation du calcul Haute Performance appliquée à la modélisation discrète. Dans le cadre de collaboration entre IMT Lille Douai et l'Université de Prétoria, des études d'écoulement granulaire ont été menées pour des grandes échelles en utilisant le code de calculs BLAZE-DEM GPU [4, 8, 10]. Ces études ont montré en particulier que l'utilisation de GPUs permettait d'accroître considérablement la puissance de calculs en augmentant le nombre de particules modélisées tout en diminuant les temps de calculs.

Dans le cadre de cette étude, l'objectif est de poursuivre l'utilisation des approches DEM sous GPUs pour décrire des écoulements aux grandes échelles tout en proposant des méthodes expérimentales afin d'identifier les paramètres des modèles de lois de contact adaptées aux problématiques industrielles et adaptables à l'approche numérique développée dans le cadre de ce travail. Cet article propose une méthodologie expérimentale afin de suivre le processus d'écoulement pour des matériaux granulaires tout en menant des simulations discrètes sous GPUs en vue de proposer une comparaison systématique expérimental/numérique. Pour une première approche, le matériau granulaire choisi est de forme géométrique simplifiée (bille de verre) où de petits volumes sont utilisés. En particulier aussi, des techniques d'analyse d'images (PIV) ont été mises en place pour étudier les écoulements granulaires et faciliter les comparaisons entre les résultats numériques et expérimentaux.

## 2. Méthode aux éléments discrets (DEM)

### 2.1 Principe de la DEM

Initialement développé par Cundall and Strack [12], la méthode des éléments discrets prend en compte de façon explicite la nature granulaire du matériau en modélisant chaque particule de façon individuelle. Le calcul DEM se fait suivant une boucle illustrée sur la figure suivante. A chaque pas de temps, les interactions entre les particules sont détectées en fonction de la déformation macroscopique imposée, ensuite chaque particule cherche à atteindre une position d'équilibre mécanique.



*Figure1 : Schéma récapitulatif de la résolution numérique discrète*

Pour savoir si les particules sont en contact ou pas, on calcule la distance de chevauchement entre les particules rapprochées. A partir de chaque particule et de l'état de chargement de chaque contact, on détermine à partir des lois d'interaction, les forces exercées sur chaque particule afin d'en déduire la force totale exercée sur une particule donnée. Le calcul de nouvelles positions à l'instant  $t$  est réalisé par l'intégration de la seconde loi de Newton (Principe fondamental de la dynamique) à l'aide d'un algorithme d'intégration temporel. On déduit la part de déplacement due au réarrangement pour tendre vers l'équilibre mécanique en utilisant la vitesse et l'accélération au pas de temps. On peut ainsi déterminer les nouvelles positions de chaque particule. Dans le cadre des simulations menées ici, nous utilisons le modèle raideur-amortisseur.

## 2.2 BLAZE-DEM GPU code

Le développement du GPU (unité de traitement graphique, Graphical Process Unit (GPU)) est une technologie qui permet de réaliser des calculs en parallèle sur les milliers de processeurs que peut contenir une carte graphique [4][5][6]. Dans le cadre des méthodes particulières, le calcul sous GPUs s'avère une solution technique pour augmenter les calculs DEM en termes de performances [7]. Bien que le GPU ait de nombreux avantages, il présente également divers défis aux implémentations de la méthode des éléments discrets, beaucoup d'études ont été dirigées vers des particules sphériques sur le GPU. [6][2][9]. Dans le cadre de ce travail, nous utilisons en particulier le code BLAZE-DEM GPU, développé par Govender et al, qui permet une représentation et un calcul efficace de systèmes mono-dispersés et poly-dispersés pour les particules à la fois sphériques et/ou polyédriques [10].

## 3. Approche expérimentale d'étude d'écoulement

L'étude micromécanique des matériaux granulaires est un champ d'investigation récent dans lequel l'usage des simulations numériques discrètes est venu compléter les expériences physiques sur des matériaux modèles. Dans cette section, nous présentons à la fois les matériaux et les expérimentations.

### 3.1 Matériaux utilisés

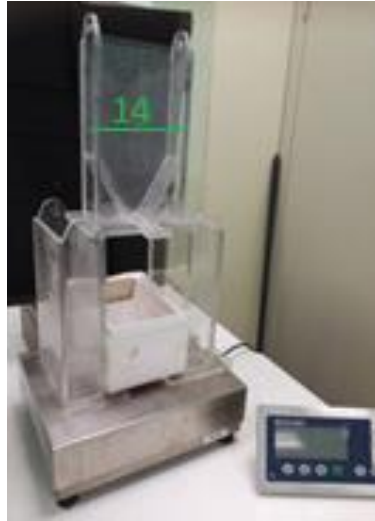
Lors de cette étude, notre choix est porté sur des matériaux de forme simple sphérique qui sont des billes de verre comme le montre le tableau 1. L'avantage de modéliser le matériau comme étant une sphère est de faciliter les interactions et la détection de contact entre particules dans les approches numériques. Le tableau 1 décrit à la fois les diamètres et la quantité de matériau utilisé. En particulier, la masse de matériaux est conservé constante quel que soit le diamètre des billes.

**Tableau 1 : récapitulatif des empilements initiaux**

Diamètre (mm)	volume d'une bille ( $mm^3$ )	Masse d'une bille (g)	Masse totale (g)	N particules
2	4.189	0.010	2500	<b>238732</b>
4	33.510	0.084	2500	<b>29842</b>
6	113.097	0.283	2500	<b>8842</b>

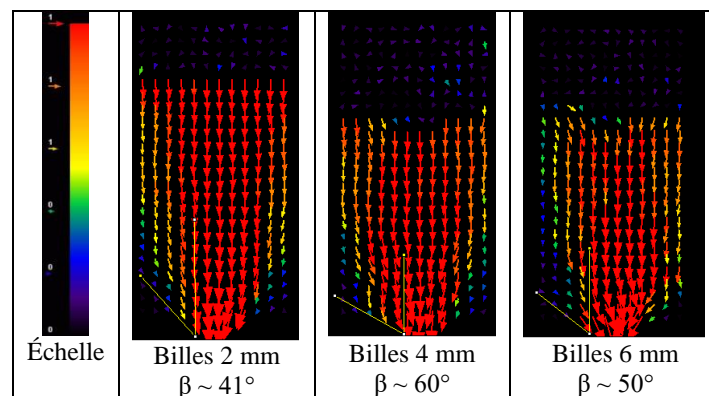
### 3.2 Etude expérimentale de l'écoulement

Les essais ont été dans le Laboratoire du Génie Civil et géo-Environnement de l'IMT Lille Douai. Les silos utilisés dans cette étude sont de dimension (25\*14\*4 cm<sup>3</sup>) comme le montre la figure 2.



*Figure 2 : Dispositif expérimental de l'écoulement granulaire*

Une caméra rapide (IMPERIX IPX-VGA 2010) capable de capturer le mouvement des particules (210 images/s) avec une résolution de 640×480 pixels a été utilisée dans cette étude. Dans le cadre de ce travail, nous avons utilisé le logiciel FIJI avec en particulier l'utilisation de technique de traitement d'image PIV (Particle Image Velocimetry) qui avait été appliquée avec succès sur des écoulements en silo dans une étude précédente [11]. Dans le cadre de l'application de la méthodologie sur les essais pour un silo à fond plat, les essais ont permis de déterminer l'angle  $\beta$  et ceci afin de l'appliquer dans les formules théoriques de calcul des débits des silos avec un angle de trémie  $\alpha \leq \beta$ . En particulier, la zone stagnante correspond à la zone où la vitesse de l'écoulement est nulle, c'est-à-dire l'angle entre la verticale et la zone présentée en bleu sur les images fournies sur la figure 3.



*Figure 3 : Détermination de l'angle  $\beta$*

Les essais sont réalisés pour trois types de silo à trémie fond plat, à trémie 30° et à trémie 60° pour chaque matériau. Dans cet article, nous avons choisi de présenter les résultats des essais dans un silo à fond plat. Les courbes de décharge associées sont représentées ci-dessous. Afin d'assurer une meilleure reproductibilité entre les résultats expérimentaux et numériques, les paramètres d'entrée du code ont été déterminés expérimentalement.

### 3.3 Etude empirique de l'écoulement

La mesure de l'évolution de la masse de l'échantillon au cours du temps est une étape primordiale pour la caractérisation d'un écoulement granulaire. Les mesures sont modélisées sur une courbe de décharge dont la pente «  $Q_m$  » est équivalente au débit massique d'écoulement.

Nedderman (1992) a réécrit l'équation du débit en combinant les deux corrélations de Beverloo et de Rose et Tanaka, et l'équation du débit a eu une nouvelle forme appelée corrélation RTBN (Rose-Tanaka-Beverloo-Nedderman) tel que :

$$Q = Cb\rho_b\sqrt{g}(D - kd)^{\frac{5}{2}}\left(\frac{\tan\alpha}{\tan\beta}\right)^{-0,35}, \quad \text{Si } \alpha \leq \beta$$

$$Q = Cb\rho_b\sqrt{g}(D - kd)^{\frac{5}{2}}, \quad \text{Si } \alpha > \beta$$

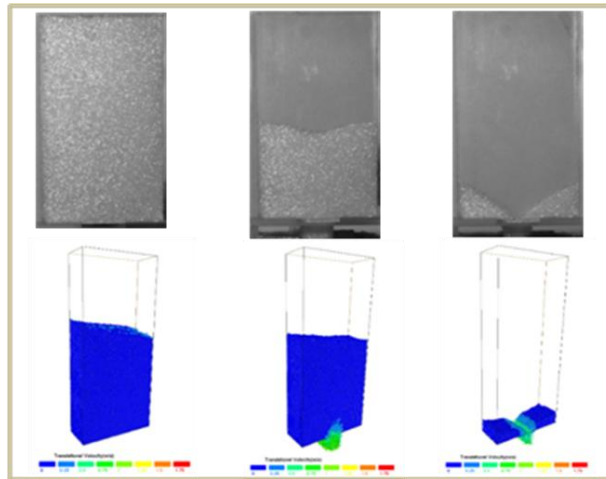
Avec : A : Surface de l'orifice ; P : Périmètre de l'orifice

Cette équation a été utilisée pour calculer le débit empirique de nos écoulements.

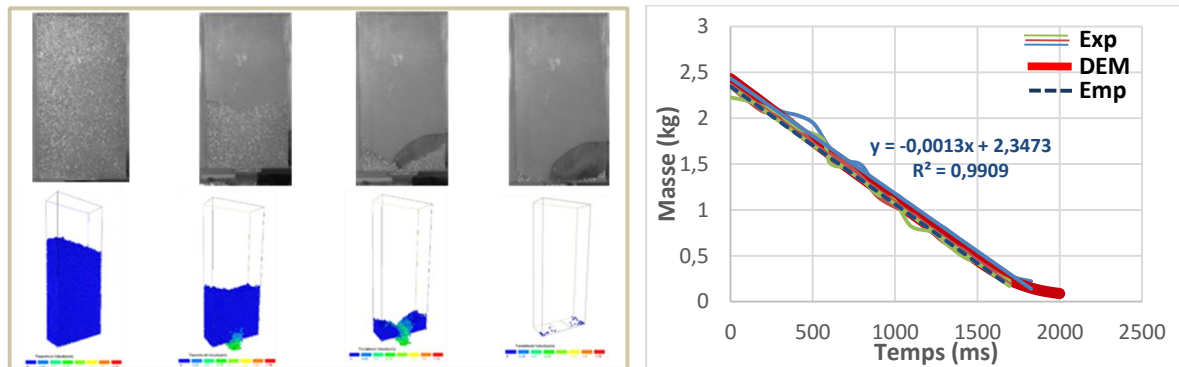
## 4. Simulation DEM de l'écoulement

Comme déjà montré dans la partie 2, l'importance de la simulation numérique consiste à rapporter des informations difficiles à déterminer expérimentalement surtout à l'échelle des grains. Le questionnement se pose ainsi par rapport afin de s'assurer que les résultats obtenus reproduisent la réalité d'où l'objectif des études comparatives faites dans le cadre de ce travail.

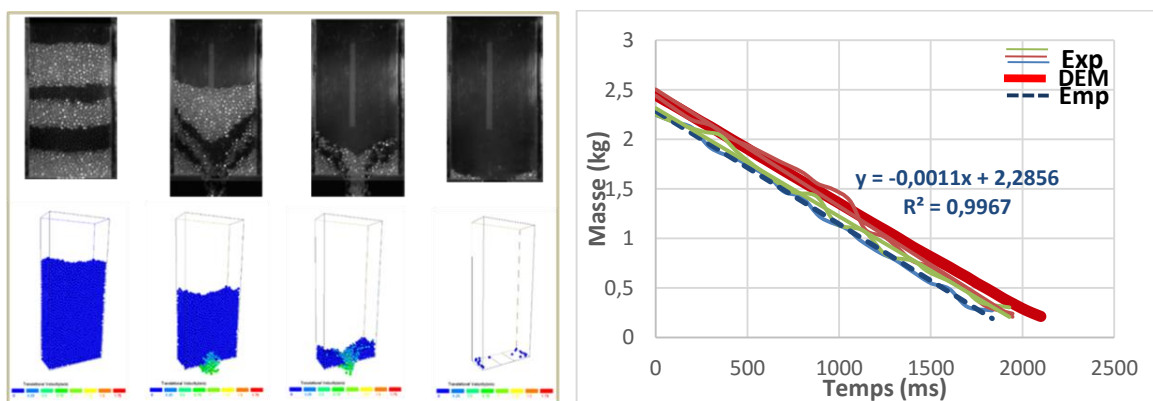
Les comparaisons des écoulements pour les trois diamètres de bille sont montrées sur les figures 4, 5 et 6. En particulier, les résultats montrent une bonne reproduction de l'écoulement expérimental à la fois via les différentes clichés photographiques pris à plusieurs instants de l'écoulement et à la fois via le suivi du débit d'écoulement où sont représentés les données expérimentales, les résultats de simulation DEM et le modèle empirique de la loi de Beverloo.



**Figure 4: Comparaison entre les résultats expérimentaux, numériques et empiriques pour l'écoulement des billes-2mm dans un silo fond plat**



**Figure 5: Comparaison entre les résultats expérimentaux, numérique et empirique pour l'écoulement des billes-4mm dans un silo fond plat**



**Figure 6: Comparaison entre les résultats expérimentaux, numérique et empirique pour l'écoulement des billes-6mm dans un silo fond plat**

## 5. Conclusion et perspectives

Les résultats montrent que pour des écoulements sur des dispositifs de laboratoire, les simulations numériques via la méthode aux éléments discrets et les résultats expérimentaux coïncident. À noter que les calculs via le logiciel BLAZE-DEM GPU sont obtenus dans des temps de simulation très raisonnables. Par conséquent, les résultats obtenus sont très encourageants ouvrant de multiples voies de leur utilisation pour des systèmes poly-dispersés de formes géométriques plus complexes permettant de s'ouvrir sur des applications industrielles réelles. Après cette première étape de validation, les perspectives de ce travail se concentrent sur le développement d'une modélisation à des échelles de taille plus importante d'un point de vue numérique et expérimental et sur la mise en place d'une méthode de calibration optimale des paramètres numériques basée sur des plans d'expériences appliqués aux simulations DEM en vue de proposer une utilisation de l'outil numérique adapté au besoin des industriels.

## Références

- [1] L. Staron, "Modélisation continue de la vidange d'un silo granulaire," pp. 1–6, 2013.
- [2] Y. Shigeto and M. Sakai, "Parallel computing of discrete element method on multi-core processors," *Particuology*, vol. 9, no. 4, pp. 398–405, 2011.
- [3] D. Cédric, "Caractérisation de matériaux granulaires et de leurs écoulements dans les silos verticaux. Mise en oeuvre d'une méthode d'investigation expérimentale et numérique," 2005.
- [4] N. Govender, D. N. Wilke, S. Kok, and R. Els, "Journal of Computational and Applied Development of a convex polyhedral discrete element simulation framework for NVIDIA Kepler based GPUs," *J. Comput. Appl. Math.*, vol. 270, pp. 386–400, 2014.
- [5] L. Zhang, S. F. Quigley, and A. H. C. Chan, "Advances in Engineering Software A fast scalable implementation of the two-dimensional triangular Discrete Element Method on a GPU platform," *Adv. Eng. Softw.*, vol. 60–61, pp. 70–80, 2013.
- [6] J. Xu *et al.*, "Quasi-real-time simulation of rotating drum using discrete element method with parallel GPU computing," vol. 9, pp. 446–450, 2011.
- [7] J. Q. Gan, Z. Y. Zhou, and A. B. Yu, "A GPU-based DEM approach for modelling of particulate systems," vol. 301, pp. 1172–1182, 2016.
- [8] P. Pizette, N. Govender, D. N. Wilke, and N. Abriak, "DEM GPU studies of industrial scale particle simulations for granular flow civil engineering applications," pp. 4–7.
- [9] J. Longmore, P. Marais, and M. M. Kuttel, "Towards realistic and interactive sand simulation : A GPU-based framework," *Powder Technol.*, vol. 235, pp. 983–1000, 2013.
- [10] N. Govender, D. N. Wilke, P. Pizette, and N. Abriak, "A study of shape non-uniformity and polydispersity in hopper discharge for spherical and polyhedral particle systems."
- [11] P. Pizette & N-A Abriak, "Particle Image Velocimetry Analysis on 2D Silo Flows", AfriCOMP15 Conference, 2015



- [12] P. A. Cundall & O.D.L. Strack, “A discrete numerical model for granular assemblies”, *Géotechnique*, 1979, pp. 47-65