



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE



UNIVERSITE ABOU-BEKR BELKAID - TLEMCEN

MÉMOIRE

Présenté à:

FACULTÉ DES SCIENCES – DÉPARTEMENT DE PHYSIQUE

Pour l'obtention du diplôme de:

MASTER EN PHYSIQUE

Spécialité: Physique Computationnelle

Par:

Sebbah Hafsa

Sur le thème

Modélisation et simulation de la ségrégation dans les systèmes granulaires vibrés

Soutenu publiquement le 29/06/2019 devant le jury composé de :

Mr Badr-Eddine Nabil Brahmi	Maître de conférences A à l'UABT	Président
Mr Sidi Mohammed Khelif	Maître de conférences B à l'ESSAT	Encadreur
Mr Mohammed Reda Boufatah	Maître de conférences B à l'UABT	Examineur
Mr Rafik Benallal	Professeur à l'ESSAT	Examineur

*À la mémoire de notre regretté professeur Tayeb **BENOUAZ***

Remerciements

Je voudrais dans un premier temps remercier mes parents, qui m'ont encouragée et aidée à atteindre ce niveau d'étude.

*Je tiens à remercier mon directeur de mémoire **Sidi Mohammed Khefif**, maître de conférences en physique à l'École Supérieure en Sciences Appliquées de Tlemcen, pour sa patience, sa disponibilité et surtout ses judicieux conseils et aussi de m'avoir guidée dans la réalisation de ce mémoire.*

*Je remercie également toute l'équipe du laboratoire d'Automatique, tous les enseignants du département de physique de l'université de Tlemcen, en particulier, Mr **Badr-Eddine Nabil Brahmi**, pour ses conseils, son aide précieuse après le décès de notre regretté professeur **Tayeb Benouaz**, et également d'avoir accepté de présider mon jury de soutenance.*

*Je remercie les autres membres de mon jury, Mr **Mohammed Reda Boufatah** et Mr **Rafik Benallal**, d'avoir accepté d'examiner mon travail.*

*Je remercie vivement mon amie Melle **Asma Zair** pour son aide morale durant toute la période de préparation. Une petite pensée pour mes camarades du Master Physique Computationnelle.*

*Je voudrais remercier **Jan Strànsky**, que je n'ai jamais rencontré physiquement, pour m'avoir aidé à comprendre et à écrire des scénarii de simulations sous Yade.*

Enfin, j'adresse ma gratitude à toutes les personnes qui par leurs paroles, leurs écrits, leurs conseils et leurs critiques ont guidé mes réflexions durant la rédaction de ce mémoire.

Dédicace

*Je dédie ce travail qui n'aurait jamais pu voir le jour sans le soutien indéfectible et sans limite de **mes chers parents** qui ne cessent de me donner avec amour le nécessaire pour me surpasser. Qu'Allah vous protège et que la réussite soit toujours à ma portée pour que je puisse vous combler de bonheur.*

Je dédie aussi ce travail à mes frères Hichem, Zineb, Abderahmaine et à mes grands-parents.

À mes meilleures amies Asma, Sihem, Amina, Abir et Wissem.

À tous mes camarades et les personnes qui m'ont encouragée.

Table des matières

Introduction générale.....	7
Chapitre I : Introduction aux milieux granulaires.....	8
I.1. Introduction	9
I.2. L'effet des noix de Brésil.....	11
I.2.1. La ségrégation dans les milieux granulaires.....	11
I.2.2. Méthodes de ségrégation.....	12
I.3. Fraction volumique Φ	13
I.3.1. Types des empilements.....	13
I.4. Les milieux granulaires vibrés.....	14
I.4.1. Ségrégation par vibrations verticales.....	14
I.5. L'effet inverse.....	15
Chapitre II : Méthode des éléments discrets DEM.....	17
II.1. Introduction.....	18
II.2. Équation de mouvement.....	18
II.2.1. Frottement statique.....	19
II.2.2. Les forces de contact.....	19
II.2.3. Temps de collision.....	20
II.3. Approche des Éléments Discrètes (DEM).....	21
II.3.1. Principe de DEM.....	22
II.3.2. Dynamique moléculaire (DM).....	22
II.3.3. Liste de Verlet.....	24
II.3.4. Code de simulation – Yade DEM.....	25
II.4. Simulation granulaire.....	25
II.4.1. Systèmes étudiés.....	26
II.4.2. Le temps CPU.....	29
Chapitre III : Résultats et discussion.....	30

III.1 Introduction.....	31
III.2. Étude du système avec traceur.....	31
III.3. Cas d'un empilement bidisperse.....	48
Chapitre 4 : Conclusion générale et perspectives.....	56
Conclusion et perspectives.....	57
Exemples de scenarii sur Yade.....	58
1. Préparation du système (pré-traitement).....	58
2. Addition des vibrations au système.....	60
Références.....	61

Table des images

[f-1] : Grains alimentaires <http://www.timlok.com/nuts-seeds-grains/>

[f-2] : Grains pharmaceutiques <https://www.medias-presse.info/labs-un-nouveau-scandale/6340/>

[f-3] : Grains industriels :

charbon https://fr.123rf.com/photo_85446560_charbon-anthracite-de-la-fraction-moyenne-en-arriere-plan-.html

gravier : <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00089234/document>

[f-4] : Effondrement d'un silo <https://docplayer.fr/71797932-Les-milieus-granulaires-un-exemple-de-systeme-complexe-renaud-delannay.html>

[f-5] : Dégradation de chaussée <https://www.elwatan.com/regions/kabylie/tizi-ouzou/azazga-les-glissements-de-terrain-reapparaissent-28-11-2018>

[f-6] : Mélange de fruits secs où on observe l'effet des noix de Brésil https://en.wikipedia.org/wiki/Granular_convection

[f-7] : Ségrégation granulométrique <https://sciencetonnant.wordpress.com/2011/12/19/leffet-noix-du-bresil/>

[f-8] : ségrégation en écoulement

<http://iusti.univ-provence.fr/gsite/document.phpproject=iusti&pagendx=11372>

[f-9] : ségrégation en tambour tournant

<http://iramis.cea.fr/spec/Pres/Git/Laptop/Segregation/Segregation.htm>

[f-10] : Ségrégation par vibration verticale

<https://www.grainscanada.gc.ca/fr/qualite-grains/echantillonnage-grain/guide-echantillon-representatif/>

[f-11] : Ségrégation sous vibrations verticales [1]

[f-12] : (a) L'effet des noix de Brésil BNE - (b) l'effet inverse des noix de Brésil RBNE

<http://large.stanford.edu/courses/2007/ph210/spector2/>

Introduction générale

Mélanger des poudres et des granulats est un procédé très fréquent dans les industries chimiques, pharmaceutiques et agro-alimentaires. Il est souvent souhaitable d'obtenir un mélange homogène en agitant les grains par des secousses ou bien par écoulement rapide dans un récipient ou dans une conduite. Aussi surprenant que cela puisse paraître, l'agitation des grains entraîne la séparation de ces derniers qui sont de natures ou simplement de tailles différentes [16].

Dans le premier chapitre de ce mémoire, nous présentons une introduction aux milieux granulaires qui contient une définition, des notions de base, ainsi que le phénomène de la ségrégation par taille. Nous donnons également un aperçu des méthodes utilisées pour la séparation des grains par leurs tailles, notamment la séparation par vibration qui fera l'objet de notre étude.

Le deuxième chapitre contient une part importante du travail effectué, dans la mesure où il contient tous les éléments de modélisation qui ont été nécessaires à l'élaboration de notre projet, en commençant par l'approche des éléments discrets (DEM). Dans le cadre d'une présentation générale de cette dernière, on insiste sur ses principes de base, la technique de la dynamique moléculaire (MD) et l'algorithme de la liste de Verlet. En plus, nous donnons une description des interactions entre grains qui constituent un aspect essentiel de la modélisation, car elles conditionnent la prédiction du comportement global d'un matériau granulaire. Ensuite, nous présentons une courte définition du code de calcul YADE-DEM utilisé dans ce projet. Enfin, on discutera du choix des paramètres des systèmes simulés, les propriétés mécaniques des matériaux étudiés, en plus des étapes de préparation qui seront présentées en détail.

Dans le troisième chapitre, nous présentons les résultats des différentes expériences numériques menées dans le cadre de notre projet de Master. Des comparaisons sont également réalisées entre les simulations des systèmes avec traceurs et les systèmes biphasiques.

À la fin, dans le quatrième chapitre, nous exposons les perspectives qui se profilent à la suite des résultats préliminaires réalisés lors de cette étude.

Chapitre I

Introduction aux milieux granulaires

I.1. Introduction

En physique, la classification des matériaux la plus connue est de les diviser en solide, liquide et gaz. Par contre, il existe d'autres formes de la matière que ces trois qui sont les plasmas, les cristaux liquides et les milieux granulaires [2]. Ces derniers ont la capacité de se comporter comme les trois premières phases, d'être facile à emmagasiner, transporter et transformer. Cet état de la matière regroupe des familles de grains d'industriels (perles, sables et sols), grains alimentaires (haricots, riz, blé, sucre, sel, poivre) et les grains pharmaceutiques (comprimés, poudres pharmaceutiques). Ce qui fait du milieu granulaire le deuxième matériau le plus utilisé par l'homme après l'eau [1].

Un milieu granulaire est donc une classe de matériaux qui présente un caractère divisé. Ce caractère permet d'afficher une identité propre à chaque < grain > ou < particule > et par conséquent une cinématique et un comportement mécanique spécifique à cette échelle [4].

Un grain est un petit corps d'un matériau de 100 μm à 10 mm de diamètre. Nous nous intéressons à des assemblées de grains non browniens (leur mouvement n'est pas aléatoire) qui interagissent par contact, collision, friction et ne collent pas [1]. À la façon dont ils se comportent collectivement, une riche diversité de comportements se présente à nous [2].



Figure I-1 : Grains alimentaires [f-1]



Figure I-2 : Grains pharmaceutiques [f-2]



Figure I-3 : Grains industriels [f-3]

Malgré les avantages qu'il présente, le milieu granulaire reste un défi pour les physiciens et les mécaniciens pour de nombreuses raisons:

- Le milieu possède des propriétés complexes et imprévisibles [2].
- Les interactions complexes posent plusieurs difficultés [1].
- Le comportement dépend du désordre et des propriétés de ce mélange qui sera composé de plusieurs grains qui diffèrent par la taille et par la densité [12].
- La thermodynamique et de la mécanique statistique sont inapplicables en milieu granulaire, puisque les fluctuations thermiques sont négligeables [2] .
- Le milieu est hautement dissipatif (l'énergie cinétique est dissipée par collisions et friction entre les grains) [1].

L'incompréhension des propriétés des milieux granulaires peut engendrer des problèmes techniques tels que :

- Ruptures, encrassements indésirables, problèmes de blocages et déstabilisation des silos [2,10].
- L'effondrement des élévateurs à grains [10].
- Dégâts des habitats et formation des trous sur les routes [10] .

Souvent dans les industries qui manipulent des grains ou des poudres exigent que les mélanges de leurs produits soient complètement homogènes. Même une petite séparation des différents ingrédients peut dégrader de manière critique la qualité du produit final, notamment les produits pharmaceutiques [2].



Figure I-4 : Effondrement d'un silo [f-4]



Figure I-5 : Dégradation de chaussée [f-5]

I.2. L'effet des noix de Brésil

Cet effet a été observé lors du transport des noix en Amazonie où les noix de Brésil sont les plus grosses particules d'un mélange de grains. En cours de déplacement, les noix de Brésil montent vers le haut tandis que les autres descendent vers le fond [7], ce phénomène est appelé l'**effet des noix de Brésil** «*Brazil Nut Effect*» dans lequel on remarque la séparation des noix par rapport à leurs tailles.



Figure I-6 : Mélange de fruits secs où on observe l'effet des noix de Brésil [f-6]

I.2.1. La ségrégation dans les milieux granulaires

Le problème de la ségrégation se rencontre dès que l'on manipule des mélanges de grains de propriétés différentes, en particulier la taille ou la masse. A la différence des liquides qu'on peut mélanger facilement, un mélange homogène de grains est difficile à obtenir dès qu'il existe des différences de propriétés. Malgré les problèmes industriels qu'elle pose, la ségrégation par taille est encore largement mal comprise [1].

Le comportement des grains dans une ségrégation granulométrique ne dépend pas uniquement de la nature des interactions, mais dépend aussi de quelques caractéristiques des grains [2] :

- Taille, densité, masse, ...
- La présence des parois.
- L'espace interstitiel qui est caractérisé par la fraction volumique ou compacité du milieu.

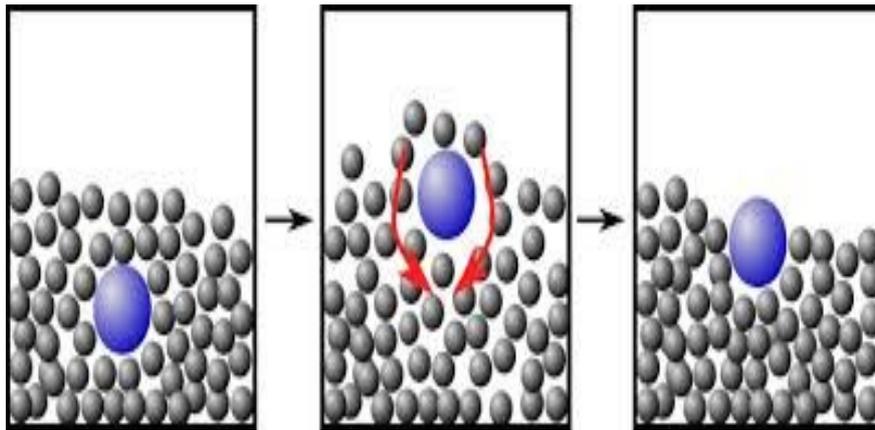


Figure I-7 : Ségrégation granulométrique [f-7]

I.2.2. Méthodes de ségrégation

Il y a trois méthodes pour séparer les grains [1] :

- ségrégation en écoulement.
- ségrégation en tambour tournant.
- ségrégation par vibration horizontale ou verticale.

Dans les milieux granulaires, l'énergie fournie est sous forme d'agitation mécanique ou bien due à des forces d'origine hydrodynamique ou gravitationnelle [2].

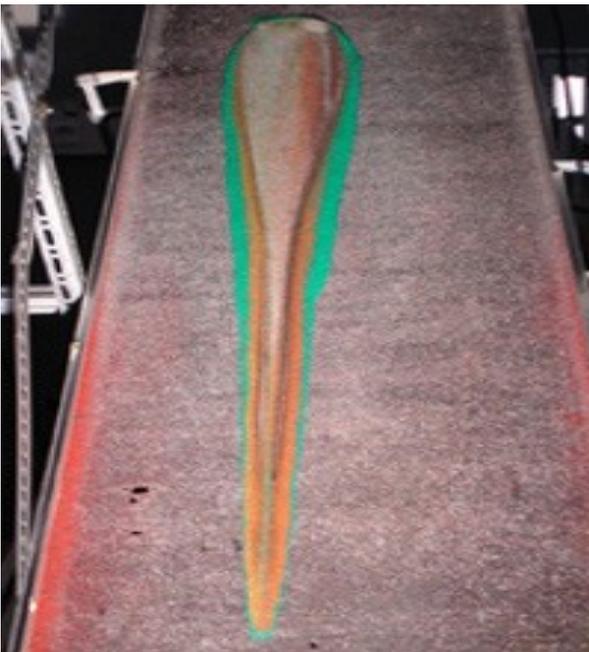


Figure I-8 : ségrégation en écoulement [f-8]



Figure I-9 : ségrégation en tambour tournant [f-9]

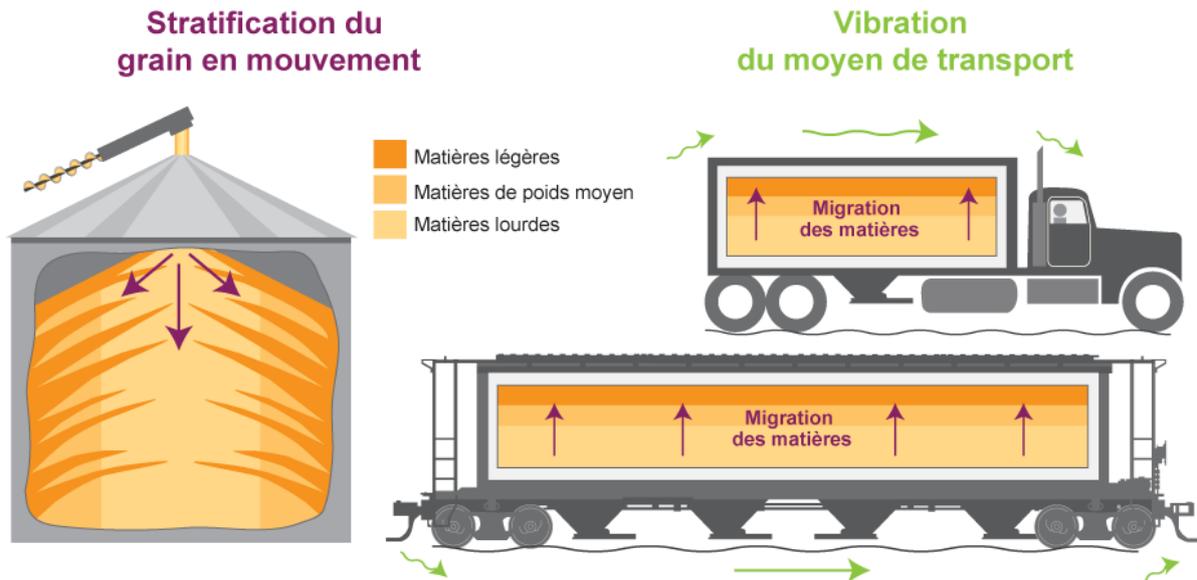


Figure I-10 : ségrégation par vibration [f-10]

I.3. Fraction volumique Φ

La fraction volumique est un paramètre important qui caractérise les empilements granulaires. Elle est définie comme le rapport du volume occupé par les grains sur le volume total occupé par l'empilement. Un milieu granulaire peut avoir des fractions volumiques différentes, dont les valeurs sont comprises entre un minimum $\phi=0.55$, correspondant à l'empilement le plus lâche 'Random Loose Packing' et un maximum $\phi=0.64$, correspondant à l'empilement le plus dense 'Random Close Packing'. La fraction volumique d'un empilement peut évoluer d'une configuration à une autre si on l'excite par des vibrations.

I.3.1. Types des empilements

Un empilement est une collection de grains. Les types des empilements les plus utilisés sont :

- **Empilement de sphères mono-disperses** : Le cas des empilements de sphères de même taille est certainement le système le plus étudié. Non seulement il représente le modèle le plus simple d'empilement, mais peut constituer aussi un modèle permettant de comprendre la structure des cristaux. La fraction volumique de ce type de systèmes est d'environ $\phi=0,74$ [1].
- **Empilement de sphères poly-disperses** : Ce genre de mélanges contient des sphères de tailles différentes.

I.4. Les milieux granulaires vibrés

La tendance d'un milieu granulaire à s'agglomérer sous l'effet de la dissipation d'énergie s'observe aussi lorsque que l'on fournit de l'énergie aux grains par des vibrations (verticales ou horizontales). Une expérience typique consiste en une colonne verticale de billes contenues dans un tube posé sur un plateau vibrant dont le mouvement est décrit par $z(t) = A \cos(\omega t + \varphi)$. Si l'on secoue énergiquement un tas de billes, le milieu devient très agité avec des particules bougeant dans tous les sens et interagissant par collisions. Dans ce régime que l'on appelle collisionnel, le milieu ressemble à un gaz (l'énergie fournie par la vibration est entièrement dissipée par les collisions). Les vibrations mécaniques sont utilisées fréquemment pour provoquer une défaillance des contacts entre grains par friction, ce qui modifie de façon dramatique leurs propriétés rhéologiques. Dans un système vibrant, nous pouvons observer divers phénomènes propres à la matière granulaire, tels que la convection, la ségrégation, le compactage et l'affaiblissement du frottement [6].

L'orientation des vibrations est définie par rapport à la direction de l'accélération de la pesanteur \vec{g} , elles sont verticales si leur direction est colinéaire à \vec{g} et horizontales si celle-ci lui est perpendiculaire.

I.4.1. Ségrégation par vibrations verticales

Lorsque l'on fait vibrer un milieu granulaire polydisperse, les gros grains se retrouvent souvent à la surface libre. C'est ce qui est observé par exemple lorsqu'au petit déjeuner on ouvre un paquet de céréales neuf : les gros flocons sont à la surface tandis que les raisins secs restent au fond. La ségrégation par vibrations a donné lieu à de nombreuses expériences qui ont exhibé l'existence de plusieurs mécanismes pouvant expliquer la remontée des grosses particules [1]. Parmi ces mécanismes :

- **Percolation des petits grains sous les gros lors de la vibration** : Dans la phase de vol libre de la vibration, des petits grains peuvent s'infiltrer sous les gros les poussant ainsi vers la surface libre [1] où les plus petits passent à travers les trous créés par les plus grands [8].
- **Mouvement collectif de convection dans le récipient** : Lorsque l'on fait vibrer un récipient rempli de grains, des rouleaux se forment confinés près du mur, les grains remontent au centre et redescendent sur les côtés.

Les deux phénomènes sont souvent présents ensemble lors de la vibration d'un milieu granulaire, ce qui rend l'interprétation des expériences de ségrégation en vibrations délicate [1].

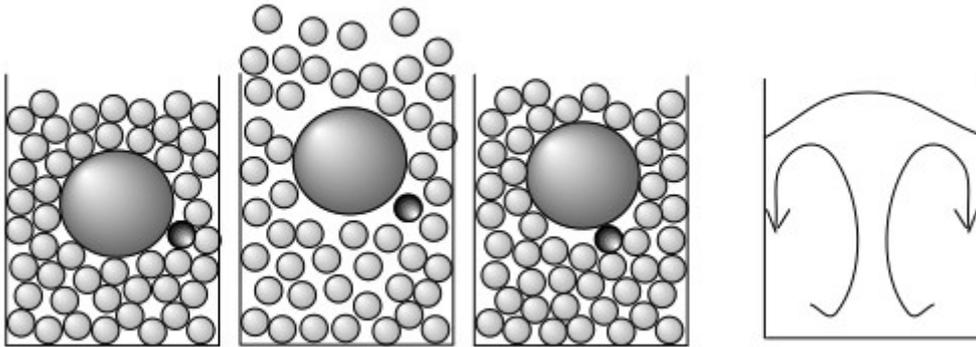


Fig I-11 : Ségrégation sous vibrations vertical [f-11]

I.5. L'effet des noix de Brésil inverse

Le mouvement de convection des plus petites particules, font remonter les plus grosses. Contrairement à ces observations communes, Shinbrot [9] a cependant observé qu'une grosse particule, en fonction de sa densité ou sa taille, pourrait également couler au fond du conteneur, au lieu de remonter, c'est l'**effet inverse des noix de Brésil**, en anglais «**Reverse Brazil Nuts Effect**» ou **RBNE**.

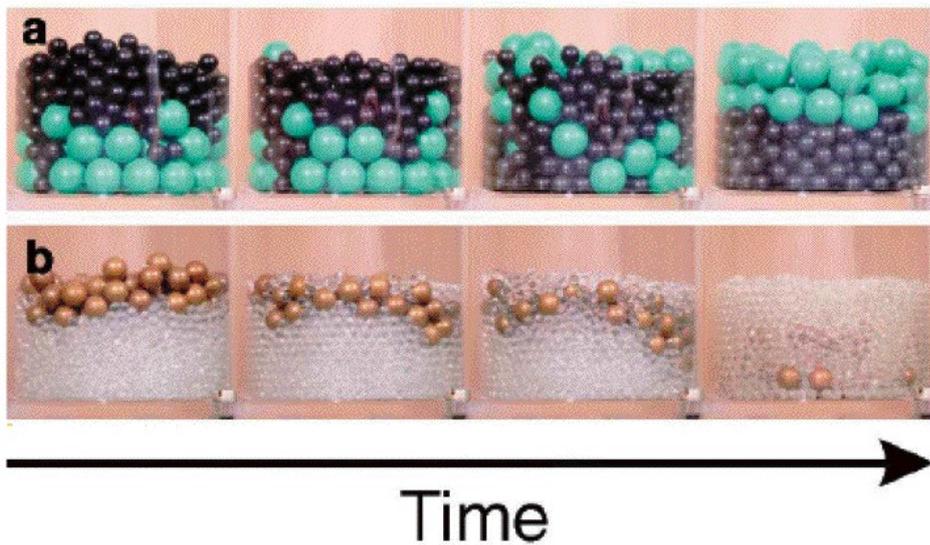


Figure I-12 : (a) L'effet des noix de Brésil BNE .
(b) l'effet inverse des noix de Brésil RBNE. [f-12]

Des études numériques récentes ont montré que les deux effets, la montée ou la descente des plus grosses particules, peuvent se produire en fonction d'une relation simple entre les rapports de taille et de densité des particules et qui prédit la limite entre les deux effets [9]:

$$\frac{d_l}{d_s} = \left(\frac{\rho_l}{\rho_s}\right)^{-1} \quad (\text{I.1}) \quad \text{et} \quad \Gamma = \frac{A(2\pi f)^2}{g} \quad (\text{I.2})$$

où : d_l, d_s, ρ_l, ρ_s sont les diamètres et les densités des grandes et petites particules, respectivement (s: small, l: large).

Γ, g, A et f sont l'accélération réduite, l'accélération de la pesanteur, l'amplitude et la fréquence des vibrations, respectivement.

Dans l'équation (I.1), si le rapport des diamètres est plus petit que l'inverse du rapport des densités, le mélange de particules devrait montrer l'effet des noix de Brésil, le contraire exhibe l'effet des noix de Brésil inverse.

À des accélérations suffisamment fortes ($\Gamma > 3.5$), toutes les petites particules peuvent monter plus haut que les plus grosses. Une fois au-dessus, elles se comportent comme un gaz granulaire et l'effet inverse des noix de Brésil est établi. On trouve que la transition entre l'effet des noix et son effet inverse dépende de l'accélération.

Les expériences de A. P. J. Breu et *al.* [9] confirment que la théorie de Hong et *al.* [8] est capable de prédire correctement l'apparition de l'effet inverse des noix de Brésil. Cependant, si les propositions théoriques ne sont pas remplies, le scénario entier change. Ils ont choisi des billes sphériques de différents diamètres et matériaux afin d'observer la transition de l'effet des noix de Brésil à sa forme inversée. Le sens de la démixion dépend fortement de l'excitation externe, de sorte qu'il est possible de basculer entre les deux effets pour un rapport de densité massique donné [9].

L'effet inverse n'est expliqué ni par la description de la convection, ni par celle de la percolation. En fait, l'effet RBNE s'est avéré encore plus complexe. Pour un intrus à densité fixe, il existe un seuil de taille au-dessus duquel les intrus s'élèvent et en-dessous duquel il coule. Les traceurs de tailles fixes montent avec une vitesse qui augmente puis diminue de manière non monotone à mesure que la densité de l'intrus augmente [7].

Chapitre II

Méthode des éléments discrets DEM

II.1. Introduction

Nous avons opté dans cette étude pour l'approche des éléments discrets, en anglais, *Discrete Elements Method (DEM)*. La particularité de cette approche est de calculer la trajectoire de chacun des grains en prenant en compte les interactions avec ses voisins. La description des interactions constitue donc un aspect essentiel de la modélisation car elle conditionne la prédiction du comportement global d'un matériau granulaire [4]. Après une présentation générale de l'approche en éléments discrets, on s'intéressera à la description des interactions en prenant en considération les phénomènes physiques intervenant à l'échelle des grains. On détaillera ensuite, l'approche numérique liée à la méthode de résolution choisie.

Les principales méthodes en éléments discrets, qui consistent à intégrer le mouvement des grains (méthodes newtoniennes), peuvent être classées en deux grandes familles [4]:

- les approches de **sphères dures** basées sur une mécanique non régulière qui prend en compte les chocs sans interpénétration des grains.
- les approches de **sphères molles** permettant la déformation des grains.

L'approche de type sphères dures basée sur la méthode *Event Driven* (ED), pilotée par les événements, qui ne gère qu'une seule interaction à la fois avec une discrétisation non régulière du temps. Elle est réservée à la simulation de gaz ou de systèmes de corps articulés. Par contre, Les approches de type sphères molles sont basées sur l'approche Dynamique Moléculaire (MD). Ces approches sont utilisées dans l'étude des liquides, des cristaux, ou encore des macro-molécules à l'échelle des atomes. Cundall et Strack [4] ont étendu cette approche au cas de corps solides par l'adjonction de lois de contact et de frottement. Aujourd'hui, cette approche est la plus employée dans la modélisation des milieux granulaires et donc elle fait l'objet d'un grand nombre d'extensions [4].

II.2. Équation de mouvement

Un matériau granulaire contient un grand nombre de particules, elles interagissent entre elles par des forces à courte portée (contact mécanique) [3].

La dynamique du milieu granulaire est exprimée par l'équation de mouvement de Newton pour le centre de masse et les angles d'Euler de ces particules [3] :

$$\frac{\partial^2 \vec{r}_i}{\partial t^2} = \frac{1}{m_i} \vec{F}_i(\vec{r}_j, \vec{v}_j, \vec{\varphi}_j, \vec{\omega}_j) \quad (i=1,2,3,4,\dots,N)$$

$$\frac{\partial^2 \vec{\varphi}_i}{\partial t^2} = \frac{1}{J_i} \vec{M}_i(\vec{r}_j, \vec{v}_j, \vec{\varphi}_j, \vec{\omega}_j) \quad (j=1,2,3,\dots,N)$$

I

où \vec{F}_i : les forces, J_i : moment d'inertie

\vec{M}_i : moment rotationnel, m_i : masse de particule i .

\vec{r}_j : position de particule i , $\vec{\varphi}_j$: orientation angulaire, $\vec{v}_j, \vec{\omega}_j$: les vitesses.

II.2.1. Frottement statique

Supposons une masse m reposant sur un plan incliné d'angle α . Son poids a une composante normale $F^n = mg \cos(\alpha)$ et une composante tangentielle $F^t = mg \sin(\alpha)$. Tant que $|\vec{F}^t| \leq \mu |\vec{F}^n|$ avec μ le coefficient de friction de Coulomb, la particule reste au repos. La force de friction statique (la force tangentielle) prend toute valeur nécessaire pour maintenir la particule au repos. Cette propriété est soumise à la condition que la force de friction statique ne puisse pas dépasser la limite $\mu |\vec{F}^n|$ [3].

II.2.2. Les forces de contact

La force totale appliquée sur la particule i est déterminée par la combinaison de son propre poids et de la force de contact \vec{F}_{ij} avec la particule j , constituée de la partie normale \vec{F}_{ij}^n et de la partie tangentielle \vec{F}_{ij}^t [6]:

$$\vec{F}_{ij} = \vec{F}_{ij}^t + \vec{F}_{ij}^n \quad (\text{II-1})$$

Dans le milieu granulaire, pour une paire de deux particules (i, j) de diamètres d_i et d_j , on dit qu'elles sont en contact mécanique si la somme de leurs rayons dépasse la distance séparant leurs centres [3]:

$$\delta_{ij} \equiv \frac{d_i + d_j}{2} - |\vec{r}_i - \vec{r}_j| > 0 \quad (\text{II-2})$$

avec: δ_{ij} la compression mutuelle des particules i et j .

$|\vec{r}_i - \vec{r}_j|$ distance entre les centres des particules i et j .

La force de contact normale \vec{F}_{ij}^n contient une partie élastique de constante normale k^n de type Hooke et d'une partie visqueuse γ^n telle que [6]:

$$\vec{F}_{ij}^n = \Theta(\delta_{ij}) (k^n \delta_{ij} - \gamma^n v_{ij}^n) \vec{n}_{ij} \quad (\text{II-4})$$

$\Theta(x)$ est la fonction de pas de Heaviside $\Theta(x) = 1$ si $x \geq 0$ et $\Theta(x) = 0$ autrement.

La vitesse relative v_{ij}^n sont données par [6]: $v_{ij}^n = v_{ij} \cdot \vec{n}_{ij}$ (II-3)

où: $\vec{v}_{ij} = \vec{v}_i - \vec{v}_j$, $\vec{n}_{ij} = \vec{r}_{ij} / |\vec{r}_{ij}|$ et $\vec{r}_{ij} = \vec{r}_i - \vec{r}_j$.

D'autre part, la force de contact tangentielle \vec{F}_{ij}^t est modélisée avec un ressort tangential de constante k^t tel que [6]:

$$\vec{F}_{ij}^t = -k^t \vec{u}_{ij} \quad \text{avec} \quad \vec{u}_{ij} = \int (\vec{v}_{ij}^t - \frac{(\vec{u}_{ij} \cdot \vec{v}_{ij}) \vec{r}_{ij}}{|\vec{r}_{ij}|^2}) dt \quad (\text{II-5})$$

où le déplacement tangential \vec{u}_{ij} est obtenu en intégrant les vitesses relatives tangentielles \vec{v}_{ij}^t :

$$\vec{v}_{ij}^t = (\vec{v}_{ij} \cdot \vec{t}_{ij}) \vec{t}_{ij} - \frac{1}{2} (d_i \vec{\omega}_i + d_j \vec{\omega}_j) \times \vec{n}_{ij} \quad \text{où} \quad \vec{t}_{ij} = \left(\frac{-r_{ij,y}}{|\vec{r}_{ij}|}, \frac{-r_{ij,x}}{|\vec{r}_{ij}|} \right) \quad (\text{II-6})$$

En utilisant les forces de contact introduites ci-dessus, les accélérations de translation et de rotation de la i -ème particule sont déterminées par la deuxième loi de Newton [6]:

$$m_i \vec{r}_i = \sum_j \vec{F}_{ij} + m_i \vec{g} \quad \text{et} \quad \vec{M}_i = J_i \vec{\omega}_i \quad (\text{II-7})$$

où m_i , J_i , $\vec{\omega}_i$ et \vec{g} : sont la masse, le moment d'inertie et l'accélération angulaire de la particule i et l'accélération de la pesanteur.

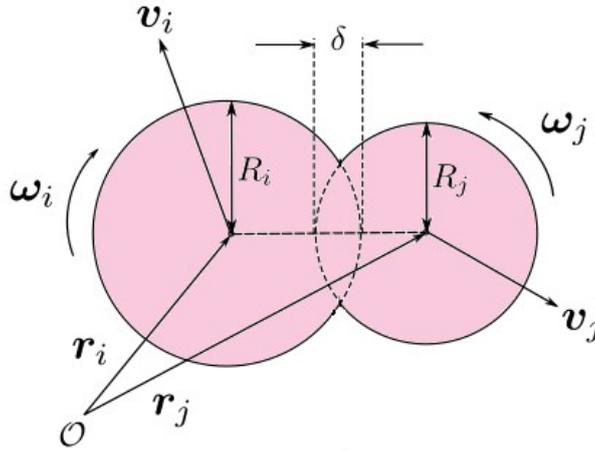


Figure II-1 : contact de deux grains sphériques [II-1]

II.2.3. Temps de collision

Pour une particule donnée, le temps entre deux collisions successive est égal au temps qu'il faut pour parcourir la distance interparticule [1]. Lorsque les particules granulaires entrent en collision, une partie de l'énergie cinétique de leur mouvement relatif est dissipée (transformé en chaleur). Les déformations des particules sont supposées être petites et leurs formes (idéales) sphériques est supposée être conservée en moyenne après de nombreuses collisions, on dit que le matériau est

élastique. Cette perte d'énergie est caractérisée par le coefficient de restitution défini comme suit [3]:

$$e^n = \exp\left(\frac{-\gamma^n t_{col}}{m^*}\right) \quad (\text{II-8})$$

où m^* : la masse réduite $m^* = \frac{m_i m_j}{m_i + m_j}$, γ^n : constante d'amortissement normale.

Pour les collisions inélastiques des grains, le coefficient de restitution e^n est défini comme le rapport des vitesses relatives normale avant et après collision [6], l'élasticité de l'impact est décrite par le coefficient de restitution normal [5] :

$$0 < e^n = \frac{v_n^f}{v_n^i} < 1 \quad (\text{II-9})$$

avec v_n^f, v_n^i : vitesses après collision (finale) et avant (initiale)

D'une manière générale, dans un milieu granulaire, les mécanismes possibles de dissipation de l'énergie sont la déformation plastique, la viscoélasticité du matériau et aussi les ondes élastiques existant lors des impacts [5].

La durée de collision: Dans les milieux granulaires secs, lors de la collision des particules, il n'y a pas de force attractive et les particules se séparent et s'éloignent les unes des autres [3], ce temps s'écrit:

$$t_{col} = \frac{\pi}{\sqrt{\frac{2k^n}{m^*} - \frac{(\gamma^n)^2}{m^{*2}}}} \quad (\text{II-10})$$

Pour des systèmes à grand nombre de particules, il est difficile de résoudre le système (I) analytiquement, on préfère faire appel à la solution numérique. Le calcul numérique des trajectoires des particules du système est appelée **la dynamique moléculaire** [3], et qui exposée ci-dessous.

Les trajectoires des particules sont déterminées en intégrant numériquement l'équation du mouvement pour toutes les particules [3].

II.3. Approche des Éléments Discrets (DEM)

Les approches discrets ou en éléments discrets, s'intéressent à l'identité propre de chaque grain et aux interactions de ce dernier avec ses voisins. La réponse macroscopique du milieu est le résultat de la combinaison des comportements locaux. L'approche en éléments discrets reste un outil efficace d'exploration du comportement de milieu granulaire [4].

II.3.1. Principe de DEM

La méthode des éléments discrets consiste à intégrer le mouvement de chaque grain [4].

■ Schéma d'intégration

Ayant établi la façon dont sont positionnés les grains, le schéma d'intégration explicite *Velocity Verlet* peut être décrit, on estime alors la position des grains au temps $(t + \delta t)$ [4]:

$$\vec{x}_i(t + \delta t) = \vec{x}_i(t) + \vec{v}_i(t) \delta t + \frac{\vec{a}_i(t)}{2} \delta t^2 \quad (\text{II-11})$$

La vitesse linéaire et la vitesse de rotation des grains au temps $(t + \delta t/2)$ sont [4]:

$$\vec{v}_i(t + \frac{\delta t}{2}) = \vec{v}_i(t) + \frac{\vec{a}_i(t)}{2} \delta t \quad \text{et} \quad \vec{\omega}_i(t + \frac{\delta t}{2}) = \vec{\omega}_i(t) + \frac{\vec{\dot{\omega}}_i(t)}{2} \delta t \quad (\text{II-12})$$

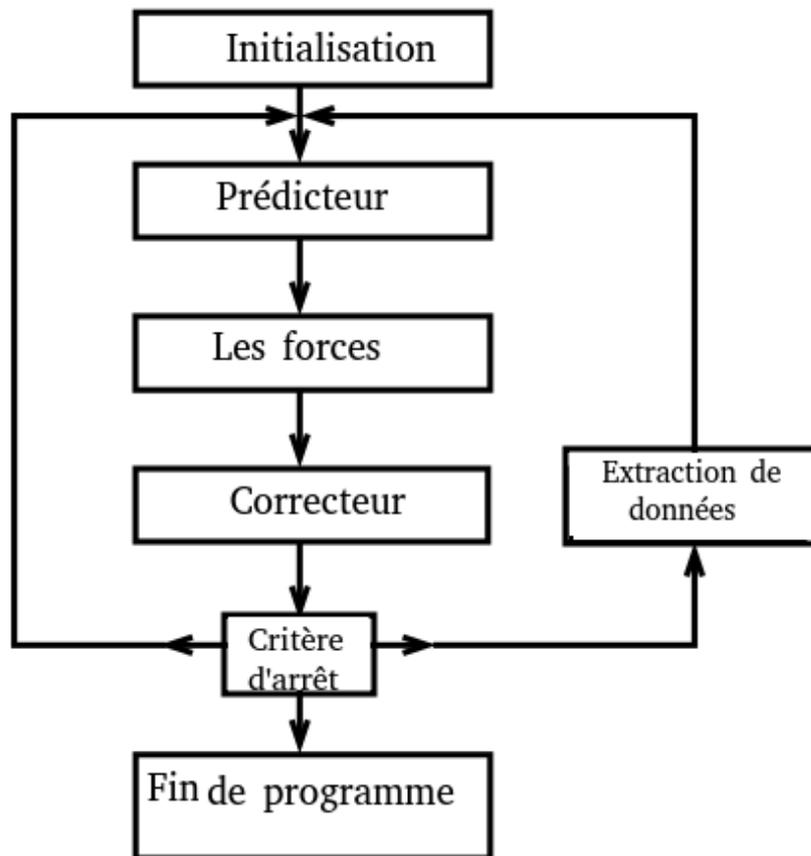
où: \vec{a}_i et $\vec{\dot{\omega}}_i$ sont l'accélération linéaire et l'accélération de rotation de la particule i , respectivement. Ces nouvelles positions, vitesses et accélérations permettent d'obtenir, par l'intermédiaire des lois d'interaction, les forces agissant sur chacun des grains. La force \vec{F}_i et le moment \vec{M}_i résultant au centre des grains sont alors calculés. L'accélération linéaire et l'accélération de rotation sont obtenues par le principe fondamental de la dynamique [4]:

$$\vec{a}_i = \frac{\vec{F}_i}{m_i} + \vec{g} \quad \text{et} \quad \vec{\dot{\omega}}_i = \frac{\vec{M}_i}{J_i} \quad (\text{II-13})$$

II.3.2. Dynamique moléculaire (DM)

L'idée de la dynamique moléculaire remonte aux travaux d'Alder et à Wainwright en 1957 [3]. Ils ont étudié la physique des gaz de sphères dures. Depuis lors, la technique de la dynamique moléculaire a été régulièrement développée et fait aujourd'hui partie des outils numériques les plus puissants et les mieux établis des physiciens, des chimistes et des ingénieurs [3]. Des travaux novateurs dans le domaine de la dynamique moléculaire des matériaux granulaires ont été réalisés par Cundall, Haff, Herrmann, Walton et bien d'autres [5]. Cette technique sert à intégrer l'équation de mouvement des particules numériquement, cela nécessite la spécification des forces qui agissent sur les grains [5].

II.3.2.1. Algorithme de dynamique moléculaire : La simulation par dynamique moléculaire peut être effectuée selon l'algorithme suivant [3]:



1. Initialisation: les coordonnées des particules et leurs dérivées temporelles sont lues à partir du fichier d'initialisation. Le fichier d'initialisation spécifie en outre le type de chaque particule, c'est-à-dire, s'il s'agit d'une particule du matériau granulaire ou d'une particule des parois.

2. Prédicteur: Calcul des coordonnées et des dérivées temporelles des particules à l'instant $(t + \delta t)$ comme une expansion de Taylor des valeurs à l'instant présent t . Le prédicteur est la première partie du schéma d'intégration prédicteur – correcteur.

3. Les forces: (a) Sélection des paires d'interaction. Cette étape affecte de manière significative l'efficacité globale de la simulation .

(b) Calcul des forces d'interaction par paire entre les particules et entre les particules et les murs, sur la base de la prédiction des coordonnées et des vitesses.

4. Correcteur: La deuxième étape du schéma d'intégration corrige les coordonnées prédites et les dérivées temporelles à l'aide des efforts calculés à l'étape 3.

5. Extraction de données: Les coordonnées, les vitesses et les forces de toutes les particules sont enregistrées à des intervalles de temps réguliers et les données peuvent être traitées ultérieurement.

6. Fin du programme: le programme est arrêté à un temps prédéfini t_{fin} . Sinon, la simulation se poursuit à l'étape 2 et ainsi de suite.

II.3.3. Liste de Verlet

Dans notre étude, nous nous intéressons aux collisions d'un grain avec ses voisins et avec le conteneur. Si on utilise la formule (II-2) pour intégrer la trajectoire de chaque grain i avec les $N-1$ grains restants, on doit intégrer $N(N-1) \approx N^2$ équations. À fin de diminuer le temps de simulation et optimiser l'efficacité des calculs, nous avons opté pour l'algorithme dit liste de Verlet qui enregistre la liste des voisins de chaque grain. C'est un algorithme basé sur une propriété simple de la dynamique des particules ; les relations de voisinage entre particules ne changent que lentement ; deux particules proches à un moment donné resteront proches l'une de l'autre, au moins pendant quelques pas de temps. Deux particules sont considérées comme étant voisines si la distance séparant leurs surfaces est inférieure à une constante appelée **distance de Verlet**, les distances de toutes les paires de particules proches sont calculées. Pour deux particules sphériques de rayon on écrit [3]:

$$(|\vec{r}_i - \vec{r}_j| - R_i - R_j) < \text{distance de Verlet}$$

pour chaque particule on prend ses proches voisins donc on forme une **liste des proches voisins** .

Au cours de la simulation, les relations de voisinage des particules changent et listes de voisinage doivent être reconstituées de temps à autre [3]. Avec l'aide de cet algorithme, on passe d'un système de N^2 équations à intégrer, à $N \log(N)$ équations, diminuant ainsi le temps de simulation.

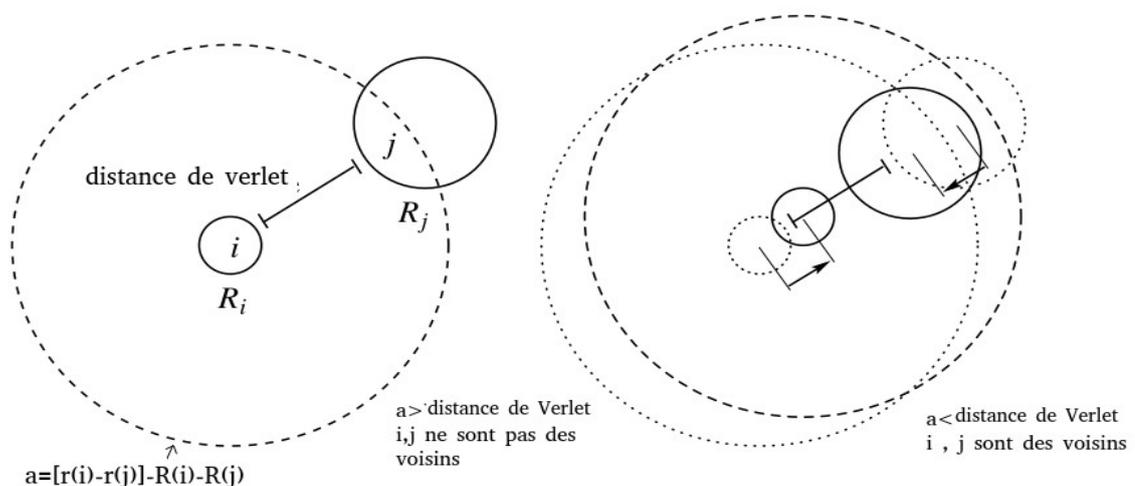


Figure II-2 : distance de Verlet [II-2]

II.3.4. Code de simulation – Yade DEM

Yade est un ensemble d'outils extensibles à code source ouvert pour modèles numériques discrets, axé sur la méthode des éléments discrets (DEM). Les parties de calcul sont écrites en C++ à l'aide d'un modèle orienté objet flexible, permettant une implémentation indépendante de nouveaux algorithmes et interfaces. Python est utilisé pour la construction rapide et concise de scènes, le contrôle de simulation, le post-traitement et le débogage.

Yade est téléchargeable sur yade-dem.org, où on trouve une documentation assez complète de ce programme. La construction, les tests de régression et la distribution des packages sont hébergés sur les serveurs du groupe géo-mécanique Grenoble des laboratoires 3SR et UMS Gricad.

Depuis mars 2012, Yade utilise GIT en tant que VCS. Les principales branches sont actuellement sur GitLab (migré de GitHub en janvier 2019) [II-2].

II.4. Simulation granulaire

Les simulations sur ordinateur ont un rôle important pour les problèmes qui ne pourraient être résolus que par des méthodes approximatives ou pourraient être assez difficiles à résoudre. En ce sens, la simulation sur ordinateur est un test de théories et, historiquement, les simulations ont en effet fait la distinction entre des approches bien fondées telles que les théories des équations intégrales de Hansen et McDonald 1986 [11] et des idées plausibles mais, en définitive, moins fructueuses. Les résultats des simulations sur ordinateur peuvent également être comparés à ceux d'expériences réelles. En premier lieu, il s'agit d'un test du modèle sous-jacent utilisé dans une simulation sur ordinateur. Finalement, si le modèle est bon, le simulateur espère offrir des perspectives à l'expérimentateur et aider à l'interprétation des nouveaux résultats. La simulation joue alors un double rôle, en tant que pont entre les modèles et les prévisions théoriques, d'une part, et entre les modèles et les résultats expérimentaux, d'autre part. En raison de ce rôle de liaison et de la manière dont les simulations sont conduites et analysées, ces techniques sont souvent appelées «**expériences sur ordinateur**»[11].

Pour une autre raison, les expériences avec des appareils d'ingénierie sont souvent coûteuses, prennent du temps et sont même parfois dangereuses. Dans de tels cas, les simulations numériques peuvent compléter ou remplacer partiellement les expériences. Il faut savoir que la simulation d'un milieu granulaire est coûteuse en temps de calcul due aux interactions particulière des particules granulaires. Les particules n'exercent des forces sur les unes que lorsqu'elles sont en contacte mécanique [3].

II.4.1. Systèmes étudiés

■ Pré-traitement d'un système avec traceur

Notre système se compose d'un conteneur de forme cylindrique rempli jusqu'à 1/3 de sa hauteur par des petits grains de taille moyenne $d=1$ avec une polydispersité de 20%. Le cylindre est de hauteur $H=60 d$ et de diamètre $=20 d$. On dépose sur le fond du conteneur un gros grain qui prend les tailles $d=2, 3, 4$.

Choix des paramètres de simulation : En se basant sur la loi de Hooke, les paramètres des lois de contact sont choisis de la façon suivante [II-3]:

- La loi de contact est visco-élastique dans la direction normale et visco-élastique à friction dans la direction tangentielle.
- Le contact normal est modélisé comme un ressort de rigidité équivalente k^n , placé en parallèle avec un amortisseur visqueux de viscosité équivalente γ^n .
- Quant au contact tangentiel, il est constitué d'un système de ressorts à pointillés (en parallèle) avec une rigidité équivalente k^t et une viscosité γ^t en série avec un patin de coefficient de friction μ . Ce coefficient peut être évalué comme $\tan(\min(\varphi_{ij}))$ où φ_{ij} est l'angle de frottement entre la particule i et j , mais que nous pouvons aussi fixer à priori.

La taille du système : Le volume du cylindre est $V_c = HS = H \pi (\text{diamètre}/2)^2$ et le volume d'un grain est $V_0 = \frac{4}{3} \pi (\frac{d}{2})^3$. Le tas dans le cylindre doit avoir une compacité de l'ordre de 0,54 pour un

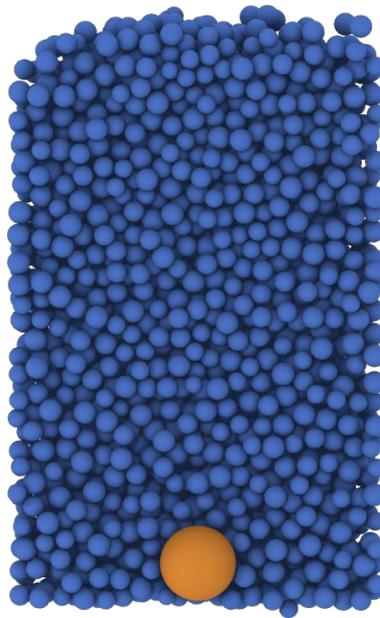
milieu dense, soit $\Phi = \frac{V}{V_c} \approx 0,5$ avec $V = V_c \cdot (0,5) = \sum_{i=1}^N V_i \simeq N \cdot V_0$ où V : volume du tas.

Le nombre de grains est alors:
$$N = \frac{V_c \cdot 0,5}{V_0} = \frac{HS(0,5)}{\frac{4}{3} \pi (\frac{d}{2})^3} = \frac{60 d (0,5) \pi (\frac{20 d}{2})^2}{\frac{4}{3} \pi (\frac{d}{2})^3} = 19440 \text{ grains}$$

On veut remplir le cylindre à 1/3 de sa hauteur:
$$\frac{N}{3} = \frac{19440}{3} = 6480 \text{ grains}$$

La surface libre du tas de notre système se trouve approximativement à $h=20 d$.

Au fond du cylindre, nous plaçons un grain de plus grande taille et de même propriétés mécaniques que les grains du tas, nous appelons cette dernière le traceur ou l'intrus. Le mélange est soumis à des secousses verticales sinusoïdales $z(t) = A \cos(\omega t + \phi)$ avec $\omega = \frac{2\pi}{T}$, caractérisées par l'amplitude A et la période T .



Coupe verticale d'un empilement cylindrique avec un traceur de taille 4 avant les oscillations

Après avoir fixé les dimensions du conteneur et le nombre des grains, le type de matériau sera défini par les propriétés mécaniques que nous avons choisies. Dans nos simulations, d , m et g prennent la valeur 1: $m, g, d=1$. Ainsi nous travaillons dans un système d'unités réduites où les distances sont mesurées en taille de grain d et le temps en unité de $\sqrt{\frac{d}{g}}$.

Propriétés mécaniques du système : Le traceur, les petits grains et le cylindre se composent du même matériau (même propriétés mécaniques) défini par les paramètres:

Paramètre	symbole	valeur
Densité	ρ	1,91
Coefficient de friction grain/paroi	μ_{gp}	0,5*
Coefficient de friction grain/grain	μ_{gg}	0,5*
constante d'élasticité normale	k^n	2e5
constante d'élasticité Tangentielle	k^t	1e5
constante visqueuse normale	γ^n	33.5
constante visqueuse Tangentielle	γ^t	16.75

Tableau : Propriétés mécaniques du système.

*:sauf précision de notre part

Pas de temps DM: le pas de temps d'intégration des équations de mouvement doit être plus petit que le temps de collision [2] de l'équation (II-10). Dans la littérature, il est courant qu'on prenne le

pas de temps comme $\Delta t_{MD} = \frac{t_{col}}{50} = 10^{-4}$, soit $\Delta t_{MD} = 10^{-4}$ pour le matériau de notre choix.

Temps de simulation : chacune de nos simulations dure 512 périodes de vibration: $t_{simul} = 512T$

et le temps de sauvegarde $t_{sauvd} = \frac{T}{4}$, c'est-à-dire les propriétés du traceur sont sauvegardées

chaque 1/4 de période.

La relaxation : En générale, après avoir fixé les paramètres de la simulation, il est nécessaire d'effectuer une relaxation de tout le système pour atteindre un état stationnaire avant l'introduction des vibrations.

1. Première expérience : On secoue le cylindre à différentes accélérations réduites, en fixant l'amplitude ($A=2$). Nous nous intéressons à l'évolution temporelle de la position z des traceurs de taille 2, 3 et 4 à des accélérations réduites $\Gamma=1, 2, 3, 5, 9$, puis nous comparons les temps de remontée des trois tailles pour chaque accélération.

2. Deuxième expérience : Pour mettre en évidence le rôle de la percolation dans l'effet de noix de Brésil, on secoue le système avec différentes amplitudes tout en gardant la même accélération réduite. Par défaut on choisit l'accélération $\Gamma=3$ et les amplitudes $A=0.7, 1.2, 2.0, 2.7, 6.0$.

3. Troisième expérience : Dans cette dernière expérience, on s'intéresse au rôle des murs sur le mouvement des traceurs. Ces derniers subissent une vibration verticale d'amplitude $A=2$ et $\Gamma=3$. Le coefficient de friction entre grain-murs prendra les valeurs suivantes $\mu_{gp}=0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 0.9$.

■ Pré-traitement – Biphase:

Dans ce cas, on remplit le même conteneur cylindrique cité ci-dessus avec deux familles de grains de mêmes propriétés mécaniques que les grains de l'expérience du traceur. Le diamètre moyen des grains de la première famille est gardé constant $d=1$, tandis que pour la deuxième famille, ce dernier prendra les valeurs $d=2, 3$ et 4 .

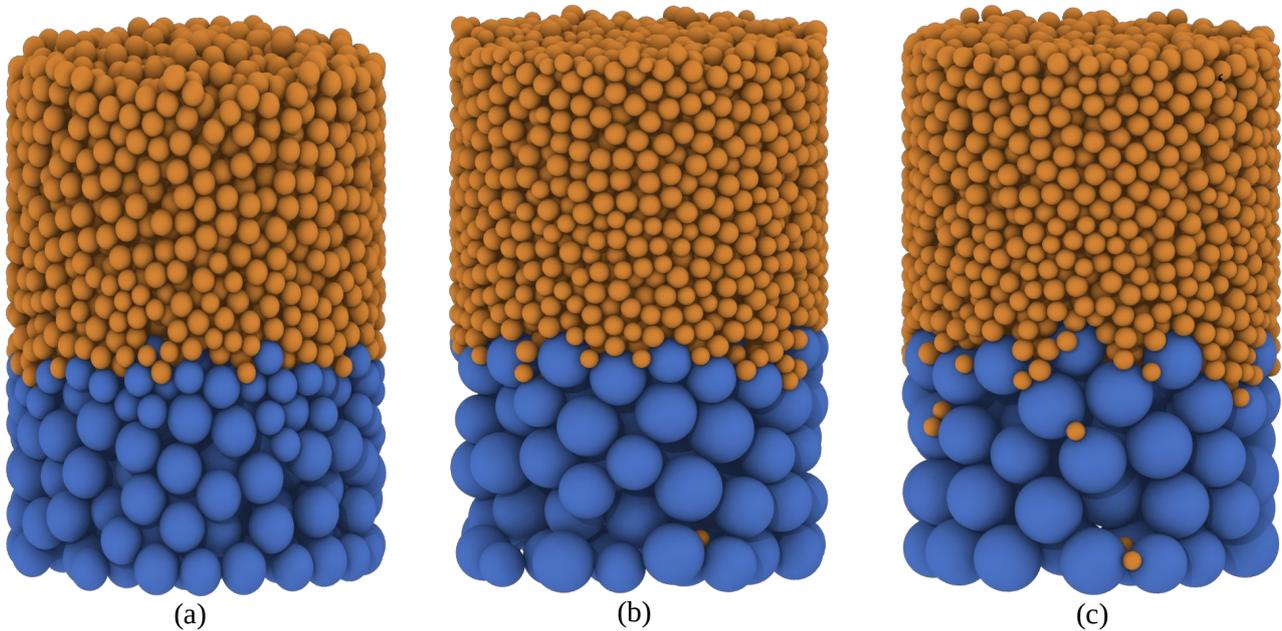
1. Première expérience : Ici on suit les mêmes étapes que la première expérience du cas du traceur, par contre on trace l'évolution temporelle des centres de masse des deux familles de grains.

2. Deuxième expérience : On étudie l'évolution temporelle des centres de masse des deux familles pour un rapport de taille 4 et $\Gamma=3$ à différentes amplitudes $A= 0.7, 1.2, 2.0, 2.7, 6.0$.

3. Troisième expérience : De la même façon que la deuxième expérience ci-dessus, on trace l'évolution temporelle des centres de masse des deux familles de grains en choisissant des coefficients de frictions paroi-grain différents.

Les centres de masse des deux familles sont calculés par la formule:
$$z_{cm} = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^N m_i z_i$$

où: m_i , z_i et M sont la masse du grain i , sa position verticale et la masse totale des grains de chaque famille, respectivement.



(a) : Système biphasique de rapport de taille 2, (b) : Système biphasique de rapport de taille 3, (c) : Système biphasique de rapport de taille 4.

II.4.2. Le temps CPU

Le temps CPU correspond à la durée exacte pendant laquelle le CPU a traité des données pour un programme ou un processus spécifique. Les programmes et les applications n'utilisent généralement pas le processeur à 100% de ses capacités de calculs, une partie du temps de calcul est consacrée aux opérations d'entrée/sortie et à l'extraction et au stockage de données sur la RAM ou le périphérique de stockage. Le temps CPU n'est utilisé que lorsque le programme utilise réellement le CPU pour effectuer des tâches telles que des opérations arithmétiques et logiques [15].

Dans les cas que nous étudions ici, le temps réel pour simuler 256 périodes pour un système type contenant 6400 grains est de l'ordre de 7465 m, soit 125 heures sur notre machine dont les propriétés sont :

Système : Ubuntu 18.04.2 LTS, 64-bit.

Mémoire : 1,8 Gio

Processeur : Intel® Pentium(R) CPU N3520 @ 2.16GHz × 4.

Chapitre III

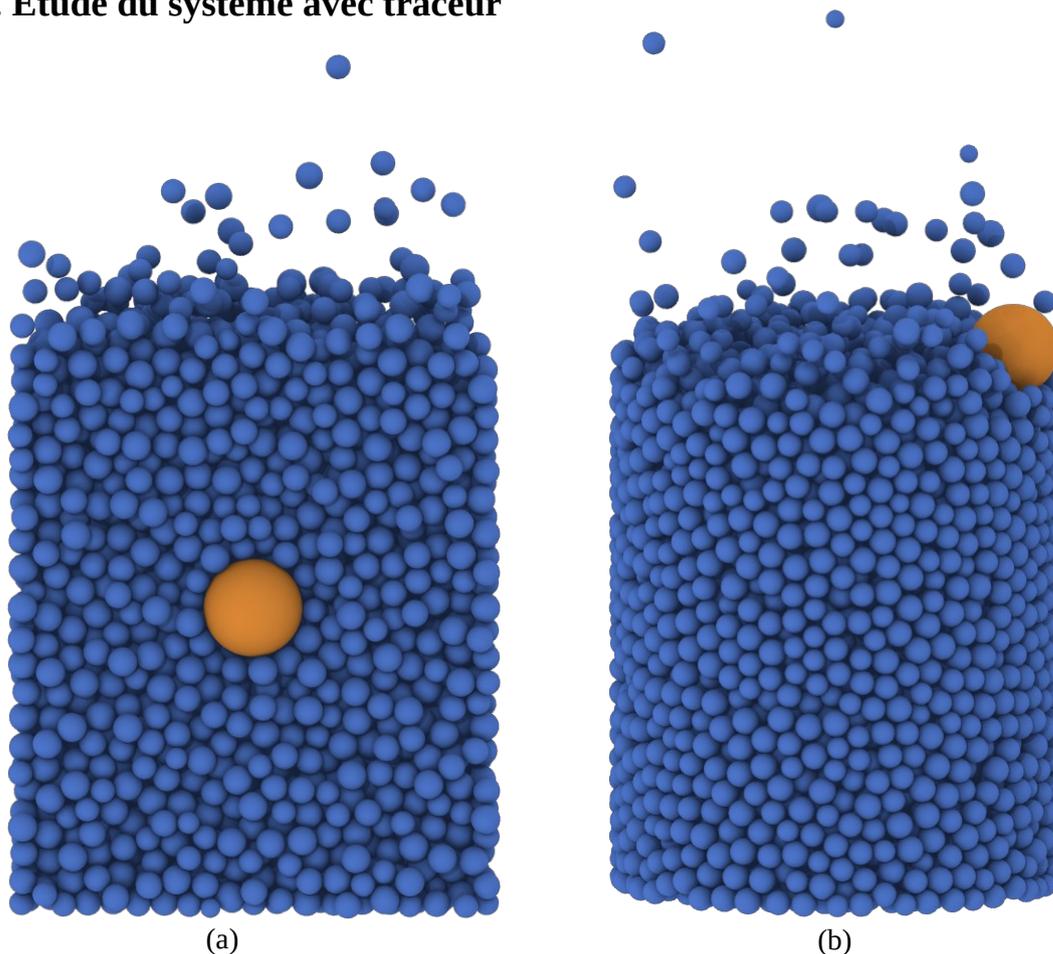
Résultats et discussion

III.1 Introduction

Les résultats présentés dans ce chapitre sont obtenus par des simulations numériques type éléments discrets DEM en utilisant le code YADE présentés dans le chapitre 2.

Avant d'analyser les résultats de l'effet des noix de Brésil d'un empilement bidisperse, nous nous intéressons au mouvement d'un traceur dans une collection de petits grains soumis à des oscillations verticales.

III.2. Étude du système avec traceur



Système avec traceur de taille 4 à deux instants différents.
 (a) coupe verticale du cylindre pendant les vibrations
 (b) vue globale du cylindre à la fin des vibrations

III.2.1. Première expérience : Comme cité dans le chapitre 2, le diamètre du traceur prendra trois valeurs 2, 3 et 4. Pour chaque taille du traceur, cinq accélérations réduites $\Gamma=1, 2, 3, 5, 9$ seront étudiées.

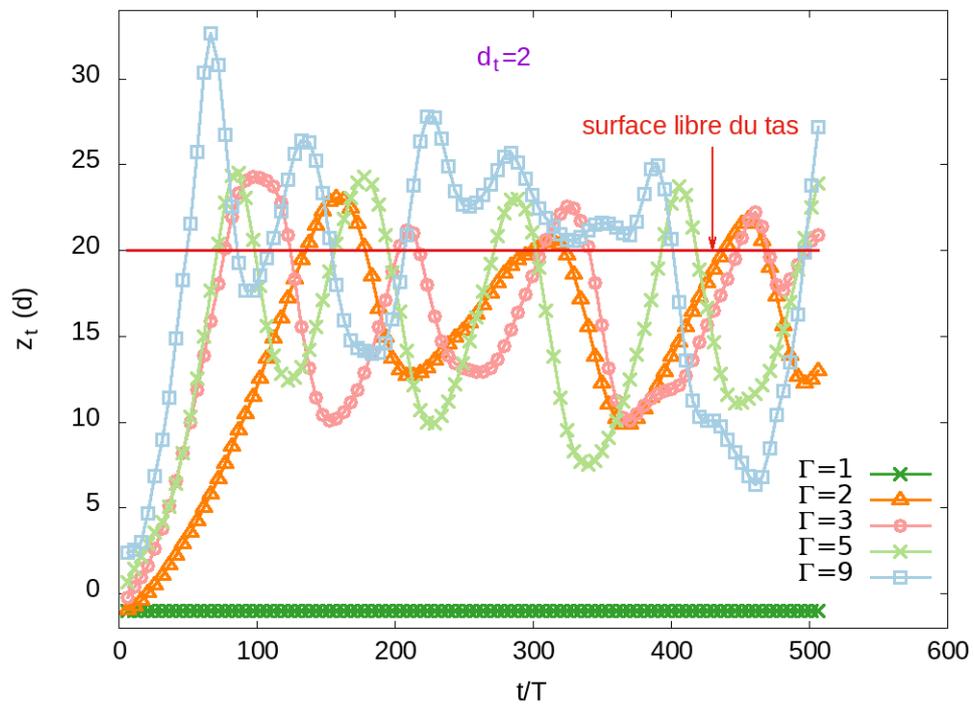


Figure 3-1-A : L'évolution temporelle de la position verticale du traceur de taille 2 pour différentes accélérations avec $A=2$.

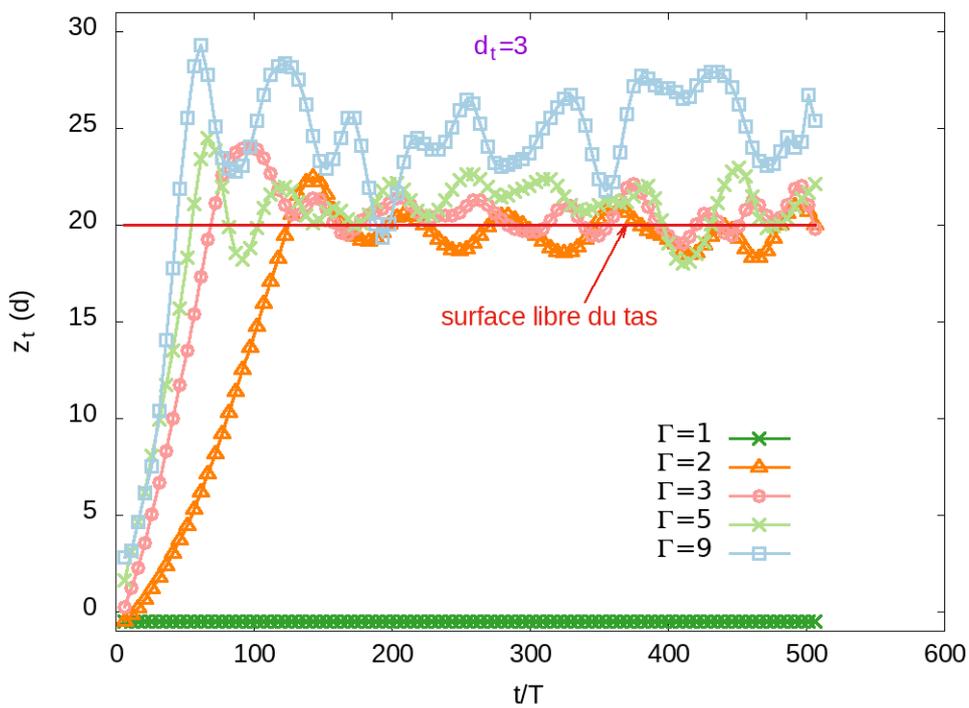


Figure 3-1-B : L'évolution temporelle de la position verticale du traceur de taille 3 pour différentes accélérations avec $A=2$.

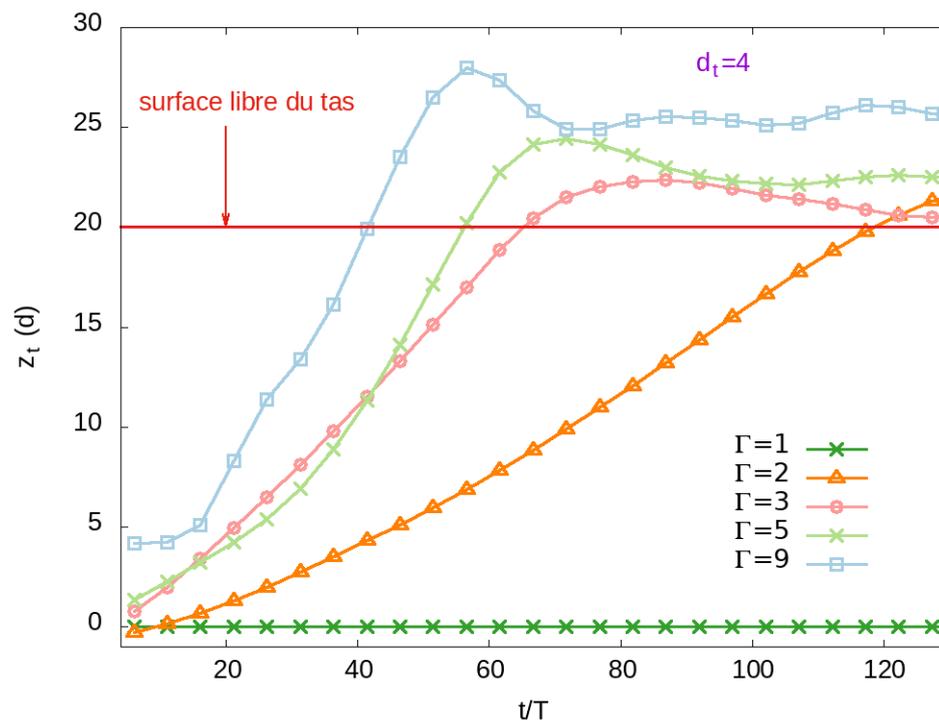


Figure 3-1-C : L'évolution temporelle de la position verticale du traceur de taille 4 pour différentes accélérations avec $A=2$.

Pour $\Gamma=1$, le traceur ne monte pas à la surface quelque soit la taille de ce dernier, du moins dans la limite de la durée de nos expériences.

Pour $\Gamma>1$, plus on augmente l'accélération, plus le traceur monte plus vite à la surface libre. La différence entre les trois traceurs se voit après avoir atteint la surface libre, les traceurs de taille 4 et 3 restent en surface, par contre le traceur de taille 2 suit un mouvement périodique de telle façon qu'il monte jusqu'à la surface puis s'enfonce dans le tas, puis remonte, et répète ce mouvement avec une certaine périodicité que nous n'avons pas évaluée.

Après avoir observé l'influence des différentes accélérations sur le mouvement d'un même traceur, maintenant on s'intéresse à l'effet de taille du traceur en gardant l'accélération inchangée :

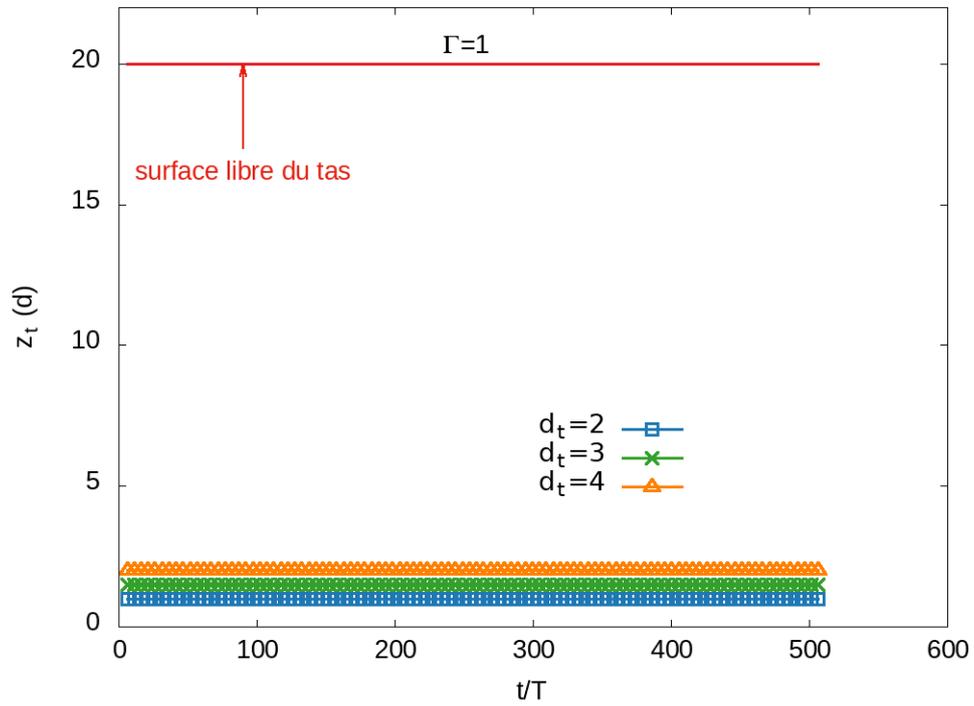


Figure 3-2-A : Comparaison entre les trois traceurs à $\Gamma=1$ et $A=2$.

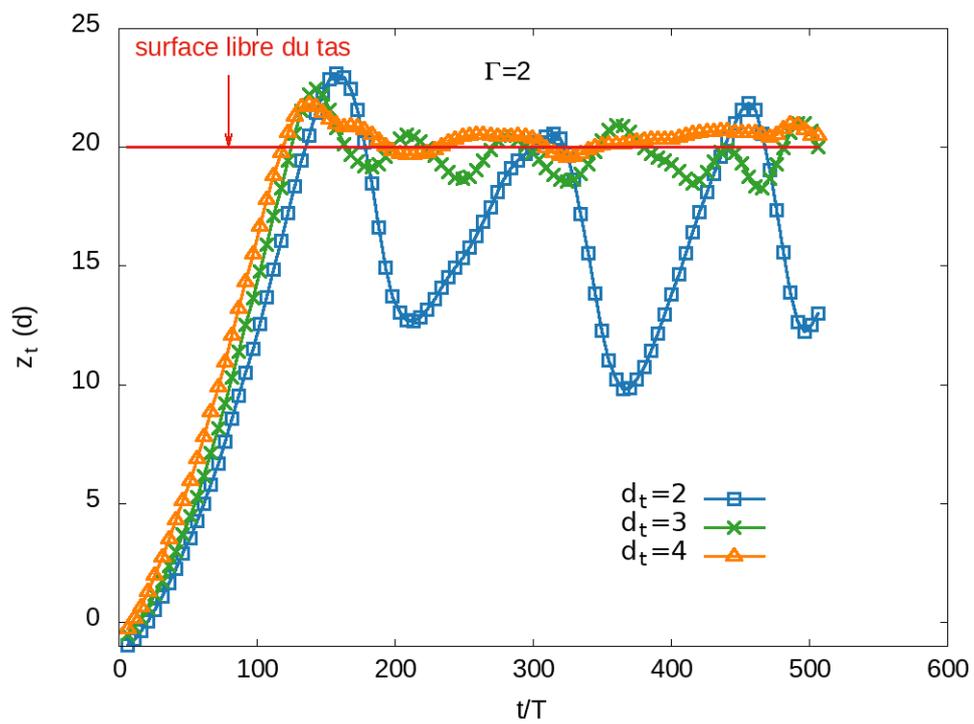


Figure 3-2-B : Comparaison entre les trois traceurs à $\Gamma=2$ et $A=2$.

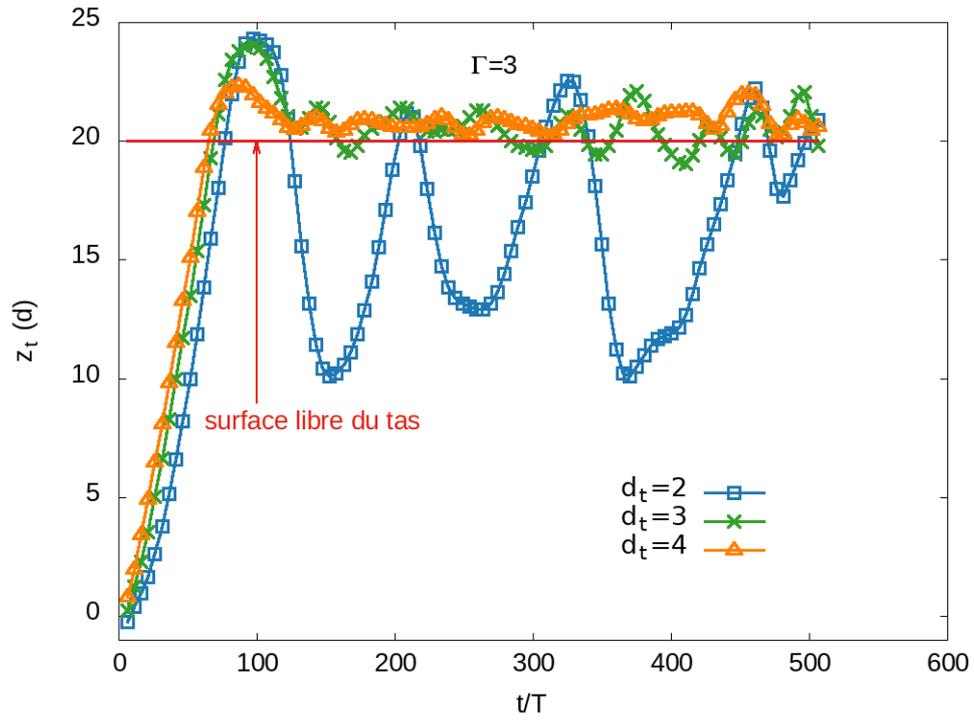


Figure 3-2-C : Comparaison entre les trois traceurs à $\Gamma=3$ et $A=2$.

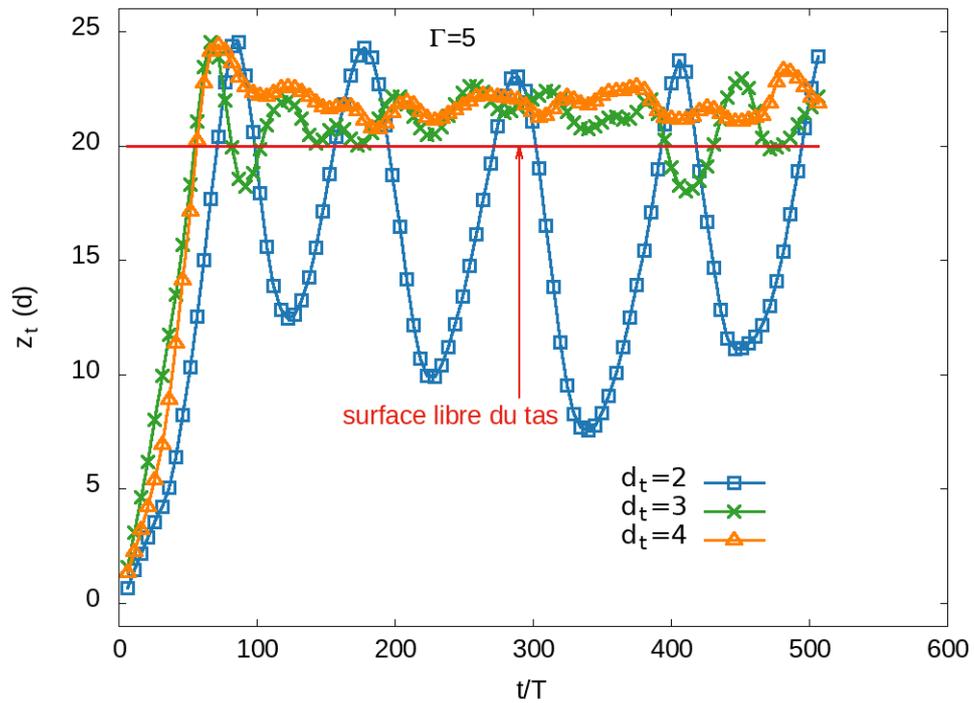


Figure 3-2-D : Comparaison entre les trois traceurs à $\Gamma=5$ et $A=2$.

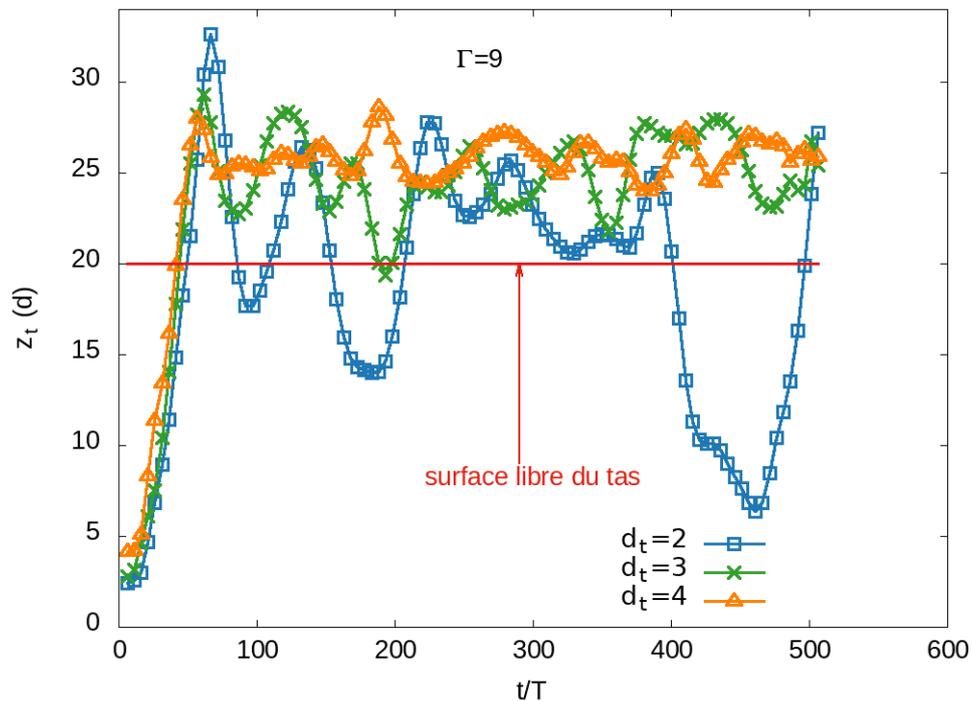


Figure 3-2-E : Comparaison entre les trois traceurs à $\Gamma=9$ et $A=2$.

Pour $\Gamma=1$, les trois traceurs restent coincés au fond du cylindre. À $\Gamma=2$, le traceur de taille 4 monte au sommet plus vite que les deux autres. Le traceur de taille 4 reste coincé en haut du tas, tandis que les deux autres suivent des mouvements périodiques en s'enfonçant et remontant à la surface sur des épaisseurs différentes. À $\Gamma=3$, plus la taille du traceur est grande, moins il met de temps pour monter à la surface. Pour les autres accélérations, les deux plus grands traceurs arrivent au sommet quasiment au même moment, le plus petit accuse un peu de retard.

Maintenant nous allons comparer le temps de remontée des traceurs pour les différentes accélérations.

La figure 3-3 montre le temps de remontée à la hauteur du tas fixée à 20 d en fonction des différentes accélérations pour les trois traceurs.

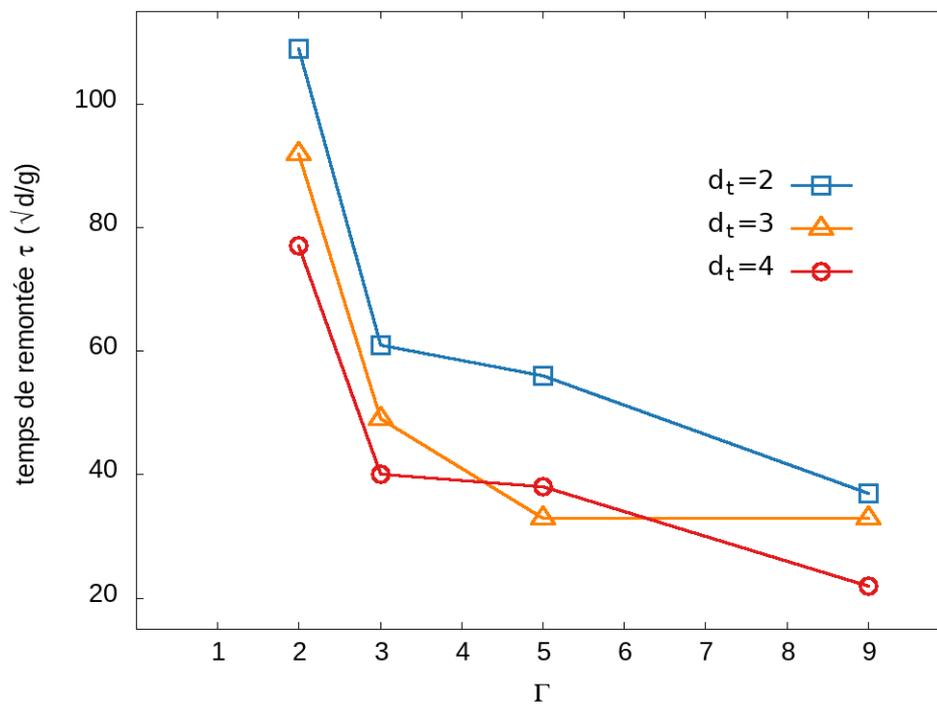


Figure 3-3 : Le temps de remontée des trois traceurs à différentes accélérations avec $A=2$.

Chaque point représente le temps de montée déterminé pour chaque accélération. D'abord, on remarque que les temps de remontée décroissent avec une accélération réduite plus élevée. Puis, à une exception près à $\Gamma=5$, pour une accélération donnée, plus la taille du traceur est grande, moins il met de temps pour arriver à la surface libre $\tau(4d) < \tau(3d) < \tau(2d)$.

Explication : Pour le traceur de taille 2, son diamètre est le double du diamètre des grains du tas, pour cela il arrive à suivre leur mouvement périodique. Ce mouvement est une manifestation d'un rouleau de convection dans le système, ceci veut dire que ce traceur fait parti du tas et du rouleau de convection. À chaque vibration, les traceurs de taille 2, 3 et 4 sont progressivement soulevés vers la surface, en raison du remplissage de petites particules dans l'espace créé par leurs mouvement ascendant mais ils ne montent pas avec la même vitesse de façon que le traceur de taille 2 arrive au sommet longtemps après les deux autres.

Conclusion : A partir d'une certaine accélération critique, dans notre cas elle se situe entre $\Gamma=1$ et $\Gamma=2$, tous ces traceurs remontent à la surface. Le temps nécessaire au traceur pour atteindre la surface à partir d'une position initiale au fond du conteneur dépend du rapport entre sa taille et celle des granules de fond. Le mouvement ascendant est dû aux particules plus petites qui remplissent

les vides générés sous les plus grosses à chaque vibration. Si le traceur de taille 2 peut suivre les rouleaux de convection et que le plus grand arrive plus vite, l'intrus le plus grand se déplace plus rapidement que la convection elle même.

III.2.2. Deuxième expérience : Dans ce cas, les traceurs de taille 2, 3 et 4 seront soumis à une accélération fixée à $\Gamma=3$ correspondant à différentes valeurs d'amplitude $A=0.7, 1.2, 2.0, 2.7, 6.0$.

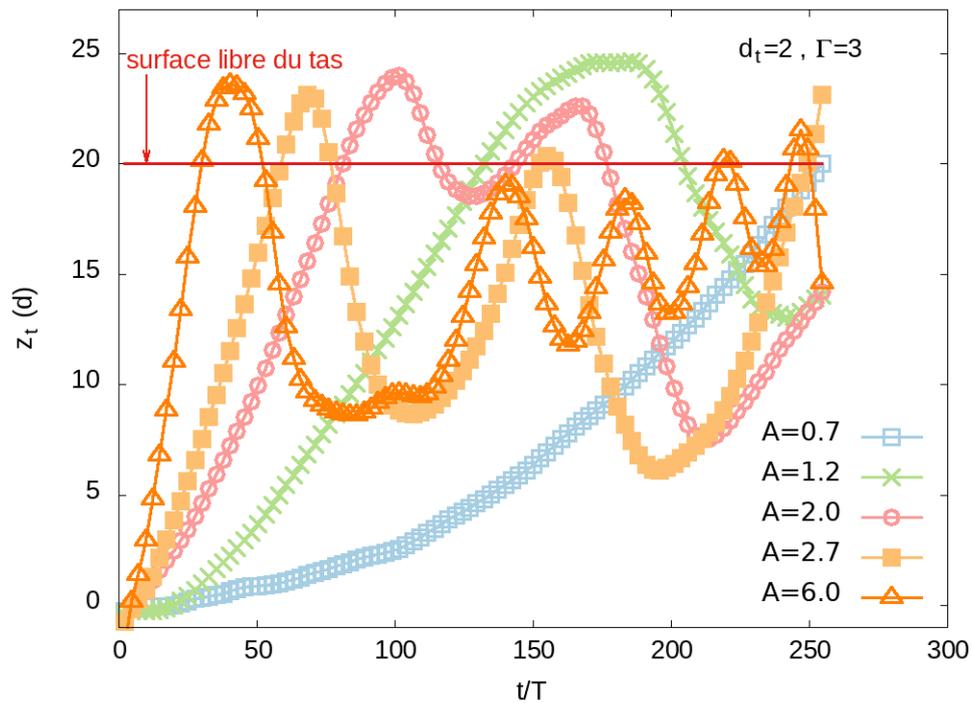


Figure 3-4-A : Position verticale du traceur de taille 2 pour différentes amplitudes à accélération fixée $\Gamma=3$.

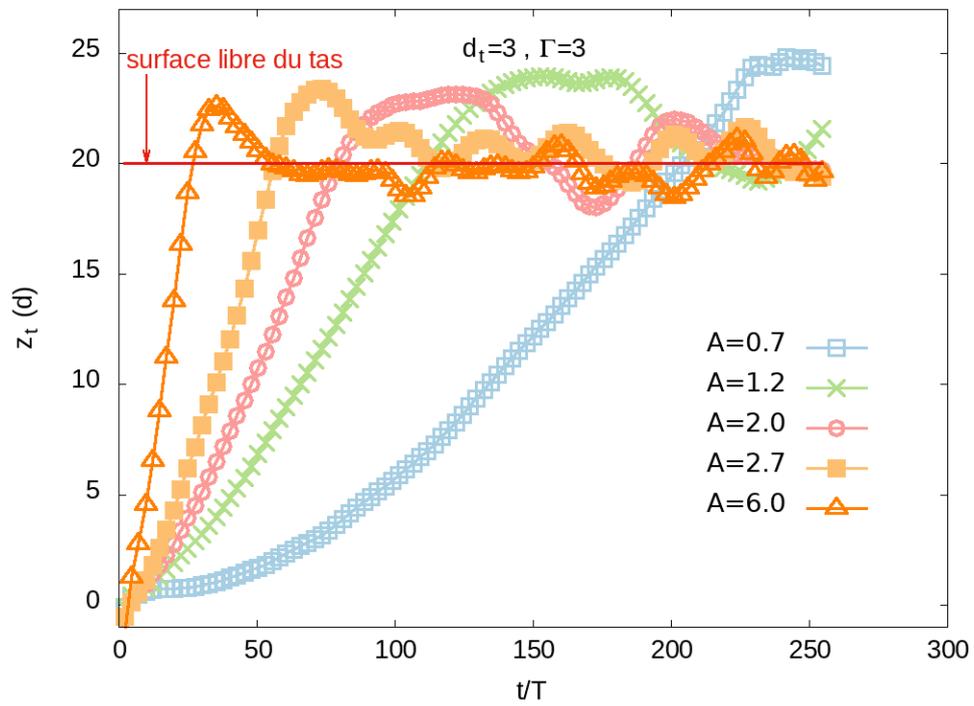


Figure 3-4-B : Position verticale du traceur de taille 3 pour différentes amplitudes à $\Gamma=3$.

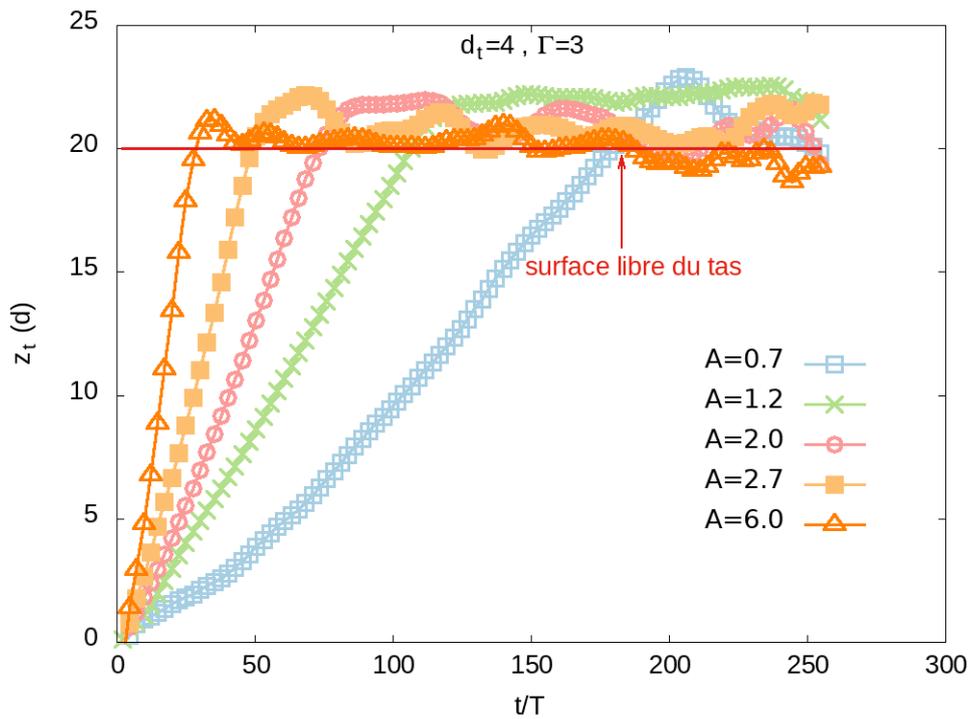


Figure 3-4-C : Position verticale du traceur de taille 4 pour différentes amplitudes à $\Gamma=3$.

Pour $A=0.7$, les trois traceurs mettent beaucoup de temps pour monter à la surface et le traceur de taille 2 est le plus lent parmi eux.

Pour $A>0.7$, plus on augmente la valeur d'amplitude, plus les traceurs montent rapidement au sommet. Même remarque que la première expérience, les traceurs de taille 4 et 3 restent en surface dès qu'ils arrivent au sommet du tas, tandis que le traceur de taille 2 suit un mouvement périodique.

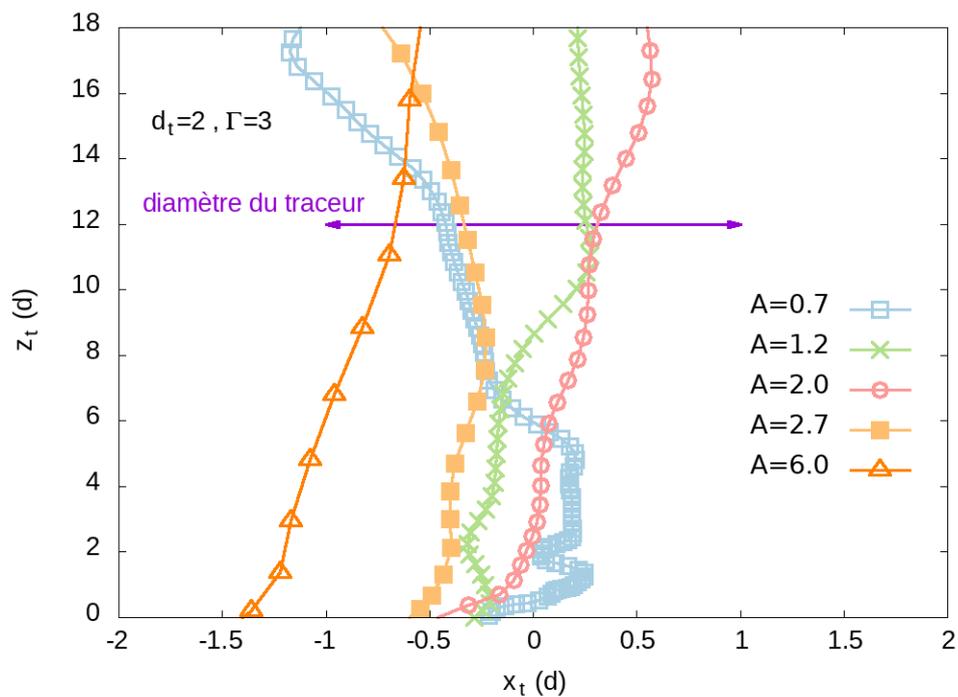


Figure 3-5-A : Position verticale du traceur de taille 2 en fonction de sa position horizontale x .

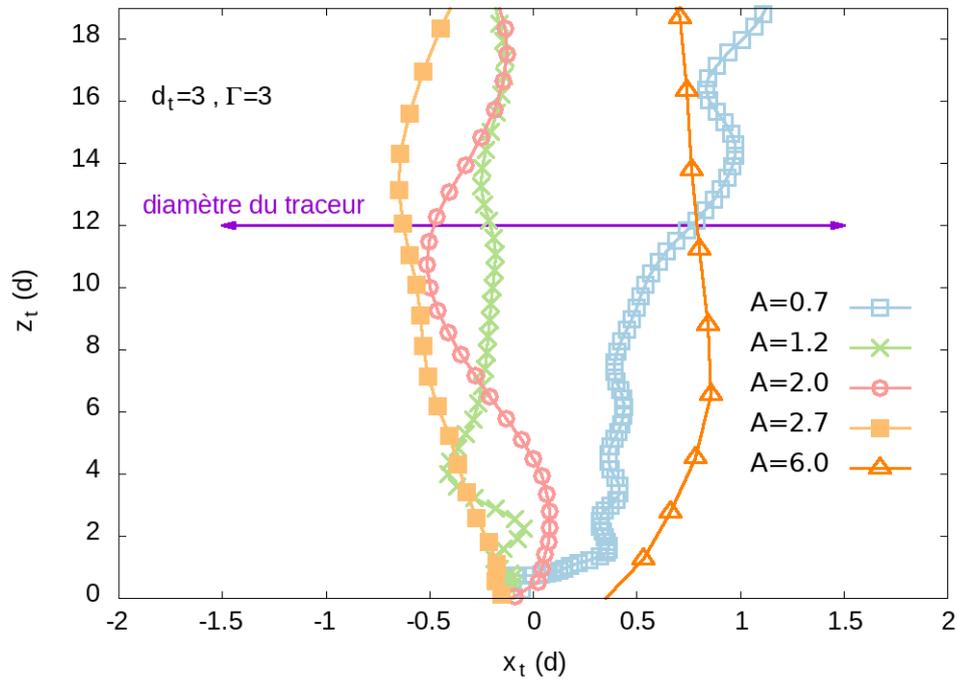


Figure 3-5-B : Position verticale du traceur de taille 3 en fonction de sa position horizontale x .

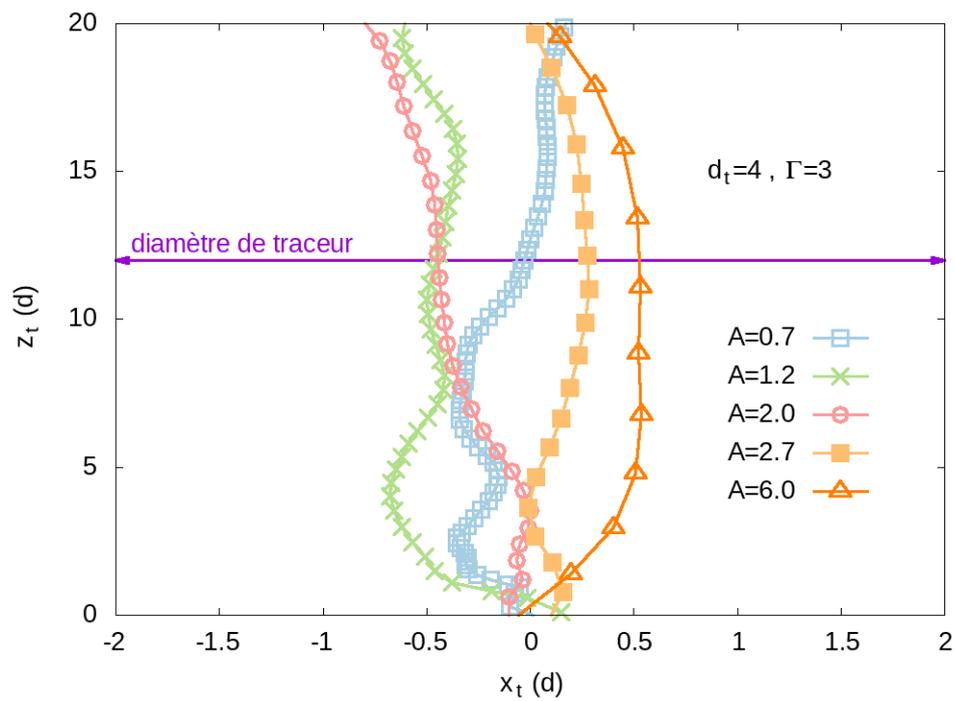


Figure 3-5-C : Position verticale du traceur de taille 4 en fonction de sa position horizontale x .

Nous observons que les traceurs remontent à la surface en restant dans une zone étroite d'épaisseur de l'ordre du quart de leurs diamètres.

Maintenant nous allons regrouper toutes les études de la deuxième expérience en une seule figure, le temps de remontée des traceurs pour les différentes amplitudes avec une même accélération.

La figure 3-6 montre le temps de remontée à la hauteur du tas fixée à 20 d en fonctions des différentes valeurs d'amplitudes pour les traceurs de taille 2, 3 et 4.

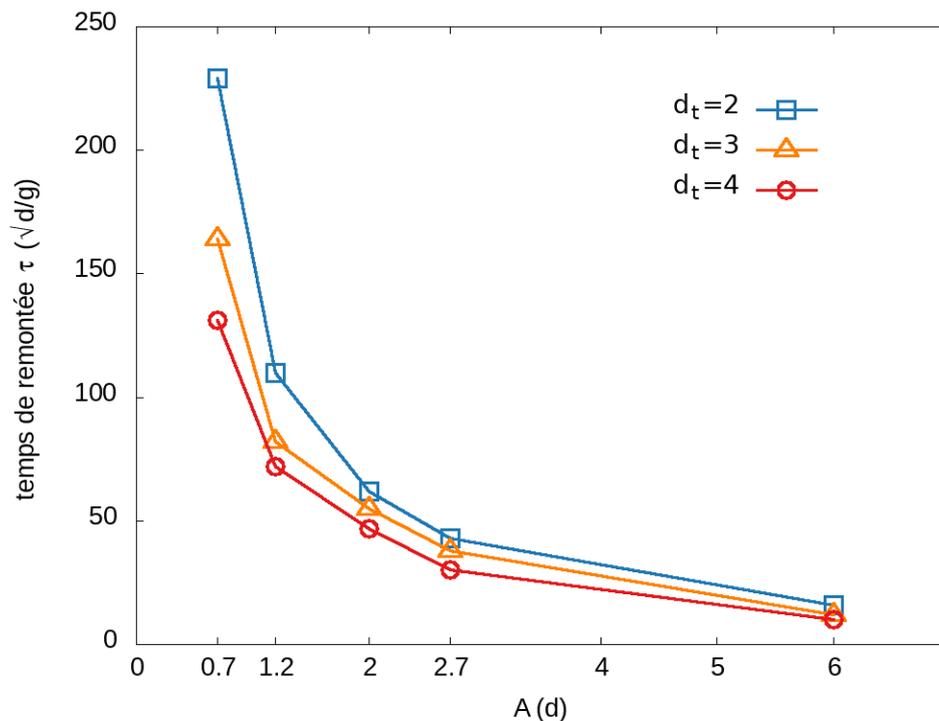


Figure 3-6 : Le temps de remontée des trois traceurs à des différentes amplitudes avec $\Gamma=3$.

On observe que le temps de remontée est d'autant plus court que l'amplitude des vibrations est grande quelque soit la taille du traceur. Ce temps de remontée diminue en agrandissant la taille du traceur par rapport à la taille du tas pour une amplitude donnée.

À amplitude fixée, l'écart entre les temps de remontée pour les différents traceurs diminue lorsque celle-ci augmente jusqu'à ce que cet écart devienne insignifiant pour $A=6$.

Explication : Augmenter l'amplitude d'oscillation permet de créer plus d'espaces interstitiels entre les grains pendant les vibrations où les plus petits occupent les trous créés par le traceur chaque fois qu'il est projeté vers le haut. Le traceur garde sa position au centre de cylindre en montant verticalement pendant les oscillations pour toutes les valeurs des amplitudes. Plus tard, le traceur tombe sur ces grains plus petits qui résistent à son mouvement descendant.

Conclusion : Le temps de remontée du traceur dépend également de l'amplitude de vibration, alors on peut dire que la percolation contribue également au phénomène de la ségrégation granulométrique.

III.2.3. Troisième expérience : On sélectionne les traceurs de taille 2, 3 et 4, on garde l'amplitude $A=2$ pour une accélération $\Gamma=3$. Le coefficient de friction entre les murs et les grains prend différentes valeurs : $\mu_{gp} = 0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 0.9$.

Les figures 3-7-A, 3-7-B, 3-7-C présentent la montée du traceur de taille 2, traceur de taille 3 et taille 4 au sommet pendant 512 T, 90 T, 75 T respectivement pour différentes valeurs du paramètre de friction entre grains et parois.

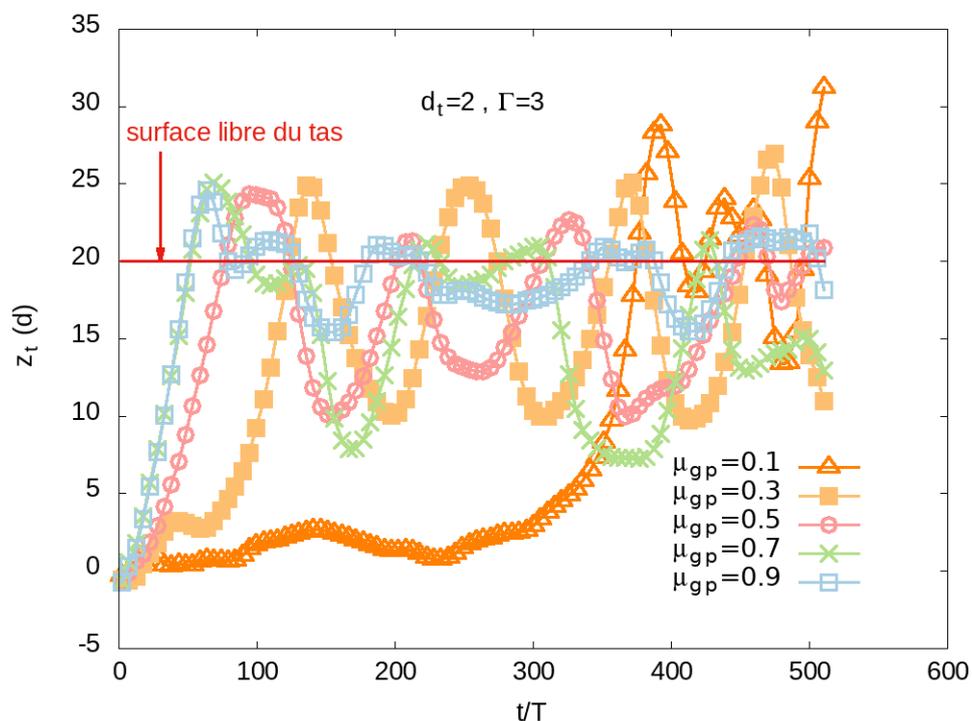


Figure 3-7-A : Position verticale du traceur de taille 2 à différents coefficients de frictions grain-paroi.

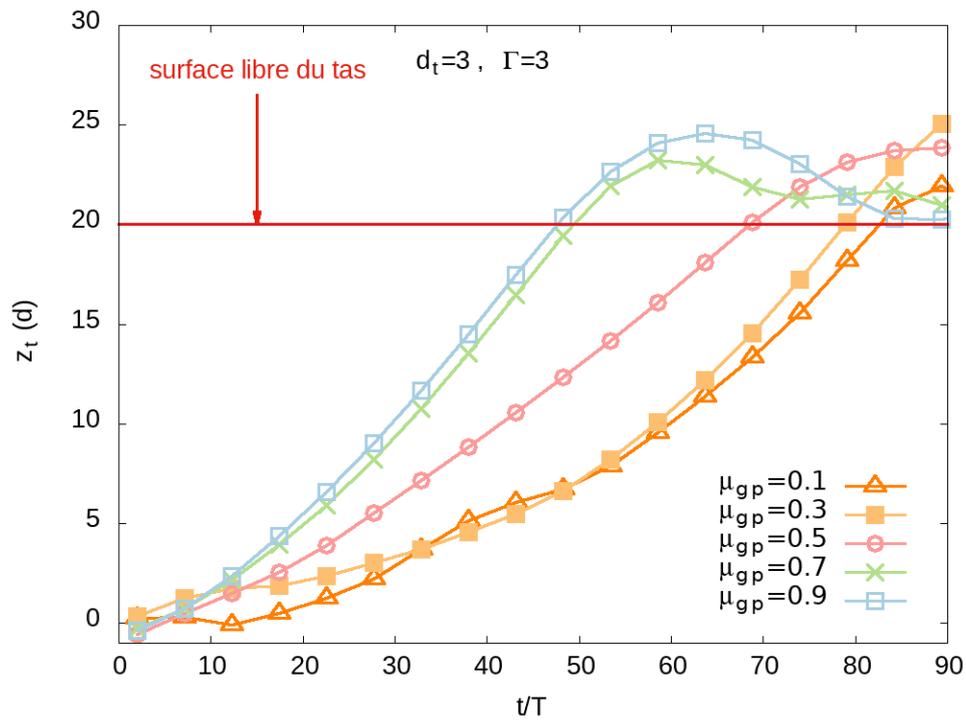


Figure 3-7-B : Position verticale du traceur de taille 3 à différents coefficients de frictions.

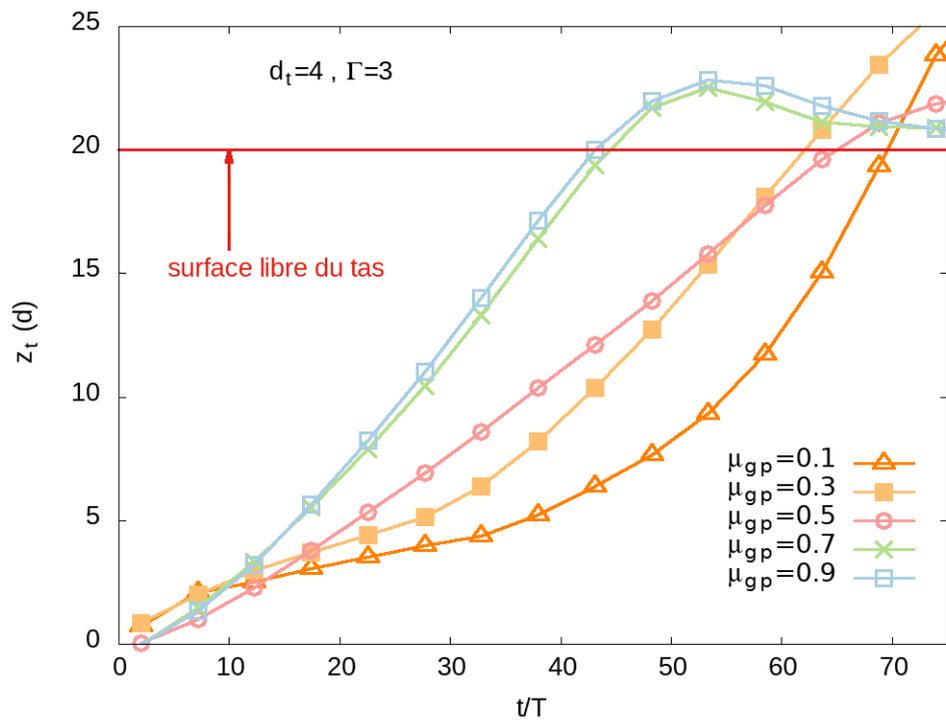


Figure 3-7-C : Position verticale du traceur de taille 4 à différents coefficients de frictions.

Pour $\mu_{gp}=0.1$, les traceurs de taille 3 et 4 montent lentement au sommet, mais le traceur de taille 2 met beaucoup plus de temps pour monter par rapport à ces derniers.

Pour $\mu_{gp}>0.1$, les traceurs de taille 2, 3 et 4 arrivent rapidement à la surface libre à une valeur de friction grain-paroi plus grande. Pour $\mu_{gp}\geq 0.7$, le temps de montée reste relativement le même quelque soit la taille du traceur.

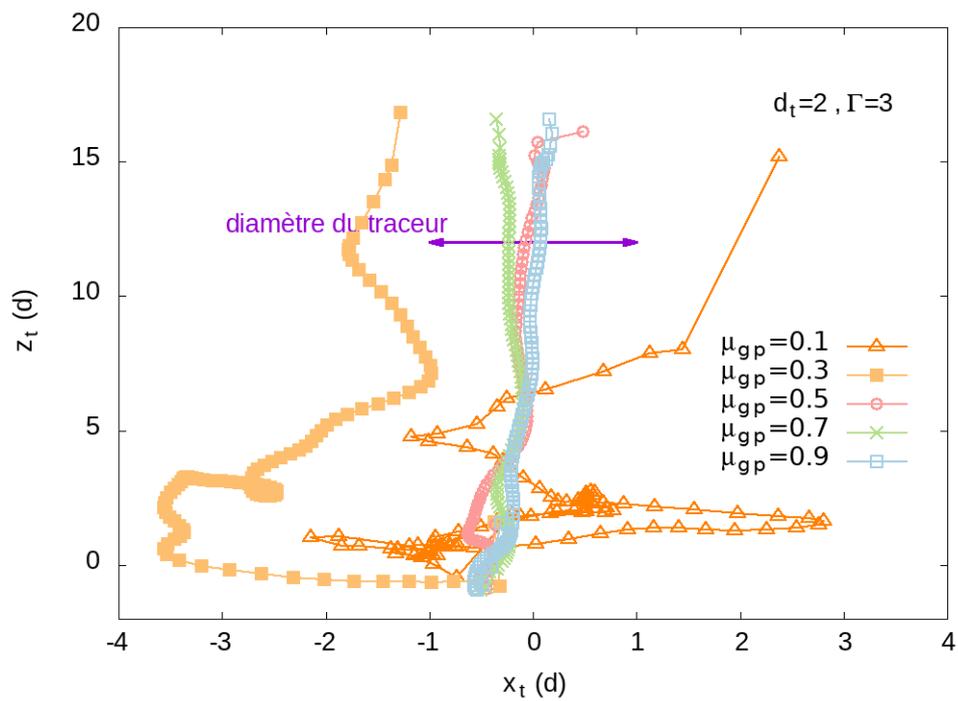


Figure 3-8-A : La position verticale du traceur de taille 2 en fonction de sa position horizontale à différents coefficients de frictions grain-paroi.

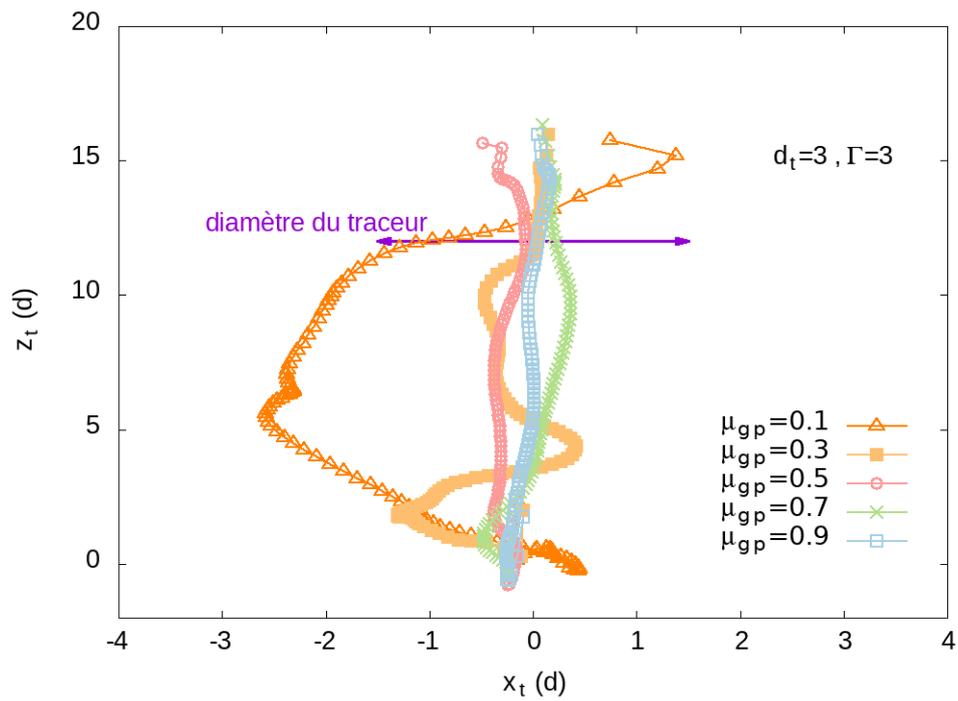


Figure 3-8-B : La position verticale du traceur de taille 3 en fonction de sa position horizontale à différents coefficients de frictions grain-paroi.

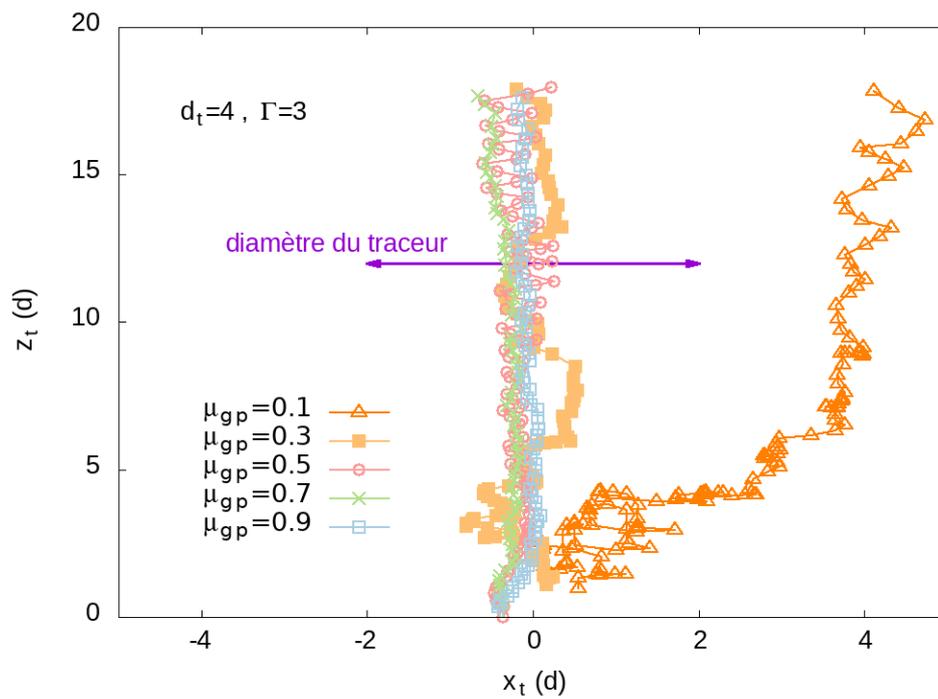


Figure 3-8-C : La position verticale du traceur de taille 4 en fonction de sa position horizontale à différents coefficients de frictions grain-paroi.

Pour $\mu_{gp} > 0.1$, les traceurs montent à la surface libre dans la région centrale du cylindre à travers un canal étroit d'épaisseur inférieur à 1/8 de leurs tailles. Par contre pour $\mu_{gp} = 0.1$, les traceurs de taille 3 et 4 remontent en exploitant une zone de largeur de l'ordre du double de leur taille.

Le traceur de taille 2, à $\mu_{gp} = 0.1$ et $\mu_{gp} = 0.3$, monte dans une zone de largeur de l'ordre du triple de sa taille.

La figure 3-9 montre le temps de remontée à la surface libre de hauteur 20 d en fonction des différents coefficients de friction grain-paroi pour les traceurs de taille 2, 3 et 4.

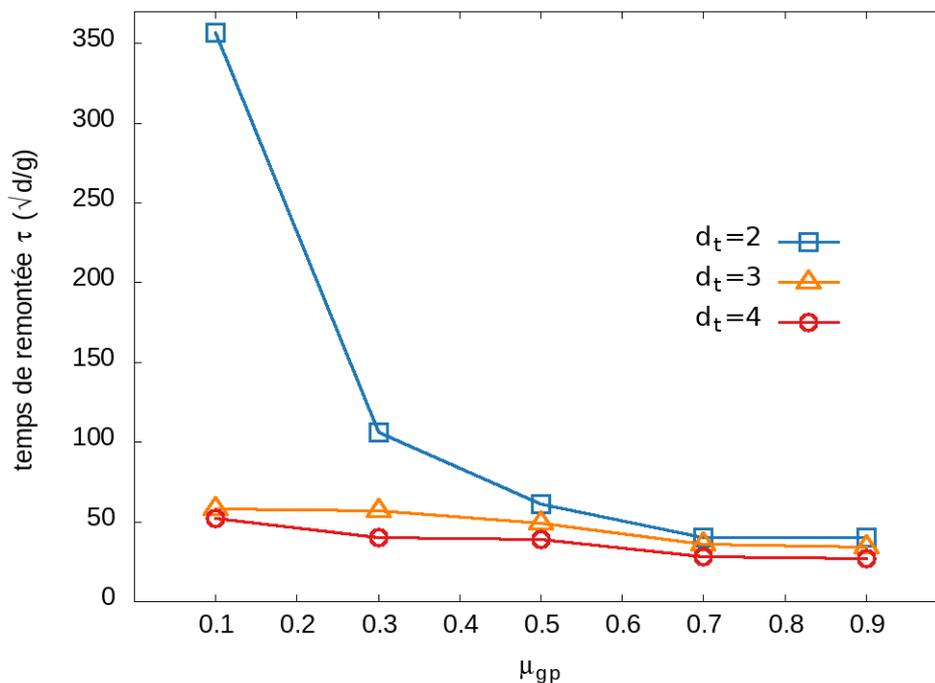


Figure 3-9 : Le temps de remontée des trois traceurs à différents coefficients de friction μ_{gp} avec $\Gamma=3$ et $A=2$.

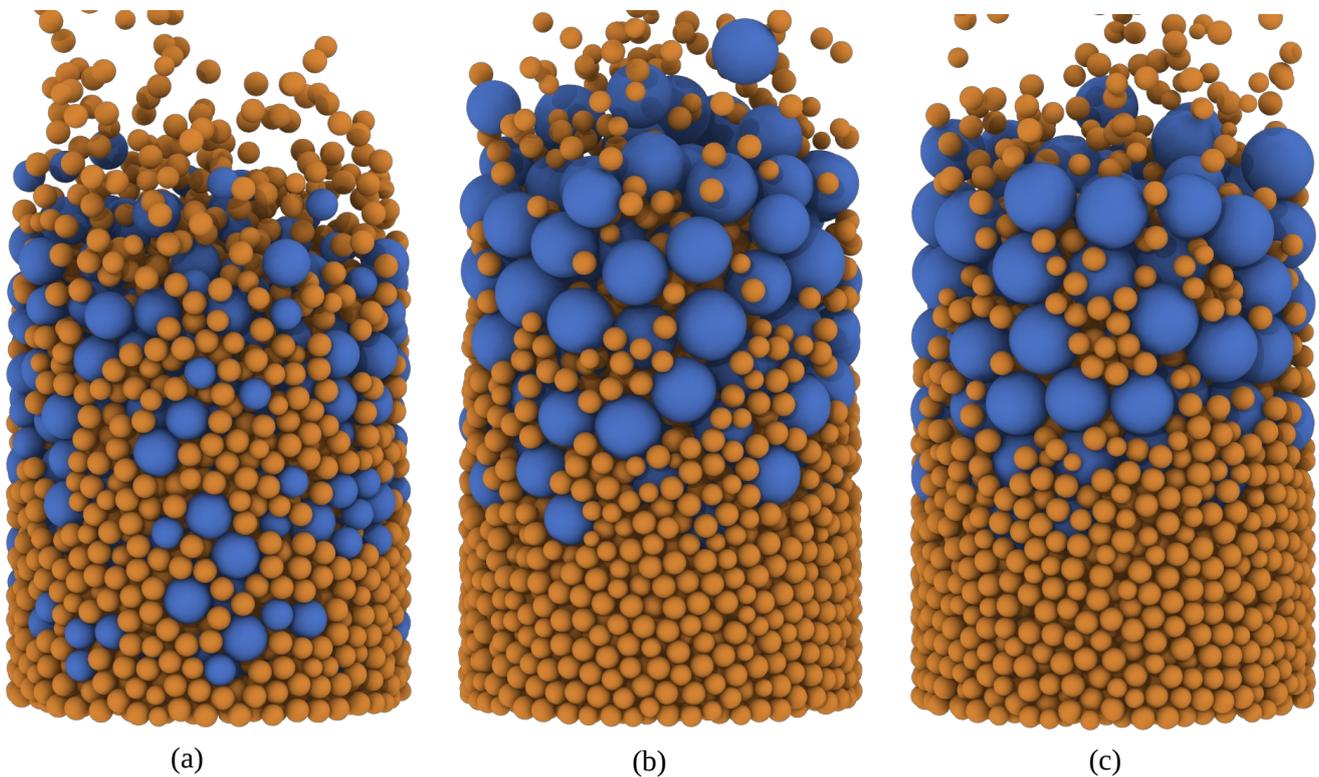
Pour les murs lisses ($\mu_{gp}=0.1$), le traceur de taille 2 monte doucement à la surface du tas. En augmentant le frottement avec les murs, on accélère la montée des traceurs. A partir de ($\mu_{gp}=0.7$), le temps de remontée sature et ne varie plus avec la friction. L'écart entre le temps de remontée pour les différents traceurs diminue avec μ qui augmente.

Explication : Un gros grain placé n'importe où dans le flux ascendant central peut être amené à la surface où il restera, sans pouvoir être ramené au fond par les flux descendants latéraux étroits. La convection prend la forme de deux cellules dans chaque plan vertical du cylindre. Dans un conteneur cylindrique à parois lisses, l'interaction de friction entre le récipient et les grains adjacents est beaucoup plus faible.

Conclusion : Les propriétés des écoulements convectifs granulaires sont grandement influencées par l'interaction de frottement entre les petits grains et les parois du cylindre qui les retiennent. Lorsque le couplage par friction est faible, le flux convectif est lent et asymétrique et si le couplage est fort la convection est rapide et très organisée.

III.3. Cas d'un Empilement Bidisperse

Dans ces simulations, on garde le même conteneur cylindrique que nous remplissons avec deux familles de grains de hauteurs égales où on place les gros grains au fond du conteneur. On prend $d_1=1$ le diamètre des petits grains et $d_2= 2, 3, 4$. Les deux familles de grains ont une polydispersité de taille de l'ordre de 20%. Nous nous intéresserons ici à la trajectoire des centres de masse de chaque famille de grains.



Représentations de trois empilements biphasiques après introduction des vibrations.
(a) rapport de taille 2, (b) rapport de taille 3, (c) rapport de taille 4.

III.3.1. Première expérience : À l'instar du chapitre 2, on étudie le système pour 3 rapports de tailles ($d_2/d_1=2, 3, 4$). Chaque cas sera soumis à cinq accélérations $\Gamma = 1, 2, 3, 5, 9$ avec $A=2$.

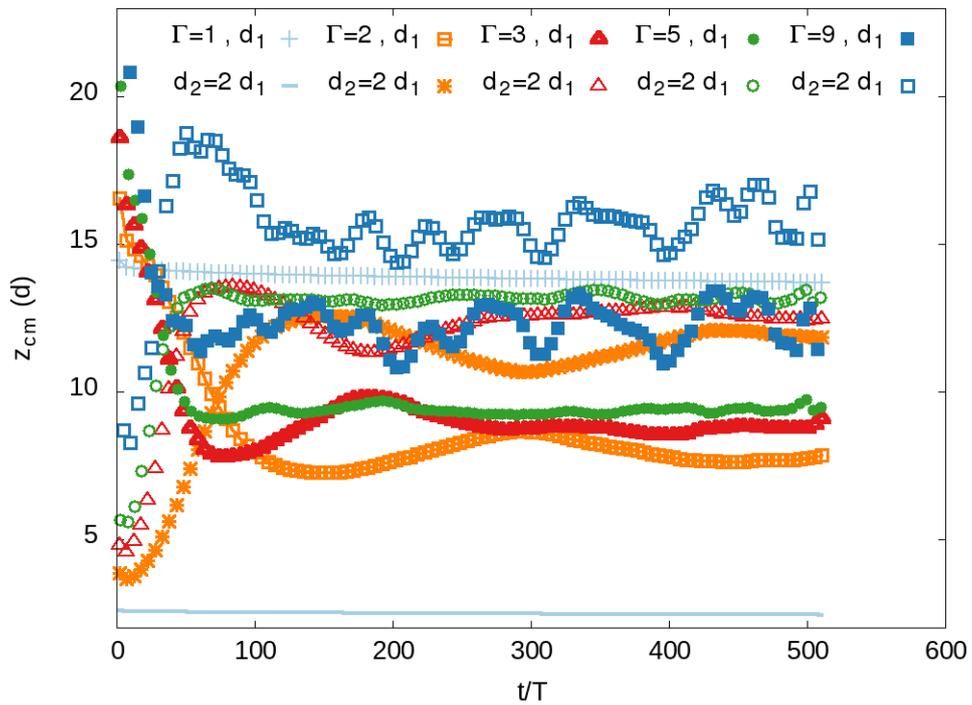


Figure 3-10-A : L'évolution de la composante verticale du centre de masse des grains d'empilement $d_2=2$ à différentes accélérations.

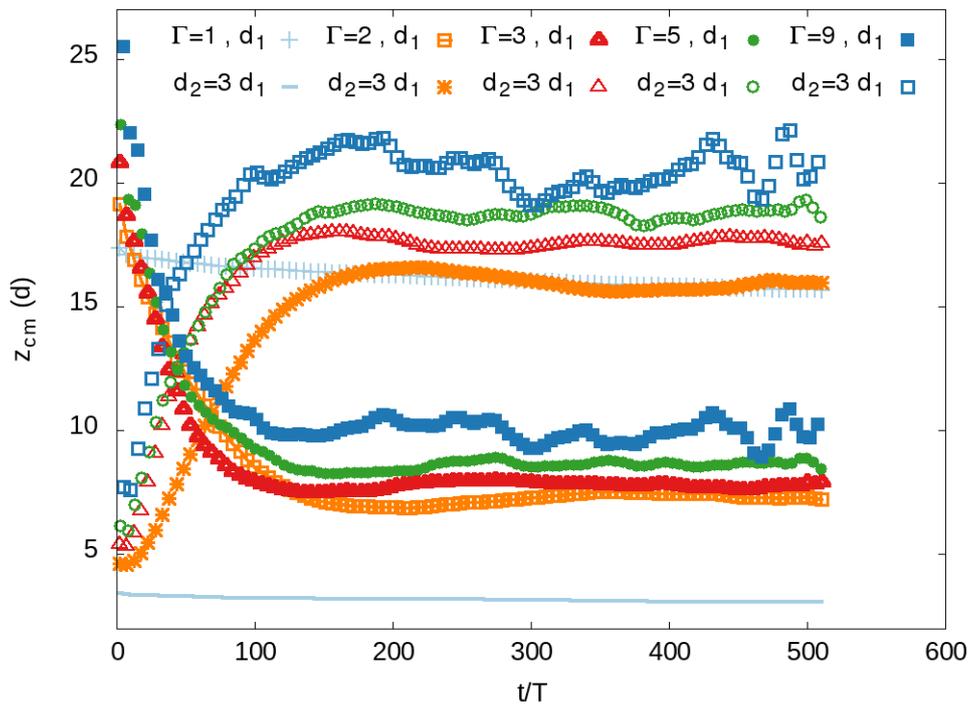


Figure 3-10-B : L'évolution de la composante verticale du centre de masse des grains d'empilement $d_2=3$ à différentes accélérations.

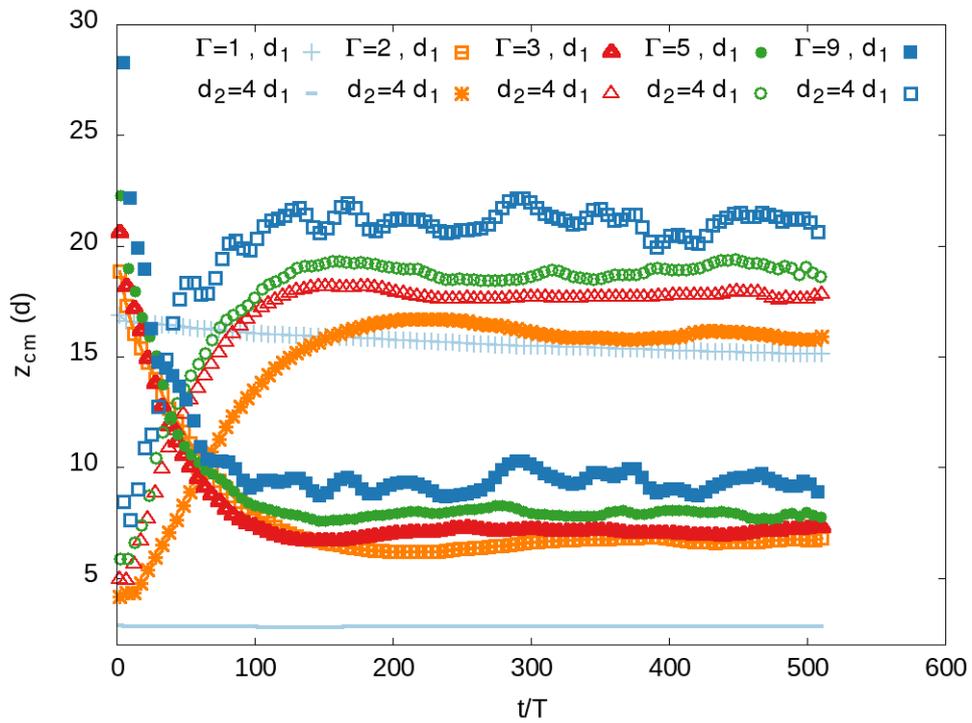


Figure 3-10-C : L'évolution de la composante verticale du centre de masse des grains d'empilement $d_2=4$ à différentes accélérations.

Pour $(d_2/d_1)=2, 3, 4$, en allant de $\Gamma = 2$ jusqu'à $\Gamma = 9$, le centre de masse des grains d_1 diminue (les petits grains descendent plus bas) et les gros grains montent plus haut.

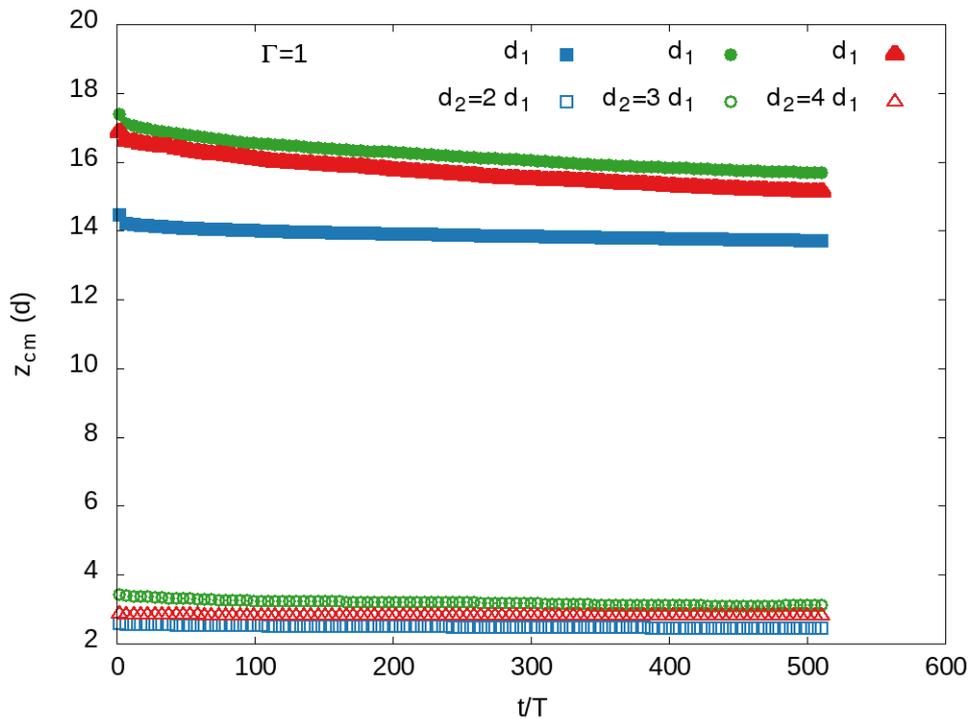


Figure 3-11-A : L'évolution des centres de masse de chaque famille de grain à $\Gamma=1$.

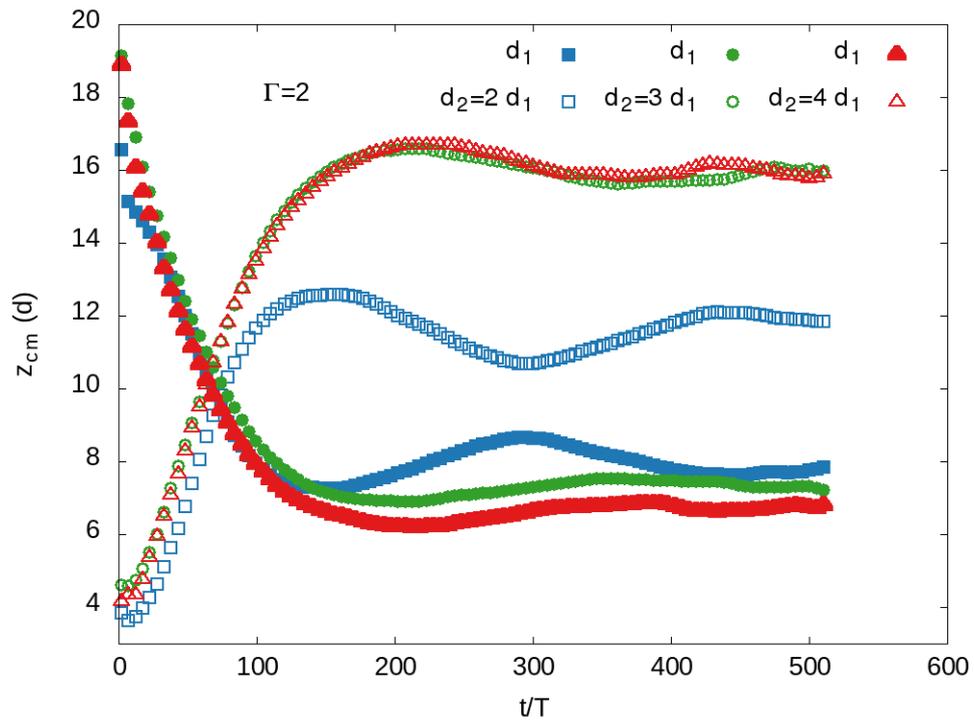


Figure 3-11-B : L'évolution des centres de masse de chaque famille de grain à $\Gamma=2$.

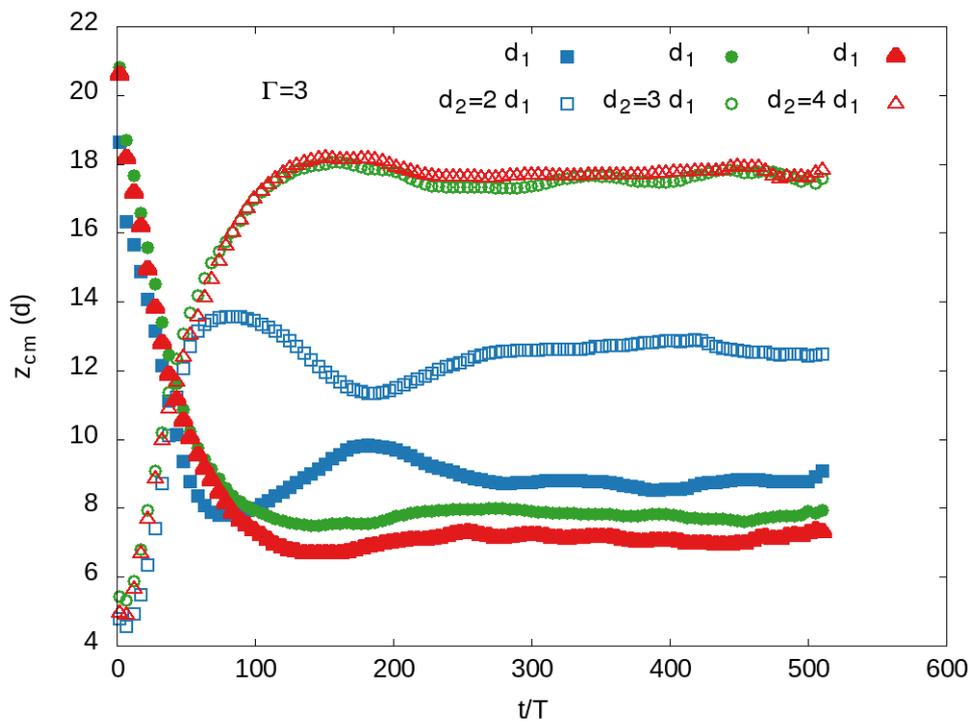


Figure 3-11-C : L'évolution des centres de masse de chaque famille de grain à $\Gamma=3$.

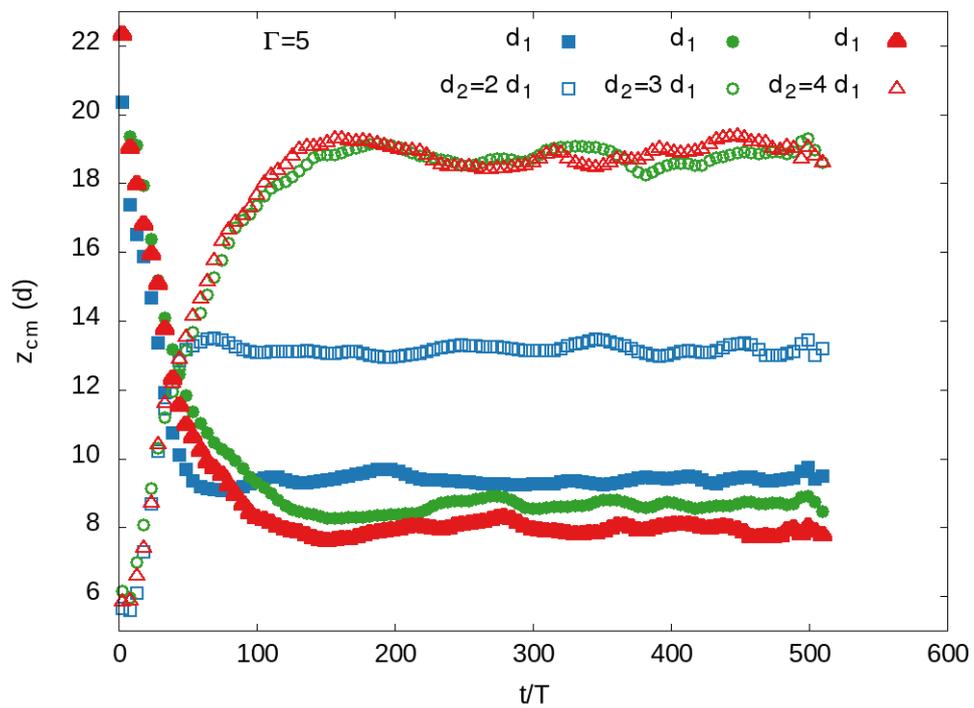


Figure 3-11-D : L'évolution des centres de masse de chaque famille de grain à $\Gamma=5$.

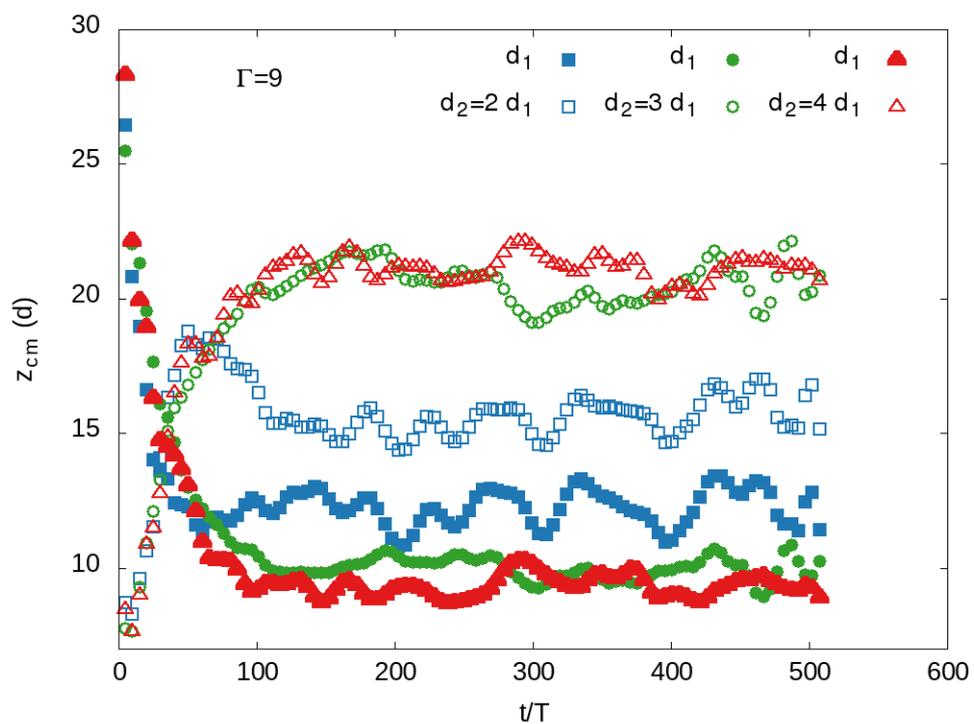


Figure 3-11-E : L'évolution des centres de masse de chaque famille de grain à $\Gamma=9$.

D'après la figure 3-11-A, l'accélération $\Gamma=1$ n'est pas suffisante pour faire monter les gros grains et faire descendre les petits grains durant toute la durée des simulations. Cependant, le tas se condense un peu plus.

D'après les autres figures 3-11, pour toutes les accélérations, l'inversement des centres de masse se réalise, la différence entre les trois configurations est que la distance entre les composantes verticales des centres de masse des deux familles de grains augmente.

Conclusion : On arrive à mieux inverser les centres de masse des deux familles de grains par des petites accélérations et un rapport de taille plus grand.

À une très faible accélération, au mieux, on obtient une compaction des grains au lieu d'un inversement des centres de masse.

III.3.2. Deuxième expérience : Dans cette étape, on garde le rapport $d_2/d_1=4$ et on modifie l'amplitude pour la même accélération $\Gamma=3$.

La figure 3-12 montre l'évolution d'un système biphasique à des amplitudes $A=0.7, 1.2, 2.0, 2.7$ et 6.0 .

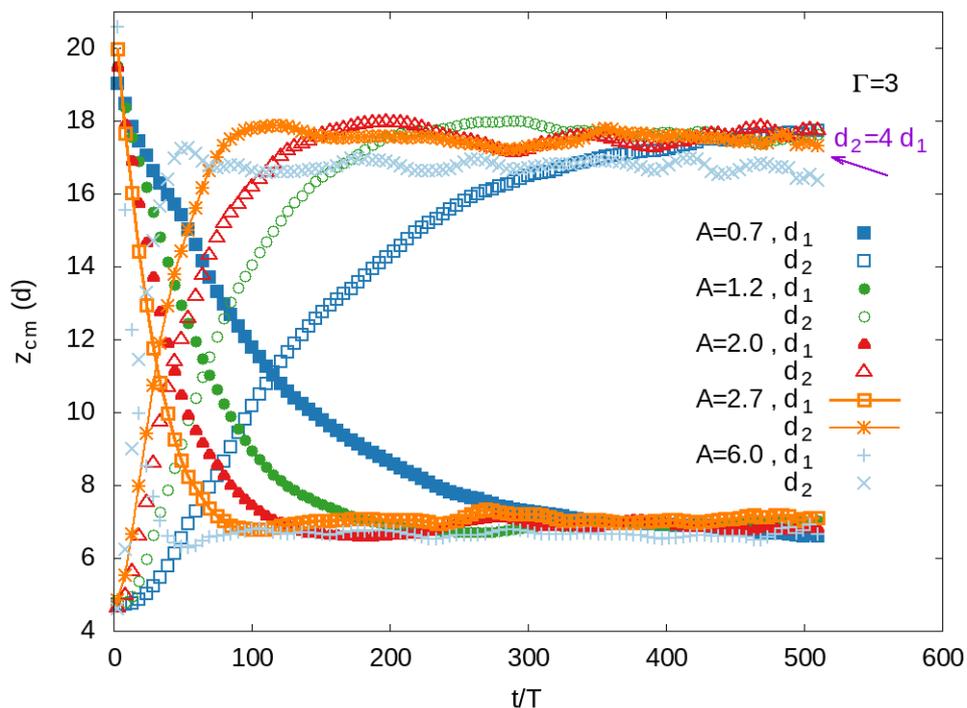


Figure 3-12 : L'évolution des centres de masse de deux phases ($d_2=4 d_1$) à différentes amplitudes avec $\Gamma=3$.

À chaque augmentation de la valeur de l'amplitude, le temps de remontée des gros grains diminue.

Conclusion : La percolation est responsable de la montée et descente des grains en fonction de leurs taille. Une grande amplitude peut cependant accélérer l'inversement des phases.

III.3.3. Troisième expérience : On modifié le coefficient de friction entre les grains et les parois, les valeurs utilisées sont : $\mu_{gp}=0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 0.9$.

La figure 3-13 montre la variation des centres de masses des deux familles en fonction du temps pour différents coefficients de frictions grain-paroi avec $d_2=4 d_1$.

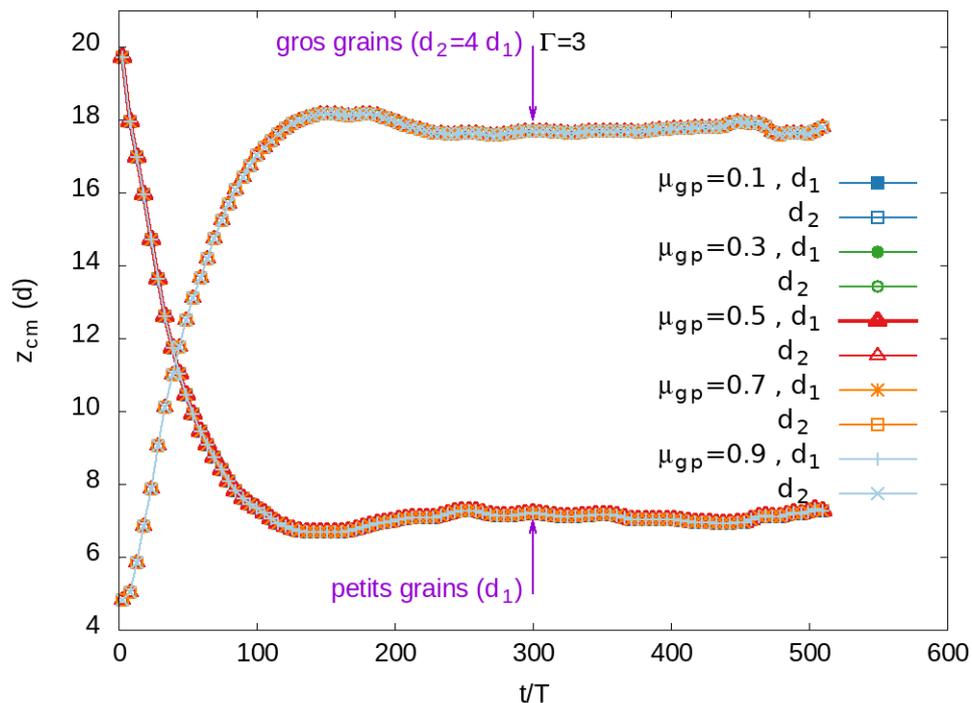


Figure 3-13 : La variation des centres de masses des deux familles ($d_2=4 d_1$) à différents coefficients de frictions grain-paroi.

Pour toutes les valeurs du coefficient de friction μ_{gp} , les trajectoires des centres de masse pour tous les rapports de taille sont identiques.

Conclusion : Contrairement au cas du traceur, pour un empilement bidisperse, la nature des murs n'a aucun effet. Vu que ce résultat est inattendu, nous avons ajouter une autre expérience où nous avons modifié le coefficient de friction entre les grains en maintenant le coefficient de frottement avec les parois constant $\mu_{gp}=0.5$.

III.3.4. Quatrième expérience : le rôle de cette étape est d'observer l'influence du coefficient de frottement grain-grain, on prend le même système avec $A=2$ et on varie la valeurs du coefficient de frottement entre les grains : $\mu_{gg}=0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 0.9$.

La figure 3-14 montre l'évolution du centre de masse des grains au cour du temps en fonction du coefficient de friction entre les grains.

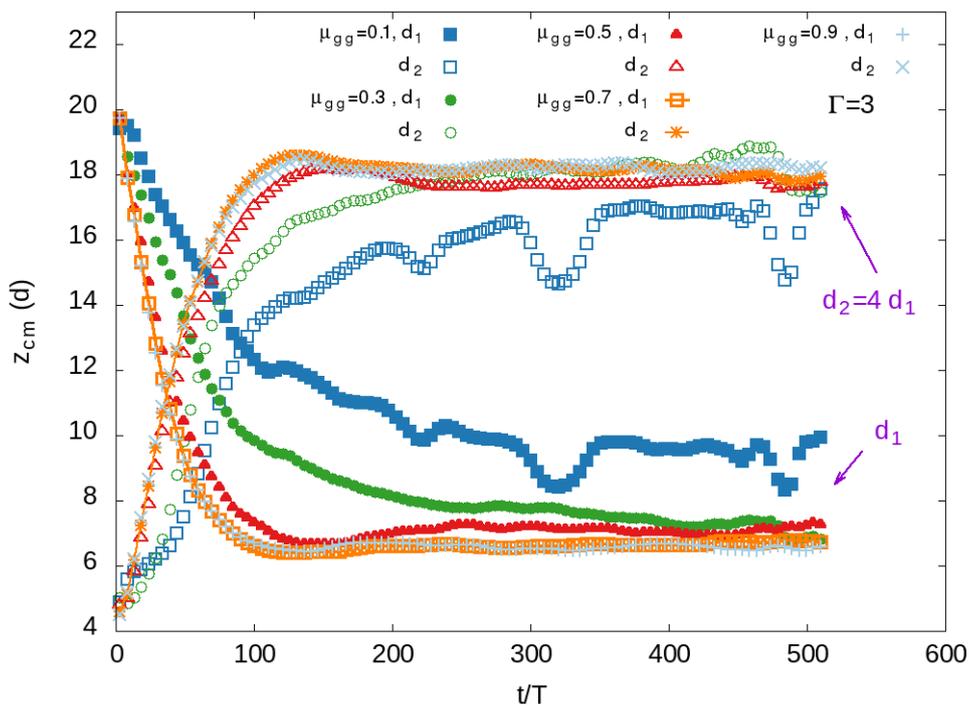


Figure 3-14 : L'évolution du centre de masse des grains au cour du temps en fonction du coefficient de frictions entre les grains.

En augmentant le coefficient de friction μ_{gg} , l'inversement des centres de masse des phases est plus rapide et les centres de masse sont d'autant plus éloignés.

Conclusion : Le coefficient de friction entre les grains accélère l'inversement des deux familles de grain et joue également un rôle prépondérant dans l'efficacité de la séparation des phases.

Chapitre 4

Conclusion générale et perspectives

Conclusion

L'objet principal de notre sujet de Master porte sur la modélisation numérique de l'effet des noix de Brésil. Notre choix repose sur une l'approche des éléments discrets de type DEM en configuration tridimensionnelle. L'idée centrale est de développer un ensemble d'outils numériques qui permettent de :

- Construire un récipient cylindrique rempli de grains et qui peut être vibré verticalement.
- Prendre en compte des lois d'interaction, de contact notamment et de frottement, entre les grains contenus dans le cylindre et les parois de ce dernier.
- Apporter une contribution personnelle à la compréhension de l'effet des noix de Brésil.

Dans les systèmes où l'on étudie l'ascension d'un traceur, le temps de remontée diminue avec la taille de ce dernier en augmentant l'accélération et/ou l'amplitude des vibrations, mais aussi en augmentant le coefficient de friction grain-paroi. Pour les systèmes contenant deux familles de grains de tailles moyennes différentes, on obtient l'inversion et la séparation des deux phases avec une accélération ou une amplitude de vibration croissante, ou bien en augmentant le coefficient de friction grain-grain.

Cependant, il est notable de souligner que l'inversement et la séparation des deux phases ne sont aucunement affectés par la variation du coefficient de frottement grain-paroi.

Ce dernier résultat imprévu, mais surtout surprenant, nous pousse à lancer dans le futur des investigations complémentaires sur les effets de bords sur la physique de l'effet des noix de Brésil, notamment à exploiter l'importance du rapport hauteur/largeur du récipient, mais aussi l'étude de système de largeur infinie en introduisant des conditions aux bords latérales périodiques.

Annexe

Exemples de scenarii sur Yade

1. Préparation du système (pré-traitement)

```
#!/usr/bin/python
from yade import pack

# Material of grains
Mat1 = O.materials.append(ViscElMat(cn=33.5, cs=16.75, density=1.91,
frictionAngle=0.4637, kn=2e5, ks=1e5))

# Material of walls
Mat2 = O.materials.append(ViscElMat(cn=33.5, cs=16.75, density=1.91,
frictionAngle=0.4637, kn=2e5, ks=1e5))

# Timestep
O.dt=1e-4

# Make a tracer
big_sphr=O.bodies.append(utils.sphere((0,0,8),2.,fixed=False,color=(1,1,0),
highlight=True,material=Mat1))

# Create sphere packing
sp=pack.SpherePack()
sp.makeCloud((-7.2,-7.2,15.), (7.2,7.2,80.9),rMean=.5,rRelFuzz=.2,num=6400)
sp.toSimulation(color=(0,0,1),material=Mat1)

# Create cylinder (radius=10)
Cylinder=O.bodies.append(geom.facetCylinder((0,0,30.),10.0,height=60.0,wallMask=6,
segmentsNumber=64,material=Mat2))

# Interactions
O.engines=[
    ForceResetter(),
    InsertionSortCollider([Bo1_Sphere_Aabb(),Bo1_Facet_Aabb()]),
    InteractionLoop(
        [Ig2_Sphere_Sphere_ScGeom(),Ig2_Facet_Sphere_ScGeom()],
        [Ip2_ViscElMat_ViscElMat_ViscElPhys()],
        [Law2_ScGeom_ViscElPhys_Basic()]
    ),
    NewtonIntegrator(damping=0,gravity=(0,0,-1.)),
    PyRunner(iterPeriod=320000,command='AddData()')
]
```

```

# Saving parameters of spheres in file
def AddData():
    # Open file
    fil=open("initial_proprt.cy lind_4D", "a+")
    fil.write ('id \t x \t y \t z \t vx\t vy \t vz \t radius \n')
    for b in O.bodies:
        if (type(b.shape)==Sphere):
            number,rad=b.id,b.shape.radius
            x,y,z=b.state.pos[0],b.state.pos[1],b.state.pos[2]
            veloc_x,veloc_y,veloc_z=b.state.vel[0],b.state.vel[1],b.state.vel[2]
            fil.write("{:d}\t{:3.2g}\t{:3.2g}\t{:3.2g}\t{:3.2f}\t{:3.2f}\t{:3.2f}\t{:3.2g}\n".format(number,x,y,z,veloc_x,veloc_y,veloc_z,rad))
            O.save('/home/hafsa/progs_python/init_config_4D.yade.gz')

O.run(320100)
utils.waitIfBatch()

```

2. Empilement vibré verticalement contenant un traceur

```
#!/usr/bin/python
O.load('/home/hafsa/traceur/init_config_4D.yade.gz')

# Constants:
freq=0.244

""" open file"""
fil=open('oscil_tracer_4D_G5_A2_32T_.dat', 'w')
fil.write('#temps\tx\ty\tz\tv_x\tv_y\tv_z \n')

# Interactions and oscillations
O.engines=O.engines+[HarmonicMotionEngine(A=[0,0,2], f=[0,0,freq], fi =
[0.0,0.0,0.0],ids=[b.id for b in O.bodies if isinstance(b.shape,Facet)]),
    PyRunner(iterPeriod=5123,command='AddData()'),
    # iterPeriod=1e4/(8*freq) ---- save every t/8 periode of simulation
    PyRunner(iterPeriod=1311365,command='Data()'),
    # iterPeriod=128*1e4/freq ---- end of simulation
    #SnapshotEngine(iterPeriod=1000,fileBase='fallingcylinder_',
    label='snapshooter')
]

# Saving parameters of spheres in file
def AddData():
    fil.write('%d\t%.3f\t%.3f\t%.3f\t%.3f\t%.3f\t%.3f\n' %
(O.iter,O.bodies[0].state.pos[0],O.bodies[0].state.pos[1],O.bodies[0].state.pos[2]
],O.bodies[0].state.vel[0],O.bodies[0].state.vel[1],O.bodies[0].state.vel[2]))

# Saving simulation
def Data():
    O.save('/home/hafsa/traceur/oscillat_tracer_4D_G5_A2_32T_.yade.gz')

# Fixing timestep
O.dt=1e-4

O.run(1311465)

utils.waitIfBatch()
```

Références

- [1] B. Andreotti, Y. Forterre, O. Pouliquen, *Les milieux granulaires entre fluide et solide* (Edité par EDP Sciences, France, 2011).
- [2] K. van der Vaart, Particle Size Segregation in Dense Granular Flows , Thèse de doctorat en Mécanique N°7028, sous la direction de C. Ancey, École Polytechnique Fédérale de LAUSANNE, Suisse, Présentée en Novembre 2016 .
- [3] T. Pöschel ,T. Schwager, *Computational Granular Dynamics, Models and Algorithms*, (Edité par Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Allemagne, 2005).
- [4] V. Richefeu, Approche par éléments discrets 3D du comportement de matériaux granulaires cohésifs faiblement contraints, Thèse de doctorat en Mécanique, sous la direction de M. JEAN, Université Montpellier II - Sciences et Techniques du Languedoc, France, soutenue en 2005 .
- [5] J. Schiffer, S. Dippel et D.E. Wolf, J. Phys. I France **6**, 5 (1996) .
- [6] D. Tsuji, M. Otsuki and H. Katsuragi, Laboratory experiment and DEM simulation of granular heap flows under vertical vibration, Universités de Nagoya et Osaka, Japon, PRE **99**, 062902 (11 février 2019).
- [7] T. Shinbrot, The Brazil Nut Effect -in reverse, NATURE, **429**, 352 (27 MAY 2004).
- [8] D. C. Hong and P. V. Quinn, Reverse Brazil Nut Problem: Competition Between Percolation and Condensation, PRL, **86**, 15 (9 Avril 2001).
- [9] A. P. J. Breu, H.-M. Ensner, C. A. Kruelle, and I. Rehberg, Reversing the Brazil-Nut Effect : Competition between Percolation and Condensation, PRL, **90**, 1 (10 JANUARY 2003).
- [10] R. Delannay, Les milieux granulaires: un exemple de système complexe, Université de Renne, France, Communication dans un congrès (2013).
- [11] M. P. Allen, D. J. Tildesley, *Computer Simulation of Liquids*, (édité par CLARENDON PRESS OXFORD, 1987).

[12] J. B. Knight, H. M. Jaeger, and S. R. Nagel, Vibration-Induced Size Separation in Granular Media: The Convection Connection, PRL, **70**, 24 (14 JUNE 1993).

[13] CRACKING THE BRAZIL NUT EFFECT, (2006).

http://www.csef.colostate.edu/2006CSEF/_Technical_Paper_Winner.pdf

[14] M. A. Naylor, Michael R. Swift, and P. J. King, Air-driven Brazil Nut Effect, PRE **68**, 012301 (2003).

[15] Temps CPU <https://www.techopedia.com/definition/2858/cpu-time>

[16] <http://matiereengrains.fr/index.php/segregation-granulaire/>

[II-1] S. M. Khefif, Dynamique d'étalement d'un empilement granulaire sous vibrations horizontales, Thèse de doctorat ès Sciences en Physique Théorique, sous la direction de F. Ould-Kaddour, université Abou Bekr Belkaïd -Tlemcen-Algérie, Présentée en septembre 2018.

[II-2] Documentation d la version de Yade 2019-04-05.git-0512330 / 2019-04-05.git-0512330. <https://yade-dev.gitlab.io/trunk/>

[II-3] [<https://github.com/yade/trunk/blob/master/pkg/dem/ViscoelasticPM.hpp>]

Résumé

L'objectif de cet travail est d'étudier numériquement la ségrégation granulométrique, notamment l'effet des noix de Brésil. Pour cela, on étudie deux systèmes de granulas contenus dans un cylindre vibré verticalement. Le premier système est un tas polydisperse avec un traceur. Le deuxième contient deux familles de grains polydisperses. À l'exception du résultat inattendu de l'insensibilité de l'inversement des phases au coefficients de frottement grain-paroi, on peut dire que la ségrégation granulométrique est sensible, à la fois, à l'accélération et l'amplitude des vibrations, au rapport de taille des grains et aussi au coefficient de frottement microscopique.

Mots clés: Ségrégation, effet des noix de Brésil, vibrations verticales, convection, percolation.

ملخص

الهدف من هذا العمل هو دراسة الفصل الحبيبي رقميا، بما في ذلك تأثير المكسرات البرازيلية. لذلك ندرس نظامين من الحبيبات الموجودة في اسطوانة تهتز عموديا. النظام الأول عبارة عن كومة متعددة العناصر مع تتبع. والثاني يحتوي على عائلتين من الحبوب بحجمين مختلفين. باستثناء النتيجة الغير متوقعة لحساسية انعكاس الطور لمعاملات احتكاك جدار الحبيبات ، يمكن القول أن الفصل الحبيبي يعتمد على كل من تسارع الاهتزاز وسعته، نسبة حجم الحبوب وكذلك معامل الاحتكاك المجهرى.

الكلمات المفتاحية: الفصل ، تأثير جوز البرازيل، الاهتزاز العمودي ، الحمل الحراري ، الترشيح

Summary

By the mean of numerical simulations, we study the segregation in a particular granular system, notably the Brazil Nut Effect. We analyse the results of a vertically vibrated cylinder filled with two distinct granular systems. The first system is a polydisperse pile with a tracer in it, the second one is composed of two piles with different mean sizes of their grains. Apart from an outstanding insensitivity of the reverse of the center of masses in the second experiment to the particle-wall friction coefficient, we clearly see that the segregation in granular media depends on the vibration acceleration and its amplitude, the size ration of the grains, and also on the microscopic friction parameter.

Key words: Segregation, Brazil Nut effect, vertical vibration, convection, percolation.