

N° d'ordre : 41703

ENS Mines Douai

Université de Lille 1



# THÈSE

Présenté en vue  
d'obtenir le grade de

**DOCTEUR**

en

**SPÉCIALITÉ : GENIE CIVIL**

Par

**Kai WU**

DOCTORAT DELIVRÉ CONJOINTEMENT  
PAR L'ÉCOLE NATIONALE SUPÉRIEURE DES MINES DOUAI ET  
L'UNIVERSITÉ DE LILLE 1

## Étude du cisaillement des matériaux granulaires homogènes et hétérogènes par expérimentation et simulation de l'essai triaxial

Soutenue le 04 Mars 2015 devant le jury d'examen

<i>Rapporteurs :</i>	<b>Jérôme Fortin</b>	Professeur, Université Picardie Jules Verne
	<b>Christophe Martin</b>	Directeur de Recherche CNRS, Grenoble-INP, Laboratoire SIMAP/GPM2
<i>Examineurs :</i>	<b>Ould Dris</b>	Professeur, Université de Technologie de Compiègne
	<b>Christophe Binetruy</b>	Professeur, École Centrale Nantes
<i>Directeurs :</i>	<b>Sébastien Remond</b>	Professeur, École des Mines de Douai
	<b>Nor-Edine Abriak</b>	Professeur, École des Mines de Douai
<i>Co-encadrants :</i>	<b>Patrick Pizette</b>	Maître-assistant, École des Mines de Douai
	<b>Frédéric Becquart</b>	Maître-assistant, École des Mines de Douai







*Twenty years from now you will be more disappointed by the things that you didn't do than by the ones you did do, so throw off the bowlines, sail away from safe harbor, catch the trade winds in your sails. Explore, Dream, Discover.*

*–Mark Twain*



# Remerciement

Le travail de thèse présenté dans ce mémoire a été effectué au sein du département Génie Civil et Environnemental à l'École Nationale Supérieure des Mines Douai. Pendant cette période, j'ai acquis des connaissances spécialisées et rencontré de nouveaux amis. Cette expérience restera toujours un excellent souvenir dans ma mémoire.

Je voudrais tout d'abord remercier sincèrement à M. Sébastien Rémond, directeur de thèse qui a aussi dirigé la partie numérique. La communication entre nous a toujours été facile. Il a partagé avec moi ses connaissances et expérience professionnelle de façon désintéressée. Ses nouvelles idées ont toujours été des armes efficaces pour résoudre les problèmes difficiles. Grâce à son aide, la thèse a avancé plus facilement. Je lui suis très reconnaissant pour ses conseils, pour ses soutiens, et aussi pour m'avoir dirigé sur la route de science. Je tiens à remercier ensuite M. Abriak Nor-Edine, mon co-directeur de thèse qui est un grand professeur dans notre école. Bien qu'il soit très chargé dans son travail, il n'a jamais oublié ma thèse. Chaque fois que l'on s'est vu dans son bureau ou dans les couloirs, il m'a encouragé avec beaucoup d'enthousiasme. Il m'a donné beaucoup de conseils dans la partie expérimentale, qui m'ont beaucoup inspirés. Je tiens à lui exprimer ma profonde gratitude pour sa sollicitude à mon égard.

Je souhaite également remercier M. Patrick Pizette, qui m'a encadré dans la partie numérique de ma recherche. La prise en main du code maison sur lequel j'ai travaillé était très difficile au démarrage de la thèse. Patrick a fait beaucoup d'efforts pour m'aider dans cette période. A ses côtés, j'ai pu déboguer, corriger et modifier le code, ce qui a été très bénéfique et a facilité ma recherche. Un grand merci, Patrick, pour ton suivi agréable et enrichissant.

Je souhaite exprimer vivement ma gratitude à M. Frédéric Becquart, qui m'a encadré dans la partie expérimentale de ma thèse. Il a montré de très grandes compétences professionnelles dans les essais expérimentaux. Nous avons résolu plein de problèmes ensemble dans la conception de l'essai triaxial. L'ambiance de travail était très agréable. Le programme expérimental sur l'essai triaxial a beaucoup amélioré mes capacités en tant qu'un expérimentateur. Je suis très content d'avoir travaillé avec toi, Fred.

Je voudrais également remercier M. Weiya XU dans cet heureux moment, mon directeur de master à l'université de Hohai en Chine. Il m'a recommandé de candidater pour la bourse du gouvernement chinois que j'ai finalement obtenue. Honnêtement, la vie doctorale a totalement changé la trajectoire de ma vie. Je lui exprime tous mes remerciements en profitant de cet heureux moment. Je remercie les techniciens du laboratoire. Ce travail de thèse n'aurait pas été possible sans leur aide : Christophe Cappelaere, Guillaume Potier, Michael D'helft.

Je remercie mes chers collègues du département : Jean De Zelicourt chef département, Denis Damidot ex-chef de département, Rachid Zentar, David Bulteel, Claire Alary,

Georges Aouad, Mahfoud Benzerzour, Christine Lors, Carole Delchambre, Jacqueline Woitrain, Adolphe Kimbonguila, Coralie Deparis, Moussa Dia, Abdelhafid Kasmi, Hassane Azrar, Issameddine Khezami, Thang Le, Jean Ducasse Lapeyrousse, Cyril Scribot, Maxime Renault, Abdelfeteh SadoK, Walid Maherzi, Ouissem Kharroubi, Raouf Achour.

J'exprime aussi mes remerciements à mes amis qui m'ont encouragé pendant ma thèse, ce sont Zengfeng Zhao, Yanyu Lv, Feiyi Du, Baochao Li, Yang Liu, Shouwen Zhang, Yun Huang.

Je voudrais exprimer les remerciements sincères à Keren Ding, merci de m'accompagner à travers le moment le plus dur dans la vie, tu es la source de mes progrès.

Enfin, je remercie du fond de mon cœur mes parents qui m'ont toujours soutenu et encouragé pendant toute la période de la thèse. J'espère qu'ils savent combien je leur suis reconnaissant.



# Abstract

This research work aims at studying the shear behavior of homogeneous and heterogeneous granular materials by triaxial test. The work is performed on glass beads both in laboratory tests and by numerical simulations in DEM (Discrete Element Method). From an experimental point of view, tests are first performed on homogeneous samples (monodisperse beads), then expands to heterogeneous cases like monodisperse systems comprising a large inclusion and bidisperse mixtures. From a numerical point of view, a cylindrical rigid wall boundary condition, based on the Lamé formula is integrated into an existing discrete element code. A series of procedures is proposed to model the triaxial test in conditions similar to experimental tests. The numerical and experimental results are compared both for monodisperse and heterogeneous systems. The numerical model can reproduce deviatoric curves very satisfactorily in all experimental conditions. It also allows describing correctly the volumetric strains of the sample despite the simplicity of the boundary condition used. The developed numerical tool is an interesting complement to experiment triaxial tests. It makes it possible to study the influence of micromechanical parameters on the overall behavior of materials.

**KEY WORDS :** Triaxial test, DEM, Granular material, Shear Behavior, Heterogeneous, Homogeneous, Condition limit, Glass bead



# Résumé

Ce travail de recherche a pour objectif d'étudier le comportement au cisaillement des matériaux granulaires homogènes et hétérogènes par l'essai triaxial de révolution. Les travaux sont réalisés sur des billes de verre et comportent à la fois des essais triaxiaux de laboratoire et des simulations numériques en DEM (Discret Element Method). D'un point de vue expérimental, les essais sont tout d'abord réalisés sur des échantillons homogènes (billes monodisperses). Ensuite, on étudie des systèmes de billes monodisperses comportant une inclusion de grande taille et des mélanges de billes bidisperses pour représenter les cas hétérogènes. D'un point de vue numérique, une condition limite cylindrique paroi rigide, basée sur la formule de Lamé, est intégrée dans un code aux éléments discrets existant. Une série de procédures est proposée afin de modéliser l'essai triaxial dans des conditions comparables aux essais expérimentaux. Les résultats numériques et expérimentaux sont ensuite comparés, à la fois pour les systèmes monodisperses et pour les milieux hétérogènes. Le modèle numérique permet de reproduire de manière très satisfaisante la courbe déviatorique dans toutes les conditions expérimentales utilisées. Il permet également de décrire correctement les déformations volumiques de l'échantillon, malgré la simplicité de la condition aux limites utilisée. L'outil numérique développé constitue ainsi un complément intéressant aux essais expérimentaux. Il permet en effet d'étudier l'influence de paramètres micromécaniques sur le comportement global des matériaux.

**MOTS CLÉS :** Essai triaxial, DEM, Matériau granulaire, Cisaillement, Hétérogénéité, Homogènes, Condition limite, Bille de verre



# Abréviation

$e_{prep}$	Indice de vide de l'échantillon sur la table d'opération
$e_{sat}$	Indice de vide après saturation de l'échantillon
$e_{cons}$	Indice de vide après consolidation isotrope et avant cisaillement
$e_{cis}$	Indice de vide après cisaillement
$q_{pic}$	Contrainte déviatorique à l'état caractéristique
$q_{palier}$	Contrainte déviatorique à l'état critique
$\varphi_{pic}$	Angle de frottement à l'état caractéristique
$\varphi_{palier}$	Angle de frottement à l'état critique
$\psi$	Angle de dilatation
$P_{conf}$	Pression de confinement
$\xi_n$	Indentation entre les grains en contact
$R$	Rayon effectif
$\gamma_n$	Coefficient d'amortissement
$E$	Module de Young
$T_{ij}$	Couple du moment
$w$	vitesse angulaire du grain
$I$	nombre d'inertie
$c$	compacité
$\Delta r$	Variation du rayon de la condition limite cylindrique
$\Delta t$	Pas de temps
$\mu_{gg}$	Coefficient de frottement grain-grain
$\mu_{gw}$	Coefficient de frottement grain-paroi
$\mu_{gp}$	Coefficient de frottement grain-pierre poreuse
$\mu_{r_{gg}}$	Coefficient de roulement grain-grain
$v$	vitesse de cisaillement
$Z$	Nombre de coordination
$f$	Indice de friction
$d$	diamètre



# Table des matières

Remerciment . . . . .	vii
Abstract . . . . .	ix
Résumé . . . . .	xi
Abréviation . . . . .	xiii
Introduction Générale . . . . .	1
<b>1 Généralités sur le comportement mécanique des matériaux granu- laires</b>	<b>5</b>
1.1 Généralités sur les sollicitations de cisaillement . . . . .	6
1.1.1 Application dans le domaine du Génie Civil . . . . .	6
1.1.2 Notion de cisaillement . . . . .	7
1.1.3 Critère de Mohr Coulomb . . . . .	7
1.2 Essais de cisaillement . . . . .	10
1.2.1 Différents essais de cisaillement . . . . .	10
1.2.2 Essais triaxial . . . . .	12
1.2.3 Comportement macroscopique des sols cisailés à l'essai triaxial	18
1.2.4 Stick-slip . . . . .	22
1.2.5 Bande de rupture . . . . .	25
1.3 Simulation numérique de l'essai triaxial . . . . .	28
1.3.1 Différentes méthodes de simulations . . . . .	29
1.3.2 Histoire de DEM . . . . .	30
1.3.3 Conditions aux limites . . . . .	31
1.3.4 Tenseur de contraintes . . . . .	37
1.3.5 Rappel du tenseur de contrainte . . . . .	39
1.3.6 Trois méthodes de calcul du tenseur de contraintes . . . . .	39
1.3.7 Hétérogénéité des échantillons . . . . .	41
1.3.8 Validation de la DEM par comparaison avec les essais expéri- mentaux . . . . .	42
1.4 Conclusion . . . . .	42
<b>2 Comportement mécanique de billes de verre monodisperses</b>	<b>45</b>
2.1 Introduction et objectifs . . . . .	46
2.2 Matériau et méthodes expérimentales . . . . .	46
2.2.1 Matériau de l'étude : caractéristiques et choix du matériau modèle billes de verre . . . . .	46
2.2.2 Dispositif expérimental dédié à l'étude (appareil triaxial classique)	47
2.3 procédures d'essais . . . . .	50
2.3.1 Préparation d'un essai triaxial (synoptique) . . . . .	50
2.3.2 Protocoles de préparation des échantillons . . . . .	50
2.3.3 Saturation . . . . .	54

2.4	Programme expérimental . . . . .	55
2.4.1	Série d'essais liée à l'influence de la vitesse de déplacement . . . . .	56
2.4.2	Série d'essais liée à l'influence de la saturation et de la pression moyenne effective pour les échantillons denses . . . . .	57
2.4.3	Série d'essais liée à l'influence de la saturation et de la pression moyenne effective pour les échantillons moyennement denses . . . . .	57
2.4.4	Série d'essais liée à l'influence de la texture . . . . .	57
2.4.5	Evaluation de la répétabilité expérimentale . . . . .	57
2.4.6	Paramètres mécaniques à identifier . . . . .	58
2.5	Résultats et analyses . . . . .	59
2.5.1	Observations générales / Réponse déviatorique type . . . . .	59
2.5.2	Comportement des billes de verre denses saturées : résultats et analyses . . . . .	60
2.5.3	Comportement des billes de verre moyennement denses saturées : résultats et analyses . . . . .	67
2.5.4	Comparaison des résultats sur échantillons denses et moyennement denses . . . . .	71
2.5.5	Comparaison des résultats entre les états sec et saturé . . . . .	72
2.5.6	Influence de la texture . . . . .	75
2.6	Conclusion expérimentale . . . . .	77
<b>3</b>	<b>Modélisation des milieux granulaires monodisperse par la DEM</b>	<b>79</b>
3.1	Démarche et objectifs de l'étude . . . . .	80
3.2	Méthode des éléments discrets (DEM) . . . . .	81
3.2.1	Présentation du code demGCE et travaux de développement effectué . . . . .	81
3.2.2	Présentation générale de la DEM . . . . .	82
3.2.3	Identification du contact . . . . .	83
3.2.4	Lois de contact . . . . .	84
3.3	Paramétriques matériaux . . . . .	88
3.3.1	Calibration du coefficient de restitution . . . . .	88
3.3.2	Paramètres appliqués dans les simulations . . . . .	90
3.4	Procédure de simulations de l'essai triaxial . . . . .	91
3.4.1	Stratégie mise en place pour modéliser l'essai triaxial . . . . .	92
3.4.2	Modélisation de la paroi rigide cylindrique . . . . .	93
3.4.3	Préparation de l'empilement initial : étape de génération et sédimentation . . . . .	94
3.4.4	Préparation de l'empilement : densification par Compaction et vibration . . . . .	96
3.4.5	Contrôle de la condition cylindrique : consolidation isotrope et cisaillement triaxial . . . . .	99



3.5	Tenseur moyen de contraintes . . . . .	104
3.6	Visualisation du comportement de l'empilement . . . . .	106
3.7	Confrontation des résultats expérimentaux et numériques . . . . .	109
3.8	Étude paramétrique . . . . .	113
3.8.1	Influence du frottement . . . . .	113
3.8.2	Influence du coefficient de roulement . . . . .	119
3.8.3	Influence de l'indice des vides initial . . . . .	121
3.8.4	Influence de la vitesse de cisaillement . . . . .	123
3.8.5	Indice de friction . . . . .	124
3.8.6	Répétition de l'essai numérique . . . . .	126
3.9	Conclusions . . . . .	127
<b>4</b>	<b>Cisaillement de milieux granulaires hétérogènes</b>	<b>129</b>
4.1	Introduction . . . . .	130
4.2	Empilement de particules monodisperses de différentes tailles . . . . .	131
4.2.1	Étude expérimentale sous pression de confinement unique . . . . .	131
4.2.2	Étude numérique sous différentes pression de confinement . . . . .	134
4.2.3	Comparaison des résultats expérimentaux et numériques . . . . .	137
4.2.4	Étude numérique de l'échantillon sous différentes pressions de confinement . . . . .	137
4.2.5	Conclusion . . . . .	138
4.3	Étude sur l'influence de la présence d'une hétérogénéité de taille . . . . .	139
4.3.1	Étude expérimentale sous pression de confinement unique . . . . .	139
4.3.2	Étude numérique de l'inclusion d'une grosse bille sous pression de confinement unique . . . . .	142
4.3.3	Comparaisons résultats expérimentaux et numériques . . . . .	144
4.3.4	Études numériques sous différentes pressions de confinement . . . . .	145
4.3.5	Conclusion . . . . .	147
4.4	Étude sur des mélanges de particules de deux tailles différentes . . . . .	148
4.4.1	Étude expérimentale sur l'influence de la composition de mélanges bi-disperses de billes sous pression de confinement unique . . . . .	148
4.4.2	Étude numérique sur l'influence de la composition de mélanges de particules bidisperses sous pression de confinement unique . . . . .	150
4.4.3	Comparaison des résultats expérimentaux et numériques sur différents mélanges sous pression de confinement unique . . . . .	152
4.4.4	Étude numérique sur différents mélanges sous différentes pressions de confinement . . . . .	155
4.4.5	Conclusion . . . . .	158
4.5	Conclusion . . . . .	158

---

<b>5</b>	<b>Conclusions et Perspectives</b>	<b>161</b>
5.1	Conclusions . . . . .	162
5.2	Perspectives . . . . .	163

# Introduction Générale

Aujourd'hui, les sous-produits industriels comme les MIDNDs (Mâchefers d'Incineration de Déchets Non Dangereux), les sédiments de dragage, les granulats recyclés, les cendres volantes . . . sont de plus en plus utilisés dans le domaine du Génie Civil, notamment en techniques routières, pour des raisons à la fois économiques et environnementales. Toutefois, une utilisation pertinente et fiable de ces matériaux dans les ouvrages nécessite une caractérisation précise de leur comportement, notamment de leur comportement mécanique sous sollicitation de cisaillement.

Cependant, ces sous-produits sont souvent plus hétérogènes que les sols ou les autres matériaux naturels traditionnellement utilisés. En réalité, les hétérogénéités des sous-produits industriels peuvent être de différentes natures. On peut distinguer des hétérogénéités de tailles (présence de grosses particules dans un milieu granulaire), des hétérogénéités de formes, des hétérogénéités de propriétés mécaniques ou chimiques . . . Évidemment, la présence de ces hétérogénéités change le comportement mécanique des matériaux. Ainsi, la caractérisation des matériaux granulaires hétérogènes est très importante afin de les valoriser correctement dans les applications de génie civil.

Le département Génie Civil et Environnemental de l'Ecole des Mines de Douai a une longue expérience dans la valorisation des sous-produits industriels en génie civil. Becquart [1] a fait une étude sur la valorisation des mâchefers en techniques routières en 2007 ; Le [2] a poursuivi ses travaux expérimentalement et numériquement avec la FEM (Méthode des Eléments finis) ; Wang [3] a caractérisé le comportement mécanique des sédiments de dragage expérimentalement en 2012 ; Zhao [4] a étudié la valorisation des sables de béton recyclé dans les mortiers en 2014. . . La caractérisation du comportement mécanique des matériaux hétérogènes demande beaucoup d'essais expérimentaux en laboratoire. La mise en œuvre de ces essais peut rapidement devenir lourde et coûteuse. Cependant, la modélisation numérique offre un outil de caractérisation très efficace pour compléter les essais expérimentaux, notamment lorsqu'on s'intéresse à l'influence de divers paramètres sur le comportement global des matériaux.

La résistance au cisaillement est un des points les plus importants pour caractériser les matériaux en mécanique des sols. Les catastrophes naturelles comme les glissements de terrain, les avalanches, ou la rupture des ouvrages en génie civil sont en effet souvent provoqués par un dépassement de la résistance au cisaillement. Pour étudier la résistance au cisaillement des matériaux, l'essai triaxial est l'un des plus utilisés pour caractériser la résistance au cisaillement des matériaux en laboratoire.

Cette thèse concerne le comportement au cisaillement des matériaux granulaires. Les matériaux granulaires étudiés sont des matériaux modèles (billes de verre monodisperses) qui possèdent tous les mêmes formes et les mêmes propriétés mécaniques. Seule la taille

de quelques particules est susceptible de varier afin de représenter des hétérogénéités. Le comportement au cisaillement de ces matériaux particuliers est étudié à la fois d'un point de vue expérimental à partir des essais triaxiaux de laboratoire et d'un point de vue numérique à partir d'une modélisation aux éléments discrets. Les objectifs principaux de la thèse sont, d'une part, d'étudier l'influence des hétérogénéités sur le comportement au cisaillement et d'autre part de proposer un outil numérique susceptible de compléter les essais expérimentaux, notamment dans le cas des études paramétriques.

Notre travail commence par une étude sur le cisaillement d'un matériau granulaire homogène modèle (billes de verre monodisperses). L'étude numérique permet de faire varier facilement les paramètres et d'étudier leur influence découplée. Dans cette partie, on souhaite pouvoir faire une comparaison entre les résultats numériques et expérimentaux, d'où la nécessité de travailler sur un matériau facilement modélisable (billes de verre).

Une fois que le comportement du matériau homogène est identifié, on ajoute des hétérogénéités de taille dans les empilements homogènes et on mélange des billes bidisperses pour mettre en évidence leur influence (par comparaison avec le comportement du matériau homogène).

Ce mémoire de thèse est composé de cinq chapitres dont voici l'organisation :

Le chapitre 1 est consacré à l'étude bibliographique sur les travaux expérimentaux et numériques concernant le cisaillement des matériaux granulaires. Les résultats importants sur l'essai triaxial à la fois expérimental et numérique sont présentés.

Le chapitre 2 porte sur la caractérisation expérimentale des billes de verre monodisperses dans l'essai triaxial. Des échantillons denses et moyennement denses sont fabriqués par deux différents modes opératoires. Les paramètres comme l'état hydrique, la vitesse de cisaillement, la texture de surface des billes de verre sont étudiés également. Le phénomène de stick-slip est un point important dans ce chapitre.

Le chapitre 3 est focalisé sur la modélisation de l'essai triaxial par des empilements monodisperses. Dans ce chapitre, la méthode DEM est appliquée pour simuler l'essai triaxial en 3D. Une condition aux limites de type paroi rigide cylindrique est proposée pour piloter la pression de confinement. Une procédure complète pour simuler l'essai triaxial est ensuite développée et comporte : une phase de génération et parfois de densification des empilements, une phase de consolidation isotrope et une phase de cisaillement des matériaux. Finalement, les résultats expérimentaux et numériques sont comparés, puis les études paramétriques sont réalisées afin d'étudier le comportement global du matériau.

Dans le chapitre 4, trois cas différents sont étudiés. Premièrement, l'étude des empilements de billes monodisperses entamée dans les chapitres 2 et 3 est poursuivie en faisant varier le diamètre des billes afin d'étudier l'influence de la taille des particules. Ensuite, nous nous intéressons aux empilements avec une inclusion de grande taille

positionnée à différents endroits pour connaître l'influence d'une hétérogénéité de taille sur le comportement mécanique mesuré dans une cellule de dimension réduite. Troisièmement, le comportement mécanique des empilements de billes bi-disperses est étudié.

Dans la fin de cette thèse, une conclusion générale rassemble toutes les principales réponses obtenues est fournie et on expose les perspectives de cette étude pour des travaux futurs.



# 1

## **Généralités sur le comportement mécanique des matériaux granulaires sous sollicitations de cisaillement – essai triaxial expérimental et modélisation numérique**

## 1.1 Généralités sur les sollicitations de cisaillement

### 1.1.1 Application dans le domaine du Génie Civil

**L**E sol est un matériau constitué d'un ensemble de particules solides entourées de vides. Les particules peuvent être constituées de différents minéraux alors que les vides peuvent être remplis d'eau et/ou d'air. En général, les contraintes dans le sol changent avec la variation des charges extérieures. Si la contrainte tangentielle dépasse la résistance au cisaillement d'un sol (valeur maximale de la contrainte de cisaillement que le sol peut supporter) une rupture commence à se produire. La rupture correspond à une déformation très grande voire non bornée. Dans ce cas, le sol va glisser le long d'une surface de rupture. Dans la nature, les catastrophes naturelles comme les glissements de terrain, les avalanches ... sont souvent provoquées par les sollicitations de cisaillement dans le sol.

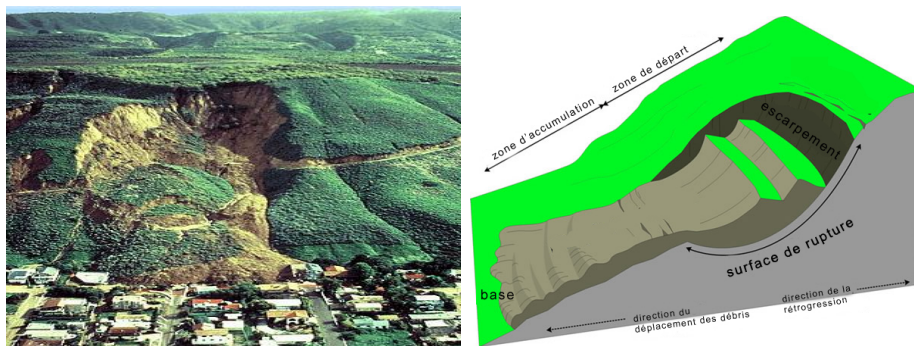


FIGURE 1.1: (a) Glissement de terrain ; (b) Schéma d'illustration de glissement de terrain

La Figure 1.1 page 6 (a) montre une photo réelle d'un glissement de terrain au Japon, on voit qu'un bloc de terrain glisse complètement sur une pente et cause beaucoup de dommages aux maisons, et peut provoquer des victimes. La Figure 1.1 page 6 (b) montre un schéma explicatif du glissement de terrain, on voit que la masse de terrain glisse le long d'une surface de rupture.

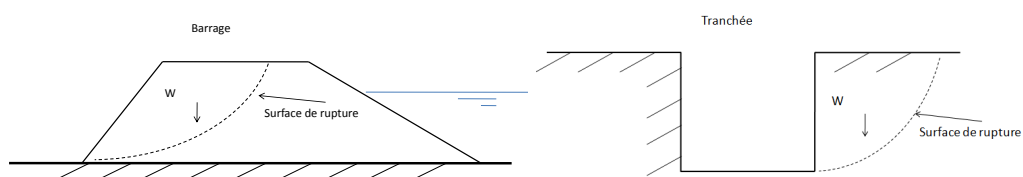


FIGURE 1.2: Surfaces de rupture dans les ouvrages : (a) surface de rupture dans un barrage ; (b) surface de rupture dans une tranchée

En géotechnique, on s'intéresse à la résistance au cisaillement des sols afin de garantir la sécurité des ouvrages comme les barrages, les tunnels, les fondations ... en phase travaux et après construction, Figure 1.2 page 6.



### 1.1.2 Notion de cisaillement

Le cisaillement d'un matériau fait intervenir une contrainte  $\tau$  appliquée de manière parallèle ou tangentielle sur une face d'un matériau, par opposition aux contraintes normales qui sont appliquées de manière perpendiculaire à la face.

La résistance au cisaillement correspond à la contrainte de cisaillement maximale que peut supporter un sol avant de subir des déformations trop importantes. Elle est l'une des principales propriétés mécaniques du sol. Lorsque le sol est en rupture, l'état de rupture est lié non seulement à la nature propre du sol, mais aussi à la combinaison des contraintes exercées. La combinaison des contraintes à la rupture est définie comme le critère de rupture. Différents critères de résistance s'appliquent à différents matériaux, Figure 1.3 page 7. Par exemple, les critères de Tresca ou de Von Mises correspondent bien aux matériaux métalliques. En géotechnique, le critère de rupture de Mohr – Coulomb est généralement utilisé pour les sols.

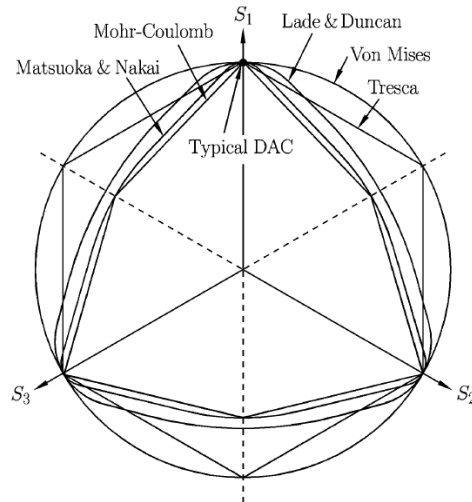


FIGURE 1.3: Différents critères de rupture sur le plan déviatorique [5][6]

### 1.1.3 Critère de Mohr Coulomb

Le critère de contrainte de Mohr-Coulomb est basé sur la théorie de Mohr-Coulomb, connue aussi sous le nom de théorie de la friction interne. Ce critère est utilisé pour des matériaux fragiles présentant des caractéristiques différentes en traction et en compression. Les matériaux fragiles ne présentent pas de limite d'élasticité spécifique. Généralement, le critère de rupture de Mohr-Coulomb inclut deux parties principales : l'équation de Coulomb et le cercle de Mohr. L'équation de Coulomb a été proposée par Coulomb en 1776 pour étudier les murs des ouvrages militaires [7]. La relation s'exprime par équation linéaire :

$$\tau = \sigma \tan \alpha + c \quad (1.1)$$

Où  $\tau$  est la résistance au cisaillement du sol,  $\sigma$  est la contrainte normale,  $\alpha$  et  $c$  sont respectivement l'angle de frottement interne et la cohésion. Pour certains matériaux non-cohésifs, comme le sable sec ou les graviers, la cohésion  $c$  est égale à zéro.

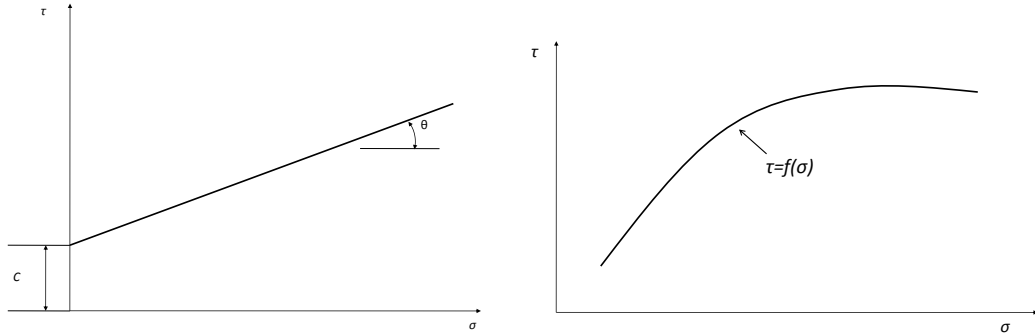


FIGURE 1.4: (a) Equation de résistance de Coulomb (b) Critère de rupture de Mohr

En 1900, Mohr a établi, pour tous les matériaux réels, un critère de rupture. La contrainte de cisaillement sur un plan de rupture est une fonction unique de la contrainte normale sur ce plan [8]. Cette relation est formulée de la manière suivante :

$$\tau_f = f(\sigma) \quad (1.2)$$

La fonction définit une relation entre contrainte normale et contrainte tangentielle, s'appelant l'enveloppe de rupture de Mohr.

Le cercle de Mohr représente un état de contraintes en un point à l'équilibre. Imaginons un élément volumique de matériau granulaire à la rupture (Figure 1.5 page 8), on applique des contraintes normales et tangentielles dans le plan de rupture.

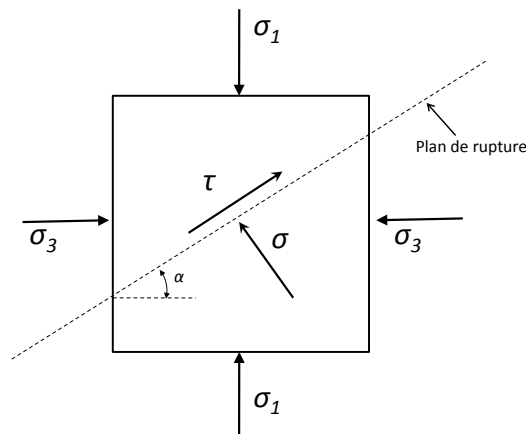


FIGURE 1.5: Contraintes normale et tangentielle dans un plan incliné d'un angle  $\alpha$  par rapport à l'horizontale

## 9 Généralités sur le comportement mécanique des matériaux granulaires

Par calcul, on peut montrer que les contraintes  $\sigma$  et  $\tau$  appliquées sur un plan incliné d'un angle  $\alpha$  sont données par les expressions suivantes :

$$\sigma = \sigma_1 \cos^2 \alpha + \sigma_3 \sin^2 \alpha \quad (1.3)$$

$$= \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3) + \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3) \cos 2\alpha \quad (1.4)$$

$$\tau = \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3) \sin 2\alpha \quad (1.5)$$

où  $\alpha \in [-90^\circ, 90^\circ]$ .

En élevant les deux équations précédentes au carré et en les additionnant, on obtient l'équation d'un cercle, appelé cercle de Mohr, de rayon  $(\sigma_1 - \sigma_3)/2$  centré au point  $(\sigma_1 + \sigma_3)/2$ . L'équation du cercle de Mohr s'écrit :

$$\left[\sigma - \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3)\right]^2 + \tau^2 = \frac{1}{4}(\sigma_1 - \sigma_3)^2 \quad (1.6)$$

Ici,  $\sigma_1$  est la contrainte principale majeure,  $\sigma_3$  est la contrainte principale mineure, et  $\sigma_2$  est la contrainte qui s'exerce dans la troisième dimension, la contrainte principale intermédiaire.

Les cercles de Mohr permettent de représenter les états des contraintes en 2D en un point d'équilibre et s'adaptent à tout matériau.

Quand on trace les cercles de Mohr et la loi de Coulomb ensemble sur le plan de contrainte normale et contrainte tangentielle, on obtient un critère appelé critère de Mohr Coulomb. Ce critère nous permet de prédire les contraintes à la rupture sur le plan de rupture. Dans la Figure 1.6 page 9, les demi-cercles I et II correspondent à deux points de rupture, alors que le demi-cercle III ne correspond à aucun état du sol. Étant donné que les masses de sol atteignent la rupture le long de plans caractéristiques, il peut être utile de connaître l'état des contraintes sur les surfaces de rupture potentielle. C'est la raison pour laquelle le critère de Mohr Coulomb est très utile dans l'analyse de la stabilité des fondations et des pentes.

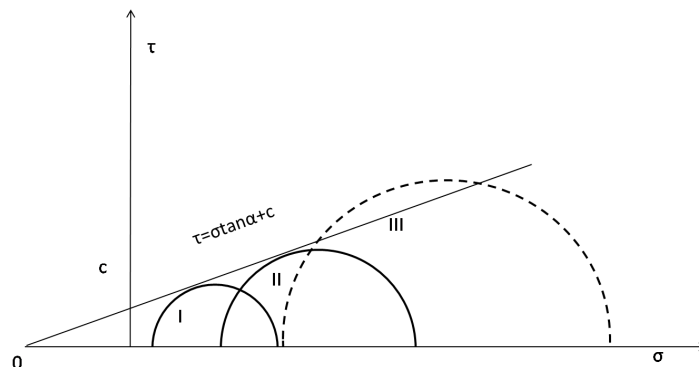


FIGURE 1.6: Critère de Mohr Coulomb

Par ailleurs, le cercle de Mohr s'adapte aussi dans un cas tridimensionnel. Par

définition, la contrainte  $\sigma_2$  est située entre la contrainte principale majeure et la contrainte principale mineure. Du coup, le cercle de Mohr en 3D est tracé à la Figure 1.7 page 10. On aperçoit que  $\sigma_2$  est situé entre  $\sigma_1$  et  $\sigma_3$ . C'est-à-dire que la contrainte majeure  $\sigma_2$  n'intervient pas à la rupture dans le critère de Mohr Coulomb. Par contre,  $\sigma_2$  influence la rupture de matériaux répondant à d'autres critères que le critère de Mohr-Coulomb.

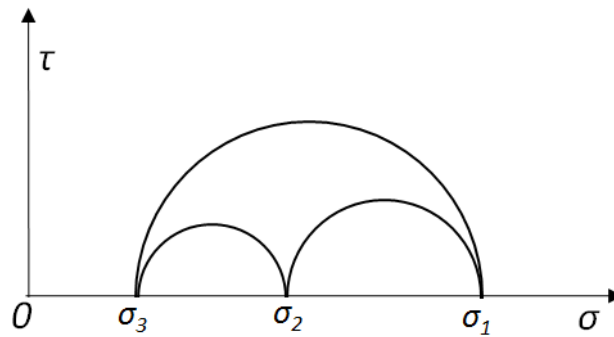


FIGURE 1.7: Cercle de Mohr dans un cas tridimensionnel

## 1.2 Essais de cisaillement

### 1.2.1 Différents essais de cisaillement

Plusieurs essais existent soit sur place soit au laboratoire pour étudier la résistance au cisaillement. Normalement, les essais sur place éliminent les problèmes de remaniement associés au prélèvement d'échantillon dans le sol, mais ne permettent qu'une évaluation indirecte de la résistance au cisaillement parce que la détermination de la résistance au cisaillement nécessite l'application d'un état de contraintes bien défini, que l'on ne peut pas contrôler in situ. Par contre, les essais au laboratoire donnent la résistance au cisaillement par mesure directe, mais l'état de l'échantillon est peut-être changé par rapport à celui sur place [7]. Dans cette section, nous allons introduire les essais les plus courants appliqués dans le domaine du Génie Civil pour étudier le comportement mécanique de matériaux. Par contre, l'essai triaxial, qui sera utilisé dans cette thèse, n'est pas abordé dans cette section, mais sera détaillé dans la section suivante.

Le scissomètre permet de réaliser des essais sur place. Le principe de l'essai est représenté sur la Figure 1.8 page 11 : un moulinet d'acier à quatre pales est foncé dans le terrain (sans avant-trou) par l'intermédiaire d'un train de tubes. La profondeur retenue pour l'essai étant atteinte, l'appareil est immobilisé pendant un court instant puis le moulinet est entraîné en rotation depuis la surface par l'intermédiaire de tiges placées à l'intérieur du train de tubes [7].

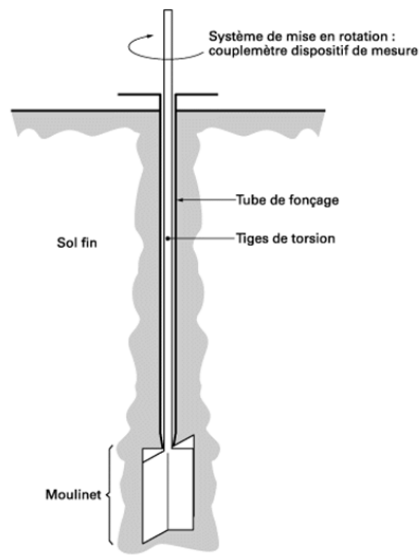


FIGURE 1.8: Schéma de dispositif du scissomètre

L'essai de cisaillement direct à la boîte de Casagrande est un essai de laboratoire, voir la Figure 1.9 page 11. L'échantillon est posé entre 2 demi-boîtes, celle du dessous est fixe, celle du dessus se déplace horizontalement à vitesse constante. Une force verticale  $F_v$  est appliquée sur l'échantillon. Lorsque la demi-boîte supérieure se déplace, l'échantillon est cisailé, on mesure la force horizontale  $F_h$ .

$$\sigma = F_v/S \quad (1.7)$$

$$\tau = F_h/S \quad (1.8)$$

où  $S$  est l'aire du plan, qui change en diminuant au cours de l'essai.

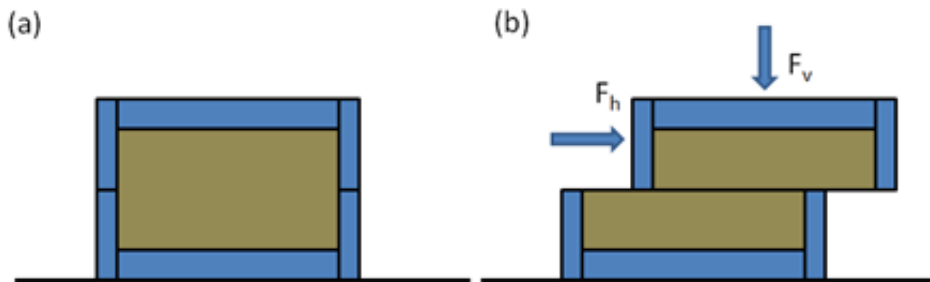


FIGURE 1.9: Essai de cisaillement direct (a) Etat initial ; (b) échantillon cisailé

Par rapport à l'essai de cisaillement direct à la boîte de Casagrande qui ne permet pas d'appliquer un taux de cisaillement très élevé à cause de la diminution de la surface du plan cisailé au cours de l'essai, l'essai de cisaillement à l'anneau présente

l'avantage de cisailer l'échantillon indéfiniment afin d'étudier des propriétés résiduelles du matériau. Dans cet essai, l'échantillon annulaire est déposé autour d'un cylindre central dont la mise en rotation assurera le cisaillement de l'échantillon, Figure 1.10 page 12. Sur l'autre bord cylindrique, une pression de confinement est exercée par l'intermédiaire d'une membrane soumise à une pression d'eau. Un tel principe assure l'homogénéité des conditions aux limites de déplacement sur toute l'interface et minimise les effets de bord [9].

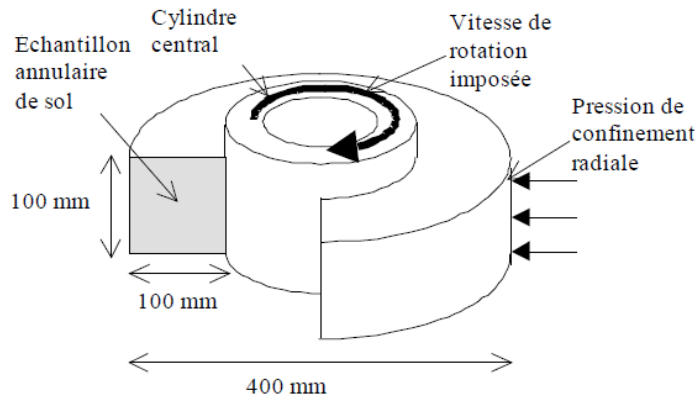


FIGURE 1.10: Schéma de l'essai de cisaillement annulaire

L'essai de compression simple est une forme très simplifiée d'essai triaxial dans lequel l'éprouvette n'est pas soumise à une pression latérale  $\sigma_3$  lors de la compression. Cet essai est exécuté sur des éprouvettes cylindriques ou cubiques posées simplement sur le plateau d'une presse capable de les déformer à une vitesse constante sous chargement axial.

## 1.2.2 Essais triaxial

### 1.2.2.1 Principe de l'essai triaxial

L'essai triaxial est l'un des essais les plus utilisés en mécanique des sols ; il permet notamment de déterminer le comportement d'un matériau sous différents chemins de sollicitations et conditions de drainage. En plus, les rotations des contraintes principales sont évitées au cours de l'essai. C'est la raison pour laquelle même si l'essai triaxial est plus compliqué que les essais de cisaillement présentés ci-dessus, il est plus approprié et plus appliqué dans le domaine de la géotechnique. Par ailleurs, le plan de rupture peut se développer n'importe où dans l'échantillon et on peut contrôler assez facilement les cheminements de contraintes jusqu'à la rupture, ce qui signifie que l'essai triaxial permet de reproduire en laboratoire les cheminements plus complexes susceptibles de se retrouver sur le terrain.

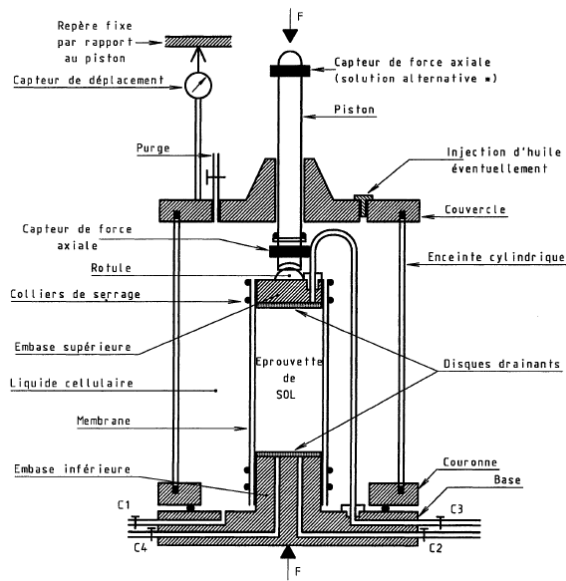


FIGURE 1.11: Schéma d'exemple d'une cellule triaxiale [10]

On distingue deux catégories d'essai triaxial : l'essai triaxial vrai ( $\sigma_1 \neq \sigma_2 \neq \sigma_3$ ) et l'essai triaxial de révolution ( $\sigma_2 = \sigma_3$ ), où  $\sigma_1$  représente la contrainte axiale, et  $\sigma_2$ ,  $\sigma_3$  représentent les contraintes latérales. Dans un essai triaxial vrai, l'échantillon est préparé en forme cubique et les contraintes dans les trois directions sont contrôlées par les parois. Par contre, un essai triaxial de révolution est effectué dans une cellule cylindrique, donc les contraintes latérales ( $\sigma_2$  et  $\sigma_3$ ) sont identiques en permanence. Dans notre travail, seul des essais triaxiaux de révolution ont été étudiés. Nous nous contentons donc par la suite de décrire ce type d'essais.

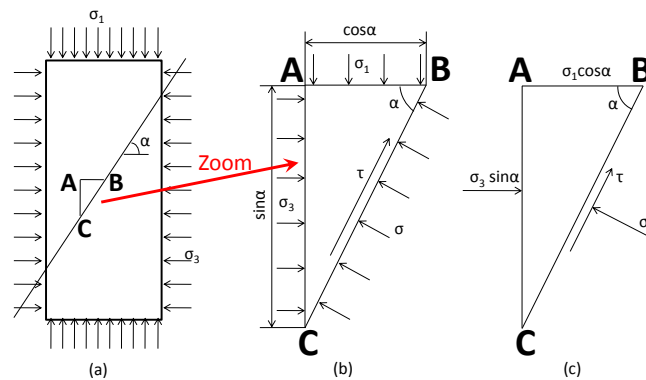


FIGURE 1.12: État de contrainte dans un échantillon triaxial

Pour réaliser un essai triaxial, on sollicite un échantillon sous différentes pressions

de confinement tout en appliquant une contrainte déviatorique en tête de l'échantillon. On est ainsi capable de localiser la bande de rupture du matériau, Figure 1.11 page 13.

Lorsque des charges sont appliquées sur l'échantillon triaxial, les contraintes sont appliquées comme dans la Figure 1.12 page 13. Imaginons une rupture comme une coupe droite arbitraire sur l'échantillon cylindrique de l'essai triaxial. Si on prend un élément volumique  $ABC$  (tel que  $BC=1$ , même configuration que la section 1.1.3) sur le plan de rupture, on peut écrire toutes les contraintes en équilibre sur cet élément volumique.

$$\sigma - \sigma_1 \cos^2 \alpha - \sigma_3 \sin^2 \alpha = 0 \quad (1.9)$$

$$\tau + \sigma_3 \sin \alpha \cos \alpha - \sigma_1 \sin \alpha \cos \alpha = 0 \quad (1.10)$$

On obtient la contrainte normale et la contrainte tangentielle par des équations suivantes :

$$\sigma = \sigma_1 \cos^2 \alpha + \sigma_3 \sin^2 \alpha \quad (1.11)$$

$$= \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3) + \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3) \cos 2\alpha \quad (1.12)$$

et la contrainte tangentielle est :

$$\tau = \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3) \sin 2\alpha \quad (1.13)$$

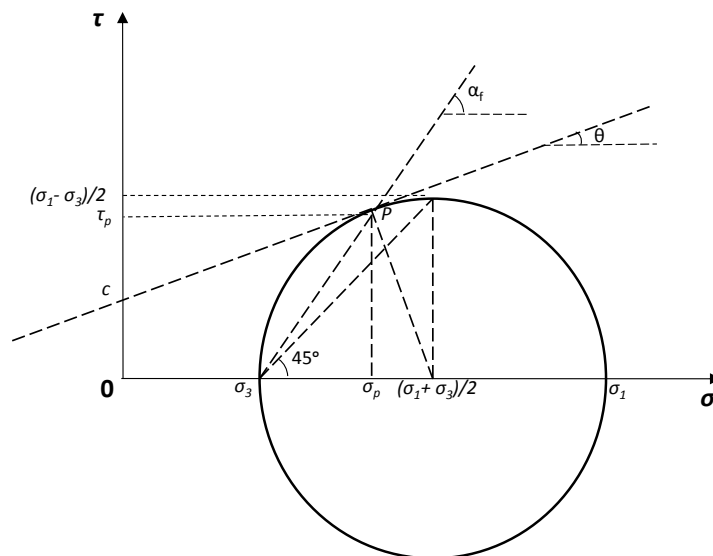


FIGURE 1.13: Contraintes de rupture au triaxial sur la Cercle de Mohr

Avec les expressions de contraintes normale et tangentielle, on trace ces contraintes



## 15 Généralités sur le comportement mécanique des matériaux granulaires

sur le cercle de Mohr (Figure 1.13 page 14), d'où l'enveloppe de rupture est tangente au cercle de Mohr au point  $P$ ,  $\sigma_p$  et  $\tau_p$  sont respectivement les contraintes normale et tangentielle au point  $p$ .  $\theta$  est l'angle de frottement interne et  $\alpha_f$  l'angle du plan de rupture. Ces deux angles sont liés par l'équation suivante :

$$\alpha_f = \frac{\pi}{4} + \frac{1}{2}\varphi \quad (1.14)$$

### 1.2.2.2 Différents types d'essai triaxiaux

La réalisation d'un essai triaxial comprend plusieurs étapes : fabrication de l'échantillon, préparation de l'échantillon dans un état isotrope dans la cellule triaxiale, sollicitation de l'échantillon.

En fonction des différentes conditions de drainage et de consolidation de l'échantillon dans la cellule triaxiale, l'essai triaxial peut être classé en trois types.

- Essai triaxial non consolidé non drainé ( $UU$ )
- Essai triaxial consolidé non drainé ( $CU$ )
- Essai triaxial consolidé drainé ( $CD$ )

La consolidation est, selon K. von Terzaghi [11], « tout processus par lequel la teneur en eau d'un sol saturé diminue, sans remplacement de l'eau par l'air. » Le plus souvent c'est par tassement, sous l'action à long terme des charges statiques, que s'effectue cette compaction avec expulsion de l'eau interstitielle. Dans l'essai triaxial, la consolidation (abréviation  $C$ ) décrit l'état de l'échantillon avant l'étape de cisaillement. Si l'échantillon est cisailé immédiatement après la préparation, l'état de l'échantillon est non consolidé. En revanche, si on laisse l'eau s'évacuer de l'échantillon jusqu'à annulation de la pression interstitielle, l'état de l'échantillon est dit consolidé.

Le drainage (abréviation  $U$ ) décrit la condition de drainage de l'échantillon pendant la phase de cisaillement. Autrement dit, si la dissipation de la pression d'eau interstitielle est permise au long de l'étape de cisaillement, l'échantillon est dit drainé.

Les trois types d'essais différents triaxiaux s'adaptent à différentes situations. Normalement, le choix des conditions de drainage (drainé ou non drainé) dépend de la nature du sol, de son origine, de sa formation géologique, de sa structure, de ses conditions de chargement. En pratique, lorsqu'on étudie le comportement à long terme d'un ouvrage géotechnique, les surpressions interstitielles de l'eau provoquées par l'application des charges ont suffisamment le temps de se dissiper. On considère, dans ce cas, que le massif de sol est en condition drainée. Les essais drainés s'adaptent à cette situation. Au cours de l'essai, l'eau interstitielle est libre de sortir ou de rentrer, l'empilement granulaire pouvant alors se dilater ou se contracter. A noter que l'eau ne joue aucun rôle majeur dans le comportement mécanique du matériau et sert uniquement à mesurer précisément les variations de volume de l'empilement (en condition saturée).

Dans le cas où l'on étudie le comportement à court terme d'un sol faiblement perméable (sols fins), les surpressions interstitielles n'ont pas suffisamment de temps pour se dissiper. Du coup, on teste ce type de sol dans un essai triaxial en condition non-drainée. Les essais triaxiaux non drainés sont effectués en maintenant le volume de l'empilement constant en fermant la vanne de drainage. Le fluide joue, dans ce cas, un rôle majeur sur le comportement de l'échantillon [12].

L'essai non consolidé non drainé ( $UU$ ) consiste à cisailer l'échantillon dans une condition de non consolidation et de non drainage. Cet essai permet de mesurer la contrainte effective de l'échantillon. La contrainte effective est calculé par  $\sigma'_3 = \sigma_3 - u_s$ , la contrainte majeure effective est calculée par  $\sigma'_1 = \sigma_1 - u_s$ . Si l'échantillon est saturé tout au début de l'essai, l'augmentation de la pression d'eau interstitielle monte simultanément avec celle de la pression de confinement. Dans ce cas, la contrainte effective reste constante. Donc, les cercles de Mohr ont tous le même diamètre. L'enveloppe de rupture est alors une droite horizontale (Figure 1.14 page 16). Si l'éprouvette n'est pas initialement saturée, l'échantillon est compressé à la suite de l'augmentation de pression latérale jusqu'à un moment où l'éprouvette devient saturée. La résistance au cisaillement de l'éprouvette croît à partir de ce point. On peut caractériser l'angle de frottement apparent  $\varphi_{uu}$  et la cohésion apparente  $c_{uu}$  par les cercles de Mohr. Et ensuite, on répète le même chemin dans un cas saturé.

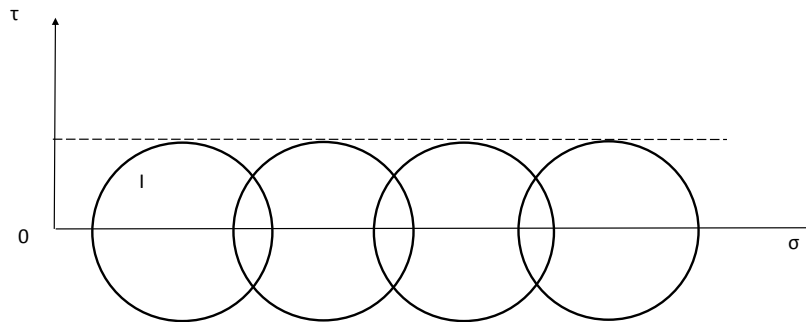


FIGURE 1.14: Cercle de Mohr dans l'essai triaxial  $UU$

L'essai consolidé non drainé ( $CU$ ) est effectué sur des éprouvettes soit sous des contraintes isotropes, soit en cisaillement non drainé avec la mesure de la pression interstitielle. La pression latérale  $\sigma'_3$  est reportée à la fois sur la contrainte effective  $\sigma'_3$ , et sur la pression d'eau interstitielle  $u_s$ . Dans la Figure 1.15 page 17, on peut calculer l'angle de frottement interne  $\varphi'$  à partir des contraintes effectives et l'angle de frottement interne  $\varphi_{cu}$  à partir des contraintes totales, où  $u_s$  est la pression d'eau interstitielle. On peut voir que pour différentes pressions de confinement,  $u_s$  est différent. Donc, pour les essais  $CU$ , on travaille sur les contraintes totales et on s'intéresse plutôt à l'angle de frottement total  $\varphi_{cu}$ .

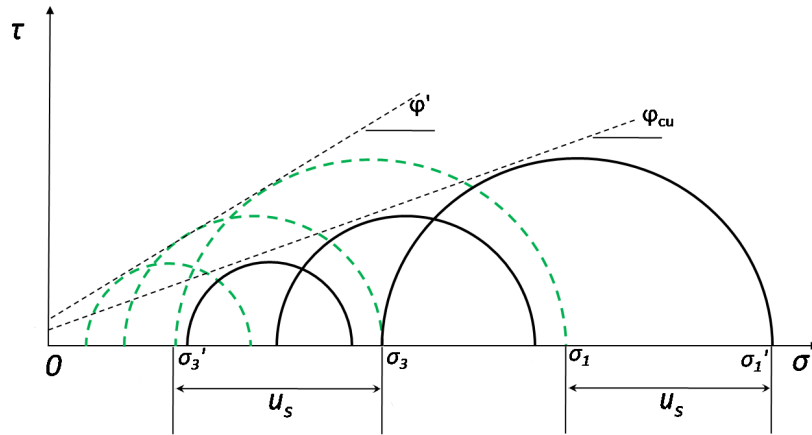


FIGURE 1.15: Angle de frottement calculé pour Essai triaxial *CU*

L'essai consolidé drainé *CD* permet un drainage au cours de l'essai. Le cisaillement est exécuté en condition de drainage ouvert, en augmentant la charge suffisamment lentement pour que la surpression interstitielle reste négligeable tout au long de l'essai. On obtient les contraintes effectives de l'échantillon directement (Figure 1.16 page 17). Donc, pour les essais *CD*, on s'intéresse à l'angle de frottement  $\varphi'$  calculé à partir des contraintes effectives.

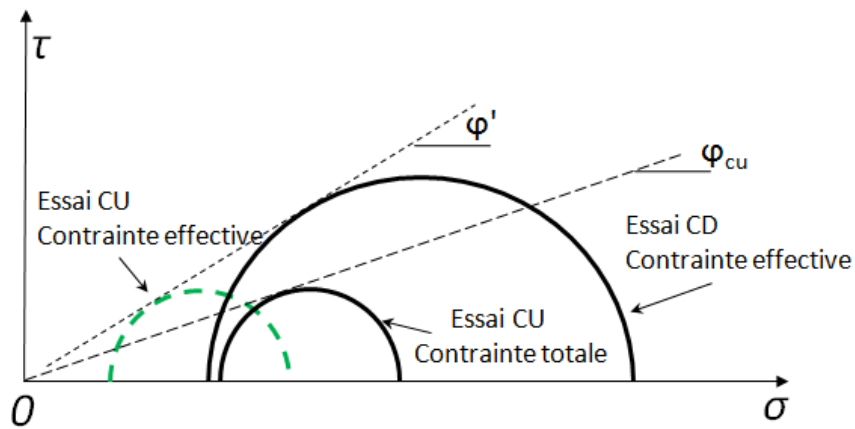


FIGURE 1.16: Angle de frottement calculé pour Essai triaxial *CD*

Le Tableau 1.1 page 17 présente les conditions utilisées dans les différents types d'essais triaxiaux.

TABLE 1.1: Choix des caractéristiques de cisaillement des sols[13]

Type de sol	Type de calcul	Hydrique	Essais	Paramètres
Cohérent Saturé	Court terme	Non drainé	<i>UU</i> ou <i>CU</i>	$C_u$ et $\lambda_{cu}$
Cohérent NonSaturé	Court terme	Non drainé	<i>UU</i>	$C_{uu}$ et $\varphi_{uu}$
Cohérent	Long terme	Drainé	<i>CD</i> ou <i>CU</i>	$C'$ et $\varphi'$
Pulvérulent	Court et Long terme	Drainé	<i>CU</i>	$C'$ et $\varphi'$

### 1.2.3 Comportement macroscopique des sols cisailés à l'essai triaxial

#### 1.2.3.1 Notion d'état critique et d'état caractéristique

En général, le sol est constitué d'un ensemble de particules solides entourées de vides. Dans le matériau, les vides peuvent être remplis d'eau, d'air, ou d'air et d'eau ensemble. On définit le volume total du sol  $V_t$ , la somme du volume des grains solides  $V_s$  et la somme du volume des vides  $V_v$ .

L'indice des vides s'exprime par la relation :

$$e = \frac{V_v}{V_s} \quad (1.15)$$

La porosité s'exprime par la relation :

$$n = \frac{V_v}{V_t} \quad (1.16)$$

La compacité s'exprime par la relation :

$$c = \frac{V_s}{V_t} \quad (1.17)$$

Donc on a

$$n = \frac{e}{1 + e} \quad (1.18)$$

$$e = \frac{n}{1 - n} \quad (1.19)$$

$$c = \frac{1}{1 + e} \quad (1.20)$$

En synthèse, les variables principales utilisées dans l'essai triaxial de révolution ( $\sigma_2 = \sigma_3$  ;  $\varepsilon_2 = \varepsilon_3$ ) sont listées dans le Tableau 1.2 page 18.

TABLE 1.2: Variables principales de l'essai triaxial

Équations et Abréviations	Notation
$\sigma_1$	Contrainte axiale
$\sigma_2$ et $\sigma_3$	Contrainte latérale
$q = \sigma_1 - \sigma_3$	Déviateur de contraintes
$p = (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)/3$	Contraintes moyenne totale
$\Delta u$	Surpression interstitielle
$p' = p - \Delta u$	Contrainte moyenne effective (relation de Terzhagi)
$M = q/p$	Rapport de contraintes
$\varepsilon_1$	Déformation axiale
$\varepsilon_3$	Déformation latérale
$\varepsilon_v = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3$	Déformation volumique
$\varepsilon_d = \frac{2}{3}(\varepsilon_1 - \varepsilon_3)$	Déformation déviatorique

Les réponses mécaniques types obtenues dans un essai triaxial de cisaillement

## 19 Généralités sur le comportement mécanique des matériaux granulaires

sur des échantillons initialement lâches et denses sont présentées dans la Figure 1.17 page 19.  $q$  est le déviateur  $q = \sigma_1 - \sigma_3$ ,  $\varepsilon_r$  est la déformation axiale. La rupture est souvent définie par la différence maximale entre les contraintes principales, ce qui correspond à la résistance à la compression de l'échantillon.

L'état caractéristique correspond à l'état du sol où la contrainte déviatorique est égale à la contrainte au pic. L'état critique correspond à l'état où la contrainte déviatorique résiduelle tend vers une valeur limite.

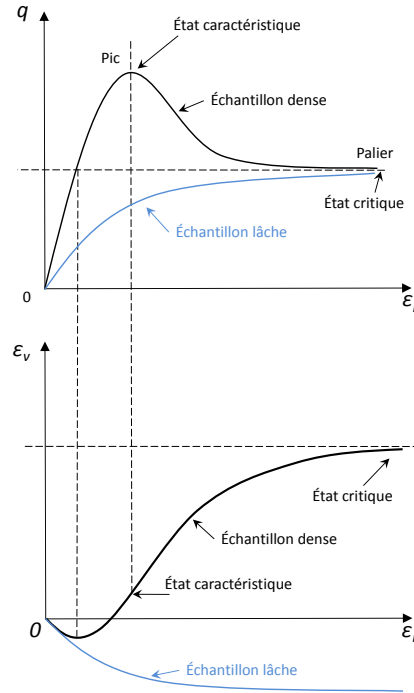


FIGURE 1.17: État caractéristique et État critique

Dans un sol dense, l'indice des vides initial est inférieur à l'indice des vides critique. Casagrande [14] a désigné l'indice de vide critique comme l'indice des vides auquel on atteint un plateau horizontal dans la courbe de contrainte déviatorique-déformation. Le volume change tout d'abord en diminuant jusqu'à la valeur minimale de la valeur  $e$ , et ensuite tend vers le volume qui correspond à un indice des vides critique, Figure 1.17 page 19(b).

Lorsqu'on soumet un matériau dense à une sollicitation de cisaillement, le déviateur augmente jusqu'à un pic, puis descend et se stabilise vers la valeur résiduelle. Par contre, il n'y a pas de valeur pic évidente sur la courbe déviatorique des matériaux lâches, la résistance du matériau lâche augmente directement vers la valeur résiduelle. Concernant l'évolution de la déformation volumique de ces matériaux, le matériau dense subit d'abord une phase de contractance moins importante que le matériau lâche puis une phase de dilatance marquée. Dans le cas d'un échantillon lâche, le

comportement est asymptotique et tend vers une valeur résiduelle.

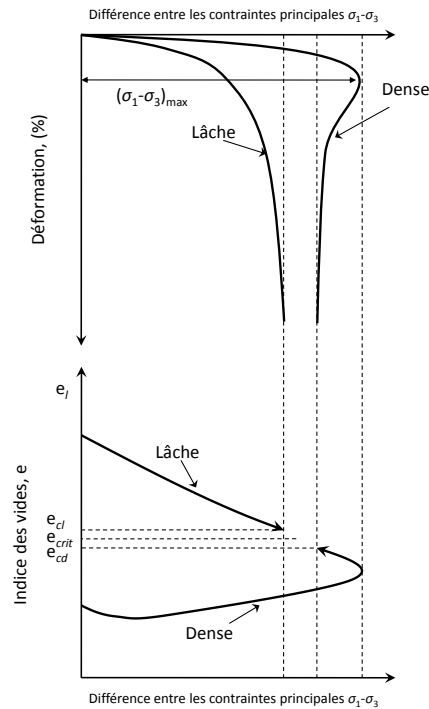


FIGURE 1.18: Essais triaxiaux sur des échantillons lâche et dense : (a) courbe d'effort-déformation ; (b) variation de l'indice des vides durant le cisaillement. [15][7]

La Figure 1.18 page 20 montre la courbe de l'indice des vides en fonction de la contrainte déviatorique. Pour un matériau dense, l'indice de vide diminue tout d'abord légèrement puis augmente jusqu'à la limite  $e_{cd}$  ( $e_c$  à l'état dense). Pour un matériau lâche, on approche l'indice des vides de l'état critique par valeur supérieure alors que pour un matériau dense on l'approche par valeur inférieure. Quelle que soit la densité du matériau, on tend en fin d'essai vers le même état critique.

### 1.2.3.2 Caractérisation des sols à partir des courbes expérimentales

A partir de courbes expérimentales, nous pouvons caractériser plusieurs paramètres intrinsèques des matériaux.

Le module d'Young  $E$  est une constante qui relie la contrainte de traction (ou de compression) à la déformation d'un matériau élastique isotrope. Ce paramètre peut être obtenu à partir de la pente de la courbe de contrainte déviatorique soit à 0,2% de déformation axiale  $E_{0,2}$  soit à 50% de la contrainte de rupture  $E_{50}$ . Dans la pratique,  $E_{50}$  est souvent choisi [2].

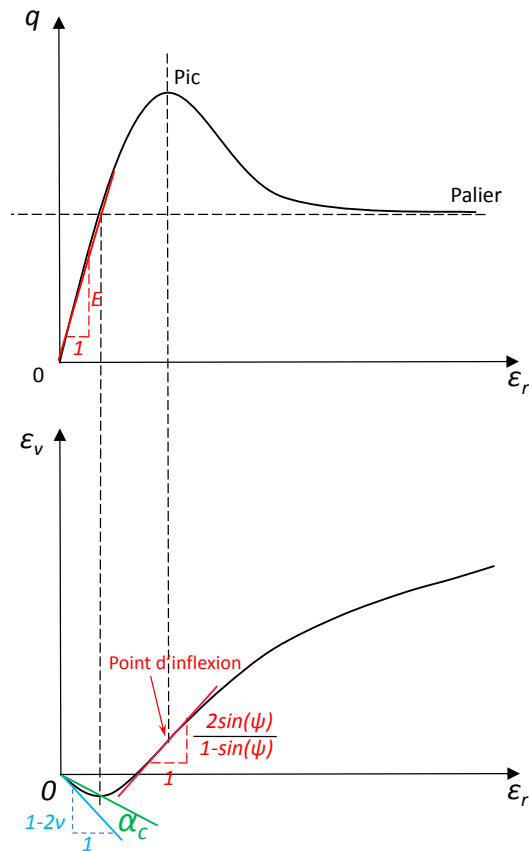


FIGURE 1.19: Détermination de différents paramètres à partir de la courbe déviateur et déformation volumique

Le coefficient de poisson  $\nu$  peut être obtenu à partir de la pente de la courbe de déformation volumique par l'équation suivante, Figure 1.19 page 21 :

$$\nu = \frac{1}{2} \left( \frac{d\epsilon_v}{d\epsilon_1} - 1 \right) \quad (1.21)$$

L'angle caractéristique  $\alpha_c$  est déterminé à partir de la pente qui relie le point 0 et le point le plus bas de la courbe de déformation volumique.

L'angle de frottement interne d'un sol  $\varphi$  est approximativement égal à l'angle du talus naturel. Si on laisse couler du sable sur une surface horizontale, le sable forme une sorte de cône avec une pointe au sommet. L'inclinaison de ce cône par rapport à l'horizontale qui peut être assimilée à l'angle de frottement interne. L'angle de frottement peut être obtenu par les cercles de Mohr, mais aussi par la courbe de contrainte déviatorique en fonction de la contrainte effective.

L'angle de dilatance  $\psi$  représente l'augmentation de volume du squelette du sol qui se produit pendant la phase de cisaillement. C'est un angle entre vecteur incrément de déformation plastique et déformation volumique à l'état initial[16]. Dans le cas du cisaillement simple :

$$\tan\psi = \frac{-\Delta z}{\Delta x} = \frac{-\Delta z/H_0}{\Delta x/H_0} = \frac{-\Delta\varepsilon_z}{\Delta\gamma_{zx}} \quad (1.22)$$

$$\psi = \tan^{-1} \frac{-\Delta z}{\Delta x} = \tan^{-1} \frac{-\Delta\varepsilon_z}{\Delta\gamma_{zx}} \quad (1.23)$$

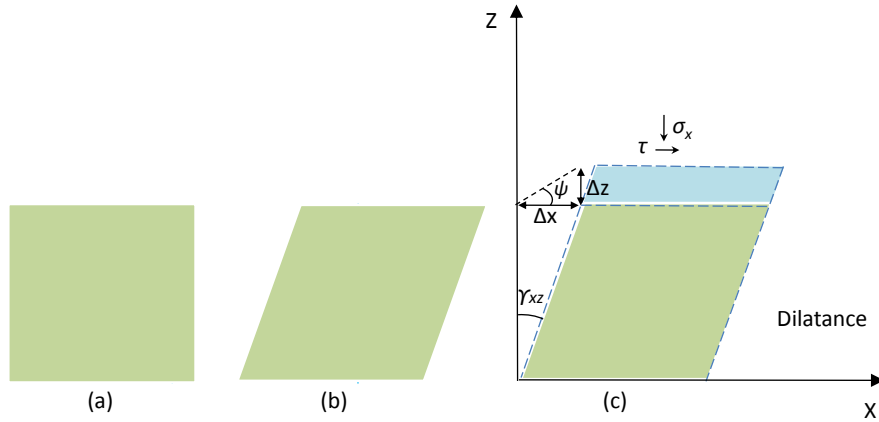


FIGURE 1.20: Phénomène de dilatance : (a) objet initial (b) No dilatance (c) dilatance de cisaillement

Dans le cas de l'essai triaxial, l'angle de dilatance  $\psi$  est déterminé à partir de la pente de la courbe de déformation volumique au point d'inflexion trouvé (Figure 1.20 page 22). L'angle de dilatance  $\psi$  est calculé à l'aide de l'équation :

$$\psi = \arcsin \frac{\frac{d\varepsilon_v}{d\varepsilon_1}}{2 + \frac{d\varepsilon_v}{d\varepsilon_1}} \quad (1.24)$$

Dans ce travail, on s'intéresse particulièrement à l'état critique, l'état caractéristique, et aux phénomènes de contractance et dilatance. Le comportement macroscopique de ces matériaux peut être étudié de manière expérimentale, mais du point de vue microscopique, le recours à la modélisation paraît quasi-incontournable (par exemple, pour étudier la relation entre la résistance locale et la microstructure du milieu granulaire).

#### 1.2.4 Stick-slip

Le phénomène de stick-slip est une variation du réseau de forces sous l'action du cisaillement dans les milieux granulaires. Dans un essai triaxial, l'existence de stick-slips est déterminée en fonction de la pression latérale, de la vitesse de chargement et de la taille des particules [17][18], de la texture des milieux granulaires.



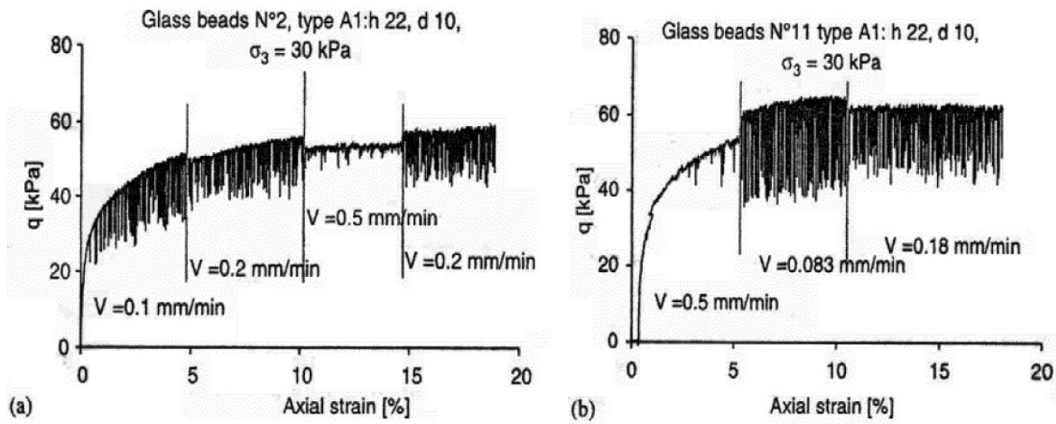


FIGURE 1.21: Influence de vitesse de chargement sur le stick-slip billes de verres sous pression de confinement de 30kPa [18]

La raison principale des processus intermittents est l'existence de frottement dissipe énergie dans les milieux granulaires. Les milieux granulaires en mouvement sont fortement dissipatifs, et lorsque l'apport d'énergie cesse, le milieu retourne rapidement au repos. La figure 1.21 page 23 montre différents sticks-slips en fonction de la vitesse de cisaillement dans les essais triaxiaux [18][19].

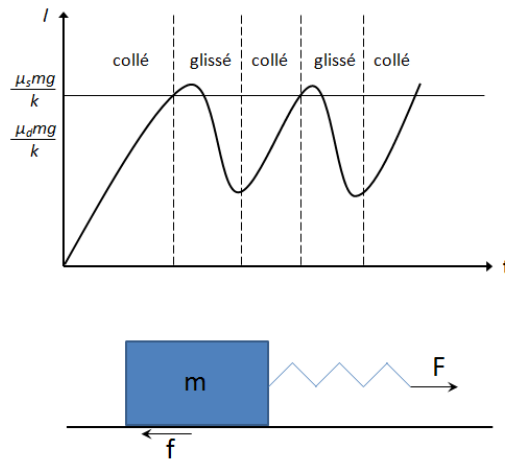


FIGURE 1.22: Le mouvement de stick-slip

La figure 1.22 page 23 montre le principe du stick-slip, où  $\mu_s$  et  $\mu_d$  sont respectivement coefficient de frottement statique et dynamique. Considérons un objet posé sur un support, et tiré par un ressort avec une raideur  $k$ . Tout au début, le ressort est au repos et l'objet est à la position  $x = 0$ . Ensuite, on tire l'objet avec le ressort à la vitesse  $V$ . L'allongement du ressort est calculé par  $l = Vt - x(t)$ .  $F$  est la tension du ressort,  $f$  est la force de frottement,  $m$  est la masse de l'objet [20].

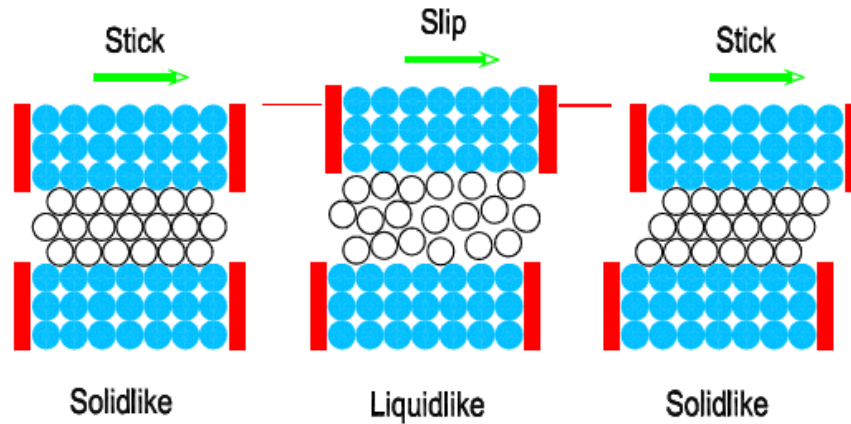


FIGURE 1.23: Transformation de l'état statique à l'état dynamique

Le mouvement de l'objet est alors caractérisé par une alternance entre "collement" et glissement. Lorsque la tension  $F$  n'atteint pas la force de frottement critique  $F = f = \mu_s mg$ , l'objet ne glisse pas. Par contre, si la force de frottement dépasse la force de frottement critique, l'objet commence à glisser, la force de frottement devient alors  $f = \mu_d mg$ . Dans ce cas là, l'allongement du ressort diminue, la tension  $F$  diminue, par conséquent, la vitesse de l'objet repassera par zéro. Donc le mouvement de l'objet reprend l'étape de collé.

La figure 1.23 page 24 illustre la transformation des matériaux granulaires de l'état statique à l'état dynamique sous cisaillement, elle explique la transition de la contractance à la dilatance en lien avec le phénomène de stick-slip. On aperçoit que l'empilement se réarrange après stick-slip.

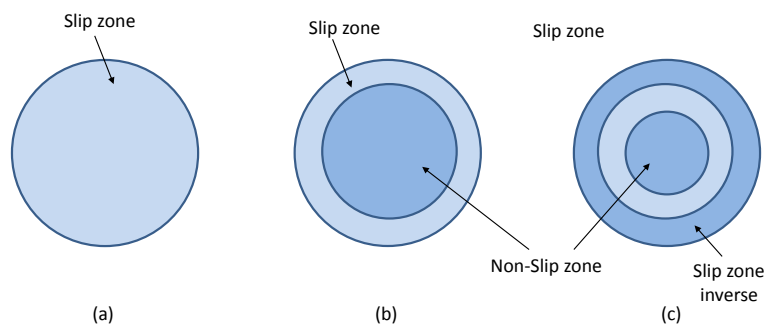


FIGURE 1.24: Illustration des zones de slip pour la sphère en glissement : (a) zone de glissement complet (b) zone de glissement partiel (c) zone de glissement partiel [21][22]

D'un point de vue microscopique, si on étudie le phénomène de stick-slip sur une particule, on peut trouver plusieurs zones de glissement au niveau d'un même contact entre deux grains (Figure 1.24 page 24). La variation de la courbe déviatorique montre que les billes sont tout le temps en collé et glissé avec les autres pendant l'essai [18].

### 1.2.5 Bande de rupture

Au cours d'un chargement intense d'un sol, de fortes déformations apparaissent en surface et à l'intérieur du sol. Cette déformation se localise alors en bandes, appelées bandes de cisaillement. Le long de cette bande de rupture, la contrainte du sol diminue alors fortement provoquant le cisaillement ou glissement brutal de deux zones distinctes du sol. La propagation de la bande de cisaillement permet alors la séparation du matériau.

Les zones de localisation sont plus connues sous le nom de bandes de cisaillement ; la déformation de la structure associe alors une ou plusieurs de ces bandes, et un certain nombre de blocs quasi-statiques [23]. En général, le comportement du sol dans la zone de bande dépend de la résistance au cisaillement. Ceci permet de prévoir le risque d'apparition de bande de cisaillement dans un sol. Dans les dernières décennies, de nombreux travaux théoriques, expérimentaux et numériques ont été réalisés pour prédire l'apparition des bandes de cisaillement [24][25][26][27][28].

Aydin et al. [26] ont classifié les différents types de bandes de déformation dans les granulaires rocheux. Lorsque le cisaillement est le comportement dominant, les bandes s'appellent les bandes de rupture. Ces bandes de rupture peuvent se faire à volume constant (cisaillement isochore, Figure 1.25 page 25(a)) avec une diminution de volume (cisaillement compactant Figure 1.25 page 25(b)) ou avec une augmentation de volume (cisaillement dilatant, Figure 1.25 page 25(c)). Par contre, s'il n'y a pas de cisaillement dans la déformation, on définit une bande de compaction s'il y a une diminution de volume Figure 1.25 page 25(d) et une bande de dilatation s'il y a une augmentation de volume Figure 1.25 page 25(e).

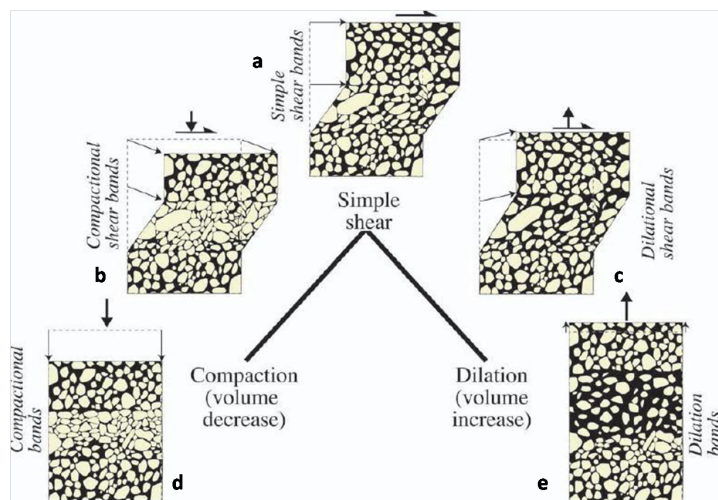


FIGURE 1.25: Classification cinématique de la déformation des bandes de cisaillement (a) bande de cisaillement simple (b) bande de cisaillement en compaction (c) bande de cisaillement dilatant (d) bande en compaction (e) bande dilatant

La Figure 1.26 page 26 présente un schéma des bandes de cisaillement localisées qui

se sont développées dans des échantillons de grès des Vosges chargés en compression et en extension triaxiale (pour différents rapports d'élancement) sous une pression de confinement de 0 à 60 MPa [29]. On trouve que l'augmentation de pression de confinement conduit à une augmentation de l'angle d'inclinaison de la bande, à une augmentation du nombre de bandes de cisaillement, et à une diminution de la distance entre les bandes.

Depuis l'apparition des technologies d'imagerie, telles que la tomographie de rayons X (XCT), différentes méthodes ont été utilisées pour réaliser des mesures non invasives de la structure interne des échantillons cisailés. Il est désormais possible d'étudier expérimentalement leur microstructure en cours d'essai. La tomographie de rayons X (XCT) est une technologie utilisée en imagerie médicale. Cette méthode permet l'acquisition de la microstructure interne d'un matériau d'une manière non destructive et avec une grande précision par rapport aux méthodes conventionnelles appliquée sur la surface d'un échantillon [30]. Des méthodes de corrélation numérique sont nécessaires pour interpréter les images obtenues expérimentalement. La plupart de ces procédures sont encore complexes et coûteuses en temps de calcul [31].

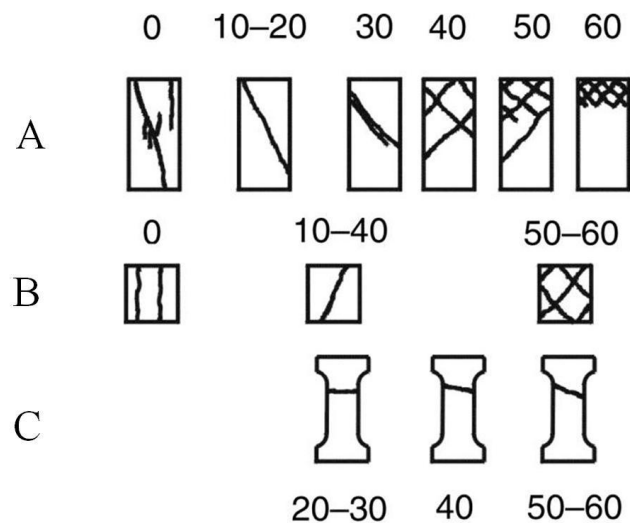


FIGURE 1.26: Illustrations de modèles de bande de cisaillement observées avec changement de pression de confinement pour différents essais de compression (a, b) avec deux valeurs d'élancement  $H / D = 2$  et  $H / D = 1$ , plus pour les essais d'extension (c)

Higo et al [27] ont appliqué la tomographie de rayons X pour enregistrer la déformation d'un échantillon de sable saturé au cours de l'essai triaxial (Figure 1.27 page 27). Leur méthode a montré l'apparition et l'évolution d'une bande de cisaillement. Cette méthode est aussi applicable pour étudier la déformation locale de l'échantillon.

Hall et al. [32] ont examiné quantitativement la déformation localisée dans un sable partiellement saturé par XCT combinée à une analyse d'images au cours de l'essai triaxial. Leurs travaux ont montré l'évolution de contrainte locale et les rotations des grains au cours de la phase de cisaillement, (Figure 1.29 page 28).

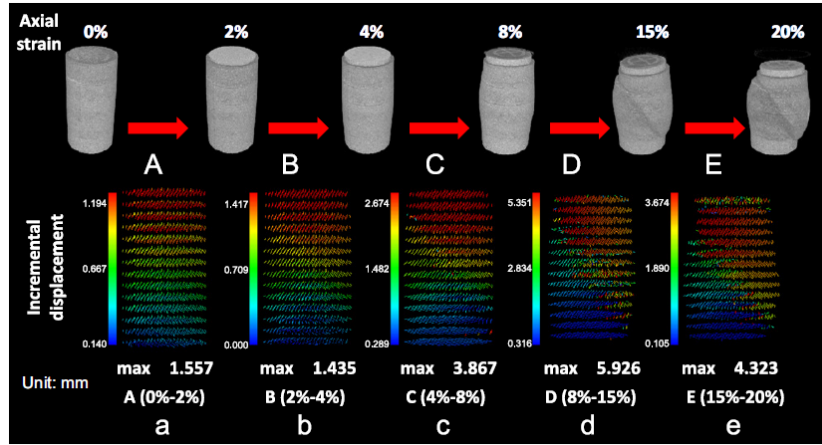


FIGURE 1.27: Déformation de l'échantillon au cours de l'essai triaxial par CT

Desrues et al [33] ont aussi mesuré l'évolution des déplacements et des rotations pour trois différents types de sable par la tomographie de rayons X. A travers ces recherches, le comportement des sables cisailés peut être observé d'un point de vue microscopique, Figure 1.30 page 28.

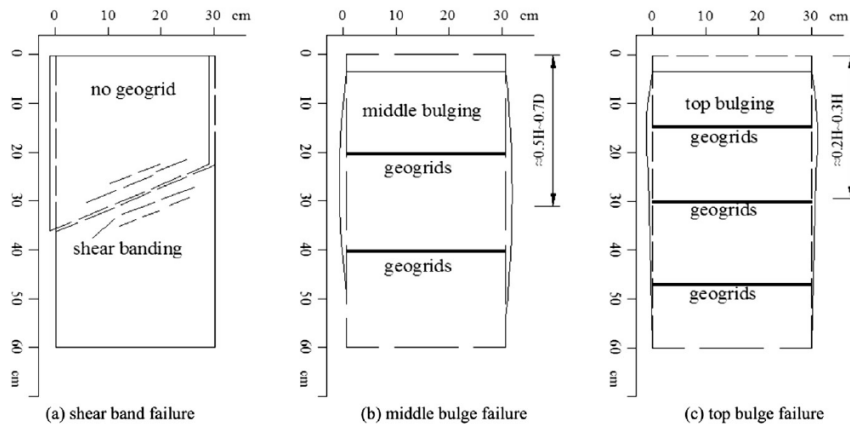


FIGURE 1.28: Différents modes de rupture de l'échantillon

Chen [34] a étudié le cisaillement des sols traités par géo-grilles qui sont utilisées dans les remblais routiers. Une géo-grille est un matériau géosynthétique utilisé pour le renforcement des sols et des matériaux similaires. Chen a classé les différentes formes de rupture de cisaillement au cours de l'essai triaxial en trois types : bande de cisaillement, gonflement de l'échantillon au milieu et gonflement de l'échantillon en haut (Figure 1.28 page 27). Ces formes de défaillance sont liées aux couches de géo-grille embarquées. La bande de cisaillement apparait plutôt dans le cas d'échantillon non renforcé. La rupture par gonflement au milieu est souvent observée dans un échantillon avec renforcement en deux couches en bas de l'échantillon. La rupture par gonflement en haut de l'échantillon se voit souvent dans un échantillon entièrement renforcé.

L'observation visuelle des bandes de cisaillement n'est pas suffisante et plusieurs

dispositifs ont été développés pour étudier ce qui se passe à l'intérieur de l'échantillon au cours de l'essai.

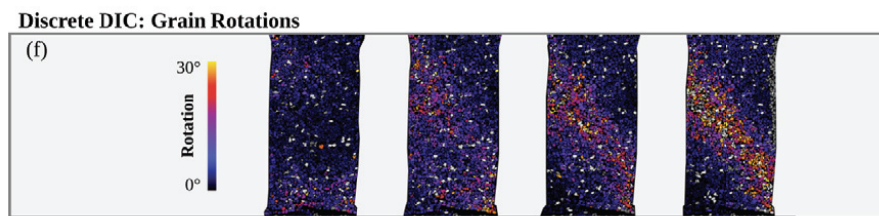


FIGURE 1.29: Rotations des grains au long de l'essai [32]

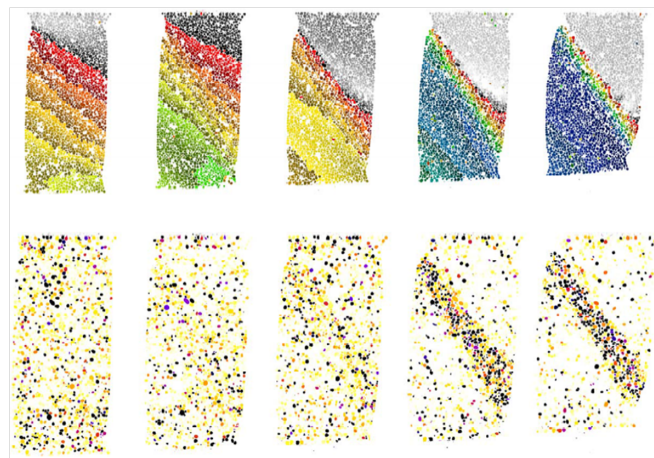


FIGURE 1.30: Évolution des déplacements et des rotations de sables au cours de l'essai triaxial sous pression de confinement 100 kPa par une technique d'imagerie et de reconstruction [33]

### 1.3 Simulation numérique de l'essai triaxial

Les essais expérimentaux présentent plusieurs difficultés ou limitations :

- Il n'est pas possible de réaliser plusieurs essais en partant de la même microstructure initiale ;
- Il est difficile d'avoir des informations microscopiques, bien que de nouveaux appareillages comme l'essai triaxial par micro-tomographie commencent à voir le jour et fournissent des informations telles que les paramètres cinématiques des particules. Mais ces équipements restent lourds à mettre en place et très coûteux.

Par contre, ces difficultés sont plus faciles à surmonter par une méthode de simulation numérique, avec un accès aux contacts des particules du point de vue microscopique. On peut changer facilement les propriétés des particules, utiliser le même échantillon pour plusieurs essais dans un état initial identique et étudier la microstructure du milieu granulaire.

### 1.3.1 Différentes méthodes de simulations

Expérimentalement, on cherche à étudier le comportement mécanique des matériaux globaux et aussi interne à l'aide des dispositifs comme la microtomographie que nous avons présentée dans la section précédente.

La simulation numérique permet de prédire et d'analyser ce qui se passe à l'intérieur du matériau. L'objectif des études numériques n'est généralement pas de reproduire exactement l'essai expérimental, mais plutôt d'offrir un point de vue différent pour la compréhension des mécanismes mis en jeu.

Globalement, il y a deux méthodes de simulation appliquées en géotechnique, les méthodes FEM (Finite Element Methode) et DEM (Discrete Element Method).

La méthode des éléments finis est une technique numérique qui est basée sur l'hypothèse que le matériau est continu. Elle est appliquée par exemple pour résoudre le problème du dimensionnement des ouvrages géotechniques en considérant que le matériau est continu. Mais la limitation de la méthode ne tient pas compte du caractère discret du matériau [35] [36] [37].

La méthode des éléments discrets (DEM), également appelée méthode des éléments distincts est l'une des familles de méthodes numériques pour calculer le mouvement d'un grand nombre de particules. Cette méthode est totalement différente de la FEM car elle prend en compte la nature discrète du matériau. La méthode consiste à modéliser les matériaux par une assemblée des particules en contact les unes avec les autres. Les forces d'interaction sont calculées à partir de lois de contact. Le mouvement des grains est ensuite calculé par la deuxième loi de Newton. Les avantages de la DEM sont d'avoir accès à des variables difficilement accessibles expérimentalement, comme la distribution des contacts, les forces entre les grains. Elle permet également de passer à une description continue (tenseur de contraintes, tenseur de déformations) grâce aux méthodes d'homogénéisation.

En général, La DEM peut se classer en deux grandes catégories en fonction des méthodes permettant de traiter les interactions entre les particules :

La méthode non-régulière du type Non Smooth Discrete Element Method, aussi appelée dynamique de contact, ou méthode collisionnelle. Cette méthode a été proposée par J.J.Moreau et M.Jean [38][39][40][41] et consiste à calculer l'ensemble des forces de contact du système par la modélisation du choc sans déformation des particules.

Les méthodes régulières Smooth Discrete Element methods, autorisent l'interpénétration des grains lors des contacts. Les forces de contact sont calculées en fonction de l'interpénétration des grains et permettent ensuite, par intégration de la seconde loi de Newton de déterminer le mouvement de chaque grain.

Aujourd'hui la DEM est largement acceptée comme une méthode efficace permettant de résoudre les problèmes d'ingénierie pour les matériaux granulaires et discontinus, en particulier dans les écoulements granulaires, la mécanique des poudres, et la mécanique des roches.

En plus, de nombreuses études visent à combiner les deux méthodes de simulation numérique pour étudier les phénomènes impliquant le couplage entre les grains et le fluide interstitiel [23][37][42].

### 1.3.2 Histoire de DEM

La méthode smooth DEM est appliquée dans notre travail. Nous revenons donc succinctement dans cette section sur l'histoire de cette méthode numérique.

En 1971, Cundall [43] a proposé la méthode DEM, inspirée de la dynamique moléculaire, pour résoudre le problème des contacts dans les roches. Cinq ans plus tard, il a développé une première version du programme 2D DEM appelé BALL [44] qui était la forme originelle du programme TRUBAL développé plus tard par Cundall et Strack [45][46]. Le modèle utilise une loi de type ressort - amortisseur pour la description des forces de contact. Ce modèle est comparé aux résultats de De Josselin De Jong and Verruijt [47] sur les forces inter-granulaires obtenues par les analyses d'images et réussit à reproduire les résultats par Oda et Konishi [48] sur le comportement mécanique d'un matériau dans un essai de cisaillement simple. En 1988, Cundall [49] a renouvelé l'ancienne version de TRUBAL par une introduction du concept de la cellule périodique. Dans les années 1980, Thornton et Randall [46] ont introduit dans le programme TRUBAL la loi de contact normal de Hertz et la loi de contact tangentielle de Mindlin et Deresiewicz. Ils ont également développé leur propre programme nommé GRANULE pour traiter les contacts humides et élastique-plastique. Kishino [50] a proposé un modèle appelé Granular Element Method (GEM) pour étudier le mouvement de particules en conditions quasi-statiques. La méthode GEM est similaire à la DEM, mais elle utilise une technique différente pour calculer la raideur des contacts entre les particules.

Dans la plupart des études, les particules sont modélisées par des disques en 2D ou des sphères en 3D. La description mathématique de ces géométries est en effet très simple et donc facile à implémenter. Il suffit de prendre en compte le mouvement du centre du corps et la rotation des particules dans les équations d'équilibre. En plus, lors des contacts, l'identification du point de contact est simple. En revanche, si les particules ont d'autres formes, elles sont plus difficiles à modéliser. Toutefois, la forme des grains peut avoir un impact important sur le comportement du milieu granulaire, de nombreux travaux ont donc été réalisés pour modéliser des particules de forme plus complexe. Ting et al [51] ont étudié des particules de forme elliptique en 2D. Ils ont montré que les particules elliptiques donnent de meilleurs résultats que les disques car elles sont plus proches des particules réelles. En 1994, Ng et Dobry [52] ont étudié des sols granulaires sous chargement monotone et cyclique en 3D. Ils ont conclu que l'angle de frottement macroscopique du matériau augmentait linéairement avec l'angle de frottement microscopique entre les particules en contact. En 1998, Iwashita et Oda [53] ont proposé d'ajouter un coefficient de roulement entre les particules. En



## 31 Généralités sur le comportement mécanique des matériaux granulaires

effet, les rotations des particules pour les contacts entre des disques ou des sphères sont surestimées par rapport aux contacts entre particules naturelles. La prise en compte de la résistance de roulement permet de rapprocher les simulations numériques de la réalité. En 1999, l'entreprise Itasca a développé le logiciel PFC3D [54]. En 2002, Sitharam [55] a étudié la compression isotrope et le cisaillement triaxial avec des sphères 3D poly-disperses en conditions périodiques [56]. Une étude similaire a été faite par Martin et al [57] [58] en prenant en compte la plasticité au niveau du contact, ou dans le cas de clusters des particules et plusieurs chemins de chargement [59][60]. Ainsi, la recherche DEM ne se limite pas seulement aux particules mono-disperses. En 2003, Jiang et al. [61] ont proposé une méthode de compaction couche par couche pour préparer un empilement dense et homogène. En 2005, Bagi [62] a proposé un algorithme «inwards packing method» afin de générer un empilement dense aléatoire pour la simulation de matériaux granulaires. Depuis 2005, de nombreuses recherches sur la méthode DEM sont publiées dans tous les domaines.

En génie civil, la DEM a été utilisée pour de multiples applications. On liste quelques exemples :

- Modélisation de l'essai triaxial 2D [53][63][64][65][66], 3D [29][67][68][69][70], avec des particules hétérogènes [31][71][72][73]
- Comportement du béton sous grande charge [74][75][76]
- Étude des sols [77][78][79]
- Comportement de roches sous chargement triaxial [25]
- Impact de blocs rocheux sur des structures de protection type merlons [68][80]
- Modélisation de glissement de terrain [81]
- Modélisation de l'agglomération de particules fines en suspension [82][83]
- Modélisation des avalanches [84]
- Stabilité des tunnels sous pression [85]
- Modélisation du comportement d'ouvrages composites sol-geosynthétique [86]

### 1.3.3 Conditions aux limites

De nombreuses études ont été réalisées afin de modéliser l'essai triaxial par la DEM. Les conditions aux limites jouent un rôle très important dans la modélisation de l'essai triaxial. Elles permettent de restreindre les déplacements des particules et de contrôler les efforts exercés sur l'empilement numérique.

Globalement, il existe plusieurs types de conditions aux limites utilisées dans la modélisation DEM : condition parois rigides ; condition périodique ; condition membrane ; condition axisymétrique et condition aux limites mixtes.

### 1.3.3.1 Condition paroi rigide

Dans le cas général, la condition aux limites la plus utilisée est la paroi rigide [73][87][59][60], voir la Figure 1.31 page 32. C'est une condition aux limites souvent décrite par une surface plane. La paroi est strictement rigide, aucune déformation de la paroi n'est autorisée. La position de la condition paroi rigide peut être fixe pour toute la durée de la simulation ou elle peut subir un déplacement contrôlé. Par contre, la condition paroi rigide n'a pas d'inertie et les forces déterminées au niveau des contacts entre les particules et la paroi sont utilisées seulement pour actualiser les coordonnées des particules en contact avec la paroi. Le frottement entre la paroi et les particules dépend du problème modélisé. La vitesse de la paroi peut être spécifiée pour déplacer la paroi en fonction de critères définis au préalable. La vitesse peut alors être contrôlée, par exemple en définissant une relation entre une contrainte consigne et la contrainte mesurée.

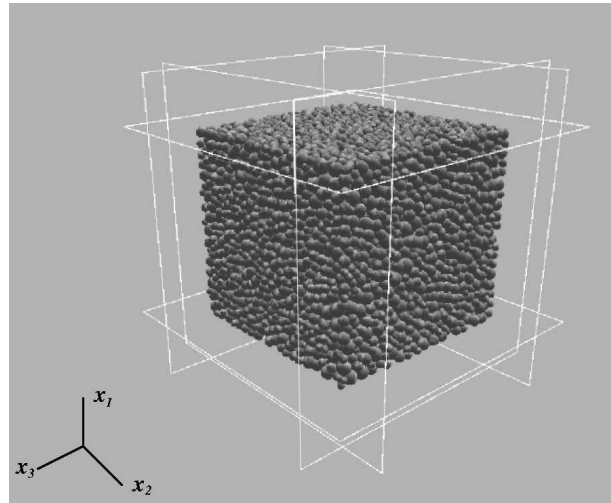


FIGURE 1.31: Schématisation de la condition Paroi rigide

Concernant la modélisation de l'essai triaxial, la façon la plus naturelle est de prendre en compte six parois rigides simulant ainsi l'essai triaxial vrai. Un système de contrôle asservit les parois afin d'ajuster leur position en fonction de la valeur de la contrainte exercée par le milieu granulaire sur la paroi. Plusieurs auteurs ont utilisé les parois rigides lors de leurs simulations de l'essai triaxial véritable [88][87][89][90][91][92]. Tandis que le chargement est exercé par le déplacement des parois hautes et basses, les contraintes latérales sont contrôlées de façon à être maintenues constantes.

La condition cylindrique [64][93][94] fait partie de la condition paroi rigide qui est appliquée pour modéliser l'essai triaxial de révolution. Le principe de cette condition aux limites est identique à la condition avec paroi rigide pour modéliser l'essai triaxial réel sauf que les contraintes latérales sont équivalentes  $\sigma_2 = \sigma_3$ .

#### 1.3.3.2 Condition périodique

La condition périodique permet la simulation d'un milieu infini dans une direction donnée en considérant seulement un sous domaine appelé cellule périodique. Cette cellule est entourée ainsi par des copies identiques à elle-même permettant de représenter le milieu granulaire à « l'infini ».

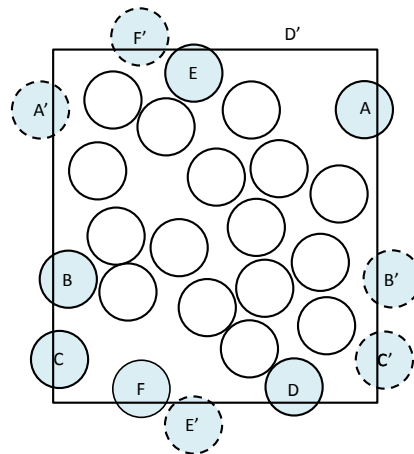


FIGURE 1.32: Schématisation de la Condition périodique

La modélisation de la cellule périodique en DEM consiste à mettre en contact les particules qui sont au bord de la face périodique avec les particules de la face opposée comme illustré sur la Figure 1.32 page 33. Lorsqu' une particule (par exemple, particule A,B,C,D,E) traverse la paroi de la cellule, la partie dépassant est supprimée et réintroduite à travers la paroi opposée. La condition périodique permet d'éliminer les effets de bord. A noter que cette condition peut être combinée avec des conditions parois rigides en ayant seulement une condition périodique suivant un seul axe [95][96].

O'Sullivan et L.CUI [97] ont mixé une condition périodique axisymétrique avec une condition membrane dite circonférentielle. Une portion d'échantillon est modélisée au lieu d'un échantillon entier. Dans la simulation, les particules mono disperses qui sortent d'une bordure circonférentielle sont réintroduites dans une position correspondante le long de l'autre bordure circonférentielle, Figure 1.33 page 34. Deux situations spéciales sont distinguées dans cette méthode. Premièrement, si une particule se situe dans la cellule périodique au niveau des deux bords, les forces d'interaction doivent être prises en compte aussi au niveau des deux bords. Deuxièmement, si une particule est située exactement suivant l'axe z, la particule ne bouge pas dans le plan x-y [98]. L'intérêt de cette condition aux limites est de diminuer le temps de calcul et d'augmenter l'efficacité de la simulation. Mais cette simulation est limitée à la modélisation des empilements homogènes, si les billes sont polydisperses ou hétérogènes, l'échantillon n'est pas axisymétrique.

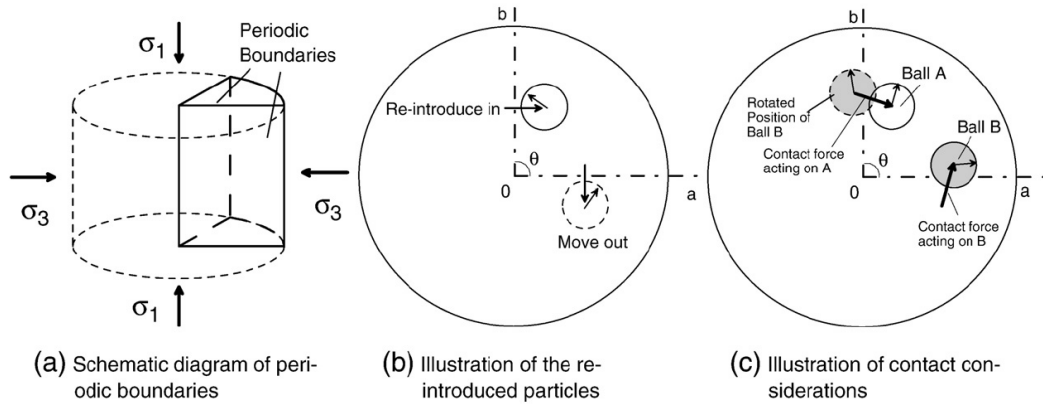


FIGURE 1.33: Schématisation de la Condition périodique axisymétrique [97]

### 1.3.3.3 Condition membrane

Contrairement à la condition paroi rigide, la condition membrane permet de modéliser la déformation de la membrane cylindrique en fonction de la déformation de l'échantillon. C'est la raison pour laquelle la condition membrane permet d'obtenir une simulation qui est plus proche de l'essai triaxial de révolution.

Il y a plusieurs méthodes pour modéliser la condition membrane.

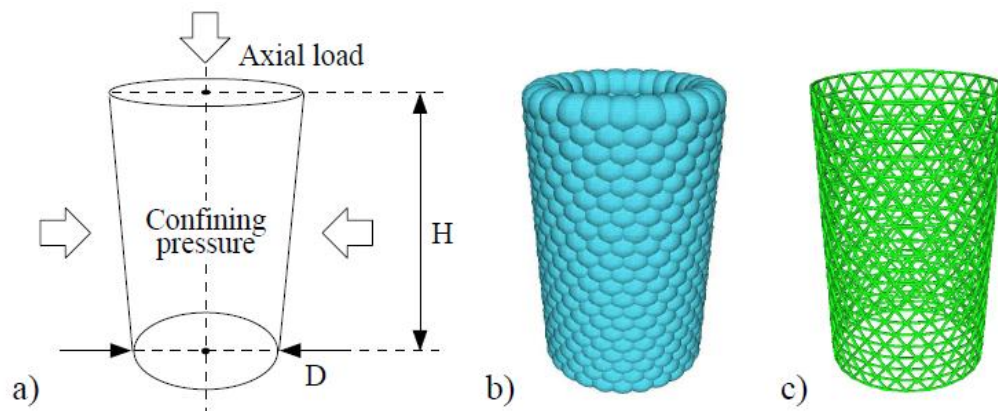


FIGURE 1.34: Condition membrane par des sphères chevauchées [84]

Fazakes [84] a modélisé une condition membrane avec 14904 sphères se chevauchant (Figure 1.34 page 34 (b)). Les centres de ces sphères forment un réseau triangulaire sur la surface externe du cylindre initial (Figure 1.34 page 34 (c)). Dans la simulation, les sphères membranes sont liées par des ressorts linéaires. La méthode est basée sur l'idée que si un chevauchement existe entre deux particules, un ressort normal et un ressort tangentiel sont créés au point de contact. Les mouvements des particules sont calculés par l'allongement des ressorts. Il n'y a pas de différence entre le contact particule-membrane et particule-particule, sauf que la rotation des particules membranes est empêchée et qu'il n'y a pas de contact répulsif dans les particules membrane. La rigidité

de l'amortisseur est choisie de telle sorte que les particules ne puissent pas sortir de la membrane.

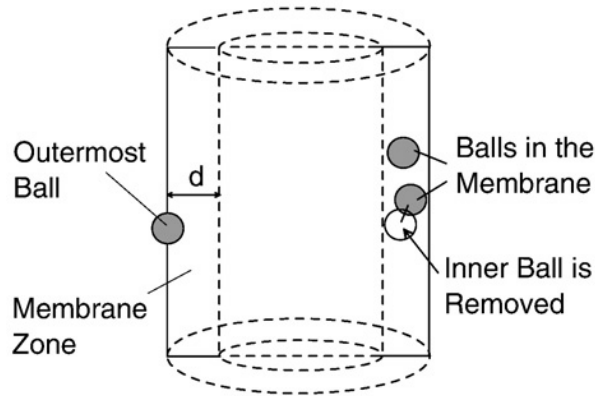


FIGURE 1.35: Illustration de l'identification condition membrane by Cui [64][99]

O'Sullivan a modélisé l'essai triaxial par une condition membrane en 3D[64][99] basée sur la définition d'une « zone de membrane » d'épaisseur  $d$  définie à partir des sphères les plus extérieures de l'empilement (Figure 1.35 page 35).

La première étape consiste à identifier les particules présentes dans la zone membrane. Cette zone est une région contenant tous les particules qui peuvent éventuellement faire partie de la membrane. La zone de membrane doit être suffisamment grande pour inclure tous les particules membranes. Dans la deuxième étape de vérification, les sphères de la membrane sont identifiées en examinant deux conditions : une première condition géométrique (on privilégie les sphères qui sont les plus près du bord de l'échantillon), une seconde condition mécanique (aucune des forces de contact associées à cette sphère ne possède un contact normal orientée radialement vers l'extérieur [97]).

Cheung,G et O'Sullivan [64] ont identifié les différentes localisations de la déformation d'un point de vue microscopique pour une condition rigide et une condition membrane en 2D (Figure 1.36 page 36). L'ombre sur la figure montre la rotation cumulée des particules. La partie la plus noire illustre les particules qui ont subi la rotation la plus forte. D'après O'Sullivan, la condition membrane permet une meilleure représentation de la rotation des particules au sein de l'échantillon. Par contre, Hall [32] qui enregistre les rotations des particules au cours de l'essai triaxial à l'aide de la micro tomodynamométrie de rayons X (Figure 1.29 page 28) met en évidence une zone de rupture plus oblique que celle obtenue par O'Sullivan.

Seung Jae et al. [71] ont modélisé la membrane en positionnant 120 parallélépipèdes dans un arrangement cylindrique pour former un espace creux comme illustré sur la Figure 1.37 page 36. Les éléments de membrane sont mobiles seulement dans la direction radiale afin de modéliser la déformation. Les plaques supérieure et inférieure sont simulées par les éléments rectangulaires rigides. Aucune détection de contact n'est réalisée entre deux éléments membrane ou entre un élément membrane et un élément plaque. Le frottement entre les particules et les éléments membrane est nul.

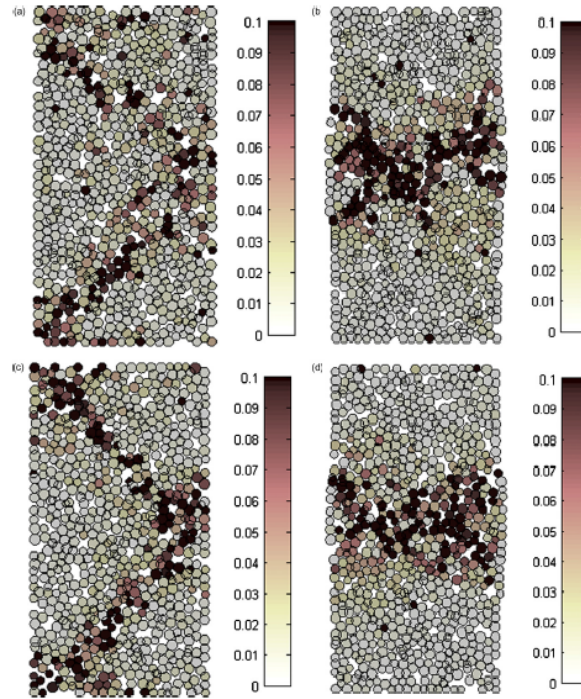


FIGURE 1.36: Déformation locale par condition rigide et membrane(2D)[64]

Les caractéristiques du matériau plaque sont les mêmes que celles des particules. Avec cette modélisation de la membrane, les auteurs ont étudié le chemin de contrainte, le déviateur et la déformation volumique de l'échantillon dans un essai triaxial. Ils ont aussi démontré que l'utilisation de polyèdres en DEM était aussi une méthode efficace pour représenter les matériaux granulaires hétérogènes.

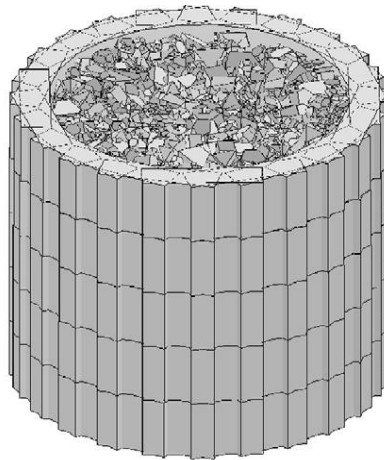


FIGURE 1.37: Condition limite parallélépipède [71]

Wang et Leung [99] ont créé une condition limite virtuelle dite condition limite de force qui ne modélise pas la condition limite mais qui exerce l'effet de la condition limite comme les forces appliquées directement sur les grains les plus extérieurs de

l'échantillon.

Wang et Tonon [100] considèrent que les particules de l'empilement les plus extérieures agissent comme la membrane. A chaque pas de temps, leur méthode identifie les particules les plus extérieures, si certaines particules pénètrent à l'intérieur de l'empilement, elles ne seront plus considérées comme des particules de la membrane (Figure 1.38 page 37).

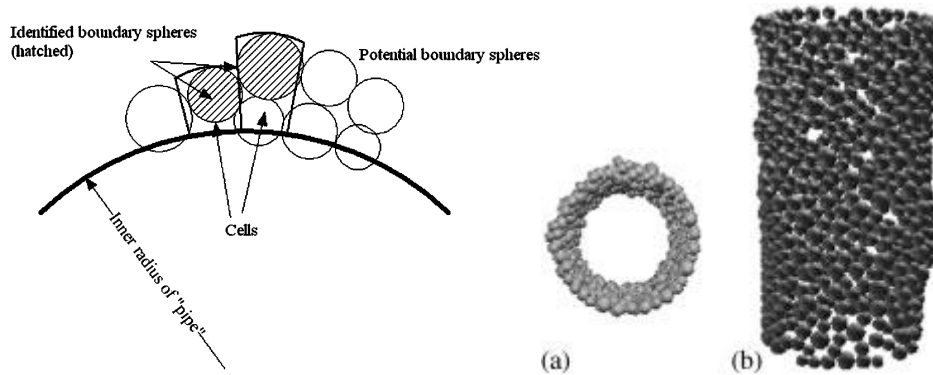


FIGURE 1.38: Illustration de l'identification des particules membrane [100]

Le Hello [42][101][102] a modélisé l'essai triaxial par une combinaison de méthode FEM et DEM. Il modélise la membrane par la FEM, et l'empilement par la DEM (Figure 1.39 page 37). Par rapport à une modélisation discontinue de la membrane, la membrane en FEM montre mieux la déformation de la membrane au cours de l'essai. La plus grosse difficulté de cette méthode est le couplage des méthodes FEM et DEM.

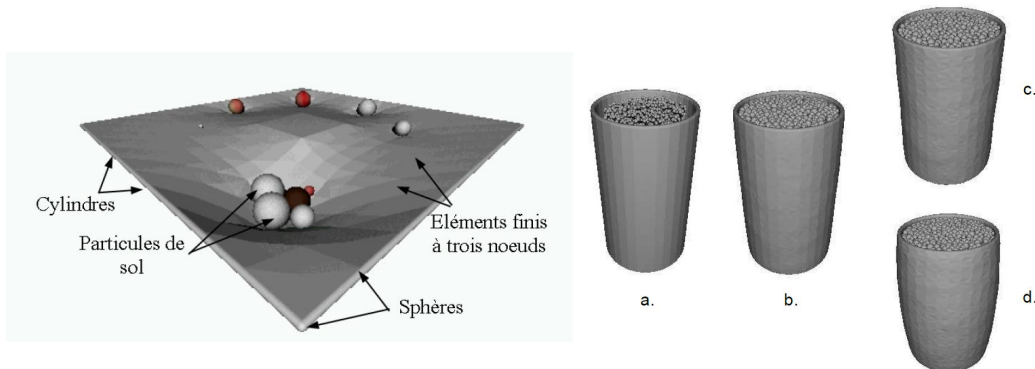


FIGURE 1.39: Application de FEM sur la condition limite dans la simulation de l'essai triaxial DEM [42]

### 1.3.4 Tenseur de contraintes

Afin de calculer les tenseurs de contraintes et de déformations, les matériaux granulaires peuvent être analysés au moyen d'une approche continue. Les méthodes

permettant de passer de la mécanique des particules à la mécanique des milieux continus sont souvent appelées méthodes d'homogénéisation. Après ce changement, on peut donc étudier les tenseurs de contraintes et de déformations au sein du milieu granulaire. Par contre, l'approche microscopique traite le matériau granulaire comme un ensemble de particules individuelles, on étudie dans ce cas plutôt les forces et les déplacements exercés ou subis par chaque particule du matériau [103][104].

Weber (1966) [105] est l'un des premiers à avoir défini l'expression du tenseur de contraintes d'un milieu granulaire en fonction des forces de contact inter-particules. Le tenseur de contraintes global est défini comme la moyenne volumique en 3D (ou surfacique en 2D) du produit tensoriel entre les forces de contact et le vecteur joignant les centres des particules :

$$\bar{\sigma} = \frac{1}{V} \sum_{k=1}^{k=N} F_i l_i \quad (1.25)$$

Où  $F_i$  est la force de contact,  $l_i$  est le vecteur entre les particules en contact,  $n$  est le nombre de particules totales dans le système,  $V$  est le volume du système.

Le volume élémentaire représentatif a été défini par Nemat-Nasser et Hori [106] comme un volume qui peut être considéré comme statistiquement représentatif du matériau, Figure 1.40 page 38. Il est considéré comme un point matériel du milieu équivalent. Le VER est représentatif parce qu'il représente le comportement du milieu équivalent : c'est le plus petit volume dont le comportement mécanique soit identique à celui du milieu macroscopique équivalent [69].

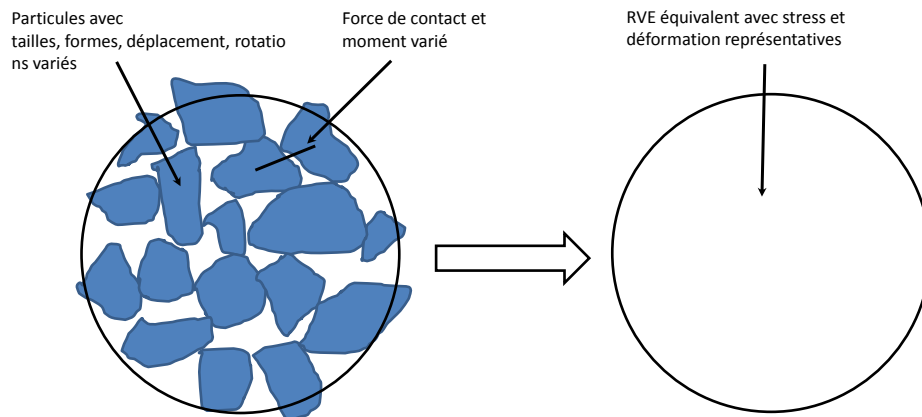


FIGURE 1.40: Illustration de la notion de homogénéisation [21]

La nécessité de relier les paramètres continus et discontinus a été reconnue depuis le travail de Cundall et Strack [45] qu'il s'agisse du calcul de la moyenne du tenseur de contraintes, de la moyenne du tenseur des moments et de la moyenne du tenseur des déplacements.

Thornton et Barnes (1986) [95] ont également repris l'idée de ce tenseur de



## 39 Généralités sur le comportement mécanique des matériaux granulaires

contraintes moyen dans leurs simulations. En 1996, Bagi [107] a exprimé la contrainte et la déformation en termes de variables locales dans le cas des matériaux granulaires. Les calculs de tenseurs de contraintes global et local ont été utilisés par Nicot et al [108][109][110][111][112][113][114][80] dans différentes études sur le comportement au cisaillement des milieux granulaires

### 1.3.5 Rappel du tenseur de contrainte

En mécanique des milieux continus, le tenseur de contraintes est utilisé pour caractériser l'état de contraintes en un point du matériau.

On rappelle dans un premier temps les variables associées à l'essai triaxial.

L'état de contraintes en un point  $M$  d'un milieu continu est défini par un tenseur à six composantes :

$$\bar{\bar{\sigma}} = \begin{pmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} \\ \sigma_{yx} & \sigma_{yy} & \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} & \sigma_{zy} & \sigma_{zz} \end{pmatrix} \quad (1.26)$$

On utilise souvent la représentation dans le repère des directions principales :

$$\bar{\bar{\sigma}} = \begin{pmatrix} \sigma_1 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_3 \end{pmatrix} \quad (1.27)$$

Souvent le tenseur de contraintes est décomposé en la somme d'un tenseur déviatorique et d'un tenseur sphérique, comme suit :

$$\bar{\bar{\sigma}} = \begin{pmatrix} q & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \sigma_3 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_3 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sigma_3 + q & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_3 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_3 \end{pmatrix} \quad (1.28)$$

Les trois contraintes principales sont  $\sigma_1$  contrainte majeure,  $\sigma_2$  contrainte intermédiaire et  $\sigma_3$  contrainte mineure ( $\sigma_2 = \sigma_3$ ).

### 1.3.6 Trois méthodes de calcul du tenseur de contraintes

Trois méthodes pour calculer le tenseur de contraintes dans un système composé des particules seront présentées dans ce chapitre. Ce sont respectivement : le tenseur moyen de contraintes du système ; le tenseur de contraintes calculé à partir de la condition paroi rigide ; le tenseur de contraintes locale sur une particule. Les équations présentées dans ce paragraphe sont tirées de [21].

**Méthode 1** *Tenseur moyen de contraintes calculé à partir de la condition limite*

Dans un matériau continu avec un volume  $V$  et une surface  $S$ , le tenseur de contrainte du matériau  $\sigma_{ij}$  peut être obtenu par intégration du théorème de Gauss [107]. L'équation de la relation micro-macro est la suivante :

$$\int_V \sigma_{ij} dV = \oint_S x_i t_j dS \quad (1.29)$$

C'est-à-dire que la somme de toutes les contraintes dans le volume  $V$  est équivalente à la somme des forces  $t_j$  appliquées à la position  $x_i$  (coordonnées du point de contact sur la surface de la condition limite). Donc, on peut calculer la contrainte moyenne par l'équation :

$$\bar{\sigma}_{ij} = \frac{1}{V} \int_V \sigma_{ij} dV = \frac{1}{V} \oint_S x_i t_j dS \quad (1.30)$$

Par contre, dans un matériau discret, les forces de contact sont exercées en des points discrets. L'équation doit être reformulée par une somme de points de contacts comme suit :

$$\bar{\sigma}_{ij} = \frac{1}{V} \sum_{k=1}^{k=n} x_i^k t_j^k \quad (1.31)$$

### Méthode 2 Tenseur de contraintes sur chaque particule

En plus du tenseur moyen de contraintes calculé sur l'ensemble de l'empilement, on peut aussi calculer le tenseur de contraintes sur une seule particule. A la surface de chaque particule, on peut calculer la production du tenseur qui égale la force exercée  $f_j^c$  sur la particule et le vecteur normal  $x_i^c$ . On obtient la formule :

$$\sigma_{ij}^p = \frac{1}{V_p} \oint_{S^p} x_i t_j dS \quad (1.32)$$

Comme dans la simulation DEM, les forces  $f_j^c$  exercées aux points de contacts  $x_i^c$  sur la surface sont discrets, on pourrait remplacer la formule précédente par la formule suivant :

$$\sigma_{ij}^p = \frac{1}{V_p} \sum_{k=1}^{k=n} x_i^c f_i^c \quad (1.33)$$

Où  $V_p$  est le volume de la particule,  $n$  est le nombre de forces de contact exercées sur la particule,  $x_i^c$  sont les positions des contacts, et  $f_j^c$  sont les forces de contact exercées sur la particule.

### Méthode 3 Tenseur moyen de contraintes de l'empilement

La position du point de contact entre deux particules peut être calculée [115] par l'équation :

$$x_i^c = x_i^p + |x_i^c - x_i^p| \times n_i^{c,p} \quad (1.34)$$

## 41 Généralités sur le comportement mécanique des matériaux granulaires

Où  $x_i^p$  est la position du centre de la particule,  $n_i^{(c,p)}$  est le vecteur unitaire pointant du centre de la particule vers le point de contact. On peut donc écrire :

$$\sigma_{ij}^p = \frac{1}{V_p} \sum_1^n (|x_i^c - x_i^p| \times n_i^{c,p}) \times f_i^c \quad (1.35)$$

En considérant la porosité de volume

$$V \approx \frac{\sum_1^n V_p}{1 - n} \quad (1.36)$$

Puisque  $x_i^p$  est la position du centre de la particule, la somme des forces sur ce point doit être 0, donc, on obtient l'équation :

$$\bar{\sigma}_{ij} = \frac{1 - n}{\sum_{k=1}^{k=n} V_p} \sum_{k=1}^{k=n} \sigma_{ij}^p V_p \quad (1.37)$$

$$\bar{\sigma}_{ij} = \frac{1 - n}{\sum_{k=1}^{k=n} V_p} \sum_{k=1}^{k=n} \sum_{c=1}^{c=n} (|x_i^c - x_i^p| \times n_i^{c,p}) \times f_i^c \quad (1.38)$$

Car

$$\sum_1^n \left( \sum_1^n (|x_i^c - x_i^p| \times n_i^{c,p}) \times f_i^c \right) = \sum_1^n (|x_i^c - x_i^{pa}| \times n_i^{c,pa} \times f_i^{j,ca} + |x_i^c - x_i^{pb}| \times n_i^{c,pb} \times f_i^{j,cb}) \quad (1.39)$$

$$l_i^c = |x_i^c - x_i^{pa}| \times n_i^{c,pa} - |x_i^c - x_i^{pb}| \times n_i^{c,pb} \quad (1.40)$$

Donc, on obtient la formule de Love classique :

$$\bar{\sigma}_{ij} = \frac{1}{V} \sum_{c=1}^{c=n} l_i^c f_j^c \quad (1.41)$$

### 1.3.7 Hétérogénéité des échantillons

Les granulaires dans la nature sont hétérogènes. Ils sont composés de particules de tailles, de formes, et de caractéristiques mécaniques variables. La représentation des hétérogénéités des granulaires reste un enjeu important pour la description de ces matériaux. Tang-Tat Ng et Wei Zhou [72] ont modélisé les grains par des ellipsoïdes. Kumar [116] ont étudié les effets polydispersés sur le comportement micro et macroscopique des matériaux granulaires sous différents chemins de chargement. Seung Jae Lee et Youssef [72] ont simulé des particules par des éléments discrets de type polyèdre. Fu [31] a modélisé des particules irrégulières par des agglomérats, Figure 1.41 page 42. Les agglomérats sont générés par des petites particules sphériques collées ensemble. Ce travail montre que la forme des particules a un effet considérable sur les comportements microscopique et macroscopique des matériaux granulaires. Au niveau micro, les formes

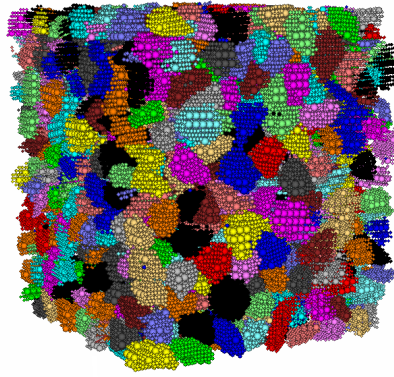


FIGURE 1.41: Échantillon composé par des agglomérats

irrégulières influencent les mouvements des particules. Au niveau macro, la résistance et la déformation de l'échantillon sont influencés par la forme des particules.

En revanche, à notre connaissance, l'influence d'hétérogénéités de taille sur le comportement au triaxial n'a pas été étudiée.

### 1.3.8 Validation de la DEM par comparaison avec les essais expérimentaux

Plusieurs essais sur des matériaux idéalisés comme des billes de verre, des billes d'acier ou des rouleaux (en 2D) ont permis à la fois d'étudier les matériaux granulaires et de fournir des bases de données pour valider les recherches DEM. Adjémian [17][18][117] a étudié sur des empilements quasi-statiques de billes de verres le phénomène de stick-slip. Dondi [93] a étudié l'essai triaxial en comparant les résultats de simulations DEM avec des essais expérimentaux pour les asphaltes. Charlampidou [118] a comparé le comportement mécanique de particules en 2D avec des disques et des rectangles. Toutefois, dans les recherches récentes, les études sur les milieux granulaires sont généralement réalisées soit par expérimentation soit par modélisation. Les travaux numériques sont généralement confrontés avec des résultats expérimentaux de la littérature, mais les conditions numériques et expérimentales ne sont pas toujours comparables. Très peu de travaux ont été effectués en étudiant systématiquement des simulations et des essais réalisés dans des conditions suffisamment proches pour qu'une véritable comparaison puisse être réalisée, cette partie reste un enjeu à développer.

## 1.4 Conclusion

Nous nous intéressons dans ce travail au cisaillement des matériaux granulaires. Les principales notions sur le cisaillement ont tout d'abord été rappelées. Ensuite, certains essais permettant d'étudier le cisaillement des granulaires ont été décrits, puis

## **43 Généralités sur le comportement mécanique des matériaux granulaires**

nous avons présenté plus en détails le principe et l'exploitation des résultats de l'essai triaxial de révolution. Cet essai est l'un des plus couramment utilisés en laboratoire, notamment au sein du laboratoire du département GCE de Mines-Douai. Enfin, les travaux numériques visant à modéliser l'essai triaxial au moyen de la DEM ont été recensés. Les différentes conditions aux limites développées dans la littérature ont notamment été présentées. Cette étude bibliographique a montré que le comportement au cisaillement des matériaux granulaires homogènes a été abondamment étudié d'un point de vue macroscopique. De nouvelles techniques expérimentales, comme la tomographie de rayons X, permettent également d'en étudier la microstructure, mais ces méthodes sont encore lourdes et très coûteuses. La simulation numérique discrète permet toutefois une étude plus aisée de la microstructure.

A l'issue de cette étude de la littérature, plusieurs questions restent cependant ouvertes. Peu de travaux ont notamment été consacrés à la comparaison systématique entre des résultats expérimentaux obtenus sur des matériaux modèles et des résultats numériques réalisés dans des conditions similaires. L'influence des hétérogénéités de taille présentes au sein d'un granulaire sur son comportement au cisaillement a par ailleurs fait l'objet, à notre connaissance, très peu étudié. Les matériaux testés en laboratoire, dans des cellules de dimension fixée, sont pourtant souvent composés d'un mélange entre particules de dimensions différentes. Ainsi, nous proposons dans ce travail de répondre aux questions suivantes :

- La DEM permet-elle de reproduire correctement le comportement au cisaillement d'un matériau granulaire lors d'un essai triaxial de révolution ?
- Quelle est l'influence des paramètres micromécaniques (tels que le coefficient de frottement grain-grain ou le coefficient de roulement) sur le comportement macroscopique du matériau ?
- Jusqu'à quelle taille de particules peut-on utiliser une cellule triaxiale de dimension fixée pour identifier de manière reproductible le comportement d'un matériau granulaire homogène ?
- Quelle est l'influence des hétérogénéités de taille sur le comportement d'un matériau granulaire ?

Afin de répondre à ces questions, ce travail de recherche a été scindé en deux grandes parties : une phase expérimentale basée sur la réalisation d'essais triaxiaux de révolution et une phase numérique basée sur la simulation DEM de l'essai triaxial. Dans la phase expérimentale, nous avons effectué des essais triaxiaux sur des billes de verres. Les billes de verre sont sphériques (matériaux granulaires idéaux) afin de permettre une comparaison avec les simulations de l'essai triaxial par la DEM.

Dans le chapitre deux, plusieurs séries d'essais triaxiaux sont réalisées sur des billes de verre monodisperses dans différentes conditions expérimentales. On s'intéresse particulièrement à l'influence de l'indice des vides initial de l'empilement, à l'influence

de l'état de saturation (empilements complètement secs ou complètement saturés) et à l'influence de la texture de surface des particules sur le comportement au cisaillement. Dans chaque cas, les essais sont réalisés sous plusieurs pressions de confinement. Ce chapitre fournit ainsi une base de données importante qui permettra par la suite une confrontation avec les simulations numériques.

Dans le chapitre trois, nous tentons de reproduire numériquement certains essais triaxiaux réalisés au chapitre précédent. Le modèle numérique utilisé est tout d'abord présenté. Une condition limite de type paroi rigide cylindrique est implémentée pour modéliser l'essai triaxial. Les simulations sont menées en utilisant les mêmes paramètres que ceux des essais expérimentaux. Les résultats numériques sont ainsi comparés avec la base de données expérimentale pour confondre le code. Le tenseur de contraintes nous permet d'étudier l'empilement d'un point de vue microscopique.

La comparaison entre les résultats expérimentaux du chapitre deux et les résultats numériques du chapitre trois étant satisfaisante, le modèle est ensuite exploité dans le chapitre quatre afin d'étudier l'influence des hétérogénéités de taille sur le comportement au cisaillement des matériaux granulaires. L'influence du rapport de tailles entre les particules et la cellule triaxiale est tout d'abord étudiée sur des empilements monodisperses. L'effet d'une unique inclusion de grande taille sur le cisaillement est ensuite abordé. Enfin, le cisaillement de mélanges de billes bidisperses de composition variable est étudié. Dans chacun des trois cas, une campagne expérimentale est tout d'abord réalisée sous une unique pression de confinement afin de permettre une comparaison avec les résultats numériques. Puis le modèle est utilisé pour étudier également d'autres pressions de confinement.

# 2

## **Comportement mécanique de billes de verres monodisperses sous sollicitations triaxiales de cisaillement**

## 2.1 Introduction et objectifs

**C**E chapitre a pour objet de présenter une étude expérimentale du comportement mécanique sous cisaillement monotone de billes de verre monodisperses. Le travail expérimental réalisé en régime quasi-statique vise en priorité à établir les fondamentaux du comportement mécanique au triaxial des billes de verre sous cisaillement, à la fois en condition sèche et totalement saturée. De nombreux travaux traitent essentiellement le cas de matériaux modèles secs, mais d'autres études relèvent de l'influence de l'état de saturation des matériaux granulaires sur la réponse mécanique et son impact sur les caractéristiques mécaniques tels que les angles de frottement local et interne.

Les résultats expérimentaux obtenus dans le cadre de ce travail doivent servir de base solide pour la confrontation numérique, dans l'optique de valider le modèle numérique et les hypothèses associées présentées dans la suite du mémoire.

Comme précités dans le chapitre 1, plusieurs facteurs d'influence jouent un rôle majeur sur la réponse mécanique des matériaux granulaires et des paramètres mécaniques. Dans ce contexte, les investigations expérimentales sont concentrées sur les facteurs suivants :

- Influence de la vitesse de cisaillement sur le stick-slip ;
- Influence de la pression effective moyenne ;
- Influence de l'état hydrique ;
- Influence de l'état de compacité ;
- Influence de l'état de texture des billes.

Ce chapitre expérimental est articulé comme suit : en premier lieu, le matériau modèle utilisé pour l'étude ainsi que le dispositif expérimental et les procédures d'essais utilisés pour la réalisation de l'ensemble des tests triaxiaux de cisaillement sont présentés.

Dans une deuxième phase, le programme expérimental est explicité, avec la prise en compte des différents facteurs d'étude précités dans la programmation des tests.

La dernière partie est consacrée à l'analyse des résultats et leur discussion, compte tenu de l'état de l'art et des objectifs numériques de l'étude.

## 2.2 Matériau et méthodes expérimentales

### 2.2.1 Matériau de l'étude : caractéristiques et choix du matériau modèle billes de verre

Le matériau utilisé est un matériau modèle simple quasi-monodisperse constitué de billes de verre sphériques, de 4mm de diamètre. Le fournisseur est LABOMAT



TABLE 2.1: Distribution de la taille des billes de verre

Taille in ( $\mu m$ )	< 3700	3700 – 3800	3800 – 3900	3900 – 4000	4000 – 4200
%	1,08	14,05	54,24	29,33	1,30

ESSOR/SILI France. Selon le certificat de qualité du produit, les billes sont principalement constituées de quartz (70%) et leur densité est de 2,53, avec un module de Young de 65GPa.

Les billes ne sont pas parfaitement monodisperses, il existe une distribution de tailles explicitée dans le tableau 2.1 page 47.

Par ailleurs, l'état de l'art a révélé que l'utilisation de billes neuves ou déjà utilisées peut avoir une influence sur les résultats mécaniques des essais du fait de l'usure des surfaces des billes. Hoang [18] a démontré que cette usure pouvait notamment entraîner une diminution du déviateur de contrainte et une atténuation du phénomène de stick-slip.

Dans ce contexte, afin de négliger ces influences parasite du comportement mécanique intrinsèque des billes, tous les essais expérimentaux présentés dans ce mémoire sont réalisés avec des billes de verre neuves. Ce choix est essentiel car il permet déjà de s'affranchir de différences par rapport aux résultats du modèle numérique, ce dernier ne reproduisant pas cet effet d'usure.

### 2.2.2 Dispositif expérimental dédié à l'étude (appareil triaxial classique)

L'appareil triaxial classique utilisé dans cette étude et présenté sur la Figure 2.1 page 48 ci-après, est constitué :

- d'une cellule triaxiale de capacité 1700 kPa (annoté a) permettant l'application d'une pression cellulaire sur tout le pourtour de l'échantillon ;
- d'une presse de modèle TRISCAN électro-mécanique 50kN (annoté b), pilotée en déplacement imposé à travers l'ascension du plateau de presse (noté c), permettant la sollicitation axiale de l'échantillon ;
- d'un capteur analogique LVDT de course 2 cm (annoté d), lié au piston (annoté e) en contact avec la tête d'échantillon ;
- d'un capteur de force externe en S de capacité maximale 2 kN, permettant la mesure de la contrainte déviatorique appliquée (noté f) ;

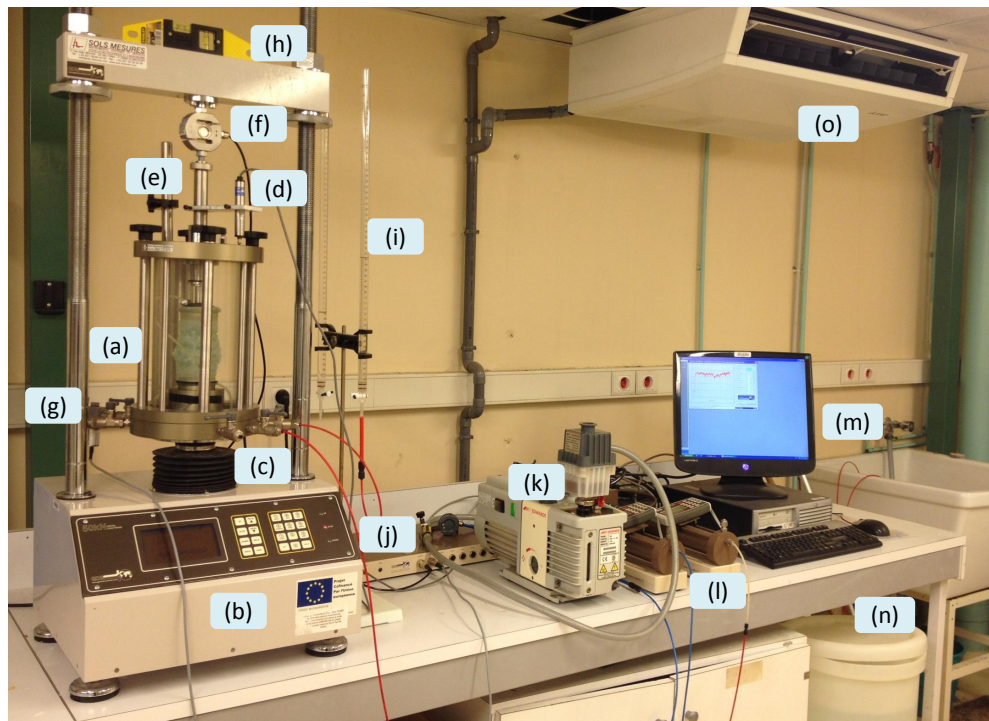


FIGURE 2.1: Ensemble du dispositif triaxial utilisé pour l'étude

- d'un capteur de pression (noté g) monté sur l'embase de la cellule triaxiale, permettant la mesure de la pression interstitielle en partie basse de l'échantillon ;
- d'un niveau (noté h) permettant le contrôle de l'horizontalité ;
- de deux burettes graduées (noté i), reliées directement aux parties haute et basse de l'échantillon lors de l'opération de dégazage de l'échantillon ;
- d'un système de contrôle et d'acquisition par le logiciel GDSLAB et conditionneur associé (noté j) ;
- d'une pompe à vide (noté k) ;
- de deux GDS de capacités ( $200\text{cm}^3$ , 3MPa) permettant la régulation des pressions de confinements cellulaires et de contre-pressions à l'intérieur de l'échantillon (noté l) ;
- d'un ordinateur (noté m) ;
- d'un contenant d'eau désaérée (noté n) ;
- d'une climatisation portée à 20 degrés (noté o) pendant la réalisation d'un essai triaxial.

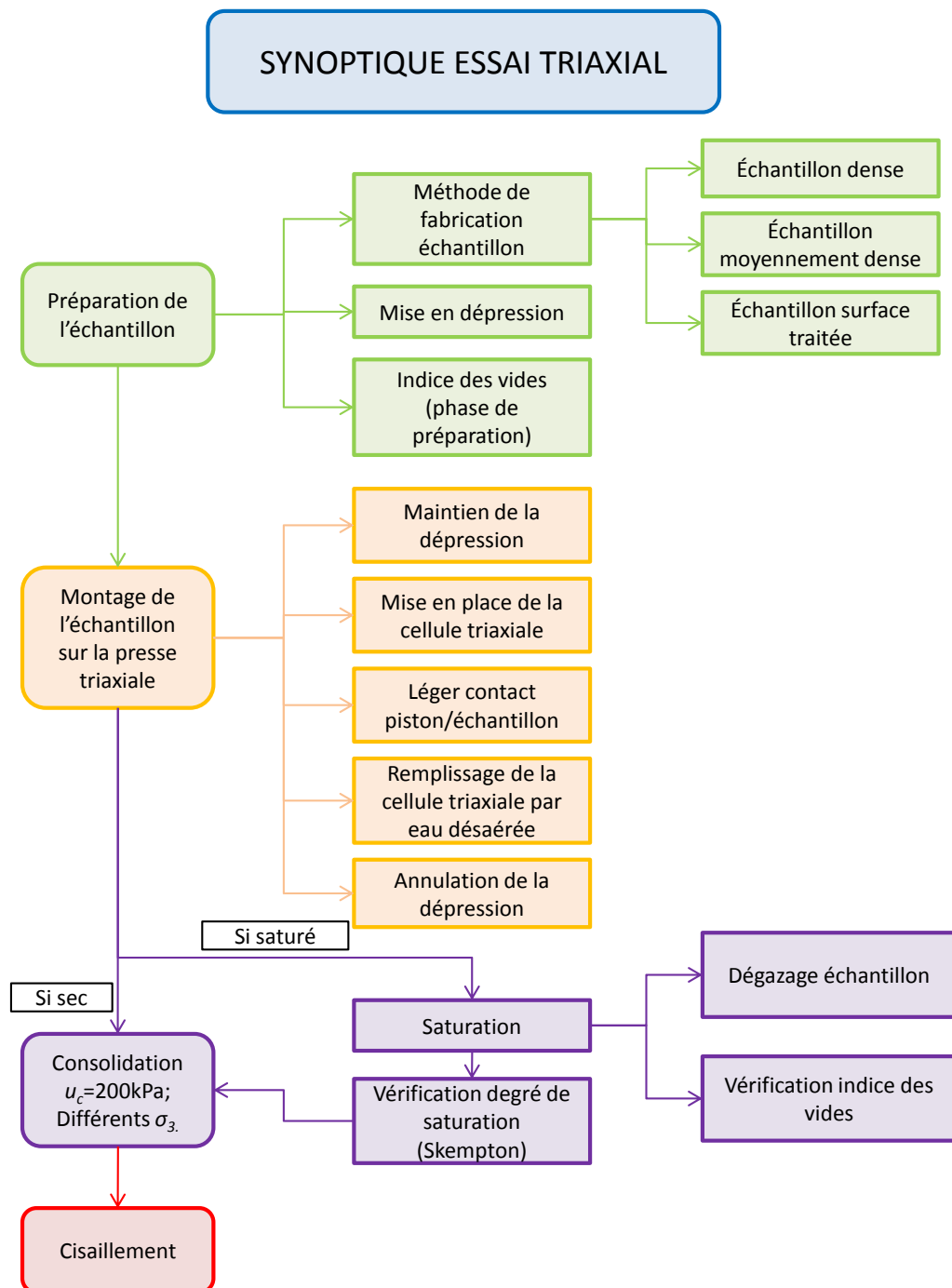


FIGURE 2.2: Synoptique de réalisation de l'essai triaxial

L'appareil triaxial classique utilisé permet l'exploitation du comportement du matériau dans le domaine des moyennes et grandes déformations.

## 2.3 procédures d'essais

### 2.3.1 Préparation d'un essai triaxial (synoptique)

Le synoptique présenté en Figure 2.2 page 49 explicite les différentes étapes de réalisation d'un essai triaxial.

### 2.3.2 Protocoles de préparation des échantillons

#### 2.3.2.1 Préparation du complexe moule/membrane

Un moule métallique cylindrique en trois parties à assembler est utilisé pour la fabrication des échantillons. Une membrane en latex de 0,3 mm d'épaisseur et de 12 MPa de rigidité est apposée sur la surface latérale intérieure du moule reconstitué ; celle-ci est ensuite rabattue extérieurement sur la partie haute du moule. Le complexe (moule + membrane latex) est posé sur le piédestal de la cellule ; une pierre poreuse est insérée en partie inférieure dans le fond du moule.

Ensuite, le mode de fabrication des éprouvettes diffère sensiblement pour la préparation des différents types d'échantillons prévus dans l'étude, à savoir : échantillon dense, échantillon moyennement dense et échantillon avec modification de texture des billes.

Il convient de préciser que tous les échantillons ont une hauteur de 12,5 cm et un diamètre de 5 cm (soit un élanement de 2,5).

#### 2.3.2.2 Préparation spécifique des échantillons denses

Les billes de verres sont déversées par pluviométrie à sec dans le moule par couche successive (hauteur de chute correspondant au bord supérieur du moule) tout en tapotant chaque couche à l'aide d'une tige-marteau.

L'objectif est de parvenir à insérer et tasser une quantité maximale de billes pour le volume cylindrique prédéterminé afin d'obtenir un échantillon dense. Une pierre poreuse et un capuchon sont ensuite respectivement posés sur le lit de billes supérieur de l'échantillon, par ailleurs soigneusement arasé.

La partie de membrane latex rabattue initialement sur le moule est utilisée pour recouvrir latéralement le capuchon ; des joints toriques (au nombre de trois) sont ensuite positionnés sur le pourtour du capuchon à une fin de garantie de l'étanchéité.

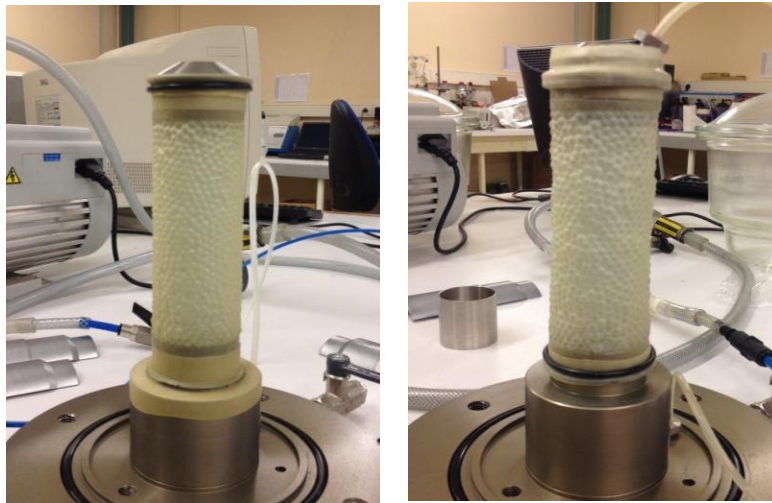


FIGURE 2.3: (a) Mise en place des joints toriques à la base de l'échantillon ; (b) Echantillon prêt à être monté sur la presse

Afin d'assurer la tenue de l'échantillon lors de l'enlèvement du moule, une dépression de -20 kPa est systématiquement appliquée. Le moule est ensuite retiré délicatement et des joints toriques (également au nombre de trois) sont positionnés sur le piédestal recouvert sur sa partie supérieure par la membrane (Figure 2.3 page 51(a)).

La répétabilité pour cette préparation est essentielle et a été assurée systématiquement, conduisant à l'utilisation de billes neuves équivalent à une masse de 388g pour une dimension d'échantillon en hauteur de 12,5 cm (Figure 2.3 page 51(b) ; systématiquement vérifié après application de la dépression) et un diamètre de 5 cm. Nombre des billes détaillées dans le tableau 3.5.

L'application de la dépression a tendance à faire pénétrer la membrane entre les grains positionnés sur tout le pourtour de l'échantillon, entraînant une réduction des vides de l'échantillon.

### 2.3.2.3 Préparation spécifique des échantillons moyennement denses

Il est bien connu qu'il reste difficile expérimentalement d'obtenir des échantillons lâches par pluviométrie à sec. Dans ce contexte, dans l'objectif de disposer d'échantillons moins denses que précédemment, une procédure expérimentale spécifique est mise au point. Celle-ci diffère du mode opératoire précédent uniquement lors de la phase de remplissage du moule par les billes de verre.

L'opération consiste tout d'abord à positionner un tube PVC de diamètre 1 cm au centre du moule, fixe durant toute la phase de déversement des billes par pluviométrie. A la différence de préparation des échantillons denses, aucun tapotement (pour densification) n'a lieu. Une couronne métallique de même diamètre que le moule est également utilisée et positionnée en partie supérieure du moule (Figure 2.4 page 52) afin de disposer d'un contenu de billes allant au-delà du bord supérieur du moule. En

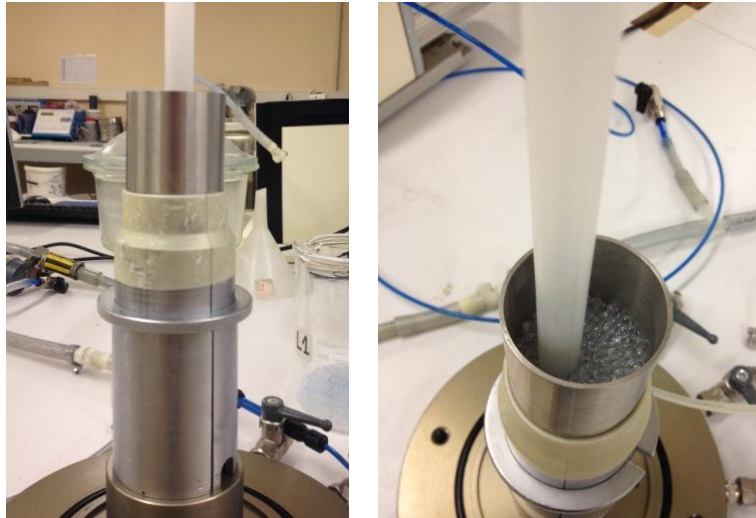


FIGURE 2.4: Dispositif pour préparation de l'échantillon moyennement dense

effet, la tige positionnée au centre du moule pendant toute la phase de déversement est ensuite enlevée de façon quasi-instantanée, induisant des vides au sein du moule et comblés par les billes complémentaires déversées dans la couronne.

Par ce mode opératoire, un échantillon de même dimension (hauteur=12,5 cm ; diamètre= 5cm) peut être obtenu en diminuant de 50g la masse de billes de verres incorporée.

L'application de la dépression a sûrement plus d'influence que le cas précédent d'échantillon dense en ce qui concerne la pénétration de la membrane entre les grains positionnés sur tout le pourtour de l'échantillon. Cela s'observe d'ailleurs visuellement.

#### 2.3.2.4 Préparation spécifique des échantillons modifiés par traitement de la surface des billes

La préparation du point de vue « montage de l'échantillon » est rigoureusement la même que pour celle de l'échantillon dense. La seule différence concerne la texture des billes qui constituent l'échantillon.

En effet, pour ce cas, la surface des billes est recouverte de téflon en utilisant une bombe vaporisante. Le téflon a pour effet de lubrifier les billes de verre et diminue donc le coefficient de frottement des billes ainsi traitées. La Figure 2.5 page 53 montre visuellement l'effet du traitement de surface des billes par le téflon. Un simple effet de cisaillement manuel par l'opérateur entre deux billes de même nature fait clairement ressentir une friction plus prononcée pour les billes neuves non traitées. Dans cette thèse, nous n'avons pas mesuré le coefficient de frottement entre les billes membrane expérimentalement.

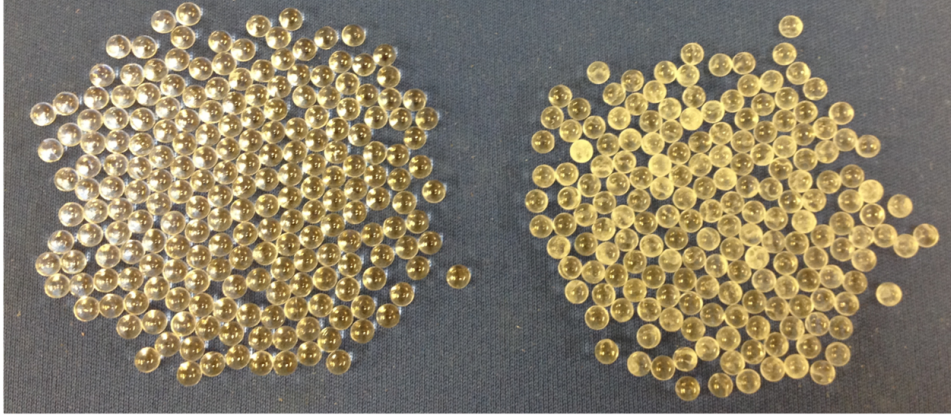


FIGURE 2.5: Billes neuves non traitées (à gauche) et après application de téflon (à droite)

### 2.3.2.5 Montage de l'échantillon sur la presse mécanique

Une fois l'échantillon préparé, celui-ci est posé sur le plateau de presse par l'intermédiaire de l'embase inférieure avec piédestal. La cellule triaxiale en plexiglas est ensuite montée et fixée sur cette embase inférieure pour éviter tout phénomène d'excentricité et garantir l'étanchéité.

Un léger contact de maintien de l'échantillon avec le piston de chargement est réalisé. A ce stade, la dépression est toujours activée.

Le remplissage de la cellule s'opère ensuite de façon ascendante et parvient progressivement à immerger l'échantillon. Tout en appliquant une pression cellulaire de 20 kPa, la dépression est maintenant annulée.

L'échantillon est maintenant parfaitement maintenu et prêt pour la phase de saturation pour les essais concernés.

Il convient à ce stade d'estimer l'indice des vides de préparation pour chaque cas envisagé : échantillon dense et moyennement dense (pour le cas des billes traitées au téflon, la configuration est la même qu'en état dense comme déjà évoqué).

L'effet de la variation de volume de l'échantillon dû à la pénétration membranaire peut être calculé en utilisant la formule empirique de Baldi et Nova [119], à savoir :

$$V_m = \frac{d_g}{2d_{spec}} V_0^3 \sqrt{\frac{\sigma'_3 d_g}{E_m t_m}} \quad (2.1)$$

avec  $V_m$  le volume dû à la pénétration membranaire,  $d_g$  le diamètre des grains,  $d_{spec}$  le diamètre de l'échantillon,  $V_0$  le volume initial de l'échantillon,  $\sigma'_3$  la pression effective latérale,  $E_m$  et  $t_m$  respectivement la rigidité et l'épaisseur de la membrane.

En utilisant cette relation, le volume dû à la pénétration membranaire est estimé de l'ordre de  $2,76 \text{ cm}^3$ , soit une variation relative du volume de l'ordre de 1,12% (volume théorique de l'échantillon cylindrique :  $245 \text{ cm}^3$ ).

Ainsi, les indices des vides à l'issue des phases de préparation expérimentale peuvent

être calculés :

- pour les échantillons denses :  $e_{prep} = 0,582$  (compacité de 0,632), valeur proche du RCP(Random Close Packing), contre 0,6 en condition parfaitement cylindrique (soit une erreur relative de 3%) ;
- pour les échantillons moyennement denses :  $e_{prep} = 0,805$  (compacité de 0,554) contre 0,826 en condition parfaitement cylindrique (soit une erreur relative de 2,5%).

### 2.3.3 Saturation

Pour l'étude, une série d'échantillons sont saturés.

La méthode de saturation suit les étapes chronologiques suivantes :

- Sous une pression cellulaire voisine de 20 kPa, un dégazage des bulles d'air par flux ascendant d'eau désaérée introduit dans l'échantillon à l'aide d'un contrôleur de volume (connecté en partie inférieure de l'échantillon) est effectué.

Le dégazage s'effectue de façon très lente de telle sorte à s'assurer au mieux de l'élimination des bulles d'air au sein du réseau de porosité du squelette granulaire.

Connectée à la partie supérieure de l'échantillon, une burette graduée de capacité  $100 \text{ cm}^3$  permet de visualiser les bulles d'air dégazées de l'échantillon et de déterminer la fin du dégazage, qui implique en théorie une saturation totale de l'échantillon. Le volume d'air dégazé étant connu ainsi que le volume injecté, la détermination de l'indice des vides (expérimental) est possible.

- Suite à cette étape, à l'aide du contrôleur de volume, plusieurs cycles de saturation s'opèrent, tout en continuant à vérifier au niveau de la burette qu'il n'existe plus de bulles d'air expulsées de l'échantillon.

En fin de phase de saturation, une comparaison du volume des vides expérimental (correspondant au volume d'eau injectée dans l'échantillon pour un dégazage total de l'échantillon) avec le volume des vides théorique (calculé suivant l'hypothèse de volume parfaitement cylindrique pour l'échantillon avec masse et densité connues des billes) est effectuée.

Pour tous les essais triaxiaux réalisés en condition saturée, l'erreur relative entre les indices des vides expérimental et théorique est inférieure à 5%, mais ne peut être considérée comme négligeable.

Pour l'étude, l'indice des vides retenu est l'indice des vides en fin de saturation, noté  $e_{sat}$ .

La mesure du coefficient de Skempton  $B$  est requise dans l'étape suivante. Ce coefficient s'exprimant comme le rapport des incréments de pression cellulaire  $\sigma_3$  et de contre-pression interstitielle  $u_c$  [120].

Ainsi, pour la vérification de la saturation, la montée en pression cellulaire s'effectuée par étape de 50 à 200 kPa, en passant par les pressions intermédiaires de 100 et 150



kPa. A la fin de chacune de ces incréments en pression, le coefficient de Skempton est évalué.

Pour l'ensemble des triaxiaux effectuées, les valeurs calculées sont toutes systématiquement supérieures à 0,95.

La pression cellulaire maximale prise égale à 200 kPa pour cette vérification correspond à la contre-pression utilisée pour cette étude dans le cadre des essais drainés saturés. Ce choix se justifie par le fait qu'à cette intensité de pression, on peut estimer que celle-ci est suffisamment importante pour parvenir à l'éclatement de bulles d'air résiduelles qui pourraient subsister dans l'échantillon.

### 2.3.3.1 Consolidation

Suite à la phase de saturation, l'échantillon est consolidé sous une pression effective de confinement  $p'$  pouvant varier de  $p' = 50$  kPa et  $p' = 300$  kPa.

La phase de consolidation est réalisée avec la contre-pression interstitielle constante  $u_c = 200$  kPa comme explicité ci-dessus. Le drainage est assuré par la consigne imposée au contrôleur de pression.

Dans cette configuration, la pression cellulaire  $\sigma_3$  passe ainsi de 200 kPa à la consigne de pression de l'essai référent (soit 250, ou 300, ou 400 et ou 500 kPa comme décrit ultérieurement dans le programme expérimental).

La fin de la phase de consolidation de l'échantillon est quasi-systématique suite à l'application de la pression cellulaire référente  $\sigma_3$  de l'essai et est caractérisée par une variation volumique nulle. A cette étape, l'indice des vides, noté  $e_{cons}$ , est calculé.

## 2.4 Programme expérimental

Le programme d'essais au cours de cette étude repose sur quatre séries d'essais décrites ci-après à travers des tableaux récapitulatifs. L'ensemble de ces différentes séries a pour objectif d'évaluer l'influence :

- de la vitesse de déplacement (série 1),
- de l'état de compacité : échantillons denses (pour la série 2) et échantillons moyennement dense (pour la série 3) avec influence de l'état hydrique (saturé/non saturé) et de la pression moyenne effective,
- de la texture des billes (série 4).

En rappel, tous les essais sont réalisés sur des échantillons de hauteur 12,5 cm, de diamètre 5 cm et avec l'utilisation systématique de billes de verre neuves.

La désignation utilisée pour un essai se décrit comme suit :

- le premier indice « v » (ou « mv ») représente la vitesse de déplacement ascendante du plateau de presse, l'unité de la vitesse étant le mm/min ; dans le cas de la série 1 avec différents vitesses au cours d'un essai, l'indice sera « mv » (pour

- multi-vitesse); dans les autres séries, l'indice sera « v01 » signifiant une vitesse de 0,1 mm/min ;
- le deuxième indice « D », « L » ou « T » indique que l'échantillon est dense, moyennement dense ou dense avec modification de texture ;
  - le troisième indice « sat » ou « sec » indique que l'échantillon est dans un état totalement saturé ou sec ;
  - l'indice « s » suivi d'un nombre représente la pression cellulaire de confinement et son intensité (en kPa); de même, l'indice « u » suivi d'un nombre représente la contre-pression interstitielle et son intensité (en kPa) ;
  - l'indice « r » signifie la répétabilité de l'essai.

A titre d'illustration concrète, l'essai désigné par  $v01Dsat_s400u200r2$  correspond à un échantillon dense saturé, cisailé sous une vitesse de  $0,1\text{mm}/\text{min}$ , sous une pression cellulaire de 400 kPa et une contre-pression de 200 kPa, soit une contrainte intergranulaire effective de 200 kPa. Il s'agit de plus de la deuxième répétition de cet essai.

Pour tous les essais réalisés à l'exception de la série relative à l'influence de la vitesse, la vitesse de déplacement imposée est prise égale à  $0,1\text{mm}/\text{min}$  afin d'assurer l'état quasi-statique et de ne pas générer de surpressions interstitielles dans les échantillons lors des essais drainés saturés.

#### 2.4.1 Série d'essais liée à l'influence de la vitesse de déplacement

Le tableau 2.2 page 56 explicite le programme spécifique : au cours d'un même essai, une variation de la vitesse de déplacement est opérée afin d'en évaluer l'influence sur la réponse mécanique globale.

- la vitesse est de 0,1 mm/min pendant jusqu'à 5% de déformation ;
- de 5 à 10%, elle est prise égale à  $1\text{mm}/\text{min}$  ;
- enfin, à partir de 10% de déformation axiale, la vitesse revient à 0,1 mm/min.

Trois essais sont effectués à différentes pressions moyenne effective (respectivement 50kPa, 100kPa et 200 kPa).

TABLE 2.2: Série d'essais avec échantillons denses avec variation de la vitesse de déplacement et de la pression moyenne effective

Dénomination	Vitesse	m(g)	$\sigma_3(kPa)$	$U_c(kPa)$	$p_{conf}(kPa)$
$mvDsat\_s250u200$	0,1 - 1,0 - 0,1	388	250	200	50
$mvDsat\_s300u200$	0,1 - 1,0 - 0,1	388	300	200	100
$mvDsat\_s400u200$	0,1 - 1,0 - 0,1	388	400	200	200

### 2.4.2 Série d'essais liée à l'influence de la saturation et de la pression moyenne effective pour les échantillons denses

Le tableau 2.3 page 58 présente le programme spécifique engagé sur les échantillons denses, avec étude d'influence de la saturation (échantillon totalement saturé ou sec) et de la pression moyenne effective prise respectivement égale à 50, 100, 200 et 300 kPa.

La contre-pression pour les essais drainés saturés est fixe et vaut 200 kPa ; pour les essais drainés secs, elle est fixe et nulle.

Chaque essai est répété systématiquement au moins trois fois afin d'évaluer le caractère répétable des essais, sous-tendant également la répétabilité de la méthodologie. En réalité, en raison des incidents expérimentaux (perforation de membrane, fuite...), le nombre d'essais réalisés est beaucoup plus important que initialement prévu dans le programme expérimental.

### 2.4.3 Série d'essais liée à l'influence de la saturation et de la pression moyenne effective pour les échantillons moyennement denses

Cette série d'essais ne diffère de la précédente que par l'état de compacité des échantillons.

### 2.4.4 Série d'essais liée à l'influence de la texture

Trois essais sont réalisés pour évaluer l'influence de la texture, comme présenté dans le Tableau 2.4 page 57 : les conditions d'essais correspondent aux essais drainés saturés sur échantillons denses aux pressions effectives de confinement de 50, 100 et 200 kPa.

TABLE 2.4: Série d'essais avec échantillons denses saturés avec billes neuves traitées avec variation de la pression moyenne effective

Dénomination	Vitesse	m (g)	$\sigma_3(kPa)$	$U_c(kPa)$	$p_{conf}(kPa)$
<i>v01Tsat_s250u200</i>	0,1	388	250	200	50
<i>v01Tsat_s300u200</i>	0,1	388	300	200	100
<i>v01Tsat_s400u200</i>	0,1	388	400	200	200

### 2.4.5 Evaluation de la répétabilité expérimentale

Il est difficile d'avoir rigoureusement le même état initial dans plusieurs expériences pour des mêmes conditions d'essais.

Pour pouvoir conclure favorablement à la répétabilité des tests triaxiaux effectués dans ce travail, tous les essais relatifs aux échantillons denses et moyennement denses ont été systématiquement réalisés trois fois.

Il convient de préciser que la réalisation des essais triaxiaux sous pressions effectives moyennes de 300 kPa s'est avérée plus délicate en raison d'une perforation de membrane

TABLE 2.3: Série d'essais avec échantillons denses et moyennement dense avec variation de l'état hydrique et de la pression moyenne effective

Dénomination	Vitesse	m(g)	$\sigma_3(kPa)$	$U_c(kPa)$	$p_{conf}(kPa)$
<i>v01Dsat_s250u200r1</i>	0,1	388/340	250	200	50
<i>v01Dsat_s250u200r2</i>	0,1	388/340	250	200	50
<i>v01Dsat_s250u200r3</i>	0,1	388/340	250	200	50
<i>v01Dsat_s300u200r1</i>	0,1	388/340	300	200	100
<i>v01Dsat_s300u200r2</i>	0,1	388/340	300	200	100
<i>v01Dsat_s300u200r3</i>	0,1	388/340	300	200	100
<i>v01Dsat_s400u200r1</i>	0,1	388/340	400	200	200
<i>v01Dsat_s400u200r2</i>	0,1	388/340	400	200	200
<i>v01Dsat_s400u200r3</i>	0,1	388/340	400	200	200
<i>v01Dsat_s500u200r1</i>	0,1	388	500	200	300
<i>v01Dsat_s500u200r2</i>	0,1	388	500	200	300
<i>v01Dsat_s500u200r3</i>	0,1	388	500	200	300
<i>v01Dsec_s250u200r1</i>	0,1	388/340	50	0	50
<i>v01Dsec_s250u200r2</i>	0,1	388/340	50	0	50
<i>v01Dsec_s250u200r3</i>	0,1	388/340	50	0	50
<i>v01Dsec_s300u200r1</i>	0,1	388/340	100	0	100
<i>v01Dsec_s300u200r2</i>	0,1	388/340	100	0	100
<i>v01Dsec_s300u200r3</i>	0,1	388/340	100	0	100
<i>v01Dsec_s400u200r1</i>	0,1	388/340	200	0	200
<i>v01Dsec_s400u200r2</i>	0,1	388/340	200	0	200
<i>v01Dsec_s400u200r3</i>	0,1	388/340	200	0	200
<i>v01Dsec_s500u200r1</i>	0,1	388	300	0	300
<i>v01Dsec_s500u200r2</i>	0,1	388	300	0	300
<i>v01Dsec_s500u200r3</i>	0,1	388	300	0	300

plus accrue que pour les essais à moindre pressions effectives. En conséquence, certains essais sous  $p' = 300$  kPa n'ont pu atteindre le palier d'écoulement.

#### 2.4.6 Paramètres mécaniques à identifier

Pour chaque série d'essais, les points caractéristiques des courbes sont évalués, à savoir :

- la contrainte déviatorique  $q_{pic}$  et la pression moyenne effective  $p'_{pic}$  au pic quand il existe ;
- la contrainte de déviatorique  $q_{palier}$  et la pression moyenne effective  $p'_{palier}$  .

A partir des droites de rupture dans le plan  $(q, p')$ , les angles de frottements internes macroscopiques au pic et palier d'écoulement sont évalués. Les angles d'initiation à la dilatance ainsi que les angles de dilatance sont également estimés à partir des réponses volumiques obtenues pour les essais saturés.

L'ensemble de ces paramètres pourront être comparés aux résultats numériques obtenus pour les mêmes conditions d'essais.

## 2.5 Résultats et analyses

### 2.5.1 Observations générales / Réponse déviatorique type

La Figure 2.6 page 59 présente la réponse type obtenue expérimentalement lors du cisaillement d'un échantillon dense de billes de verre sous une pression moyenne effective de 200 kPa.

Il est observé de façon prononcée le phénomène de stick-slip sur la réponse déviatorique : cette réponse est saccadée et caractérisée par des chutes brutales de la contrainte déviatorique. Ce phénomène saccadé a déjà été décrit et étudié notamment par Adjémian [17][19] et Hoang [18]. L'intensité du phénomène semble dépendre de la taille des billes, de la pression moyenne appliquée et de la vitesse de cisaillement.

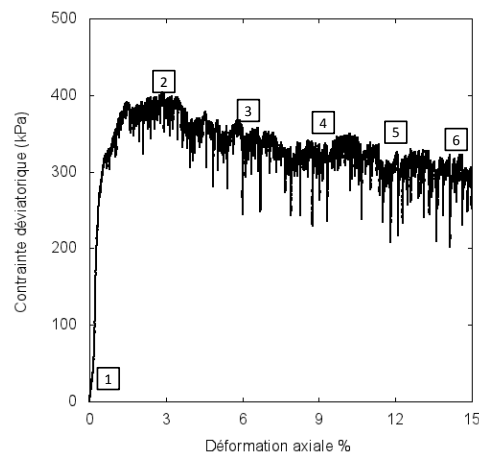


FIGURE 2.6: Réponse déviatorique type obtenue lors des essais triaxiaux de cisaillement (courbe de référence :  $p' = 200$  kPa)

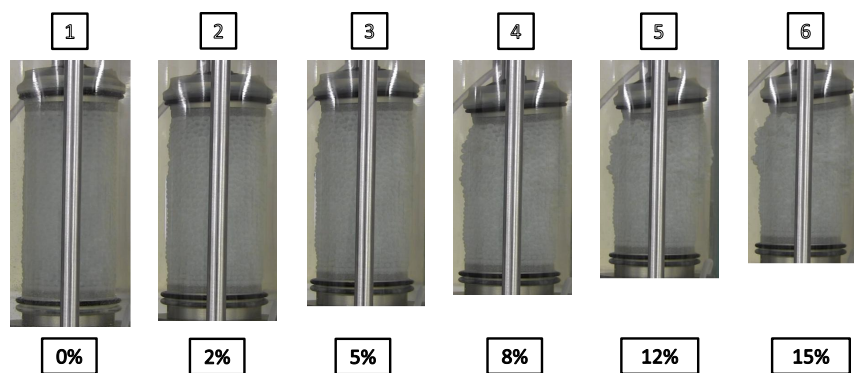


FIGURE 2.7: Cisaillement et déformation globale de l'échantillon à différents niveaux de déformations repérés sur la réponse déviatorique type en Figure 2.6 ( $p' = 200$  kPa)

Dans ce travail, en présence de ce phénomène parasite, l'allure de la réponse déviatorique reste commune à ce qui est observé pour un milieu granulaire dense cisailé, avec la présence d'un pic de rupture et un palier d'écoulement aux grandes

déformations.

La Figure 2.7 page 59 illustre la déformation de l'échantillon jusqu'à 15% sous  $p' = 200$  kPa. La courbe déviatorique est annotée afin de visualiser l'état de déformation en différents points de la réponse déviatorique. De l'observation visuelle, on peut considérer que la forme d'échantillon reste cylindrique au moins jusqu'à 5% de déformation axiale. Ce constat expérimental est fondamental pour la confrontation avec les résultats des simulations numériques basée sur la condition limite cylindrique dans le chapitre suivant.

La Figure 2.8 page 60 présente également les trois états majeurs de l'échantillon au cours de la réalisation de l'essai triaxial (avant essai (a), au pic de rupture (b) et à l'état résiduel (c)).

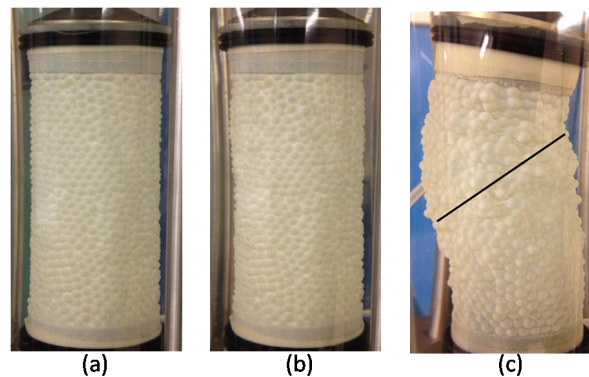


FIGURE 2.8: Forme de l'échantillon avant essai (a), au pic de rupture (b) et au palier d'écoulement (c)

## 2.5.2 Comportement des billes de verre denses saturées : résultats et analyses

### 2.5.2.1 Influence de la vitesse de cisaillement

La vitesse de cisaillement dans chaque essai varie de la façon suivante : durant les premiers 5% de déformation axiale, la vitesse est fixée à 0.1mm/min ; puis dans les 5% de déformation axiale suivants, la vitesse est augmentée à 1mm/min ; dans les derniers 5% de déformation axiale, la vitesse est ramenée à 0.1mm/min. De cette façon, nous pouvons étudier l'effet de la vitesse sans trop alourdir le travail expérimental selon les études d'Adjemian [17][19] et Hoang [18]. Les essais sont réalisés pour trois pressions de confinement : 50kPa, 100kPa, 200kPa.

On observe clairement sur la Figure 2.9 page 61 que la continuité de l'allure générale de la réponse déviatorique est conservée. On note cependant que l'augmentation de la vitesse semble impacter sur l'amplitude du phénomène de stick-slip (moins prononcé avec l'augmentation de la vitesse). D'autre part, on constate que ce phénomène tend à

s'amplifier avec l'augmentation de la pression effective moyenne.

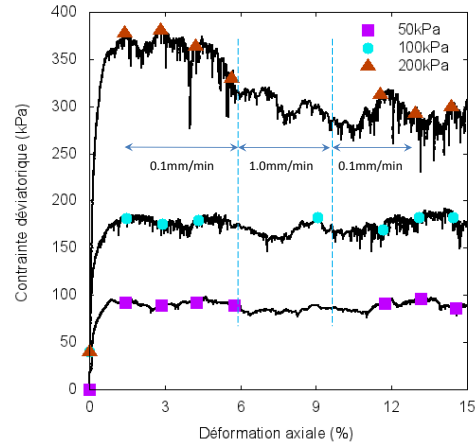


FIGURE 2.9: Évolution du déviateur  $q$  pour échantillons denses sous différentes vitesses de cisaillement

### 2.5.2.2 Influence de la pression effective moyenne

Préalablement, le tableau 2.5 page 62 montre les indices des vides des échantillons denses saturés obtenus après chaque étape d'essai triaxial (préparation, saturation, consolidation, cisaillement) comme explicité en début de chapitre dans le synoptique spécifique à la réalisation de l'essai triaxial. Certains essais n'ont pu être menés à leur terme ce qui n'a donc pas permis la détermination de l'indice des vides en fin d'essai de cisaillement.

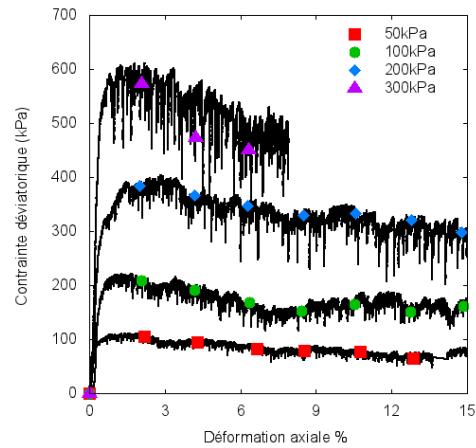


FIGURE 2.10: Courbes déviatoriques pour les essais triaxiaux denses saturés

La Figure 2.10 page 61 montre les réponses déviatoriques obtenues pour les échantillons denses sous les quatre pressions effectives de confinement : 50 kPa, 100 kPa, 200 kPa et 300 kPa. Par souci de lisibilité, les résultats présentés sur la Figure 2.10 page 61 représente systématiquement le deuxième essai répété (c'est-à-dire marqué par « r2 » dans la dénomination de l'essai) à pression effective de confinement fixée.

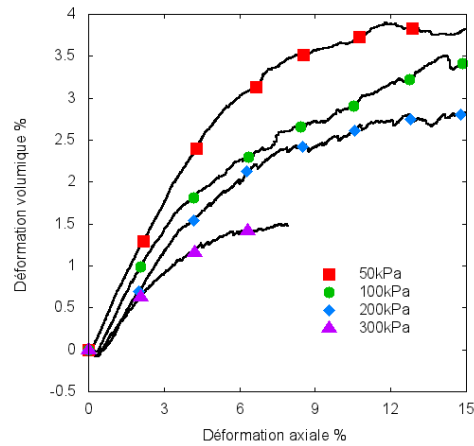


FIGURE 2.11: Courbes volumiques pour les essais triaxiaux denses saturés

TABLE 2.5: Indice des vides calculés au cours des différentes étapes des essais triaxiaux denses saturés

Nom Essai	$e_{prep}$	$e_{sat}$	$e_{cons}$	$e_{cis}$
<i>v01Dsat_s250u200r1</i>	0,581	0,554	0,539	0,637
<i>v01Dsat_s250u200r2</i>	0,581	0,562	0,545	0,645
<i>v01Dsat_s250u200r3</i>	0,581	0,565	0,551	0,642
<i>v01Dsat_s300u200r1</i>	0,581	0,555	0,532	0,628
<i>v01Dsat_s300u200r2</i>	0,581	0,558	0,537	0,624
<i>v01Dsat_s300u200r3</i>	0,581	0,559	0,539	0,631
<i>v01Dsat_s400u200r1</i>	0,581	0,553	0,526	0,607
<i>v01Dsat_s400u200r2</i>	0,581	0,551	0,529	X
<i>v01Dsat_s400u200r3</i>	0,581	0,549	0,532	0,612
<i>v01Dsat_s500u200r1</i>	0,581	0,551	0,523	X
<i>v01Dsat_s500u200r2</i>	0,581	0,543	0,521	X
<i>v01Dsat_s500u200r3</i>	0,581	0,547	0,525	X

Le déviateur augmente très rapidement en début d'essai de façon linéaire jusqu'à l'apparition de la rupture (courbure progressive de la réponse déviatorique) marquée significativement par un pic. On note que la pente initiale des courbes est d'autant plus raide que la pression effective moyenne augmente, ce qui traduit une évolution de la rigidité de l'amas granulaire et de sa dépendance vis-à-vis de la contrainte moyenne.

Post-pic, le déviateur décroît jusqu'à atteindre un niveau asymptotique, caractéristique de l'état critique aux grandes déformations.

La Figure 2.11 page 62 présente l'évolution de la déformation volumique en fonction de la déformation axiale sous les quatre pressions effective de confinement pour les essais retenus précédemment. Les échantillons denses passent initialement par une phase de contractance puis se dilatent progressivement. La dilatance apparaît d'autant plus importante que la pression effective de confinement est faible.

Les résultats expérimentaux obtenus sont en conformité avec le comportement



mécanique classique des matériaux granulaires initialement denses largement développé dans la littérature.

Les Figures 3.12 page 97 et 2.13 page 63 montrent les réponses obtenues, respectivement déviatoriques et volumiques, pour l'ensemble des essais répétés systématiquement trois fois à pression effective de confinement fixée.

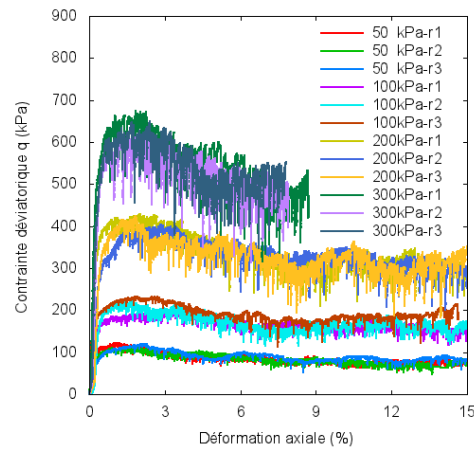


FIGURE 2.12: Courbes déviatoriques pour échantillons denses saturés : essais de répétabilité

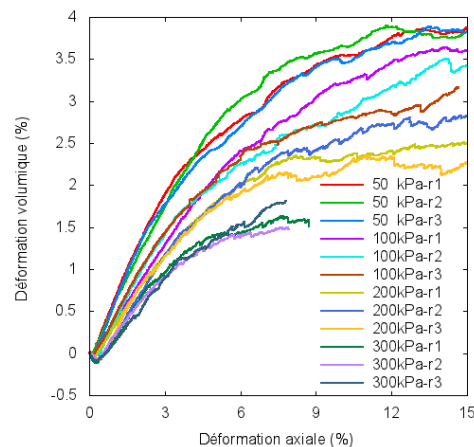


FIGURE 2.13: Courbes volumiques pour échantillons denses saturés : essais de répétabilité

Les résultats expérimentaux obtenus montrent la bonne répétabilité des différents tests, concourant à l'obtention de paramètres mécaniques expérimentaux fiables pour le milieu granulaire modèle et nécessaire à une fin de comparaison pertinente et critique avec les simulations numériques.

La Figure 2.14 page 64 montre l'évolution de l'indice des vides en fonction du logarithme décimal de la pression effective moyenne  $p'$ . Il semble se dessiner que l'indice des vides obtenus au palier d'écoulement varie linéairement en fonction du logarithme

de la pression effective moyenne appliquée, hormis pour les essais à  $p' = 300$  kPa dont la plupart sont arrêtés prématurément en raison de déchirures membranaires. Ces résultats expérimentaux seraient à approfondir en comparaison avec la droite normalement consolidée dans le plan  $(e; \log p')$  ainsi que la droite de compression isotrope, le fait remarquable étant le parallélisme de ces droites entre elles dans le plan  $(e; \log p')$ .

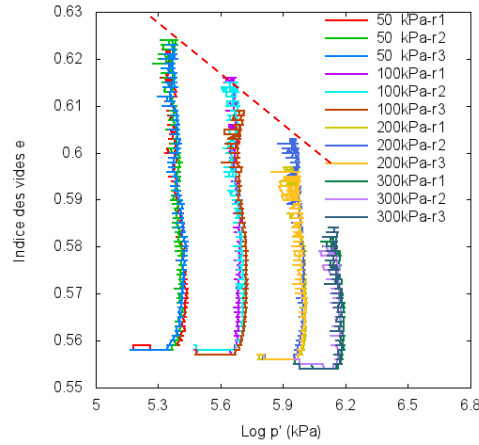


FIGURE 2.14: Évolution de l'indice des vides en fonction de la pression effective moyenne pour les échantillons denses

### 2.5.2.3 Évaluation des angles de frottement macroscopique pour les échantillons denses saturés

La Figure 2.15 page 65 montre l'évolution du rapport  $M$  ( $q/p'$ ) en fonction de la déformation axiale pour tous les échantillons denses. Toutes les réponses suivent la même allure que les résultats obtenus au niveau des réponses déviatoriques.

A partir des réponses déviatoriques, le tableau 2.6 page 65 présente les valeurs des paramètres caractéristiques au pic et au palier, à savoir le triplet  $(q, p', M)$ . Un pseudo-angle de frottement interne  $\varphi$  est calculé au pic et au palier pour un essai donné, considérant une cohésion nulle.

Les angles de frottements au pic et au palier sont calculés à l'aide de l'expression littérale suivante :

$$M = \frac{q}{p} \quad (2.2)$$

$$M = \frac{6 \sin \varphi}{3 - \sin \varphi} \quad (2.3)$$

La valeur de  $M$  est voisine de 1.3 à l'état caractéristique (noté  $M_{pic}$ ), et voisine de 1.1 à l'état critique (notée  $M_{palier}$ ). Les valeurs calculées des pseudo-angles de frottement au pic et au palier sont respectivement de l'ordre de  $27^\circ$  et de  $25^\circ$ . Ces résultats sont similaires avec ceux obtenus par Novoa-Martinez [121] et Olivari [122].

TABLE 2.6: Valeurs expérimentales caractéristiques du triplet  $(q, p, M)$  et  $\varphi$  (en degrés) calculés au pic et au palier pour les essais denses saturés

Nom Essai	$p_{conf}$	$q_{pic}$	$p'_{pic}$	$M_{pic}$	$\varphi_{pic}$	$q_{pal}$	$p'_{pal}$	$M_{pal}$	$\varphi_{pal}$
<i>v01Dsat_s250u200r1</i>	50	108	86	1,26	27,5	92	81	1,14	25,6
<i>v01Dsat_s250u200r2</i>	50	105	85	1,24	27,2	90	80	1,13	25,4
<i>v01Dsat_s250u200r3</i>	50	110	87	1,26	27,5	91	80	1,14	25,6
<i>v01Dsat_s300u200r1</i>	100	210	171	1,24	27,2	172	157	1,10	24,9
<i>v01Dsat_s300u200r2</i>	100	195	165	1,18	26,2	170	157	1,08	24,6
<i>v01Dsat_s300u200r3</i>	100	213	171	1,25	27,3	175	158	1,11	25,1
<i>v01Dsat_s400u200r1</i>	200	413	338	1,22	26,9	338	313	1,08	24,6
<i>v01Dsat_s400u200r2</i>	200	415	338	1,23	27,0	340	314	1,09	24,8
<i>v01Dsat_s400u200r3</i>	200	412	337	1,22	26,9	335	312	1,07	24,4
<i>v01Dsat_s500u200r1</i>	300	665	522	1,27	27,7	510	470	1,09	24,8
<i>v01Dsat_s500u200r2</i>	300	668	523	1,28	27,8	512	471	1,09	24,8
<i>v01Dsat_s500u200r3</i>	300	670	523	1,28	27,8	510	470	1,09	24,8

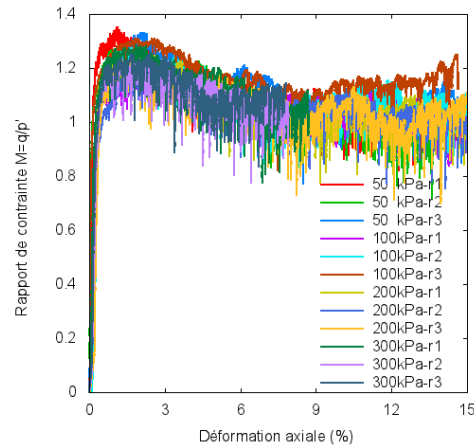
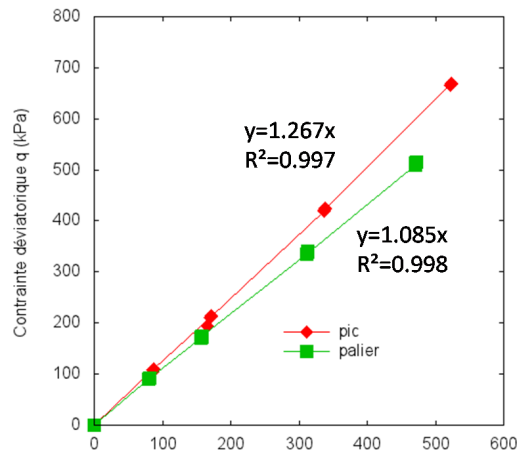
FIGURE 2.15: Évolution du rapport de contrainte  $q/p'$  pour échantillons denses saturés

FIGURE 2.16: Droite de rupture au pic et au palier pour échantillons denses saturés

La Figure 2.16 page 65 présente les droites de rupture linéaire dans le plan  $(q,p')$  au pic et au palier. L'estimation des angles de frottement au pic et au palier confirme les résultats précités.

#### 2.5.2.4 Evaluation des angles de dilatance et d'initiation à la dilatance pour les échantillons moyennement denses saturés

Comme présenté sur la Figure 2.17 page 66, l'angle de dilatance  $\psi$  est calculé à partir de la courbe de déformation volumique en fonction de la déformation axiale, à l'aide de l'expression littérale :

$$\psi = \arcsin\left(\frac{d\varepsilon_v/d\varepsilon_h}{2 + d\varepsilon_v/d\varepsilon_h}\right) \quad (2.4)$$

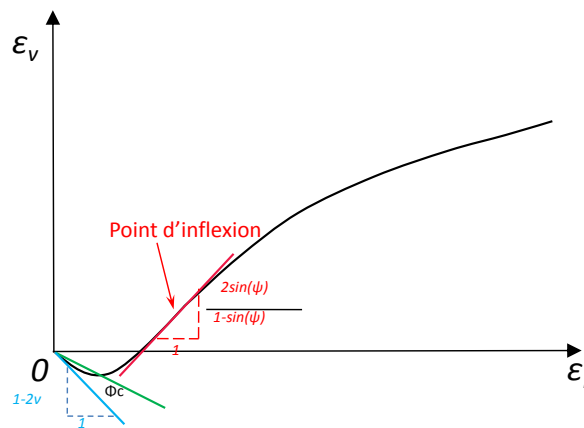


FIGURE 2.17: Détermination expérimentale de l'angle caractéristique et de l'angle de dilatance à partir de la courbe déformation volumique en fonction de la déformation axiale

Il s'agit en fait de l'angle de la droite tangente au point d'inflexion avec l'horizontal.

L'angle caractéristique (ou angle d'initiation à la dilatance)  $\phi_c$  est calculé à partir de la pente de la droite reliant le point  $0$  au point le plus bas de la courbe de déformation volumique, comme indiqué sur la Figure 2.17 page 66 également.

L'ensemble des valeurs obtenues pour ces angles de dilatance et d'initiation à la dilatance sont présentées dans le tableau 2.7 page 67. L'angle de dilatance varie en moyenne de  $9,5^\circ$  à  $13,7^\circ$  alors que l'angle d'initiation à la dilatance varie de  $7,2^\circ$  à  $15,4^\circ$  ; dans le cadre de cette étude expérimentale, il n'est pas observé une influence évidente de la pression effective moyenne sur ces paramètres.

TABLE 2.7: Evaluation des angles de dilatance et d'initiation à la dilatance (en degrés) pour les essais triaxiaux sur échantillons denses saturés

Nom Essai	$p_{conf}(kPa)$	$\phi_c$	$\psi$
<i>v01Dsat_s250u200r1</i>	50	7,16	11,06
<i>v01Dsat_s250u200r2</i>	50	13,11	12,11
<i>v01Dsat_s250u200r3</i>	50	15,43	9,54
<i>v01Dsat_s300u200r1</i>	100	7,95	9,73
<i>v01Dsat_s300u200r2</i>	100	12,33	10,47
<i>v01Dsat_s300u200r3</i>	100	11,19	12,24
<i>v01Dsat_s400u200r1</i>	200	13,12	10,61
<i>v01Dsat_s400u200r2</i>	200	14,42	13,54
<i>v01Dsat_s400u200r3</i>	200	15,13	13,67
<i>v01Dsat_s500u200r1</i>	300	13,45	10,54
<i>v01Dsat_s500u200r2</i>	300	12,68	11,57
<i>v01Dsat_s500u200r3</i>	300	14,23	10,76

### 2.5.3 Comportement des billes de verre moyennement denses saturées : résultats et analyses

#### 2.5.3.1 Influence de la pression effective moyenne

Comme pour les essais réalisés sur les échantillons plus denses, le tableau 2.8 page 67 présente les indices des vides des échantillons moyennement denses saturés obtenus après chaque étape d'essai triaxial. Certains essais n'ont pu être menés à leur terme ce qui n'a donc pas permis la détermination de l'indice des vides en fin d'essai de cisaillement (essais dénommés *v01Lsat\_s250u200r1* et *v01Lsat\_s400u200r3*).

TABLE 2.8: Indice des vides calculés au cours des différentes étapes des essais triaxiaux moyennement denses saturés

Nom Essai	$e_{prep}$	$e_{sat}$	$e_{cons}$	$e_{cis}$
<i>v01Lsat_s250u200r1</i>	0,805	0,636	0,604	X
<i>v01Lsat_s250u200r2</i>	0,805	0,633	0,601	0,651
<i>v01Lsat_s250u200r3</i>	0,805	0,631	0,597	0,651
<i>v01Lsat_s300u200r1</i>	0,805	0,633	0,601	0,652
<i>v01Lsat_s300u200r2</i>	0,805	0,626	0,597	0,648
<i>v01Lsat_s300u200r3</i>	0,805	0,631	0,592	0,647
<i>v01Lsat_s400u200r1</i>	0,805	0,626	0,584	0,652
<i>v01Lsat_s400u200r2</i>	0,805	0,623	0,586	0,647
<i>v01Lsat_s400u200r3</i>	0,805	0,624	0,581	X

La Figure 2.18 page 68 montre l'évolution du déviateur de contrainte sous les trois pressions effectives de confinement testées. On observe que les pics des courbes déviatoriques sont moins marqués que pour les essais avec échantillons plus denses. Le déviateur tend très vite vers la valeur résiduelle. Comme pour les essais précédents,

le phénomène de stick-slip apparaît d'autant plus marqué que la pression effective de confinement augmente.

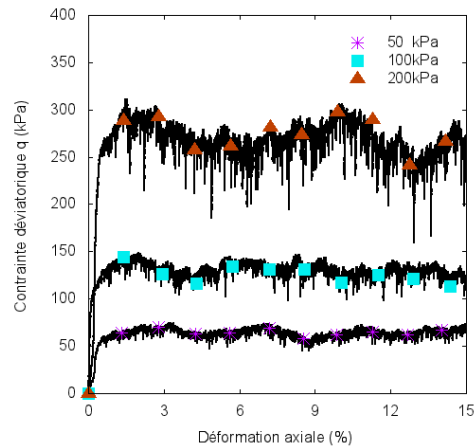


FIGURE 2.18: Courbes déviatoriques pour les essais triaxiaux moyennement denses saturés

La Figure 2.19 page 68 montre l'évolution de la déformation volumique en fonction de la déformation axiale. On constate que les échantillons se dilatent d'autant plus que la pression de confinement est faible. La même tendance a été obtenue pour les essais triaxiaux effectués avec des échantillons denses.

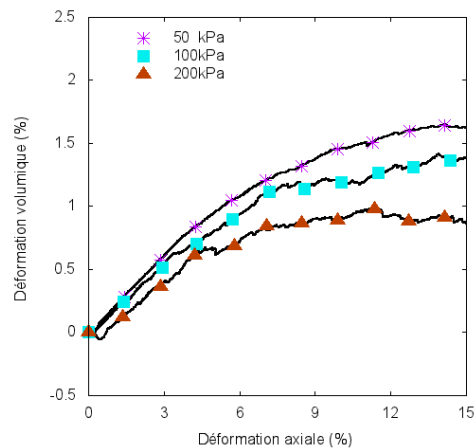


FIGURE 2.19: Courbes volumiques pour les essais triaxiaux moyennement denses saturés

Les Figures 2.20 page 69 et 2.21 page 69 illustrent la répétabilité des essais, tant du point de vue déviatorique que volumique.

La Figure 2.22 page 69 montre l'évolution de l'indice des vides en fonction du logarithme décimal de la pression effective moyenne  $p'$ . Comme pour les essais denses, il semble se dessiner que l'indice des vides obtenus au palier d'écoulement varie linéairement en fonction du logarithme décimal de la pression effective moyenne appliquée.

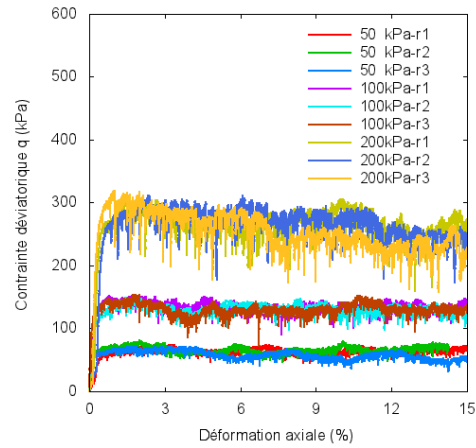


FIGURE 2.20: Courbes déviatoriques pour échantillons moyennement denses saturés : essais de répétabilité

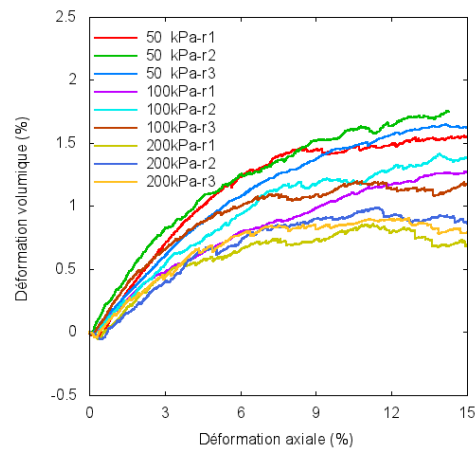


FIGURE 2.21: Courbes volumiques pour échantillons moyennement denses saturés : essais de répétabilité

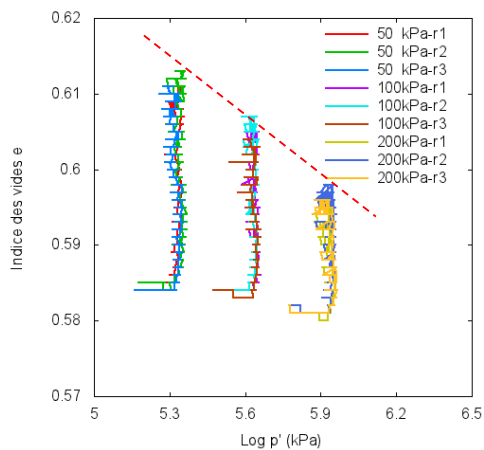


FIGURE 2.22: Évolution de l'indice des vides en fonction de la pression effective moyenne pour les échantillons moyennement denses

### 2.5.3.2 Evaluation des angles de frottement macroscopique pour les échantillons moyennement denses saturés

La Figure 2.23 page 70 présente l'évolution du rapport  $M$  au cours des essais moyennement denses. On évalue une valeur de  $M_{pic}$  de l'ordre de 1, contre 0,98 - 0,99 pour  $M_{palier}$ , comme présenté dans le tableau 2.9 page 71. Les droites de rupture au pic et au palier sont très voisines, comme explicité sur la Figure 2.24 page 70 : cela induit des angles de frottement au pic et au palier quasiment identiques et de l'ordre de  $23^\circ$ .

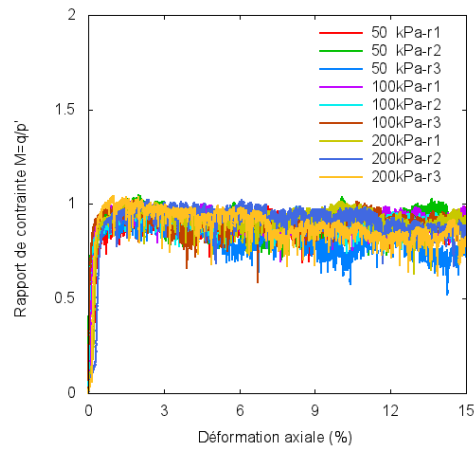


FIGURE 2.23: Évolution du rapport de contrainte  $q/p'$  pour échantillons moy. denses

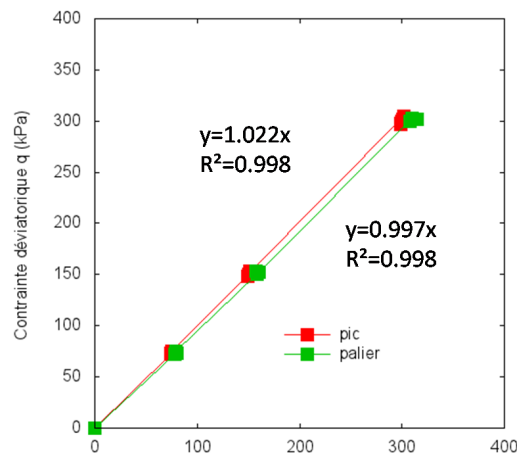


FIGURE 2.24: Droite de rupture au pic et au palier pour échantillons moyennement denses

### 2.5.3.3 Evaluation des angles de dilatance et d'initiation à la dilatance pour les échantillons moyennement denses saturés

Sur la même base que pour les essais denses, les angles de dilatance et d'initiation à la dilatance sont calculés et présentés dans le tableau 2.10 page 71. Une certaine



TABLE 2.9: Valeurs expérimentales caractéristiques du triplet  $(q, p, M)$  et  $\varphi$  (en degrés) calculés au pic et au palier pour les essais moyennement denses saturés

Nom Essai	$p_{conf}$	$q_{pic}$	$p'_{pic}$	$M_{pic}$	$\varphi_{pic}$	$q_{pal}$	$p'_{pal}$	$M_{pal}$	$\varphi_{pal}$
<i>v01Lsat_s250u200r1</i>	50	72	74	0,97	22,7	70	73	0,96	22,5
<i>v01Lsat_s250u200r2</i>	50	73	74	0,99	23,0	72	74	0,97	22,7
<i>v01Lsat_s250u200r3</i>	50	75	75	1,00	23,2	74	75	0,99	23,0
<i>v01Lsat_s300u200r1</i>	100	150	150	1,00	23,2	148	149	0,99	23,0
<i>v01Lsat_s300u200r2</i>	100	148	149	0,99	23,0	145	148	0,98	22,8
<i>v01Lsat_s300u200r3</i>	100	152	151	1,02	23,4	150	150	1,00	23,2
<i>v01Lsat_s400u200r1</i>	200	298	299	1,00	23,2	295	298	0,99	23,0
<i>v01Lsat_s400u200r2</i>	200	297	299	0,99	23,0	295	298	0,99	23,0
<i>v01Lsat_s400u200r3</i>	200	300	300	1,00	23,2	298	299	1,00	23,2

TABLE 2.10: Evaluation des angles de dilatance et d'initiation à la dilatance (en degrés) pour les essais triaxiaux sur échantillons moyennement denses saturés

Nom Essai	$p_{conf}(kPa)$	$\phi_c$	$\psi$
<i>v01Lsat_s250u200r1</i>	50	5,61	6,87
<i>v01Lsat_s250u200r2</i>	50	13,19	11,75
<i>v01Lsat_s250u200r3</i>	50	8,75	9,23
<i>v01Lsat_s300u200r1</i>	100	8,29	9,75
<i>v01Lsat_s300u200r2</i>	100	10,33	8,26
<i>v01Lsat_s300u200r3</i>	100	9,17	9,36
<i>v01Lsat_s400u200r1</i>	200	10,13	10,29
<i>v01Lsat_s400u200r2</i>	200	9,27	9,35
<i>v01Lsat_s400u200r3</i>	200	8,13	9,88

dispersion expérimentale est à relever pour un même essai réalisé trois fois. Comme pour les essais plus denses, l'influence de la pression effective n'est pas observée : l'angle de dilatance varie en moyenne de 5,6 ° à 13,2° alors que l'angle d'initiation à la dilatance varie de 6,9° à 11,8°.

#### 2.5.4 Comparaison des résultats sur échantillons denses et moyennement denses

Dans cette section, nous allons comparer les courbes de contrainte déviatorique et de déformation volumique pour les échantillons dense et moyennement dense. Nous avons pris l'exemple d'une pression effective de confinement de 100kPa.

Sur la Figure 2.25 page 72, il est observé logiquement que le pic du déviateur de l'échantillon dense est plus important que l'échantillon moyennement dense. A l'état critique, la contrainte déviatorique résiduelle de l'échantillon dense est plus élevée que l'échantillon moyennement dense ; les deux valeurs sont toutefois assez proches.

Sur la Figure 2.26 page 72 présentant l'évolution de la déformation volumique en fonction de la déformation axiale, on observe très distinctement l'influence de l'état de

compacité sur le phénomène de dilatance, la dilatance de l'échantillon étant plus importante que l'échantillon moyennement dense. Il apparaît également une phase de contractance initiale plus prononcée pour l'échantillon dense.

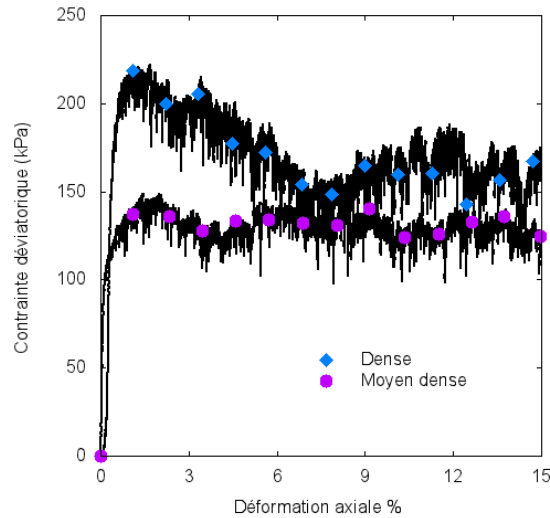


FIGURE 2.25: Comparaison de l'évolution de la contrainte déviatorique pour les échantillons denses et moyennement denses (cas  $p' = 100kPa$ )

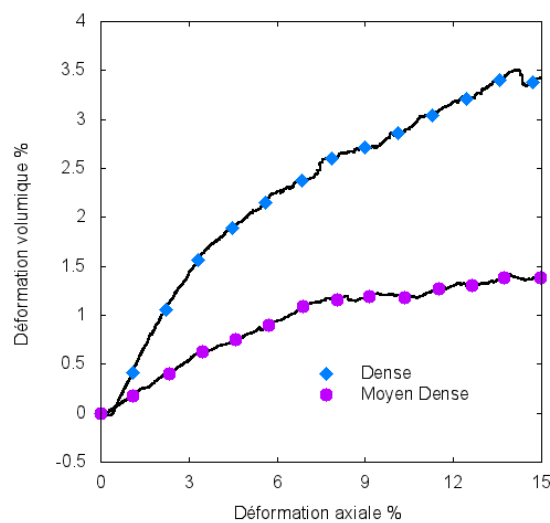


FIGURE 2.26: Comparaison de l'évolution de la déformation volumique pour les échantillons denses et moyennement denses (cas  $p' = 100kPa$ )

### 2.5.5 Comparaison des résultats entre les états sec et saturé

Cette section présente une comparaison des résultats obtenus pour les échantillons dans un état sec et saturé. Cette comparaison servira pour l'étude de simulation DEM présentée dans le chapitre suivant. En effet, puisque dans notre modèle de simulation DEM, l'intervention de l'eau n'est pas prise en compte, nous ne pouvons

pas simuler l'essai triaxial avec les échantillons saturés. Par contre, expérimentalement, la déformation volumique de l'échantillon est mesurée par le changement de volume d'eau dans l'échantillon au cours de l'essai. Du coup, la saturation est nécessaire pour avoir la courbe de déformation volumique (la déformation volumique de l'échantillon numérique est calculée par la déformation de forme de l'échantillon qui n'a pas de relation avec l'eau). En conséquence, si on veut comparer les résultats expérimentaux avec les résultats numériques, il convient d'avoir une idée de l'influence de l'eau sur les résultats.

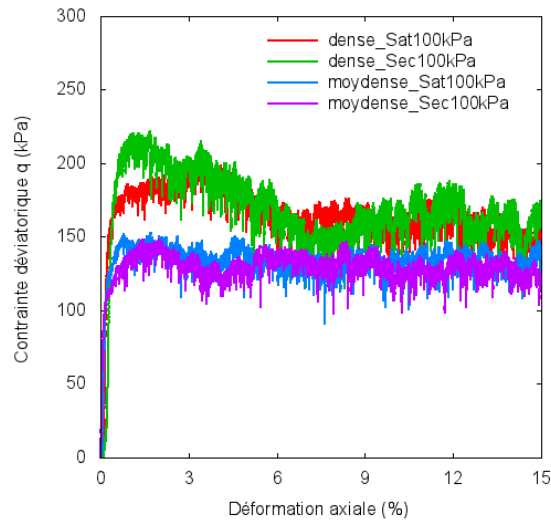


FIGURE 2.27: Évolution du déviateur  $q$  : comparaisons états dense / moyennement dense - États sec / saturé

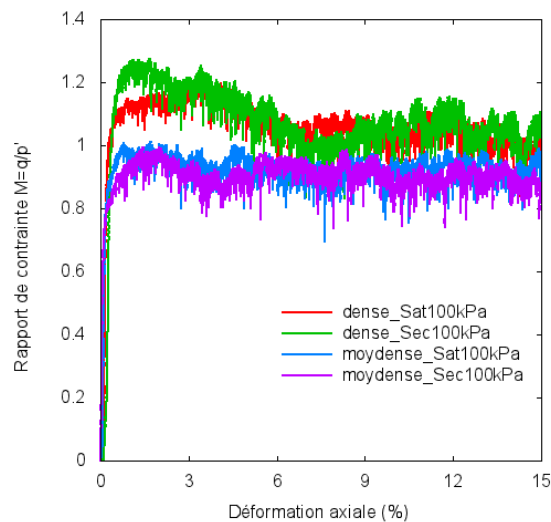


FIGURE 2.28: Rapport de contrainte  $q/p'$  : comparaisons états dense / moyennement dense - États sec et saturé

Sur les Figures 2.27 page 73 et 2.28 page 73, la comparaison des réponses dévia-

toriques et des évolutions du rapport de contrainte entre les états sec et saturé pour des échantillons dense et moyennement dense sous pression de confinement de 100kPa sont présentés. Les comparaisons sous les autres pressions de confinement (50kPa et 200kPa) ont également été effectuées et ont conduit aux mêmes conclusions, elles ne sont donc pas présentées.

La Figure 2.27 page 73 montre la similitude des réponses déviatoriques à état de compacité fixé. Il en va de même pour l'évolution du rapport de contraintes, présenté sur la Figure 2.28 page 73.

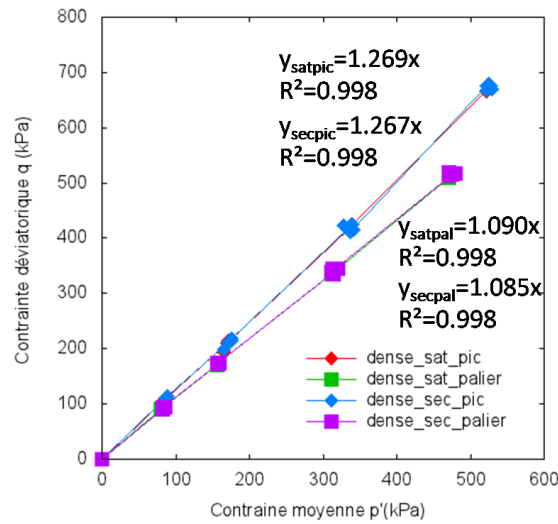


FIGURE 2.29: Droites de rupture : comparaisons états sec/ saturé pour échantillons denses

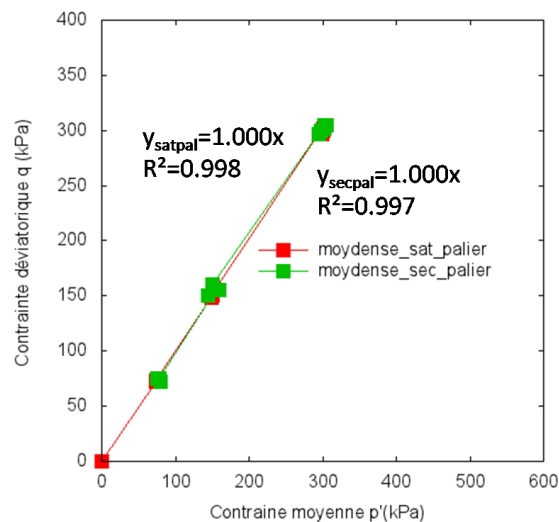


FIGURE 2.30: Droites de rupture : comparaisons états sec/saturé pour échantillons moyennement denses

Concernant les angles de frottements au pic et au palier, les Figures 2.29 page 74 et

2.30 page 74 montrent la quasi-superposition des droites de rupture à état de compacité fixé.

On peut donc conclure que l'eau n'a pas d'influence sur la réponse mécanique au cisaillement des billes de verres de 4mm. Il faut insister ici sur le fait que l'échantillon contenant de l'eau est complètement saturé et donc exempt de ménisques. La présence d'eau n'apporte donc, dans ce cas, aucune cohésion au matériau.

Par la suite, les simulations numériques réalisées sur un matériau sec pourront être comparées aux essais expérimentaux en conditions saturées.

### 2.5.6 Influence de la texture

La rugosité de surface des particules est un facteur qui influence beaucoup les forces tangentielles entre les particules. Dans cette section, les résultats des tests sur échantillons préparés avec des billes traitées en surface avec du téflon sont présentés. Ce traitement permet de diminuer le coefficient de frottement de la surface des particules ; à noter que ce traitement est seulement réalisé sur les billes de verre (non sur la membrane).

Les échantillons sont préparés de la même façon que les échantillons denses (mêmes dimensions d'échantillon, mêmes masses de billes, même mode opératoire). Par contre, la réduction du coefficient de frottement des billes traitées devrait conduire à une compacité plus élevée. Dans les préparations d'échantillons, on sent bien que ces billes sont moins tassées que les billes brutes. Donc on ne peut peut-être pas considérer que les deux échantillons soient rigoureusement préparés dans les mêmes conditions (c'est peut-être plutôt le rapport  $C/C_{max}$  qui devrait être prise en compte pour évaluer l'état de compaction initiale de l'échantillon : dense ou moyennement dense).

Les essais sont réalisés sous trois différentes pressions de confinement : 50kPa, 100kPa, 200kPa.

La Figure 2.31 page 76 montre une comparaison de la courbe déviatorique pour les échantillons préparés avec des billes traitées et non traitées sous pressions de confinement 50kPa, 100kPa, et 200kPa. La courbe déviatorique de l'échantillon traité par téflon n'atteint pas le même niveau de contrainte par rapport à la courbe obtenue pour des billes non traitées ; le déviateur augmente et tend vers une valeur asymptotique sans passer par un pic évident. Sachant que les indices des vides initiaux pour tous les échantillons sont presque les mêmes, la différence vient uniquement de la texture des billes. D'autre part, l'allure de la courbe pour les billes traitées ressemble plus à celles obtenues pour les échantillons moyennement denses, mais la différence essentielle est que l'amplitude des stick-slips est beaucoup moins importante que pour les essais moyennement denses sur billes non traitées.

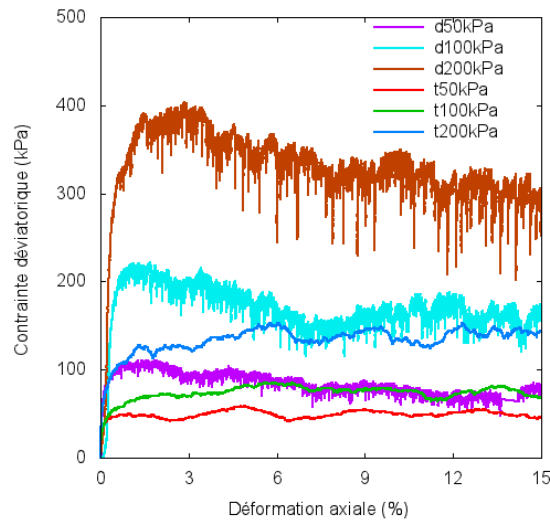


FIGURE 2.31: Comparaisons de l'évolution du déviateur  $q$  pour échantillons avec modification de texture

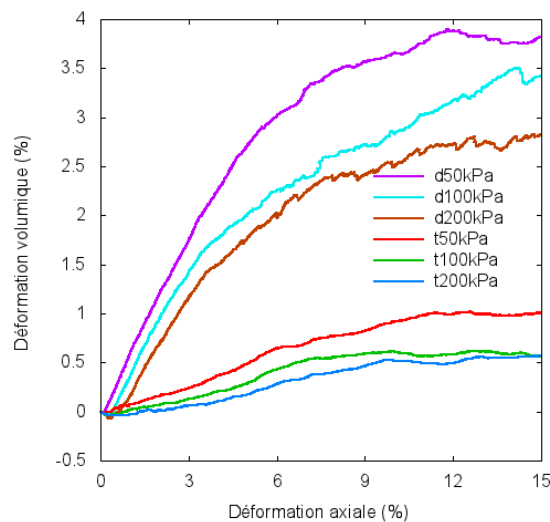


FIGURE 2.32: Comparaisons de l'évolution de la déformation volumique avec modification de texture

La Figure 2.32 page 76 présente les courbes volumiques, marquant une différence significative dans la dilatance des échantillons, cette dilatance apparaissant plus intense pour les essais sur billes non traitées.

Concernant les angles de frottement, il apparaît clairement l'influence de la modification de texture des billes (droite de rupture moins pentue dans le plan  $(q/p')$  comme présentée sur la Figure 2.33 page 77) : l'angle de frottement passe sous la barre des  $20^\circ$ , de l'ordre de  $17^\circ$  au pic et de  $16^\circ$  au palier (Tableau 2.11 page 77).

TABLE 2.11: Valeurs expérimentales caractéristiques du triplet  $(q, p, M)$  et  $\varphi$  (en degrés) calculés au pic et au palier pour les essais denses saturés avec modification de texture

Nom Essai	$p_{conf}$	$q_{pic}$	$p'_{pic}$	$M_{pic}$	$\varphi_{pic}$	$q_{pal}$	$p'_{pal}$	$M_{pal}$	$\varphi_{pal}$
<i>v01Tsat_s250u200r1</i>	50	62	71	0,86	20,6	52	67	0,8	18,4
<i>v01Tsat_s300u200r2</i>	100	83	127	0,63	15,9	76	125	0,6	15,3
<i>v01Tsat_s400u200r3</i>	200	149	252	0,61	15,3	142	247	0,6	14,6

TABLE 2.12: Evaluation des angles de dilatance et d'initiation à la dilatance (en degrés) pour les essais triaxiaux sur échantillons denses saturés avec modification de texture

Nom Essai	$p_{conf}(kPa)$	$\phi_c$	$\psi$
<i>v01Tsat_s250u200r1</i>	50	11,76	8,23
<i>v01Tsat_s250u200r2</i>	100	9,72	7,56
<i>v01Tsat_s250u200r3</i>	200	10,15	7,11

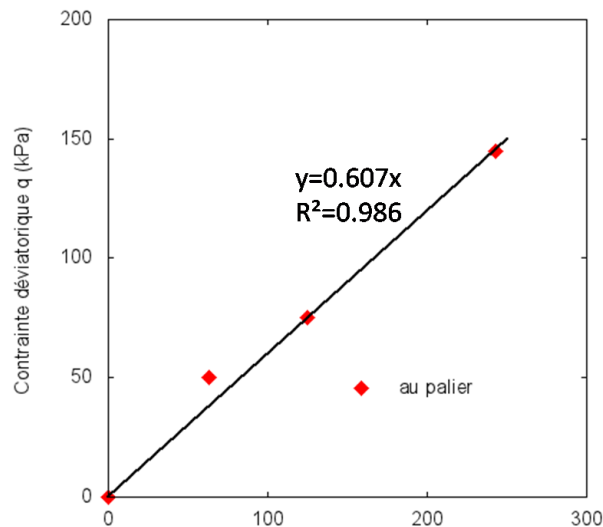


FIGURE 2.33: Droite de rupture pour échantillons avec modification de texture

Concernant les angles de dilatance et d'initiation à la dilatance (Tableau 2.12 page 77), les valeurs obtenues apparaissent plus faibles que celles obtenues pour les échantillons denses saturés, marquant l'influence de la modification de texture.

## 2.6 Conclusions de l'étude expérimentale au triaxial sur mélanges homogènes de billes de verre 4mm

Dans ce chapitre, nous avons étudié le comportement mécanique au triaxial de cisaillement de billes de verres monodisperses de diamètre de 4mm.

A travers les différentes études d'influence retenue (vitesse, compacité, état hydrique, texture), l'ensemble des tests effectués permet d'apporter les conclusions spécifiques suivantes :

- la vitesse de cisaillement (dans la gamme des vitesses retenues à l'étude ; conditions quasi-statiques) ne modifie pas en soit la réponse mécanique globale du milieu granulaire ; l'augmentation de la vitesse semble cependant avoir un effet sur l'amplitude du phénomène de stick-slip ;
- le comportement mécanique global suivant différents états de compacités est similaire au cas classique des matériaux granulaires initialement denses et moyennement denses soumis aux mêmes sollicitations triaxiales : phase de contractance initiale suivie d'une dilatance d'autant plus prononcée que la pression moyenne effective est faible ;
- l'état hydrique (sec/saturé) des échantillons n'a pas d'influence notable sur le comportement mécanique en cisaillement des billes de verre ainsi que sur l'angle de frottement macroscopique ;
- la modification de la texture de surface des billes a une influence significative sur le comportement mécanique ainsi que sur l'angle de frottement macroscopique. Il est notable de relever que le phénomène de stick-slip se voit atténuer par le traitement de surface des billes.

Les résultats expérimentaux obtenus dans ce chapitre relativement aux observations visuelles de la déformation de l'échantillon au cours de la phase de cisaillement des divers essais renseignent sur la validité de la condition limite cylindrique appliquée dans la modélisation de l'essai triaxial par la méthode DEM.

L'ensemble des résultats expérimentaux précités doit concourir à la validation des hypothèses et du modèle numérique développé dans le cadre de la modélisation de l'essai triaxial par la méthode DEM.



# 3

## **Modélisation des milieux granulaires monodisperse par la DEM**

### 3.1 Démarche et objectifs de l'étude

**L**A méthode des éléments discrets (DEM, Discrete Element Method) premièrement proposé par Cundall et Strack [43][45][44][46][123] dans les années 70 est une approche numérique de plus en plus utilisée dans le domaine de la géotechnique et du génie civil pour étudier le comportement mécanique des matériaux granulaires. La particularité de cette approche est de prendre en compte chaque particule du milieu modélisé ainsi que les interactions entre celles-ci, permettant ainsi de relier directement le comportement macroscopique d'un ensemble de grains avec ce qui se passe localement à l'échelle des contacts entre les grains. Cela diffère de l'approche des milieux continus (comme la méthode des éléments finis), où les mouvements relatifs et les rotations des particules ne sont pas pris en compte explicitement [37]. La méthode des éléments discrets propose une approche complémentaire par rapport à une démarche expérimentale ou une approche continue. Dans une simulation DEM, le système numérique est constitué par de nombreuses particules discrètes. Les contacts se créent et se perdent lorsque les particules se réarrangent. L'approche discrète permet donc de suivre les itinéraires de toutes les particules. Par ce suivi des particules, la DEM est une méthode qui permet de résoudre plus facilement les problèmes en grande déformation.

Nous avons déjà étudié le comportement mécanique des milieux granulaires lors du cisaillement de billes de verre en utilisant l'essai triaxial dans le chapitre 2. Dans cette partie, l'objectif est de simuler l'essai triaxial avec la méthode des éléments discrets. Nous nous intéressons ici à l'étude des empilements de billes monodisperses. Les objectifs visés sont les suivants :

- Développer une procédure complète de simulation de l'essai triaxial
- Comparer le comportement d'un empilement monodisperse cisailé avec les résultats expérimentaux obtenus au chapitre précédent
- Étudier la liaison entre les paramètres micromécaniques des particules et le comportement macroscopique de l'échantillon

Pour atteindre ces objectifs, la DEM sera tout d'abord présentée pour que le lecteur comprenne le principe de cette méthode numérique. Ensuite, afin d'étudier les milieux granulaires sous-cisaillement, une méthode de contrôle de la condition limite cylindrique rigide pour modéliser l'essai triaxial de révolution sera exposée. Le mode opératoire appliqué pour simuler toutes les procédures de l'essai triaxial sera détaillé. Dans la partie de l'analyse des résultats, nous allons étudier les influences de différents paramètres liés à notre modèle. Les résultats de simulation obtenus en respectant les paramètres naturels des billes de verre seront comparés avec les résultats expérimentaux obtenus dans le chapitre précédent. A la fin de ce chapitre, deux méthodes pour calculer le tenseur de contraintes moyen dans l'empilement et la contrainte locale des particules seront détaillées montrant ainsi les avantages de la

modélisation DEM qui permet d'étudier l'échantillon numérique non seulement d'un point de vue macroscopique (comportement d'ensemble de l'empilement), mais aussi d'un point de vue microscopique en donnant des informations à l'échelle des grains.

## 3.2 Méthode des éléments discrets (DEM)

### 3.2.1 Présentation du code demGCE et travaux de développement effectué

Le code aux éléments discrets DemGCE utilisé dans le cadre de ce travail de recherche a été développé initialement par S. Rémond [124] au laboratoire de Mécanique et Matériaux du Génie Civil de l'Université de Cergy-Pontoise. Ce code est basé sur la méthode des éléments discrets (DEM) et permet de modéliser des problèmes granulaires en 3D (les grains sont ici assimilés à des sphères). Certaines parties du code ont été inspirées par des fonctions de CEMHYD3D, code développé au NIST dédié à l'étude de la microstructure et l'hydratation du ciment, pour faire de la génération aléatoire d'empilements granulaires puis introduction de la DEM. Le code DEM a ensuite été étudié et développé dans les travaux de thèse de A. Kimbonguila [82] sur la modélisation de l'agglomération de particules fines en suspension. Ensuite, une amélioration des lois de contact a été réalisée sur l'amélioration de la force tangentielle et la prise en compte de la résistance au roulement et validé sur des tests d'écoulement de billes dans des configurations de décharge en silo et formation d'écoulement [125]. Un travail de mise en commun via une gestion des sources du code a aussi été fait via un système de gestion de versions. Le code est actuellement également utilisé dans le cadre d'une thèse sur l'étude de l'interface entre un milieu granulaire et une paroi rugueuse [126].

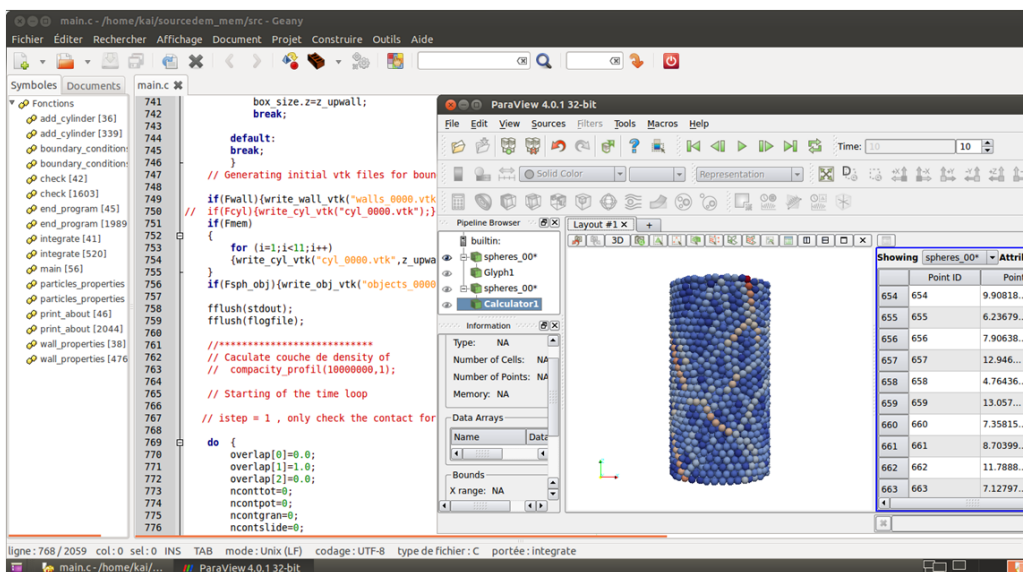


FIGURE 3.1: Environnement de travail numérique

Dans le cadre de ce travail de thèse, je suis intervenu en particulier sur l'implémentation d'une procédure permettant de simuler l'essai triaxial de révolution avec en particulier la mise en place des étapes de : préparation de l'empilement numérique à différentes compacités, contrôle de la pression exercée sur l'empilement lors de la mise en confinement de l'empilement, cisaillement sous pression de confinement contrôlée. En parallèle, j'ai implémenté deux méthodes pour calculer le tenseur des contraintes ainsi que des fonctions de post-traitement (dont visualisation sous paraview) [127][128].

La Figure 3.1 page 81 illustre l'environnement de travail avec un exemple de visualisation sous paraview et d'édition de sources du programme (code développé en langage C, travail sous environnement linux).

### 3.2.2 Présentation générale de la DEM

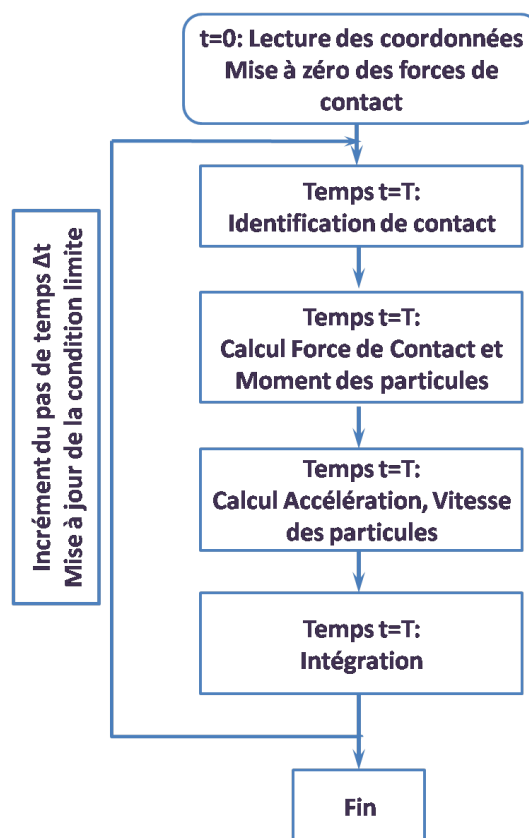


FIGURE 3.2: Schémat du cycle de calcul DEM

Le calcul de la simulation est réalisé de manière cyclique. Une vue d'ensemble du cycle de calcul de la DEM est montrée dans la Figure 3.2 page 82. Au début de chaque boucle de calcul (en temps), les positions des grains sont déjà connues grâce soit à la mise à jour des positions des particules du pas de temps précédent, soit pour  $t = 0$  par une importation du fichier de coordonnées qui constitue donc une donnée d'entrée. La boucle temporelle commence par une initialisation des forces à zéro exercées sur chaque

particule puis par une étape de détection des contacts entre les particules. Cette mise à jour de la liste des particules en contact permet de calculer les forces de contact totales et les moments exercés sur chaque grain. A partir des forces et des moments exercés sur chaque particule, la seconde loi de Newton peut être utilisée pour calculer les accélérations linéaire et angulaire. Par intégration, les vitesses linéaire et angulaire de chaque particule et enfin les déplacements à l'incrément de temps courant peuvent être déterminés. Le détail de chacune des étapes est présenté dans les sous chapitres ci-après.

Plusieurs hypothèses et règles doivent être appliquées lors d'un calcul DEM [21] :

- Les particules sont rigides et indéformables, mais l'interpénétration entre les particules est permise au niveau du contact. La valeur de cette interpénétration (aussi appelée indentation ou recouvrement dans la littérature) est directement utilisé pour calculer les actions de contact.
- A chaque pas de temps, la liste des particules en contact doit être mise à jour.
- Chaque contact concerne uniquement deux particules. Si une particule rentre en contact avec deux ou plusieurs particules lors du pas de temps instantané, le calcul des forces est effectué pour chacun des contacts, puis les forces sont additionnées afin de calculer la force totale exercée.
- Le pas de temps choisi doit être suffisamment petit par rapport au temps de collision afin d'assurer que la particule interagit seulement avec les particules en contact avec elle.

### 3.2.3 Identification du contact

L'algorithme de détermination des contacts est une partie très importante d'un code DEM. Il influence directement le temps de calcul [129]. Dans un système constitué de  $N$  grains, si chaque particule doit être comparée à tous les autres grains du système,  $N(N-1)/2$  comparaisons sont nécessaires pour déterminer les contacts. Donc, l'objectif de l'algorithme de détermination des contacts est d'optimiser le temps de calculs.

Plusieurs algorithmes de détection des contacts existent pour accélérer les temps de calcul dans les méthodes DEM. Pour identifier la liste de contacts voisins, Poschel et Schwager [129] citent par exemple la liste de Verlet où une distance de Verlet permet de minimiser le nombre de particules potentielles en contact pour une particule donnée. Les particules potentielles sont mise à jour après un certain nombre d'itérations. A chaque pas de temps, la recherche des contacts se fait dans la liste des contacts potentiels.

L'utilisation de sous-domaines permet également de déterminer le voisinage de chaque grain. Tout l'espace est divisé en cellules cubiques. La taille de ces cellules est assez grande pour contenir la particule la plus grande, et elle ne change pas tout au long de calcul. Par contre, si les échelles de différentes tailles de grains sont trop importantes, on obtiendra beaucoup plus de petits grains dans une cellule, ce qui

nécessitera également un temps de calcul important. Cette méthode est celle qui a été retenue dans le code *demGCE* utilisé dans ce travail. La Figure 3.3 page 84 illustre le principe et le lecteur pourra se référer à [82][130][129][124][131][132] pour plus de détails. A noter qu'une extension de cette méthode existe pour des sous domaine de taille variable permettant d'optimiser la taille de cellule en fonction de la taille de la particule [133].

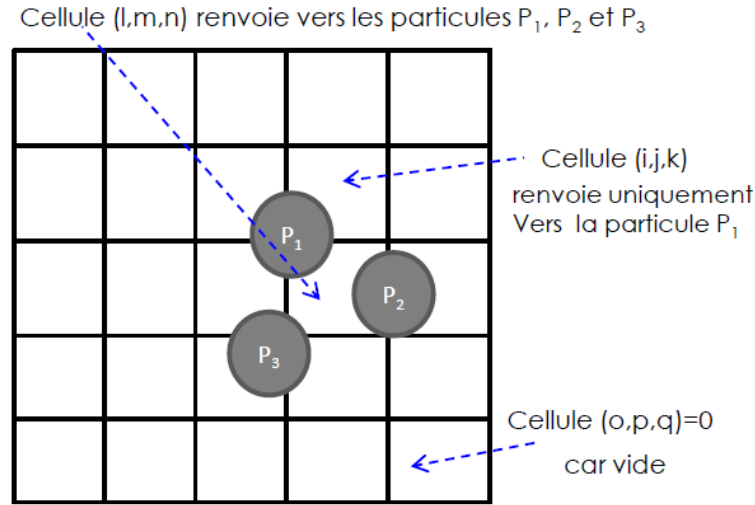


FIGURE 3.3: Illustration de la procédure de détection de contacts potentiels et effectifs pour le calcul des interactions dans le code *demGCE* où P1, P2, P3 sont les identités des particules [82]

A partir de cette liste potentielle, pour chaque paire de particules une vérification du contact est effectuée en calculant l'interpénétration par :

$$\xi_n = r_i + r_j - \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2 + (z_i - z_j)^2} \quad (3.1)$$

où  $r_1, r_2$  sont rayons des particules (sphères) en contact et  $(x_1, y_1, z_1)$  et  $(x_2, y_2, z_2)$  sont les coordonnées des centres de particules. Ainsi, les particules sont en contact si  $\xi_n \leq 0$ . Cette interpénétration est ensuite directement utilisée pour calculer la force normale.

### 3.2.4 Lois de contact

Les lois de contact utilisées dans le cadre de cette thèse ont été implémentées dans le code *demGCE* et validées sur des tests d'écoulement de billes dans les configurations de décharge de silo et formation d'empilement[125]. La force de contact se décompose en une composante normale  $\vec{F}_n$  (portée par la normale au contact  $n_{ij}$  et une composante tangentielle  $\vec{F}_t$  comme dans la Figure 3.4 page 85. Un repère local au niveau du grain est introduit pour calculer le moment appliqué autour du point de contact. Le détail des forces prises en compte est présenté dans les paragraphes suivants.

### 3.2.4.1 Force normale

Deux types de lois de contact sont souvent utilisées dans les simulations pour le calcul de la force normale : le modèle ressort amortisseur, ou le modèle de Hertz-Mindlin. C'est ce dernier qui a été utilisé dans notre travail, Figure 3.4 page 85 (a).

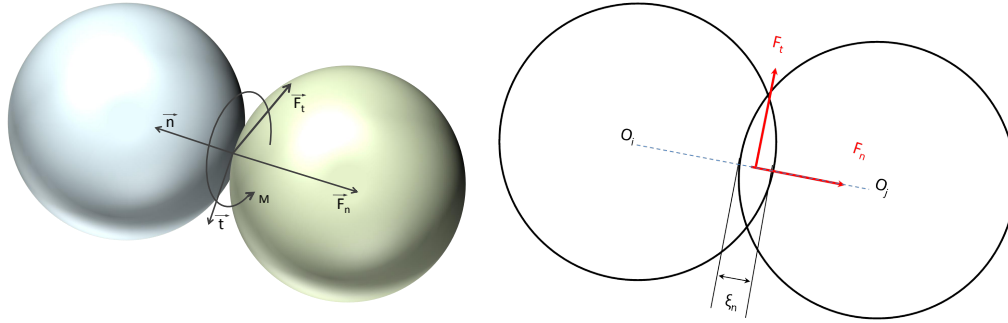


FIGURE 3.4: Schéma de l'interaction entre deux particules en 3D et une coupe en 2D

Dans le modèle utilisé ici, la force normale est composée par une partie élastique (Hertz modèle) et une partie visqueuse (Poschel et Schwager model) [129].

$$F_{n,ij} = -\left(\frac{4}{3}E\sqrt{R}\xi_n^{\frac{3}{2}} + \gamma_n E\sqrt{R}\sqrt{\xi_n}\dot{\xi}_n\right)n_{ij} \quad (3.2)$$

$$\frac{1}{E} = \frac{1 - \nu_i^2}{E_i} + \frac{1 - \nu_j^2}{E_j} \quad (3.3)$$

Où  $\xi_n$  est le recouvrement entre deux particules en contact ;  $\gamma_n$  est le coefficient d'amortissement (section 3.3.2, section 4.1) ;  $\sqrt{R} = RiRj/(Ri + Rj)$  , le rayon effectif de la particule ;  $E$  est le module de Young effectif,  $E_i$  et  $E_j$  sont les modules de Young des particules en contact et  $n_{ij}$  est le vecteur normal unitaire.

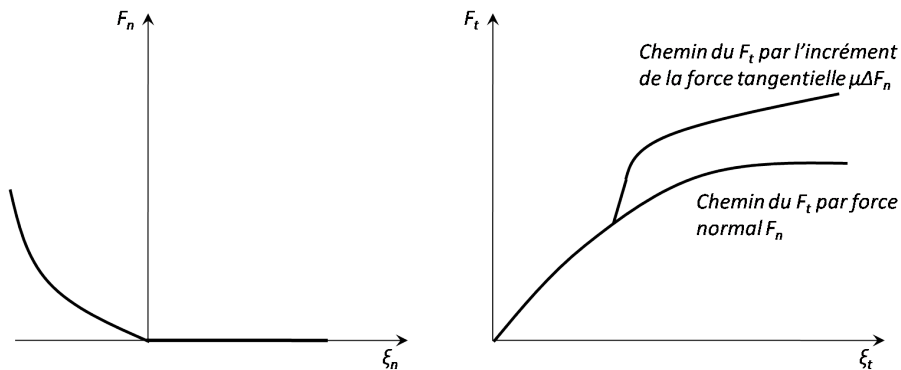


FIGURE 3.5: Schéma d'illustration des lois de contact : (a) Force normale ; (b) Force tangentielle [21]

### 3.2.4.2 Force tangentielle

La force tangentielle est composée ici de deux parties permettant de prendre en compte au niveau du contact le collage (sticking) qui précède le glissement total (gross sliding).

Ainsi, au début du mouvement tangential relatif entre deux particules, le modèle de Mindlin est utilisé afin de prendre en compte les micro-glissements. La force tangentielle est alors calculée de façon incrémentale, Figure 3.4 page 85(b) :

$$\Delta \vec{F}_{t,stick} = -8G\sqrt{R_{ij}\xi_n}\vec{v}_{trel}\Delta t \quad (3.4)$$

Le module de cisaillement est calculé par la formule suivante :

$$G = 4\left(\frac{(2 - \nu_i)(1 + \nu_i)}{E_i} + \frac{(2 - \nu_j)(1 + \nu_j)}{E_j}\right)^{-1} \quad (3.5)$$

Où  $\nu_i, \nu_j$  et  $E_i, E_j$  sont respectivement coefficient de poisson et module de Young de la particule.  $R_{ij}$  est le rayon effective de la particule.  $\vec{v}_{trel}$  est le déplacement tangential relatif entre les deux particules en contact au pas de temps courant.

La force tangentielle est limitée par la loi de Coulomb (glissement totale), valeur qui dépend aussi de l'effort normal suivant la formule :

$$F_t \leq \mu_s F_n \quad (3.6)$$

Où  $\mu_s$  est le coefficient de frottement,  $F_n$  est la force normale.

Notre modèle nous permet de prendre en compte l'éventuel pivotement des particules au point de contact. En cas de rotation des particules entre un pas de temps, une opération de rotation correspondante est aussi appliquée à  $\vec{F}_{t,stick}(t - \Delta t)$  [54][58]

Enfin, cette force tangentielle  $\vec{F}_{t,stick}$  [54] est utilisée pour calculer les moments exercés autour du point de contact intervenant ainsi dans les équations du moment.

### 3.2.4.3 Résistance au roulement

De nombreux travaux basés sur les simulations DEM sont développés à base de disques en 2D ou de sphères en 3D en vue en particulier de faciliter la détection des contacts. Par conséquent, les contacts entre nos grains sont ponctuels, et les surfaces n'induisent pas de résistances au roulement. En revanche, les grains dans la réalité ont des formes plus complexes. Les surfaces angulaires et rugueuses des grains peuvent entraîner les blocages en fonction des réarrangements des particules entre elles. Pour modéliser ce phénomène, le calcul de la résistance au roulement est introduit dans le code par l'utilisation d'un modèle de moment résistant directionnel s'opposant au mouvement de rotation classiquement utilisée de Zhou et al. [134] en 2D ou en 3D[135], adapté de celui de Beer et Johnson [136]. Le moment résistant  $T_{ij}$  est calculé par la formule suivante .



$$T_{ij} = -\mu_{rol} \times F_{n,ij} \times R_{ij} \times \left( \frac{w_i - w_j}{|w_i - w_j|} \right) \quad (3.7)$$

Où  $\mu_{rol}$  est le coefficient de résistance de «roulement»,  $F_{n,ij}$  est la force normale,  $R_{ij}$  est le rayon effectif,  $w_i$  et  $w_j$  sont les vitesses angulaires des particules,  $i$  et  $j$  sont les deux dénominations des grains en contact.

#### 3.2.4.4 Intégration du mouvement des particules

Une fois tous les contacts passés en revue, les sommes des forces  $F_i$  et des moments  $M_i$  extérieurs exercés sur chacune des particules sont calculées, ce qui permet d'appliquer le principe fondamental de la dynamique :

$$\ddot{x}_t = \frac{F_i}{m_i} \quad (3.8)$$

$$\ddot{w}_t = \frac{M_i}{I} \quad (3.9)$$

où la masse  $m_i$  et le moment d'inertie  $I_i$  sont respectivement liés aux accélérations de translation  $\ddot{x}_t$  et de vitesse de rotation  $\ddot{w}_t$  du centre de gravité de la particule  $i$ . Après le calcul de la force, on a besoin de suivre un schéma d'intégration semi-implicite d'Euler (ou Euler-Cromer) [21] pour déterminer la position des particules :

La position des particules est déterminée à l'intervalle de temps  $\Delta t$  par :

$$\dot{x}_{i,t+\Delta t} = \dot{x}_{i,t} + \ddot{x}_{i,t} \times \Delta t \quad (3.10)$$

$$\dot{w}_{i,t+\Delta t} = \dot{w}_{i,t} + \ddot{w}_{i,t} \times \Delta t \quad (3.11)$$

Puis les nouvelles positions à  $t + \Delta t$

$$x_{i,t+\Delta t} = x_{i,t} + \dot{x}_{i,t} \times \Delta t \quad (3.12)$$

$$w_{i,t+\Delta t} = w_{i,t} + \dot{w}_{i,t} \times \Delta t \quad (3.13)$$

Pour la stabilité des calculs, le pas de temps doit être choisi suffisamment petit de façon à ce que le mouvement d'une particule à un pas de temps donné n'influence que les particules immédiatement voisines. Le pas de temps critique peut être donné normalement par la formule suivant :

$$\Delta t = K_{stab} \sqrt{\frac{m}{k_n}} \quad (3.14)$$

Où  $m$  est la masse de la particule,  $K_{stab}$  est un coefficient de stabilité (ordre de grandeur de 0.01),  $k_n$  est la raideur au contact. Cette formule provient de la détermination du pas de temps critique. Selon Thornton [137] [138], si le pas de temps est trop grand, le calcul de la simulation n'est pas stable, en revanche, si le pas de

temps est très petit, les calculs seront trop long. Dans le cas d'une loi de contact de type Hertz-mindlin, les raideurs  $K_n$  ne sont pas les mêmes pour chacun des contacts. Il faudrait en toute rigueur calculer régulièrement lors du calcul la plus petite raideur afin d'optimiser la valeur du pas de temps. Cette raideur est déduite via la loi de contact en dérivant la relation qui lie la force normale à l'interpénétration [40][139]. Dans notre cas, nous avons un pas de temps fixe tout le long de la simulation. Par contre, on s'assure de la stabilité du calcul en comparant une même simulation réalisée pour plusieurs valeurs du pas de temps.

### 3.3 Paramétriques matériaux

#### 3.3.1 Calibration du coefficient de restitution

Le coefficient de restitution est une grandeur qui intervient lors de l'étude d'une collision. Imaginons une particule lâchée sans vitesse initiale d'une hauteur initiale  $h_0$ . Cette particule arrive sur la surface avec une vitesse  $V+$ , et quitte la surface avec une vitesse  $V-$ , comme le montre la Figure 3.6 page 88. A la fin, cette particule rebondit à la hauteur  $h_1$ . Pendant le rebond, la particule perd une partie de son énergie. Le coefficient de restitution  $e$  est relié à l'énergie dissipée lors de la collision [40][140].

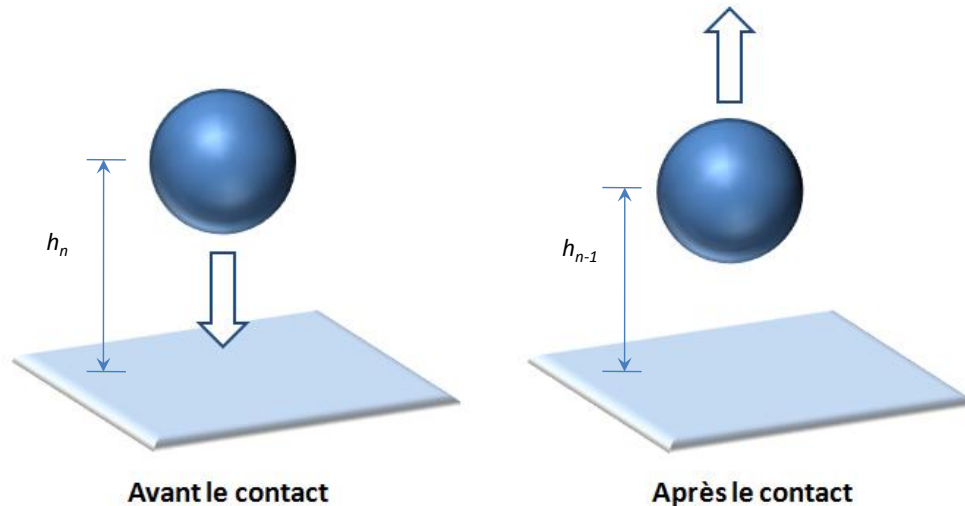


FIGURE 3.6: Schématisation d'une collision entre une particule sphérique et un plan

Le coefficient de restitution  $e$  est compris entre 0 et 1. La valeur 1 correspond au cas idéal où aucune énergie n'est dissipée. Par contre, la valeur 0 correspond au cas où toute l'énergie est dissipée lors du contact. Le coefficient de restitution dépend essentiellement de la nature des matériaux avec le modèle de ressort et amortisseur, avec le modèle de Hertz Mindlin, il dépend aussi de la vitesse d'impact. Par exemple,

pour des billes de verre, une valeur typique de 0,8 peut être utilisée.

$$e = \sqrt{\frac{h_{n-1}}{h_n}} \quad (3.15)$$

ou

$$e = \frac{V_-}{V_+} \quad (3.16)$$

Dans notre cas, pour identifier le coefficient  $\gamma_n$ , nous avons étudié, comme Fortin [40], le rebond d'une bille sur un plan. Nous avons trouvé une valeur de  $1,6 \times 10^{-6}$  pour le coefficient de restitution suite à une chute libre de 10 cm sans vitesse initiale. Ce coefficient de restitution sera le même quel que soit les diamètres de bille considérées et donc le coefficient d'amortissement est à chaque fois identifié lors du changement de taille des particules.

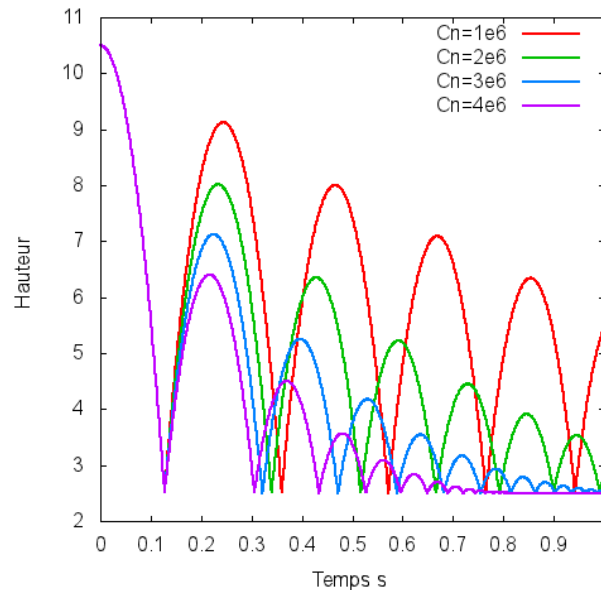


FIGURE 3.7: Simulation d'un contact entre une particule et un plan avec différents coefficients d'amortissement visqueux

Le coefficient d'amortissement a une relation avec les paramètres loi de contact par ce qu'il change la valeur de la force normal selon les équations. A noter que dans le cas quasi-statique (peu de collision), certains auteurs prennent une valeur nulle dans le cas de calcul 2D du coefficient d'amortissement [21][7].

La Figure 3.7 page 89 montre l'amortissement lors du rebond d'une particule sur un plan. Si on garde le même module de Young de la particule en changeant uniquement le coefficient d'amortissement visqueux, on voit que le coefficient de restitution diminue avec l'augmentation du coefficient d'amortissement visqueux. La valeur gamma choisie pour le coefficient d'amortissement nous permet d'avoir un coefficient de restitution de 0,8 (valeur typique billes de verre).

TABLE 3.1: Tableau des quelques paramètres important dans la simulation de l'essai triaxial : données issus de la bibliographie

2D/3D	Conditon Limite	$\mu_{gg}$	$\mu_{gw}$	Contact Law	Biblio
2D	Rectangle	0,05	\	Raideur-amortisseur	[64]
3D	Plans rigides	0,25	0	Raideur-amortisseur	[141]
2D	Rectangle	0,5	0	Hertz-Mindlin	[65]
3D	Plans rigides	0,096	0,175	Hertz-Mindlin	[98]
2D	Membrane	0,49	0,36	Raideur-amortisseur	[63]
3D	Membrane polyèdre	0,42	0	Raideur-amortisseur	[71]
3D	Condition périodique	0,096	0,228	Raideur-amortisseur	[97]
3D	Condition périodique	0,268	0-0,3	Hertz-Mindlin	[67]
3D	Plans rigides	0,25	0,2	Raideur-amortisseur	[74]
3D	Cylindrique rigide	0,42	0	Raideur-amortisseur	[93]
3D	Plans rigides	0,5	\	Hertz-Mindlin	[142]
2D	Membrane	0,5	0	Raideur-amortisseur	[64]
3D	Cylindrique rigide	0,25	0	Raideur-amortisseur	[64]
3D	Plans rigides	0,5	\	Hertz-Mindlin	[72]

### 3.3.2 Paramètres appliqués dans les simulations

Concernant les propriétés élastiques, les modules de Young et coefficient de Poisson du verre ont été pris en compte. Un petit pas de temps a été déterminé en conséquence pour la stabilité des calculs (section 3.2.4 ).

Le Tableau 3.1 page 90. résume les paramètres de simulation DEM appliqués par d'autres chercheurs dans la simulation de l'essai triaxial, dans des problèmes en deux ou trois dimensions avec soit des lois de contact de type raideur-amortisseur ou de type Hertz-Mindlin. Dans certaines études, le coefficient de frottement particule-paroi n'est pas forcément pris en compte. Nous discuterons de la nécessité de la prise en compte de ce coefficient dans la section 3.6.1.

Les valeurs des paramètres matériaux utilisés dans nos simulations sont résumées dans le Tableau 3.4 page 101.

Dans ce travail, concernant les coefficients de frottement, ceux-ci varient en fonction des différentes étapes de simulation, notamment pour la préparation des échantillons mais aussi pour les études paramétriques. La plage de variation des coefficients de frottement est résumé dans le Tableau 3.2 page 91. L'identification des coefficients de frottement à l'échelle locale reste difficile à réaliser d'un point de vue expérimental. Ce dernier peut dépendre à la fois de la texture de surface des matériaux en contact, de la taille des particules, de la matière des deux parties en contact, de l'usure du contact, de la dimension du problème considéré. Dans notre cas, nos coefficients choisis sont dans la gamme de valeurs utilisée par les autres auteurs.

TABLE 3.2: Tableau général montrant la plage de variation des coefficients de frottement dans le cadre de ce travail

Paramètre micromécanique	Défaut	Plage de valeurs
Coefficient de frottement inter-particules $\mu_{gg}$	0,15	0,1-0,5
Coefficient de frottement particules-paroi $\mu_{gw}$	0,05	0,0-0,2
Coefficient de frottement particules-pierre poreuse $\mu_{gp}$	0,25	0,0-0,7
Coefficient de roulement inter-particules $\mu_{r_{gg}}$	0,01	0,0-1,0

### 3.4 Procédure de simulations de l'essai triaxial

La procédure de simulation, Figure 3.8 page 91, inclut les étapes suivantes :

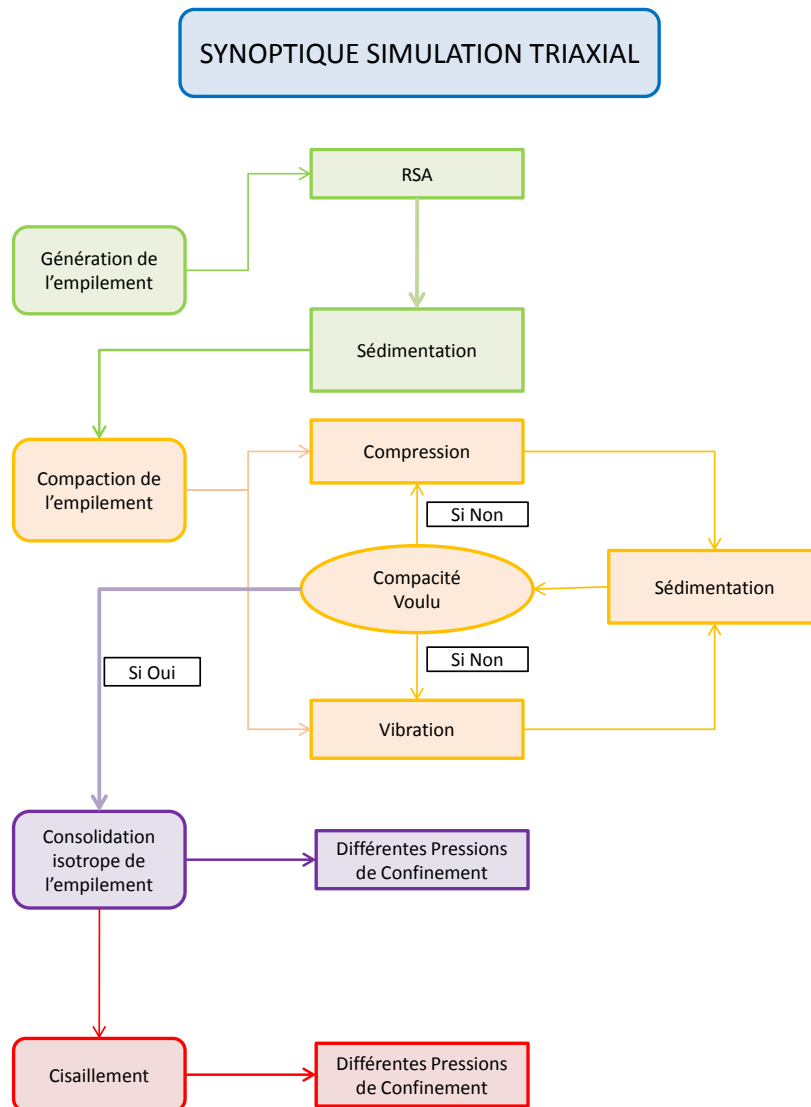


FIGURE 3.8: Schématisation des procédures de modélisation de l'essai triaxial

- Préparation de l'empilement numérique
- Consolidation de l'empilement à chemin isotrope en contrainte
- Cisaillement de l'empilement confiné

Afin de pouvoir comparer nos résultats numériques avec les résultats expérimentaux obtenus au chapitre précédent, tous les paramètres de simulation concernant les dimensions de l'échantillon, la masse de billes introduites dans la cellule ou les caractéristiques mécaniques des particules, ont été choisis de façon à se rapprocher au maximum des conditions des essais expérimentaux.

### 3.4.1 Stratégie mise en place pour modéliser l'essai triaxial

La bibliographie a montré que plusieurs conditions aux limites peuvent être utilisées pour la modélisation de l'essai triaxial : condition rigide [31][93][70][143], condition périodique [67][97], condition membrane [64][69][89][71][99]. Le choix est lié à la fois au type de problème à modéliser et à la stratégie mise en place. Pour rappel, l'objectif de cet essai est de caractériser le comportement en cisaillement d'un matériau tout en veillant avoir à appliquer des sollicitations les plus homogènes possibles (critère de taille de cellule par rapport à la taille maxi des particules par exemple). Ainsi, les conditions aux limites périodiques permettent de modéliser un VER mais ne permettent pas d'identifier des zones de déformation localisées. Dans notre cas, nous nous intéressons dans notre cas à reproduire les conditions expérimentales de l'essai triaxial de révolution que nous avons en laboratoire, (cellule triaxial de dimension finie).

Remarquant que la forme globale des échantillons cisailés reste généralement cylindrique, au moins au début de l'essai triaxial, l'utilisation d'une condition limite cylindrique semble un choix pertinent pour simuler l'essai triaxial. Elle est en effet plus simple à implémenter et peu coûteuse en temps de calcul. Par ailleurs Cheung et O'Sullivan ont aussi comparé les simulations de l'essai triaxial en 2D et en 3D respectivement en utilisant la condition limite rigide et la condition membrane. Ils ont trouvé que les contraintes déviatoriques dans les simulations en conditions cylindriques sont proches de celles obtenues en conditions membranes. C'est à dire que la déformation locale n'influence pas beaucoup la contrainte déviatorique totale [64]. On peut ainsi se demander si la mise en œuvre de conditions membrane est réellement nécessaire pour la simulation de l'essai triaxial. Plusieurs auteurs [64][93] ont déjà utilisé une condition limite cylindrique rigide pour la simulation de l'essai triaxial en utilisant le code *PFC3D* [54], code commercial de l'entreprise Itasca.

Dans le cadre de ce travail, étant donné que ceci était le premier travail réalisé avec ce code pour modéliser l'essai triaxial, un choix a été fait d'implémenter et d'utiliser une condition cylindrique rigide pour représenter la condition membranes.

Ainsi, les conditions limites autour de notre empilement numérique se décomposent en trois parties : deux plateaux horizontaux (supérieur et inférieur) ainsi qu'une

condition limite cylindrique. Dans la génération de ces conditions limites, les plateaux supérieur et inférieur sont modélisés par deux plans horizontaux.

### 3.4.2 Modélisation de la paroi rigide cylindrique

Par rapport à la condition limite cylindrique, nous avons traité les contacts entre les grains et la condition limite cylindrique en assimilant cette dernière à un grain virtuel de rayon quasi infini, tangent au cylindre au niveau du point de contact (Figure 3.9 page 93).

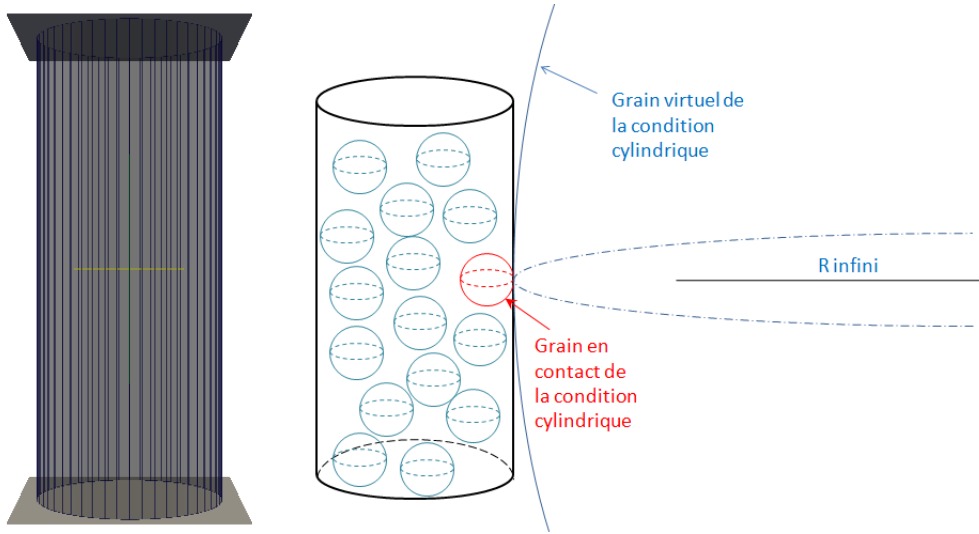


FIGURE 3.9: (a) condition limite cylindrique dans nos simulations de l'essai triaxial; (b) Schématisation du contact du grain avec la condition limite cylindrique

La contrainte exercée par l'empilement sur chaque condition aux limites est calculée via les forces solides des particules en contact avec la condition aux limites en question par :

$$\sigma_1 = \frac{1}{S} \sum_{k=1}^{N_{FCL}} \vec{F}_k \vec{n}_{cl} \quad (3.17)$$

où  $F_k$  est la force de contact exercée par la particule  $k$  sur la condition aux limites,  $\vec{n}_{cl}$  est le vecteur normale à la condition aux limites (aux points de contact),  $S$  la surface de cette condition aux limites et  $N_{FCL}$  le nombre de forces exercées sur la condition aux limites

Ainsi, pour les plans supérieur et inférieur, la contrainte axiale  $\sigma_1$  correspond au rapport entre la somme de toutes les forces verticales s'exerçant sur le plateau et la surface du plateau.

$$\sigma_3 = \frac{1}{\pi r^2} \sum_{k=1}^{N_{FCL}} \vec{F}_k \vec{n}_{cl} \quad (3.18)$$

Concernant le cylindre, la pression latérale moyenne  $\sigma_3$  exercée par la condition cylindrique sur l'empilement est obtenue par la somme de l'ensemble des forces normales entre les particules en contact avec la condition rigide divisée par la surface de la paroi cylindrique :

$$\sigma = \frac{1}{2\pi r h} \sum_{k=1}^{N_{FCL}} \vec{F}_k \vec{n}_{cl} \quad (3.19)$$

### 3.4.3 Préparation de l'empilement initial : étape de génération et sédimentation

La préparation de l'échantillon est la première étape de la procédure de modélisation de l'essai triaxial. L'objectif de cette étape est de générer un empilement dense ou lâche dans la condition limite cylindrique. Dans ce travail, nous avons préparé plusieurs échantillons à différents indices des vides. Cette étape de préparation de l'échantillon inclut aussi plusieurs phases que nous allons décrire plus précisément dans ce paragraphe.

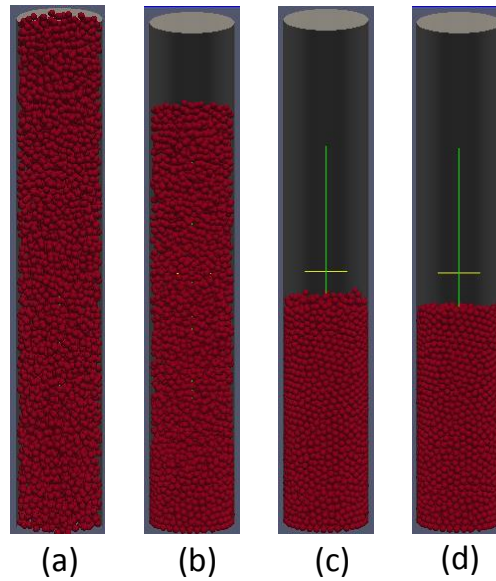


FIGURE 3.10: Étape de génération de l'empilement puis phases de sédimentation :  $t=0s$ ;  $t=0,1s$ ;  $t=0,2s$ ;  $t=0,4s$

Figure 3.10 page 94 montre l'évolution de la microstructure de l'empilement au cours de sédimentation. 4 images correspondent respectivement sont montré respectivement au temps  $t=0s$ ,  $t=0,1s$ ,  $t=0,2s$ ,  $t=0,4s$ .

#### 3.4.3.1 Génération d'un gaz de particules dans la condition cylindrique

Initialement, un gaz de particules est généré à l'aide d'un algorithme *RSA* (Random Sequential Adsorption) [144][145][146]. Le principe de cet algorithme est de placer



les particules aléatoirement, l'une après l'autre, dans la condition cylindrique sans interpénétration avec le plan inférieur. Si la particule interpénètre une autre déjà présente, une nouvelle position est générée approximativement jusqu'à ce qu'une place disponible soit trouvée. Imaginons que cette procédure continue jusqu'au moment où aucune sphère ne puisse plus être ajoutée, la compacité maximale théorique sera atteinte (environ 0,38 en 3D et 0,547 en 2D) [144]. Dans notre étude, nous avons généré autant de particules que le nombre introduit dans la cellule triaxiale dans la partie expérimentale, soit 4600 particules. Le diamètre des particules est de 4mm (cas monodisperse), la masse volumique du verre est de  $2530\text{kg}/\text{m}^3$ , les dimensions de l'échantillon numérique sont : diamètre de 50mm et hauteur de 300mm.

### 3.4.3.2 Sédimentation pour atteindre un état d'empilement

La seconde étape consiste à simuler la sédimentation des particules sous l'effet de la gravité. Toutes les particules sont lâchées des positions précédentes sans vitesse initiale. L'empilement est considéré stabilisé lorsque l'énergie cinétique tend vers zéro. En plus, dans le cas d'une préparation de l'empilement dense, le coefficient de frottement particule-particule et particule paroi est fixé à 0,0 pour augmenter la densification. Par contre, le coefficient de frottement est fixé à 1,0 dans le cas de la préparation d'un empilement lâche, c'est-à-dire de faible densité.

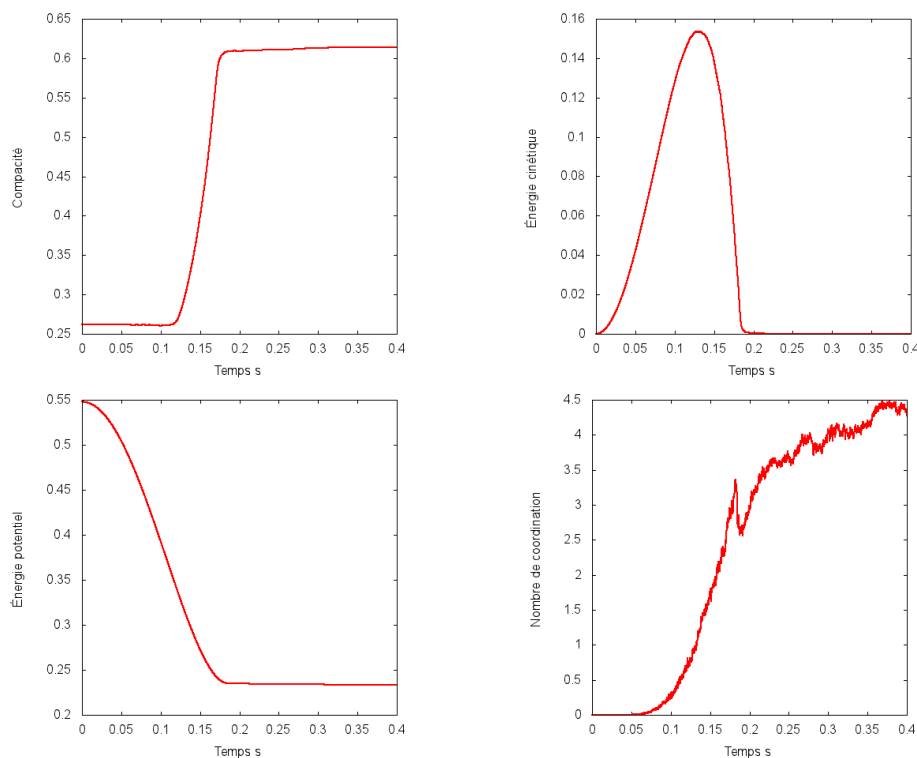


FIGURE 3.11: (a) compacité de l'empilement ; (b) énergie cinétique de l'empilement ; (c) énergie potentiel de l'empilement (d) Nombre de coordination

Dans les simulations, la compacité de l'échantillon est calculée selon la formule suivante :

$$c = \frac{\frac{4}{3}\pi r^3 n}{\pi R^2 h} \quad (3.20)$$

où  $r$  et  $n$  sont le rayon et le nombre des particules ;  $R$  est le rayon et la hauteur de la condition paroi cylindrique,  $h$  est la hauteur de la plus haute de la particule (calculé à partir du centre de la plus haute particule auquel on ajoute le rayon de cette particule).

Figure 3.11 page 95 montre respectivement la compacité (a), l'énergie cinétique (b), énergie potentielle (c), nombre de coordination (d) dans la phase de sédimentation. Dans la première 0,1s, l'énergie cinétique augmente rapidement mais la compacité ne change pas. Cette étape correspond à une phase d'accélération des particules, sans variation importante de leur position. La compacité augmente ensuite très vite jusqu'à environ 0,62, puis se stabilise. La courbe du nombre de coordination moyen montre qu'une particule dans l'empilement est en contact avec environ 4,5 particules autour d'elle. Comme évoqué ci-dessus, on peut aussi obtenir des empilements de densités plus faibles en augmentant le coefficient de frottement.

Dans la première 0,1s, l'énergie cinétique commence à augmenter mais la compacité ne bouge pas, c'est-à-dire que le gaz de particule commence à accélérer à sédimenter. Et puis, la compacité augmente très vite jusqu'à environs 0,62, puis stabilise. La courbe du nombre de coordination moyenne montre qu'une particule dans l'empilement se contacte avec 4,5 particules moyen autour d'elle.

### 3.4.4 Préparation de l'empilement : densification par Compaction et vibration

#### 3.4.4.1 Compression de l'empilement

Plusieurs études sont sur la compaction des empilements dans la littérature [147][61][148]. Dans nos études, pour préparer un empilement dense, l'utilisation d'un coefficient de frottement nul à la fois grain-grain et grain-paroi lors de la phase de sédimentation n'est pas toujours suffisante. Deux procédures de densification de l'empilement ont ainsi été utilisées dans la thèse : la compression et la vibration.

La compression consiste à comprimer l'empilement avec le plateau supérieur, Figure 3.12 page 97. Le plateau supérieur est descendu progressivement sur l'empilement jusqu'à une hauteur objectif (inférieure à la hauteur finale visée). Ensuite, le plateau supérieur est enlevé afin que les particules se relaxent, puis l'opération est répétée jusqu'à ce que la hauteur de l'empilement après relaxation soit proche de la valeur permettant d'obtenir la compacité visée. Cette procédure est assez proche de celle utilisée dans l'essai expérimental. A la fin, l'empilement est préparé avec le même indice des vides que dans les essais expérimentaux. Pendant cette compaction, les coefficients de frottement et les coefficients de roulement inter-particule et particule-paroi sont tous fixés à 0 afin que les particules soient plus faciles à bouger.

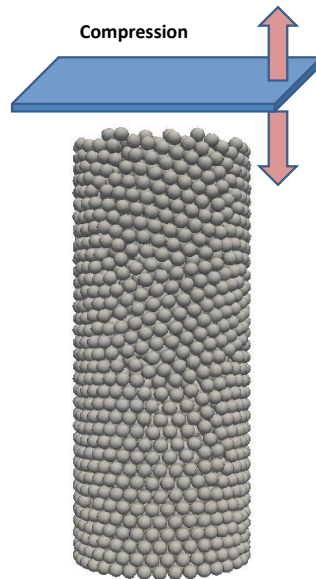


FIGURE 3.12: Schématisation de la compression de l'empilement

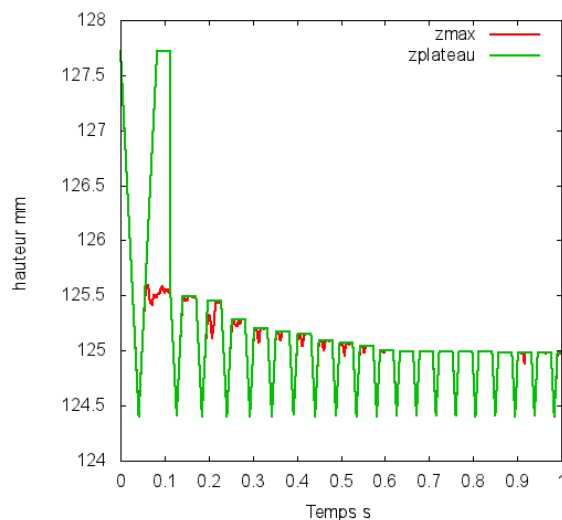


FIGURE 3.13: Évolution du plateau supérieur et de la hauteur de la particule la plus haute pendant la compression

La Figure 3.13 page 97 montre l'évolution de la position du plateau supérieur et de la hauteur de l'échantillon. La hauteur initiale de l'échantillon est de 127,7 mm. La hauteur finale visée après compression est de 125mm (comme dans l'essai expérimental). Sur le schéma, on voit qu'à chaque compression, le plateau comprime l'échantillon à une hauteur inférieure à la hauteur visée (ici 124,5 mm) et remonte jusqu'à la hauteur précédente avant compression. On laisse ensuite l'échantillon retrouver un état d'équilibre puis on passe à la compression suivante. Finalement, nous obtenons un échantillon à l'équilibre de hauteur de 125mm qui a la même hauteur que l'échantillon expérimental.

### 3.4.4.2 Vibration de l'empilement

La vibration consiste à vibrer l'échantillon par le plateau inférieur avec une fréquence de 100Hz et une amplitude de 0,4m, Figure 3.14 page 98

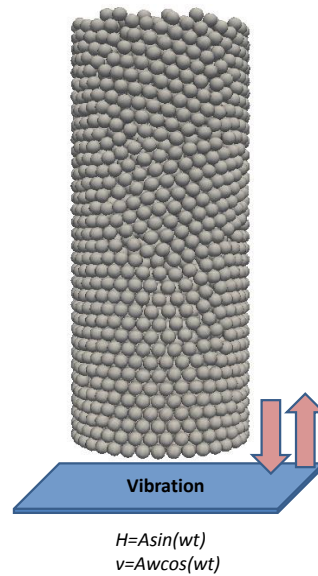


FIGURE 3.14: Schématisation de la vibration de l'empilement

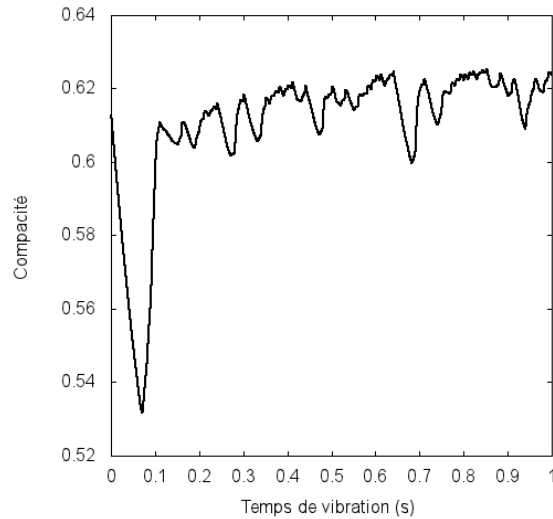


FIGURE 3.15: Compacité de l'empilement au cours d'une vibration pendant 1s

$$H = A \sin(\omega t) \quad (3.21)$$

$$v = A \omega \cos(\omega t) \quad (3.22)$$

où  $A$  et  $\omega$  sont l'amplitude et la fréquence de la vibration.  $H$  et  $v$  sont la hauteur et la vitesse du plateau inférieur.

La Figure 3.15 page 98 montre une courbe de variation de la compacité de l'empilement au cours de la vibration pendant 1s. On observe que la compacité augmente par rapport à celle de l'empilement initial.

A l'issue de la vibration, le système est à nouveau soumis à une procédure de sédimentation afin qu'il retrouve un état d'équilibre.

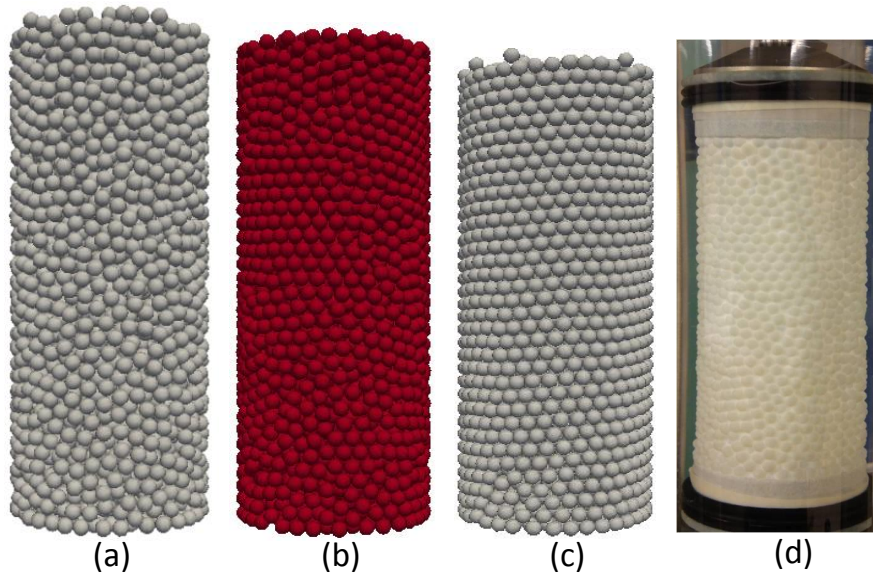


FIGURE 3.16: Images de l'empilement numérique (a) après sédimentation, (b) après compression et (c) après vibration (d) Échantillon expérimental dense

La Figure 3.16 page 99 montre des images d'empilements numériques pour différents états de compaction. Le Tableau 3.3 page 100 indique les indices des vides et les compacités de ces trois empilements. Juste après la sédimentation du gaz de particules (Figure 3.16 page 99,a), l'empilement paraît désordonné. La compression (Figure 3.16 page 99,b) permet une augmentation significative de la densité (on atteint la compacité expérimentale) et ordonne partiellement l'empilement qui ressemble beaucoup à l'échantillon dense expérimental (Figure 3.16 page 99,d). La procédure de vibration (Figure 3.16 page 99,c) induit en revanche un ordre très important dans l'empilement (au moins à la paroi de l'échantillon) qui se traduit par une augmentation significative de la compacité. Au vu de ces résultats la procédure de compression paraît plus réaliste au regard de celle utilisée expérimentalement. Les échantillons numériques denses qui seront présentés par la suite ont donc été obtenus avec cette procédure (sauf mention contraire).

### 3.4.5 Contrôle de la condition cylindrique : consolidation isotrope et cisaillement triaxial

Dans notre simulation, la condition limite utilisée est cylindrique[128]. La variation de la pression latérale exercée par cette condition limite peut donc être obtenue en

TABLE 3.3: Différentes indice de vides ou compacités dans les trois étapes de préparations

Méthodes	Indice de vide e	Compacité c
Sédimentation	0,603	0,624
Compression	0,589	0,628
Vibration	0,569	0,637

changeant le diamètre du cylindre. Pour calculer la variation du rayon du cylindre entre deux pas de temps successifs, nous avons appliqué la formule de Lamé. La formule de Lamé est une série d'équations permettant de déterminer la contrainte radiale, la contrainte tangentielle et le déplacement radial en n'importe quel point d'un tube soumis à une différence de pression interne/externe [149].

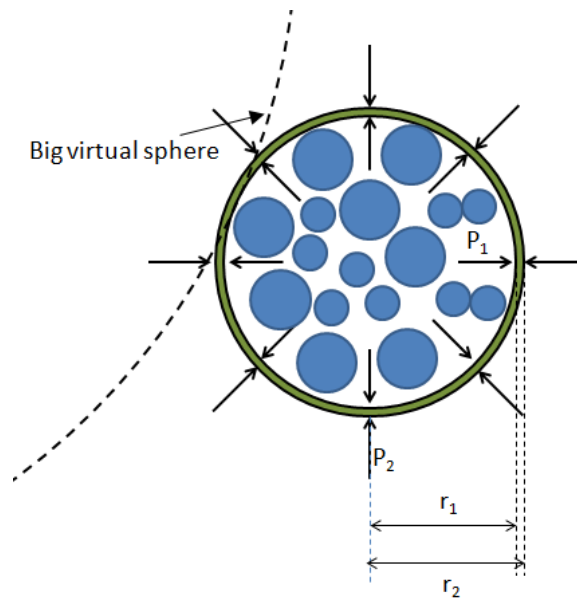


FIGURE 3.17: Coupe de la condition limite cylindrique

La Figure 3.17 page 100 montre une vue en coupe du système appliqué dans le cas de contrôle de la variation de pression de confinement. Un tube mince subit une pression extérieure et une pression intérieure. Si la pression extérieure est plus importante que la pression intérieure, le tube se contracte, dans le cas contraire il se dilate. La formule de Lamé permet de calculer la variation de rayon du tube. Dans notre simulation de l'essai triaxial, la forme de l'échantillon reste tout le temps cylindrique. La membrane peut donc être considérée comme un tube mince élastique qui satisfait toutes les exigences de la formule de Lamé. La variation du rayon peut alors être calculée selon l'équation :

$$\Delta r = \frac{1}{E} \times \frac{(1 - \nu)(r_1^2 P_1 - r_2^2 P_2)}{r_2^2 - r_1^2} r + \frac{(1 + \nu)r_1^2 r_2^2 (P_1 - P_2)}{r_2^2 - r_1^2} \frac{1}{r} \quad (3.23)$$

où  $\Delta r$  est la variation de rayon à déterminer ;  $E$  et  $\nu$  sont respectivement le module de Young et le coefficient de Poisson de la condition limite,  $P_1$  et  $P_2$  sont respectivement la

pression latérale actuelle et la pression de confinement cible,  $r_1$  et  $r_2$  sont respectivement les rayons interne et externe du cylindre.

Il faut remarquer que la pression de confinement dans l'essai triaxial expérimental vient de l'eau de la cellule triaxiale. Mais la pression latérale dans la simulation est exercée par la condition limite cylindrique. Pour éviter une variation de rayon  $\Delta r$  entre deux pas de temps trop importante, il faut que la rigidité de la membrane soit suffisante selon la formule de Lamé ( $E$  plus grand,  $\Delta r$  plus faible). Dans nos simulations, le module du cylindre est fixé à la même valeur que celui des particules.

L'essentiel de la préparation de l'empilement isotrope est de trouver un état où la contrainte latérale est équivalente à la contrainte axiale.

Dans cette étape, on "rallume" tout d'abord le coefficient de frottements inter-particulaires et le frottement entre les particules et la paroi.

TABLE 3.4: Tableau de paramètres de simulations pour les exemples de la préparation isotrope et phase de cisaillement présenté

Module de Young granin et paroi	65GPa
Coefficient de Poisson	0,25
Coefficient de Frottement grain-grain $\mu_{gg}$	0,15
Coefficient de Frottement grain-paroi $\mu_{gw}$	0,05
Coefficient de Frottement grain-pierre poreuse $\mu_{gp}$	0,25
Coefficient de Roulement grain-grain $\mu_{grr}$	0,01
Coefficient amortissement 4mm	$3,5 \times 10^{-6}$
Pression de confinement $P_{conf}(kPa)$	50 ; 100 ; 200 ; 300
Pas de temps $\Delta t(s)$	$5 \times 10^{-8}$
Vitesse de cisaillement $\nu$	0,04

### 3.4.5.1 Chemin de chargement isotrope en contrainte

La Figure 3.18 page 102 montre l'algorithme de la préparation de l'empilement en suivant un chemin isotrope. Au début de la procédure de consolidation isotrope, la pression de confinement et de la pression axiale sont à peu près nulles. Nous avons choisi d'augmenter progressivement la pression axiale puis, pour chaque incrément, de faire varier le rayon du cylindre pour égaliser les pressions axiale et radiale. La pression  $P_2$  (pression cible dans la formule de Lamé) est donc fixée à la valeur de la pression axiale alors que la pression  $P_1$  correspond à la pression latérale intérieure. Ce processus est répété jusqu'à ce que les pressions axiale et radiale soient toutes deux égales à la pression de confinement désirée.

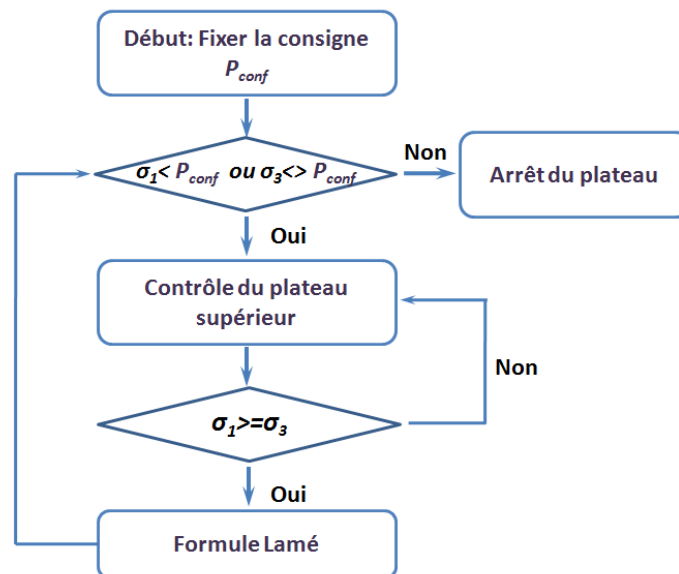
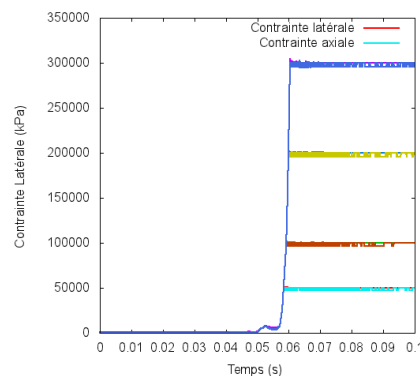


FIGURE 3.18: Algorithme d'une préparation en suivant un chemin isotrope

FIGURE 3.19: Variation des contraintes axiale  $\sigma_1$  et latérale  $\sigma_3$  lors de la préparation isotrope d'échantillons à 50, 100, 200 et 300 kPa.

La Figure 3.19 page 102 montre les variations des pressions axiale et latérale pour atteindre quatre pressions de confinement de 50 kPa, 100 kPa, 200 kPa et 300 kPa. On remarque d'une part qu'à la fin de cette procédure, la pression latérale et la pression axiale sont toutes deux identiques à la pression de confinement visée. D'autre part, on constate que les pressions axiale et latérale sont identiques à tout moment de la préparation, le chemin suivi est donc bien isotrope.

### 3.4.5.2 Etape de cisaillement

Dans l'étape de cisaillement, nous avons besoin à la fois de maintenir la contrainte latérale autour de la pression de consigne, et d'augmenter la contrainte axiale pour incrémenter le déviateur. L'algorithme de la Figure 3.20 page 103 montre la procédure de cisaillement. Le plateau descend avec une vitesse constante, la contrainte latérale est



comparée à la consigne à chaque itération. Si la contrainte latérale est moins importante que la consigne, le plateau continue à descendre sans modifier le rayon du cylindre. Dans le cas contraire, le plateau continue aussi à descendre à vitesse constante, mais la formule de Lamé est appliquée afin de modifier le rayon de la condition cylindre pour que la contrainte latérale soit maintenue égale à la consigne. La procédure de cisaillement est systématiquement poursuivie jusqu'à une déformation axiale de 15%.

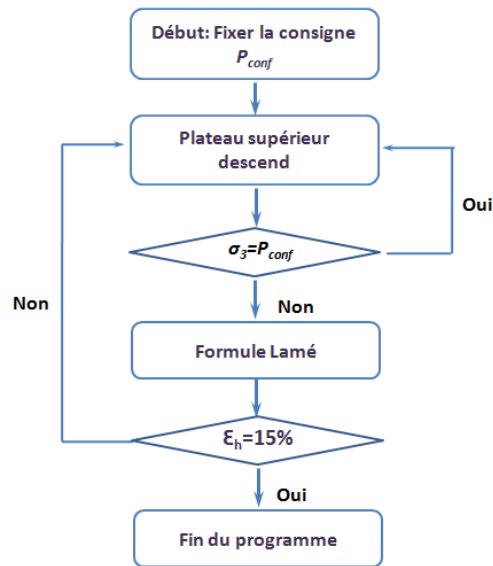


FIGURE 3.20: Algorithme de contrôle de la contrainte latérale dans la phase de cisaillement

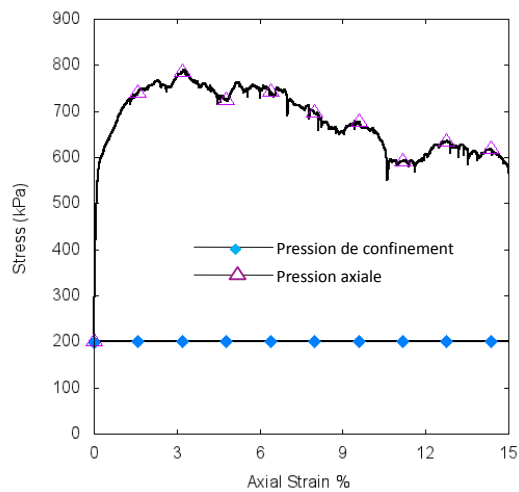


FIGURE 3.21: Variation de la contrainte latérale et de la contrainte axiale

La Figure 3.20 page 103 montre un exemple de variation de la contrainte latérale et de la contrainte axiale au cours de la phase de cisaillement. On voit que la contrainte

latérale  $\sigma_3$  est maintenue constante tandis que la contrainte  $\sigma_1$  augmente lorsque la déformation axiale augmente jusqu'à une valeur pic. Ensuite, elle diminue au cours du temps et à la fin se stabilise vers une contrainte résiduelle. Cette allure de la courbe de la contrainte  $\sigma_1$  est similaire à une courbe déviatorique type obtenue sur un échantillon dense dans le chapitre 1.

### 3.5 Tenseur moyen de contraintes

Dans le chapitre 1, nous avons présenté trois méthodes pour calculer le tenseur de contraintes par la DEM. Les équations de ces trois méthodes sont respectivement :

**Méthode 4** *Tenseur moyen de contraintes calculé à partir de la condition limite*

$$\bar{\sigma}_{ij} = \frac{1}{V} \sum_{k=1}^{k=n} x_i^k t_j^k \quad (3.24)$$

**Méthode 5** *Tenseur de contrainte sur chaque particule*

$$\sigma_{ij}^p = \frac{1}{V_p} \sum_{k=1}^{k=n} x_i^c f_j^c \quad (3.25)$$

**Méthode 6** *Tenseur de contrainte moyenne de l'empilement*

La position du point de contact peut être calculée [115] par l'équation :

$$\bar{\sigma}_{ij} = \frac{1-n}{\sum_{k=1}^{k=n} V_p} \sum_{c=1}^{c=n} l_i^c f_j^c \quad (3.26)$$

où  $V_p$  est le volume de la particule,  $n$  est le nombre de forces de contact exercées sur la particule,  $x_{ijk}^c$  sont les positions des contacts, et  $f_{ijk}^c$  sont les forces de contact exercées sur la particule.

Toutes ces trois méthodes sont implémentées dans notre code, nous allons ensuite analyser nos résultats dans cette section.

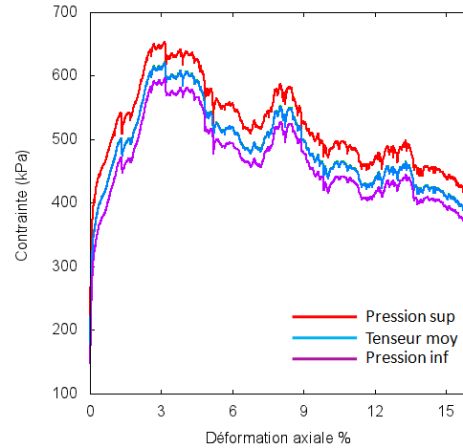


FIGURE 3.22: Courbe de la pression supérieure, la pression inférieure et le tenseur de contrainte moyenne  $\sigma_{33}$

La Figure 3.22 page 105 rassemble la variation de la pression supérieure, de la pression inférieure et du tenseur moyen suivant l'axe  $z$  dans l'étape de cisaillement. A cause du frottement grains/paroi, la pression supérieure est plus grande que la pression inférieure. On voit que le tenseur moyen est compris entre la pression supérieure et la pression inférieure. Le tenseur moyen de contraintes calculé à partir de la condition aux limites nous donne la même réponse. Ceci valide également l'implémentation de ces calculs dans le code et permet de vérifier la configuration d'équilibre.

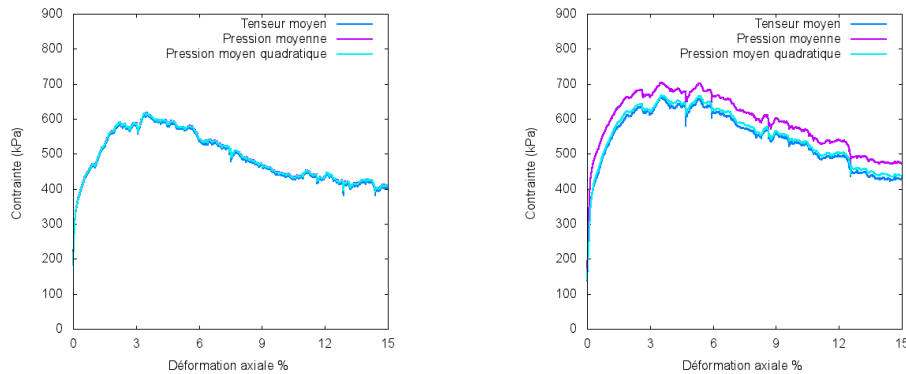


FIGURE 3.23: Influence du frottement entre les particules et la paroi sur la courbe tenseur moyen (a) coefficient de frottement particule-paroi 0 (b) coefficient de frottement particule-paroi 0,3 ( $P_{conf}$  200 kPa)

La Figure 3.23 page 105 montre une comparaison de la contrainte verticale calculée à partir du tenseur moyen et de la pression moyenne exercée sur les plateaux supérieur et inférieur pour deux coefficients de frottement grain/paroi différents (0 et 0,3). Si le frottement particule-paroi est nul, on observe que le tenseur moyen est superposé avec la pression moyenne arithmétique  $p_m$  et pression moyenne quadratique  $p_q$ . Par contre, si le coefficient de frottement n'est pas nul entre les particules et la paroi, le tenseur moyen suivant l'axe  $z$  est supérieur de la pression moyenne à cause du frottement le

long de la paroi, mais la pression moyenne quadratique est plus proche du tenseur moyen. On peut ainsi conclure que le tenseur moyen correspond à la moyenne de la pression supérieure, de la pression inférieure et du frottement entre les particules et la paroi.

la pression moyenne  $p_m$  et pression moyenne quadratique  $p_q$  sont calculés par les formules suivants :

$$p_m = (\sigma_{sup} + \sigma_{inf})/2 \quad (3.27)$$

$$p_q = \sqrt{(\sigma_{sup} \times \sigma_{inf})} \quad (3.28)$$

### 3.6 Visualisation du comportement de l'empilement

Dans la simulation de l'essai triaxial, nous pouvons étudier non seulement les différentes courbes représentant l'évolution des contraintes ou des déformations, mais aussi la visualisation des empilements à l'aide du logiciel de post-traitement (paraview). Les données de tenseur de contraintes local de chaque particule sont transmises au logiciel de post-traitement paraview pour observer la distribution des contraintes locales dans l'empilement. La Figure 3.24 page 106 montre l'état de l'empilement dans différent étapes de simulation.

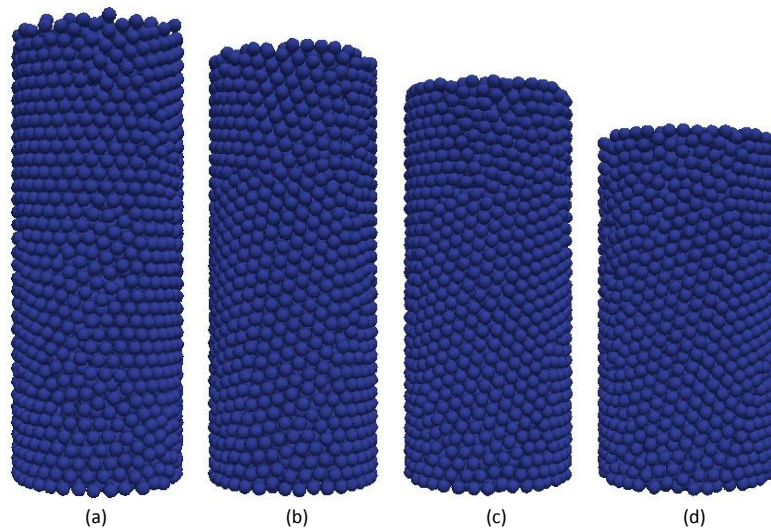


FIGURE 3.24: Echantillons numériques au cours d'une simulation numérique de l'essai triaxial : (a) après sédimentation ; (b) après consolidation ; (c) à l'état critique ; (d) à 15% déformation axiale

La Figure 3.25 page 107 montre l'exemple d'un empilement cisailé sous une pression de confinement de 200kPa. La déformation axiale va jusqu'à 15%. Trois étapes

intermédiaires durant la simulation du cisaillement sont comparés : 1%, 3% et 14% de déformation axiale. Nous étudions l'évolution de différents paramètres de l'empilement.

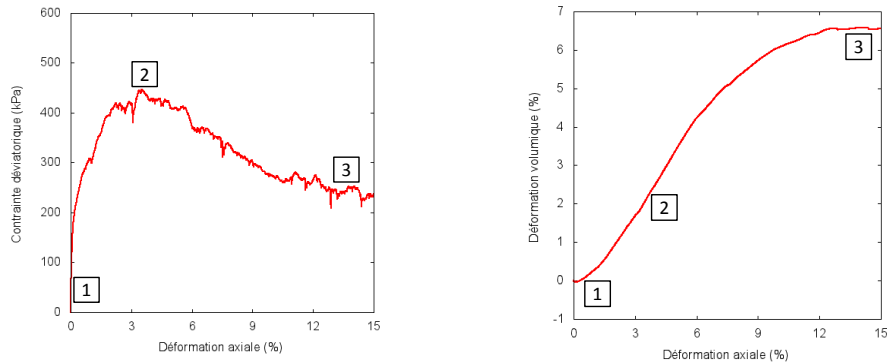


FIGURE 3.25: Trois états retenus pour la visualisation de la vitesse, de la vitesse angulaire et du tenseur de contrainte de chaque particule sur l'empilement : Début d'essai 1% de déformation axiale, au pic sur la courbe déviatorique à 3% de déformation axiale, au palier sur la courbe déviatorique à 14% de déformation axiale

La Figure 3.26 page 107 montre les distributions de vitesse sur toutes les particules, on observe que les vitesses sont plutôt élevées dans la partie supérieure de l'empilement. A 14% de déformation axiale, on voit que les vitesses sur les particules en bas à droite de l'empilement sont presque nulles. On peut considérer que la frontière entre les vitesses quasi nulles et non nulles correspond à la bande de rupture.

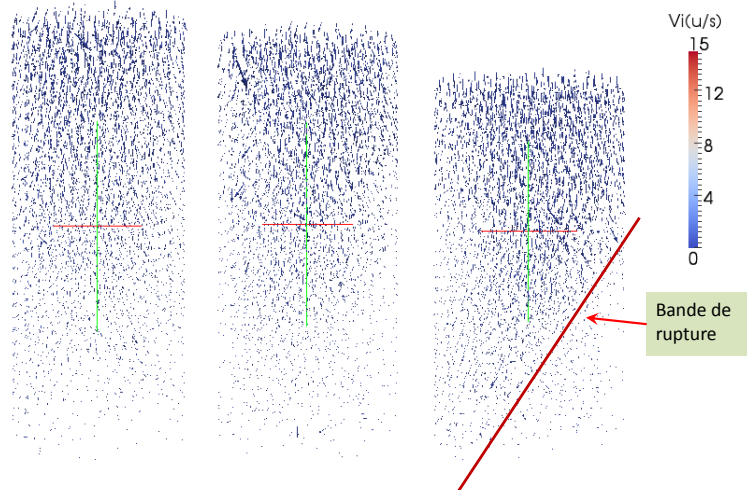


FIGURE 3.26: Image de la distribution de vitesses sur toutes les particules au cours de la phase de cisaillement : 1%, 3%, 14% de déformation axiale ( $P_{conf}$  200 kPa)

La Figure 3.27 page 108 montre la distribution de la vitesse angulaire sur toutes les particules dans trois étapes du cisaillement. On voit que la distribution de la vitesse sur les particules est de plus en plus grande pendant le cisaillement. A 14% de déformation axiale, on observe une bande avec des couleurs de particules plus vives correspondant

à la bande de cisaillement où la rotation des particules est donc plus importante.

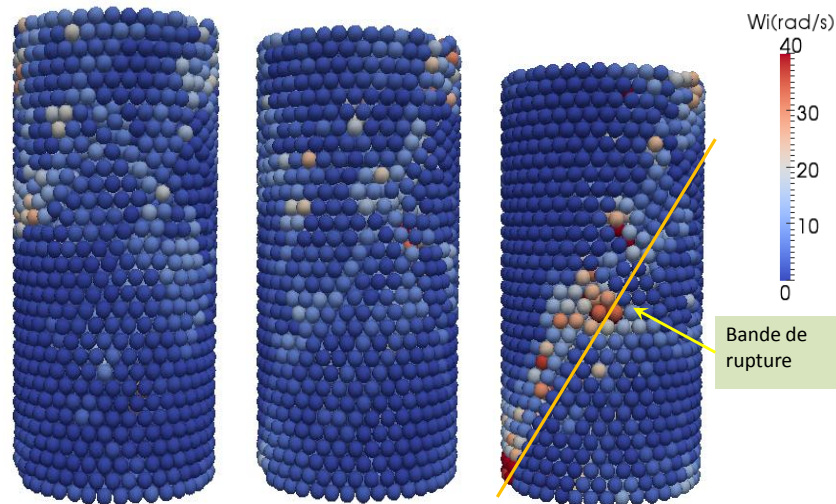


FIGURE 3.27: Image de la distribution de vitesse angulaire sur toutes les particules au cours de la phase de cisaillement à 1%, 3%,14% de déformation axiale ( $P_{conf}$  200 kPa)

La Figure 3.28 page 108 montre la distribution du tenseur de contraintes (norme) sur toutes les particules dans l'empilement. Le tenseur de contraintes de chaque particule est calculé par la méthode présentée dans la section précédente. On voit que les particules subissant les contraintes les plus élevées au début du cisaillement sont distribuées aléatoirement dans l'empilement. Au contraire, à la fin du cisaillement, les contraintes élevées se concentrent plutôt sur la bande de rupture.

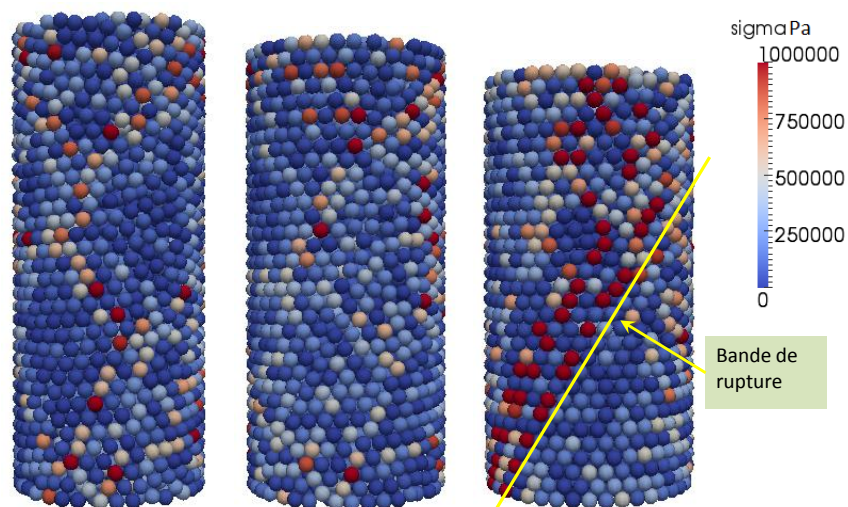


FIGURE 3.28: Image de la distribution du tenseur de contraintes local sur toutes les particules au cours de la phase de cisaillement : 1%, 3%,14% de déformation axiale ( $P_{conf}$  200 kPa)

En résumé, même si notre condition limite paroi rigide cylindrique ne reproduit

pas exactement la déformation locale de l'échantillon au cours de l'essai, elle permet toute de même d'étudier la phase de cisaillement jusqu'à l'apparition d'une bande de cisaillement caractéristique de l'essai triaxial de révolution. Ce sont les distributions de la vitesse, de la vitesse angulaire et des contraintes sur toutes les particules qui permettent cette visualisation. Les visualisations nous montrent que le comportement mécanique des particules dans la bande de cisaillement est largement différent des autres particules.

### 3.7 Confrontation des résultats expérimentaux et numériques

Les résultats expérimentaux du chapitre deux sont comparés avec les résultats numériques. A cette fin, nous essayons d'appliquer des paramètres de simulation aussi proches que possible de ceux de l'essai expérimental. Tableau 3.5 page 82 montre les paramètres appliqué pour la simulation de l'essai triaxial. Concernant les contraintes, nous avons utilisés la formule de calcul  $\sigma_1$  et  $\sigma_3$ .

TABLE 3.5: Tableau des paramètres appliqués dans la simulation de l'essai triaxial

Module de Young (grain et paroi)	65GPa
Coefficient de Poisson	0,25
Coefficient de Frottement grain-grain $\mu_{gg}$	0,15
Coefficient de Frottement grain-paroi $\mu_{gw}$	0,05
Coefficient de Frottement grain-pierre poreuse $\mu_{gp}$	0,25
Coefficient de Roulement grain-grain $\mu_{grr}$	0,01
Coefficient amortissement 4mm	$3,5 \times 10^{-6}$
Pression de confinement $P_{conf}(kPa)$	50 ; 100 ; 200 ; 300
Pas de temps $\Delta t(s)$	$5 \times 10^{-8}$
Vitesse de cisaillement $\nu$	0,04
Nombre des particules pour l'empilement dense	4650
Nombre des particules pour l'empilement moyennement dense	4050

Le Tableau 3.6 page 109 montre une comparaison indice de vide pour échantillon numérique et expérimentales, d'où les définitions de  $e_{sat}$   $e_{cons}$   $e_{cis}$  sont présentés dans la section 2.3.

TABLE 3.6: Comparaisons indice de vide pour échantillons denses numérique et expérimentales

$P_{conf}(kPa)$	$e_{sat}$		$e_{cons}$		$e_{cis}$	
	Exp	Num	Exp	Num	Exp	Num
50	0,554	0,559	0,539	0,547	0,637	0,658
100	0,554	0,559	0,527	0,542	0,628	0,656
200	0,554	0,559	0,526	0,537	0,617	0,662

La Figure 3.29 page 110 montre les confrontations des résultats de nos simulations numériques avec les essais expérimentaux correspondants. Sur la courbe déviatorique numérique, on observe que le pic déviatorique est parfois décalé par rapport au pic expérimental (la comparaison est toutefois très bonne dans certains cas). Par contre, les valeurs de contraintes déviatoriques sont tout à fait comparables. Les courbes montrent toutefois que la simulation peine à reproduire les stick-slip des résultats expérimentaux. Dans les essais expérimentaux, l'amplitude de stick slip augmente en fonction de l'augmentation de pression de confinement, mais ce phénomène n'est pas observé dans les simulations. A noter qu'il existe des lois de frottement plus complexe (revue détaillée des différents modèles dans [21]), mais l'influence éventuelle du choix de modèle n'est pas traité dans cette étude.

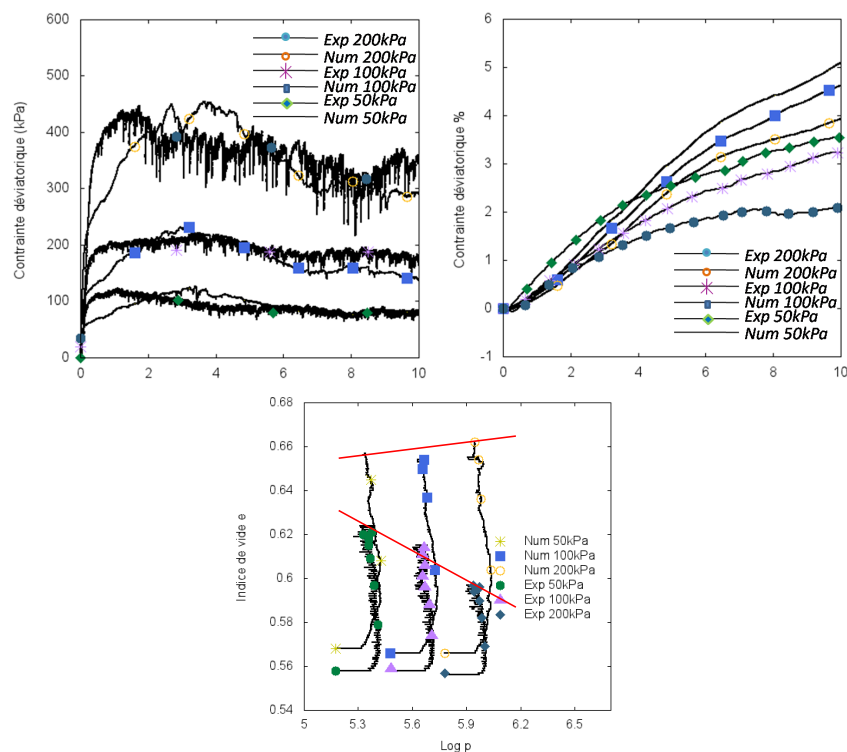


FIGURE 3.29: Confrontation des courbes obtenues par simulation numérique avec les résultats expérimentaux pour trois différents confinement 50kPa, 100kPa, 200kPa, (a) contraintes déviatoriques (b) évolution de la déformation volumique (c) Indice des vides en fonction de log p

Les courbes numériques de déformation volumique ne suivent pas exactement les courbes expérimentales. Expérimentalement, la pente au début de l'essai est plus forte que dans les simulations. Au contraire les déformations volumiques numériques sont supérieures aux déformations expérimentales au delà d'environ 3% de déformation axiale. Ceci pourrait être dû au fait que notre simulation utilise une condition rigide cylindrique. L'échantillon expérimental se déforme irrégulièrement en début d'essais, mais au delà du pic, il ne peut plus être considéré comme un cylindre. Pareil pour la



courbe d'indice des vides en fonction de logarithme  $p$ .

Les angles de frottement expérimentaux et numériques sont comparés dans le Tableau 3.7 page 111 et Tableau 3.8 page 111. Au pic, les angles de frottement obtenus par la simulation et dans les essais sont respectivement de  $27,2^\circ$  et  $27,9^\circ$ . Au palier, les angles de frottement par la simulation et expérimentaux sont respectivement de  $25,0^\circ$  et  $24,0^\circ$ . Les résultats obtenus au pic sont un peu meilleurs qu'au palier. Ceci démontre clairement que notre modèle DEM est capable de reproduire correctement le comportement mécanique macroscopique sur des billes de verres dans les essais triaxiaux expérimentaux jusqu'au pic. Au delà du pic, des différences sont observées mais la comparaison reste cependant correcte.

TABLE 3.7: Angles de frottement pour échantillons denses au pic

	$p_{conf}(kPa)$	$q(kpa)$	$p'(kpa)$	$M$	$\varphi_{pic}$
Exp	50	108	86	1,26	27,2
	100	213	171	1,25	
	200	412	337	1,22	
Num	50	113	88	1,29	27,9
	100	232	177	1,31	
	200	433	344	1,26	

TABLE 3.8: Angles de frottement pour échantillons denses au palier

	$p_{conf}(kPa)$	$q(kpa)$	$p'(kpa)$	$M$	$\varphi_{pal}$
Exp	50	92	81	1,14	25,0
	100	173	158	1,10	
	200	335	312	1,07	
Num	50	91	80	1,13	24,0
	100	152	151	1,01	
	200	298	299	1,00	

Comme dans la partie expérimentale, les simulations sur les empilements moyennement denses sont testées. Pour ce faire, le nombre de particules est réduit de 4600 à 4000 par rapport aux empilements denses. Les essais sont étudiés pour trois pressions de confinement 50 kPa, 100 kPa, et 200 kPa. Les paramètres mécaniques des échantillons sont maintenus identiques à ceux des empilements denses.

La Figure 3.30 page 112(a) montre les confrontations de courbes de contraintes déviatorique expérimentales et numériques sous trois pressions de confinement 50 kPa, 100 kPa, 200 kPa. On voit que la courbe numérique de 50 kPa se superpose très bien avec la courbe expérimentale. Pour les courbes 100 kPa et 200 kPa, les valeurs sont un peu faibles par rapport aux résultats expérimentaux. Ces résultats numériques sur empilements moyennement denses sont plus proches des résultats expérimentaux que dans le cas des empilements denses. Concernant les stick-slips, nous n'avons pas non

plus observés l'augmentation des amplitudes des stick-slips dans ces simulations sur empilement moyennement denses, alors qu'on les retrouve systématiquement dans les essais expérimentaux.

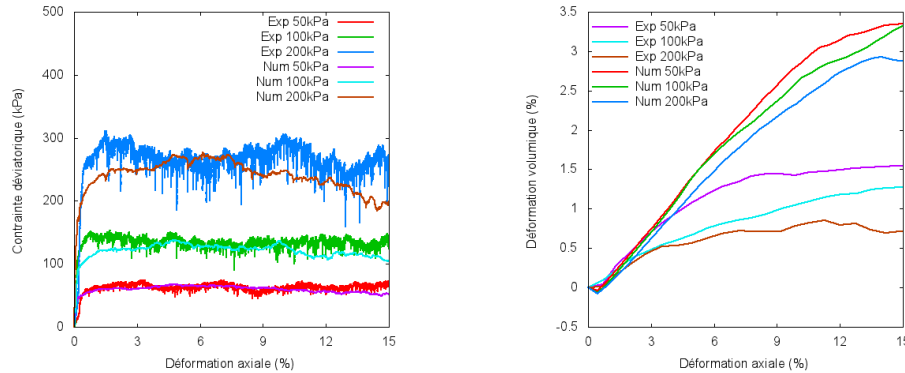


FIGURE 3.30: Confrontation des courbes obtenues par simulation numérique pour des empilements moyennement denses avec les résultats expérimentaux pour trois différents confinements 50 kPa, 100 kPa, 200 kPa, (a) contraintes déviatorique (b) évolution de la déformation volumique

La Figure 3.30 page 112(b) montre les comparaisons des courbes de déformations volumiques expérimentales et numériques sous trois pressions de confinement 50kPa, 100kPa, 200kPa. Les différences entre les résultats numériques et expérimentaux sont plus marquées que dans la comparaison avec des empilements denses. Ceci est probablement dû au fait que les déformations des échantillons moyennement denses sont plus éloignées de la forme cylindrique que celles des échantillons denses à la fin de cisaillement. la conditions cylindrique peine donc à suivre les déformations volumique pour les échantillons moyennement denses.

TABLE 3.9: Angles de frottement pour échantillons moyennement denses au pic

	$p_{conf}(kPa)$	$q(kpa)$	$p'(kpa)$	$M$	$\varphi_{pic}$
Exp	50	73	74	0,98	
	100	153	151	1,01	23,3
	200	308	303	1,02	
Num	50	72	74	0,97	
	100	149	150	1,00	22,8
	200	287	296	0,97	

Les angles de frottement sont comparés également pour les échantillons moyennement denses. Dans l'état caractéristique, les angles de frottement obtenus par la simulation et dans les essais sont respectivement de  $23,3^\circ$  et  $22,8^\circ$ . Au palier, les angles de frottement numériques et expérimentaux sont respectivement de  $23,2^\circ$  et  $20,1^\circ$ . Premièrement, les angles de frottement calculés au pic par les simulations sont plus proches des résultats expérimentaux qu'au palier. Ceci nous conduit à la même conclusion

que précédemment, à savoir que notre modèle est capable de reproduire correctement le comportement mécanique macroscopique sur des billes de verres dans les essais triaxiaux jusqu'au pic. Deuxièmement, on observe que les angles de frottement obtenus au pic et au palier par les essais expérimentaux sont assez proches. Par contre, il y a  $2,7^\circ$  de différence entre les angles de frottement obtenus au pic et au palier par les simulations.

TABLE 3.10: Angles de frottement pour échantillons moyennement denses au palier

	$p_{conf}(kPa)$	$q(kpa)$	$p'(kpa)$	$M$	$\varphi_{pal}$
Exp	50	73	74	0,98	
	100	152	151	1,01	23,2
	200	305	302	1,01	
Num	50	72	74	0,97	
	100	103	134	0,77	20,1
	200	203	268	0,76	

## 3.8 Étude paramétrique sur l'influence des paramètres des lois de contact

### 3.8.1 Influence du frottement

Le coefficient de frottement est l'un des premiers paramètres à étudier dans la modélisation DEM. Ce coefficient est lié directement aux contacts de deux particules et influence fortement la valeur de la force tangentielle.

Dans un essai triaxial, il y a trois différents coefficients de frottement dans un échantillon numérique. Ce sont le coefficient de frottement inter-particule  $\mu_{gg}$ , le coefficient de frottement particule-condition paroi rigide cylindrique  $\mu_{gw}$  et le coefficient de frottement particule-pierre poreuse  $\mu_{gp}$  (le plateau supérieur et inférieur de l'échantillon).

Dans un premier temps, nous étudions le coefficient de frottement inter-particules.

#### 3.8.1.1 Coefficient de frottement Inter-Particules

Quatre échantillons numériques de différents coefficients de frottement  $\mu_{gg}=0,1; 0,2; 0,3; 0,5$  ont été préparés depuis le début de l'étape isotrope. Les autres paramètres sont listés dans le Tableau 3.11 page 114.

Dans la simulation de l'essai triaxial, 3 coefficients de frottement interviennent. Ce sont coefficient de frottement inter-particule  $\mu_{gg}$ , coefficient de frottement particule-condition paroi rigide cylindrique  $\mu_{gw}$ , coefficient de frottement particule-pierre poreuse  $\mu_{gp}$  (le plateau supérieur et inférieur de l'échantillon).

TABLE 3.11: Paramètres pour l'étude d'influence du coefficient de frottement inter-particule

Module de Young (grain et paroi)	65GPa
Coefficient de Poisson	0,25
Coefficient de Frottement grain-grain $\mu_{gg}$	0,1 ; 0,2 ; 0,3 ; 0,5
Coefficient de Frottement grain-paroi $\mu_{gw}$	0,05
Coefficient de Frottement grain-pierre poreuse $\mu_{gp}$	0,25
Coefficient de Roulement grain-grain $\mu_{grr}$	0,01
Pression de confinement $P_{conf}$ (kPa)	200
Pas de temps $\Delta t$ (s)	$5 \times 10^{-8}$
Vitesse de cisaillement $\nu$	0,04

Dans un premier temps, nous étudions le coefficient de frottement inter-particules. Quatre échantillons numériques de différents coefficients de frottement  $\mu_{gg}=0,1 ; 0,2 ; 0,3 ; 0,5$  sont préparés depuis le départ de l'étape d'isotrope.

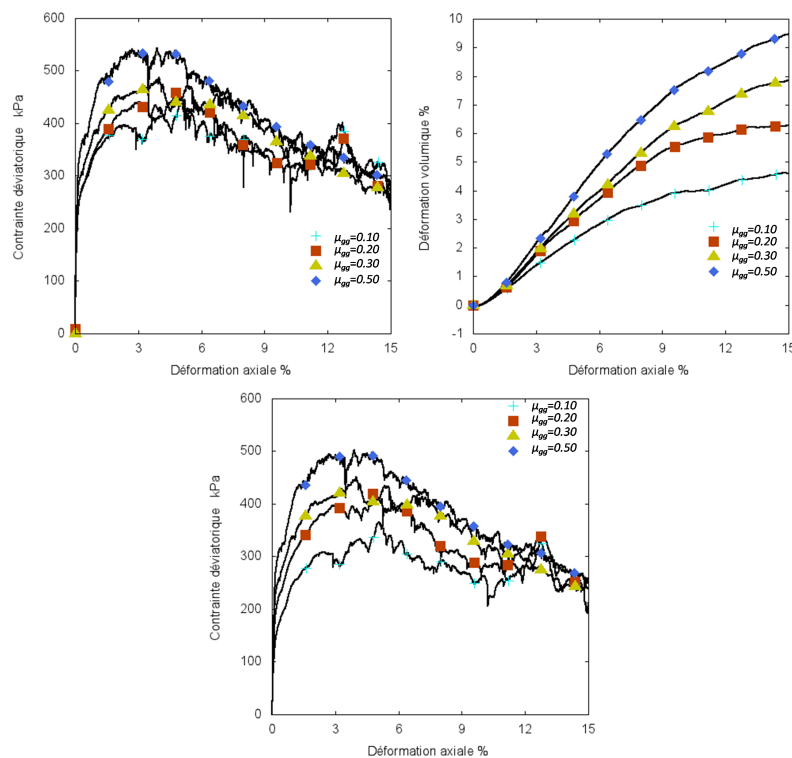


FIGURE 3.31: Influence du coefficient de frottement inter-particules sur (a) la contrainte déviatorique; (b) la courbe de déformation volumique; (c) la courbe du tenseur de contraintes déviatoriques sous pression de confinement 200 kPa

Figure 3.31 page 114(a) montre l'évolution de la contrainte déviatorique en fonction de 4 différents coefficients de frottement. On observe que les contraintes déviatorique augmentent avec l'augmentation de coefficient de frottement inter-particule. En plus, les allures de la courbe contrainte déviatorique de 4 coefficients de frottement ne

sont pas tout à fait pareils. Sur la courbe  $\mu_{gg}=0,1$ , la valeur de pic de la contrainte déviatorique n'est pas autant évidente que les 3 autres courbes. Par contre, les pics de trois courbes apparaissent à environs 3% de déformation axiale. Ils suivent presque la même tendance. En conclusion, l'augmentation de coefficient de frottement inter particule renforce la résistance entre les particules.

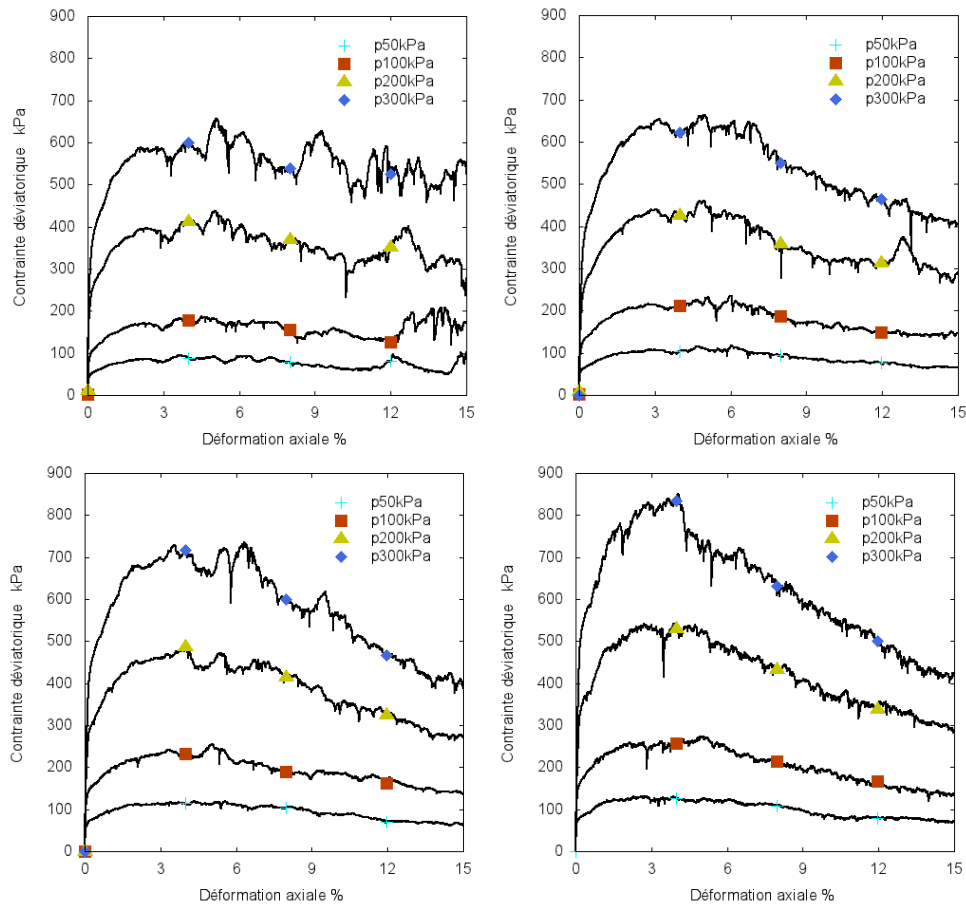


FIGURE 3.32: Influence du frottement particule-particule (a)  $\mu_{gg} = 0,1$  (b)  $\mu_{gg} = 0,2$  (c)  $\mu_{gg} = 0,3$  (d)  $\mu_{gg} = 0,5$  sur la contrainte déviatorique sous différentes pressions de confinement 50kPa, 100kPa, 200kPa, 300kPa

Figure 3.31 page 114(b) concerne la courbe déformation volumique en fonction de la déformation axiale. On constate que la déformation volumique augmente avec l'augmentation de coefficient de frottement. Ce phénomène est aussi observé dans le chapitre 2 et montré dans la littérature [121]. En réalité, les particules avec un faible coefficient de frottement sont plus faciles à trouver des vides entre les particules et se stabilisent (contractance). Par contre, les particules avec un coefficient de frottement plus élevés sont plus difficiles à bouger vers les vides inter-particules, mais préfèrent à chercher vers l'espace extérieur de l'empilement (dilatance). C'est la raison pour laquelle la déformation volumique de l'échantillon monte avec l'augmentation de coefficient de frottement inter-particules.

Ces tendances numériques à la fois dans la contrainte déviatorique et la déformation volumique sont concordantes avec les résultats expérimentaux qui ont été obtenus sur la modification de texture des billes dans le chapitre 2.

Les influences du coefficient de frottement inter particule sur la courbe de contrainte déviatorique sous différentes pressions de confinement sont présentées dans la Figure 3.32 page 115.

Le Tableau 3.12 page 116 montre l'angle de frottement calculé à l'état caractéristique et à l'état critique pour différents coefficients de frottement grain-grain. On observe que l'angle de frottement augmente à l'état caractéristique avec l'augmentation du coefficient de frottement grain-grain. Par contre, l'augmentation de l'angle de frottement à l'état critique tends vers une valeur limite au tour de  $23^\circ$ .

TABLE 3.12: Valeurs des caractéristiques pour mélanges des empilements par modélisations

$\mu_{gg}$	$P_{conf}$	$q_{pic}$	$P'_{pic}$	$M_{pic}$	$\varphi_{pic}$	$q_{pal}$	$P'_{pal}$	$M_{pal}$	$\varphi_{pal}$
0,1	50	92	81	1,14	26,6	95	82	1,16	23,2
	100	188	163	1,16		153	151	1,01	
	200	432	344	1,26		302	301	1,00	
	300	651	517	1,26		434	445	0,98	
0,2	50	112	87	1,28	28,1	78	76	1,03	22,4
	100	235	178	1,32		152	151	1,01	
	200	467	356	1,31		269	291	0,93	
	300	679	526	1,29		402	434	0,93	
0,3	50	117	89	1,31	28,8	75	75	1,00	21,9
	100	252	184	1,37		137	146	0,94	
	200	496	365	1,36		272	291	0,94	
	300	718	539	1,33		392	431	0,91	
0,5	50	125	92	1,36	29,9	78	76	1,03	22,8
	100	287	196	1,47		147	149	0,99	
	200	534	378	1,41		298	299	1,00	
	300	849	583	1,46		416	439	0,95	

### 3.8.1.2 Coefficient de frottement Particule-Paroi

Souvent dans les littératures, seul le coefficient de frottement inter-particules est pris en compte, en général le coefficient de frottement entre les particules et la condition limite est nul [65][71][93][141]. Peu de travaux étudient l'influence du coefficient de frottement entre les particules et la condition paroi [67][150]. Mais en réalité, le coefficient de frottement entre les particules et la condition limite a non seulement une influence sur la déformation locale de l'échantillon[26], mais aussi sur la contrainte déviatorique des matériaux. L.Cui et O'sullivan [67] ont souligné l'influence du coefficient de frottement particule-membrane sur la localisation du gonflement de l'échantillon dans l'étape de cisaillement. Ils ont montré que cette dernière change avec la variation du coefficient de frottement particule-membrane. Si ce coefficient de

frottement est nul, le gonflement de l'empilement se situe plutôt en bas de l'échantillon. Quand on augmente ce coefficient à 0,1, le gonflement de l'échantillon est situé au milieu de l'échantillon, Figure 3.33 page 117. C'est-à-dire que la condition limite donne également une résistance à l'empilement.

Dans notre cas, la forme de la paroi ne change pas pendant la simulation, nous ne pouvons donc pas effectuer la même observation de la déformation locale de l'échantillon que L.Cui et O'Sullivan [67]. En revanche, l'évolution de la contrainte déviatorique en fonction de ce paramètre peut être étudiée.

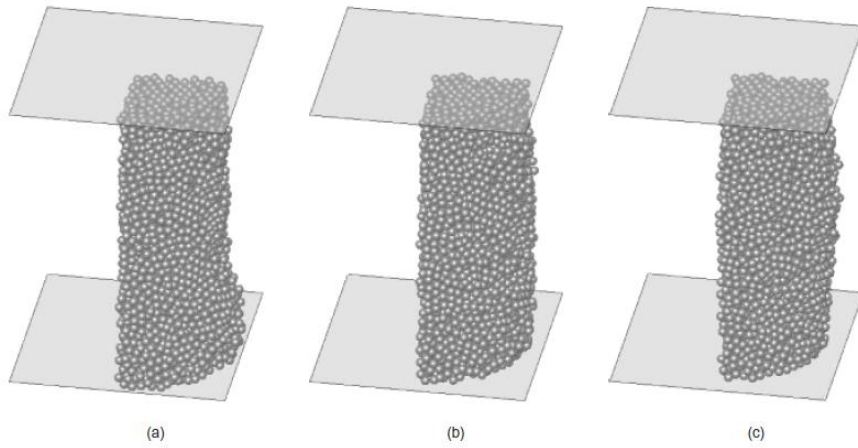


FIGURE 3.33: Influence de frottement particule-membrane sur la position de gonflement de l'empilement [67] : (a)  $\mu_{gw}=0,0$ ; (b)  $\mu_{gw}=0,05$ ; (c)  $\mu_{gw}=0,1$

TABLE 3.13: Paramètres retenus pour l'étude de l'influence du coefficient de frottement particules-paroi

Module de Young	65GPa
Coefficient de Poisson	0,25
Coefficient de Frottement grain-grain $\mu_{gg}$	0,15
Coefficient de Frottement grain-paroi $\mu_{gw}$	0,0 ; 0,05 ; 0,10 ; 0,15 ; 0,20
Coefficient de Frottement grain-pierre poreuse $\mu_{gp}$	0,25
Coefficient de Roulement grain-grain $\mu_{grr}$	0,01
Pression de confinement $P_{conf}(kPa)$	200
Pas de temps $\Delta t(s)$	$5 \times 10^{-8}$
Vitesse de cisaillement $\nu$	0,04

Cinq différents coefficients de frottement particules - paroi rigide sont testés dans notre travail. Comme la membrane dans l'essai expérimental est un matériau plus lisse que les billes de verre, les coefficients de frottement choisis sont plus petits que le coefficient inter-particules  $\mu_{gw}=0,0-0,20$ . Les paramètres utilisés sont rassemblés dans le Tableau 3.13 page 117.

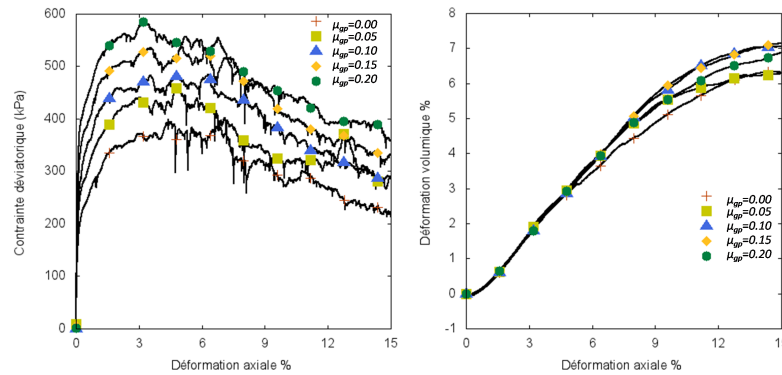


FIGURE 3.34: Influence du coefficient de frottement particule-paroi sur (a) la courbe de la contrainte déviateur et (b) déformation volumique en fonction de déformation axiale sous pression de confinement 200kPa

La Figure 3.34 page 118 montre l'évolution de la contrainte déviatorique en fonction de la déformation axiale tracée pour différents coefficients de frottement entre particules et condition paroi rigide. Les résultats montrent la même tendance sur les 5 courbes avec différents coefficients de frottement particules-condition limite. Par contre, la contrainte déviatrice augmente d'environ 200kPa quand ce coefficient passe de 0,0 à 0,2. C'est-à-dire que la condition paroi rigide donne une résistance à l'empilement non négligeable. L'influence de ce paramètre sur la déformation volumique semble au contraire être faible. En conclusion, le coefficient de frottement entre particule et condition paroi a une influence évidente surtout sur la contrainte déviatorique. Dans les simulations DEM de l'essai triaxial, il est à conseiller de prendre en compte ce coefficient et de ne pas simplement le fixer à zéro.

### 3.8.1.3 Coefficient de frottement particule-pierre poreuse (plateaux horizontaux)

Dans un essai triaxial expérimental, deux pierres poreuses sont placées en haut et en bas de l'échantillon afin de faciliter la pénétration d'eau. La texture de ces pierres poreuses est plus rugueuse que les billes de verre et la membrane, nous avons choisi d'étudier ce coefficient individuellement. Les paramètres de ces simulations sont listés dans le Tableau 3.14 page 119.

La Figure 3.35 page 119 montre les courbes déviatoriques et les courbes de déformations volumiques obtenues pour différents coefficients de frottement entre particules et pierre poreuse. Les différences obtenues pour la contrainte et la déformation volumique sont très faibles. On observe une légère augmentation de la contrainte déviatorique lorsque ce coefficient de frottement passe de 0 à une valeur non nulle, mais cette influence n'est plus visible pour des valeurs différentes non nulles du coefficient. Par contre, la courbe de déformation volumique ne varie pratiquement pas en fonction de ce coefficient de frottement entre les particules et les pierres poreuses. En conclusion,



l'existence du coefficient de frottement particule et pierre poreuse influence légèrement la courbe déviatorique de l'échantillon, mais la variation de ce coefficient est moins importante que celle obtenue pour les coefficients inter-particule et particule-membrane.

TABLE 3.14: Paramètre de l'influence du coefficient de frottement particules-pierres poreuses

Module de Young	65GPa
Coefficient de Poisson	0,25
Coefficient de Frottement grain-grain $\mu_{gg}$	0,15
Coefficient de Frottement grain-paroi $\mu_{gw}$	0,05
Coefficient de Frottement grain-pierre poreuse $\mu_{gp}$	0,25 ; 0,50 ; 0,70
Coefficient de Roulement grain-grain $\mu_{grr}$	0,01
Pression de confinement $P_{conf}(kPa)$	200
Pas de temps $\Delta t(s)$	$5 \times 10^{-8}$
Vitesse de cisaillement $\nu$	0,04

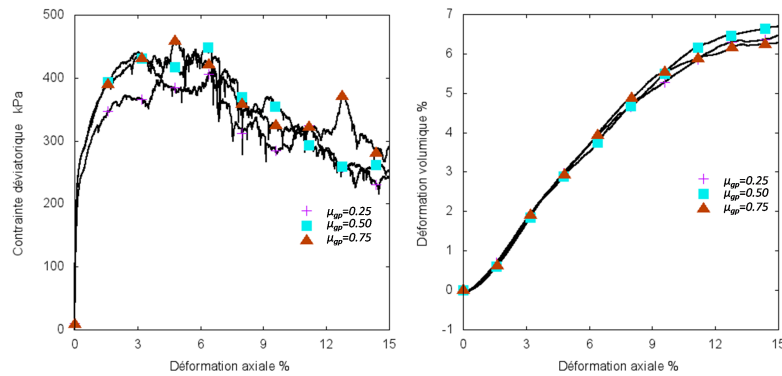


FIGURE 3.35: Influence du coefficient de frottement particule-pierre poreuse sur la courbe de la contrainte déviatorique et déformation volumique en fonction de déformation axiale sous pression de confinement 200kPa

### 3.8.2 Influence du coefficient de roulement

Lorsque deux particules anguleuses entrent en contact, leur angularité empêche les glissements et les rotations. Dans notre code DEM, les particules sont parfaitement sphériques, donc pour tenir compte de ce phénomène qui joue un rôle très important dans l'essai triaxial [63][66][132], le coefficient de roulement est introduit dans le code. Dans cette section, nous allons étudier l'influence de ce coefficient.

Différentes valeurs du coefficient de roulement ont été étudiées (Tableau 3.15 page 120). L'essai avec un coefficient de roulement nul correspond au cas du roulement libre. C'est à dire que le coefficient de roulement n'est pas pris en compte dans la simulation. Les particules roulent librement dans les essais.

TABLE 3.15: Paramètres de l'influence de coefficient de résistance aux roulements

Module de Young	65GPa
Coefficient de Poisson	0,25
Coefficient de Frottement grain-grain $\mu_{gg}$	0,15
Coefficient de Frottement grain-paroi $\mu_{gw}$	0,05
Coefficient de Frottement grain-pierre poreuse $\mu_{gp}$	0,25
Coefficient de Roulement grain-grain $\mu_{grr}$	0,0;0,05;0,5;1,0
Pression de confinement $P_{conf}(kPa)$	200
Pas de temps $\Delta t(s)$	$5 \times 10^{-8}$
Vitesse de cisaillement $\nu$	0,04

Quatre simulations avec différents coefficients de roulement sont présentées dans la Figure 3.36 page 120. On observe dans la Figure qu'entre les courbes  $\mu_r=0$  et 0,05, il y a une différence évidente. La valeur au pic passe de 400kPa à 550kPa, la contrainte résiduelle augmente de 270kPa à 350kPa, et la déformation volumique augmente de 6,0% à 8,0 % en fin d'essai. Entre les courbes  $\mu_r=0,05$  et 0,5, l'augmentation de la valeur au pic de la courbe déviatorique et de la déformation volumique est beaucoup plus faible (malgré une multiplication par 10 du coefficient de roulement). La valeur au pic augmente de 550kPa à 580kPa, la contrainte résiduelle reste presque la même et la déformation volumique en fin d'essai augmente de 8,0% à 9,2%. Entre les courbes  $\mu_r=0,5$  et 1,0, on observe que la courbe déviatorique et la courbe de déformation volumique en fonction de la déformation axiale sont superposées, c'est à dire qu'il n'y a pas d'influence entre ces variations de coefficients.

En conclusion, une différence importante sur le comportement mécanique des matériaux est observée entre l'essai avec roulement libre et l'essai avec résistance au roulement.

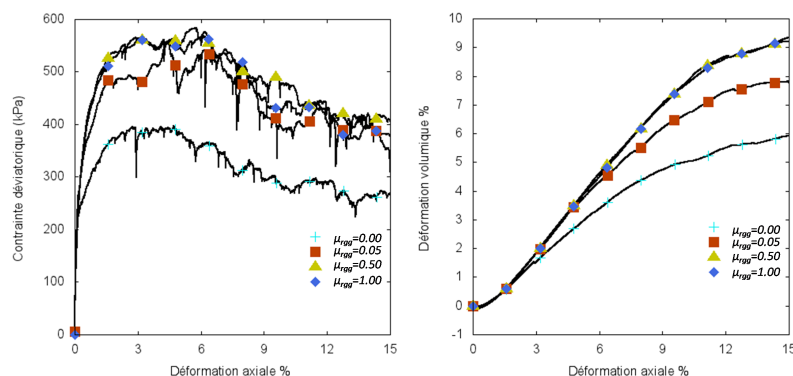


FIGURE 3.36: Influence de coefficient de roulement sur (a) la contrainte déviatorique et (b) déformation volumique de l'essai triaxial

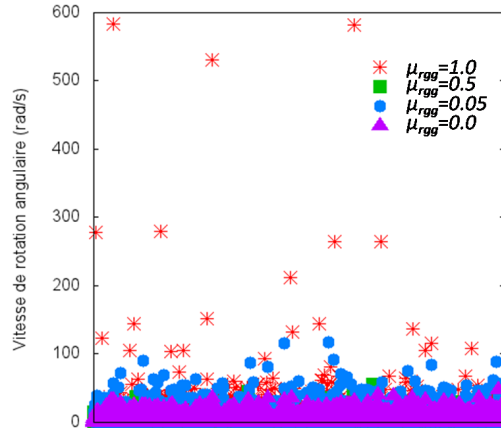


FIGURE 3.37: Distribution de la rotation de chaque particule dans l'empilement selon différents coefficients de roulement sous pression de confinement 200kPa

Le coefficient de roulement permet d'opposer un moment résistant à la rotation des particules. Macroscopiquement, la courbe de contrainte déviatorique nous indique l'effet de ce coefficient. Maintenant, une étude supplémentaire sur la vitesse angulaire de chaque particule nous permet d'étudier l'influence de ce coefficient d'un point de vue microscopique.

Dans la Figure 3.37 page 121, nous avons représenté la vitesse angulaire de chaque particule de l'empilement pour différents coefficients de roulement. On remarque que les vitesses de rotation maximales obtenues pour des coefficients de roulement de 0,05, 0,5 et 1,0 sont plus faibles que celles avec coefficient de roulement nul. Pour la plupart des particules, les vitesses angulaires sont comprises entre 0 et 100 rad/s. La vitesse angulaire diminue avec l'augmentation du coefficient de roulement.

### 3.8.3 Influence de l'indice des vides initial

Afin d'étudier l'influence de l'indice des vides initial sur le comportement mécanique de l'empilement dans la phase de cisaillement, quatre simulations ont été effectuées. Chaque échantillon numérique est préparé à partir d'un même état initial après sédimentation et densifié à différents indices des vides pour éliminer l'influence de l'arrangement de l'empilement sur le résultat final. Les indices des vides initiaux des 4 échantillons avant le départ de l'étape de cisaillement sont listés dans le Tableau 3.16 page 122. Dans l'étape de cisaillement, les simulations de chaque échantillon sont réalisées avec les mêmes paramètres de simulation (coefficient de frottement, coefficient de roulement, vitesse de cisaillement, etc). La pression de confinement est maintenue à 200kPa.

TABLE 3.16: Indice des vides initial des quatre échantillons préparés pour le test

Nom Essai	$e_1$	$e_2$	$e_3$	$e_4$
Indice de vide $e$	0,632	0,597	0,583	0,572
Compacité $c$	0,613	0,626	0,630	0,636

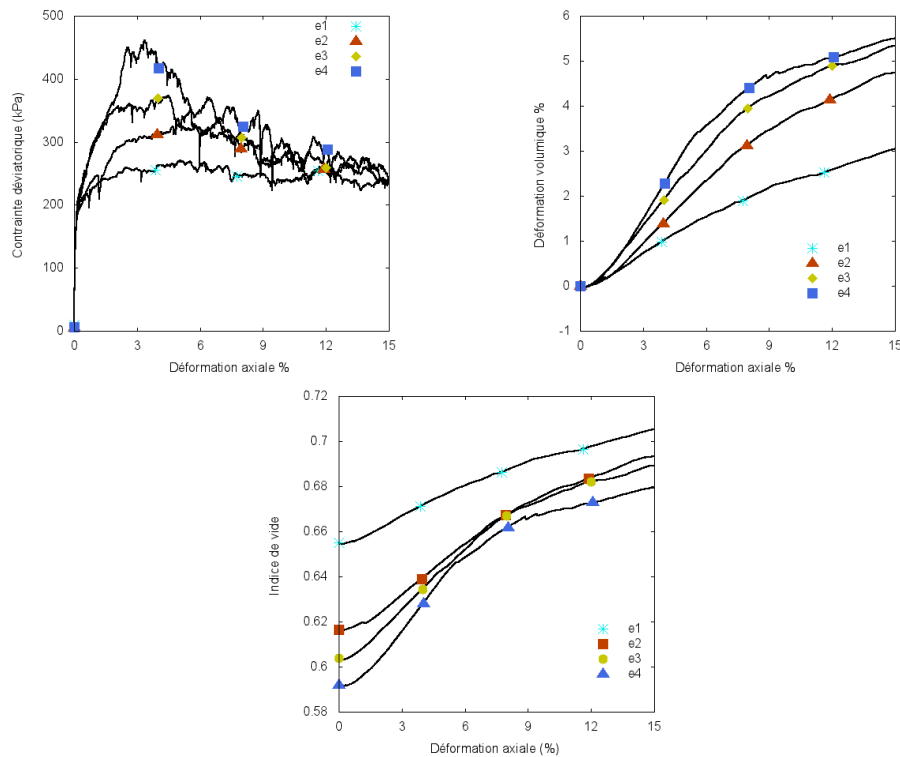


FIGURE 3.38: Influence de l'indice des vides sur (a) la contrainte déviatorique (b) la déformation volumique en fonction de la déformation axiale (c) Évolution des indices des vides

La Figure 3.38 page 122(a) montre la contrainte déviatorique en fonction de la déformation axiale dans la phase de cisaillement. Dans le cas de l'échantillon le plus dense  $e_4$ , le déviateur augmente jusqu'à une valeur d'environ 460kPa à la déformation axiale de 4%. Avant d'atteindre le pic, la contrainte déviatorique augmente pendant que la déformation axiale augmente. Après avoir atteint le pic, la contrainte déviatorique diminue lorsque la déformation axiale augmente. La contrainte déviatorique à l'état critique tend vers la valeur de 230kPa. Pour les échantillons avec l'indice des vides initiaux  $e_2$  et  $e_3$ , les valeurs au pic sont environs de 350kPa et 300kPa à la déformation axiale de 4% et 5%. Les contraintes déviatrices résiduelles sont maintenues à 230kPa. Pour l'échantillon le plus lâche, il n'y a pas de valeur de pic évidente, la contrainte déviatorique augmente jusque à 230kPa et puis reste constante. Ces résultats montrent le rôle de l'indice de vide dans le comportement macroscopique du matériau : plus l'empilement est dense, plus la valeur au pic est élevée dans l'état caractéristique. Par

contre, l'état critique est indépendant de l'indice des vides initial du matériau.

La Figure 3.38 page 122(b) montre l'influence de l'indice des vides sur la déformation volumique de l'échantillon, on constate que toutes les courbes augmentent lors de l'évolution de la déformation axiale. Les empilements les plus denses se déforment plus que les empilements moins denses. La même conclusion a été tirée dans le chapitre 2 en comparant les échantillons denses et moyennement denses.

Théoriquement, pour les échantillons d'un même matériau avec différents indices des vides initiaux, les indices des vides tendent vers une même valeur critique dans l'état critique [7]. La Figure 3.38 page 122(c) montre l'évolution des indices de vides de nos quatre échantillons. Toutes les courbes augmentent vers une valeur critique. Comme nos simulations s'arrêtent à 15% déformation axiale, on ne peut pas savoir la valeur critique de l'indice de vide dans l'état critique, mais on peut estimer, à partir de la courbe obtenue pour e4, que cette valeur serait autour de 0,705.

### 3.8.4 Influence de la vitesse de cisaillement

La vitesse de cisaillement est un facteur important dans la simulation DEM qui doit être choisie soigneusement [139]. Si la vitesse est trop rapide, un effet dynamique va affecter la réponse du matériau, ce qui n'est pas l'objectif dans cette thèse. Radjai [151][152] a proposé une équation pour le nombre d'inertie pour savoir si le comportement d'un milieu granulaire correspond à un écoulement ou à un cas quasi-statique. L'équation de ce nombre d'inertie en 3D est donnée par :

$$I = \dot{\epsilon}_q \sqrt{\frac{m}{pd}} \quad (3.29)$$

Où  $\dot{\epsilon}_q$  est le taux de déformation de cisaillement,  $m$  est la masse d'une particule,  $p$  est la pression de confinement,  $d$  est le diamètre de la particule. Selon Radjai, le nombre d'inertie doit être inférieur à 1.0 pour être en état quasi-statique. Dans la thèse de Sibille [69], une valeur de  $I < 10^{-3}$  est proposée pour considérer le matériau en état quasi-statique.

La Figure 3.39 page 124 montre les résultats des quatre simulations avec différentes vitesses de cisaillement. Ces quatre essais sont réalisés sur un échantillon numérique initial identique. La Figure 3.39 page 124(a) montre les courbes de contraintes déviatoriques. On voit que pour les différentes vitesses de cisaillement de  $0,04m/s$  à  $0,2m/s$ , le nombre d'inertie est inférieur de  $10^{-3}$ , et les valeurs du nombre d'inertie varient peu ( $I=4 \times 10^{-4}$  pour  $0,04m/s$  et  $I=7 \times 10^{-4}$  pour  $0,2m/s$ ). Lorsque les vitesses augmentent à  $0,4m/s$  ( $I=1.1 \times 10^{-3}$ ) et  $2.0m/s$  ( $I=5.2 \times 10^{-3}$ ), le nombre d'inertie est supérieur de  $10^{-3}$ , les variations de la contrainte déviatorique sont plus évidentes. La Figure 3.39 page 124(b) montre les déformations volumiques dans ces simulations numériques. Comme pour la courbe déviatorique, les déformations volumiques ne changent pas beaucoup lorsque le nombre d'inertie est inférieur de  $10^{-3}$ . Ensuite,

les courbes changent plus lorsque le nombre d'inertie dépasse  $10^{-3}$ . Donc, dans nos simulations, le nombre d'inertie ne peut pas dépasser  $I < 10^{-3}$ , sinon, on risque de quitter le régime quasi-statique.

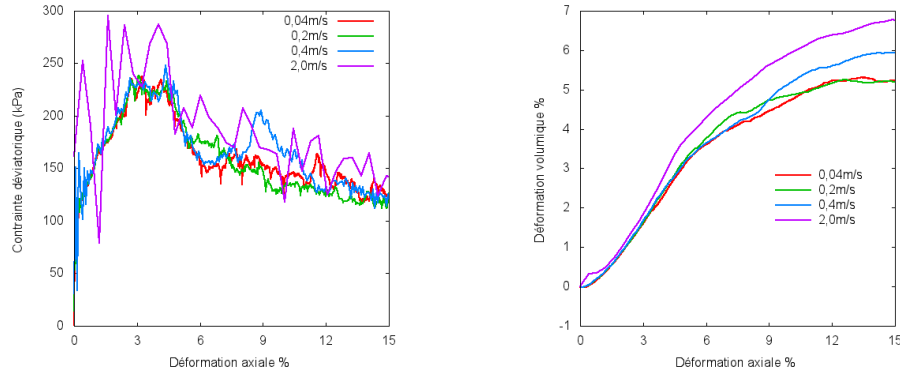


FIGURE 3.39: Courbe courbe déviatorique des essais numérique avec différents vitesses de chargement (b) courbe déformation volumique des essais numériques avec différents vitesses de chargement

### 3.8.5 Indice de friction

L'indice de friction est un paramètre qui représente l'état de glissement de la particule : un indice de friction inférieur à 1,0 signifie que le contact n'est pas glissant. C'est indice est calculé par la formule suivante :

$$f = \sum_{k=1}^{k=n} \frac{F_t}{F_{coulomb}} \quad (3.30)$$

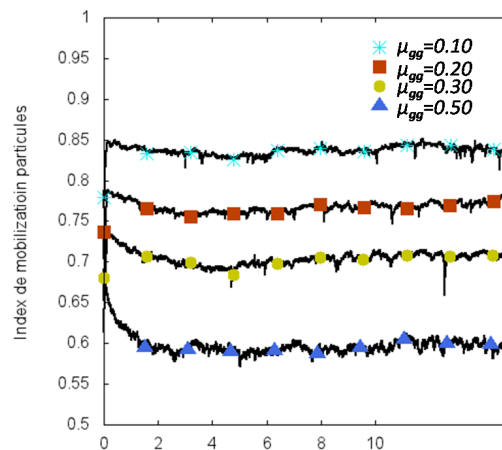


FIGURE 3.40: Évolution de l'indice de friction en fonction de différent coefficient de frottement

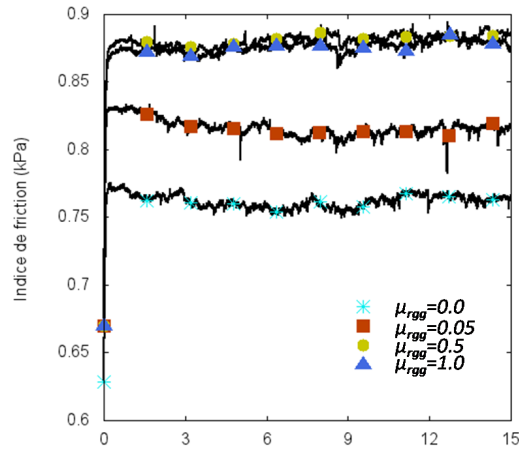


FIGURE 3.41: Évolution de l'indice de friction en fonction de différents coefficient de roulement

La Figure 3.40 page 124 montre que l'indice de friction augmente avec la diminution du coefficient de frottement. Cela veut dire que, plus on diminue le coefficient de frottement, plus il y a de grains qui se trouvent dans un état glissant. En réalité, si on regarde l'équation 3.30 page 124, l'augmentation du coefficient de frottement conduit à une augmentation de seuil de  $F_{coulomb}$ , puis  $F_t$  reste le même, donc l'indice de friction diminue.

La Figure 3.41 page 125 montre l'influence du coefficient de roulement sur l'indice de friction. Le coefficient de roulement augmente les frictions entre les particules. En effet, le moment de roulement s'oppose aux rotations, donc les forces tangentielles sont plus élevées, ce qui augmente l'indice de friction si  $F_{coulomb}$  reste le même.

La Figure 3.42 page 125 montre que la courbe de l'indice de friction ne change pas avec l'augmentation de la pression, parce que la pression n'intervient pas dans l'équation 3.30 page 124.

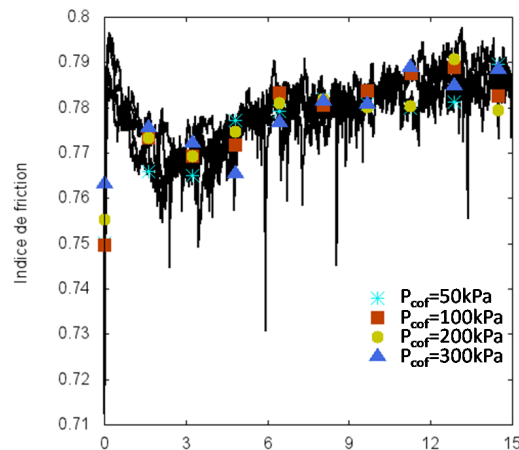


FIGURE 3.42: Évolution de l'indice de friction en fonction de différent pression de confinement

TABLE 3.17: Différents indices des vides et compacité pour 3 différents échantillons numériques avant la phase de cisaillement

	Specimen1	Specimen2	Specimen3
Indice de vide $e$	0,636	0,635	0,633
Compacité $c$	0,573	0,575	0,579

### 3.8.6 Répétition de l'essai numérique

Après avoir comparé les résultats de la simulation numérique de référence avec les résultats expérimentaux, nous voulons aussi vérifier si ce comportement mécanique numérique de la simulation triaxiale est reproductible pour différents arrangements de l'empilement.

Une série de trois échantillons numériques avec le même nombre de particules 4600 sont générés en suivant la même procédure : génération de gaz de particules, sédimentation, compaction, préparation de l'échantillon dans un état isotrope. Dans toutes ces phases, les paramètres comme le module de Young, le coefficient de poisson, le coefficient de frottement, le coefficient de roulement, la vitesse de cisaillement sont maintenues constantes afin d'éliminer l'effet de ces paramètres sur les réponses finales. Du coup, la seule différence entre ces trois échantillons vient de l'arrangement initial des particules dans le gaz, avant sédimentation (il suffit pour cela de changer la graine du générateur de nombre aléatoires).

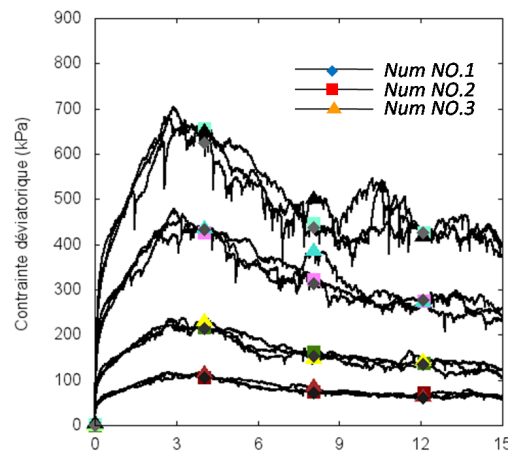


FIGURE 3.43: Répétitions des courbes déviatorique pour 3 échantillons numériques sous différentes pressions de confinement

Le Tableau 3.17 page 126 montre l'indice des vides et la compacité de ces trois échantillons numériques au début de l'étape de cisaillement :

La même vitesse de cisaillement de 0,04m/s est appliquée dans l'étape de cisaillement. Chaque échantillon est cisailé dans 4 pressions de confinement de 50kPa, 100kPa, 200kPa et 300kPa. La Figure 3.43 page 126 montre les courbes de la contrainte déviatorique. On remarque que les courbes sous la faible pression de confinement se



superposent mieux que celles sous forte pression de confinement, mais les allures suivent la même tendance et les valeurs au pic et au palier sont très proches pour les trois simulations.

### 3.9 Conclusions

Dans ce chapitre, nous avons présenté la méthode des éléments discrets (smooth DEM) pour des sphères en 3D pour modéliser l'essai triaxial de révolution. Le modèle implémenté dans le code nous permet de prendre en compte les forces de contact normal et tangentiel. La résistance au roulement entre les particules est introduite. L'accélération, puis le déplacement de chaque particule est calculé en chaque pas de temps en fonction de l'équation du mouvement selon le schéma d'intégration.

Différentes étapes sont nécessaires pour simuler l'essai triaxial de révolution, ce sont : génération d'un gaz de particules ; sédimentation des particules ; densification de l'empilement ; préparation de l'empilement dans un état isotrope ; et cisaillement de l'empilement. Chaque étape est analysée en détails dans le chapitre.

Une procédure de contrôle de la pression exercée par la condition rigide cylindrique est implémentée pour contrôler la pression latérale dans l'étape isotrope et de cisaillement. Cette condition rigide cylindrique diffère de la plupart des conditions rigides cylindrique récentes en simulant une condition limite cylindrique intégrale. Le changement de rayon du cylindre est calculé directement en fonction de la pression latérale qui varie à l'aide de la formule de Lamé.

Dans la partie concernant l'analyse des résultats, nous avons étudié les influences des paramètres micromécaniques sur le comportement macroscopique des échantillons par des simulations de l'essai triaxial. Quatre séries de simulations ont été réalisées sur l'influence du coefficient de frottement grain-grain, du coefficient de frottement grain-paroi, le coefficient de frottement grain-pierre poreuse et le coefficient de roulement grain-grain. Globalement, les résultats numériques montrent que la résistance au cisaillement augmente en fonction de l'augmentation de ces quatre paramètres micromécaniques. L'effet de chaque paramètre micromécanique est différent. Les effets du coefficient de frottement grain-grain et du coefficient de roulement sont plus importants. Le coefficient de frottement grain-paroi, qui est souvent négligé dans la littérature a également une influence non négligeable. L'effet du coefficient de frottement grain-pierre poreuse est tout à fait négligeable.

Ensuite, les comparaisons des résultats numériques et expérimentaux montre que notre modèle arrive à reproduire de manière très satisfaisante le comportement jusqu'au pic (à l'état caractéristique). Malgré la condition cylindrique, le comportement à l'état critique peut être approché. L'influence de la pression de confinement est très bien reproduite dans nos simulations et donc nous pouvons retrouver les angles intrinsèques de frottement (au pic et au palier). L'influence de la densité initiale de l'empilement

est correctement reproduite. De ce fait, le modèle de la condition limite paroi rigide cylindrique peut être utilisé pour simuler le comportement au cisaillement des matériaux granulaires dans un essai triaxial. Dans le chapitre suivant, on utilisera ce modèle pour remplacer quelques essais expérimentaux par des simulations numériques.

# 4

## **Cisaillement de milieux granulaires hétérogènes**

## 4.1 Introduction

**D**ans les matériaux granulaires naturels ou industriels, les particules sont toujours de différentes tailles. Cette caractéristique joue un rôle important dans le comportement mécanique des matériaux au sens où l'étendue granulaire des particules change radicalement leur arrangement.

Ce chapitre est consacré à l'étude du cisaillement triaxial d'échantillons hétérogènes. Il est décomposé en trois parties. Dans la première partie, on s'intéresse tout d'abord à des échantillons composés de particules monodisperses de différents diamètres afin d'étudier le lien entre la taille de la cellule et la taille des particules. La deuxième partie s'intéresse au comportement au cisaillement d'échantillons monodisperses comportant une inclusion de grande taille positionnée à différents endroits dans la cellule triaxiale. La troisième partie concerne les mélanges de particules bi-disperses.

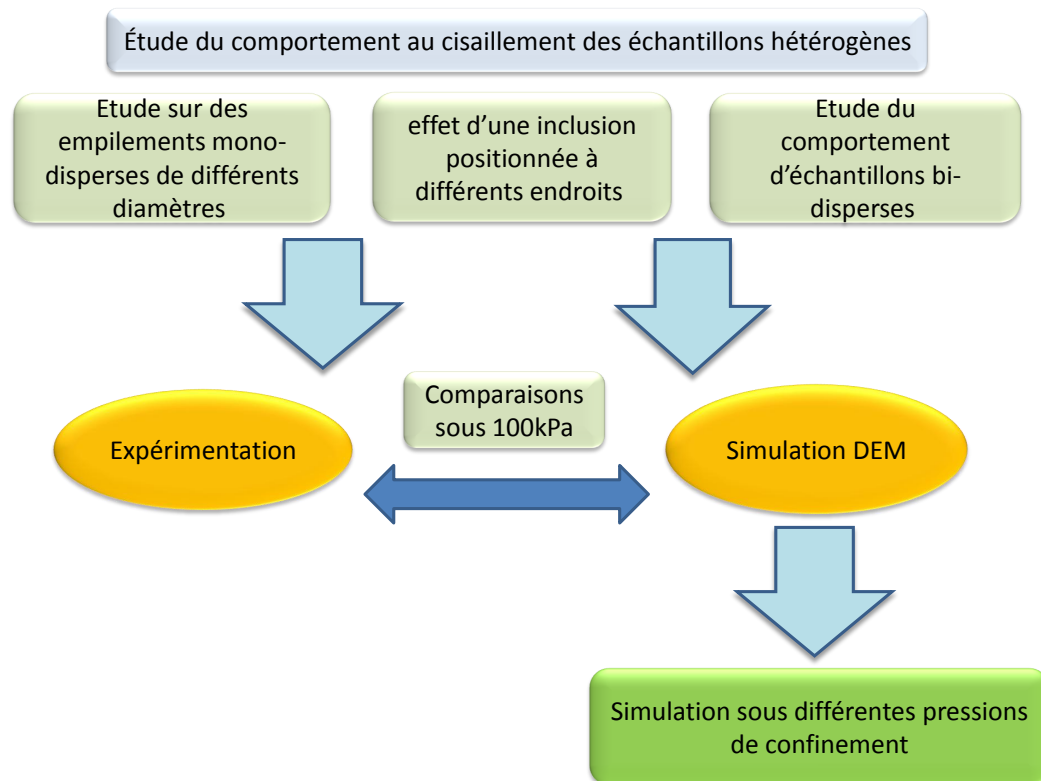


FIGURE 4.1: Schéma du contenu du chapitre 4

Dans les trois parties de ce chapitre, les études sont à la fois expérimentales et numériques. La Figure 4.1 page 130 illustre la démarche adoptée. La partie expérimentale vise à fournir des données permettant une comparaison avec les résultats de la simulation. Tous les essais triaxiaux expérimentaux sont réalisés sous une seule pression de confinement de 100kPa. Ensuite, dans la partie numérique, le modèle de l'essai triaxial développé dans le chapitre 3 est appliqué pour étudier les échantillons de

même composition par rapport aux échantillons expérimentaux. Enfin, des simulations sont réalisées sous d'autres pressions de confinement.

## 4.2 Empilement de particules monodisperses de différentes tailles

### 4.2.1 Étude expérimentale sous pression de confinement unique

Des échantillons expérimentaux composés de billes de différents diamètres (2mm, 4mm et 6mm) sont testés dans cette partie. Tous les échantillons sont fabriqués dans le même moule métallique que celui utilisé dans le chapitre 2 (diamètre 50mm, hauteur 125mm). Les billes de différents diamètres sont versées dans le moule jusqu'au remplissage complet. Le mode opératoire de préparation des échantillons est exactement le même que celui décrit dans le chapitre 2 pour fabriquer les échantillons denses. Les échantillons sont cisailés avec une vitesse de 0.1mm/s sous une pression de confinement de 100kPa.

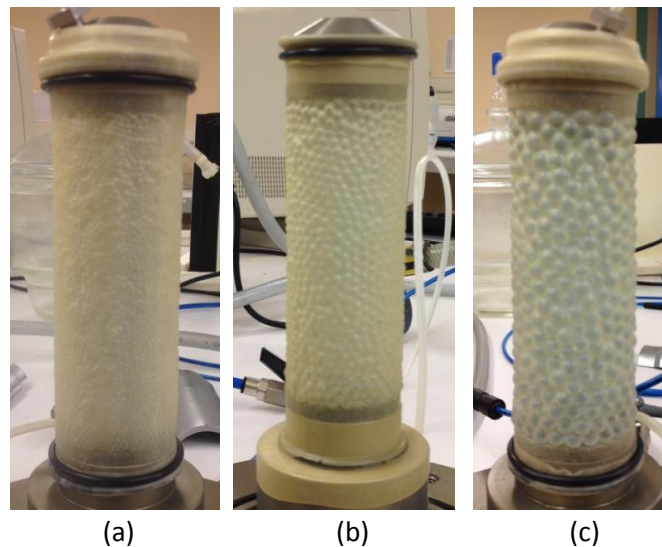


FIGURE 4.2: Échantillons initiaux composés de billes de différents diamètres (2mm, 4mm, 6mm)

Le tableau 4.1 page 132 montre les masses de billes et les indices des vides initiaux de chaque échantillon. L'indice des vides diminue légèrement lorsque la taille des billes augmente. La Figure 4.2 page 131 présente une vue de chaque empilement après remplissage. On peut voir que lorsque le diamètre des billes augmente, la pénétration de la membrane est plus importante. C'est ce qui explique la diminution de l'indice des vides avec l'augmentation de la taille des particules. Les indices des vides au début de la procédure de cisaillement dans ce chapitre sont mesurés à partir du volume d'eau désaérée injecté dans la cellule. Les erreurs de pénétration de membrane sont calculées

par la formule 2.1 page 53 présentée dans chapitre 2.

TABLE 4.1: Principales caractéristiques des échantillons de différentes tailles de billes verres

Diamètre (mm)	Masse (g)	$e_{cons}$	erreur de pénétration
2mm	392	0,585	1,1%
4mm	388	0,581	2,8%
6mm	378	0,572	4,7%

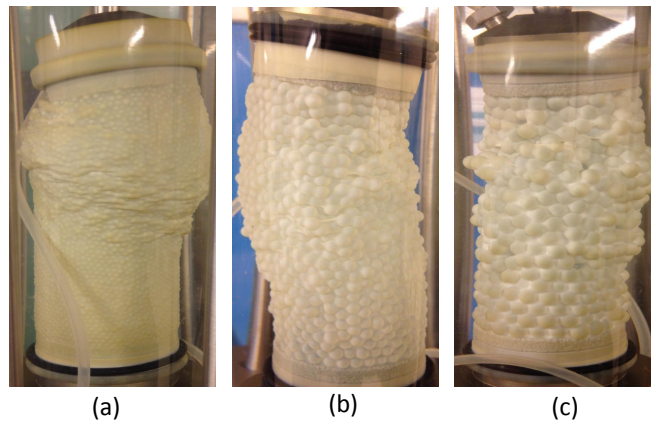


FIGURE 4.3: Déformation des trois échantillons de différentes tailles cisailés à 15% de déformation axiale

La Figure 4.3 page 132 montre la fin de l'étape de cisaillement pour les trois échantillons à 15% de déformation axiale. On voit que les échantillons mono-disperses se déforment plutôt dans la partie supérieure que dans la partie inférieure. Ceci est dû au fait que les échantillons sont cisailés par la descente du plateau supérieur ce qui favorise la déformation locale en haut des échantillons. Cette déformation localisée est plus évidente pour l'échantillon de 2mm parce qu'il comporte plus de couches que les autres échantillons. La frontière entre les parties supérieure et inférieure correspond à une bande de cisaillement. De même, pour l'échantillon de 4mm, environ dix couches en bas de l'échantillon ne se déforment pas. Pour l'échantillon de 6mm, la déformation est moins évidente que pour les deux échantillons précédents, mais on observe toutefois une faible déformation en bas de l'échantillon.

La Figure 4.4 page 133 montre la courbe de la contrainte déviatorique des échantillons composés de particules de différentes tailles. On observe une légère augmentation de la valeur au pic avec l'augmentation du diamètre des billes. Par contre, les contraintes résiduelles à l'état critique sont proches. De plus, le comportement stick-slip est plus marqué pour les billes de grand diamètre.

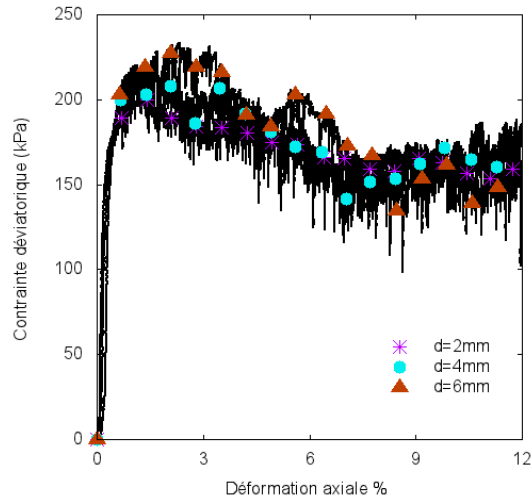


FIGURE 4.4: Courbes déviatoriques pour trois différents échantillons composés de billes de verre monodisperses de différents diamètres

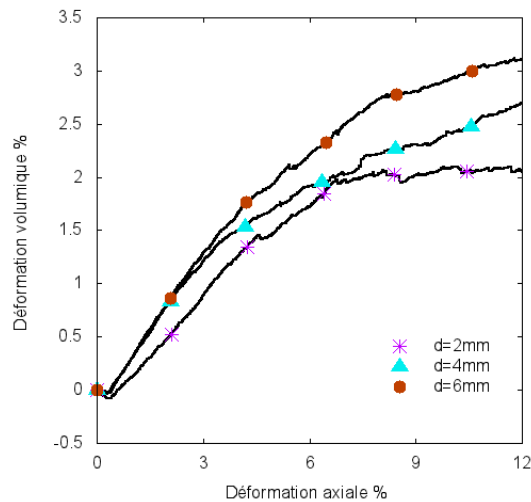


FIGURE 4.5: Courbes de déformation volumique pour trois échantillons composés des billes de verre mono-disperse de différentes diamètres

La Figure 4.5 page 133 montre les courbes de déformation volumique en fonction de la déformation axiale pour les trois échantillons. On remarque que la déformation volumique augmente avec la taille des billes. Toutefois, les différences obtenues sont assez faibles. Il n'a pas été possible, faute de temps, de réaliser une étude de répétabilité pour ces essais. Cependant, nous verrons dans le paragraphe suivant que la répétabilité des simulations diminue lorsque la taille des billes augmente. Compte tenu des faibles différences entre ces trois courbes, il faut plutôt considérer ici que la taille des particules influence peu la déformation volumique de l'échantillon. Cette conclusion rejoint celle de Novoa [121], qui n'a pas observé d'augmentation de la déformation volumique en relation avec la taille des billes. On voit ici par ailleurs, tout le bénéfice que l'on

peut tirer de la simulation numérique de l’essai triaxial pour compléter la campagne expérimentale réalisée (à noter la limitation de la nombre des particules qui entraîne l’augmentation du temps de calcul).

### 4.2.2 Étude numérique sous différentes pression de confinement

Parallèlement, nous avons préparé trois échantillons virtuels monodisperses composés de particules de 1cm, 6mm, et 4mm. Le tableau 4.2 page 134 et le tableau 4.3 page 134 indique les paramètres utilisés dans nos simulations. Afin de réduire les temps de calcul, les particules de diamètre 2mm utilisées dans les essais expérimentaux ne sont pas simulées. En effet, pour ces essais, le nombre de particules s’élève à environ 40000. Une procédure complète de simulation de l’essai triaxial, comprenant les phases de sédimentation, vibration, consolidation isotrope jusqu’à la dernière phase de cisaillement serait ainsi très longue. Comme nous nous intéressons à l’influence du diamètre des billes, nous avons choisi de simuler un échantillon de particules de 1cm au lieu des particules de 2mm. La Figure 4.6 page 135 montre trois empilements numériques monodisperses de différentes tailles de particules : 1cm, 6mm et 4mm.

TABLE 4.2: Paramètres des empilements avec de différentes tailles de particules dans les simulations

Diamètre	Nombre	Module Young (G)	Poisson $\nu$	Coef d’amortissement
4mm	4600	65GPa	0,25	$3,5 \times 10^{-6}$
6mm	1260	65GPa	0,25	$2,5 \times 10^{-6}$
1cm	250	65GPa	0,25	$1,5 \times 10^{-6}$

Dans nos simulations tous les paramètres d’entrée sont identiques, hormis le coefficient d’amortissement qui intervient dans la formule de Hertz-Mindlin pour calculer la force normale. Ce coefficient varie en fonction de la taille des particules de manière à conserver un coefficient de restitution de 0.8 constant pour toutes les simulations. Les coefficients de restitution sont calculés selon la méthode décrite dans le chapitre 3. On observe que le coefficient d’amortissement diminue avec l’augmentation du diamètre des particules.

TABLE 4.3: Paramètres principaux de la simulation DEM

Coefficient de frottement grain-grain $\mu_{gg}$	0,15
Coefficient de frottement grain-paroi $\mu_{gw}$	0,05
Coefficient de frottement grain-pierre poreuse $\mu_{gp}$	0,25
Coefficient de roulement grain-grain $\mu_{r_{gg}}$	0,01
Pression de confinement $P_{conf}(kPa)$	50 ;100 ;200 ;300
Pas de temps $\Delta t(s)$	$5 \times 10^{-8}$
Vitesse de cisaillement $v$	0,04

La Figure 4.7 page 135 montre les répétitions des courbes déviatorique et des



déformations volumiques pour des échantillons composés de particules de 1cm sous trois pressions de confinement, on trouve que les résultats de contrainte déviatorique pour la simulation de l'échantillon de 1cm ne sont pas répétables. En plus, la déformation volumique est influencée par l'état initial de l'empilement. Les 3 courbes correspondant au même échantillon sont en effet systématiquement confondues jusqu'à au moins 6% mais il y a des différences entre les deux empilements.

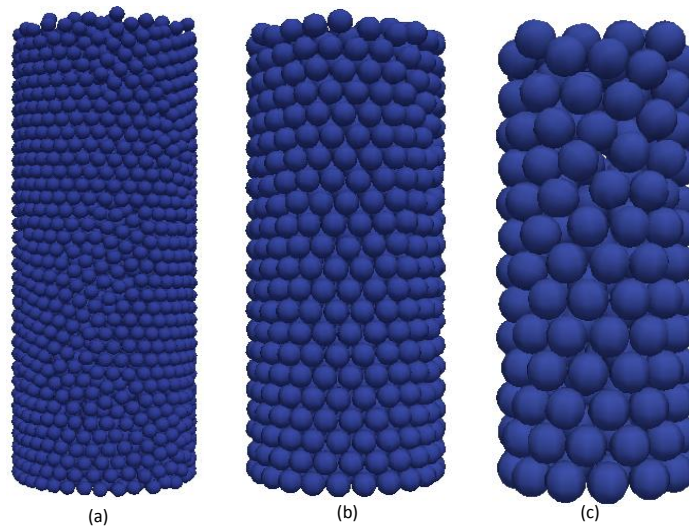


FIGURE 4.6: Figure de trois empilements monodisperses de différentes tailles de particules : 1cm, 6mm, 4mm

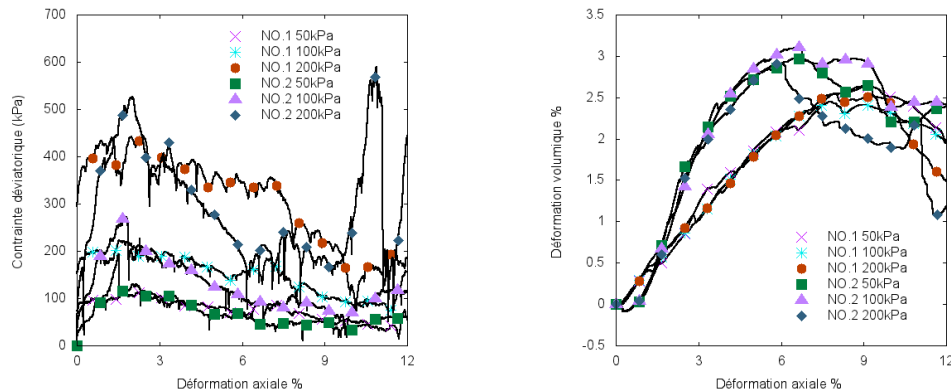


FIGURE 4.7: Répétitions des courbes déviatorique et déformation volumique en fonction de la déformation axiale par deux échantillons de diamètre de 1cm

Par ailleurs, il semblerait que la répétabilité de la courbe déviatorique soit d'autant moins bonne que le confinement est élevé. Cette mauvaise répétabilité peut être attribuée au faible nombre de particules.

La Figure 4.8 page 136 montre les répétitions des courbes et des déformations volumiques pour des échantillons composés de particules de 6mm sous trois pressions

de confinement : 50kPa, 100kPa, 200kPa. On observe une meilleure répétabilité des résultats que pour les billes de 1cm. Dans la courbe déviatorique, les pics pour deux empilements différents sous chaque pression de confinement atteignent sensiblement le même niveau, mais ils sont obtenus pour des déformations axiales différentes. L'état initial de l'empilement influence encore de manière significative la déformation volumique, mais les déformations dans l'état final sont assez semblables. Comme on peut s'y attendre, le nombre de particules influence beaucoup la répétabilité des résultats. On peut considérer qu'au-delà de 6mm, le nombre de billes utilisés est trop faible pour assurer un résultat répétable.

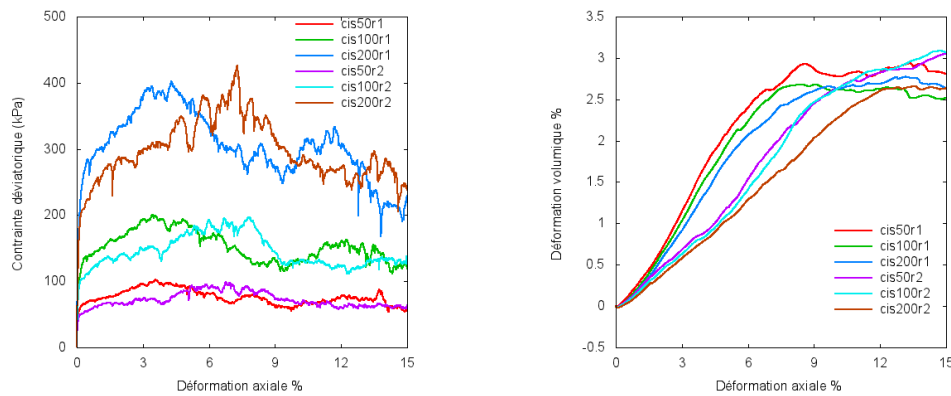


FIGURE 4.8: Déviateur de contrainte et déformation volumique pour échantillons de 6mm sous pression de confinement de 100 kPa

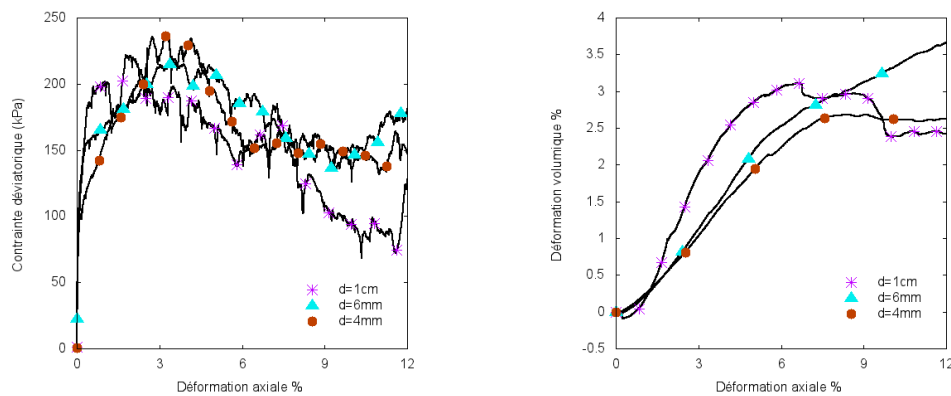


FIGURE 4.9: Déviateur de contrainte et déformation volumique pour différentes tailles d'échantillons sous pression de confinement de 100 kPa

La Figure 4.9 page 136 présente les répétitions de la courbe contrainte déviatorique et déformation volumique pour trois tailles de particules sous pression de confinement 100kPa. La Figure 4.9 page 136 à gauche montre que les courbes déviatoriques sont assez proches les unes des autres, notamment pour les billes de 6 et 4 mm de diamètre. La Figure 4.9 page 136 à droite montre les courbes de déformations volumiques en fonction de la déformation axiale pour différentes tailles de grains. On observe qu'il

n'y a pas de tendances claires pour différentes tailles de particules ce qui confirme l'observation de Novoa [1] citée précédemment.

### 4.2.3 Comparaison des résultats expérimentaux et numériques

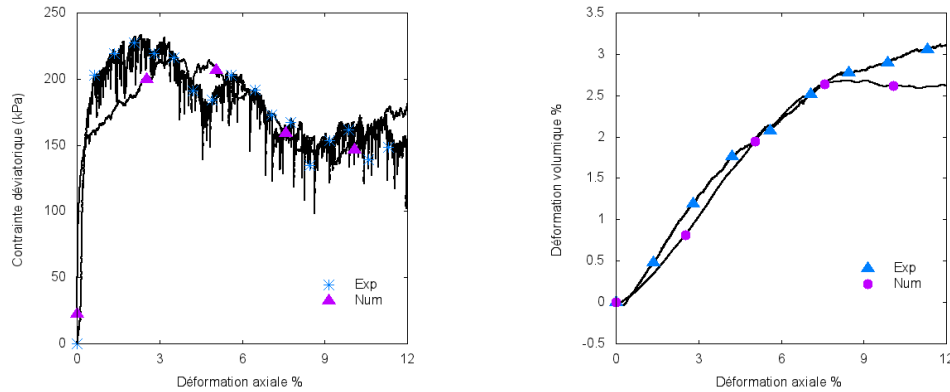


FIGURE 4.10: Comparaisons des courbes déviatorique et de déformation volumique pour un échantillon mono-disperse de 6mm

Dans cette section, nous comparons les résultats obtenus pour les échantillons expérimentaux et numériques de 6mm (les échantillons de 4mm sont déjà comparés dans le chapitre 3).

La Figure 4.10 page 137 montre les courbes déviatorique et de déformation volumique de l'échantillon monodisperses de 6mm. La valeur au pic de la courbe déviatorique numérique est un peu moins grande que la courbe expérimentale, mais les deux courbes sont malgré tout très proches. De même, les courbes de déformation volumiques sont tout à fait comparables. Le modèle utilisé semble donc tout à fait adapté à la simulation de l'essai triaxial dans ces conditions.

### 4.2.4 Étude numérique de l'échantillon sous différentes pressions de confinement

La Figure 4.11 page 138 montre les courbes déviatorique et de déformation volumique pour un échantillon mono-disperses de 6mm de diamètre sous quatre pressions de confinement. Comme nous l'avons vu au chapitre précédent pour des billes de 4mm, on observe que la contrainte déviatorique augmente avec l'augmentation de la pression de confinement. On observe aussi que de 0 à 8% déformation axiale, les courbes sont identiques, mais à partir de 8% déformation axiale, la déformation volumique diminue avec l'augmentation de la pression de confinement.

Le tableau 4.4 page 138 montre les angles de frottement calculé pour chaque configurations des empilements. On obtient un angle de frottement de 26.5 degrés à l'état caractéristique et 23.6 degrés à l'état critique pour l'empilement de 6mm. En comparant avec les angles de frottement de l'empilement de 4mm de 27.9 degré à l'état

caractéristique et de 24.0 degré à l'état critique, on trouve un peu différent à l'état caractéristique et à peu près la même valeur à l'état critique.

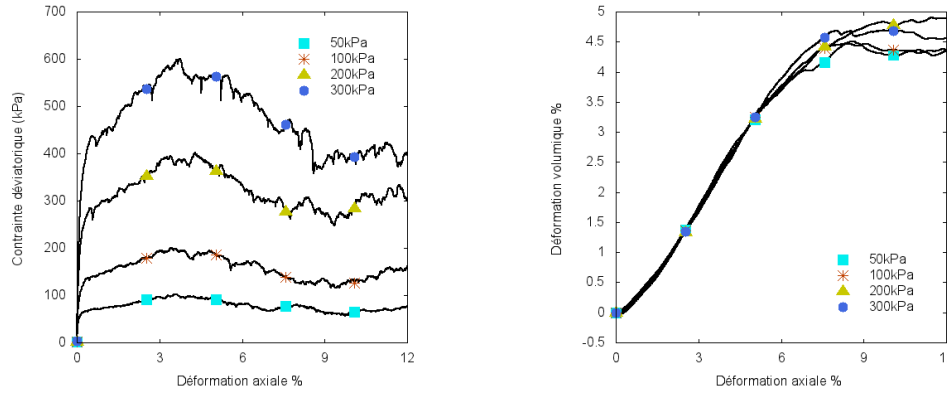


FIGURE 4.11: Courbes déviatoriques et déformation volumique sous quatre pressions de confinement pour des billes de 6mm de diamètre

TABLE 4.4: Valeurs des caractéristiques des empilements de 6mm par modélisations

$p(kPa)$	$q(kPa)$	$p'(kPa)$	$M$	$\alpha$	$q(kPa)$	$p'(kPa)$	$M$	$\alpha$
50kPa	97	82	1,18	26,5	87	79	1,10	23,6
100kPa	199	166	1,20		168	156	1,08	
200kPa	401	334	1,20		299	300	1,00	
300kPa	603	501	1,20		402	434	0,93	

### 4.2.5 Conclusion

Dans cette section, nous avons tout d'abord réalisé des essais expérimentaux sur des échantillons mono-disperses composés de billes de différents diamètres sous pression de confinement de 100kPa. Nous avons vu que les courbes de contraintes déviatorique changent peu en fonction de la taille des particules, tant que celle-ci reste inférieure ou égale à 6mm. Ensuite, nous avons vu que les incertitudes pour des échantillons composés des grandes particules (1cm) sont plus importantes que les échantillons de petites particules. Ensuite nous avons comparé ces résultats expérimentaux avec ceux obtenus sur des échantillons virtuels par la simulation numérique de l'essai triaxial pour valider notre modèle et aussi les paramètres de simulations appliqués. Après avoir effectué des simulations pour des échantillons de billes de 6mm sous trois différentes pressions de confinement, nous avons obtenu un angle de frottement au pic de 26.5 degré et au palier de 23.6 degré pour échantillon de billes de 6mm à comparer aux angles de frottement au pic de 27.9 degré et au palier de 24.0 degré des échantillons de billes de 4mm par les résultats de simulations.

### 4.3 Étude sur l'influence de la présence d'une hétérogénéité de taille

#### 4.3.1 Étude expérimentale sous pression de confinement unique

Cette section concerne l'étude de l'influence d'une inclusion dans l'échantillon. Une particule de grande taille a été introduite dans des empilements monodisperses pour représenter une hétérogénéité. La Figure 4.12 page 139 montre les deux types de billes utilisées : une grosse bille de diamètre 25mm et des billes de diamètre 4mm. La masse volumique de ces billes de verre est identique (2530kg/m<sup>3</sup>). La masse totale des billes de verre de 4mm est 366g et celle de la bille de verre de 25mm est 20g.



FIGURE 4.12: Deux types de billes utilisées pour les empilements contenant des hétérogénéités

La Figure 4.13 page 140 montre les images de quatre échantillons différents. Parmi eux, un échantillon est composé avec des billes de diamètre de 4mm sans inclusion et les trois autres échantillons sont préparés avec chacun une inclusion. L'inclusion est positionnée respectivement en haut, au milieu, ou en bas de l'échantillon, voir le tableau 4.5 page 139. Grâce à la transparence des billes de diamètre 4mm, on peut apercevoir l'inclusion de grande taille dans les échantillons (ombre noire). Hormis la position de la grosse bille, les masses de billes de 4mm dans chaque échantillon sont identiques. Avec la même masse et même hauteur des échantillons, on considère que les indices des vides initiaux pour les trois échantillons sont identiques. Au cours du cisaillement, l'échantillon est cisailé avec une vitesse de 0.1mm/s sous pression de confinement de 100kPa.

TABLE 4.5: Séries des essais pour l'étude sur l'influence de la présence d'une hétérogénéité de taille

Position d'inclusion	Masse 25mm(g)	Masse 4mm(g)	$e_{cons}$
monodisperses	0	389,0	0,552
En haut	20,3	366,2	0,588
Au milieu	20,3	366,5	0,587
En bas	20,3	366,3	0,588

La Figure 4.14 page 140 montre l'image des échantillons à 15% de déformation

axiale. On remarque que l'échantillon se déforme différemment selon la position initiale de l'inclusion. Pour l'échantillon monodisperses, on voit que l'arrangement de la partie basse de l'échantillon n'est pas beaucoup changé par rapport au début de l'essai. La déformation de l'échantillon (le gonflement) se produit dans la partie haute. Pour le deuxième échantillon avec une inclusion positionnée en haut, la déformation se produit au milieu de l'échantillon. Le troisième échantillon concerne l'inclusion positionnée au milieu. On observe dans ce cas un gonflement à mi hauteur de la cellule. La partie basse de l'échantillon est toujours stable. Le dernier échantillon contient une inclusion en bas ce qui conduit à une déformation dans la partie basse de l'échantillon, contrairement aux trois échantillons précédents.

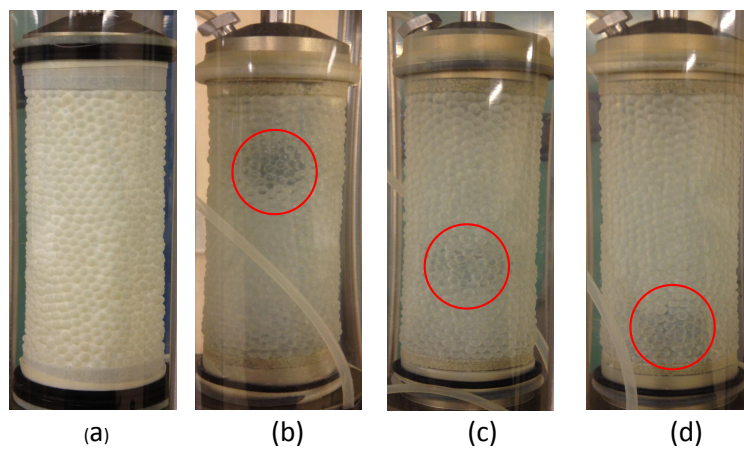


FIGURE 4.13: Images de 4 différents échantillons préparés : (a) avec des billes monodisperses ; (b) avec une inclusion en haut ; (c) avec une inclusion au milieu ; (d) avec une inclusion en bas

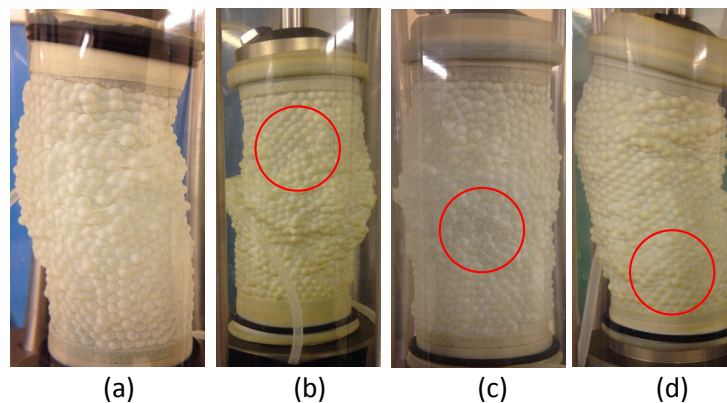


FIGURE 4.14: Photos des échantillons à 15% de déformation axiale : (a) échantillon monodisperses ; (b) échantillon avec une inclusion positionnée en haut ; (c) échantillon avec une inclusion positionnée au milieu ; (d) échantillon avec une inclusion positionnée en bas

Il semble donc que l'inclusion dans l'échantillon influence la déformation locale. C'est-à-dire que l'échantillon est plus facile à déformer autour d'une grande particule. Cette différente déformation peut être expliquée par la théorie de Chen [34] avec ses trois types de formes de rupture, expliquée dans le chapitre 1. Pour le échantillon dense monodisperse, les billes sont plus tassées en partie inférieure par la préparation de l'échantillon, donc le gonflement de l'échantillon apparaît en haut. Pour les échantillons contenant une inclusion, l'arrangement des petites billes autour de l'inclusion est perturbé en raison de l'effet de paroi ce qui réduit probablement la résistance locale au cisaillement.

La Figure 4.15 page 141 montre les courbes déviatoriques des quatre échantillons précédents. Dans l'état caractéristique, les courbes déviatoriques des trois échantillons avec inclusion sont très proches les unes des autres. La position de l'inclusion ne change pas la résistance au cisaillement globale de l'échantillon. Par contre, le pic du déviateur des trois échantillons avec inclusion est significativement plus faible que pour l'échantillon monodisperse. L'existence de l'inclusion diminue la résistance locale de l'échantillon qui influence le comportement mécanique global. Dans l'état critique, on voit que les contraintes déviatrices des quatre différents échantillons tendent vers la même valeur.

La Figure 4.16 page 142 montre les déformations volumiques des 4 échantillons. On observe que les trois courbes avec inclusion s'écartent bien de la courbe monodisperse à partir d'environ 4% ou 5% de déformation axiale. C'est-à-dire que la présence d'une grosse inclusion n'a pas beaucoup d'effet sur la déformation volumique de l'échantillon au départ, mais l'influence (faible malgré tout) existe dans l'état final.

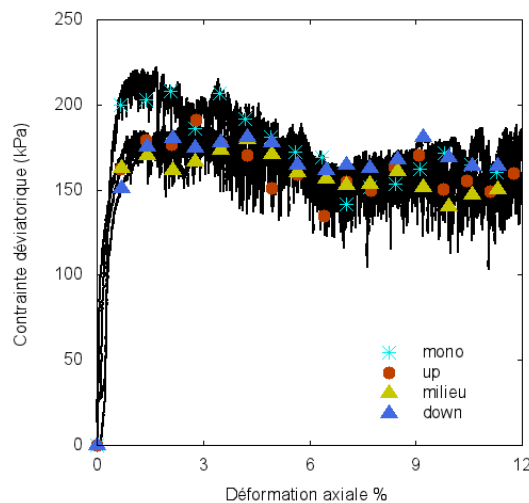


FIGURE 4.15: Courbes déviatoriques des 4 différents échantillons : (a) échantillon monodisperse ; (b) échantillon avec une inclusion dans la partie haute ; (c) échantillon avec une inclusion positionnée au milieu ; (d) échantillon avec une inclusion dans la partie basse

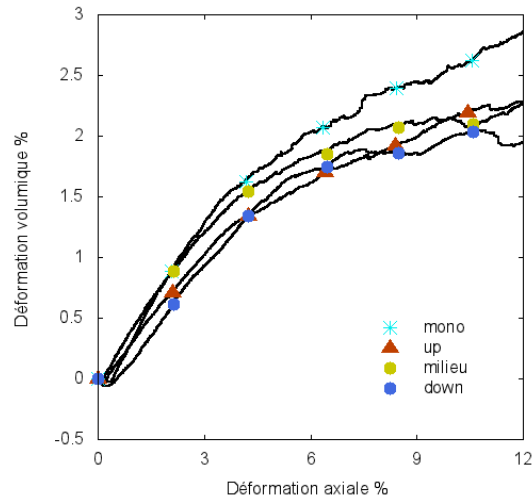


FIGURE 4.16: Courbes de déformation volumique des 4 différents échantillons : (a) échantillon monodisperse ; (b) échantillon avec une inclusion dans la partie haute ; (c) échantillon avec une inclusion positionnée au milieu ; (d) échantillon avec une inclusion dans la partie basse

#### 4.3.2 Étude numérique de l'inclusion d'une grosse bille sous pression de confinement unique

Dans l'étude numérique, nous avons préparé quatre échantillons virtuels de même composition que dans l'essai expérimental. Chaque échantillon est ajoutée une inclusion de diamètre 25mm positionnée à mi hauteur ou en partie inférieure de l'échantillon. Pour chaque hauteur, deux configurations sont étudiées : la bille de grand diamètre est positionnée soit au centre de l'empilement, soit sur le côté, tangente à la condition cylindrique.

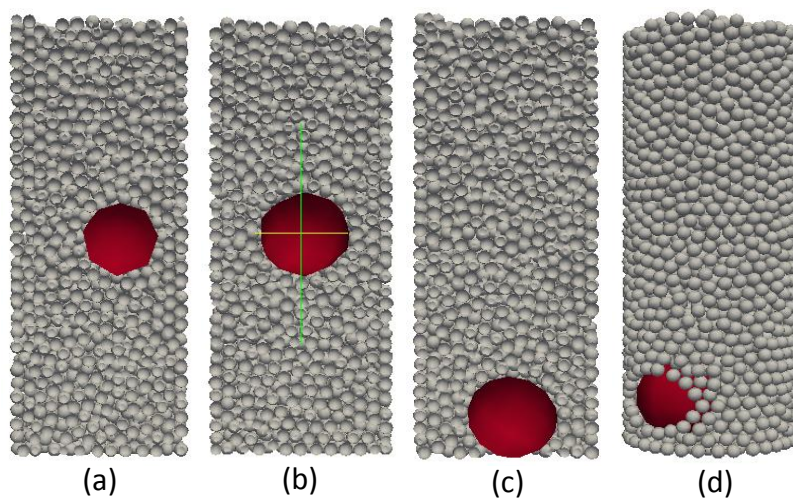


FIGURE 4.17: Échantillons virtuels avec l'inclusion de grosse particule positionnée (a) à côté au milieu, (b) centre au milieu, (c) centre en bas, (d) à côté en bas



Chaque échantillon est préparé en suivant les différentes étapes présentées dans le chapitre 2. La seule différence concerne la génération des particules, on génère dans la première étape une grosse particule dans une position spécifiée. Ensuite, le gaz de particules de diamètre de 4mm est généré aléatoirement dans l'espace. Après la sédimentation de la totalité des particules, on compacte l'empilement en descendant le plateau supérieur jusqu'à la hauteur de 12.5cm qui est identique à l'échantillon expérimental. Dans ce cas, comme le nombre de particules est calculé avec les données expérimentales, on vérifie que l'indice des vides de l'échantillon virtuel est identique à l'expérimental.

La Figure 4.17 page 142 montre les échantillons virtuels avec l'inclusion de la grosse particule positionnée dans les différents endroits.

Le tableau 4.6 page 143 montre les paramètres de simulations utilisés dans notre étude numérique. Donc, dans un premier temps, nous avons réalisé des simulations sous la pression de confinement de 100kPa.

TABLE 4.6: Valeurs des caractéristiques des empilements de 6mm par modélisations

Module de Young	65GPa
Coefficient de Poisson	0,25
Coefficient de Frottement grain-grain $\mu_{gg}$	0,15
Coefficient de Frottement grain-paroi $\mu_{gw}$	0,05
Coefficient de Frottement grain-pierre poreuse $\mu_{gp}$	0,25
Coefficient de Roulement grain-grain $\mu_{grr}$	0.01
Coefficient amortissement 4mm	$3,5 \times 10^{-6}$
Coefficient amortissement 25mm	$8 \times 10^{-7}$
Pression de confinement $P_{conf}(kPa)$	50 ;100 ;200 ;300
Pas de temps $\Delta t(s)$	$5 \times 10^{-8}$
Vitesse de cisaillement $\nu$	0,04

La Figure 4.18 page 144 compare les courbes de contraintes déviatoriques et de déformation volumique pour les différents échantillons sous 100kPa. On observe que les contraintes déviatoriques et les déformations volumiques ne sont pas beaucoup influencées par les différentes positions de l'inclusion, par contre, les niveaux du pic sont inférieurs à la courbe de l'empilement mono disperse. Ce résultat est en bon accord avec les résultats expérimentaux. Pour la déformation volumique, les courbes suivent la même tendance au long de la simulation. Ceci concorde également avec les conclusions obtenues expérimentalement sur la déformation volumique de l'échantillon. Les résultats sont similaires à ceux obtenus par les essais expérimentaux. On aurait envie de dire que le modèle (même avec sa condition cylindrique) permet bien d'étudier l'effet d'une hétérogénéité sur le comportement au cisaillement du système.

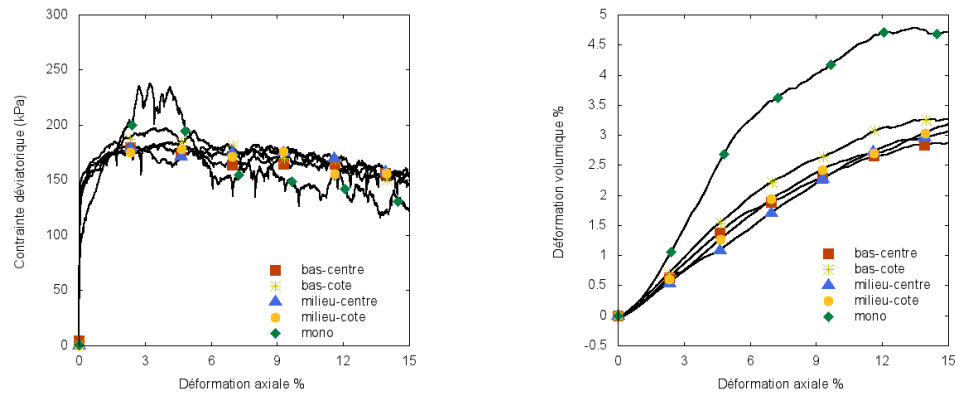


FIGURE 4.18: Courbes de contrainte déviatorique et de déformation volumique pour quatre compositions des échantillons sous pression de confinement de 100kPa

### 4.3.3 Comparaisons résultats expérimentaux et numériques

Dans cette section, nous comparons les deux cas expérimental et numérique.

- Inclusion positionnée au centre en bas
- Inclusion positionnée au centre au milieu

Les Figure 4.19 page 144 et Figure 4.20 page 145 montrent les comparaisons entre les résultats expérimentaux et numériques dans les deux cas. On remarque que les pics et les contraintes au palier de contraintes déviatorique sont très proches. Les amplitudes des stick-slip expérimentaux sont plus importantes que pour les simulations. Concernant les courbes de déformation volumique, on remarque que le début de la courbe numérique est situé sous la courbe expérimentale et puis la dépasse à partir d'environ 8% de déformation axiale, mais les deux courbes sont très proches les unes avec des autres.

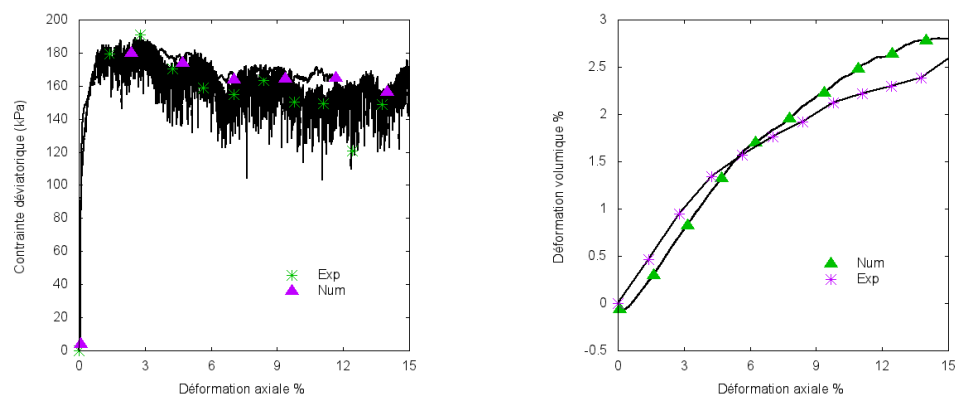


FIGURE 4.19: Comparaison contrainte déviatorique et déformation volumique pour le cas d'une inclusion positionnée au centre en bas pour les essais expérimentaux et numériques

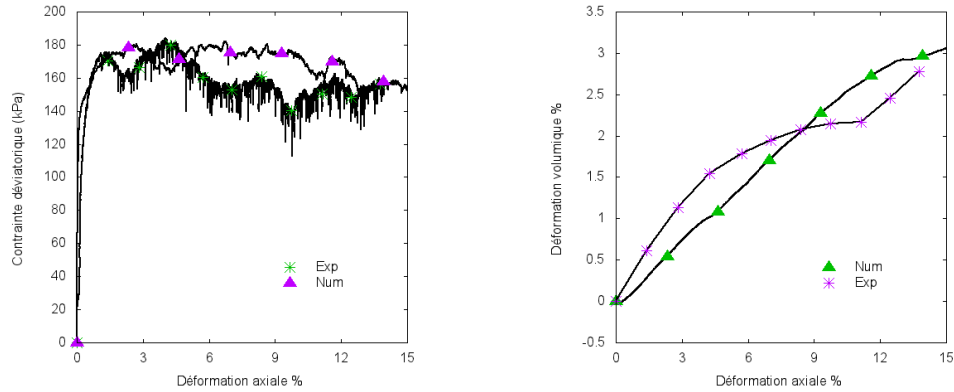


FIGURE 4.20: Comparaison contrainte déviatorique et déformation volumique pour le cas d'une inclusion positionnée au centre au milieu pour les essais expérimentaux et numériques

#### 4.3.4 Études numériques sous différentes pressions de confinement

A partir des comparaisons expérimentales et numériques sur l'échantillon sous pression de confinement de 100kPa, nous effectuons les simulations des essais sous 4 différentes pressions de confinement 50kPa, 100kPa, 200kPa, 300kPa pour différentes inclusions de particules.

Les Figures 4.21 page 145, Figure 4.22 page 146, Figure 4.23 page 146, Figure 4.24 page 146 montrent les courbes de contraintes déviatorique et de déformation volumique pour différentes configurations d'échantillons sous quatre pressions de confinement. Les résultats montrent que la position de l'inclusion dans l'empilement n'influence pas significativement la résistance du matériau et la déformation volumique de l'échantillon.

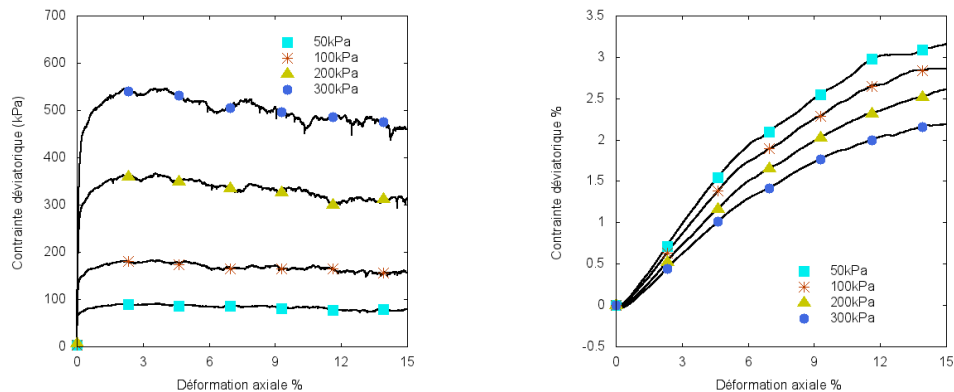


FIGURE 4.21: Courbe de contrainte déviatorique et de déformation volumique pour l'échantillon avec une inclusion positionnée en bas au centre de l'échantillon sous 4 différentes pressions de confinement 50kPa, 100kPa, 200kPa, 300 kPa

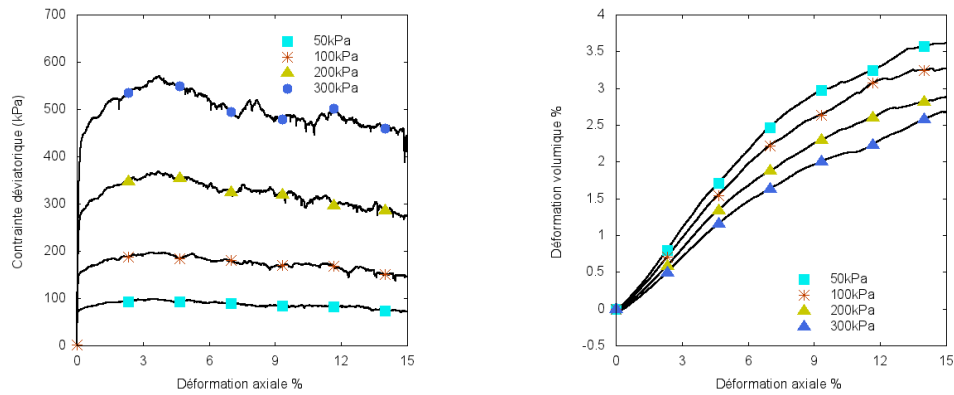


FIGURE 4.22: Courbe contrainte déviateur et déformation volumique pour l'échantillon avec une inclusion positionnée en bas sur le coté de l'échantillon sous 4 différentes pressions de confinement 50kPa, 100kPa, 200kPa, 300 kPa

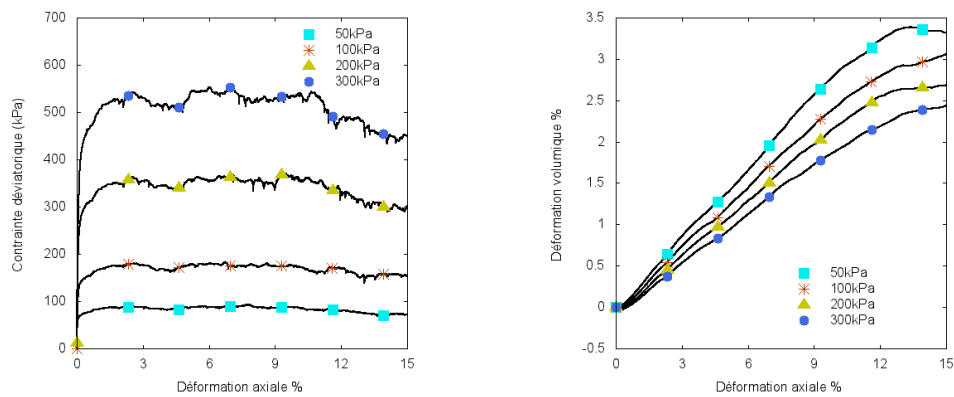


FIGURE 4.23: Courbe contrainte déviateur et déformation volumique pour l'échantillon avec une inclusion positionnée en milieu au centre de l'échantillon sous 4 différentes pressions de confinement 50kPa, 100kPa, 200kPa, 300 kPa

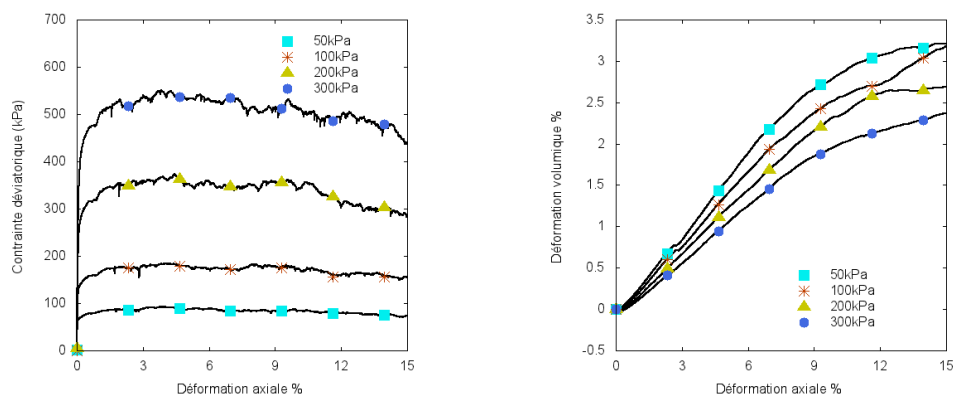


FIGURE 4.24: Courbe contrainte déviateur et déformation volumique pour l'échantillon avec une inclusion positionnée en milieu à côté de l'échantillon sous 4 différentes pressions de confinement 50kPa, 100kPa, 200kPa, 300 kPa

Le tableau 4.7 page 147 résume le bilan de la contrainte déviatorique moyenne pour

les différents cas d'inclusions.

TABLE 4.7: Valeurs des caractéristiques des empilements avec des inclusions par modélisations

Position	$p_{conf}$	$q_{pic}$	$p'_{pic}$	$M_{pic}$	$\varphi_{pic}$	$q_{pal}$	$p'_{pal}$	$M_{pal}$	$\varphi_{pal}$
Mono	50	113	88	1,3	27,9	91	80	1,1	24,0
	100	232	177	1,3		152	151	1,0	
	200	433	344	1,3		335	312	1,1	
Bas-Centre	50	97	82	1,2	25,9	82	77	1,1	24,0
	100	189	163	1,2		168	156	1,1	
	200	373	324	1,2		304	301	1,1	
	300	549	483	1,1		471	457	1,0	
Bas-côté	50	99	83	1,2	26,2	78	76	1,0	23,4
	100	201	167	1,2		158	153	1,0	
	200	373	324	1,2		285	295	1,0	
	300	572	491	1,2		458	453	1,0	
Milieu-Centre	50	93	81	1,2	25,5	79	76	1,0	23,5
	100	182	161	1,1		157	152	1,0	
	200	367	322	1,1		297	301	1,0	
	300	537	479	1,1		451	450	1,0	
Milieu-Côté	50	98	83	1,2	25,9	81	77	1,1	23,4
	100	192	164	1,2		152	151	1,0	
	200	373	324	1,2		298	299	1,0	
	300	552	484	1,1		446	449	1,0	

#### 4.3.5 Conclusion

Dans cette section, nous avons étudié expérimentalement et numériquement quelques cas hétérogènes avec une inclusion positionnée à différents endroits à l'intérieur des échantillons. Dans la partie expérimentale, les échantillons avec de l'inclusion sont testés sous pressions de confinement de 100kPa. On voit que la résistance de l'échantillon ne change pas beaucoup selon la position de l'inclusion (inclusion de forme sphérique). En revanche, la résistance des empilements comportant une inclusion est systématiquement inférieure à celle du système monodisperse correspondant. La présence d'une inclusion réduit donc la valeur au pic mais la position de l'inclusion joue peu. Par contre, la déformation locale de l'échantillon change avec la position de l'inclusion. La comparaison des résultats de simulations des échantillons sous 100kPa avec ceux obtenus expérimentalement, montre que le code reproduit assez fidèlement à la fois la courbe déviatorique et la courbe de déformation volumique. Ensuite, nous avons testé les différents échantillons numériques sous différentes pressions de confinement 50kPa, 100kPa, 200kPa, 300kPa. Nous avons obtenu un angle de frottement moyen de 26 degrés à l'état caractéristique et de 23.6 degrés à l'état critique. Du coup, la position de l'inclusion n'influence pas la valeur de ces angles de frottement.

## 4.4 Étude sur des mélanges de particules de deux tailles différentes

### 4.4.1 Étude expérimentale sur l'influence de la composition de mélanges bi-disperses de billes sous pression de confinement unique

Dans cette partie, nous étudions l'influence de la composition d'un mélange bidisperse sur le comportement au cisaillement sous une pression de confinement de 100kPa. Deux tailles de billes de verre (4mm et 10mm) sont utilisées. Lors de la préparation de l'échantillon sur la table d'opération, les deux billes sont versées simultanément dans le moules, on peut donc considérer que les positions des particules sont aléatoires. En plus, dans la préparation des échantillons, on trouve que les empilements bidisperses sont plus faciles à mettre en place. La compaction est souvent inutile pour que la hauteur de l'échantillon soit inférieure à 125mm. Il faut donc considérer que ces mélanges sont mis en place avec une énergie de compaction inférieure à celle des échantillons monodisperses.

Les proportions des deux types de particules sont listées dans le tableau 4.8 page 148. Dans ce tableau, on remarque que les indices des vides et les compacités des échantillons ne changent pas beaucoup par rapport aux différentes proportions. Ce résultat est attendu car les diamètres des deux types de billes du mélange sont assez proches [130][76].

TABLE 4.8: Propositions massiques des mélanges bidisperses étudiés

Ratio	Masse			Échantillon		$e_{cons}$	c
	10mm	4mm	Total	Hauteur	Diamètre		
1 :5	65,2	325,0	388,2	125,1	50,1	0,592	0,628
1 :2	130,1	260,0	390,0	125	49,9	0,591	0,628
1 :1	193,9	195,0	388,9	125,1	50	0,591	0,629
2 :1	260,1	130,0	390,1	125	50,1	0,590	0,629
Mono dense	0	391,0	391,0	125	50	0,559	0,637
Mono moyen dense	0	340,0	340,0	124,9	49,8	0,602	0,625

La Figure 4.25 page 149 montre les images de quatre échantillons expérimentaux initiaux de différentes propositions respectivement 1 :5, 1 :2, 1 :1 ; 2 :1. La Figure 4.26 page 149 montre les échantillons à l'état final du cisaillement (15% de déformation axiale).

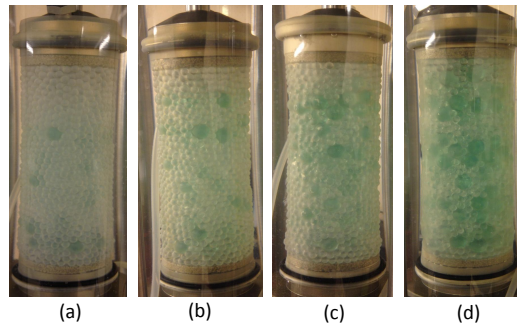


FIGURE 4.25: Photos d'échantillons expérimentaux avec des mélanges de billes de différentes proportions : 1 :5, 1 :2, 1 :1 et 2 :1

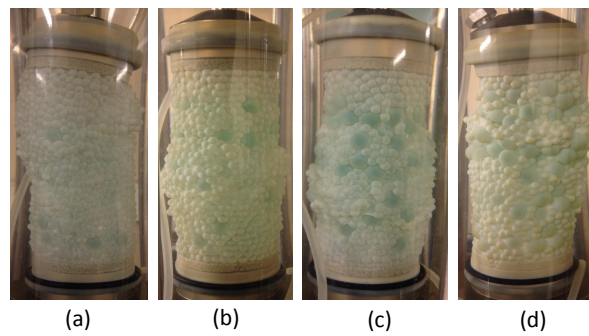


FIGURE 4.26: Déformations des échantillons expérimentaux avec différent pourcentage des particules bi-disperses, 1 :5, 1 :2, 1 :1 et 2 :1 à 15% déformation axiale

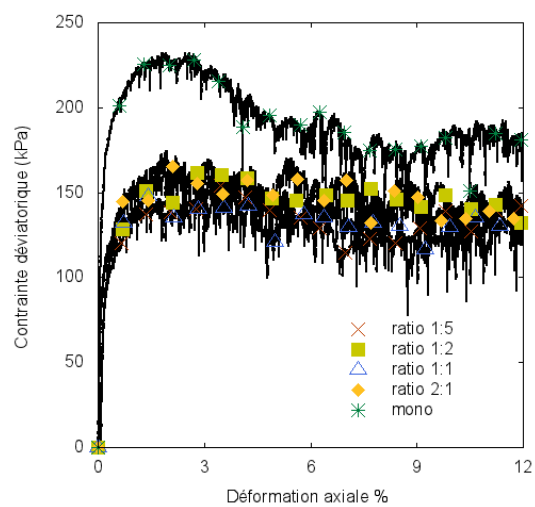


FIGURE 4.27: Courbes déviatorique pour différentes compositions par des échantillons expérimentaux

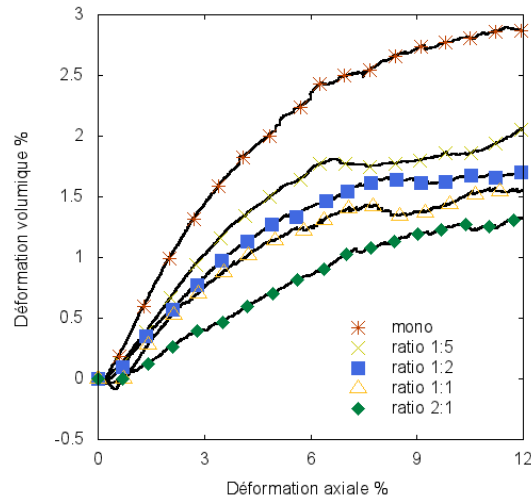


FIGURE 4.28: Courbes de déformation volumique pour différents mélanges des échantillons expérimentaux

La Figure 4.27 page 149 présente les courbes déviatoriques de différents mélanges. On voit que le pic déviatorique change peu en fonction des différentes compositions de mélanges. Ensuite on voit que les contraintes déviatoriques de ces quatre mélanges sont beaucoup plus faibles que l'échantillon dense et un peu plus élevées que l'échantillon moyennement dense. L'allure des courbes obtenues pour les mélanges est par ailleurs assez proche de celle obtenue pour le milieu monodisperse moyennement dense. Les indices des vides initiaux de ces quatre échantillons mélanges sont compris entre ceux de l'échantillon dense et moyennement dense. Ces indices des vides initiaux donnent un effet sur les pics de la contrainte déviatorique à l'état caractéristique. Ce résultat sera discuté dans la partie numérique.

La Figure 4.28 page 150 montre les courbes de déformations volumiques pour différents mélanges. On voit que la déformation volumique diminue avec l'augmentation des proportions des billes de 1cm.

#### 4.4.2 Étude numérique sur l'influence de la composition de mélanges de particules bidisperses sous pression de confinement unique

Dans cette section, nous présentons les simulations de l'essai triaxial correspondant aux essais expérimentaux précédents avec différentes proportions de mélanges. La préparation des échantillons numériques est similaire aux préparations précédentes. Sauf que pour celle des échantillons préparés avec une seule inclusion, nous avons fixé la position de l'inclusion « à la main ». Mais ici, nous avons tout d'abord généré un gaz de grosses particules (procédure RSA) puis un gaz de petites particules. L'utilisation de mélanges de billes permet a priori d'augmenter la compacité du système après sédimentation. Donc dans le cas des empilements de mélanges, aucune compaction n'est nécessaire pour remplir la condition limite cylindrique à l'issue de l'étape de



sédimentation. Par contre, dans le cas des empilements monodisperses, la compaction est plus intense pour préparer une hauteur de 125mm. Ceci pourrait ensuite avoir une conséquence importante sur les comportements. En effet, pour les monodisperses, l'essai de cisaillement est réalisé sur un échantillon compacté alors que pour les mélanges, il est réalisés sur des échantillons non compactés (et malgré tout aussi denses que les monodisperses).

TABLE 4.9: Valeurs des caractéristiques des empilements de 6mm par modélisations

Module de Young (grain et paroi)	65GPa
Coefficient de Poisson	0,25
Coefficient de Frottement grain-grain $\mu_{gg}$	0,15
Coefficient de Frottement grain-paroi $\mu_{gw}$	0,05
Coefficient de Frottement grain-pierre poreuse $\mu_{gp}$	0,25
Coefficient de Roulement grain-grain $\mu_{grr}$	0,01
Coefficient amortissement 4mm	$3,5 \times 10^{-6}$
Coefficient amortissement 1cm	$1,5 \times 10^{-6}$
Pression de confinement $P_{conf}(kPa)$	50 ;100 ;200 ;300
Pas de temps $\Delta t(s)$	$5 \times 10^{-8}$
Vitesse de cisaillement $\nu$	0,04

Les proportions des mélanges de particules numériques sont identiques à celles des essais expérimentaux présentées dans le tableau 4.8 page 148.

Les paramètres de calcul pour la simulation des mélanges de particules sont montrés dans le tableau 4.9 page 151.

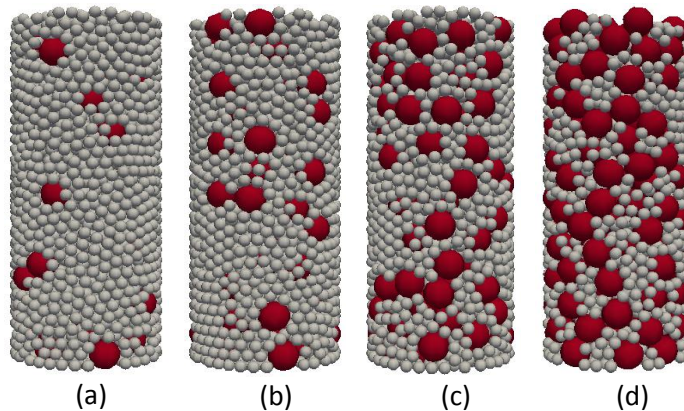


FIGURE 4.29: Images des échantillons numériques avec différents pourcentages de masse de mélange des deux différents taille de particules, 1 :5, 1 :2, 1 :1 et 2 :1

La Figure 4.29 page 151 montre quatre échantillons numériques correspondant à des mélanges de proportions variables de billes de 1cm et 4mm de diamètre.

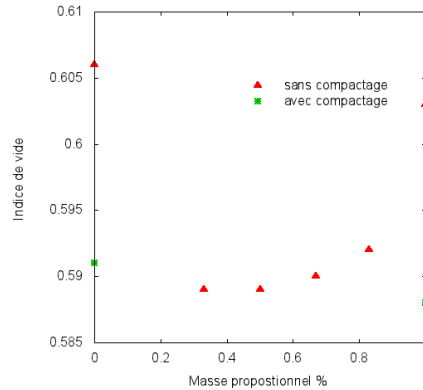


FIGURE 4.30: Indice de vide selon différentes masse proposition de particules de 4mm et 1cm

La Figure 4.30 page 152 montre les indices des vides de différents échantillons virtuels, pour les mélanges étudiés ainsi que pour les échantillons monodisperses de petites et de grosses billes. On observe que, après sédimentation, les indices des vides des mélanges sont proches les uns des autres et sont tous nettement plus faibles que ceux des systèmes monodisperses. La compaction des échantillons monodisperses permet de les amener à un indice des vides proche de celui des mélanges. Ainsi, aucune procédure de compaction n'a été utilisée pour la préparation des mélanges.

#### 4.4.3 Comparaison des résultats expérimentaux et numériques sur différents mélanges sous pression de confinement unique

L'essai triaxial a été simulé pour quatre différentes proportions sous pression de confinement de 100kPa pour comparer les résultats avec ceux obtenus expérimentalement.

La Figure 4.31 page 153 montre la comparaison entre un échantillon expérimental et numérique pour un mélange de proportion 1 :5 sous une pression de confinement de 100kPa. Concernant la courbe déviatorique, jusqu'à 5% de déformation axiale, les courbes numérique et expérimentale suivent le même chemin. Après le pic, les courbes commencent à diverger, mais se rejoignent à nouveau pour des valeurs plus élevées de la déformation axiale. Par contre, on trouve, là encore, que les stick-slips de la courbe expérimentale sont plus importants que la courbe numérique. Par rapport aux courbes de déformations volumiques, jusqu'à 7% de déformation axiale, la déformation expérimentale est légèrement supérieure à la déformation numérique, mais à partir de 7% les courbes se croisent et on observe l'inverse. Les déformations volumiques observées sont toutefois assez proches les unes des autres.

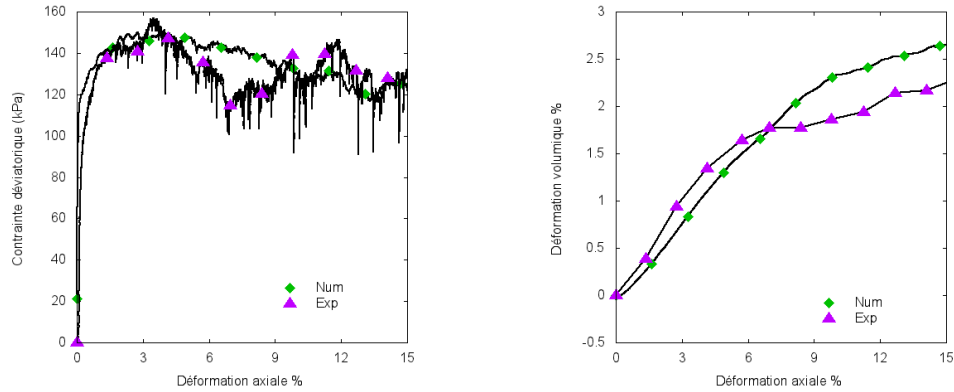


FIGURE 4.31: Comparaisons expérimental et numérique sur la contrainte déviatorique et déformation volumique pour échantillon de mélange 1 :5 sous pression de confinement de 100kPa

La Figure 4.32 page 153 montre la comparaison entre un échantillon expérimental et numérique pour un mélange de proportion 1 :2 sous une pression de confinement de 100kPa. On observe que les courbes déviatoriques numérique et expérimentale sont similaires. Les deux courbes donnent des résultats très proches à la fois pour l'état caractéristique et pour l'état critique. Pour les deux courbes, le pic de la courbe déviatorique est proche de 160 kPa, puis la contrainte résiduelle descend un peu à 140kPa. Encore une fois, les sticks-slips sur la courbe expérimentale sont plus évidents que sur la courbe numérique. Par rapport aux courbes de déformations volumiques, la courbe expérimentale et la courbe numérique sont proches l'une de l'autre.

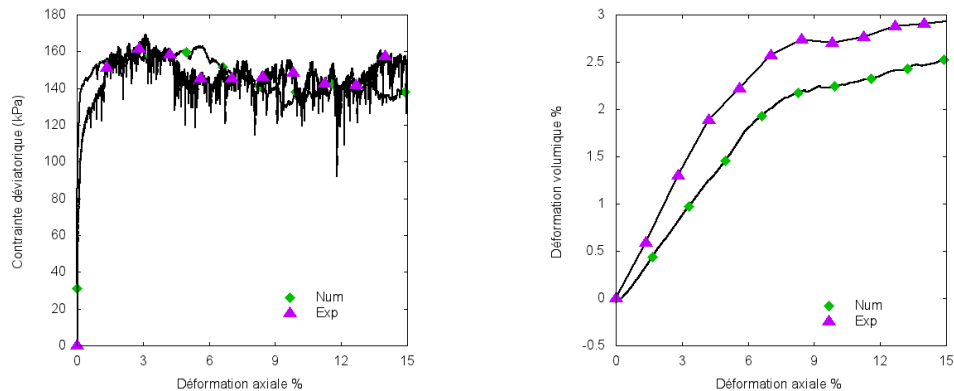


FIGURE 4.32: Comparaisons expérimental et numérique sur la contrainte déviatorique et déformation volumique pour échantillon de mélange 1 :2 sous pression de confinement de 100kPa

La Figure 4.33 page 154 montre la comparaison entre échantillon expérimental et simulation numérique pour un mélange 1 :1 sous pression de confinement de 100kPa. Expérimentalement, les états caractéristiques sont comparables comme pour l'essai précédent à environ 150 kPa. En revanche, la contrainte déviatorique dans l'état critique est plus élevée pour l'échantillon expérimental que pour la simulation. Pour la courbe

de déformation volumique en fonction de la déformation axiale, les deux courbes suivent la même tendance.

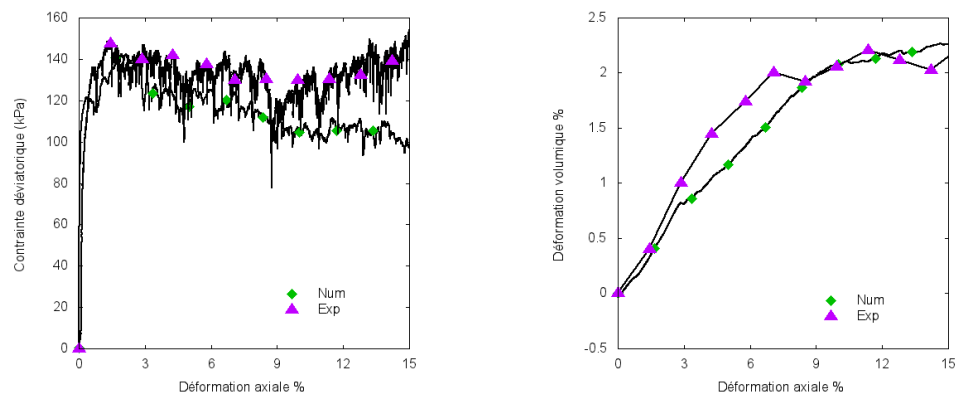


FIGURE 4.33: Comparaisons expérimental et numérique sur la contrainte déviatorique et déformation volumique pour échantillon de mélange 1 :1 sous pression de confinement de 100kPa

La Figure 4.34 page 154 montre la comparaison entre échantillon expérimental et simulation numérique pour un mélange de proportion 2 :1 sous pression de confinement de 100kPa. Pour la courbe déviatorique, le pic déviatorique expérimental est un peu plus important que dans la simulation numérique. Les valeurs au pic sont de 170kPa pour l'expérience et 150kPa pour la simulation. Pour la contrainte résiduelle, les valeurs de contraintes sont environ de 120kPa. Pour la courbe de déformation volumique, au départ, les courbes numérique et expérimentale sont proches l'une de l'autre. A partir de 9% de déformation axiale, la courbe expérimentale commence à baisser alors qu'elle continue à augmenter linéairement dans la simulation. Cette différence peut être attribuée à la condition cylindrique utilisée dans le modèle qui ne permet pas de représenter précisément la forme de l'échantillon en fin d'essai.

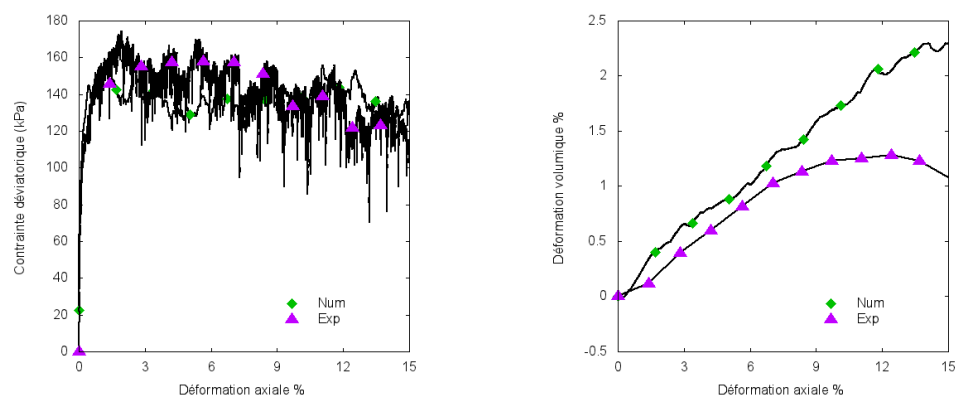


FIGURE 4.34: Comparaisons expérimental et numérique sur la contrainte déviatorique et déformation volumique pour échantillon de mélange 2 :1 sous pression de confinement de 100kPa

#### 4.4.4 Étude numérique sur différents mélanges sous différentes pressions de confinement

Avec les comparaisons précédentes entre les simulations numériques et les essais expérimentaux pour quatre proportions de mélanges sous pression de confinement de 100kPa, nous pouvons considérer que notre modèle numérique est capable de reproduire de manière satisfaisante les résultats expérimentaux sur les mélanges bidisperses considérés. Ensuite, nous avons appliqué notre modèle pour simuler le comportement mécanique des échantillons sous quatre pressions de confinement 50kPa, 100kPa, 200kPa, 300kPa pour finalement tracer l'angle de frottement.

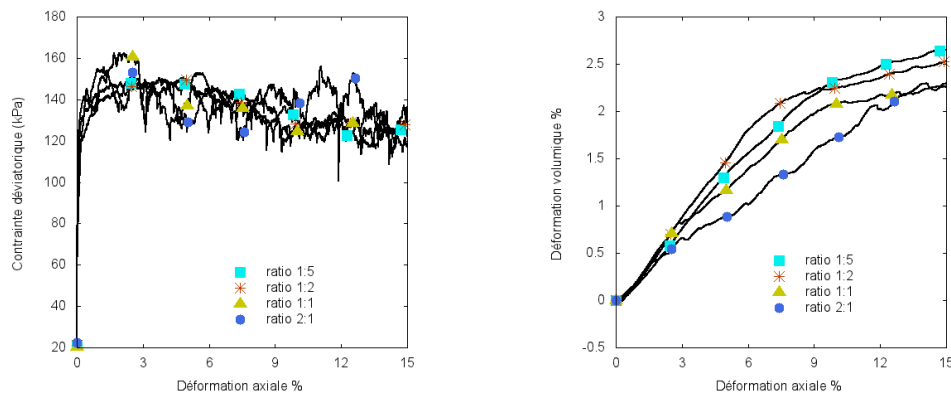


FIGURE 4.35: Déviateur de contrainte et déformation volumique pour quatre différents mélanges masse proportionnel de 1 :5, 1 :2, 1 :1 et 2 :1 échantillon sous la pression de confinement de 100kPa

La Figure 4.35 page 155 montre les courbes de contraintes déviatorique et de déformation volumique des quatre simulations des différents mélanges sous pression de confinement de 100kPa. On observe que pour les échantillons de proportions 1 :5 et 1 :2, les courbes de contrainte déviatorique et déformation volumique sont similaires. Pour les échantillons de proportions 1 :1 et 2 :1, les courbes de contrainte déviatorique sont plus dispersées par rapport aux deux courbes précédentes. C'est-à-dire que les stick-slips dans la courbe de contrainte déviatorique sont plus variés. Pour la courbe de déformation volumique, nous observons que la courbe de l'échantillon 2 :1 est le plus faible par rapport aux autres courbes. Pour les trois autres échantillons, les courbes se croisent l'une avec l'autre. Ce résultat confirme certains résultats obtenus expérimentalement : plus la proportion de grosses billes est importante, plus la déformation volumique diminue. Pour les trois autres pressions de confinement, des observations similaires peuvent être faites.

Les Figure 4.36 page 156, Figure 4.37 page 156, Figure 4.38 page 157 et Figure 4.39 page 157 montrent les courbes déviatorique et de déformation volumique sous quatre pressions de confinement pour les différentes proportions de mélanges étudiées. On observe que plus la proportion de grosses particules dans l'empilement est élevée, plus

le phénomène de stick-slips est présent sur la courbe déviatorique. De même dans les courbes de déformation volumique, lorsqu'il y a moins de grosses particules dans l'empilement, les courbes sont plus lisses. Après l'ajout des grosses particules, par exemple pour le mélange 2 :1, les courbes sont plus irrégulières que les autres mélanges. En prenant en compte l'étude des particules de 1cm dans la section 4.1, on peut penser que l'irrégularité des courbes vient du trop grand nombre de particules de 1cm.

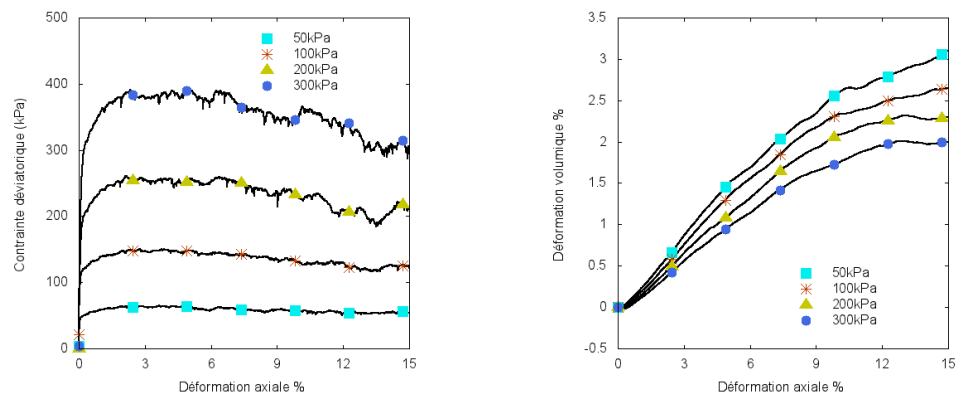


FIGURE 4.36: Déviateur de contrainte et déformation volumique pour un échantillon mélange masse proportionnel de 5 :1 sous quatre différents pressions de confinement 50kPa, 100kPa, 200kPa, 300kPa

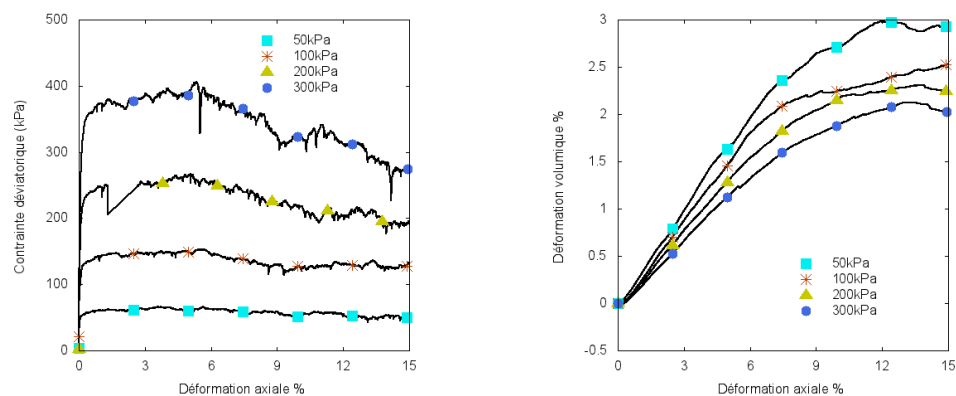


FIGURE 4.37: Déviateur de contrainte et déformation volumique pour un échantillon mélange masse proportionnel de 2 :1 sous quatre différents pressions de confinement 50kPa, 100kPa, 200kPa, 300kPa

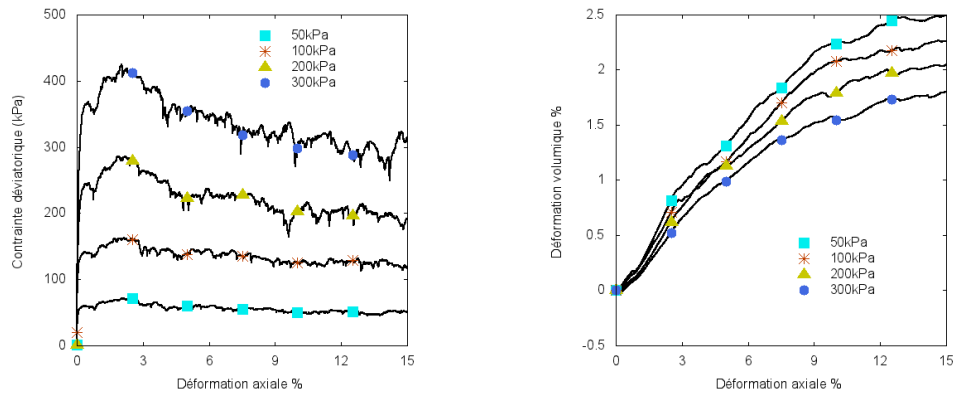


FIGURE 4.38: Déviateur de contrainte et déformation volumique pour un échantillon mélange masse proportionnel de 1 :1 sous quatre différents pressions de confinement 50kPa, 100kPa, 200kPa, 300kPa

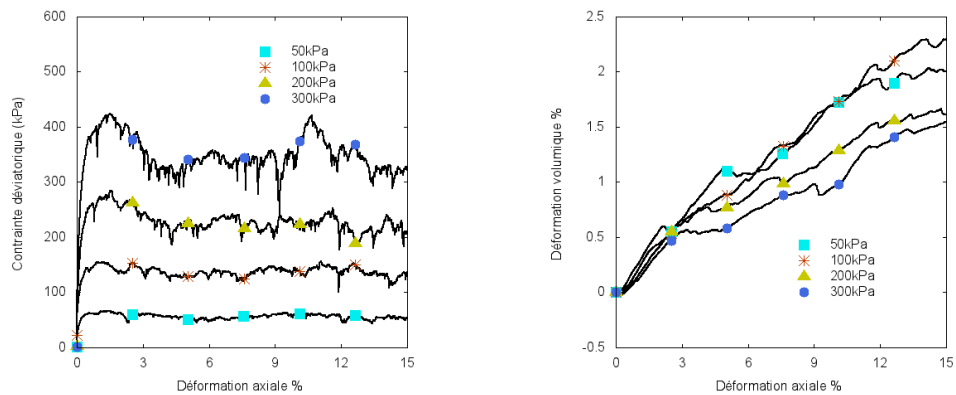


FIGURE 4.39: Déviateur de contrainte et déformation volumique pour un échantillon mélange masse proportionnel de 1 :2 sous quatre différents pressions de confinement 50kPa, 100kPa, 200kPa, 300kPa

Le Tableau 4.10 page 158 présente les angles de frottement calculés pour différentes proportions des mélanges. On observe que les proportions du mélange influencent très peu les angles de frottement, sauf la proportion mélange 1 :1. Ces derniers sont respectivement au tour de 22 degrés à l'état caractéristique et de 19 degrés à l'état critique.

TABLE 4.10: Valeurs des caractéristiques pour mélanges des empilements par modélisations

Ratio	$p_{conf}$	$q_{pic}$	$p'_{pic}$	$M_{pic}$	$\varphi_{pic}$	$q_{pal}$	$p'_{pal}$	$M_{pal}$	$\varphi_{pal}$
Mono	50	113	88	1,3	27,9	91	80	1,1	24,0
	100	232	177	1,3		152	151	1,0	
	200	433	344	1,3		335	312	1,1	
1 :5	50	63	71	0,9	21,7	52	67	0,8	19,4
	100	142	147	1,0		123	141	0,9	
	200	262	287	0,9		213	271	0,8	
	300	396	432	0,9		307	402	0,8	
1 :2	50	58	69	0,8	21,8	51	67	0,8	19,3
	100	149	150	1,0		138	146	0,9	
	200	271	290	0,9		198	266	0,7	
	300	402	434	0,9		281	394	0,7	
1 :1	50	67	72	0,9	22,7	50	67	0,8	19,1
	100	158	153	1,0		123	141	0,9	
	200	289	296	1,0		199	266	0,7	
	300	413	438	0,9		304	401	0,8	
2 :1	50	54	68	0,8	21,9	52	67	0,8	19,7
	100	152	151	1,0		138	146	0,9	
	200	282	294	1,0		202	267	0,8	
	300	415	438	1,0		319	406	0,8	

#### 4.4.5 Conclusion

Deux conclusions principales peuvent être retenues dans cette section :

Premièrement, les proportions influencent très peu le déviateur pour les tailles de billes utilisées. Du coup, il n'y a pas beaucoup d'effet sur les angles de frottement. En revanche, la résistance au cisaillement des mélanges bidisperses est inférieure à celle d'un échantillon monodisperse de même compacité car, pour les échantillons bidisperses, cette valeur de compacité est obtenue pour un système non compacté. Son comportement est ainsi plus proche de celui d'un échantillon monodisperses moyennement dense. Deuxièmement, nous avons obtenu une bonne concordance des résultats numériques et expérimentaux.

## 4.5 Conclusion

Ce chapitre est consacré à l'étude expérimentale et numérique de différentes compositions d'échantillons. Nous avons étudié trois cas :

1. Des échantillons de particules monodisperses de différents diamètres ;
2. Des échantillons contenant une inclusion de grande taille positionnée dans différents endroits à l'intérieur de l'empilement ;



3. Des échantillons composés de mélanges de particules bidisperses de différentes proportions.

Dans les trois cas, nous avons tout d'abord lancé des essais expérimentaux sous une pression de confinement de 100kPa. Ensuite, nous avons comparé ces résultats avec des simulations numériques pour des échantillons de compositions identiques afin de valider notre modèle DEM. Puis nous avons simulé les différents échantillons sous différentes pressions de confinement pour étudier le comportement mécanique des matériaux.

Nous avons conclu que :

1. Pour les échantillons monodisperses de différents diamètres, la contrainte déviatorique ne change pas beaucoup en fonction de la taille des particules. Par contre, selon les résultats obtenus expérimentalement et numériquement sur les trois tailles de particules étudiées, on observe que les résultats sur 1cm ne sont pas assez stables pour être considérés répétables ; les résultats sur 4mm (présentés dans chapitre 3) présentaient une bonne répétabilité ; les résultats sur 6mm sont également satisfaisants. Donc, on considère que le diamètre des billes pour un milieu monodisperse doit être au moins égal à  $D/5$ , où  $D$  est le diamètre de la cellule pour avoir des résultats représentatifs.
2. Pour les échantillons avec une inclusion positionnée à différents endroits à l'intérieur de l'empilement, nous avons observé que la présence de l'inclusion diminue la résistance au cisaillement des matériaux par rapport aux échantillons monodisperses. Par contre, les différentes positions des inclusions ne changent pas la résistance du matériau. De même, la déformation volumique diminue en présence de l'inclusion par rapport aux échantillons monodisperses. Mais la position de l'inclusion n'affecte pas la déformation volumique. En revanche, les déformations locales changent selon les positions de l'inclusion.
3. Pour les mélanges de différentes proportions la résistance au cisaillement dépend de l'indice des vides initial, mais aussi l'intensité de la compaction utilisée pour préparer l'échantillon. La courbe de déformation volumique diminue avec l'augmentation des proportions de grosses billes.

Dans ce chapitre, les essais expérimentaux n'ont pas pu être systématiquement répétés trois fois, comme nous l'avons fait dans l'étude monodisperse. De même, nous n'avons pas pu tester les différents échantillons sous plusieurs pressions de confinement. Toutefois, la comparaison entre les simulations et les essais réalisés sous une pression de 100 kPa ayant été concluante, nous avons pu réaliser des simulations numériques dans des conditions beaucoup plus variées que les essais. Ces simulations, complémentaires au travail expérimental, nous permettent malgré tout de tirer les conclusions ci-dessus. Ce chapitre illustre bien l'utilité de l'outil numérique développé au cours de la thèse. Il permet en effet de faire varier à moindre coût différents paramètres d'essai pour économiser un travail expérimental long et coûteux.



# 5

## Conclusions et Perspectives

## 5.1 Conclusions

Cette thèse concerne l'étude du comportement au cisaillement des matériaux granulaires homogènes et hétérogènes. Les travaux sont réalisés sur des billes de verre et comportent à la fois des essais triaxiaux de laboratoire et des simulations numériques en DEM. D'un point de vue expérimental, les essais sont tout d'abord réalisés sur des échantillons homogènes (billes monodisperses). Ensuite, on étudie des systèmes de billes monodisperses comportant une inclusion de taille et des mélanges de billes bidisperses pour représenter les cas hétérogènes. D'un point de vue numérique, une condition limite cylindrique paroi rigide, basée sur la formule de Lamé, et une série de procédures sont proposées afin de modéliser l'essai triaxial. Les résultats numériques sont ensuite comparés avec les essais expérimentaux, à la fois pour les systèmes monodisperses et pour les milieux hétérogènes. La partie numérique permet en outre d'étudier l'influence de paramètres micromécaniques sur le comportement global des matériaux.

Dans le chapitre 1, les objectifs de la thèse ont été définis à partir de quatre questions principales. Voici les réponses qui ont été obtenues :

### **La DEM permet-elle de reproduire correctement le comportement au cisaillement d'un matériau granulaire lors d'un essai triaxial de révolution ?**

Dans cette étude, nous avons proposé une condition cylindrique paroi rigide pour modéliser l'essai triaxial. D'après nos simulations, les résultats concordent bien avec les résultats expérimentaux, à la fois pour des échantillons initialement denses et pour des échantillons moyennement denses. Les courbes de contraintes déviatoriques suivent bien, dans les deux cas, les allures types de l'essai triaxial. Les courbes de déformations volumiques sont reproductible jusqu'à environ 8% de déformation axiale. Au-delà, la déformation de l'échantillon numérique peut différer sensiblement de celle de l'échantillon expérimental, cependant, les influences des différents paramètres étudiés sont conservées. Les conditions membranes proposées dans la littérature permettent sans doute une représentation plus réaliste des déformations locales des échantillons. Toutefois, notre étude montre que la condition limite cylindrique utilisée, beaucoup plus simple à implémenter, permet déjà une représentation satisfaisante du comportement global des matériaux.

### **Quelle est l'influence des paramètres micromécaniques (tels que le coefficient de frottement grain-grain ou le coefficient de roulement) sur le comportement macroscopique du matériau ?**

Nous avons en réalité étudié cette question à la fois d'un point de vue expérimental et numérique. Expérimentalement, nous avons lubrifié la surface des billes avec du téflon afin de réduire le coefficient de frottement bille-bille. Parallèlement, les études numériques ont permis de faire varier de manière plus systématique les différents coefficients de frottement. Quatre séries de simulations sur le coefficient de frottement grain-grain,

le coefficient de frottement grain-paroi, le coefficient de frottement grain-pierre poreuse et le coefficient de roulement grain-grain ont été réalisées. Globalement, nous avons montré que la résistance au cisaillement augmente en fonction de l'augmentation de ces quatre paramètres micromécaniques. Les effets du coefficient de frottement grain-grain et du coefficient de roulement sont très marqués. Le coefficient de frottement grain-paroi, qui est souvent négligé dans la littérature a également une influence non négligeable. L'effet du coefficient de frottement grain-pierre poreuse est en revanche tout à fait négligeable.

#### **Jusqu'à quelle taille de particules peut-on utiliser une cellule triaxiale de dimension fixée pour identifier de manière reproductible le comportement d'un matériau granulaire homogène ?**

Nous avons étudié l'influence de la taille des particules dans le chapitre 4. En fait, la répétabilité des essais ou des simulations dépend étroitement du nombre de particules dans une cellule de dimensions fixées. Donc, par rapport aux dimensions de l'échantillon utilisé (50mm de diamètre et 125mm de hauteur), des particules de 6mm de diamètre (environ 1250 billes dans la cellule) permettent d'obtenir des résultats répétables. Naturellement, les résultats obtenus avec des billes de 4mm sont bien meilleurs que les autres.

#### **Quelle est l'influence des hétérogénéités de taille sur le comportement d'un matériau granulaire ?**

Pour répondre à cette question, nous avons étudié deux cas : des empilements homogènes comportant une inclusion de grande taille puis des mélanges bidisperses. La présence de billes de tailles différentes tend à augmenter la densité de l'empilement à l'issue de la phase de sédimentation, ce qui rend inutile la compaction de l'échantillon pour obtenir l'indice des vides visé. Du coup, le comportement des échantillons hétérogènes ressemble plutôt à celui des échantillons homogènes moyennement denses. La résistance au cisaillement des échantillons diminue ainsi par rapport à celle des échantillons homogènes. En plus, dans le cas des inclusions, la position de l'inclusion ne modifie pas le comportement obtenu.

## **5.2 Perspectives**

Bien que les objectifs fixés initialement aient été atteints, de nombreuses questions restent posées sur l'étude du cisaillement des matériaux granulaires afin d'approcher le comportement des sous produits industriels [153]. Les perspectives de travail suivantes pourraient être envisagées à court terme pour la poursuite de notre travail :

L'étude des hétérogénéités dans cette thèse a consisté soit à insérer une inclusion de taille plus grande dans un milieu monodisperse, soit à utiliser un mélange de billes bidisperses. Des hétérogénéités de propriétés mécaniques ou de forme pourraient également être prises en compte, en modifiant les caractéristiques de certaines particules

dans l'empilement.

Nous avons appliqué une condition limite cylindrique dans notre étude, nous avons vu que cette condition limite montre bien le comportement global de l'échantillon. Par contre, si on veut étudier les déformations locales de l'échantillon, notamment au-delà du pic du déviateur, il serait sans doute préférable d'utiliser une condition membrane. A court terme, il serait possible de découper la condition cylindrique rigide en plusieurs cylindres superposés, chaque cylindre se déformant en fonction de la pression locale exercée par les grains du milieu. A plus long terme, l'utilisation de la tessellation de Voronoï[154] pour paver les grains en contact de la membrane serait encore plus intéressante à développer pour modéliser la condition membrane.

Notre étude sur les hétérogénéités dans le chapitre 4, a montré que la résistance diminuait en présence d'inclusions lorsque l'indice des vides initial est maintenu constant. Le comportement de ces échantillons ressemble beaucoup à celui des matériaux moyennement denses. L'étude de l'influence de l'intensité de la compaction (et pas seulement de l'indice des vides initial) permettrait de préciser les notions d'empilement dense ou moyennement dense, utilisées dans cette thèse, et de relier le comportement obtenu à l'état de compacité maximale de l'empilement.

Enfin, l'étude du cisaillement des matériaux granulaires est un long chemin à parcourir. Pour finir, on peut citer le mot de Simpson et Tatsuoka [155] : "It is likely that computations that model the non-continuous nature of soils, with discrete load paths, fractures and similar features, will become important and might provide a major step forward."

# Table des figures

1.1	(a) Glissement de terrain ; (b) Schéma d'illustration de glissement de terrain	6
1.2	Surfaces de rupture dans les ouvrages : (a) surface de rupture dans un barrage ; (b) surface de rupture dans une tranchée . . . . .	6
1.3	Différents critères de rupture sur le plan déviatorique [5][6] . . . . .	7
1.4	(a) Equation de résistance de Coulomb (b) Critère de rupture de Mohr	8
1.5	Contraintes normale et tangentielle dans un plan incliné d'un angle $\alpha$ par rapport à l'horizontale . . . . .	8
1.6	Critère de Mohr Coulomb . . . . .	9
1.7	Cercle de Mohr dans un cas tridimensionnel . . . . .	10
1.8	Schéma de dispositif du scissomètre . . . . .	11
1.9	Essai de cisaillement direct (a) Etat initial ; (b) échantillon cisailé . .	11
1.10	Schéma de l'essai de cisaillement annulaire . . . . .	12
1.11	Schéma d'exemple d'une cellule triaxiale [10] . . . . .	13
1.12	État de contrainte dans un échantillon triaxial . . . . .	13
1.13	Contraintes de rupture au triaxial sur la Cercle de Mohr . . . . .	14
1.14	Cercle de Mohr dans l'essai triaxial <i>UU</i> . . . . .	16
1.15	Angle de frottement calculé pour Essai triaxial <i>CU</i> . . . . .	17
1.16	Angle de frottement calculé pour Essai triaxial <i>CD</i> . . . . .	17
1.17	État caractéristique et État critique . . . . .	19
1.18	Essais triaxiaux sur des échantillons lâche et dense : (a) courbe d'effort-déformation ; (b) variation de l'indice des vides durant le cisaillement. [15][7] . . . . .	20
1.19	Détermination de différents paramètres à partir de la courbe déviateur et déformation volumique . . . . .	21
1.20	Phénomène de dilatance : (a) objet initial (b) No dilatance (c) dilatance de cisaillement . . . . .	22
1.21	Influence de vitesse de chargement sur le stick-slip billes de verres sous pression de confinement de 30kPa [18] . . . . .	23
1.22	Le mouvement de stick-slip . . . . .	23
1.23	Transformation de l'état statique à l'état dynamique . . . . .	24
1.24	Illustration des zones de slip pour la sphère en glissement : (a) zone de glissement complet (b) zone de glissement partiel (c) zone de glissement partiel [21][22] . . . . .	24
1.25	Classification cinématique de la déformation des bandes de cisaillement (a) bande de cisaillement simple (b) bande de cisaillement en compaction (c) bande de cisaillement dilatant (d) bande en compaction (e) bande dilatant . . . . .	25

1.26	Illustrations de modèles de bande de cisaillement observées avec changement de pression de confinement pour différents essais de compression (a, b) avec deux valeurs d'élanement $H / D = 2$ et $H / D = 1$ , plus pour les essais d'extension (c) . . . . .	26
1.27	Déformation de l'échantillon au cours de l'essai triaxial par CT . . . . .	27
1.28	Différents modes de rupture de l'échantillon . . . . .	27
1.29	Rotations des grains au long de l'essai [32] . . . . .	28
1.30	Évolution des déplacements et des rotations de sables au cours de l'essai triaxial sous pression de confinement 100 kPa par une technique d'imagerie et de reconstruction [33] . . . . .	28
1.31	Schématisation de la condition Paroi rigide . . . . .	32
1.32	Schématisation de la Condition périodique . . . . .	33
1.33	Schématisation de la Condition périodique axisymétrique [97] . . . . .	34
1.34	Condition membrane par des sphères chevauchés [84] . . . . .	34
1.35	Illustration de l'identification condition membrane by Cui [64][99] . . . . .	35
1.36	Déformation locale par condition rigide et membrane(2D)[64] . . . . .	36
1.37	Condition limite parallélépipède [71] . . . . .	36
1.38	Illustration de l'identification des particules membrane [100] . . . . .	37
1.39	Application de FEM sur la condition limite dans la simulation de l'essai triaxial DEM [42] . . . . .	37
1.40	Illustration de la notion de homogénéisation [21] . . . . .	38
1.41	Échantillon composé par des agglomérats . . . . .	42
2.1	Ensemble du dispositif triaxial utilisé pour l'étude . . . . .	48
2.2	Synoptique de réalisation de l'essai triaxial . . . . .	49
2.3	(a) Mise en place des joints toriques à la base de l'échantillon ;(b) Échantillon prêt à être monté sur la presse . . . . .	51
2.4	Dispositif pour préparation de l'échantillon moyennement dense . . . . .	52
2.5	Billes neuves non traitées (à gauche) et après application de téflon (à droite) . . . . .	53
2.6	Réponse déviatorique type obtenue lors des essais triaxiaux de cisaillement (courbe de référence : $p' = 200$ kPa) . . . . .	59
2.7	Cisaillement et déformation globale de l'échantillon à différents niveaux de déformations repérés sur la réponse déviatorique type en Figure 2.6 ( $p' = 200$ kPa) . . . . .	59
2.8	Forme de l'échantillon avant essai (a), au pic de rupture (b) et au palier d'écoulement (c) . . . . .	60
2.9	Évolution du déviateur $q$ pour échantillons denses sous différentes vitesses de cisaillement . . . . .	61
2.10	Courbes déviatoriques pour les essais triaxiaux denses saturés . . . . .	61
2.11	Courbes volumiques pour les essais triaxiaux denses saturés . . . . .	62



2.12	Courbes déviatoriques pour échantillons denses saturés : essais de répétabilité . . . . .	63
2.13	Courbes volumiques pour échantillons denses saturés : essais de répétabilité	63
2.14	Évolution de l'indice des vides en fonction de la pression effective moyenne pour les échantillons denses . . . . .	64
2.15	Évolution du rapport de contrainte $q/p'$ pour échantillons denses saturés	65
2.16	Droite de rupture au pic et au palier pour échantillons denses saturés .	65
2.17	Détermination expérimentale de l'angle caractéristique et de l'angle de dilatance à partir de la courbe déformation volumique en fonction de la déformation axiale . . . . .	66
2.18	Courbes déviatoriques pour les essais triaxiaux moyennement denses saturés . . . . .	68
2.19	Courbes volumiques pour les essais triaxiaux moyennement denses saturés	68
2.20	Courbes déviatoriques pour échantillons moyennement denses saturés : essais de répétabilité . . . . .	69
2.21	Courbes volumiques pour échantillons moyennement denses saturés : essais de répétabilité . . . . .	69
2.22	Évolution de l'indice des vides en fonction de la pression effective moyenne pour les échantillons moyennement denses . . . . .	69
2.23	Évolution du rapport de contrainte $q/p'$ pour échantillons moy. denses	70
2.24	Droite de rupture au pic et au palier pour échantillons moyennement denses . . . . .	70
2.25	Comparaison de l'évolution de la contrainte déviatorique pour les échantillons denses et moyennement denses (cas $p' = 100kPa$ ) . . . . .	72
2.26	Comparaison de l'évolution de la déformation volumique pour les échantillons denses et moyennement denses (cas $p' = 100kPa$ ) . . . . .	72
2.27	Évolution du déviateur $q$ : comparaisons états dense / moyennement dense – États sec / saturé . . . . .	73
2.28	Rapport de contrainte $q/p'$ : comparaisons états dense / moyennement dense - États sec et saturé . . . . .	73
2.29	Droites de rupture : comparaisons états sec/ saturé pour échantillons denses . . . . .	74
2.30	Droites de rupture : comparaisons états sec/saturé pour échantillons moyennement denses . . . . .	74
2.31	Comparaisons de l'évolution du déviateur $q$ pour échantillons avec modification de texture . . . . .	76
2.32	Comparaisons de l'évolution de la déformation volumique avec modification de texture . . . . .	76
2.33	Droite de rupture pour échantillons avec modification de texture . . .	77
3.1	Environnement de travail numérique . . . . .	81

3.2	Schémat du cycle de calcul DEM . . . . .	82
3.3	Illustration de la procédure de détection de contacts potentiels et effectifs pour le calcul des interactions dans le code <i>demGCE</i> où P1, P2, P3 sont les identités des particules [82] . . . . .	84
3.4	Schéma de l'interaction entre deux particules en 3D et une coupe en 2D	85
3.5	Schéma d'illustration des lois de contact : (a) Force normale; (b) Force tangentielle [21] . . . . .	85
3.6	Schématisation d'une collision entre une particule sphérique et un plan	88
3.7	Simulation d'un contact entre une particule et un plan avec différents coefficients d'amortissement visqueux . . . . .	89
3.8	Schématisation des procédures de modélisation de l'essai triaxial . . .	91
3.9	(a) condition limite cylindrique dans nos simulations de l'essai triaxial; (b) Schématisation du contact du grain avec la condition limite cylindrique	93
3.10	Étape de génération de l'empilement puis phases de sédimentation :t=0s;t=0,1s;t=0,2s;t=0,4s	94
3.11	(a) compacité de l'empilement; (b) énergie cinétique de l'empilement; (c) énergie potentiel de l'empilement (d) Nombre de coordination . . .	95
3.12	Schématisation de la compression de l'empilement . . . . .	97
3.13	Évolution du plateau supérieur et de la particule la plus haute pendant la compression . . . . .	97
3.14	Schématisation de la vibration de l'empilement . . . . .	98
3.15	Compacité de l'empilement au cours d'une vibration pendant 1s . . . .	98
3.16	Images de l'empilement numérique (a) après sédimentation, (b) après compression et (c) après vibration (d) Échantillon expérimental dense	99
3.17	Coupe de la condition limite cylindrique . . . . .	100
3.18	Algorithme d'une préparation en suivant un chemin isotrope . . . . .	102
3.19	Variation des contraintes axiale $\sigma_1$ et latérale $\sigma_3$ lors de la préparation isotrope d'échantillons à 50, 100, 200 et 300 kPa. . . . .	102
3.20	Algorithme de contrôle de la contrainte latérale dans la phase de cisaillement . . . . .	103
3.21	Variation de la contrainte latérale et de la contrainte axiale . . . . .	103
3.22	Courbe de la pression supérieure, la pression inférieure et le tenseur de contrainte moyenne $\sigma_{33}$ . . . . .	105
3.23	Influence du frottement entre les particules et la paroi sur la courbe tenseur moyen (a) coefficient de frottement particule-paroi 0 (b) coefficient de frottement particule-paroi 0,3 ( $P_{conf}$ 200 kPa) . . . . .	105
3.24	Echantillons numériques au cours d'une simulation numérique de l'essai triaxial : (a) après sédimentation; (b) après consolidation; (c) à l'état critique; (d) à 15% déformation axiale . . . . .	106

3.25	Trois états retenus pour la visualisation de la vitesse, de la vitesse angulaire et du tenseur de contrainte de chaque particule sur l'empilement : Début d'essai 1% de déformation axiale, au pic sur la courbe déviatorique à 3% de déformation axiale, au palier sur la courbe déviatorique à 14% de déformation axiale . . . . .	107
3.26	Image de la distribution de vitesses sur toutes les particules au cours de la phase de cisaillement : 1%, 3%,14% de déformation axiale ( $P_{conf}$ 200 kPa) . . . . .	107
3.27	Image de la distribution de vitesse angulaire sur toutes les particules au cours de la phase de cisaillement à 1%, 3%,14% de déformation axiale ( $P_{conf}$ 200 kPa) . . . . .	108
3.28	Image de la distribution du tenseur de contraintes local sur toutes les particules au cours de la phase de cisaillement : 1%, 3%,14% de déformation axiale ( $P_{conf}$ 200 kPa) . . . . .	108
3.29	Confrontation des courbes obtenues par simulation numérique avec les résultats expérimentaux pour trois différents confinement 50kPa, 100kPa, 200kPa, (a) contraintes déviatoriques (b) évolution de la déformation volumique (c) Indice des vides en fonction de log p . . . . .	110
3.30	Confrontation des courbes obtenues par simulation numérique pour des empilements moyennement denses avec les résultats expérimentaux pour trois différents confinement 50 kPa, 100 kPa, 200 kPa, (a) contraintes déviatorique (b) évolution de la déformation volumique . . . . .	112
3.31	Influence du coefficient de frottement inter-particules sur (a) la contrainte déviatorique; (b) la courbe de déformation volumique;(c) la courbe du tenseur de contraintes déviatoriques sous pression de confinement 200 kPa	114
3.32	Influence du frottement particule-particule (a) $\mu_{gg} = 0,1$ (b) $\mu_{gg} = 0,2$ (c) $\mu_{gg} = 0,3$ (d) $\mu_{gg} = 0,5$ sur la contrainte déviatorique sous différentes pressions de confinement 50kPa, 100kPa, 200kPa, 300kPa . . . . .	115
3.33	Influence de frottement particule-membrane sur la position de gonflement de l'empilement [67] : (a) $\mu_{gw}=0,0$ ; (b) $\mu_{gw}=0,05$ ;(c) $\mu_{gw}=0,1$ . . . . .	117
3.34	Influence du coefficient de frottement particule-paroi sur (a) la courbe de la contrainte déviateur et (b) déformation volumique en fonction de déformation axiale sous pression de confinement 200kPa . . . . .	118
3.35	Influence du coefficient de frottement particule-pierre poreuse sur la courbe de la contrainte déviateur et déformation volumique en fonction de déformation axiale sous pression de confinement 200kPa . . . . .	119
3.36	Influence de coefficient de roulement sur (a) la contrainte déviatorique et (b) déformation volumique de l'essai triaxial . . . . .	120
3.37	Distribution de la rotation de chaque particule dans l'empilement selon différents coefficient de roulement sous pression de confinement 200kPa	121

3.38	Influence de l'indice des vides sur (a) la contrainte déviatorique (b) la déformation volumique en fonction de la déformation axiale (c) Évolution des indices des vides . . . . .	122
3.39	Courbe courbe déviatorique des essais numérique avec différents vitesses de chargement (b) courbe déformation volumique des essais numériques avec différents vitesses de chargement . . . . .	124
3.40	Évolution de l'indice de friction en fonction de différent coefficient de frottement . . . . .	124
3.41	Évolution de l'indice de friction en fonction de différents coefficient de roulement . . . . .	125
3.42	Évolution de l'indice de friction en fonction de différent pression de confinement . . . . .	125
3.43	Répétitions des courbe déviatorique pour 3 échantillons numériques sous différentes pressions de confinement . . . . .	126
4.1	Schéma du contenu du chapitre 4 . . . . .	130
4.2	Échantillons initiaux composés de billes de différents diamètres (2mm, 4mm, 6mm) . . . . .	131
4.3	Déformation des trois échantillons de différentes tailles cisailés à 15% de déformation axiale . . . . .	132
4.4	Courbes déviatoriques pour trois différents échantillons composés de billes de verre monodisperses de différents diamètres . . . . .	133
4.5	Courbes de déformation volumique pour trois échantillons composés des billes de verre mono-disperse de différentes diamètres . . . . .	133
4.6	Figure de trois empilements monodisperses de différentes tailles de particules : 1cm, 6mm, 4mm . . . . .	135
4.7	Répétitions des courbes déviatorique et déformation volumique en fonction de la déformation axiale par deux échantillons de diamètre de 1cm . . . . .	135
4.8	Déviateur de contrainte et déformation volumique pour échantillons de 6mm sous pression de confinement de 100 kPa . . . . .	136
4.9	Déviateur de contrainte et déformation volumique pour différents tailles d'échantillons sous pression de confinement de 100 kPa . . . . .	136
4.10	Comparaisons des courbes déviatorique et de déformation volumique pour un échantillon mono-disperse de 6mm . . . . .	137
4.11	Courbes déviatoriques et déformation volumique sous quatre pressions de confinement pour des billes de 6mm de diamètre . . . . .	138
4.12	Deux types de billes utilisées pour les empilements contenant des hétérogénéités . . . . .	139

4.13 Images de 4 différents échantillons préparés : (a) avec des billes monodisperses ; (b) avec une inclusion en haut ; (c) avec une inclusion au milieu ; (d) avec une inclusion en bas . . . . .	140
4.14 Photos des échantillons à 15% de déformation axiale : (a) échantillon monodisperses ; (b) échantillon avec une inclusion positionnée en haut ; (c) échantillon avec une inclusion positionnée au milieu ; (d) échantillon avec une inclusion positionnée en bas . . . . .	140
4.15 Courbes déviatoriques des 4 différents échantillons : (a) échantillon monodisperse ; (b) échantillon avec une inclusion dans la partie haute ; (c) échantillon avec une inclusion positionnée au milieu ; (d) échantillon avec une inclusion dans la partie basse . . . . .	141
4.16 Courbes de déformation volumique des 4 différents échantillons : (a) échantillon monodisperse ; (b) échantillon avec une inclusion dans la partie haute ; (c) échantillon avec une inclusion positionnée au milieu ; (d) échantillon avec une inclusion dans la partie basse . . . . .	142
4.17 Échantillons virtuels avec l'inclusion de grosse particule positionnée (a) à côté au milieu, (b) centre au milieu, (c) centre en bas, (d) à côté en bas	142
4.18 Courbes de contrainte déviatorique et de déformation volumique pour quatre compositions des échantillons sous pression de confinement de 100kPa . . . . .	144
4.19 Comparaison contrainte déviatorique et déformation volumique pour le cas d'une inclusion positionnée au centre en bas pour les essais expérimentaux et numériques . . . . .	144
4.20 Comparaison contrainte déviatorique et déformation volumique pour le cas d'une inclusion positionnée au centre au milieu pour les essais expérimentaux et numériques . . . . .	145
4.21 Courbe de contrainte déviatorique et de déformation volumique pour l'échantillon avec une inclusion positionnée en bas au centre de l'échantillon sous 4 différentes pressions de confinement 50kPa, 100kPa, 200kPa, 300 kPa . . . . .	145
4.22 Courbe contrainte déviateur et déformation volumique pour l'échantillon avec une inclusion positionnée en bas sur le coté de l'échantillon sous 4 différentes pressions de confinement 50kPa, 100kPa, 200kPa, 300 kPa .	146
4.23 Courbe contrainte déviateur et déformation volumique pour l'échantillon avec une inclusion positionnée en milieu au centre de l'échantillon sous 4 différentes pressions de confinement 50kPa, 100kPa, 200kPa, 300 kPa	146
4.24 Courbe contrainte déviateur et déformation volumique pour l'échantillon avec une inclusion positionnée en milieu à côté de l'échantillon sous 4 différentes pressions de confinement 50kPa, 100kPa, 200kPa, 300 kPa .	146

4.25	Photos d'échantillons expérimentaux avec des mélanges de billes de différentes proportions : 1 :5, 1 :2, 1 :1 et 2 :1 . . . . .	149
4.26	Déformations des échantillons expérimentaux avec différent pourcentage des particules bi-disperses, 1 :5, 1 :2, 1 :1 et 2 :1 à 15% déformation axiale	149
4.27	Courbes déviatorique pour différentes compositions par des échantillons expérimentaux . . . . .	149
4.28	Courbes de déformation volumique pour différents mélanges des échantillons expérimentaux . . . . .	150
4.29	Images des échantillons numériques avec différentes pourcentages de masse de mélange des deux différents taille de particules, 1 :5, 1 :2, 1 :1 et 2 :1 . . . . .	151
4.30	Indice de vide selon différentes masse proposition de particules de 4mm et 1cm . . . . .	152
4.31	Comparaisons expérimental et numérique sur la contrainte déviatorique et déformation volumique pour échantillon de mélange 1 :5 sous pression de confinement de 100kPa . . . . .	153
4.32	Comparaisons expérimental et numérique sur la contrainte déviatorique et déformation volumique pour échantillon de mélange 1 :2 sous pression de confinement de 100kPa . . . . .	153
4.33	Comparaisons expérimental et numérique sur la contrainte déviatorique et déformation volumique pour échantillon de mélange 1 :1 sous pression de confinement de 100kPa . . . . .	154
4.34	Comparaisons expérimental et numérique sur la contrainte déviatorique et déformation volumique pour échantillon de mélange 2 :1 sous pression de confinement de 100kPa . . . . .	154
4.35	Déviateur de contrainte et déformation volumique pour quatre différents mélanges masse proportionnel de 1 :5, 1 :2, 1 :1 et 2 :1 échantillon sous la pression de confinement de 100kPa . . . . .	155
4.36	Déviateur de contrainte et déformation volumique pour un échantillon mélange masse proportionnel de 5 :1 sous quatre différents pressions de confinement 50kPa, 100kPa, 200kPa, 300kPa . . . . .	156
4.37	Déviateur de contrainte et déformation volumique pour un échantillon mélange masse proportionnel de 2 :1 sous quatre différents pressions de confinement 50kPa, 100kPa, 200kPa, 300kPa . . . . .	156
4.38	Déviateur de contrainte et déformation volumique pour un échantillon mélange masse proportionnel de 1 :1 sous quatre différents pressions de confinement 50kPa, 100kPa, 200kPa, 300kPa . . . . .	157
4.39	Déviateur de contrainte et déformation volumique pour un échantillon mélange masse proportionnel de 1 :2 sous quatre différents pressions de confinement 50kPa, 100kPa, 200kPa, 300kPa . . . . .	157

# Liste des tableaux

1.1	Choix des caractéristiques de cisaillement des sols[13] . . . . .	17
1.2	Variables principales de l'essai triaxial . . . . .	18
2.1	Distribution de la taille des billes de verre . . . . .	47
2.2	Série d'essais avec échantillons denses avec variation de la vitesse de déplacement et de la pression moyenne effective . . . . .	56
2.4	Série d'essais avec échantillons denses saturés avec billes neuves traitées avec variation de la pression moyenne effective . . . . .	57
2.3	Série d'essais avec échantillons denses et moyennement dense avec variation de l'état hydrique et de la pression moyenne effective . . . . .	58
2.5	Indice des vides calculés au cours des différentes étapes des essais triaxiaux denses saturés . . . . .	62
2.6	Valeurs expérimentales caractéristiques du triplet $(q, p, M)$ et $\varphi$ (en degrés) calculés au pic et au palier pour les essais denses saturés . . . . .	65
2.7	Evaluation des angles de dilatance et d'initiation à la dilatance (en degrés) pour les essais triaxiaux sur échantillons denses saturés . . . . .	67
2.8	Indice des vides calculés au cours des différentes étapes des essais triaxiaux moyennement denses saturés . . . . .	67
2.9	Valeurs expérimentales caractéristiques du triplet $(q, p, M)$ et $\varphi$ (en degrés) calculés au pic et au palier pour les essais moyennement denses saturés . . . . .	71
2.10	Evaluation des angles de dilatance et d'initiation à la dilatance (en degrés) pour les essais triaxiaux sur échantillons moyennement denses saturés . . . . .	71
2.11	Valeurs expérimentales caractéristiques du triplet $(q, p, M)$ et $\varphi$ (en degrés) calculés au pic et au palier pour les essais denses saturés avec modification de texture . . . . .	77
2.12	Evaluation des angles de dilatance et d'initiation à la dilatance (en degrés) pour les essais triaxiaux sur échantillons denses saturés avec modification de texture . . . . .	77
3.1	Tableau des quelques paramètres important dans la simulation de l'essai triaxial : données issus de la bibliographie . . . . .	90
3.2	Tableau général montrant la plage de variation des coefficients de frottement dans le cadre de ce travail . . . . .	91
3.3	Différentes indice de vides ou compacités dans les trois étapes de préparations . . . . .	100
3.4	Tableau de paramètres de simulations pour les exemples de la préparation isotrope et phase de cisaillement présenté . . . . .	101
3.5	Tableau des paramètres appliqués dans la simulation de l'essai triaxial . . . . .	109

3.6	Comparaisons indice de vide pour échantillons denses numérique et expérimentales . . . . .	109
3.7	Angles de frottement pour échantillons denses au pic . . . . .	111
3.8	Angles de frottement pour échantillons denses au palier . . . . .	111
3.9	Angles de frottement pour échantillons moyennement denses au pic . .	112
3.10	Angles de frottement pour échantillons moyennement denses au palier	113
3.11	Paramètres pour l'étude d'influence du coefficient de frottement inter-particule . . . . .	114
3.12	Valeurs des caractéristiques pour mélanges des empilements par modélisations . . . . .	116
3.13	Paramètres retenus pour l'étude de l'influence du coefficient de frottement particules-paroi . . . . .	117
3.14	Paramètre de l'influence du coefficient de frottement particules-pierres poreuses . . . . .	119
3.15	Paramètres de l'influence de coefficient de résistance aux roulements .	120
3.16	Indice des vides initial des quatre échantillons préparés pour le test . .	122
3.17	Différents indices des vides et compacité pour 3 différents échantillons numériques avant la phase de cisaillement . . . . .	126
4.1	Principales caractéristiques des échantillons de différentes tailles de billes verres . . . . .	132
4.2	Paramètres des empilements avec de différentes tailles de particules dans les simulations . . . . .	134
4.3	Paramètres principaux de la simulation DEM . . . . .	134
4.4	Valeurs des caractéristiques des empilements de 6mm par modélisations	138
4.5	Séries des essais pour l'étude sur l'influence de la présence d'une hétérogénéité de taille . . . . .	139
4.6	Valeurs des caractéristiques des empilements de 6mm par modélisations	143
4.7	Valeurs des caractéristiques des empilements avec des inclusions par modélisations . . . . .	147
4.8	Propositions massiques des mélanges bidisperses étudiés . . . . .	148
4.9	Valeurs des caractéristiques des empilements de 6mm par modélisations	151
4.10	Valeurs des caractéristiques pour mélanges des empilements par modélisations . . . . .	158



# Bibliographie

- [1] F. Becquart. *Premiere approche du comportement mécanique d'un milieu granulaire issu d'un mâchefer d'incinération d'ordre ménageres : valorisation en technique routiere*. Thèse de doctorat, Université de Lille 1, 2007. (document)
- [2] Le Ngoc Hung. *Contribution à la modélisation du comportement mécanique canique d'un matériau hétérophase rematerialisé issu d'un mâchefer d'incinération d'ordures ménageres : Valorisation en Genie Civil*. Thèse de doctorat, 2011. (document), 1.2.3.2
- [3] D.X. Wang. *Solidification et valorisation de sediments du port de Dunkerque en travaux routiers*. Thèse de doctorat, University Lille 1, 2011. (document)
- [4] Z.F. Zhao. *Valorisation des sable de beton recycle pour la fabrifabric de motier( Re-use of fine recycled concrete aggregates for the manufacture of mortars)*. Thèse de doctorat, University Lille 1 et L'École des Mines de Douai, 2014. (document)
- [5] F. Bahda. *Étude du comportement du sable a l'appareil triaxial : expérience et modélisation*. Thèse de doctorat, Champs sur Marne, 1997. 1.3, 5.2
- [6] G.B. Gong. *DEM simulation of drained and undrained behaviour*. Thèse de doctorat, 2008. 1.3, 5.2
- [7] D.R. Holtz and D.K. William. *Introduction à la geotehcinqe*. 1991. 1.1.3, 1.2.1, 1.18, 3.3.1, 3.8.3, 5.2
- [8] R. Brannon. Mohr's circle and mohr circles. Rapport, 2003. 1.1.3
- [9] G. Chambon, A. Corfdir, P. Lerat, and J. Schmittbuhl. Essais d'interface sol/structure utilisant l'appareil de cisaillement simple annulaire. Rapport, Ecole Normale Supérieure, Paris. 1.2.1
- [10] Nf p94-112. Rapport. 1.11, 5.2
- [11] K. Terzaghi and O.-K. Fröhlich. Theorie der setzung von tonschichten : eine einführung in die analytische tonmechanik. *Soil Mechanics in Engineering Practice*, 1951. 1.2.2.2
- [12] B. Andreotti, Y. Forterre, and O. Pouliquen. *Les milieux granulaires entre fluide et solide*. 2011. 1.2.2.2
- [13] J-P. Magnan. Résistance au cisaillement. Rapport. 1.1, 5.2
- [14] A. Casagrande. Characteristics of cohesionless soils affecting the stability of slopes and earth fills. *Journal of the Boston Society of Civil Engineers, janvier, repris dans Contributions to Soil Mechanics*, pages 257–276, 1936. 1.2.3.1
- [15] R.C. Hirschfeld. Stress-deformation and strength characteristics of soils. *Harvard University (Non publie)*, page 87, 1963. 1.18, 5.2
- [16] W D.M. Soil behavior and critical state soil mechanic. *Cambridge University Press*, 1990. 1.2.3.2

- [17] F. Adjémian and P. Evesque. Experimental stick-slip behaviour in triaxial test on granular matter. *Poudres & Grains*, 12 :115–121, 2001. 1.2.4, 1.3.8, 2.5.1, 2.5.2.1
- [18] H.M. Tam. *Frottement saccadé dans les matériaux granulaires modèles*. Thèse de doctorat, 2011. 1.2.4, 1.21, 1.2.4, 1.2.4, 1.3.8, 2.2.1, 2.5.1, 2.5.2.1, 5.2
- [19] F. Adjemian. *Stick-slip et transition de broutage dans les essais triaxiaux sur billes de verre*. Thèse de doctorat, 2003. 1.2.4, 2.5.1, 2.5.2.1
- [20] B. Andreotti. Plasticité, frottement, rupture, avalanche ; lave prismee ; séisme ; dyke. Rapport, 2011/2012. 1.2.4
- [21] C. O’Sullivan. *Particulate Discrete Element Modelling*. CRC Press, 2011. 1.24, 1.40, 1.3.6, 3.2.2, 3.5, 3.2.4.4, 3.3.1, 3.7, 5.2
- [22] Persson and B.N.J. *Sliding friction : Physical principles and application*. New York, 1998. 1.24, 5.2
- [23] T.K. Nguyen. *Modelisation multi-echelle des materiaux granulaires frottant-cohesifs*. Thèse de doctorat, 2013. 1.2.5, 1.3.1
- [24] I. Vadoulakis. Shear band inclination and shear modulus of sand in biaxial test. *Methods Geomech*, 1980. 1.2.5
- [25] H. Y. Liu, S. Q. Kou, P. A. Lindqvist, and C. A. Tang. Numerical studies on the failure process and associated microseismicity in rock under triaxial compression. *Tectonophysics*, 384(1-4) :149–174, 2004. 838IU Times Cited :15 Cited References Count :46. 1.2.5, 1.3.2
- [26] E.M. Charalampidou. *Étude expérimentale sur la localisation des déformations dans les grès poreux*. Thèse de doctorat, 2011. 1.2.5
- [27] Y. Higo, F. Oka, T. Sato, Y. Matsushima, and S. Kimoto. Investigation of localized deformation in partially saturated sand under triaxial compression using microfocus x-ray ct with digital image correlation. *Soils and Foundations*, 2013. 1.2.5, 1.2.5
- [28] X.Q. Gu, M.S. Huang, and J.G. Qian. Discrete element modeling of shear band in granular materials. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 72(0) :37–49, 2014. 1.2.5
- [29] P. Besulle, J. Desrues, and S. Raynaud. Experimental characterisation of the localisation phenomenon inside a vosage sandstone in a triaxial cell. *Rock mechanics and Mining Sciences*, 2000. 1.2.5, 1.3.2
- [30] X. Lee and W.C. Dass. An experimental study of granular packing structure changes under load. *Poudres & Grains*, 93 :17–22, 1993. 1.2.5
- [31] Y.R. Fu. *Experimental quantification and DEM simulation of mico-macro behaviours of granular materials using X-ray tomography imaging*. Thèse de doctorat, 2005. 1.2.5, 1.3.2, 1.3.7, 3.4.1

- [32] Stephen A. Hall, J. Desrues, G. Viggiani, and P. Besuelle. Experimental characterisation of (localised) deformation phenomena in granular geomaterials from sample down to inter-and intra-grain scales. *Procedia IUTAM*, 4 :54–65, 2012. 1.2.5, 1.29, 1.3.3.3, 5.2
- [33] J. Desrues, E. Ando, S. Hall, C. Viggiani, and P. Bésuelle. Mesure par tomographie rayons x de la déformation d'un échantillon de sable vu comme une assemblée de grains. In *Journee Fed3G et MaiMoSiNe*, 2012. 1.2.5, 1.30, 5.2
- [34] X.B. Chen. Shear behaviour of a geogrid-reinforced coarse-grained soil based on large-scale triaxial tests. *Geotextiles and Geomembranes*, 42 :312–328, 2014. 1.2.5, 4.3.1
- [35] O.C. Zienkiewicz. *La méthode des éléments finis*. McGraw-Hill Inc, 1979. 1.3.1
- [36] T.J.R. Hughes. *The finite element method : linear static and dynamic finite element analysis*. DoverPublications, 2012. 1.3.1
- [37] Antonio A Munjiza. *The Combined Finite-Discrete Element Method*. Wiley, 2004. 1.3.1, 3.1
- [38] J.J. Moreau. Fonctions de résistance et fonctions de dissipation, 1971. 1.3.1
- [39] J.J. Moreau. Sur l'évolution d'un système elasto-visco-plastique. *C.R.Acad. SC.Paris*, 1971. 1.3.1
- [40] J. Fortin. *Simulation numerical de la dynamique des systèmes multicorps appliquée aux milieux Granulaires*. Thèse de doctorat, 2000. 1.3.1, 3.2.4.4, 3.3.1, 3.3.1
- [41] J.J. Moreau. Sur la lois de frottement, de plasticite et de viscosite. *C.R.Acad. SC.Paris*, 1970. 1.3.1
- [42] B. Le Hello. *Renforcement par géosynthétiques des remblais sur inclusions rigides, étude expérimentale en vraie grandeur et analyse numérique*. Thèse de doctorat, 2007. 1.3.1, 1.3.3.3, 1.39, 5.2
- [43] Cundall.P.A. A computer model for simulating progressive large scale movements of blocky rock systems. *Proceedings of the Symposium of the international Society of Rock Mechanics*, 1 :132–150, 1971. 1.3.2, 3.1
- [44] P.A. Cundall. Ball-a computer program to model granular media using the distinct element method. *Technical note TN-LN-13*, 1978. 1.3.2, 3.1
- [45] P. A. Cundall and O.Strack. The distinct element method as a tool for research in granular media. *Report to NSF*, Part I, 1978. 1.3.2, 1.3.4, 3.1
- [46] P. A. Cundall and O. D. L. Strack. A discrete numerical model for granular assemblies. *Geotechnique*, 29 :47–65, 1979. 1.3.2, 3.1
- [47] J.G. De Josselin and A. Verruijt. Étude phot-elastique d'un empilement de disques. *Cahiers du Groupe Francais de Rheologie*, pages 73–86, 1969. 1.3.2
- [48] M. Oda and J. Konishi. Microscopic deformation mechanism of granular material in simple shear. *Soils and Foundations*, 14 :25–38, 1974. 1.3.2

- [49] P.A. Cundall. Computer simulations of dense sphere assemblies. *Micromechanics of granular materials, Satake and Jenkins*, pages 113–123, 1988. 1.3.2
- [50] Y. Kishino. Disc model analysis of granular media. *Micromechanics of granular materials, Satake and Jenkins*, pages 143–152, 1988. 1.3.2
- [51] J.M. Ting, L. Meachum, and Rowell J.D. Effect of particle shape on the strength and deformation mechanism of ellipse-shaped granular assemblages. *Engineering Computations*, 12 :99–108, 1995. 1.3.2
- [52] T. T. Ng and R. Dobry. Numerical simulations of monotonic and cyclic loading of granular soil. *Journal of Geotechnical Engineering-Asce*, 120 :388–403, 1994. 1.3.2
- [53] K. Iwashita and M. Oda. Rolling resistance at contacts in simulation of shear band development by dem. *Journal of Engineering Mechanics-Asce*, 124(3) :285–292, 1998. Yx291 Times Cited :182 Cited References Count :29. 1.3.2
- [54] Inc Itasca Consulting Group. Pfc 3d manual. Rapport, 2010. 1.3.2, 3.2.4.2, 3.4.1
- [55] T.G. Sitharam, S.V. Dinesh, and N. Shimizu. Micromechanical modelling of monotonic drained and undrained shear behaviour of granular media using three-dimensional dem. *Int.J.Numer.Anal.Meth.Geomech*, 26 :1167–1189, 2002. 1.3.2
- [56] Z. Yan, C.L. Martin, O. Guillon, D. Bouvard, and C.S. Lee. Microstructure evolution during the co-sintering of ni/batio3 multilayer ceramic capacitors modeled by discrete element simulations. *Journal of the European Ceramic Society*, 2014. 1.3.2
- [57] C.L. Martin and D. Bouvard. Study of the cold compaction of composite powders by the discrete element method. *Acta Materialia*, 2003. 1.3.2
- [58] C.L. Martin, D. Bouvard, and Shima S. Study of particle rearrangement during powder compaction by the discrete element method. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 2003. 1.3.2, 3.2.4.2
- [59] P. Pizette, C. L. Martin, G. Delette, P. Sornay, and F. Sans. Compaction of aggregated ceramic powders : From contact laws to fracture and yield surfaces. *Powder Technology*, 198(2) :240–250, 2010. 560BS Times Cited :15 Cited References Count :48. 1.3.2, 1.3.3.1
- [60] P. Pizette, C. L. Martin, G. Delette, F. Sans, and T. Geneves. Green strength of binder-free ceramics. *Journal of the European Ceramic Society*, 33(5) :975–984, 2013. 081OX Times Cited :0 Cited References Count :48. 1.3.2, 1.3.3.1
- [61] M.J. Jiang, J.M. Konrad, and S. Leroueil. An efficient technique for generating homogeneous specimens for dem studies. *Computers and Geotechnics*, 30 :579–597, 2003. 1.3.2, 3.4.4.1

- [62] K. Bagi. An algorithm to generate random dense arrangements for discrete element simulations of granular assemblies. *Granular Matter*, 7(1) :31–43, 2005. 910CK Times Cited :50 Cited References Count :38. 1.3.2
- [63] K. Iwashita and M. Oda. Micro-deformation mechanism of shear banding process based on modified distinct element method. *Powder Technology*, 109(1-3) :192–205, 2000. 294RK Times Cited :142 Cited References Count :39. 1.3.2, 3.1, 3.8.2
- [64] G. Cheung and C. O’Sullivan. Effective simulation of flexible lateral boundaries in two- and three-dimensional dem simulations. *Particuology*, 6(6) :483–500, 2008. 388TP Times Cited :16 Cited References Count :32. 1.3.2, 1.3.3.1, 1.35, 1.3.3.3, 1.3.3.3, 1.36, 3.1, 3.4.1, 5.2
- [65] X. Q. Gu and J. Yang. A discrete element analysis of elastic properties of granular materials. *Granular Matter*, 15(2) :139–147, 2013. 118FH Times Cited :1 Cited References Count :23. 1.3.2, 3.1, 3.8.1.2
- [66] H.X. Tang, X. Zhang, and X.H. Chu. Dem simulation for the effect of rolling resistance on shear band. *Mechanics and Materials*, 204-208 :246–249, 2012. 1.3.2, 3.8.2
- [67] L. Cui, C. O’Sullivan, and O’Neill. An analysis of the triaxial apparatus using a mixed boundary three-dimensional discrete element model. *Geotechnique*, 2010. 1.3.2, 3.1, 3.4.1, 3.8.1.2, 3.33, 5.2
- [68] J-P. Plassiard. *Modélisation par la Méthode des éléments discrets d’impacts de blocs rocheux sur structures de protection type merlons*. Thèse de doctorat, 2007. 1.3.2
- [69] S. Luc. *Modélisation discrète de la rupture dans les milieux granulaires*. Thèse de doctorat, 2006. 1.3.2, 1.3.4, 3.4.1, 3.8.4
- [70] N. Belheine, J. P. Plasslard, F. V. Donze, F. Darve, and A. Seridi. Numerical simulation of drained triaxial test using 3d discrete element modeling. *Computers and Geotechnics*, 36(1-2) :320–331, 2009. 391RF Times Cited :39 Cited References Count :27. 1.3.2, 3.4.1
- [71] S. J. Lee, Y. M. A. Hashash, and E. G. Nezami. Simulation of triaxial compression tests with polyhedral discrete elements. *Computers and Geotechnics*, 43(0) :92–100, 2012. 979MF Times Cited :4 Cited References Count :24. 1.3.2, 1.3.3.3, 1.37, 3.1, 3.4.1, 3.8.1.2, 5.2
- [72] T.T. Ng and W. Zhou. Dem simulation of bi-disperse ellipsoids of different particle sizes. *Comptes Rendus Mecanique*, 2014. 1.3.2, 1.3.7, 3.1
- [73] C. Salot. *Modélisation du comportement mécanique d’un matériau granulaire composite par la méthode des éléments discrets*. Thèse de doctorat, 2007. 1.3.2, 1.3.3.1

- [74] V. T. Tran, F. V. Donze, and P. Marin. A discrete element model of concrete under high triaxial loading. *Cement & Concrete Composites*, 33(9) :936–948, 2011. 837EE Times Cited :4 Cited References Count :30. 1.3.2, 3.1
- [75] T. Gabet, Y. Malecot, and L. Daudeville. Triaxial behaviour of concrete under high stresses : Influence of the loading path on compaction and limit states. *Cement and Concrete Research*, 38(3) :403–412, 2008. 268GY Times Cited :31 Cited References Count :18. 1.3.2
- [76] F. De Larrard and T. Sedran. Optimization of ultra-high-performance concrete by the use of a packing model. *Cement and Concrete Research*, 24(6) :997 – 1009, 1994. 1.3.2, 4.4.1
- [77] Y. P. Cheng, M. D. Bolton, and Y. Nakata. Crushing and plastic deformation of soils simulated using dem. *Geotechnique*, 54(2) :131–141, 2004. 814KR Times Cited :60 Cited References Count :19. 1.3.2
- [78] P. Guo and X. Su. Shear strength, interparticle locking, and dilatancy of granular materials. *Canadian Geotechnical Journal*, 44(5) :579–591, 2007. 191GE Times Cited :16 Cited References Count :37. 1.3.2
- [79] N. Guo and J.D. Zhao. A hierarchical model for cross-scale simulation of granular media, 2013. 1.3.2
- [80] D. Bertrand, F. Nicot, P. Gotteland, and S. Lambert. Modelling a geo-composite cell using discrete analysis. *Computers and Geotechnics*, 32(8) :564–577, 2005. 026FD Times Cited :24 Cited References Count :47. 1.3.2, 1.3.4
- [81] N. ESTRADA MEJIA. *Étude numérique du cisaillement des geomatériaux granulaires cohésifs : relation micro-macro, microstructure, et application à la modélisation de glissements de terrain*. Thèse de doctorat, 2008. 1.3.2
- [82] A. Kimbonguila. *Modélisation discrète de la microstructure des agglomérats de particules fines en suspension*. Thèse de doctorat, 2013. 1.3.2, 3.2.1, 3.2.3, 3.3, 5.2
- [83] A. Kimbonguila and S. Remond. Discrete element modeling of the microstructure of fine particle agglomerates in sheared dilute suspension. *Physica A-Statistical Mechanics and Its Applications*, 412 :66–83, 2014. 1.3.2
- [84] F. Sandor. *Distinct Element Simulations of Granular Materials*. Thèse de doctorat, 2007. 1.3.2, 1.3.4, 1.3.3.3, 5.2
- [85] M. J. Jiang and Z. Y. Yin. Analysis of stress redistribution in soil and earth pressure on tunnel lining using the discrete element method. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 32(0) :251–259, 2012. 013HQ Times Cited :3 Cited References Count :34. 1.3.2
- [86] B. Chareyre. *Modélisation du comportement d'ouvrages composites sol-geosynthétique par éléments discrets-Application aux ancrages en tranchées en tête de Talus*. Thèse de doctorat, 2003. 1.3.2

- [87] S. Luc. *Modélisation micro-Mechanical des milieux granulaires partiellement saturé*. Thèse de doctorat, 2008. 1.3.3.1, 1.3.3.1
- [88] JJ-P Plassiard, N. Belheine, and F.V. Donze. Calibration procedure for spherical discrete elements using a local moment law. Rapport, Grenoble university, Laboratoire Sols, Solides, Structures et Risques. 1.3.3.1
- [89] L. Sibille and F. Froio. A numerical photogrammetry technique for measuring microscale kinematics and fabric in schneebeli materials. *Granular Matter*, 9(3-4) :183–193, 2007. 169SQ Times Cited :8 Cited References Count :27. 1.3.3.1, 3.4.1
- [90] Y. P. Cheng, Y. Nakata, and M. D. Bolton. Discrete element simulation of crushable soil. *Geotechnique*, 53(7) :633–641, 2003. 733BG Times Cited :101 Cited References Count :24. 1.3.3.1
- [91] M. Obermayr, K. Dressler, C. Vrettos, and P. Eberhard. Prediction of draft forces in cohesionless soil with the discrete element method. *Journal of Terramechanics*, 48(5) :347–358, 2011. 867KH Times Cited :3 Cited References Count :51. 1.3.3.1
- [92] M. M. M. Shamsi and A. A. Mirghasemi. Numerical simulation of 3d semi-real-shaped granular particle assembly. *Powder Technology*, 221(0) :431–446, 2012. Sp. Iss. SI 931LV Times Cited :2 Cited References Count :49. 1.3.3.1
- [93] G. Dondi, A. Simone, V. Vignali, and G. Manganelli. Numerical and experimental study of granular mixes for asphalts. *Powder Technology*, 232 :31–40, 2012. 023OM Times Cited :4 Cited References Count :26. 1.3.3.1, 1.3.8, 3.1, 3.4.1, 3.8.1.2
- [94] A. Bottero and R. Negre. Problème de l’essai triaxial en mécanique des sols par la théorie de l’analyse limite. *Mechanics Research Communications*, 4(4) :229–234, 1977. 1.3.3.1
- [95] C. Thornton. Numerical simulations of deviatoric shear deformation of granular media. *Geotechnique*, 50(1) :43–53, 2000. 305ZL Times Cited :226 Cited References Count :18. 1.3.3.2, 1.3.4
- [96] C. Thornton. Force transmission in granular media. *Powder and Particle*, 1997. 1.3.3.2
- [97] C. O’Sullivan and C. Liang. Micromechanics of granular material response during load reversals : Combined dem and experimental study. *Powder Technology*, 193(3) :289–302, 2009. 459HT Times Cited :16 Cited References Count :15. 1.3.3.2, 1.33, 1.3.3.3, 3.1, 3.4.1, 5.2
- [98] L. Cui. *Developing a Virtual Test Environment for Granular Materials Using Discrete Element Modelling*. Thèse de doctorat, 2006. 1.3.3.2, 3.1
- [99] Y. H. Wang and S. C. Leung. A particulate-scale investigation of cemented sand behavior. *Canadian Geotechnical Journal*, 45(1) :29–44, 2008. 271ET Times Cited :27 Cited References Count :28. 1.35, 1.3.3.3, 1.3.3.3, 3.4.1, 5.2

- [100] Y. N. Wang and F. Tonon. Calibration of a discrete element model for intact rock up to its peak strength. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 34(5) :447–469, 2010. 584QT Times Cited :10 Cited References Count :20. 1.3.3.3, 1.38, 5.2
- [101] B. Le Hello, B. Chevalier, G. Combe, and P. Villard. Coupling finite elements and discrete elements methods, application to reinforced embankment by piles and geosynthetics. 1.3.3.3
- [102] P. Villard, B. Chevalier, B. Le Hello, and G. Combe. Coupling between finite and discrete element methods for the modelling of earth structures reinforced by geosynthetic. *Computers and Geotechnics*, 2009. 1.3.3.3
- [103] J.N. Roux and F. Chevoir. Simulation numerique discrete et comportement mecanique des materiaux granulaires. *Bulletin des laboratoire des ponts et chaussées*, pages 109–138, 2005. 1.3.4
- [104] X. Li, H. S. Yu, and X. S. Li. Macro-micro relations in granular mechanics. *International Journal of Solids and Structures*, 46(25-26) :4331–4341, 2009. 523XC Times Cited :10 Cited References Count :39. 1.3.4
- [105] J. Weber. Recherches concernant les contraintes intergranulaires dans les milieux pulvérulents : application aux lois de similitude dans les études sur modèles réduits de problèmes de mécanique des sols pulvérulents. *Bul. Liaison P. et CH.*, 20, 1966. 1.3.4
- [106] S. Nemat-Nasser and M. Hori. *Micromechanics : Overall Properties of Heterogeneous Materials*. North-holland, 1999. 1.3.4
- [107] K. Bagi. Stress and strain in granular assemblies. *Mechanics of Materials*, 22, 1996. 1.3.4, 1.3.6
- [108] F. Nicot, F. Darve, and Rnvo Grp. A multi-scale approach to granular materials. *Mechanics of Materials*, 37(9) :980–1006, 2005. 934TT Times Cited :60 Cited References Count :89. 1.3.4
- [109] F. Nicot and F. Darve. Micro-mechanical investigation of material instability in granular assemblies. *International Journal of Solids and Structures*, 43(11-12) :3569–3595, 2006. 040TE Times Cited :32 Cited References Count :88. 1.3.4
- [110] F. Nicot, L. Sibille, F. Donze, and F. Darve. From microscopic to macroscopic second-order work in granular assemblies. *Mechanics of Materials*, 39(7) :664–684, 2007. 154AD Times Cited :13 Cited References Count :43. 1.3.4
- [111] F. Nicot and F. Darve. The h-microdirectional model : Accounting for a mesoscopic scale. *Mechanics of Materials*, 43(12) :918–929, 2011. 868JS Times Cited :2 Cited References Count :58. 1.3.4



- [112] F. Nicot, L. Sibille, and F. Darve. Failure in rate-independent granular materials as a bifurcation toward a dynamic regime. *International Journal of Plasticity*, 29(0) :136–154, 2012. 868JA Times Cited :8 Cited References Count :49. 1.3.4
- [113] F. Nicot, N. Hadda, F. Bourrier, L. Sibille, R. Wan, and F. Darve. Inertia effects as a possible missing link between micro and macro second-order work in granular media. *International Journal of Solids and Structures*, 49(10) :1252–1258, 2012. 931MN Times Cited :4 Cited References Count :35. 1.3.4
- [114] F. Nicot, N. Hadda, M. Guessasma, J. Fortin, and O. Millet. On the definition of the stress tensor in granular media. *International Journal of Solids and Structures*, 50(14-15) :2508–2517, 2013. 160DB Times Cited :0 Cited References Count :23. 1.3.4
- [115] D.O. Potyondy and P. A. Cundall. A bonded-particle model for rock. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 41(8) :1329–1364, 2004. 880SW Times Cited :440 Cited References Count :90. 1.3.6, 3.5
- [116] N. Kumar, O.I. Imole, V. Magnanimo, and S. Luding. Effects of polydispersity on the micro-macro behavior of granular assemblies under different deformation paths. *Particuology*, 12(0) :64–79, 2014. 1.3.7
- [117] T. Doanh, M.T. Hoang, J.-N. Roux, and C. Dequeker. Stick-slip behaviour of model granular materials in drained triaxial compression. *Granular Matter*, 15 :1–23, 2013. 1.3.8
- [118] E.M. Charalampidou, G. Combe, G. Viggiani, and J. Lanier. Mechanical behavior of mixtures of circular and rectangular 2d particles, 2009. 1.3.8
- [119] G. Baldi and R. Nova. Membrane penetration effects in triaxial testing. *Journal of Geotechnical Engineering*, 110, 1984. 2.3.2.5
- [120] A.W. Skempton. The pore pressure coefficients a and b. *Geotechnique*, 4(4), 1954. 2.3.3
- [121] B. Novoa-Martinez. *Strength properties of granular materials*. Thèse de doctorat, 2003. 2.5.2.3, 3.8.1.1, 4.2.1
- [122] G. Olivari. *Contribution à l'étude des limites de fatigue des milieux pulvérulents*. Thèse de doctorat, University Scientifique et Medicale de Grenoble, 1973. 2.5.2.3
- [123] P. A. Cundall, A. Drescher, and O. D. L. Strack. Numerical experiments on granular assemblies ; measurements and observations. *Geotechnique*, 29(1), 1982. 3.1
- [124] S. Remond. Dem simulation of small particles clogging in the packing of large beads. *Physica A*, 389 :4485–4496, 2010. 3.2.1, 3.2.3
- [125] P. Pizette and S. Remond. Experimental and numerical studies of the effect rolling friction for sandpile formation. In *WCCM XI-ECCM V*, 2014. 3.2.1, 3.2.4

- [126] K. Elcheik and S. Remond. Étude du comportement à l'interface d'un milieu granulaire sur une paroi rigoureuse. In *32emes AUGC*, 2014. 3.2.1
- [127] P. Pizette, K. Wu, S. Rémond, F. Becquart, and A. Noredine. A discrete element modeling to study the mechanical behaviour of recycled unbound granular materials. In *ECGP11, Villeneuve d'Ascq*, 2013. 3.2.1
- [128] K. Wu, P. Pizette, F. Becquart, S. Remond, A. Noredine, and W.Y. Xu. Experimental and numerical study of the shear behavior of mono-sized glass beads by triaxial test. 3.2.1, 3.4.5
- [129] T. Poschel and T. Schwager. *Computational Granular Dynamics*. Springer Berlin Heidelberg, 2005. 3.2.3, 3.2.4.1
- [130] S. Remond and J.L. Gallias. Modelling of granular mixtures placing. comparison between a 3d full-digital model and a 3d semi-digital model. *Powder Technology*, 145(1) :51–61, 2004. 854SG Times Cited :3 Cited References Count :21. 3.2.3, 4.4.1
- [131] S. Remond, J. L. Gallias, and A. Mizrahi. Characterization of voids in spherical particle systems by delaunay empty spheres. *Granular Matter*, 10(4) :329–334, 2008. 306OM Times Cited :3 Cited References Count :19. 3.2.3
- [132] S. Remond and P. Pizette. A dem hard-core soft-shell model for the simulation of concrete flow. *Cement and Concrete research*, 58 :169–178, 2014. 3.2.3, 3.8.2
- [133] G.M. Hu. Analysis and simulation of granular system by discrete elemnt method using edem. *WUhan University of Technology Press*, 2010. 3.2.3
- [134] Y.C. Zhou, B.D. Wright, R.Y. Yang, B.H. Xu, and A.B. Yu. Rolling friction in the dynamic simulation of sandpile formation. *Physica A : Statistical Mechanics and its Applications*, 1999. 3.2.4.3
- [135] V. Richefeu. *Approche par élément discrets 3D du comportement de matériel granulaires cohesifs faiblement contraints*. Thèse de doctorat, 2005. 3.2.4.3
- [136] E.R. Beer, F.P. and Johnson. Mechanics for engineers-statics and dynamics. *MacGraw-Hill, New York*, page 1976. 3.2.4.3
- [137] C. Thornton. The conditions for failure of a face-centered cubic array of uniform rigid spheres. *Geotechnique*, 29 :441–459, 1979. 3.2.4.4
- [138] C. Thornton and S.J. Antony. Quasi static deformation of particulate media. *Roy Soc of London Phil Tr A*, 356 :2763, 1998. 3.2.4.4
- [139] J.-N Rou and G.combe. Quasisquasi rheology and the origins of strain. *Comptes Rendus Physique*, 2002. 3.2.4.4, 3.8.4
- [140] F. Y. Fraige and P. A. Langston. Integration schemes and damping algorithms in distinct element models. *Advanced Powder Technology*, 15(2) :227–245, 2004. 824IA Times Cited :18 Cited References Count :19. 3.3.1

- [141] B. S. Kim, S. W. Park, and S. Kato. Dem simulation of collapse behaviours of unsaturated granular materials under general stress states. *Computers and Geotechnics*, 42(0) :52–61, 2012. 913YC Times Cited :0 Cited References Count :42. 3.1, 3.8.1.2
- [142] G. B. Gong, X. X. Zha, and J. Wei. Comparison of granular material behaviour under drained triaxial and plane strain conditions using 3d dem simulations. *Acta Mechanica Solida Sinica*, 25(2) :186–196, 2012. 966VW Times Cited :0 Cited References Count :26. 3.1
- [143] N. Belheine, F.V. Donze, and F. Darve. Analysis of the mechanical response of a sand at grain-level with dem-mtl. 3.4.1
- [144] B. Widom. Random sequential addition of hard spheres to a volume. *The Journal of Chemical Physics*, 44(10) :3888–3894, 1966. 3.4.3.1
- [145] A. Renyi. On a one-dimensional problem concerning random space filling. *Magyar Tud.Akad. Mat.*, 1958. 3.4.3.1
- [146] P. Richard. *Étude de la geometrie de milieux granulaires modeles tridimensionnels par simulation numérique*. Thèse de doctorat, 2000. 3.4.3.1
- [147] S.X. Song, Q.C. Sun, F. Jin, and C.H. Zhang. Analsis of parameters in granular solid hydrodynamics for triaxial compression tests. *Acta Mechanica Solida Sinica*, 27, 2014. 3.4.4.1
- [148] C. Thornton and G. Sun. Axisymmetric compression of 3d polydisperse systems of spheres, 1993. 3.4.4.1
- [149] J. Phillip Ellenberger. *Piping and Pipeline Calculations Manual*. 2010. 3.4.5
- [150] H. Abou-Chakra and U. Tuzun. Coefficient of friction of binary granular mixtures in contact with a smooth wall. *Chemical Engineering Science*, 1999. 3.8.1.2
- [151] F. Radija. Force and fabric states in granular media, 2009. 3.8.4
- [152] F. Radjai and F. Dubois. *Discrete Element Modeling of Granular Materials*. 2011. 3.8.4
- [153] P. Pizette, K. Wu, S. Rémond, F. Becquart, and A. Noredine. Perspectives of using discrete element simulations as a numerical tool for sediment studies. In *4th International Symposium on Sediment management ;FERRARA (Italie), pp 17-19 CD ROM*, Septembre -2014,. 5.2
- [154] D. Asahina and J. E. Bolander. Voronoi-based discretizations for fracture analysis of particulate materials. *Powder Technology*, 213(1-3) :92–99, 2011. 827MV Times Cited :2 Cited References Count :24. 5.2
- [155] B. Simpson and F. Tatsuoka. Geotechnics : the next 60 years. *Geotechnique*, 58 :357–368, 2008. 5.2