

Titre: Modélisation numérique des phénomènes de ségrégation et de stratification dans les haldes à stériles
Title: stratification dans les haldes à stériles

Auteur: Tristan Vuilloz
Author: Tristan Vuilloz

Date: 2022

Type: Mémoire ou thèse / Dissertation or Thesis

Référence: Vuilloz, T. (2022). Modélisation numérique des phénomènes de ségrégation et de stratification dans les haldes à stériles [Mémoire de maîtrise, Polytechnique Montréal]. PolyPublie. <https://publications.polymtl.ca/10344/>
Citation: Vuilloz, T. (2022). Modélisation numérique des phénomènes de ségrégation et de stratification dans les haldes à stériles [Mémoire de maîtrise, Polytechnique Montréal]. PolyPublie. <https://publications.polymtl.ca/10344/>

 **Document en libre accès dans PolyPublie**
Open Access document in PolyPublie

URL de PolyPublie: <https://publications.polymtl.ca/10344/>
PolyPublie URL: <https://publications.polymtl.ca/10344/>

Directeurs de recherche: Carlos Ovalle
Advisors: Carlos Ovalle

Programme: Génie minéral
Program: Génie minéral

POLYTECHNIQUE MONTRÉAL

affiliée à l'Université de Montréal

**MODÉLISATION NUMÉRIQUE DES PHÉNOMÈNES DE SÉGRÉGATION
ET DE STRATIFICATION DANS LES HALDES À STÉRILES**

TRISTAN VUILLOZ

Département des génies civil, géologique et des mines

Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de *Maîtrise ès sciences appliquées*
Génie minéral

Mai 2022

POLYTECHNIQUE MONTRÉAL

affiliée à l'Université de Montréal

Ce mémoire intitulé :

**MODÉLISATION NUMÉRIQUE DES PHÉNOMÈNES DE SÉGRÉGATION
ET DE STRATIFICATION DANS LES HALDES À STÉRILES**

présenté par **Tristan VUILLOZ**

en vue de l'obtention du diplôme de *Maîtrise ès sciences appliquées*

a été dûment accepté par le jury d'examen constitué de :

Thomas PABST, président

Carlos OVALLE, membre et directeur de recherche

Li LI, membre

DÉDICACE

"Il fait bon s'allonger à l'ombre d'un doute."

Tomi Ungerer, (1931 - 2019)

À l'académie.

REMERCIEMENTS

Ma reconnaissance va aux membres du jury qui ont accepté d'évaluer ce travail.

*

Ce projet de maîtrise n'a été rendu possible que par l'initiative et la participation active de mon directeur de recherche, Carlos Ovalle. Je lui adresse tout naturellement les premiers remerciements pour m'avoir confié cette opportunité, pour la qualité de son encadrement dans la réalisation du travail, la confiance qu'il aura su m'accorder et son ouverture d'esprit. Je ne saurais ensuite que trop peu remercier David Cantor pour l'appui apporté tout au long de la progression du projet, la pertinence de ses analyses théoriques et pratiques sur les objets de notre étude, son expertise et sa curiosité zélée. J'ai beaucoup aimé partager son enthousiasme et nos discussions animées sur les sciences ou l'humain.

Les collaborations hebdomadaires de Sergio Carrasco et Paula Quiroz auront également compté pour garantir une prise de recul et un gain d'objectivité sur chaque progrès réalisé.

Mes remerciements vont aussi aux membres du laboratoire de recherche "Mécanique granulaire pour la géotechnique minière" de l'Institut de Recherche en Mines et Environnement (IRME) pour l'ensemble des sessions d'échange et de partage sur l'avancée des travaux de chacun. Je réserve une attention égale aux collègues chercheurs de l'IRME que j'aurais eu la chance de côtoyer au cours de rassemblements et de conférences.

Ce projet de recherche a bénéficié du support de l'IRME et de ses partenaires industriels ainsi que d'une allocation de ressources serveur offerte par ComputeCanada.

Un grand merci à ceux qui m'auront permis de garder la forme en m'accompagnant sur les courts de tennis ou les playgrounds de basketball.

Une attention toute spéciale s'adresse à Cassandra qui n'aura eu de cesse de m'éveiller aux richesses et à la beauté du Québec depuis ses appartements du 2311. Son humeur ensoleillée et l'intensité de son soutien sont des alliés dont je ne saurais me passer au quotidien.

La réalisation de ce travail n'aurait finalement pu aboutir sans les soutiens indéfectibles de ma famille et de mes proches pour la plupart restés en France. Je tiens à louer leur précieuse disponibilité mais aussi leur écoute appliquée. Je les remercie pour chacun de leurs encouragements. Merci à mes parents pour votre présence, votre éducation et votre amour.

RÉSUMÉ

Les activités minières nécessitent l'excavation de quantités de roches stériles pour accéder au minerai. De tels rejets miniers sans valeur économique sont généralement stockés en surface pour permettre la poursuite des opérations. Les stériles miniers sont ainsi entreposés par la répétition de déchargements d'importants volumes de matériaux sur des sites choisis de l'exploitation pour construire des haldes.

Le déversement des roches stériles constitue une sollicitation propice au développement de phénomènes de ségrégation parmi le matériau qui favorise l'accumulation des particules de fractions grossières, ou blocs, dans les régions inférieures des empilements. Les observations des haldes à stériles rapportent régulièrement l'exposition de motifs granulaires particuliers, ségrégués ou stratifiés, qui sont principalement attribués à l'existence de différences de propriétés physiques entre les éléments des échantillons de roches stériles déposés.

Le développement de phénomènes de ségrégation et de stratification au sein des haldes à stériles représente en effet un risque, car la distribution hétérogène des roches stériles dans la structure interne de la construction pourrait se traduire par des altérations des propriétés géotechniques et hydrogéologiques, en différentes régions de l'empilement, capables d'initier des dangers d'instabilité mécanique et hydrogéologique.

Le travail présenté vise à développer des modélisations numériques capables de reproduire des mécanismes de ségrégation et de stratification en simulant la construction d'empilements granulaires.

L'étude a débuté avec la reproduction d'essais expérimentaux capables de mettre en évidence le développement de phénomènes de granoclassement au travers de la déposition de matériaux granulaires dans des cellules étroites. La comparaison qualitative des configurations d'empilements obtenues avec de précédents travaux semblables de la littérature a démontré la cohérence des tests réalisés. Les résultats des dépositions ont été quantifiés avec les mesures d'angles de repos et de longueurs d'onde de schémas de stratification observés. L'élaboration de modèles numériques a ensuite été décidée pour poursuivre et approfondir les essais physiques présentés.

Les modèles numériques de l'étude ont été réalisés grâce au logiciel open-source LMGC90,

développé à l'université de Montpellier en France. LMGC90 est une alternative à la modélisation de systèmes dynamiques de complexités variables qui a prouvé s'adapter à l'étude de systèmes granulaires semblables aux échantillons de particules considérés pour ce travail. La résolution des simulations imaginées pour répondre à la question de recherche s'est faite avec l'emploi de la méthode des éléments discrets (MED) implémentant la dynamique des contacts (DC). L'interprétation et la mise en forme des résultats obtenus ont nécessité le recours à divers langages informatiques tels que **Python** et **Fortran**.

L'étude numérique a considéré deux géométries de modélisations : à savoir, respectivement, une géométrie 2D et une géométrie 3D. LMGC90 a permis de créer trois mélanges granulaires dont les propriétés physiques ont été déterminées pour générer des échantillons de grains présentant des disparités de tailles et de formes. Le modèle numérique mis au point simule un scénario de déposition des échantillons pour des paramètres variables : régime d'écoulement, hauteur d'injection, dimensions des cellules d'essai (environnement de déposition). Les schémas des empilements ainsi reproduits ont été étudiés qualitativement et quantitativement au travers du calcul de plusieurs indicateurs. Des maillages ont permis de dresser une représentation de la distribution des aspects de tailles ou de formes des grains au travers des dépositions. La cinématique des mouvements granulaires au cours de la construction des empilements a enfin été examinée. L'influence des propriétés des mélanges granulaires et des paramètres de déposition pour le développement de mécanismes de granoclassement a été interprétée sur la base des résultats de simulations.

Des travaux complémentaires ont aussi visé à étendre l'étude du phénomène de ségrégation dans les milieux granulaires grâce au développement d'un second modèle numérique à part entière. Le nouveau modèle simule le cisaillement d'un volume granulaire élémentaire constitué à partir des échantillons déjà construits pour la précédente partie du travail. Les conditions de cisaillement de chaque simulation ont été définies par un calcul du nombre inertiel associé à chaque essai. L'évolution du phénomène de ségrégation avec les valeurs prises par le nombre inertiel et les pressions de surcharge appliquées au cours du cisaillement a été consécutivement étudiée.

L'étude numérique par MED des phénomènes de ségrégation et de stratification souligne la pertinence des modèles en trois dimensions (3D) pour reproduire les mécanismes de granoclassement des mélanges granulaires au cours de dépositions. Les simulations achevées présentent des schémas de ségrégation. Le résultat est observé avec consistance malgré les variations des paramètres des déposition dans le cadre des scénarios étudiés. Le contrôle rigoureux des conditions de déposition semble exigé pour reproduire les mécanismes à l'origine de schémas stratifiés dans les haldes. La disparité de formes dans les échantillons bidisperses

s'avère un facteur catalytique pour l'observation de phénomènes de stratification. Les simulations de cisaillement témoignent de l'évolution de la cinématique de ségrégation dans les mélanges bidisperses en fonction du nombre d'inertie imposé. La localisation du cisaillement et des mécanismes de ségrégation est montrée pour des conditions de pression particulières.

Les résultats de l'étude entendent servir de base à la résolution de défis entourant les incertitudes de prédiction du développement de phénomènes de granoclassement lors des dépositions de roches stériles en surface. Les exemples de modélisations et les outils d'interprétation présentés au terme de ce travail composent un ensemble de solutions capables de caractériser les schémas de granoclassement des haldes à stériles et leur intensité. Les travaux qui décideraient de s'inscrire dans la suite d'un tel projet pourraient envisager la création d'outils logiciels pour prédire, et décrire, avec fiabilité le développement des phénomènes de ségrégation et de stratification dans les haldes à stériles, dont la mise à disposition représenterait une avancée dans la résolution des défis actuels de l'industrie minière.

ABSTRACT

Mining activities typically need excavation works to access the ore. Those operations produce large quantities of waste rock which does not have any major economic value. Such material is generally stored at the surface with repeated granular dumps building waste rock piles.

Waste rock dumping is an operation known to cause the development of segregation phenomena among the material which favors the concentration of coarser fraction particles, or blocks, at slopes toe. Eventually, waste rock piles expose particular granular patterns, segregated or stratified, attributed to waste rock physical properties disparities between each particle.

The development of segregation and stratification phenomena in waste rock piles represents indeed a risk, since grains heterogeneous distributions within the dumped structure might alter its geotechnical and hydrogeological properties, depending on piles areas, therefore leading to mechanical and hydrogeological sources of instabilities.

This work aims to develop numerical models able to reproduce segregation and stratification mechanisms by simulating granular heaps disposal.

The study has begun by reproducing experimental trials able to demonstrate grading phenomena development through granular material pouring in quasi-2D cells. Qualitative comparison of obtained particles heaps configurations with similar former published works has demonstrated tests consistency. Results has been quantified by measuring repose angles and stratification patterns wavelengths. Developing numerical models to further investigate granular material disposal has been decided.

Numerical models have been created thanks to the open-source software LMGC90, developed at the university of Montpellier in France. LMGC90 is an alternative for simple or complex dynamic systems modelling which has proven itself capable of solving problems involving granular mixtures similar to those considered within the scope of this study. Simulations have been performed by means of a discrete-element method (DEM) known as contact dynamics (CD). Results interpretation and formatting requested the use of various programming languages such as `Python` and `Fortran`.

The numerical study considered 2D and 3D modelling geometries. LMGC90 allowed to create granular mixtures whose physical properties have been determined to generate samples with

grain size and shape dispersities. The main numerical model simulates a dumping scenario and varying pouring parameters: flow regimes, injection height, cell's dimensions (disposal environment). Waste rock piles thus reproduced expose patterns which have been investigated qualitatively and quantitatively through multiple indices. Grains aspect distribution in terms of sizes or shapes have been drawn within each deposit. Granular flows kinematics during piles construction were also examined. Granular mixtures properties and dumping parameters influence on the development of grading phenomena have been discussed according to simulations results.

Complementary works have also widened the scope of the study on segregation phenomena in granular media thanks to the development of a second numerical model. This new set of simulations models an elementary granular volume under simple shearing using the same samples previously built. Shearing parameters have been defined with the computation of an associated inertial number for each simulation. The evolution of segregation with various inertial number values and pressures applied during shearing was studied.

Segregation and stratification phenomena numerical DEM study notes three dimensional (3D) models to be relevant designs to reproduce granular mixtures grading mechanisms in discharge operations. Completed simulations present segregation patterns. Such result is observed with consistency despite deposition parameters variations in each scenario. The close control on pouring settings seems necessary in order to reproduce mechanisms leading to stratified patterns in rock piles. Shape dispersity in bidisperse samples appears to be a catalyst for stratification. Shearing simulations show segregation kinematics evolution in bidisperse samples as a function of the imposed inertial number. Shearing and segregation localizations are shown for specific pressure conditions.

Study's results plan to serve as a basis for the resolution of challenges addressing grading phenomena prediction in waste rock disposal operations. Various model examples and interpretation methods presented constitute a range of solutions able to characterize grains ordering patterns in waste rock piles and their intensity. Future works may consider to create reliable numerical warning tools for the prediction, and description, of segregation and stratification phenomena in waste rock dumps.

TABLE DES MATIÈRES

DÉDICACE	iii
REMERCIEMENTS	iv
RÉSUMÉ	v
ABSTRACT	viii
TABLE DES MATIÈRES	x
LISTE DES TABLEAUX	xiv
LISTE DES FIGURES	xvi
LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS	xxxix
LISTE DES ANNEXES	xxxviii
CHAPITRE 1 INTRODUCTION	1
1.1 Mise en contexte	1
1.2 Objectifs de recherche	3
1.3 Originalité du projet et contributions scientifiques	4
1.4 Contenu du mémoire	5
CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE	7
2.1 Haldes à stériles	7
2.1.1 Roches stériles	7
2.1.2 Construction de haldes à stériles	12
2.1.3 Ségrégation au sein des haldes	17
2.1.4 Profils hydrogéologiques et stabilité chimique des ouvrages	19
2.1.5 Stabilité mécanique des ouvrages	20
2.2 Flots et écoulements granulaires à surface libre	24
2.2.1 Cellules d'essai pour la reproduction d'écoulements	24
2.2.2 Cinématique des écoulements	28
2.2.3 Schémas de granoclassement au sein des constructions	32
2.3 Études numériques et procédés employés	49

2.3.1	Modélisation des matériaux granulaires	49
2.3.2	Détails de la microstructure granulaire	52
2.3.3	Méthodes des éléments discrets (DEM)	57
2.3.4	Dynamique des contacts (CD)	63
2.3.5	LMGC90	69
2.4	Synthèse et critique de la revue de littérature	70
CHAPITRE 3 ESSAIS RÉELS DE DÉPOSITION		73
3.1	Méthodologie expérimentale	73
3.1.1	Fabrication de la cellule de déposition	73
3.1.2	Sélection des matériaux granulaires	74
3.1.3	Réalisation des mélanges bidisperses	76
3.1.4	Procédure de déposition	77
3.2	Exploitation des essais réalisés	77
3.2.1	Observations des résultats	78
3.2.2	Interprétations des résultats	80
3.3	Comparaison des résultats des essais aux travaux et données existants	81
3.3.1	Dépôts de mélanges avec disparité des formes de grains	81
3.3.2	Exemples d'essais identifiés par débits de déposition	82
CHAPITRE 4 SIMULATIONS NUMÉRIQUES DE DÉPOSITION DE MÉLANGES GRANULAIRES BIDISPERSÉS		85
4.1	Méthodologie numérique	85
4.1.1	Modélisation de l'environnement de déposition numérique	86
4.1.2	Propriétés générales des matériaux modélisés	88
4.1.3	Propriétés générales des échantillons modélisés	89
4.1.4	Mélanges granulaires modélisés	96
4.2	Contrôle des simulations de déposition	98
4.2.1	Hauteur de déposition et vitesses de chute des grains	98
4.2.2	Débit massique de déposition des grains	98
4.2.3	Distance de séparation entre les murs latéraux	99
4.3	Résultats des simulations de déposition	99
4.3.1	Modélisations 2D des dépôts	100
4.3.2	Modélisations 3D des dépôts - 1 ^{re} géométrie de cellule	102
4.3.3	Modélisations 3D des dépôts - 2 ^{de} géométrie de cellule	107
4.3.4	Mesures de ségrégation et de stratification	109
4.3.5	Interprétation des résultats des simulations de dépôts	115

4.4	Comparaisons des résultats de simulations aux travaux et données existantes	116
4.4.1	Dépôts de mélanges bidisperses de particules sphériques	117
4.4.2	Dépôts de mélanges avec disparité des formes de grains	118
4.5	Volet d'étude cinématique	119
4.5.1	Profils géométriques des empilements	119
4.5.2	Régimes de déposition et description d'écoulements	120
CHAPITRE 5 SIMULATIONS NUMÉRIQUES COMPLÉMENTAIRES POUR L'ÉTUDE DU PHÉNOMÈNE DE SÉGRÉGATION AU SEIN D'UN MÉLANGE GRANULAIRE BIDISPERSE SOUMIS À CISAILEMENT SIMPLE 122		
5.1	Méthodologie numérique	122
5.1.1	Propriétés générales des matériaux modélisés	122
5.1.2	Génération des volumes granulaires	123
5.1.3	Consolidation isotropique des échantillons	123
5.2	Lancement et contrôle des essais de cisaillement simulés	126
5.2.1	Nombre d'inertie	128
5.2.2	Variation des vitesses de cisaillement	128
5.2.3	Variation des pressions de surcharge appliquées	129
5.3	Évolution du système granulaire au cours du cisaillement	129
5.3.1	Fraction solide	129
5.3.2	Résistance au cisaillement	130
5.3.3	Nombre de coordination	132
5.4	Mesures de ségrégation au cours du cisaillement	133
5.4.1	Profils des vitesses et localisation du cisaillement	134
5.4.2	Indicateurs calculés de ségrégation	135
5.4.3	Démonstration effective de ségrégation	138
CHAPITRE 6 DISCUSSIONS 144		
6.1	Influence de la géométrie de l'environnement de déposition	144
6.1.1	Propriétés et dimensions de la cellule d'essai	144
6.1.2	Extension à l'étude de dépôts granulaires coniques en 3D complète . .	146
6.2	Influence de la préparation des mélanges étudiés	147
6.2.1	Caractère bidisperse des échantillons	147
6.2.2	Cohésion potentielle au sein des matériaux granulaires	148
6.2.3	Représentativité des échantillons comme roches stériles	149
6.3	Traduction d'essais réels avec l'emploi d'un outil numérique	150
6.3.1	Optimisation des méthodes de modélisation	150

6.3.2	Validation des résultats	152
6.3.3	Prédiction d'effets d'échelle	152
CHAPITRE 7 CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS		154
7.1	Conclusion	154
7.2	Recommandations	156
RÉFÉRENCES		158
ANNEXES		176

LISTE DES TABLEAUX

2.1	Revue de littérature des propriétés géotechniques des roches stériles (Adapté de Kalonji, 2020).	8
2.2	Définitions et descriptions des paramètres de contrôle des dépositions.	28
2.3	Ensemble de paramètres expérimentaux et observations associées rassemblés d'après des travaux rapportant des essais réels de dépositions de matériaux granulaires polydisperses. Chaque publication mentionnée étudie principalement le déversement de mélanges granulaires bidisperses équiconcentrés en volumes ou masses des espèces de grains (renvoi à Sec. 2.2.3). Les configurations des schémas d'empilements sont décrites comme suit : SE, Ségrégué ; MI, Mélangé ; ST, Stratifié. Stade* détermine les progressions relatives des dépositions en référence à la division établie par fig. 2.16.b . Adapté et actualisé de Fan et al., 2017.	37
2.4	Avantages et limitations des méthodes numériques utilisées pour la modélisation de dépositions de mélanges granulaires. *d'autres travaux ont recours à une méthode numérique MED pour l'étude d'écoulements granulaires polydisperses mais ne considèrent pas les cas de dépositions complètes.	49
3.1	Description des compositions des mélanges granulaires bidisperses utilisés dans la réalisation des essais réels de déposition.	76
3.2	Dimensions des cellules d'essais physiques, paramètres de préparation des échantillons granulaires et de procédure des dépositions.	77
3.3	Description des schémas d'empilements réels obtenus.	80
4.1	Mesures des angles de repos pour différentes espèces de grains modélisées. (M.a), (M.b) et (M.c) traduisent respectivement les dénominations des MÉLANGE (a), (b) ou (c) comme défini (voir fig. 4.6). . .	90
4.2	Description des caractères de formes des polyèdres de fig. 4.3	92
4.3	Description des disparités de formes des échantillons granulaires bidisperses (M.a), (M.b) et (M.c).	97
4.4	Paramètres principaux des simulations réalisées (2D ou 3D) avec la première géométrie de cellule d'essai (fig. 4.1).	100

4.5	Mesures des angles de repos pour les empilements granulaires 3D obtenues après déposition des différents matériaux bidisperses modélisés. σ_β est l'écart-type mesurant les dispersions autour de $\bar{\beta}$. 15 simulations de dépositions ont été réalisées dans les intervalles de paramètres de contrôle définis pour chacun des mélanges considérés et intègrent les calculs des valeurs présentées.	107
4.6	Paramètres principaux des simulations 3D réalisées avec la seconde géométrie de cellule d'essai intégrant une rampe inclinée de déposition (fig. 4.2).	107
5.1	Paramètres de contrôle des simulations de cisaillement.	128
B.1	Description des précisions d'application des méthodes d'évaluation des paramètres de formes des grains composant des échantillons aléatoirement générés de $N = 10,000$ polyèdres à n_v sommets.	178
C.1	Simulations core parameters.	183

LISTE DES FIGURES

1.1	Prises de vues d'empilements granulaires produits de l'application de modèles mathématiques discrets : (a) ségrégation complète d'un mélange de larges grains noirs arrondis et de grains fins anguleux gris ; (b) stratification claire d'un mélange de larges grains anguleux noirs et de grains fins arrondis gris (Tiré de Cizeau et al. 1999).	2
2.1	Diagramme de corrélation entre les mesures de l'angle de friction interne ϕ et de différents paramètres géotechniques de matériaux granulaires comme la porosité n , l'indice des vides e ou la masse volumique du matériau sec considéré ρ (Tiré de Holtz et al., 1981).	11
2.2	Fonctions hydriques schématisées pour un sol fin (silt) et un sol grossier (sable) : (a) courbes de rétention d'eau $\theta_w-\psi$; (b) fonctions de perméabilité $k_w-\psi$ (Tiré de Aubertin et al., 2015).	11
2.3	Classification des constructions de type haldes à stériles selon leurs configurations. I : déposition dans une vallée (éventuellement incomplète) ; II : déposition en travers d'une vallée ; III : déposition sur une pente ; IV : déposition sur une crête ; V : empilement en tas (Tiré de U.S. E.P.A., 1995).	13
2.4	Illustrations des modèles conceptuels des méthodes de construction des haldes à stériles, respectivement avec les emplois du <i>end-dumping</i> (gauche) et du <i>push-dumping</i> (droite). Les différentes couleurs de matériaux distinguent des dépositions successives de stériles dans le cas du scénario de déversement à la benne. Les détails des couches sombres au sommet des bancs ou à l'intérieur de la structure des dépôts représentent des régions de matériau compressées par le trafic répété des engins (Tiré de Raymond et al., 2021).	14
2.5	Descriptions des séquences de construction des haldes à stériles et des évaluations associées (Tiré de Hawley et al., 2017).	15

2.6	Résultats de tests de ségrégation de matériaux granulaires le long d'un plan incliné : (a) schéma de l'environnement de test ; (b) graphique de la distribution des tailles de grains pondérée par deux tests de ségrégation réalisés avec la méthode du <i>push-dumping</i> et un matériau grossier ; les courbes granulométriques représentées correspondent chacune à l'échantillon matériau prélevé, après déposition, sur un intervalle de pente indiqué du plan incliné (Tiré de Nichols, 1986).	18
2.7	Analyse numérique de la distribution de la teneur en eau volumique θ_w après plusieurs années dans des dépôts de roches stériles, non saturés, pour différents modèles de bancs et méthodes de construction. (a) modèle de référence ; (b) barrière capillaire de sables ; (c) <i>end-push-dumping</i> design ; (d) barrière capillaire de sables inclinée (Tiré de Aubertin et al., 2002b).	20
2.8	Illustrations des modes de rupture des dépôts et des empilements de roches stériles : (a) ruptures superficielles ; (b) ruptures profondes (Tiré de Hawley et al., 2017).	22
2.9	Déterminations par analyse numérique, selon différentes méthodes, de centres de rotation de surfaces de glissement pour un scénario de rupture d'empilements. (a) méthode de Morgenstern-Price ; (b) analyse des contraintes par méthode aux éléments finis optimisée ; (c) analyses de contraintes par méthode aux éléments finis ; (d) méthode de Bishop simplifiée (Tiré de Maknoon et al., 2016).	23
2.10	Photographies de la réalisation d'un essai physique d'écoulement de débris granulaires (a-d) composés de sables, de roches arrondies colorées de 32mm, et d'eau, sur le canal incliné de 82m du groupe U.S. Geological Survey (Tiré de Johnson et al., 2012).	25
2.11	Illustrations de quatre configurations d'étude des écoulements granulaires à surface libre dans des environnements de géométrie en quasi deux dimensions. (a) empilement confiné (b) tambour rotationnel ; (c) empilement sans frontière ; (d) plan incliné. Q représente un débit de déposition volumique, v_r est la vitesse d'élévation des constructions granulaires, g est l'accélération de la pesanteur, et u est la vitesse de l'écoulement dans sa direction principale (Tiré de Fan et al., 2017).	26

2.12	Représentations des deux régimes d'écoulement définis pour caractériser les dépositions granulaires dans des cellules bornées : (a) régime discret ou d'avalanches discrètes ; (b) écoulement continu. De gauche à droite, le débit d'injection (Q , q , f) augmente. La partie sous-jacente de l'empilement statique est dessinée dans une teinte foncée ; le matériau coloré gris clair est en mouvement à la surface libre de la pile (Tiré de Fan et al., 2017).	27
2.13	Représentation schématique de l'essai physique original de Savage & Lun's (1988) de démonstration de ségrégation dans un écoulement granulaire (a). (b) Photographie de larges grains blancs et de fines particules noires au sortir de l'entonnoir, soit à l'initiation de leur déversement ; (c) compartiments de réception séparant les grains au terme de la chute (Tiré de Gray, 2018).	29
2.14	Photographie de la création de doigts et de cassures au front d'un écoulement granulaire d'un mélange bidisperse composé de grains bruns anguleux et de plus petits grains blancs arrondis (Tiré de Baker et al. 2016a) (a). (b) Représentation schématique d'un élément unitaire d'écoulement granulaire montrant la procédure de levée des larges particules (Tiré de Johnson, 2012).	30
2.15	Illustrations des mécanismes d'expulsion ou de flottabilité (a) et de percolation (b) au sein d'un écoulement granulaire. (c) Représentation schématique du phénomène de ségrégation cinétique le long d'un plan incliné (Tiré de Gajjar et al., 2014).	31
2.16	Schémas de la division d'une tranche d'un dépôt conique selon le rayon de sa base. Une flèche rouge indique la direction de développement de la déposition d'un empilement granulaire vue de dessus (de longueur L) (a). (b) Schéma d'une vue de côté décrivant trois stades définis de la construction d'un empilement confiné : (I) initiation, (II) extension latérale et (III) remplissage constant (Tiré de Fan et al., 2012).	33
2.17	Photographies des trois configurations définies de schémas d'empilements obtenables après la réalisation d'un essai réel de déposition d'échantillons granulaires bidisperses : (a) état stratifié ; (b) état ségrégué ; (c) état mélangé. L'échantillon bidisperse déversé est composé de larges grains sphériques bleus et de fines particules sphériques rouges (Tiré de Fan et al., 2012).	33

- 2.18 Photographies des premiers résultats des travaux expérimentaux de Makse. Résultat typique des premières séries d'essais montrant la formation successive de bandes de grains grossiers et fins (les particules blanches sont des billes de verres de diamètre moyen $d_s = 0.27mm$, les grains les plus larges sont des cristaux de sucre rouges de $d_L = 0.8mm$) (a); (b) photographie rapprochée. (c) Schéma d'empilement stratifié obtenu avec la déposition d'un mélange polydisperse de trois types de grains : billes de verres sphériques ($\langle d \rangle = 0.15mm$, $\beta = 26^\circ$), sable bleu ($\langle d \rangle = 0.4mm$, $\beta = 35^\circ$) et cristaux de sucre rouges ($\langle d \rangle = 0.8mm$, $\beta = 39^\circ$); (d) photographie rapprochée (Tiré de Makse et al., 1997a). 34
- 2.19 Schémas illustrant le développement de deux mécanismes quand les populations de grains d'un mélange bidisperse diffèrent en tailles et en formes : (a) ségrégation des tailles : les grains larges ségrèguent au pied de la pile ; (b) ségrégation des formes : les grains arrondis ségrèguent au pied de la pile (Tiré de Makse et al., 1997b). 35
- 2.20 Schémas illustrant le développement de mécanismes de granoclassement pour des exemples de ségrégation stable (a) ou instable (b) au cours de dépositions (Tiré de Makse et al., 1997b). (c) Expressions des variations d'angles de repos en fonction de la composition de grains à la surface de la pile selon s_{12} qui exprime l'angle de repos observé pour une particule de la population 1 sur une pente composée de particules de la population 2 (Tiré de Makse et al., 1997c). 38
- 2.21 Photographie et schéma illustrant le profil d'une avalanche granulaire à la surface libre d'un empilement construit par la déposition d'un mélange bidisperse (a). (b) Photographie et schéma illustrant l'élévation consécutive, ou butée, au terme d'une avalanche ou d'un écoulement (Tiré de Gray et al., 1997). 39
- 2.22 Séquence de photographies (a)–(t) montrant les détails de la construction d'un schéma d'empilement stratifié avec le déclenchement d'une avalanche à surface libre. L'écoulement prend place entre les deux parois latérales d'une cellule d'essai de largeur $D = 3mm$. Le mélange déposé est composé de grossiers cristaux de sucre et de plus petites billes de fer (Tiré de Gray et al., 2009). 40

- 2.23 Diagramme de phase déterminant les schémas d'empilements observés au terme de la déposition de mélanges granulaires bidisperses dans des cellules d'essai ($f = 2.5g/s$ et $D = 3mm$) selon le rapport de tailles $R = 1/s_r$ entre de larges grains de sable anguleux et des billes de verres (Tiré de Grasselli et al., 1998) (a). (b) Diagramme de phase déterminant les schémas d'empilements observés au terme de la déposition de mélanges granulaires bidisperses dans des cellules d'essai (stratification : cercle rouge ; ségrégation : carré noir ; mélange : losange bleu), en fonction des paramètres q et v_r , selon l'indication du rapport des tailles $R = 1/s_r$ en ordonnées (Tiré de Fan et al., 2012). 41
- 2.24 Photographies des dépositions d'un mélange granulaire bidisperse de grains sphériques ($R = 2, \beta_s = 26.9^\circ, \beta_L = 27.8^\circ$) dans une cellule quasi-2D : (a) empilement stratifié comme résultat d'un faible régime d'injection ($Q = 7g/s$) ; (b) empilement mélangé comme résultat d'un régime d'injection intense ($Q = 800g/s$) (Tiré de Baxter et al., 1998). 42
- 2.25 Mesures d'intensité lumineuse d'après une photographie d'une déposition stratifiée d'un mélange granulaire bidisperse dans une direction perpendiculaire aux bandes de stratification (Tiré de Grasselli et al., 1998) (a). (b) Tracé des mesures de longueurs d'onde de bandes de stratification après l'observation de dépositions stratifiées dans des cellules d'essai vérifiant $D \geq 6mm$. (c) Diagramme de phase pour la détermination de schémas d'empilements au terme de la déposition de mélanges granulaires bidisperses dans des cellules d'essai de largeur D variable (Tiré de Koeppe et al., 1998). 43
- 2.26 Photographies numériques des dépositions physiques de mélanges granulaires bidisperses tels que : (a) rapport de tailles $R = 3, h = 10mm$ et $m_{LS} = 0.61$; (b) rapport de tailles $R = 3, h = 50mm$, et $m_{LS} = 0.60$; (c) rapport de tailles $R = 1.5, h = 50mm$, et $m_{LS} = 0.90$ (Tiré de Benito et al., 2013). 44

2.27	Diagrammes de phase pour la détermination de schémas d'empilements au terme de la déposition de mélanges granulaires bidisperses dans des cellules d'essai selon le ratio des masses des espèces m_{LS} et de la hauteur d'injection h : (a) rapport de tailles tel que $R = 3$, des lignes séparent différentes configurations d'empilements observées : M, mélange ; B, bandes ou stratification ; SM, ségrégation ; SB, ségrégation-stratification ; (b) rapport de tailles tel que $R = 1.5$, des lignes séparent différentes configurations d'empilements observées : S, ségrégation ; M, mélange ; SM, ségrégation-mélange (Tiré de Benito et al., 2013).	45
2.28	Schéma détaillant la dynamique du "modèle de terrain" mathématique de Makse (a) ; (b) prise de vue du résultat obtenu après l'application du modèle (Tiré de Makse et al., 1997a).	46
2.29	Prises de vues d'une étude numérique via résolution pseudo-dynamique traitant des phénomènes de ségrégation dans la construction d'empilements. Les résultats des simulations sont obtenus après les dépositions de mélanges granulaires bidisperses de disques tels que le rapport de tailles mesuré est $R = 3$ (a, b) ou $R = 2$ (c, d) avec des variations de concentrations des mélanges des deux espèces de particules ; ou tel que le rapport de tailles mesuré est $R = 3$ (e, f) avec des déplacements horizontaux du point d'injection des échantillons (Tiré de Benito et al., 2014).	47
2.30	Schéma d'une cellule d'essai pour la construction d'un empilement confiné après l'atteinte du stade (III) d'avancée de déposition. Le système de coordonnées choisi est le résultat d'une rotation de l'angle de repos θ_{ramp} du matériau déposé et d'une élévation à la vitesse v_r (a). (b) Profils de mesures obtenus au terme de simulations de déposition MED montrant l'évolution de la vitesse u de l'écoulement à surface libre dans sa direction principale (haut) et une vitesse de cisaillement mesurée $\dot{\gamma}$ (bas) selon les dimensions (x, z) de la cellule (Tiré de Fan et al., 2013).	47

2.31	Prises de vues de dépositions numériques MED 3D, dans des cellules d'essai, d'échantillons granulaires bidisperses de particules sphériques tels que : (a) rapport de tailles $R = 3$, hauteur d'injection $h = 10mm$, ratio de masses $m_{LS} = 1$; (b) rapport de tailles $R = 3$, hauteur d'injection $h = 10mm$, ratio de masses $m_{LS} = 0.5$; (c) rapport de tailles $R = 3$, hauteur d'injection $h = 50mm$, ratio de masses $m_{LS} = 1$; (d) rapport de tailles $R = 1.5$, hauteur d'injection $h = 10mm$, ratio de masses $m_{LS} = 1$. Les diamètres des particules larges représentées sur la figure sont réduits d'un facteur d'échelle donné (facteur d'échelle = 0.7) (Tiré de Zhang et al., 2017).	48
2.32	Représentation schématique d'un grain avec annotation de ses dimensions.	50
2.33	Échelles de description pour l'étude des matériaux granulaires.	52
2.34	Représentation schématique d'un arrangement de sphères dans un solide amorphe ; tracé de la fonction de distribution radiale $g(r)$ associée (Tiré de Ziman, 1979) (a). (b) Exemple de mesures de g comme une fonction de la distance radiale r normalisée par un diamètre moyen $\langle d \rangle$ pour des arrangements monodisperses de pentagones réguliers avec un étalement granulométrique S variable (Tiré de Nguyen, 2014).	53
2.35	Représentation schématique d'environnements locaux de particules et des réseaux de contacts associés : (a) environnements locaux des particules i et j ; (b) réseaux de contacts résultants.	54
2.36	Photographie d'une pile de disques photoélastiques créée par une procédure de source localisée. La déposition est visualisé entre deux polariseurs pour laisser entrevoir l'organisation de sa structure interne. Les régions en surbrillance correspondent aux de chaînes de contacts établies (Tiré de Geng et al., 2001).	56
2.37	Modèle de contact local schématisé pour la DEM. (a) Illustration; (b) modèle de contact de type masse-ressort-amortisseur pour les collisions normales; (c) modèle de contact de type masse-ressort-amortisseur pour les composantes tangentielles d'interactions.	60
2.38	Modèle de contact local schématisé pour la CD. (a) Illustration; (b) condition de Signorini définie relativement à une vitesse normale relative v_n entre particules; (c) loi de frottement de Coulomb.	64

2.39	Représentations des différents types de contacts observables entre deux polyèdres : (a) sommets-face ; (b) arête-face ; (c) face-face ; (d) arête-arête. Les points de contacts identifiés sont représentés comme des cercles blancs (Tiré de Azéma et al., 2013a).	68
2.40	Exemples illustrés d'applications du logiciel LMGC90 à différents domaines d'étude : (a) maçonnerie ; (b) mécanique des matériaux déformables ; (c) physique granulaire (Tiré d'une publication internet LMGC90).	70
3.1	Photographie d'une cellule de déposition fabriquée hors laboratoire (Tiré de la vidéo <u>Mathematical impressions: spontaneous stratification</u>) (a) ; (b) schéma conceptuel associé d'une cellule d'essai quasi-2D. . .	74
3.2	Premier mélange granulaire bidisperse composé (a) de grains blancs fins arrondis et (b) de particules rouges grossières anguleuses. Le rapport des tailles des grains est estimé tel que 1:2.	75
3.3	Second mélange granulaire bidisperse composé (a) de grains blancs fins arrondis et (b) de particules noires grossières anguleuses. Le rapport des tailles des grains est estimé tel que 1:4.	75
3.4	Représentation schématique de la méthode de mesures d'angles de repos β	76
3.5	Schémas d'empilements comme résultats obtenus au terme des dépositions du premier mélange granulaire dans une cellule d'essai quasi-2D.	78
3.6	Schémas d'empilements comme résultats obtenus au terme des dépositions du second mélange granulaire dans une cellule d'essai quasi-2D.	79
3.7	Représentation schématique de la méthode de détermination des longueurs d'onde λ des bandes dans le cas d'empilements stratifiés. . . .	79
3.8	Comparaison des paramètres explorés par les essais physiques de dépositions (soulignés en rouge) aux diagrammes de prédiction des schémas d'empilements issus de précédents de la littérature pour des dépositions de mélanges granulaires bidisperses en termes de tailles et de formes des particules. Diagramme de phase (adapté de Grasselli et al., 1998) (a) ; (b) diagramme de phase pour un rapport de tailles tel que $R = 2$, (adapté de Koeppe et al., 1998).	82

3.9	Comparaison des paramètres explorés par les essais physiques de dépositions (soulignés en rouge) aux diagrammes de prédiction des schémas d'empilements issus de précédents de la littérature pour des débits massiques de déposition variables dans le déversement de mélanges granulaires bidisperses en termes de tailles des particules (Adapté de Fan et al., 2012).	83
4.1	Schéma conceptuel de la géométrie de cellule d'essai classique, à base plane.	88
4.2	Schéma conceptuel de la seconde géométrie de cellule d'essai intégrant une rampe inclinée.	89
4.3	Représentation des structures d'un ensemble de polyèdres générés aléatoirement et classés par ordre croissant selon leur nombre de sommets n_v , de faces n_f (d'en haut à gauche en bas à droite).	92
4.4	Représentation d'un polyèdre et définition des paramètres d'excentricité.	94
4.5	Définition d'un angle dièdre α défini par deux faces jointes d'un polyèdre.	95
4.6	Représentations des trois échantillons granulaires bidisperses générés pour les simulations numériques 3D : (a) mélange de grains sphériques (M.a) ; (b) mélange de grains polyédriques (M.b) ; (c) mélange de grains polyédriques à l'angularité prononcée (M.c).	97
4.7	Schémas d'empilements obtenus comme résultats des simulations 2D pour la déposition d'échantillons bidisperses aux propriétés et proportions de mélanges variables ; rapport de tailles tel que $R = 3$, hauteur d'injection telle que $h = 10mm$ et débit massique de déposition tel que $f = 0.1g/s$. Prises de vues des dépositions : (a) d'un mélange bidisperse de disques avec un même comportement en frottement, (b) mélange bidisperse de disques avec une disparité de coefficients de frottement, (c) mélange bidisperse de disques et de polygones (c) ; (de gauche à droite) $m_{LS} = 0.5$ et $m_{LS} = 1$	102
4.8	Déposition pyramidale 3D du mélange bidisperse (M.a) analogue aux schémas d'empilements tirés de (Zhang et al., 2017) (voir fig. 2.31) ; largeur de cellule $D = 10mm$, ratio de masses tel que $m_{LS} = 1$, rapport de tailles tel que $R = 3$, hauteur d'injection telle que $h = 10mm$ et débit massique de déposition tel que $f = 1.0g/s$	103

- 4.9 Schémas d'empilements obtenus comme résultats des simulations 3D pour la déposition des mélanges bidisperses composés de grains sphériques, soit le mélange (M.a) ; largeur de cellule $D = 10mm$, ratio de masses tel que $m_{LS} = 1$, rapport de tailles tel que $R = 3$, (de haut en bas) $f = 1.5g/s$, $f = 3g/s$ et $f = 4.5g/s$ 104
- 4.10 Schémas d'empilements obtenus comme résultats des simulations 3D pour la déposition des mélanges bidisperses composés de grains polyédriques ; largeur de cellule $D = 3mm$, ratio de masses tel que $m_{LS} = 1$, rapport de tailles tel que $R = 3$. Prises de vues des dépositions du mélange (M.c) à $f = 0.5g/s$ (gauche) et $f = 1.5g/s$ (droite) (a) ; (b) prises de vues des dépositions du mélange (M.b) à $f = 0.5g/s$ (gauche) et $f = 1.5g/s$ (droite). 105
- 4.11 Schémas d'empilements obtenus comme résultats des simulations en 3D intégrant la seconde géométrie de cellule d'essai pour la déposition du mélange bidisperse (M.a). $\theta_{ramp} = 20^\circ$, ratio de masses tel que $m_{LS} = 1$, rapport de tailles tel que $R = 3$, (de haut en bas) $H_{ramp} = 160mm$ et $H_{ramp} = 60mm$; (a) largeur de cellule $D = 3mm$; (b) largeur de cellule $D = 10mm$ 108
- 4.12 Schémas d'empilements obtenus comme résultats des simulations en 3D intégrant la seconde géométrie de cellule d'essai pour la déposition du mélange bidisperse (M.b). $\theta_{ramp} = 35^\circ$, ratio de masses tel que $m_{LS} = 1$, rapport de tailles tel que $R = 3$, (de haut en bas) $H_{ramp} = 160mm$ et $H_{ramp} = 60mm$; (a) largeur de cellule $D = 3mm$; (b) largeur de cellule $D = 10mm$ 109
- 4.13 Représentation schématique de la méthode de division des empilements en sections d'équi-surface/volume. 111
- 4.14 Calculs de l'indice de ségrégation m_I au travers de dépôts granulaires 2D de disques. Les empilements analysés sont divisés en dix sections verticales de même surface ; un calcul de m_I est effectué pour chaque section. Les valeurs de m_I correspondant aux ratios de masses initiaux m_{LS} sont indiquées comme des seuils horizontaux affichés en pointillés. 112

4.15	Calculs de l'indice de ségrégation m_I au travers de dépôts granulaires 3D de sphères (M.a). Les empilements analysés sont divisés en dix sections verticales de même volume ; un calcul de m_I est effectué pour chaque section. Les valeurs de m_I correspondant aux ratios de masses initiaux m_{LS} sont indiquées comme des seuils horizontaux affichés en pointillés.	112
4.16	Représentation schématique de la méthode de maillage des empilements pour le calcul de m_{Δ_d}	113
4.17	Moyenne calculée de l'indice m_{Δ_d} sur l'ensemble des simulations de dépositions du mélange (M.a) avec la première géométrie de cellule d'essai (a) ; (b) moyenne calculée de l'indice m_{Δ_d} sur l'ensemble des simulations de dépositions du mélange (M.b) avec la première géométrie de cellule d'essai. Les maillages retenus et présentés comptent plus de 100 divisions.	114
4.18	Moyenne calculée de l'indice m_{Δ_d} sur l'ensemble des simulations de dépositions du mélange (M.a) avec la seconde géométrie de cellule d'essai (a) ; (b) moyenne calculée de l'indice m_{Δ_d} sur l'ensemble des simulations de dépositions du mélange (M.b) avec la seconde géométrie de cellule d'essai. Les maillages retenus et présentés comptent plus de 100 divisions.	115
4.19	Comparaison des paramètres explorés par les simulations de déposition présentées (soulignés en rouge) aux diagrammes de prédiction des schémas d'empilements issus de publications d'essais physiques de la littérature pour le déversement de mélanges granulaires de sphères bidisperses avec un rapport de tailles tel que $R = 3$. Diagramme de phase (Adpaté de Benito et al., 2013).	118
4.20	Comparaison des paramètres explorés par les simulations de déposition présentées (soulignés en rouge) aux diagrammes de prédiction des schémas d'empilements issus de publications d'essais physiques de la littérature pour le déversement de mélanges granulaires bidisperses en termes de tailles et de formes des particules. Diagramme de phase pour un rapport de tailles tel que $R = 2$ (adapté de Koeppe et al., 1998).	119
5.1	Conditions limites pour l'exercice de consolidation isotropique des volumes granulaires (a) avec une pression de confinement constante $\sigma_0 = 10,000Pa$; prise de vues (b) de la procédure de consolidation complétée.	124

5.2	Prises de vues de la consolidation des échantillons granulaires du type MÉLANGE : (a) état initial ; (b) état final, consolidation effectuée.	125
5.3	Mesures des profils initiaux de fraction solide ν_0 (a) et de la proportion volumique en particules larges f_{L0} (b) au travers des échantillons consolidés, avant cisaillement. $f_L = 0.5$ correspond à $m_{LS} = 1$ (car chaque espèce de grains admet une même et unique valeur ρ), comme imposé pour la génération du volume de particules modélisé.	126
5.4	Prises de vues des volumes granulaires avant l'initiation de la procédure de cisaillement. Les représentations choisies sont données de côté (a) et en perspective (b).	127
5.5	Schéma des essais de cisaillement simple simulés.	127
5.6	Évolution de la fraction solide ν à $P = 10,000Pa$ pour chaque valeur de I , en fonction du taux de déformation γ (a) ; (b) loi de dilatance : $\nu \sim a + bI$	130
5.7	Évolution de la résistance au cisaillement q_s/p_s à $P = 10,000Pa$ pour chaque valeur de I , en fonction du taux de déformation γ (a) ; (b) loi de frottement : $\phi' \sim a + bI$	131
5.8	Évolution du nombre de coordination Z à $P = 10,000Pa$ pour chaque valeur de I , en fonction du taux de déformation γ (a) ; (b) variation du nombre de coordination Z en fonction de I : $Z \sim aI^b$	132
5.9	Évolution de la vitesse de cisaillement v_x (a) et de la vitesse de cisaillement normalisée \bar{v}_x (b), à $P = 10,000Pa$ et $\gamma = 5$ pour chaque valeur de I , selon la hauteur de l'échantillon z/H_γ	134
5.10	Évolution de la vitesse de cisaillement v_x (a) et de la vitesse de cisaillement normalisée \bar{v}_x (b), à $I = 2.10^{-1}$ et $\gamma = 5$ pour chaque valeur de P , selon la hauteur de l'échantillon z/H_γ	135
5.11	Évolution de la fraction solide ν (a) et de la proportion volumique en particules larges f_L (b), à $P = 10,000Pa$ et $\gamma = 5$ pour chaque valeur de I , selon la hauteur de l'échantillon z/H_γ	136
5.12	Évolution de la fraction solide ν (a) et de la proportion volumique en particules larges f_L (b), à $I = 2.10^{-1}$ et $\gamma = 5$ pour chaque valeur de P , selon la hauteur de l'échantillon z/H_γ	137
5.13	Évolution de la vitesse de cisaillement v_x à $I = 2.10^{-1}$ en fonction du taux de déformation γ selon la hauteur de l'échantillon z/H_γ : (a) $P = 100Pa$; (b) $P = 1,000Pa$	139

5.14	Évolution de la fraction solide ν à $I = 2.10^{-1}$ en fonction du taux de déformation γ selon la hauteur de l'échantillon z/H_γ : (a) $P = 100Pa$; (b) $P = 1,000Pa$	140
5.15	Évolution de la proportion volumique en particules larges f_L à $I = 2.10^{-1}$ en fonction du taux de déformation γ selon la hauteur de l'échantillon z/H_γ : (a) $P = 100Pa$; (b) $P = 1,000Pa$	141
5.16	Prises de vues des simulations de cisaillement à $I = 2.10^{-1}$ réalisées après l'atteinte de taux de déformation γ avancés pour : (a) $P = 100Pa$, $\dot{\gamma} = 22s^{-1}$; (b) $P = 1,000Pa$, $\dot{\gamma} = 70s^{-1}$	142
6.1	Mesures physiques d'angles de repos β pour différentes dépositions d'un matériau granulaire dans des cellules d'essai de largeur D en fonction du flux surfacique adimensionnel q^* (a) ; (b) diagramme de phase montrant la distinction des conditions d'observation des régimes d'écoulement uniformes et stationnaires selon q^* et en fonction de l'indicateur D/d (Tiré de Jop et al., 2005).	146
6.2	Prises de vues numériques de réseaux de contacts (a-d) d'un matériau granulaire en fonction de la progression des effets simulés de fragmentation des particules (Tiré de Nguyen et al., 2014).	149
6.3	Représentation de moyens de traduction de formes de particules anguleuses par la création d'assemblages de sphères (a). (b) Résultat de la simulation DEM d'une déposition d'un mélange granulaire composé de particules anguleuses générées comme des agrégats de cinq sphères (5-sphere) (Tiré de Alizadeh et al., 2017).	151
A.1	Déposition d'un mélange granulaire bidisperse sur une surface plane par déchargement direct depuis un unique point d'injection.	176
A.2	Déposition d'un mélange granulaire bidisperse sur une surface plane par déchargement au travers d'un appareillage de type entonnoir/silo.	177
A.3	Déposition d'un mélange granulaire bidisperse sur une surface plane par déchargement depuis la surélévation d'une rampe inversée d'injection.	177
B.1	Évolution des écarts-types des descripteurs des formes de particules σ_{χ_1} , σ_{χ_2} , σ_Ψ , $\sigma_{\langle\alpha\rangle}$, en fonction du nombre de sommets des grains n_v . La moyenne arithmétique $\overline{\sigma_\chi}$ est calculée d'après σ_{χ_1} et σ_{χ_2}	179
C.1	Testing cell representation.	183
C.2	Heaps patterns as results of 2D simulations ; (a) mass ratio $m_{LS} = 0.5$, size ratio is 3:1, $f = 0.1g/s$ and $h = 10mm$; (b) mass ratio $m_{LS} = 1$, size ratio is 3:1, $f = 0.1g/s$ and $h = 10mm$	185

C.3	Mixing state computation across 2D granular deposits, heaps are divided in ten vertical stripes of same surface along its length. m_I gradations corresponding to mixtures initial m_{LS} are indicated as horizontal thresholds.	186
C.4	Heaps patterns as results of 3D simulations; (a) mass ratio $m_{LS} = 1$, size ratio is 3:1, $f = 0.6g/s$, $h = 50mm$ and $D = 3mm$, (b) mass ratio $m_{LS} = 1$, size ratio is 3:1, $f = 0.4g/s$, $h = 10mm$ and $D = 10mm$; then (c) presents (b) deposit with the smaller particles hidden.	187
C.5	Mixing state computation across 3D granular deposits, heaps are divided in ten vertical stripes of same volume along its length. m_I gradations corresponding to mixtures initial m_{LS} are indicated as horizontal thresholds.	188
E.1	Prises de vues - avant (haut) et après (bas) - de la réalisation d'un exercice numérique de compression d'un échantillon de polyèdres du type MÉLANGE (b); sans affichage des murs de confinement.	192
E.2	Prises de vues - avant (haut) et après (bas) - de la réalisation d'un exercice numérique de compression d'un échantillon de polyèdres du type MÉLANGE (b); avec affichage des murs de confinement.	193
E.3	Prises de vues - avant (haut) et après (bas) - de la réalisation d'un exercice numérique de compression d'un échantillon de polyèdres du type MÉLANGE (c); sans affichage des murs de confinement.	194
E.4	Prises de vues - avant (haut) et après (bas) - de la réalisation d'un exercice numérique de compression d'un échantillon de polyèdres du type MÉLANGE (c); avec affichage des murs de confinement.	195
F.1	Évolution de la fraction solide ν à $I = 1.10^{-2}$, $P = 10,000Pa$, $\dot{\gamma} = 11s^{-1}$, en fonction du taux de déformation γ selon la hauteur de l'échantillon z/H_γ	196
F.2	Évolution de la proportion volumique en particules larges f_L à $I = 1.10^{-2}$, $P = 10,000Pa$, $\dot{\gamma} = 11s^{-1}$, en fonction du taux de déformation γ selon la hauteur de l'échantillon z/H_γ	197
F.3	Évolution de la vitesse de cisaillement v_x à $I = 1.10^{-2}$, $P = 10,000Pa$, $\dot{\gamma} = 11s^{-1}$, en fonction du taux de déformation γ selon la hauteur de l'échantillon z/H_γ	197
F.4	Évolution de la fraction solide ν à $I = 5.10^{-2}$, $P = 10,000Pa$, $\dot{\gamma} = 55s^{-1}$, en fonction du taux de déformation γ selon la hauteur de l'échantillon z/H_γ	198

F.5	Évolution de la proportion volumique en particules larges f_L à $I = 5.10^{-2}$, $P = 10,000Pa$, $\dot{\gamma} = 55s^{-1}$, en fonction du taux de déformation γ selon la hauteur de l'échantillon z/H_γ	199
F.6	Évolution de la vitesse de cisaillement v_x à $I = 5.10^{-2}$, $P = 10,000Pa$, $\dot{\gamma} = 55s^{-1}$, en fonction du taux de déformation γ selon la hauteur de l'échantillon z/H_γ	199
F.7	Évolution de la fraction solide ν à $I = 1.10^{-1}$, $P = 10,000Pa$, $\dot{\gamma} = 111s^{-1}$, en fonction du taux de déformation γ selon la hauteur de l'échantillon z/H_γ	200
F.8	Évolution de la proportion volumique en particules larges f_L à $I = 1.10^{-1}$, $P = 10,000Pa$, $\dot{\gamma} = 111s^{-1}$, en fonction du taux de déformation γ selon la hauteur de l'échantillon z/H_γ	201
F.9	Évolution de la vitesse de cisaillement v_x à $I = 1.10^{-1}$, $P = 10,000Pa$, $\dot{\gamma} = 111s^{-1}$, en fonction du taux de déformation γ selon la hauteur de l'échantillon z/H_γ	201
F.10	Évolution de la fraction solide ν à $I = 15.10^{-2}$, $P = 10,000Pa$, $\dot{\gamma} = 167s^{-1}$, en fonction du taux de déformation γ selon la hauteur de l'échantillon z/H_γ	202
F.11	Évolution de la proportion volumique en particules larges f_L à $I = 15.10^{-2}$, $P = 10,000Pa$, $\dot{\gamma} = 167s^{-1}$, en fonction du taux de déformation γ selon la hauteur de l'échantillon z/H_γ	203
F.12	Évolution de la vitesse de cisaillement v_x à $I = 15.10^{-2}$, $P = 10,000Pa$, $\dot{\gamma} = 167s^{-1}$, en fonction du taux de déformation γ selon la hauteur de l'échantillon z/H_γ	203
F.13	Évolution de la fraction solide ν à $I = 2.10^{-1}$, $P = 10,000Pa$, $\dot{\gamma} = 220s^{-1}$, en fonction du taux de déformation γ selon la hauteur de l'échantillon z/H_γ	204
F.14	Évolution de la proportion volumique en particules larges f_L à $I = 2.10^{-1}$, $P = 10,000Pa$, $\dot{\gamma} = 220s^{-1}$, en fonction du taux de déformation γ selon la hauteur de l'échantillon z/H_γ	205
F.15	Évolution de la vitesse de cisaillement v_x à $I = 2.10^{-1}$, $P = 10,000Pa$, $\dot{\gamma} = 220s^{-1}$, en fonction du taux de déformation γ selon la hauteur de l'échantillon z/H_γ	205

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS

A	Aire de la base de la cellule de test [L ²]
A_p	Aire de la surface d'un grain, d'une particule [L ²]
a, b	Coefficient numérique pour l'expression de courbes de tendance [—]
\vec{a}	Vecteur accélération d'une particule dans le repère global [—]
b, a	Coefficient numérique pour l'expression de courbes de tendance [—]
C_U	Coefficient d'uniformité de la granulométrie d'un matériau [—]
c'	Cohésion d'un matériau en contraintes effectives [ML ⁻¹ T ⁻²]
c	Identifiant d'un contact au sein d'un système granulaire [—]
c_{app}	Cohésion apparente d'un matériau [ML ⁻¹ T ⁻²]
CCE	: <i>Couche de Contrôle des Écoulements</i>
CD, DC	: <i>Dynamique des Contacts</i>
D	Largeur de la cellule de test de déchargement [L]
D_r	Densité relative d'un matériau [—]
D_{10}	Mesure des mailles du tamis laissant passer 10% de la granulométrie d'un matériau [L]
D_{60}	Mesure des mailles du tamis laissant passer 60% de la granulométrie d'un matériau [L]
d	Diamètre d'un grain, d'une particule [L]
$\langle d \rangle$	Diamètre moyen d'un grain, d'une particule issue d'un échantillon ou d'une population [L]
d_s	Diamètre d'un petit grain issu d'un mélange bidisperse [L]
d_L	Diamètre d'un grain large issu d'un mélange bidisperse [L]
d_1	Longueur de l'axe principale d'une particule [L]
d_2	Longueur de l'axe intermédiaire d'une particule [L]
d_3	Longueur de l'axe mineur d'une particule [L]
d_{max}	Diamètre maximal d'une population de grains [L]
d_{min}	Diamètre minimal d'une population de grains [L]
DC, CD	: <i>Dynamique des Contacts</i>
DEM, MED	: <i>Méthode des Éléments Discrets</i>
DM, MD	: <i>Dynamique moléculaire</i>
DMA	: <i>Drainage Minier Acide</i>
DNC	: <i>Drainage Neutre Contaminé</i>
e	Indice des vides [—]

e_n	Coefficient de restitution normal de Newton [–]
e_t	Coefficient de restitution tangentiel au contact [–]
F_u	Nombre de Froude pour une vitesse linéaire [–]
F_ω	Nombre de Froude pour une vitesse angulaire [–]
\vec{F}	Vecteur d'action mécanique extérieure [–]
\mathbf{F}	Matrice des actions mécaniques extérieures formulée dans le repère global pour un système granulaire [–]
f	Débit massique de déposition de particules [MT ⁻¹]
$\mathbf{f}, \vec{\mathbf{f}}$	Vecteur force de contact entre deux particules [–]
$\mathbf{f}, \mathbf{f}_1, \mathbf{f}_2$	Fonction d'arguments définis [–]
f_L	Concentration massique en particules larges dans une division géométrique d'un échantillon [–]
\mathbf{f}_n	Force de contact normale entre deux particules en interactions dans un matériau granulaire [MLT ⁻²]
$\overline{\mathbf{f}_n}$	Moyenne des forces de contact normal calculée au travers d'un échantillon granulaire [MLT ⁻²]
\mathbf{f}_t	Force de contact tangentielle entre deux particules en interactions dans un matériau granulaire [MLT ⁻²]
f^e	Force de répulsion élastique [MLT ⁻²]
f^ν	Force de frottement visqueux [MLT ⁻²]
FEM	: <i>Méthode des Éléments Finis</i>
FS, FS	: <i>Facteur de sécurité pour analyse de stabilité des empilements granulaires</i>
G	Module d'élasticité d'un matériau [ML ⁻¹ T ⁻²]
g	Accélération de la pesanteur [LT ⁻²]
\vec{g}	Vecteur accélération de la pesanteur [–]
$g(r)$	Fonction de distribution radiale [–]
H	Hauteur de la cellule de test de test de déchargement [L]
\mathbf{H}	Facteur hertzien d'un contact élastique [ML ^{-1/2} T ⁻²]
H_{dump}	Hauteur d'un dépôt de matériau granulaire [L]
H_{ramp}	Hauteur de la rampe dans la nouvelle cellule de test [L]
H_0	Hauteur initiale d'un échantillon granulaire après consolidation et avant cisaillement [L]
H_γ	Hauteur d'un échantillon granulaire cisailé pour un taux de déformation γ [L]
h	Hauteur de chute, d'injection des particules [L]

I	Nombre d'inertie [–]
i	Premier identificateur d'une particule donnée [–]
j	Second identificateur d'une particule donnée [–]
k_B	Constante de Boltzmann [$ML^2T^{-2}\theta^{-1}$]
k_n	Raideur normale d'un contact entre deux particules [MT^{-2}]
k_{sat}	Conductivité hydraulique saturée d'un matériau [MT^{-1}]
k_t	Raideur tangentielle d'un contact entre deux particules [MT^{-2}]
k_w	Conductivité hydraulique d'un matériau [MT^{-1}]
L	Longueur de la cellule de test de test de déchargement [L]
L_{dump}	Longueur d'un dépôt de matériau granulaire [L]
L_{ramp}	Longueur de la rampe dans la nouvelle cellule de test [L]
L_{op}	Longueur d'ouverture du système de déposition pour les cellules de test [L]
L_λ	Longueur entre le point de déposition bas d'un empilement dans une cellule de test et la surface libre du dépôt [L]
\mathbf{l}, \vec{l}	Vecteur branche, vecteur bras de levier qui lie les deux centres de masse d'une paire de particules en contact [–]
M	Matrice d'inertie des éléments d'un système granulaire [–]
m	Masse d'un grain, d'une particule [M]
$\langle m \rangle$	Masse moyenne d'un grain, d'une particule issue d'un échantillon ou d'une population [M]
m_{ech}	Masse d'un échantillon granulaire, d'un mélange [M]
m_I	Indice de mixité granulaire/(de ségrégation) [–]
m_L	Masse de grains larges introduite dans un mélange granulaire bidisperse [M]
m_{LS}	Ratio des masses introduites dans un mélange pour deux populations de grains [–]
$m_{LS,div}$	Ratio des masses mesuré pour deux populations de grains au sein d'une division géométrique d'un empilement [–]
m_s	Masse de grains de diamètres inférieurs introduite dans un mélange granulaire bidisperse [M]
M.a, M.b, M.c	: <i>MÉLANGE</i> (a), (b) et (c), identifiant trois mélanges granulaires modélisés (3D)
MD, DM	: <i>Dynamique moléculaire</i>
MED, DEM	: <i>Méthode des Éléments Discrets</i>
N	Nombre de particules dans un mélange granulaire [–]

N_c	Nombre de contacts actifs au sein d'un système granulaire [–]
N_p	Nombre de particules considérées non flottantes au sein d'un système granulaire [–]
N_λ	Nombre de bandes de stratification [L]
\vec{n}	Vecteur de réaction normale au contact [–]
\vec{n}_1, \vec{n}_2	Vecteur normal à deux faces en contact d'un même polyèdre [–]
n	Porosité d'un échantillon de matériau [–]
n_f	Nombre de faces d'un polyèdre [–]
n_s	Nombre de petites particules au sein d'une division géométrique [–]
n_v	Nombre d'arêtes d'un polyèdre [–]
n_L	Nombre de particules grossières au sein d'une division géométrique [–]
P	Pression appliquée au cours d'un essai de cisaillement, pression de surcharge [ML ⁻¹ T ⁻²]
p	Pression de confinement [ML ⁻¹ T ⁻²]
p_s	Contrainte moyenne [ML ⁻¹ T ⁻²]
$p^{(t)}$	Vecteur qui porte les variables locales de la formulation des contacts pour chaque particule d'un système granulaire [–]
Q	Débit volumique de déposition de particules [M ³ T ⁻¹]
q, q'	Débit surfacique de déposition de particules [M ² T ⁻¹]
q^*	Débit surfacique adimensionnel de déposition de particules [–]
q_s	Contrainte déviatorique [ML ⁻¹ T ⁻²]
q_s/p_s	Résistance au cisaillement [ML ⁻¹ T ⁻²]
R, s_r	Rapport des tailles ou des diamètres entre une petite et une large particule issues d'un mélange [–]
r	Mesure d'une distance radiale [L]
r_t	Rayon d'un tambour rotatif [L]
S	Étalement granulométrique d'un échantillon granulaire [–]
s_r, R	Facteur d'expression du rapport moyen des diamètres entre une petite et une large particule issues d'un mélange [–]
s_{12}	Angle de repos observé pour une particule de la population 1 sur une pente composée de particules de la population 2 [°]
T	Température du milieu [θ]
t	Temps de déposition [T]
\vec{t}	Vecteur de réaction tangentielle au contact [–]
$\vec{u}, \vec{v}_1, \vec{v}_2$	Vecteurs définis par deux des côtés d'un triangle, des arêtes d'un polyèdre [–]

u	Vitesse moyenne d'un écoulement dans sa direction principale [LT^{-1}]
$\vec{v}_1, \vec{v}_2, \vec{u}$	Vecteurs définis par deux des côtés d'un triangle, des arêtes d'un polyèdre [—]
V_L	Volume de particules larges dans un échantillon granulaire bidisperse [L^3]
V_p	Volume d'un grain, d'une particule [L^3]
V_S	Volume de solide d'un échantillon de sol [M^3]
V_s	Volume de particules de diamètres inférieurs dans un échantillon granulaire bidisperse [L^3]
V_T	Volume total d'un échantillon de sol [M^3]
V_V	Volume des vides d'un échantillon de sol [M^3]
\vec{v}	Vecteur vitesse d'une particule dans le repère global [—]
\mathbf{v}_{cl}	Vitesse de déposition des particules au sein des simulations, vitesse obtenue au terme de la chute libre des grains [LT^{-1}]
v_r	Vitesse d'élévation d'un empilement granulaire dans une cellule de test [LT^{-1}]
v_x	Vitesse de cisaillement, appliquée aux parois pour les essais [LT^{-1}]
\bar{v}_x	Vitesse normalisée de cisaillement [—]
L_{ramp}	Longueur de la rampe dans la nouvelle cellule de test [L]
X	Coefficient numérique, nombre entier [—]
\vec{X}	Direction de l'espace [—]
\vec{x}	Vecteur position d'une particule dans le repère global [—]
\vec{Y}	Direction de l'espace [—]
Z	Nombre de coordination d'un système granulaire [—]
\vec{Z}	Direction de l'espace [—]
α	Angle dièdre entre deux plans de l'espace [$^\circ$]
$\langle \alpha \rangle$	Angularité moyenne d'une particule [—]
$\overline{\langle \alpha \rangle}$	Moyenne du paramètre $\langle \alpha \rangle$ mesurée sur un échantillon de particules [—]
β	Angle de repos d'un empilement granulaire [$^\circ$]
$\bar{\beta}$	Moyenne des angles de repos mesurée sur un échantillon d'empilements granulaires [$^\circ$]
β_{dy}	Angle de repos dynamique d'un empilement granulaire [$^\circ$]
β_L	Angle de repos des particules larges d'un mélange bidisperse [$^\circ$]
β_s	Angle de repos des petites particules d'un mélange bidisperse [$^\circ$]
β_{st}	Angle de repos statique d'un empilement granulaire [$^\circ$]
Γ	Énergie de surface d'un grain, d'une particule [ML^2T^{-2}]

γ	Taux de déformation pour un essai de cisaillement [–]
$\dot{\gamma}$	Taux de cisaillement [T ⁻¹]
Δt	Incrément de temps calculatoire pour simulation numérique [T]
ΔV	Variation finie, saut, des vitesses entre deux incréments de temps pour chaque élément d'un système granulaire [–]
Δz	Variation de hauteur des centres de masse de populations de particules [L]
$\Delta\beta$	Différences des angles de repos des populations de particules d'un mélange granulaire bidisperse [°]
δ	Mesure de l'échelle du contact entre deux corps granulaires [L]
δ	Hauteur, épaisseur d'un écoulement granulaire [L]
δ_n	Mesure normale de la déflexion d'un contact entre deux particules [L]
δ_x	Mesure du déplacement horizontal du mur supérieur de cisaillement [L]
ϵ	Coefficient numérique appartenant à l'intervalle [0 ; 1[[–]
η	Expression d'un critère de convergence pour un algorithme de résolution [–]
θ	Angle de pente mesuré d'un empilement pour le calcul d'un facteur de sécurité FS [°]
θ_{ramp}	Angle d'inclinaison d'un plan incliné [°]
θ_w	Teneur en eau volumique d'un échantillon [–]
$\iota_1, \iota_2, \iota_3, \iota_4, \iota_5$	Identificateur de particule voisine d'une particule désignée i [–]
κ	Niveau de raideur [–]
λ	Longueur d'onde des bandes de stratification [L]
$\bar{\lambda}$	Longueur d'onde moyenne de bandes de stratification [L]
μ	Coefficient de frottement de Coulomb [–]
ν	Fraction solide d'un échantillon granulaire [–]
ν_n	Coefficient d'amortissement d'un contact entre deux particules [MT ⁻¹]
ρ	Masse volumique sèche d'un matériau [ML ⁻³]
σ	Tenseur des contraintes dans un échantillon granulaire [–]
σ'	Contrainte normale appliquée à un matériau [ML ⁻¹ T ⁻²]
σ_0	Contrainte normale, de compression isotropique [ML ⁻¹ T ⁻²]
σ_1, σ_2	Contraintes principales du tenseur des contraintes dans un plan de cisaillement défini [ML ⁻¹ T ⁻²]
$\sigma_{(\alpha)}$	Écart-type de la mesure d'un paramètre d'angularité moyenne \square [–]
σ_β	Écart-type de la mesure d'un paramètre d'angle de repos \square [°]
$\sigma_{\chi_1}, \sigma_{\chi_2}$	Écart-type de la mesure d'un paramètre d'excentricité \square [–]

σ_Ψ	Écart-type de la mesure d'un paramètre de sphéricité \square [-]
τ	Contrainte de cisaillement appliquée ou résistance au cisaillement d'un matériau $[\text{ML}^{-1}\text{T}^{-2}]$
v	Vitesse relative entre deux particules $[\text{LT}^{-1}]$
v_n	Composante normale de la vitesse relative entre deux particules $[\text{LT}^{-1}]$
v_t	Composante tangentielle de la vitesse relative entre deux particules $[\text{LT}^{-1}]$
v^-	Vitesse relative incidente entre deux particules $[\text{LT}^{-1}]$
v^+	Vitesse relative de restitution entre deux particules $[\text{LT}^{-1}]$
ϕ	Angle de friction interne d'un matériau $[\circ]$
ϕ'	Angle de friction interne d'un matériau en contraintes effectives $[\circ]$
χ_1, χ_2	Facteur d'excentricité d'une particule [-]
$\overline{\chi_1}, \overline{\chi_2}$	Moyenne d'un facteur d'excentricité mesurée sur un échantillon de particules [-]
Ψ	Sphéricité d'une particule [-]
$\overline{\Psi}$	Sphéricité moyenne mesurée sur un échantillon de particules [-]
ψ	Succion matricielle ou pression d'eau $[\text{L}]$
Ω	Nombre de dimensions du système considéré [-]
ω	Vitesse angulaire d'un tambour rotatif $[\text{T}^{-1}.1]$

LISTE DES ANNEXES

Annexe A	Géométries des différentes cellules de déposition non retenues pour la réalisation des simulations	176
Annexe B	Mise en évidence de la variance des mesures d'indices d'allongement, de sphéricité et d'angularité moyenne des grains	178
Annexe C	Powders & Grains 2021 - Article : DEM MODELING OF SEGREGATION AND STRATIFICATION IN POURING HEAPS OF BIDI- PERSED MIXTURES OF ROUNDED PARTICLES	180
Annexe D	Powders & Grains 2021 - Poster	191
Annexe E	Simulations numériques additionnelles : préparation d'échantillons de polyèdres pour essais de cisaillement	192
Annexe F	Mesures de ségrégation et de localisation du cisaillement pour les es- sais numériques de cisaillement réalisés à $P = 10,000Pa$ et pour des nombres d'inertie tels que $I \leq 2.10^{-1}$, jusque $\gamma = 5$	196

CHAPITRE 1 INTRODUCTION

1.1 Mise en contexte

La gestion traditionnelle des roches stériles prévoit la construction de haldes qui sont des empilements d'e conséquents volumes de rejets. Les techniques de déposition des stériles miniers en surface sont cependant connues pour initier la ségrégation du matériau au cours de son déversement ou d'autres mécanismes de granoclassement.

Une gestion alternative des roches stériles peut contribuer à réduire la proportion des rejets miniers intégrant les haldes. La valorisation est un procédé de reconversion avec ou sans transformation des rejets des industries qui s'est notamment étendue aux activités minières. Elle a prouvé être adaptée aux besoins de l'industrie qui produit d'importantes quantités de résidus et roches stériles [1,2] habituellement stockés en surface et dont la gestion représente un défi pour la restauration des sites exploités. Les roches stériles trouvent majoritairement des voies de valorisation sur site. Les stériles miniers s'intègrent à d'autres ouvrages de restauration en qualité de matériau grossier. Leurs propriétés hydrogéologiques et leur résistance mécanique en font des matériaux de choix capables de constituer des éléments de contrôle drainants et structurants.

La définition et le développement du projet de recherche traité par le travail présenté se limitent à la première solution de gestion des roches stériles, soit la construction des haldes.

Les arrangements et écoulements granulaires sont souvent rencontrés dans la nature et les industries comme principaux moyens d'entreposage et de transport des géomatériaux. Le déversement de matériaux granulaires pour former des empilements représente par ailleurs une situation favorable au développement de phénomènes de granoclassement. Les phénomènes de ségrégation et de stratification sont notamment responsables de distributions hétérogènes parmi les échantillons granulaires au cours et au terme de leur déposition. De telles répartitions dans les empilements sont majoritairement expliquées par les disparités de propriétés physiques des les mélanges granulaires.

Les exemples de ségrégation sont depuis longtemps étudiés et retiennent les mécanismes de percolation et d'expulsion comme les principales causes de la division spatiale des particules dans les mélanges. La cinématique de ségrégation est observée pour des opérations de dépôts

granulaires existants [3] mais est aussi examinée par reproduction avec des expériences de laboratoire et modèles mathématiques à de nombreuses autres occasions [4,5]. La description d'une pile de grains exposant un motif de ségrégation présente généralement une distribution des larges particules dans les régions inférieures ou extérieures du dépôt alors que les plus petites particules sont retrouvées concentrées sur la partie supérieure de la construction (**fig. 1.1.a**) [6].

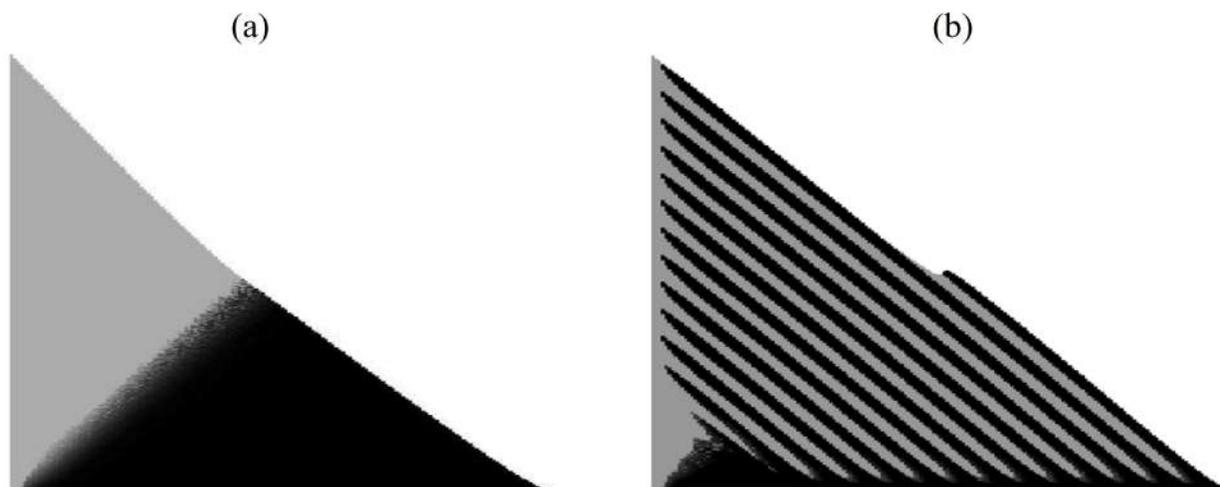


FIGURE 1.1 Prises de vues d'empilements granulaires produits de l'application de modèles mathématiques discrets : (a) ségrégation complète d'un mélange de larges grains noirs arrondis et de grains fins anguleux gris ; (b) stratification claire d'un mélange de larges grains anguleux noirs et de grains fins arrondis gris (Tiré de Cizeau et al. 1999).

Le phénomène de stratification est moins documenté. Des motifs particuliers de stratification sont remarqués sur les dépôts des sites d'exploitation [7] et sont reproduits expérimentalement notamment avec le déversement de mélanges granulaires polydisperses, composés de plusieurs populations de grains aux propriétés de tailles et de formes diverses [8,9]. La description d'un empilement de grains exposant un schéma de stratification est caractérisée par une distribution alternée de couches de grains larges et fins, parallèles à la surface libre de la pile, à l'issue de la déposition (**fig. 1.1.b**).

La motivation du travail de recherche trouve parmi ses sources les opérations de construction des haldes à stériles selon la méthode connue comme *push-dumping*. La technique du *push-dumping* propose le déversement des matériaux à l'aide d'engins depuis des points de déposition surélevés ou le sommet de précédents empilements, générant un écoulement granulaire sur la surface de la halde et favorisant alors les développements de phénomènes de

granoclassement. Le recours à une telle pratique de déposition des stériles miniers est typiquement justifié lorsque les coûts de transport estimés pour construire une halde depuis ses fondations sont excessifs, empêchant l'édification de bermes pour diminuer l'inclinaison globale de l'ouvrage afin d'améliorer sa stabilité mécanique et de limiter les effets de ségrégation. De telles situations sont normalement observées pour des projets de remblayage de fosses profondes [10], et dans le cadre d'opérations minières en haute montagne avec le remblayage de vallées abruptes [11, 12].

La formation de schémas de granoclassement dans les haldes à stériles est ainsi susceptible d'induire des variations des propriétés géotechniques et hydrogéologiques au sein même des structures internes des empilements. La distribution hétérogène des roches stériles dans les dépositions est responsable de localisations de mesures particulières de paramètres de fraction solide, de résistance au cisaillement ou de perméabilité dans les constructions, accentuant les risques d'instabilités géotechniques et hydrogéologiques capables d'affecter l'intégrité des ouvrages de stockage ou de restauration des activités minières [13–16]. Les enjeux liés à la prédiction du développement de phénomènes de ségrégation et de stratification au cours de la construction des haldes à stériles peuvent donc concerner le contrôle des :

- Stabilité mécanique des ouvrages, par le biais de :
 - Développement potentiel de zones, couches alternées, de fragilité particulière ;
 - Création de régions de rétention d'eau localisées pour lesquelles seraient mesurées de hautes pressions interstitielles.
- Stabilité hydrogéologique des ouvrages, stabilité géochimique, par le biais de :
 - Création de voies de drainages naturelles secondaires ;
 - Possible génération de drainage minier acide/neutre contaminé dépendamment de la minéralogie du matériau (DMA/DNC).

1.2 Objectifs de recherche

L'objectif principal de l'étude est le développement de modélisations numériques capables de reproduire des mécanismes de ségrégation et de stratification en simulant la construction d'empilements granulaires.

Les objectifs spécifiques (OS) du travail de recherche peuvent être présentés comme suit :

- OS1 - Reproduire expérimentalement la déposition de mélanges granulaires exposant des schémas de granoclassement ;
- OS2 - Développer des modèles numériques capables de démontrer des phénomènes de ségrégation et de stratification ;
- OS3 - Définir des conditions propices et limites au développement de phénomènes de

granoclassement.

1.3 Originalité du projet et contributions scientifiques

Le phénomène de ségrégation dans les milieux granulaires est largement décrit et étudié par des apports pratiques autant que par des contributions théoriques [17, 18]. Le problème est pourtant si complexe que plusieurs axes de recherche restent à être éclaircis ou approfondis. Le projet s'intéresse aux essais de déposition à surface libre des mélanges granulaires en piles. Le travail réalisé saisit les problématiques de cinématique, de facteurs d'influence et d'expressions particulières - ségrégation et stratification - des phénomènes de granoclassement. Les modélisations numériques d'empilements et les analyses consécutives, qualitatives et quantitatives de schémas de granoclassement, présentées sont d'importance pour le large horizon de paramètres de déposition qu'ils explorent.

Des travaux expérimentaux documentant avec succès la construction et les configurations particulières des piles granulaires sont publiés. Une quantité non négligeable de productions de recherche sont également récemment apparues pour étudier la cinématique des flots granulaires à l'aide de modèles numériques MED. Il est alors légitime d'interroger le nombre trop réduit de publications partageant le développement de simulations capables de rendre compte d'empilements complets exposant des motifs de déposition hétérogènes. Une grande majorité des références démontre la reproduction de schémas de ségrégation, mais des équivalents pour le problème précis de stratification manquent encore. Les pistes de réflexion et la méthodologie appliquées dans le travail proposé entendent ainsi participer à paver la voie de la résolution complète des problèmes de prédiction des phénomènes divers de ségrégation et de stratification dans les constructions et flots granulaires.

Le projet s'inscrit dans un effort commun du laboratoire de recherche "Mécanique granulaire pour la géotechnique minière" (MGGM) affilié à l'IRME.

Les contributions du travail présenté ont enfin fait l'objet de la rédaction d'un article de conférence, publié à l'occasion de la tenue de Powders & Grains 2021 (**Ann. C**), dont voici la référence [19] :

Vuilloz, T., Cantor, D. et Ovalle, C.. (2021). DEM modeling of segregation and stratification in pouring heaps of bidispersed mixtures of rounded particles. EPJ web of conferences, 249, 03049.[doi:10.1051/epjconf/202124903049](https://doi.org/10.1051/epjconf/202124903049)

1.4 Contenu du mémoire

Le présent chapitre d'introduction ouvre l'exposé du travail de recherche rapporté et développé en sept parties qui constituent l'architecture du mémoire.

Au terme de la précédente mise en contexte du projet et du rappel des objectifs affichés, le chapitre 2 présente une revue de littérature des théories, pratiques et outils sollicités au cours de l'étude. Le chapitre débute par une introduction aux travaux de construction des haldes à stériles qui définit le matériau des roches stériles puis décrit les méthodes de construction et la structure des ouvrages. La revue de littérature se poursuit avec un retour sur l'état des connaissances au sujet des flots et écoulements granulaires qui couvre leur théorie, les moyens pratiques d'analyse, leurs mécanismes ainsi que la description des schémas de distributions granulaires observés dans les empilements. Elle se clôt par une présentation de la nature des études numériques réalisées qui détaille les techniques employées et démontre la pertinence du choix de telles ressources pour la modélisation de systèmes granulaires.

Le chapitre 3 débute l'étude avec la réalisation d'essais physiques de constructions d'empilements dans des cellules de test. Il résume la reproduction d'expériences réelles de déposition de mélanges granulaires polydisperses et l'obtention de schémas de granoclassement convaincants. Les résultats sont décrits et interprétés qualitativement et quantitativement avec le détail de paramètres mesurés. La conclusion des essais justifie la composition particulière des échantillons bidisperses de grains et la sélection des paramètres de déposition à faire varier. Le chapitre précise donc la fenêtre générale d'étude de la question de recherche en fixant les scénarios explorés.

Les chapitres 4 et 5 constituent le corps principal du mémoire. Les deux parties décrivent les stratégies de modélisation et la réalisation des études numériques. Les résultats obtenus et les interprétations qui en découlent y sont aussi présentés qualitativement, avec les descriptions de schémas d'empilements, et quantitativement, grâce à la définition d'indices calculés de ségrégation. Le chapitre 4 se dédit au développement de simulations numériques de déposition de mélanges granulaires bidisperses. Le chapitre 5 est, quant à lui, réservé au traitement d'un second modèle numérique qui simule le cisaillement d'un échantillon granulaire semblable aux précédents pour l'étude de phénomènes de ségrégation prolongés.

Le chapitre 6 reprend les différents résultats présentés dans les dernières parties et propose diverses discussions. Les influences de la géométrie de l'environnement des simulations, de la représentativité des échantillons considérés et de la pertinence des méthodes numériques sont débattues pour approfondir ou limiter les déductions apportées par le travail réalisé.

Le chapitre 7 conclut le développement porté par l'ensemble du mémoire. Il entend finalement donner des recommandations capables d'alimenter des pistes de poursuite pour des travaux qui projetteraient le traitement de questions de recherche connexes.

Les annexes attachées à ce document apportent des informations complémentaires au développement du mémoire. Des collections de données, d'images et quelques productions supplémentaires y sont consignées.

CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE

2.1 Haldes à stériles

La gestion de la majorité des volumes de roches stériles intègre les plans de restauration des sites par le développement d'aires de stockage. L'entreposage en surface des stériles miniers demeure la solution la plus usitée et la plus à même de disposer d'importantes quantités de rejets au travers de la construction de haldes à stériles. Les compétences d'ingénierie nécessaires à la conception de tels ouvrages se sont développées avec des degrés d'exigence de contrôle ou de performance croissants motivés par des objectifs sécuritaires et environnementaux davantage mis en avant.

2.1.1 Roches stériles

Le développement des activités minières est connu pour produire d'impressionnantes quantités de déchets d'exploitation regroupés sous la dénomination de "rejets miniers". Les rejets miniers peuvent être divisés en trois sous-ensembles que sont le mort-terrain décapé, les roches stériles résultant des opérations minières et les résidus miniers produits des concentrateurs ; les eaux de lixiviation ne sont pas considérées. L'étude réalisée projette l'emploi de matériaux de type roches stériles issus de mines de roches dures, non cohésifs et secs.

Propriétés géotechniques

Les roches stériles sont des matériaux jugés sans valeur économique quelconque ou suffisante dont il est nécessaire de disposer au cours des opérations d'exploitation pour atteindre une zone de roc minéralisée d'intérêt. Les stériles miniers sont des matériaux résultant des opérations de forage et de sautage extraits dans des proportions pouvant atteindre jusqu'à 60% du volume total de roche excavé dans le cas d'activités à ciel ouvert [20]. Il est alors nécessaire de connaître les caractéristiques des matériaux sélectionnés avant de procéder à leur entreposage, le **tableau 2.1** résume les mesures de propriétés géotechniques pour des échantillons de roches stériles [21].

Les matériaux de type roches stériles admettent des distributions de tailles très étalées si bien qu'un échantillon peut à la fois exposer des blocs pluricentimétriques et des particules fines

TABLEAU 2.1 Revue de littérature des propriétés géotechniques des roches stériles (Adapté de Kalonji, 2020).

PARAMÈTRE	SYMBOLE	VALEUR
Distribution granulométrique	D_{10} (mm)	0.02 à 3
Distribution granulométrique	D_{60} (mm)	1 à 80
Coefficient d'uniformité	C_U	≥ 20
Proportion de graviers	-	33 à 37 %
Proportion de sables	-	59 à 62 %
Proportion de fines	-	4 à 5 %
Groupe de classification USCS	-	(SW) ou (GW)
Densité relative	D_r	2.1 à 4.8
Masse volumique sèche	ρ (kg/m^3)	1,500 à 2,700
Porosité	n	0.3 à 0.6
Conductivité hydraulique saturée	k_{sat} (cm/s)	10^{-4} à 1

comme les silts [21–24]. Les distributions granulométriques mesurées pour les roches stériles sont larges ($C_U > 20$), mais majoritairement constituées de sables et de graviers [22, 25, 26]. La variation de la distribution granulométrique d'un échantillon de roches stériles à un autre est aussi susceptible de modifier les propriétés mécaniques et hydrogéologiques des matériaux. Un échantillon composé d'une fraction grossière plus majoritaire qu'un précédent démontre une plus importante résistance au cisaillement et, ainsi, un échantillon à la fraction de fines plus conséquente démontre une conductivité hydraulique saturée k_{sat} réduite [22, 27].

La variabilité des paramètres de caractérisation des roches stériles s'étend également à la détermination des formes des grains parmi les échantillons. Les stériles ont des formes aléatoires, irrégulières à tendance anguleuse et sans allongement particulier. Plusieurs méthodes expérimentales et modèles de calculs sont accessibles pour approcher la description de la forme d'un grain [28–31], mais un développement du sujet est réservé pour la section 4.1.3.

Les valeurs rapportées de densité relative D_r pour des échantillons de roches stériles varient entre 2.1 et 4.8. Pareillement, les mesures de masse volumique sèche ρ sont obtenues entre 1,500 et 2,700 kg/m^3 pour des stériles miniers de compositions minéralogiques standards [22, 32]. Des intervalles de valeurs spécifiques de D_r ou ρ peuvent être mesurés pour des roches stériles issues des mines de roches tendres avec lesquelles des densités et masses volumiques moindres sont documentées, ou pour des échantillons de roches dont la minéralogie est particulière et introduit des variabilités d'évaluation des mêmes grandeurs [33, 34].

L'angle de repos β d'un empilement de roches stériles est mesuré comme le plus grand angle observable formé par le dépôt simple du matériau dans un état lâche. Les intervalles d'angles

de repos recensés pour des échantillons de roches stériles suite à des procédures d'évaluation standards sont situés entre 35° et 40° [35]. Les expériences de terrain prouvent alors notamment que la mesure de l'angle de repos d'un empilement est fonction de la géométrie de la surface de construction et de la méthode de déposition employée [36, 37]. Il est retenu principalement de l'influence de la géométrie des particules qu'un empilement de grains anguleux possède un angle de repos supérieur à un échantillon du même matériau constitué de grains plus arrondis [38]. Les propriétés intrinsèques des roches stériles telles que la densité relative des particules, l'étalement granulométrique ou encore de la teneur en eau du mélange sont d'autres facteurs d'influence de la mesure des angles de repos [39–41].

La porosité n représente le rapport entre le volume de vide V_V et le volume total V_T d'un échantillon. Les roches stériles démontrent une porosité variable mesurée entre 0.3 et 0.6 dépendamment du degré de compaction imposé à l'échantillon considéré [24, 25, 42–44]. Les mesures de porosité sont également fonctions de la forme des grains et de l'étalement granulométrique du matériau. La réduction de la porosité d'un échantillon entraîne une réduction de sa conductivité hydraulique et une augmentation de sa résistance au cisaillement au pic.

La conductivité hydraulique saturée k_{sat} a enfin tendance à augmenter avec la taille moyenne des particules d'un échantillon. La granulométrie généralement grossière des roches stériles en fait un matériau relativement perméable mesurant pour k_{sat} jusqu'à 1cm/s [22, 43, 44].

Comportement d'un matériau non cohésif et sec

Les empilements de roches stériles sont des environnements généralement désaturés. Le matériau considéré dans la réalisation de cette étude est un modèle simplifié d'échantillon de roches stériles non cohésif et sec. Un tel état suggère alors la définition particulière de paramètres caractéristiques pour les stériles miniers.

La détermination de la résistance du matériau est réalisée à l'aide de différents essais de laboratoire ou *in-situ*. L'expression du critère de Mohr-Coulomb est notamment utilisée pour définir la résistance au cisaillement des roches stériles [33, 34] :

$$\tau = c' + \sigma' \cdot \tan(\phi') \quad (2.1)$$

- avec,

τ , la résistance au cisaillement mobilisable du matériau; c' , la cohésion du matériau en contraintes effectives; σ' la contrainte normale au plan de rupture du matériau; ϕ' l'angle de friction interne du matériau en contraintes effectives.

La mesure de l'angle de friction interne ϕ est sensible à l'évolution simultanée de nom-

breuses propriétés d'un échantillon. La distribution granulométrique, la forme et la rugosité des grains, la porosité ou la densité de l'échantillon en question sont autant de facteurs qui impactent la mesure au pic de l'angle de friction interne (**fig. 2.1**) [27]. Une sélection compactée de roches stériles à la granulométrie grossière, avec un large étalement granulométrique, composée de grains anguleux et denses expose des valeurs de ϕ élevées quand, à l'inverse, un échantillon plus lâche de stériles miniers roulés et moins denses tend à mesurer des valeurs de ϕ faibles. Les publications qui rapportent des mesures d'angles de friction internes pour des roches stériles issues de mines de roches dures proposent un intervalle de valeurs de ϕ compris généralement entre 38° et 45° [32–34, 45]. Une seconde mesure appelée angle de friction résiduel correspond à la résistance du matériau porté à un certain stade de déformation après le croisement d'une valeur pic de ϕ . L'angle de friction résiduel est légèrement inférieur à l'angle de friction interne, il mesure environ 5° de moins que ϕ pour les roches stériles [34, 46].

La qualité des échantillons testés est aussi d'importance, car la dégradation des grains ou leur fragmentation sous l'impulsion de fortes pressions de confinement peuvent être responsables de l'altération des propriétés évoquées, et donc des mesures consécutives de résistance [47–49]. Les principales procédures utilisées pour la mesure d'un angle de friction interne sont les essais de cisaillement et les essais triaxiaux. La détermination de la résistance des échantillons est alors limitée par la dimension des cellules d'essai disponibles [50–52]. D'exceptionnelles campagnes d'essais peuvent être réalisées pour de larges dimensions d'appareillage, et donc des échantillons de roches stériles plus représentatifs, mais de telles opportunités sont coûteuses et la caractérisation d'un effet d'échelle dans la détermination de la résistance des matériaux est toujours d'actualité [47, 52].

Le traitement du cas d'un échantillon désaturé se distingue alors du modèle d'enveloppe défini par **eq. (2.1)**. La cohésion des matériaux non saturés considère un terme additionnel apparent c_{app} , exprimé en fonction de θ_w et ψ , qui témoigne d'interactions capillaires dans les échantillons justifiées par le développement de profils de succion. Les critères d'expression de la résistance au cisaillement pour des échantillons de roches stériles non saturés étendent ainsi le critère de Mohr-Coulomb avec de nombreux modèles calculatoires empiriques [53, 54].

La conductivité hydraulique k_w d'un matériau est fonction de sa teneur en eau θ_w , ou des valeurs de succion ψ mesurées. La granulométrie grossière des échantillons de roches stériles assure des valeurs de k_{sat} élevées, mais est aussi la cause d'une cinétique de désaturation en eau rapide. Les roches stériles ne conservent alors qu'une conductivité hydraulique résiduelle plus faible que celle de matériaux "fins" dans un état désaturé (**fig. 2.2**) [55]. De nombreux modèles empiriques existent pour déterminer k_w d'après θ_w ou ψ [56] mais aussi pour décrire les écoulements d'eau au sein d'échantillons non saturés [57, 58].

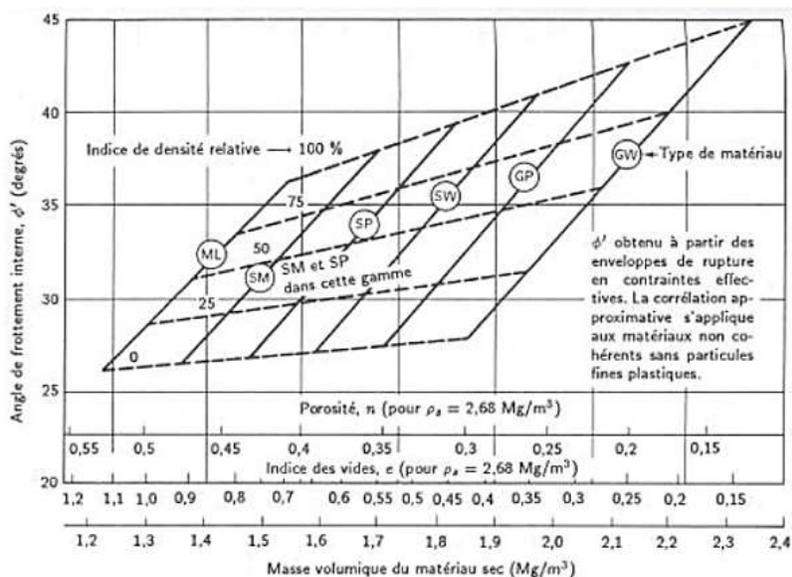


FIGURE 2.1 Diagramme de corrélation entre les mesures de l'angle de friction interne ϕ et de différents paramètres géotechniques de matériaux granulaires comme la porosité n , l'indice des vides e ou la masse volumique du matériau sec considéré ρ (Tiré de Holtz et al., 1981).

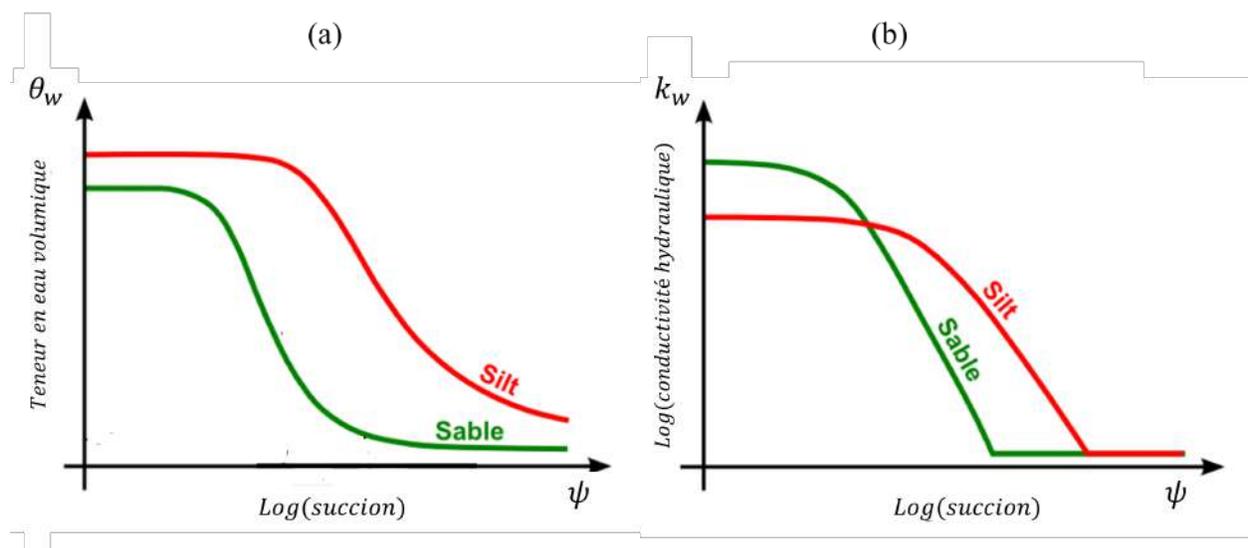


FIGURE 2.2 Fonctions hydriques schématisées pour un sol fin (silt) et un sol grossier (sable) : (a) courbes de rétention d'eau θ_w - ψ ; (b) fonctions de perméabilité k_w - ψ (Tiré de Aubertin et al., 2015).

2.1.2 Construction de haldes à stériles

La construction des haldes pour l'entreposage en surface des roches stériles est régulée et documentée par des consignes qui témoignent de l'expérience et des compétences d'ingénierie nécessaires pour mener les projets de restauration des sites à bien [46, 59, 60]. Les méthodes et marches à suivre connues sont explicitées depuis la sélection du site jusqu'au terme des travaux principaux.

Sélection des sites et des environnements

Le projet de construction d'une halde à stériles débute par la sélection du site d'entreposage des rejets miniers. Le choix d'un environnement adapté contribue en grande partie à la réussite complète de l'opération de restauration concernée par la déposition des stériles miniers [59].

La sélection d'un environnement d'entreposage commence par l'exploration des sites candidats pour la réalisation de l'aménagement de restauration [22, 46]. Des prises de vues aériennes, des études topographiques et la description d'un historique géologique du lieu permettent de définir son potentiel et ses défauts majeurs comme des restrictions diverses de nature :

- écologique : zone d'habitat pour espèces protégées, fragilité de l'écosystème ;
- économique : coûts prohibitifs justifiés par un accès difficile au site, une longue distance de transport des rejets au point de dépôt ;
- sociale : dégradation esthétique de l'environnement ou pollution visuelle potentielle après restauration ;
- technique : exposition du site à des risques sismiques, mesures de dénivelés et pentes prononcées, fondations fragiles, perméables ou encore d'intérêt ;
- ou législative : terrain réservé à des usages particuliers.

La seconde étape de sélection du site consiste en une analyse approfondie des premiers lieux retenus par la comparaison de leurs qualités à celles recherchées pour le projet de restauration imaginée [22, 46, 60]. Des essais ou des simulations de projection peuvent alors être réalisés pour renseigner les caractéristiques géotechniques, hydrogéologiques, voire climatiques, de chaque site considéré. Un lieu de déposition idéal présente une fondation stable, un bassin de drainage réduit, une topographie avantageuse et un profil de caractéristiques généralement uniforme. Un site est finalement choisi avec l'aboutissement de la procédure.

Le terme du processus de sélection peut conclure à l'élection de lieux d'entreposage sensiblement différents. La nature de l'environnement de déposition est alors capable d'influencer la configuration géométrique finale de la halde à stériles construite (**fig. 2.3**) [61]. Chaque étude est traitée comme un cas particulier précis.

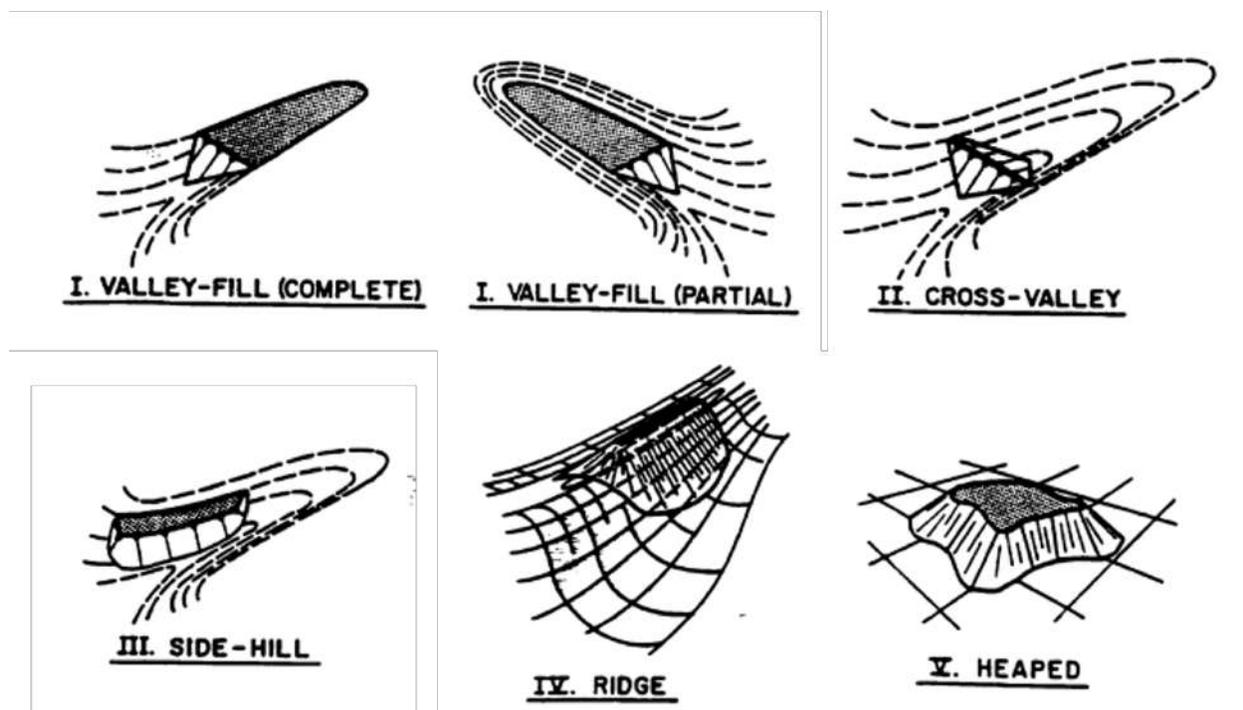


FIGURE 2.3 Classification des constructions de type haldes à stériles selon leurs configurations. I : déposition dans une vallée (éventuellement incomplète) ; II : déposition en travers d'une vallée ; III : déposition sur une pente ; IV : déposition sur une crête ; V : empilement en tas (Tiré de U.S. E.P.A., 1995).

Méthodes usuelles

Les haldes à stériles sont des empilements aux dimensions importantes dont la surface d'emprunt au sol peut dépasser les 100ha et la hauteur peut atteindre jusqu'à plusieurs centaines de mètres pour certains sites d'entreposage à la topographie particulière [11, 12, 46–48]. Les opérations de dépositions peuvent représenter l'entreposage de millions de mètres cubes de rejets miniers. L'édification rigoureuse des haldes à stériles est donc impérative pour garantir leur stabilité géotechnique et géochimique. Plusieurs procédures de déposition des stériles miniers sont répertoriées pour diriger la réalisation d'ouvrages d'ingénierie construits [60, 62].

Le choix d'une méthode de construction particulière s'effectue d'après la sélection précédente du site d'entreposage, les propriétés et le volume des matériaux à déposer, mais aussi selon les moyens matériels disponibles. Quatre méthodes usuelles de construction des haldes à stériles sont à dissocier [22, 46, 63] :

- Le déversement à la benne, aussi appelé *end-dumping* (fig. 2.4), consiste en la répétition de déchargements de roches stériles avec des chargeurs ou camions depuis la crête existante de la halde ou un point de déposition naturel surélevé ;

- Le déversement avec épandage au butoir, ou *push-dumping* (fig. 2.4), entend la déposition préalable des roches stériles à proximité du point de déversement final puis la poussée du dépôt à la surface libre de la construction existante à l'aide de béliers mécaniques ou bulldozers ;
- Le déversement à la benne avec régalage, ou *free-dumping*, propose la création de plusieurs dépôts individuels de tailles réduites n'excédant par quelques mètres avant leur nivellement et leur compactage pour créer la nouvelle surface de l'empilement ;
- L'utilisation d'une pelle à benne traînante (*dragline*) réalise l'acheminement et la déposition des roches stériles. Peu d'exploitations de mines en roches dures ont effectivement recours à une telle méthode.

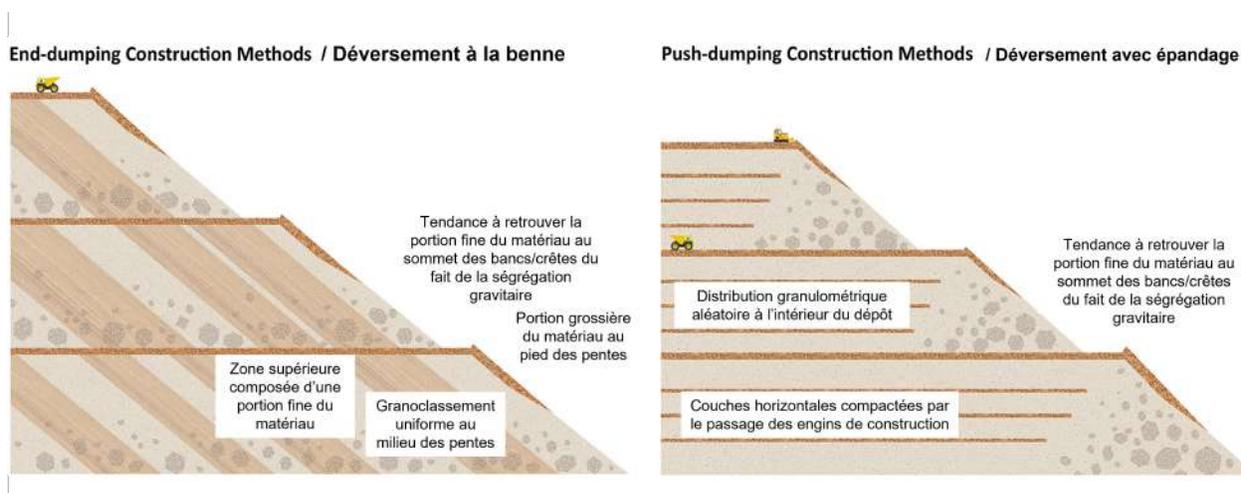
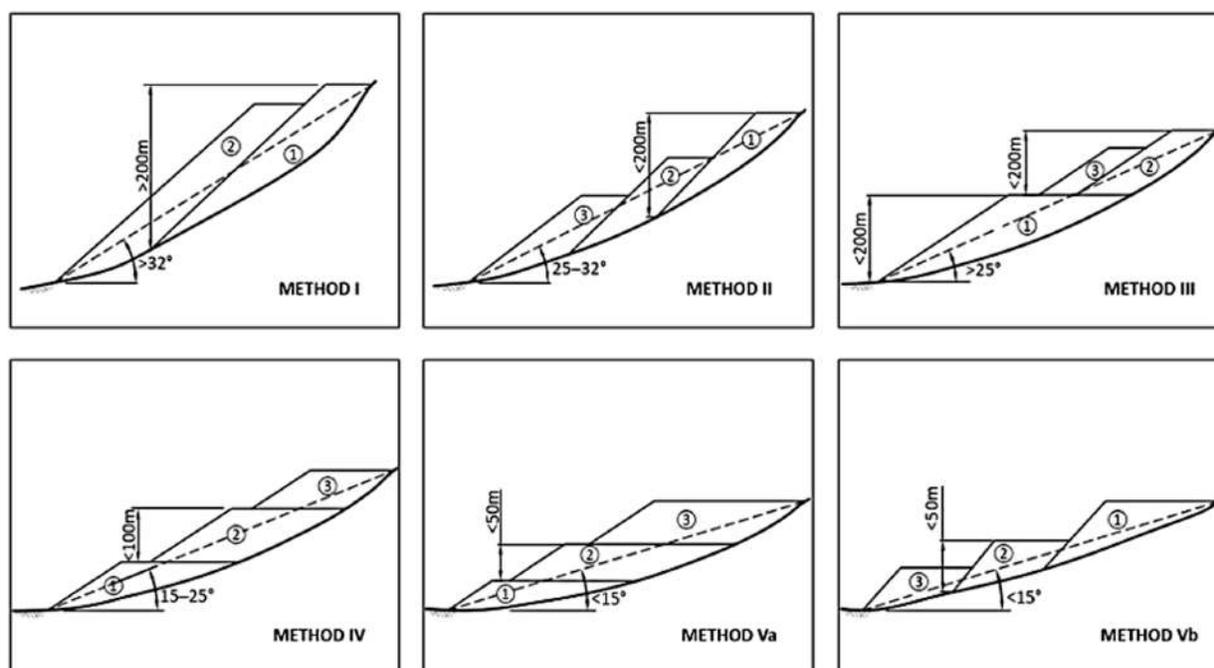


FIGURE 2.4 Illustrations des modèles conceptuels des méthodes de construction des haldes à stériles, respectivement avec les emplois du *end-dumping* (gauche) et du *push-dumping* (droite). Les différentes couleurs de matériaux distinguent des dépositions successives de stériles dans le cas du scénario de déversement à la benne. Les détails des couches sombres au sommet des bancs ou à l'intérieur de la structure des dépôts représentent des régions de matériau compressées par le trafic répété des engins (Tiré de Raymond et al., 2021).

La définition des méthodes de déposition s'accompagne de la description des séquences de construction des haldes à stériles qui renseignent l'ordre de progression des opérations [22, 46, 60, 62]. La **figure 2.5** présente une évaluation de la stabilité des haldes à stériles en fonction des séquences de construction décidées. Le calcul d'un indicateur élevé traduit l'assurance portée à un exemple d'entreposage. Les recommandations pour les travaux d'édification des haldes à stériles encouragent par exemple la déposition des stériles miniers sur des sites dont l'angle d'inclinaison de la fondation ne dépasse pas 10 à 15° lorsque la topographie du site le permet. La réalisation de séquences de construction ascendantes par bancs de hauteur définie ($\leq 25m$), pour assurer le contrôle des étapes de déchargement du matériau et la circulation

des équipements, et légèrement inclinés, pour favoriser le drainage de l'empilement, est aussi motivée afin de garantir l'intégrité des haldes.



Factors	Ratings				
Construction method	Method I	Method II	Method III	Method IV	Method V
Description	Descending sequence with single or multiple (wrap-around), very high lifts constructed on very steep terrain; lift heights > 200 m; overall foundation slopes > 32°	Descending sequence with single or multiple (wrap-around) lifts constructed on steep terrain; lift heights < 200 m; overall foundation slopes 25–32°	Hybrid (combination of descending and ascending) sequence designed to avoid founding lift toes on steep or very steep terrain; lift heights < 200 m; overall foundation slopes > 25°	Ascending sequence with multiple lifts constructed on moderate terrain; lift heights < 100 m; overall foundation slopes 15–25°	Descending or ascending sequence on gentle or flat terrain; lift heights < 50 m; overall foundation slopes < 15°
Rating	0	2	4	6	8
Loading Rate	Very High	High	Moderate	Low	Very Low
Volumetric Loading Rate (m ² /d/m)	> 500	150–500	50–150	15–50	< 15
Mass Loading Rate (t/d/m)	> 250	75–250	25–75	7.5–25	< 7.5
Crest Advancement Rate (m ² /d)	> 500	150–500	50–150	15–50	< 15
Rating	0	2	3.5	5	7
Construction Rating				Maximum possible rating:	15

FIGURE 2.5 Descriptions des séquences de construction des haldes à stériles et des évaluations associées (Tiré de Hawley et al., 2017).

Le profil des empilements de roches stériles est généralement allongé depuis la surface et

s'élève graduellement de manière à répartir les temps et énergies de consolidation propre des matériaux. Les régimes de déposition, les vitesses d'avancement des constructions et les pentes globales des haldes sont également des facteurs déterminés par les opérations de restauration et qui les potentiels de stabilité des empilements de stériles miniers.

Nouvelles approches et instrumentation

Les méthodes ou la systématisation récente des pratiques présentées pour la déposition de stériles miniers répondent principalement à la gestion particulière de rejets contaminés, susceptibles d'initier la génération de DMA/DNC dans les haldes, ou de problèmes de stabilité mécanique rencontrés pour la restauration des parcs à résidus.

Les constructions de haldes à stériles intègrent désormais les concepts de revalorisation des matériaux de type roches stériles dans les infrastructures minières. Les stériles miniers sont par exemple utilisés pour la construction de drains ou de digues dans des plans de co-disposition des rejets avec les résidus miniers. L'objectif de la co-disposition est alors de profiter des propriétés respectives des rejets de concentrateur et des roches stériles. L'inclusion de roches stériles comme drains locaux dans les parcs à résidus démontre les avantages d'accélérer la consolidation des résidus, de délester le poids porté sur les digues par effet de compartimentation et de diminuer la dangereuse influence des sollicitations sismiques [64]. Les opérations des chantiers souterrains valorisent aussi les roches stériles avec la conception de barricades de soutien pour remblais [65, 66]. Les roches stériles sont encore susceptibles d'intégrer les compositions de couches de contrôle des écoulements (CCE), en qualité de matériau grossier, de nappes surélevées et de couvertures monocouches dans le cadre de la construction d'aires de stockage de déchets miniers ou de travaux de restauration de sites pollués [23, 67, 68]. La majorité des solutions présentées sont enfin à éviter si elles entendent l'emploi de roches stériles réactives.

Des méthodes de restauration anticipées des haldes à stériles sont aussi développées au cours de la construction des empilements. La sélection d'échantillons parmi les volumes de roches stériles à déposer selon leur granulométrie ou leur minéralogie permet de répartir les dépositions de matériau dans différentes régions des haldes de manière à contrôler les écoulements. La restauration pendant les opérations de construction des haldes avec la déposition sélective des roches stériles présente les avantages de diminuer les coûts de restauration postérieurs des ouvrages et les coûts de traitements d'eaux potentiellement polluées en prévenant leur circulation au travers de stériles sulfureux [14, 69].

Enfin, Les méthodes de déposition évoquées sont dorénavant accompagnées d'une phase d'instrumentation des constructions dans le but de contrôler régulièrement le comportement des

ouvrages [16,64,69]. L'instrumentation consiste en l'intégration d'outils de mesure ou d'acquisition dans la structure des dépositions pour dresser les profils géotechniques et géochimiques de l'ouvrage. Le recours à l'instrumentation constitue un moyen de détecter et de prévenir rapidement la dégradation de l'intégrité physique ou chimique des constructions. L'instrumentation se propose comme une solution d'auscultation continue des empilements.

2.1.3 Ségrégation au sein des haldes

La déposition des roches stériles démontre régulièrement la ségrégation des matériaux au terme de l'opération. Les méthodes de construction des haldes présentées sont de même responsables du granoclassement des stériles miniers dans les empilements [7,46]. L'intensité du développement des phénomènes de ségrégation rapportés est alors notamment fonction du choix de la procédure sélectionnée et des propriétés des matériaux déposés.

L'emploi des méthodes de *push-* et *end-dumping* génère des profils de granoclassement particulièrement marqués dans les constructions [63,70]. La procédure de déposition par *end-dumping* est associée à une ségrégation de la fraction fine des échantillons de matériaux entreposés à la surface ou dans les régions hautes de l'empilement, et à la concentration des fractions grossières dans les régions inférieures ou au pied des haldes. Les études de reproduction de constructions d'empilements de stériles décrivent schématiquement une déposition divisée en les deux zones déjà remarquées et une troisième zone centrale de transition de granulométrie moyenne non ségréguée. La réalisation de la méthode du *push-dumping* révèle des schémas de granoclassement similaires dans les haldes à stériles, mais dont la ségrégation dans la partie supérieure de l'empilement est moins affichée (**fig. 2.6**) [3]. Le déversement à la benne est retenu comme la méthode responsable des effets de ségrégation les plus prononcés, car la déposition franche des échantillons confère initialement une forte énergie potentielle à chaque particule qui favorise leur transport, et donc les mécanismes de granoclassement.

Les observations des empilements de stériles sur le terrain témoignent d'une ségrégation principale des matériaux basée sur l'exposition des différences de tailles entre particules. Les distributions ségréguées des roches stériles dans les haldes sont variables selon la granulométrie du matériau déposé [3,7,70]. Des schémas de ségrégation réguliers sont relevés pour la déposition d'échantillons de roches stériles à l'étalement granulométrique limité. L'agrandissement du fuseau granulométrique du matériau déversé peut causer le développement d'irrégularités dans les schémas de classement des haldes, car plusieurs profils de ségrégation se réalisent alors au cours de mêmes dépositions en fonction des larges intervalles de proportions et de diamètres de grains définis comme fins ou grossiers.

Le plan de restauration des ouvrages dicte la progression des opérations et donc la direc-

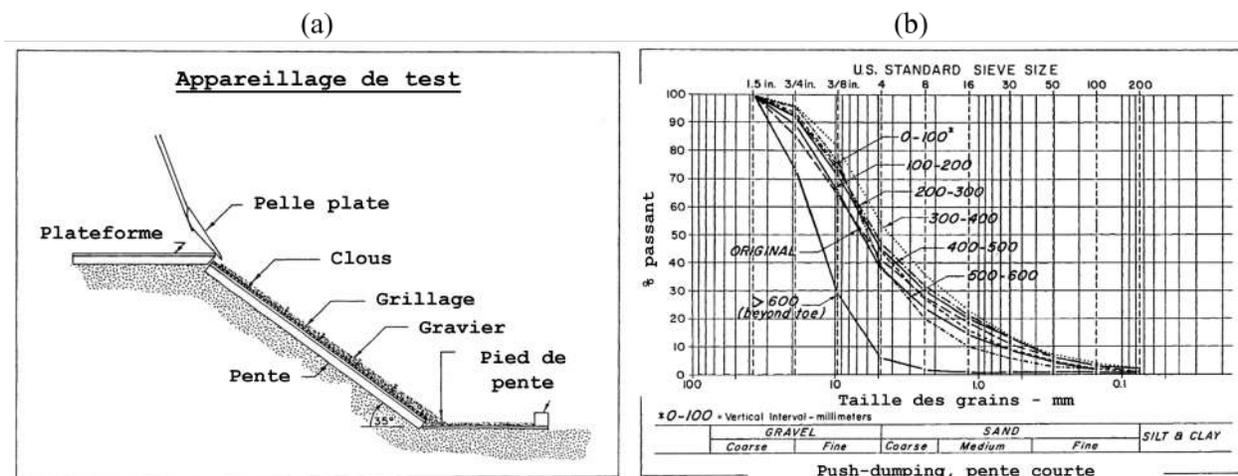


FIGURE 2.6 Résultats de tests de ségrégation de matériaux granulaires le long d'un plan incliné : (a) schéma de l'environnement de test ; (b) graphique de la distribution des tailles de grains pondérée par deux tests de ségrégation réalisés avec la méthode du *push-dumping* et un matériau grossier ; les courbes granulométriques représentées correspondent chacune à l'échantillon matériau prélevé, après déposition, sur un intervalle de pente indiqué du plan incliné (Tiré de Nichols, 1986).

tion de l'extension spatiale de l'entreposage du matériau [46, 59]. La construction des haldes à stériles par répétition de déchargements ponctuels, ou par la réalisation de bancs, traduisent respectivement une extension horizontale ou verticale des dépôts ; une telle tendance influence le développement du profil granulométrique de la structure interne des empilements de restauration. L'emploi de procédures particulières d'édification des haldes est d'ailleurs quelquefois un moyen de contrôler ou limiter le développement de phénomènes naturels de ségrégation [41, 46].

Il est important de remarquer que les opérations de déposition, la circulation des engins et les étapes intermédiaires ou de finition de construction des haldes à stériles ne sont pas les uniques moyens de la ségrégation des matériaux dans les empilements [22, 34, 46]. Les tassements, la consolidation naturelle d'un dépôt, les écoulements d'eau ou le développement de contraintes élevées dans sa structure sont également susceptibles de causer un mouvement résiduel des matériaux ou la fragmentation de certains éléments et donc de remanier substantiellement le profil granulométrique complet de l'ouvrage de restauration.

La détermination de l'effet prononcé ou de l'intensité des distributions hétérogènes des particules dans la construction des haldes est nécessaire pour comprendre et prédire les comportements géotechnique et géochimique des rejets dans les empilements.

2.1.4 Profils hydrogéologiques et stabilité chimique des ouvrages

Le bilan hydrique d'un empilement de roches stériles dépend du site d'entreposage sélectionné et des conditions environnementales qui y sont observées. Les haldes à stériles sont des constructions réalisées en surface et donc nécessairement exposées aux phénomènes de précipitations qui sont responsables d'infiltrations ou de ruissellements respectivement à l'intérieur ou sur le périmètre de l'empilement [15, 16, 20, 42–44, 71].

Les écoulements dans les dépositions de stériles miniers sont aussi dirigés par la conductivité hydraulique des matériaux dans les haldes. Le profil granulométrique des empilements et les éventuels schémas de granoclassement existants sont des facteurs d'influence de la conductivité des roches stériles entreposées. Il est plus tôt rappelé que les variations de la conductivité hydraulique k_w ou de la porosité n d'un échantillon sont fonctions de la granulométrie du matériau considéré et de son état de compaction [15, 22, 42]. Les distributions hétérogènes des stériles dans les haldes issues des opérations de construction sont alors capables de faire significativement varier les caractéristiques hydriques entre les régions d'un empilement. L'apparition récurrente de schémas de granoclassement développe principalement des chemins d'écoulements préférentiels associés à la création de zones stratifiées ou ségréguées dans les haldes et selon les degrés de saturation mesurés [15, 42]. Les vecteurs d'écoulements préférentiels sont majoritairement rencontrés dans les régions des haldes de granulométries grossières désaturées où les débits d'écoulement sont les plus importants. Les schémas de granoclassement des empilements exposent ainsi des distributions d'écoulements qui suivent les profils granulométriques des haldes pour différentes méthodes de construction (**fig. 2.7**) [16, 63]. De tels chemins d'écoulements peuvent constituer des réseaux communicants ou sont limités et isolés, car les mesures de conductivités hydrauliques localisées d'un empilement sont également amenées à varier avec d'éventuelles dégradations temporelles. Le transport de particules érodées par l'eau, l'oxydation des stériles résultant en la précipitation de minéraux, les mouvements de gaz peuvent encombrer ou libérer des régions de la halde et modifier le comportement hydrique de la construction à différents termes [14, 16, 55].

L'oxydation de stériles sulfureux exposés après leur entreposage est capable de développer une pollution chimique des eaux de percolation de l'ouvrage [55]. Le développement régulier des phénomènes de ségrégation ou de stratification dans les haldes à stériles et leur impact sur la distribution des écoulements poussent à effectuer une déposition sélective des rejets générateurs d'acide au cours des opérations. L'objectif de la sélection des roches stériles en fonction de leur minéralogie est de prévenir les réactions chimiques d'oxydation responsables de la dégradation de la qualité des effluents. La procédure de déposition sélective est alors double et consiste simultanément à déposer les roches stériles à potentiel générateur de DMA/DNC

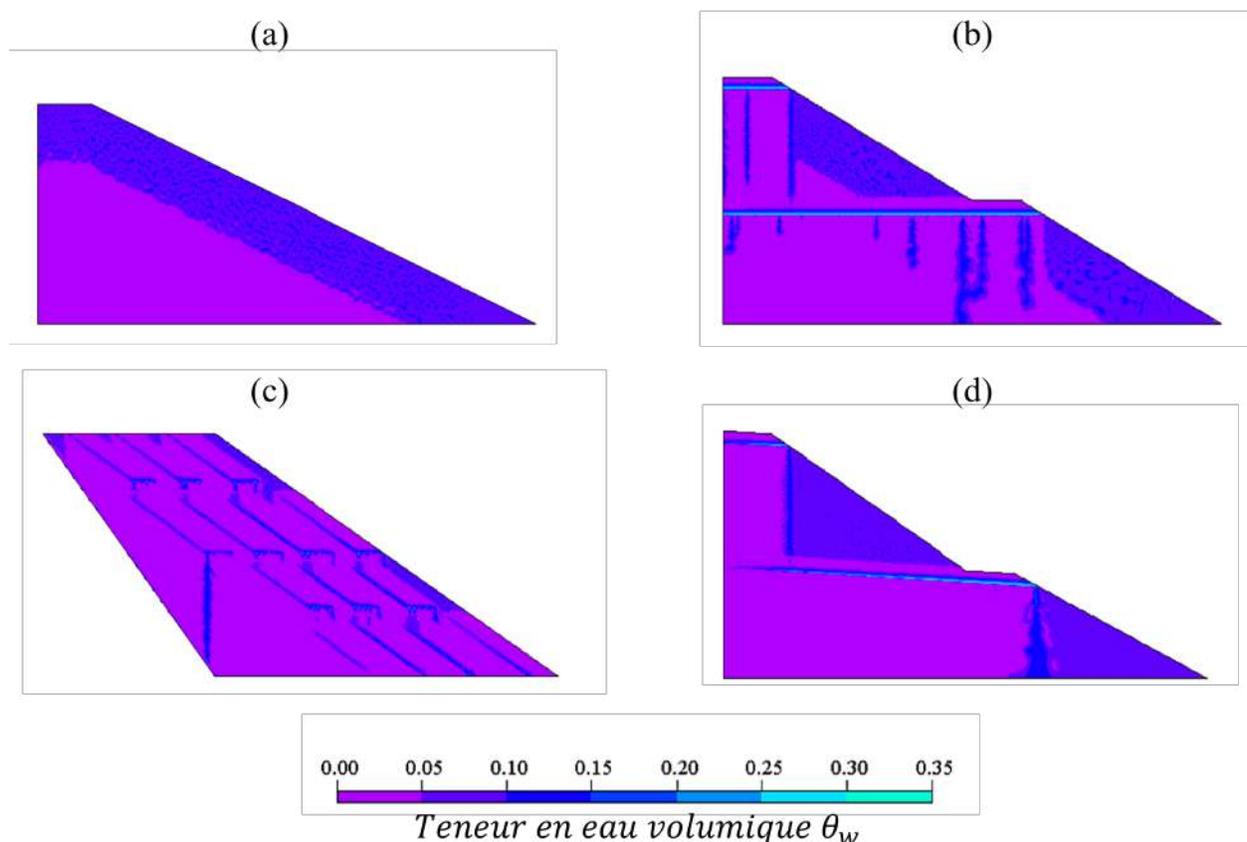


FIGURE 2.7 Analyse numérique de la distribution de la teneur en eau volumique θ_w après plusieurs années dans des dépôts de roches stériles, non saturés, pour différents modèles de bancs et méthodes de construction. (a) modèle de référence ; (b) barrière capillaire de sables ; (c) *end- ou push-dumping design* ; (d) barrière capillaire de sables inclinée (Tiré de Aubertin et al., 2002b).

dans des régions des haldes généralement épargnées par les écoulements et les mouvements de gaz, soit souvent au centre du dépôt, mais aussi de réaliser des zones d'écoulements ou de rétention d'eau comme CCE par la sélection de matériaux non sulfureux respectivement grossiers ou fins [20, 44, 67, 69].

L'apparition de mécanismes de granoclassement dans les opérations de restauration a tendance à créer des réseaux ou des conduites localisées d'écoulements privilégiés, de par la distribution hétérogène des matériaux, capables d'influencer consécutivement les profils hydrogéologiques initiaux des haldes [15, 16, 20, 42–44, 55, 72, 73].

2.1.5 Stabilité mécanique des ouvrages

Le transport non désiré de volumes de roches stériles entreposés au terme de la construction d'une halde peut avoir de lourdes conséquences. De tels ouvrages se doivent de démontrer une stabilité à long terme pour assurer la restauration pérenne et sécuritaire des sites [59].

Les exemples d'érosion, d'affaissement, de glissement jusqu'au cas de l'effondrement complet des empilements sont autant de descriptions de dégradations anticipées ou avancées de la structure des dépositions. Les études des voies d'altération de l'intégrité géotechnique des haldes à stériles définissent trois catégories majeures d'instabilités (**fig. 2.8**) [46, 74, 75] :

- Les instabilités superficielles qui représentent les érosions limitées à la surface libre des empilements causées par des phénomènes de tassement ou le ruissellement des eaux, et qui participent généralement à une faible extension horizontale du dépôt ;
- Les instabilités d'assises profondes ou internes qui se traduisent par les ruptures progressives, ou instantanées, de larges volumes du dépôt de pentes raides, ainsi que le développement de phénomènes de liquéfaction par la concentration de pressions interstitielles dans des régions localisées ou stratifiées de forte rétention d'eau des haldes, sont remarquées lors d'épisodes sismiques ou climatiques consécutifs ;
- Les instabilités de fondation attribuées au dépassement de la résistance des matériaux de fondation que les contraintes développées par les constructions sont susceptibles de causer avec ou sans fragilisation mécanique du site d'entreposage.

Les observations rapportent des exemples de dégradations ou de ruptures diverses. Le risque associé au scénario d'instabilité géotechnique d'un empilement de roches stériles est établi selon les dimensions, la géométrie et le poids de l'ouvrage pour déterminer l'ampleur des manifestations physiques d'un effondrement, puis selon les impacts éventuels mesurables portés sur les populations, les écosystèmes et les infrastructures environnantes [34, 49, 62, 74]. Les propriétés des rejets miniers de type roches stériles délimitent les projections de rupture des haldes à des glissements de matériaux sur des distances de plusieurs centaines de mètres de puis. Les prévisions d'exposition fictionnelles dans la situation de l'effondrement d'un ouvrage de restauration sur site pour les zones voisines d'habitation, d'exploitation, ou préservées, sont alors notamment moins prononcées pour le développement d'instabilités dans les haldes à stériles que lors des ruptures de parcs à résidus [34, 61, 76].

Des programmes d'évaluation et des méthodes d'analyse de la stabilité des empilements sont donc développés pour contrôler les risques encourus avec les opérations de constructions. L'utilisation de tels moyens s'étend de l'élaboration des projets d'aménagement aux étapes d'auscultations des ouvrages de restauration [49, 62, 74, 77].

Un exemple de programme d'évaluation des séquences de construction est déjà mentionné (**fig. 2.5**) et donne des recommandations pour la réalisation de dépositions de stériles stables

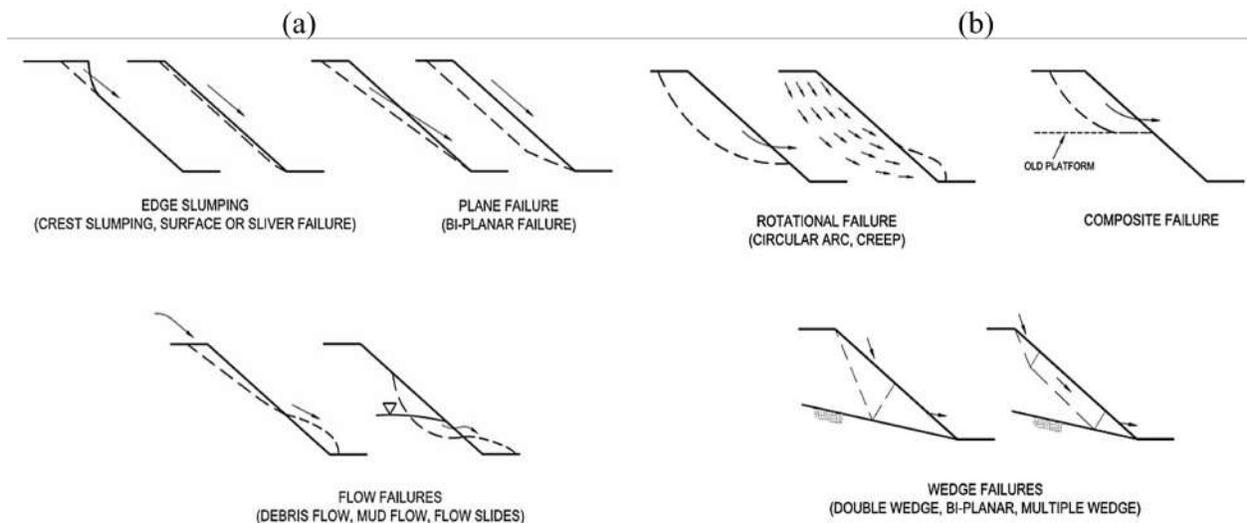


FIGURE 2.8 Illustrations des modes de rupture des dépôts et des empilements de roches stériles : (a) ruptures superficielles ; (b) ruptures profondes (Tiré de Hawley et al., 2017).

ou propose d'estimer le risque d'instabilité repéré pour des régions identifiées des haldes. Les hauteurs et les volumes de matériaux des empilements, le calcul de la capacité portante des fondations, l'estimation des tassements ou encore une prévision de l'intensité sismique du site d'entreposage sont des exemples de facteurs impactant la détermination de l'assurance de stabilité d'un ouvrage avec de similaires solutions d'évaluation [49, 62, 76].

La volonté d'une étude plus spécifique des conditions de stabilité d'un empilement se doit de passer par l'application d'une méthode déterministe pour le calcul d'un indicateur facteur de sécurité FS [74, 76, 78]. La définition générale de FS se base alors sur l'expression de l'angle de la pente des empilements θ et de la résistance des matériaux déposés, exprimée par ϕ' l'angle de friction interne d'un matériau homogène en contraintes effectives, qui sont des facteurs critiques de description de stabilité des haldes à stériles. La proposition la plus simple est une relation dressée pour la description de matériaux de construction secs et non cohésifs auxquels les profils de rupture associés sont généralement superficiels, planaires et parallèles à la surface libre des empilements.

$$FS = \frac{\tan(\phi')}{\tan(\theta)} \quad (2.2)$$

Le calcul donné par **eq. (2.2)** n'est pas valable pour traiter les analyses de stabilité des dépôts hétérogènes, aux géométries de construction sophistiquées, ou aux problèmes de surcharge, pour lesquelles les méthodes de calcul à la rupture sont développées. Les différents modèles

de calcul du FS considèrent le principe de l'équilibre limite qui envisage le glissement ou le détachement d'une surface des dépositions de géométrie donnée [78–80]. Le FS est défini par rapport aux conditions d'équilibre statique, qui se résument en général au rapport entre la somme des forces qui induisent la rupture et la somme des forces qui y résistent [79–81]. Les géométries de rupture varient également en fonction des caractéristiques de l'ouvrage et de la nature des instabilités déclarées. Une étude peut imaginer plusieurs modes de rupture comme les glissements et les affaissements superficiels, la formation de plans de glissement de forme circulaire, plane ou incurvée, et les glissements progressifs avec écoulement de matériaux (figs. 2.8 et 2.9) [74–77].

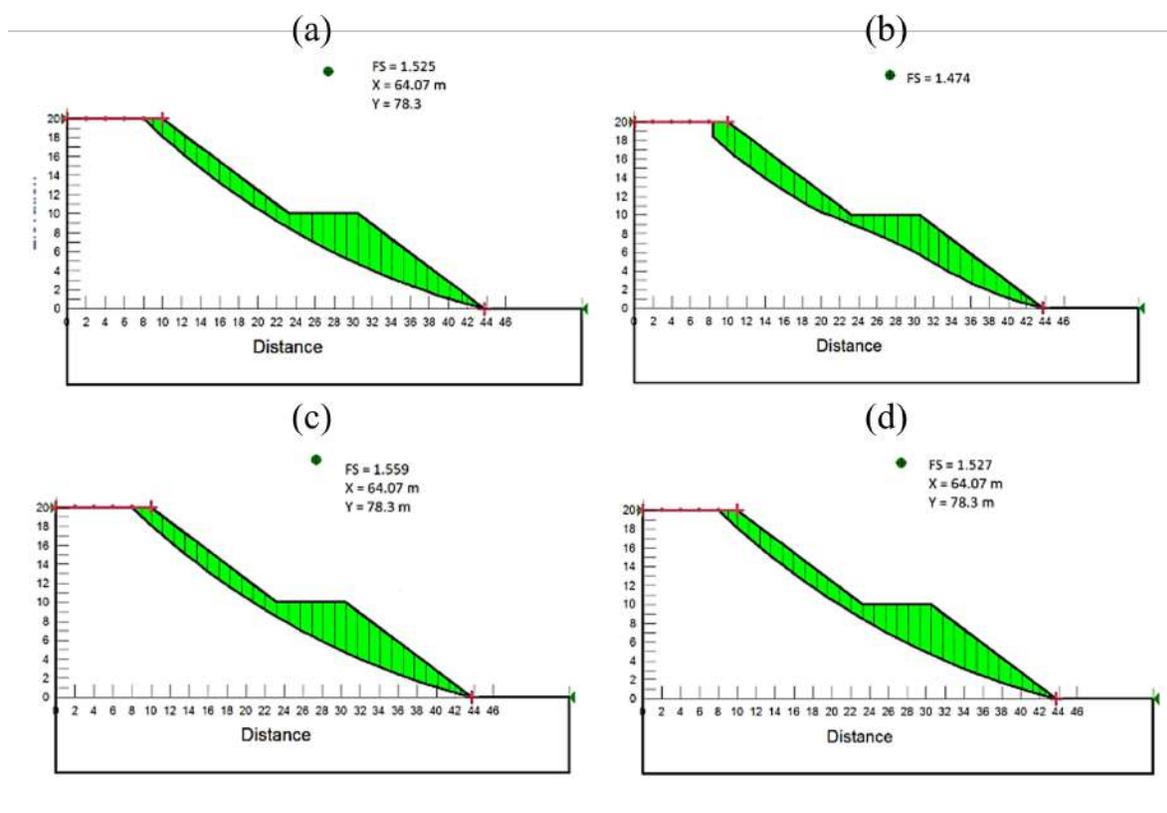


FIGURE 2.9 Déterminations par analyse numérique, selon différentes méthodes, de centres de rotation de surfaces de glissement pour un scénario de rupture d'empilements. (a) méthode de Morgenstern-Price ; (b) analyse des contraintes par méthode aux éléments finis optimisée ; (c) analyses de contraintes par méthode aux éléments finis ; (d) méthode de Bishop simplifiée (Tiré de Maknoon et al., 2016).

Les seuils de FS déterminés pour assurer la stabilité de l'ouvrage dépendent de la qualité des matériaux, des caractéristiques de l'ouvrage et des projets de restauration envisagés pour le site d'exploitation considéré. Les conceptions des haldes à stériles existantes exposent des

valeurs de FS situées dans un intervalle de 1.1 à 1.5 au terme des opérations [49, 62, 74, 82]. Les modélisations numériques continues se sont montrées adaptées à l’application des méthodes de calcul développées, leur utilisation est récurrente.

2.2 Flots et écoulements granulaires à surface libre

De nombreuses observations naturelles sont rassemblées sous la dénomination d’écoulements granulaires qu’il s’agisse d’avalanches, de glissements de terrain ou plus généralement de phénomènes de transport, voire de procédés industriels. L’étude des écoulements des matériaux est populaire et de fait soutenue puisque sa progression se traduit dans un large horizon de domaines d’application susceptible de concerner les exploitations minières comme la pharmaceutique. Les écoulements granulaires qui font l’objet de l’étude présentée sont régulièrement désignés comme des écoulements “denses”. L’un des enjeux principaux qui justifient notamment l’intérêt porté aux flots granulaires est la capacité des matériaux considérés à s’organiser ou se mélanger au cours de leur transport [3, 83–86]. Les mécanismes de granoclassement peuvent donc être particulièrement mis en œuvre dans la déposition des roches stériles.

2.2.1 Cellules d’essai pour la reproduction d’écoulements

Description des appareils de déposition

Les observations d’écoulements granulaires sur le terrain ont inspiré plusieurs modèles d’expériences pour approfondir leur compréhension [87, 88]. Des essais physiques, ou réels, à différentes échelles ont donc été développés pour pouvoir étudier les mécanismes mis en jeu au cours du transport des matériaux (**figs. 2.10 et 2.13.a**). Les études des phénomènes de granoclassement considèrent particulièrement la déposition de matériaux bidisperses de deux populations de grains aux diamètres distincts (fins d_s , larges d_L) liés par l’expression d’un rapport des tailles $R = d_L/d_s$.

L’objectif des environnements de test imaginés est alors de soumettre des systèmes granulaires choisis à diverses sollicitations pour en détailler le comportement. Deux géométries d’essais sont considérées et majoritairement utilisées, car elles se sont démontrées adaptées à l’analyse des écoulements en représentant une section adimensionnelle d’un écoulement naturel (**fig. 2.11**) [17, 18, 89] :

- Les **tambours rotationnels** (**fig. 2.11.b**) ;

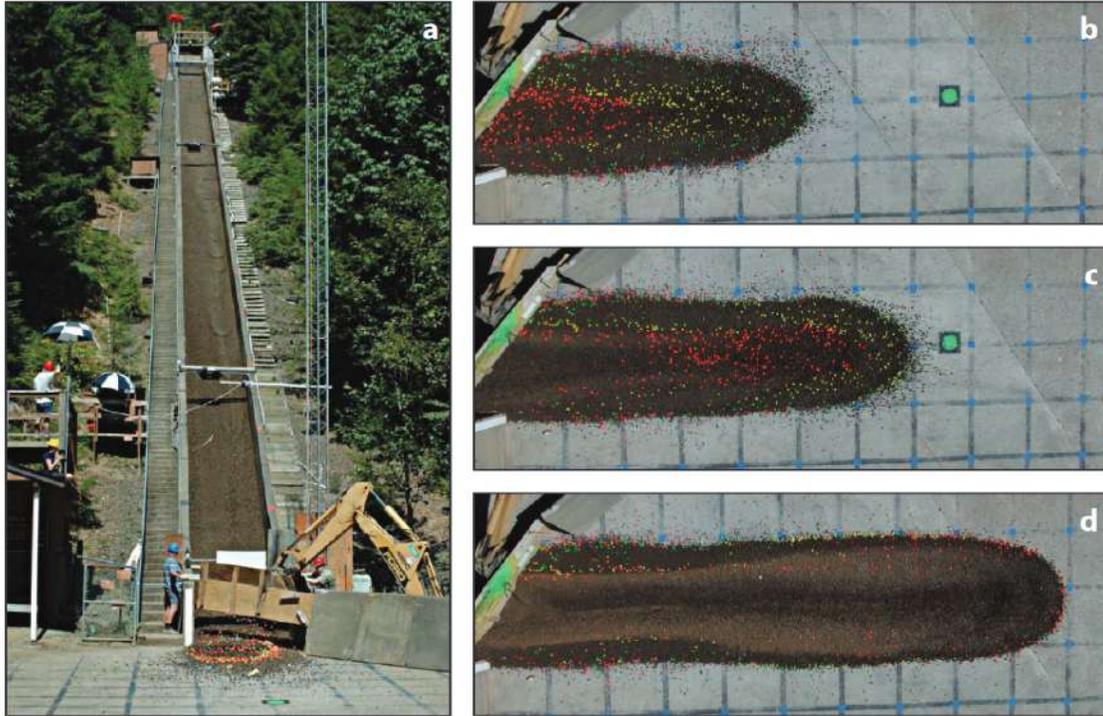


FIGURE 2.10 Photographies de la réalisation d'un essai physique d'écoulement de débris granulaires (a-d) composés de sables, de roches arrondies colorées de 32mm , et d'eau, sur le canal incliné de 82m du groupe U.S. Geological Survey (Tiré de Johnson et al., 2012).

- Les **cellules de dépôt** (fig. 2.11.a, c et d) (ou appelées cellules de Hele-Shaw) dont les dimensions sont : L longueur, H hauteur et D épaisseur ou largeur.

Toutes les configurations existantes sont des environnements dits “quasi-2D” ou “étroits”, soit des appareils de test qui reproduisent les flots granulaires en limitant physiquement leur développement latéral (selon D). L'écoulement simulé est donc cloisonné et libre de se développer dans les directions du flot principal et de la profondeur de l'appareil.

Les deux premiers essais (a, b) mesurent des vitesses d'écoulement variables et sont destinés à l'étude des schémas de granoclassement dans les assemblages granulaires. Les deux autres types de cellules de dépôt (c, d) analysent des écoulements à vitesse constante et sont réservés à l'étude de la cinématique des flots granulaires. La configuration (a) est enfin la seule à avoir une surface libre de dépôt non fixée, car les essais qui en font l'usage progressent avec le remplissage de la cellule.

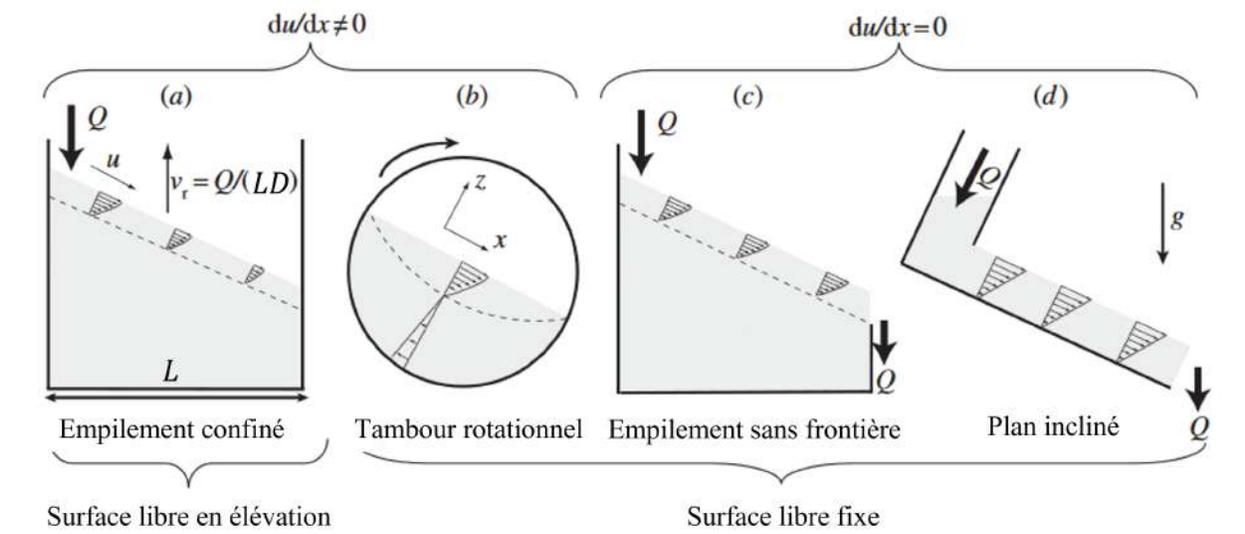


FIGURE 2.11 Illustrations de quatre configurations d'étude des écoulements granulaires à surface libre dans des environnements de géométrie en quasi deux dimensions. (a) empilement confiné (b) tambour rotationnel; (c) empilement sans frontière; (d) plan incliné. Q représente un débit de déposition volumique, v_r est la vitesse d'élévation des constructions granulaires, g est l'accélération de la pesanteur, et u est la vitesse de l'écoulement dans sa direction principale (Tiré de Fan et al., 2017).

Caractérisation des régimes d'écoulement

La première distinction dans la caractérisation des expériences de reproduction des écoulements granulaires est la définition du régime d'écoulement associé à l'essai considéré. La détermination d'un régime d'écoulement permet de décrire l'agitation du flot granulaire reproduit dont le comportement peut varier en fonction de la dynamique du système.

L'utilisation des modèles de tambours rotationnels est développée et la détermination des régimes d'écoulement reproduits s'appuie sur la définition d'un nombre adimensionnel de Froude $F_\omega = \frac{\omega^2 r_t}{g}$, fonction de la vitesse angulaire du tambour ω , du rayon de l'appareil r_t et de l'accélération de la pesanteur g [90–92]. Il existe également une écriture du nombre de Froude capable de caractériser les régimes d'écoulement dans les cellules de déposition $F_u = \frac{u}{\sqrt{g\delta}}$, fonction de la vitesse du flot u dans sa direction principale et δ la hauteur du flot, mais son emploi n'est pas systématique [93]. Une distinction qualitative est encore majoritairement retenue comme méthode approchée de la caractérisation des écoulements divisés en deux catégories (fig. 2.12) [17] :

- Les écoulements “discrets” (a) sont des écoulements qui laissent des avalanches intermittentes se développer à la surface libre de la déposition. Le déclenchement des

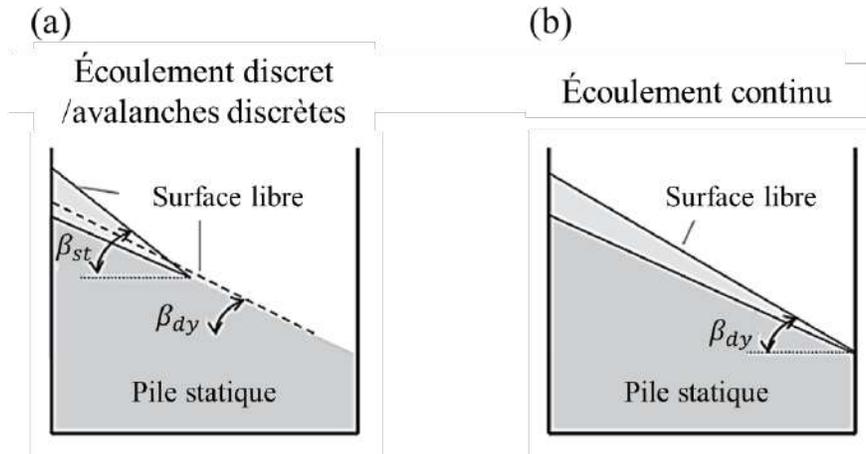


FIGURE 2.12 Représentations des deux régimes d'écoulement définis pour caractériser les dépositions granulaires dans des cellules bornées : (a) régime discret ou d'avalanches discrètes ; (b) écoulement continu. De gauche à droite, le débit d'injection (Q , q , f) augmente. La partie sous-jacente de l'empilement statique est dessinée dans une teinte foncée ; le matériau coloré gris clair est en mouvement à la surface libre de la pile (Tiré de Fan et al., 2017).

avalanches est précédé de l'exposition de deux angles de repos à la surface du dépôt β_{st} et β_{dy} respectivement les angles de repos statique et dynamique de l'empilement. Les écoulements discrets sont observés pour de faibles débits volumiques Q , surfaciques q ou massiques f (soit la déposition d'une masse d'échantillon m_{ech} sur un intervalle de temps t).

- L'augmentation de Q cause le développement d'écoulements “**continus**” (b) qui démontrent un flot ininterrompu à la surface libre du dépôt dont l'angle de repos est similaire à β_{dy} . Des régimes extrêmes d'écoulement continus sont atteints pour d'importantes valeurs de Q et le schéma de la pente est susceptible de changer pour prendre un profil convexe.

Il est important de distinguer les régimes d'écoulement dépendamment de l'appareil utilisé pour l'étude des flots granulaires et de connaître leur évolution selon le choix des différents paramètres de caractérisation d'essai - ω , r_t ou encore Q - afin de contrôler les expériences et la reproduction des phénomènes [17]. La suite du travail présenté ne retient que les résultats obtenus pour les études réalisées dans les cellules quasi-2D afin de conserver des représentations simulant la déposition d'empilements.

Contrôles des essais de déposition dans les cellules étroites

La définition des paramètres physiques de déposition est une étape nécessaire à la préparation d'expériences de reproduction d'écoulements granulaires, et notamment pour la caractérisation du régime d'écoulement recréé. Le **tableau 2.2** dresse l'ensemble des paramètres contrôlables ou calculables depuis un banc d'essai [94].

TABLEAU 2.2 Définitions et descriptions des paramètres de contrôle des dépositions.

PARAMÈTRE	DESCRIPTION	TYPE
L, H, D	Longueur, hauteur et largeur de cellule	contrôlé
d_s, d_L	Diamètre d'une particule fine, grossière	contrôlé
m_{ech}	Masse de mélange déposé	contrôlé
ρ	Masse volumique sèche de matériau	contrôlé
t	Temps de déposition	contrôlé
$f = m_{ech}/t$	Débit massique de déposition	contrôlé
$Q = f/(0.6\rho)$	Débit volumique de déposition (3D)	contrôlé
$R = d_L/d_s = 1/s_r$	Rapport des tailles de particules	contrôlé
$q = Q/D$	Débit surfacique de déposition (2D)	calculé
$v_r = q/L$	Vitesse d'élévation de la déposition	calculé

Les mêmes grandeurs et notations sont régulièrement utilisées dans la suite du document pour interpréter les travaux de la littérature et définir les intervalles d'études des essais physiques, ou simulations numériques, de déposition de matériaux granulaires.

2.2.2 Cinématique des écoulements

L'approche de l'étude des écoulements granulaires débute avec l'utilisation de géométries de cellules étroites adaptées à la simulation de flots denses à vitesse constante sur des plans inclinés (**figs. 2.11. c et d**) dans le but de reproduire les observations naturelles [3, 83, 87]. De tels environnements de déposition permettent de générer un flot continu sur une surface fixe et donc d'étudier la cinématique des écoulements. Les expériences réalisées avec les mêmes dispositifs sont aussi les premières à reproduire dans des conditions de laboratoire les phénomènes de ségrégation initiés par le transport des matériaux et l'exposition des différences de propriétés des particules constituant les mélanges déposés.

Ségrégation cinétique et circulation granulaire dans les écoulements

Les premiers développements de reproduction d'écoulements granulaires sont réalisés avec des bancs d'essai similaires à celui présenté **fig. 2.13**. Leur utilisation permet de mettre à

jour deux comportements particuliers des écoulements granulaires que sont la ségrégation cinétique et l'exposition de chemins de circulation des particules dans les flots.

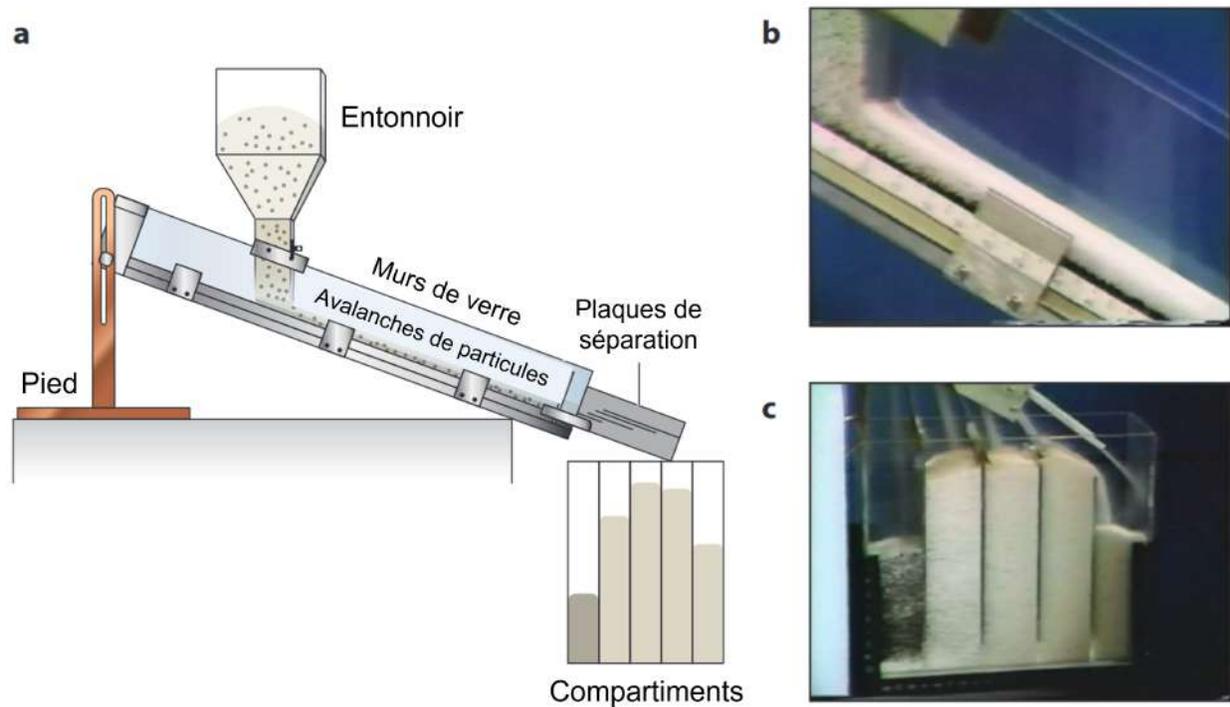


FIGURE 2.13 Représentation schématique de l'essai physique original de Savage & Lun's (1988) de démonstration de ségrégation dans un écoulement granulaire (a). (b) Photographie de larges grains blancs et de fines particules noires au sortir de l'entonnoir, soit à l'initiation de leur déversement ; (c) compartiments de réception séparant les grains au terme de la chute (Tiré de Gray, 2018).

Le phénomène de ségrégation cinétique décrit l'organisation spatiale particulière des grains d'un échantillon lorsque soumis à une sollicitation de type transport [4, 18, 95]. Un écoulement granulaire constitue donc un moyen de ségrégation cinétique qui voit les particules du mélange transporté se diviser au sein du flot sur la base de leurs différences de tailles. Un mélange initialement homogène soumis à une sollicitation résultant en une ségrégation cinétique voit ses grains les plus larges gagner la surface libre de l'échantillon où les vitesses de transport des particules sont les plus élevées. Les plus fines particules du système granulaire se concentrent alors progressivement dans ses régions inférieures, à la base lente de l'écoulement. La ségrégation cinétique est donc responsable d'un classement inverse (*inverse grading*). Le même phénomène de granoclassement est clairement démontré par le transport simple d'échantillons bidisperses composés de deux populations de grains de diamètres moyens différents.

Les écoulements reproduits dans les cellules sont également le lieu d'une circulation particulière des grains au front. Les flots granulaires ne présentent pas constamment des fronts uniformes et des instabilités sont susceptibles de se développer en exposant des géométries particulières séparant l'écoulement en lobes d'allongement ou creux de retrait (*granular fingering*). De telles formations sont terminées par des concentrations importantes de grains grossiers (**fig. 2.14.a**) [5, 93, 96, 97]. La propagation latérale de chaque lobe de l'écoulement démontre aussi régulièrement une dispersion des plus larges particules à l'extrémité du flot, après qu'il soit arrivé à son terme. Une partie des grains grossiers est consécutivement retrouvée dans des régions qui forment des levées remarquables sur le périmètre de la déposition (*levee-formation*) (**fig. 2.14**) [87, 88].

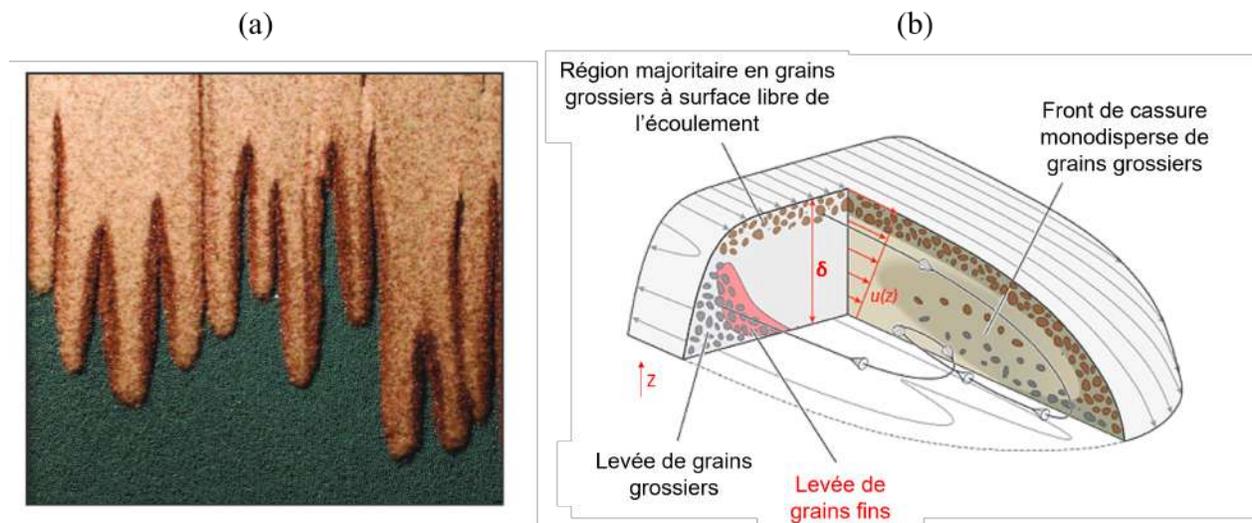


FIGURE 2.14 Photographie de la création de doigts et de cassures au front d'un écoulement granulaire d'un mélange bidisperse composé de grains bruns anguleux et de plus petits grains blancs arrondis (Tiré de Baker et al. 2016a) (a). (b) Représentation schématique d'un élément unitaire d'écoulement granulaire montrant la procédure de levée des larges particules (Tiré de Johnson, 2012).

Détails des mécanismes de ségrégation dans les écoulements

La nature des sollicitations à laquelle les mélanges sont exposés, ainsi que les différences des propriétés intrinsèques des grains qui les composent, expliquent les observations des phénomènes développés dans le transport des matériaux granulaires. Les mécanismes de granoclassement sont principalement initiés par les disparités des tailles, des formes, ou encore des densités des particules.

La ségrégation cinétique est un mécanisme de granoclassement gravitaire qui se décrit comme la combinaison de deux sous-mécanismes distincts de percolation et d'expulsion (fig. 2.15) [98–102]. Le phénomène de percolation désigne la propension des grains de plus petits diamètres à chuter dans les vides générés par le transport du matériau. Le mécanisme d'expulsion ou de flottabilité (*buoyancy or squeeze expulsion*) explique l'inclinaison des grains larges à se hisser dans les régions élevées de l'écoulement à mesure que des espaces s'ouvrent à la surface libre du système [103–105]. Le développement de la percolation et de l'expulsion des grains dans une section de l'écoulement dépend largement des concentrations locales des grains de tailles considérées petites ou larges [98, 99, 106]. Les deux mécanismes sont asymétriques : la percolation d'un petit grain se fait plus rapidement dans un environnement local où la concentration de particules larges est importante alors qu'un grain grossier est expulsé plus aisément dans un environnement local où la concentration de particules fines est faible. L'introduction

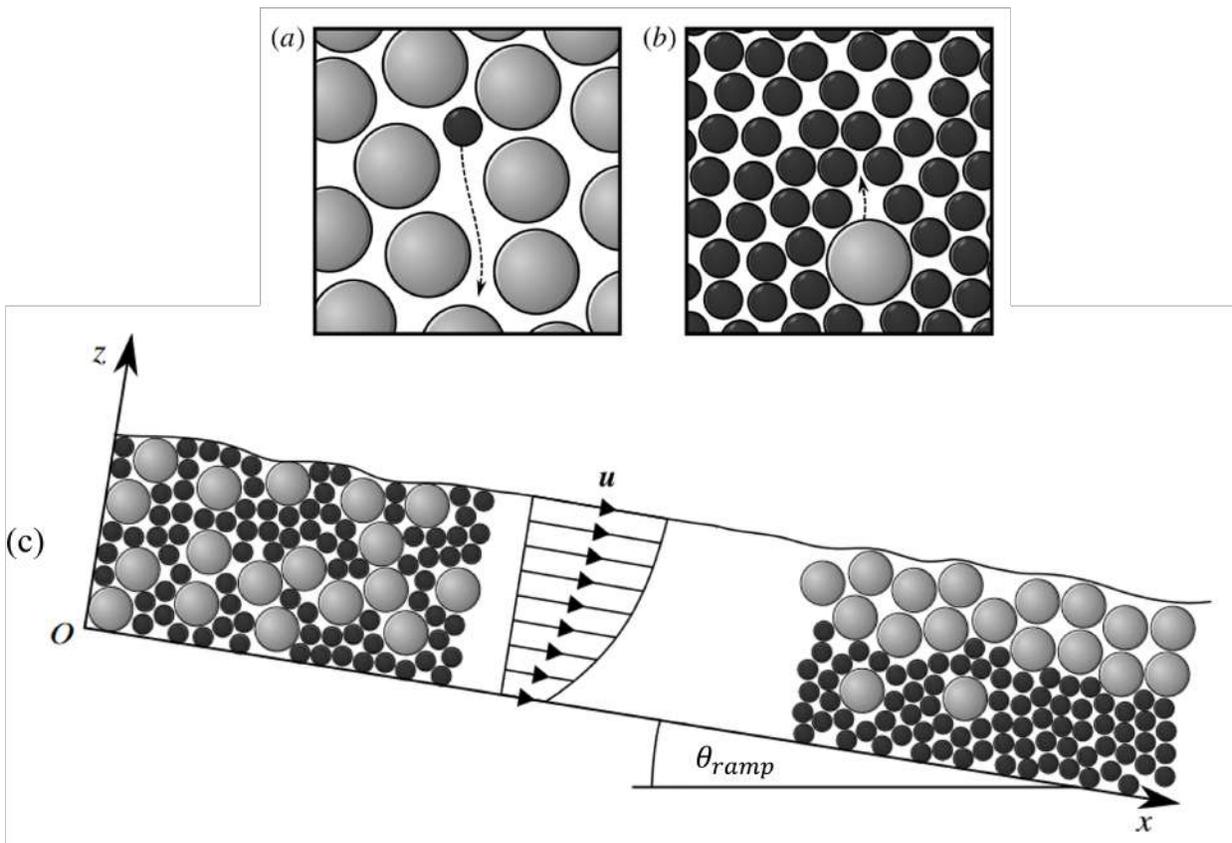


FIGURE 2.15 Illustrations des mécanismes d'expulsion ou de flottabilité (a) et de percolation (b) au sein d'un écoulement granulaire. (c) Représentation schématique du phénomène de ségrégation cinétique le long d'un plan incliné (Tiré de Gajjar et al., 2014).

de différences des densités ou des formes entre les espèces de particules des échantillons consi-

dérés ont des effets mineurs et ne s'opposent pas à la réalisation de la ségrégation gravitaire. De telles disparités jouent davantage sur la cinématique du phénomène [4, 18, 107].

Les mouvements observés dans la direction, ou au front de l'écoulement, et la séparation des flots sont des mécanismes combinés de la ségrégation cinétique, de la distribution des vitesses des particules et de leurs capacités de roulement [5, 93, 95]. L'accumulation des particules grossières au front du flot est expliquée par la vitesse supérieure qu'elles acquièrent au sommet de l'écoulement après la réalisation de la ségrégation gravitaire. Les grains larges sont transportés plus rapidement et s'accumulent donc au-devant du flot pour former une région monodisperse de l'écoulement opposée au corps principal ségrégué (*breaking size-segregation wave*) (**fig. 2.14.b**). La limite entre le flot bidisperse et le front monodisperse devient alors le lieu de la recirculation des différentes tailles de grains à l'arrière de l'écoulement, pour le laisser se prolonger [95, 97]. Le transport ralentit ultimement qu'il soit limité géométriquement, pas assez alimenté, ou suite à l'exposition d'un comportement frictionnel prononcé des particules. Les larges particules du front sont déportées sur le pourtour de l'écoulement par le flot résiduel des grains fins. La cassure du front uniforme de l'écoulement en lobes est éventuellement observée pour l'écoulement de matériaux dont les grains larges ont une capacité de roulement limitée, en raison de leur densité ou de leur angularité, qui cause l'immobilisation d'une partie du flot lorsque le transport perd en énergie [93, 96].

2.2.3 Schémas de granoclassement au sein des constructions

Un autre intérêt de l'étude des écoulements granulaires concerne le développement de phénomènes de granoclassement dans des empilements [3, 7, 46]. La reproduction de dépôts complets comme la section d'une pile conique nécessite alors l'utilisation d'une géométrie de cellule entière (**fig. 2.11.a**). Les déchargements de matériaux recréés dans de tels environnements causent la répétition de flots granulaires à la surface libre de la construction en constante élévation et permettent l'observation de plusieurs phases de remplissage (**fig. 2.16**). Les réalisations d'essais de déposition dans les cellules étroites considérées démontrent l'apparition conditionnelle de schémas complets de granoclassement dans les empilements granulaires dépendamment de la cinématique du déchargement et des propriétés des matériaux [17, 89].

Configurations de granoclassement

Les études des développements de schémas de granoclassement dans les empilements ont recours à la déposition de matériaux bidisperses présentant des disparités de tailles adaptées à la mise en évidence des mécanismes de ségrégation. Les observations consécutivement rapportées pour l'exposition des schémas de construction sont divisées en trois résultats principaux

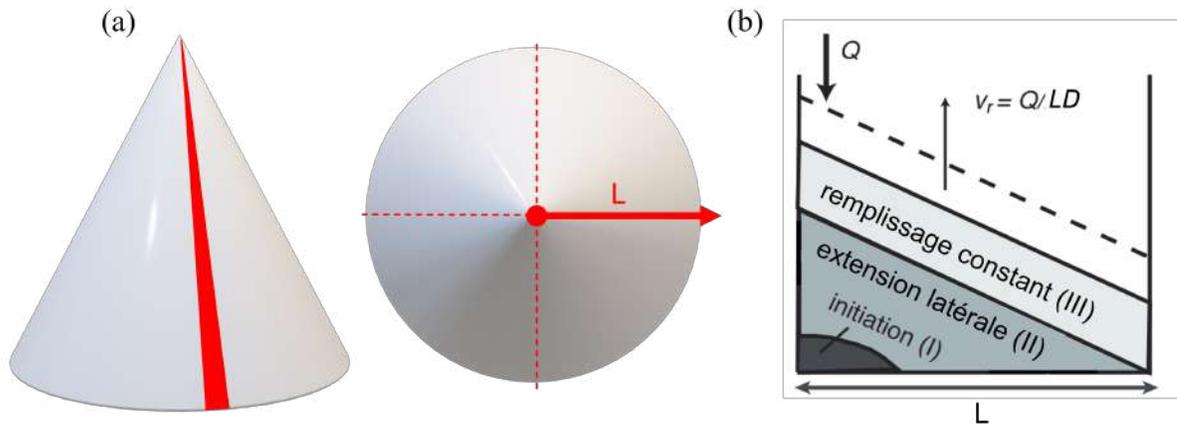


FIGURE 2.16 Schémas de la division d'une tranche d'un dépôt conique selon le rayon de sa base. Une flèche rouge indique la direction de développement de la déposition d'un empilement granulaire vue de dessus (de longueur L) (a). (b) Schéma d'une vue de côté décrivant trois stades définis de la construction d'un empilement confiné : (I) initiation, (II) extension latérale et (III) remplissage constant (Tiré de Fan et al., 2012).

que sont les dépôts stratifiés, ségrégués ou mélangés (**fig. 2.17**) [17, 94, 108].



FIGURE 2.17 Photographies des trois configurations définies de schémas d'empilements obtenables après la réalisation d'un essai réel de déposition d'échantillons granulaires bidisperses : (a) état stratifié ; (b) état ségrégué ; (c) état mélangé. L'échantillon bidisperse déversé est composé de larges grains sphériques bleus et de fines particules sphériques rouges (Tiré de Fan et al., 2012).

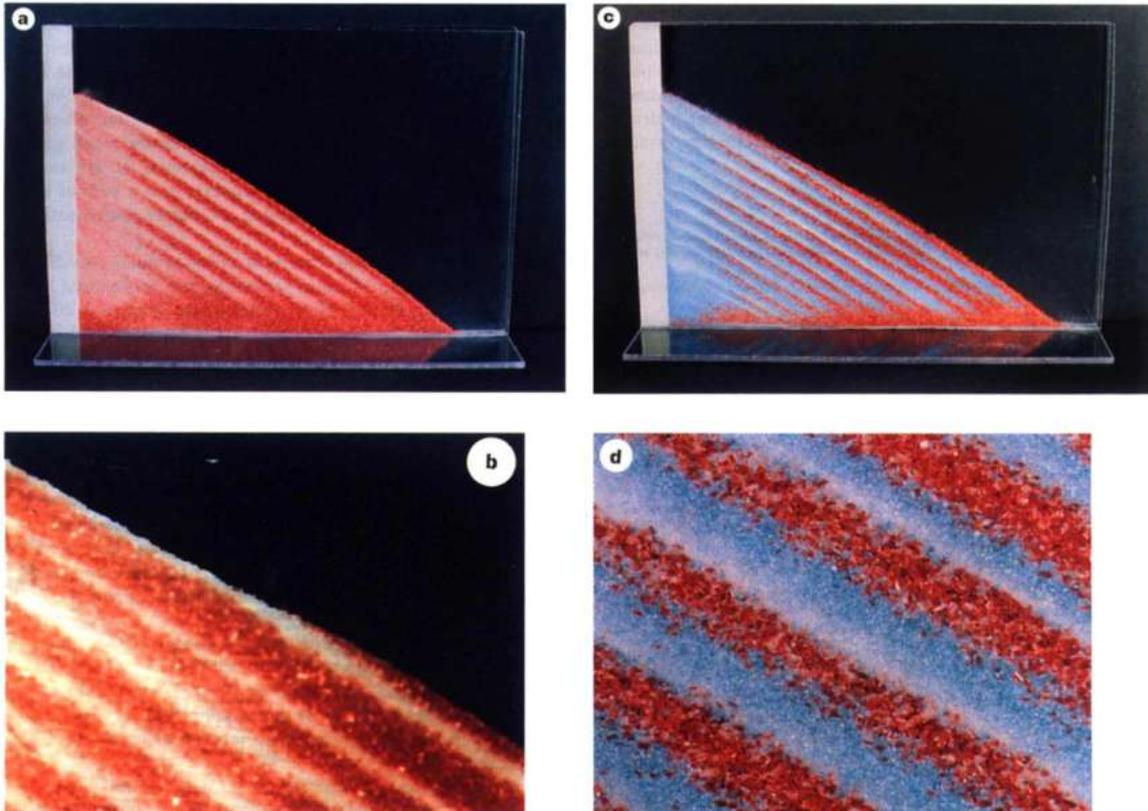


FIGURE 2.18 Photographies des premiers résultats des travaux expérimentaux de Makse. Résultat typique des premières séries d'essais montrant la formation successive de bandes de grains grossiers et fins (les particules blanches sont des billes de verres de diamètre moyen $d_s = 0.27mm$, les grains les plus larges sont des cristaux de sucre rouges de $d_L = 0.8mm$) (a); (b) photographie rapprochée. (c) Schéma d'empilement stratifié obtenu avec la déposition d'un mélange polydisperse de trois types de grains : billes de verres sphériques ($\langle d \rangle = 0.15mm$, $\beta = 26^\circ$), sable bleu ($\langle d \rangle = 0.4mm$, $\beta = 35^\circ$) et cristaux de sucre rouges ($\langle d \rangle = 0.8mm$, $\beta = 39^\circ$); (d) photographie rapprochée (Tiré de Makse et al., 1997a).

Le développement de schémas de stratification cause l'organisation du dépôt granulaire comme une alternance de bandes de grains de petit diamètre et de grains grossiers parallèles à la surface libre de l'empilement (**fig. 2.17.a**). La longueur d'onde d'une paire de couches stratifiées est relativement constante pour un essai dont les paramètres de déposition restent inchangés. Les empilements stratifiés sont le plus souvent observés dans des cellules de déposition dont les dimensions en largeur ne dépassent pas quelques diamètres moyens de particules du mélange déposé [109,110]. L'apparition des bandes peut-être retardée et ne débuter qu'après un remplissage initial de la cellule. L'obtention d'une configuration stratifiée est possible avec la déposition d'un mélange bidisperse avec disparités des tailles; elle est toutefois plus fréquente (ou rendue "plus simple") quand l'échantillon inclut également des

disparités des formes des deux espèces de grains pour créer un matériau constitué de petites particules roulées et de particules grossières anguleuses. L'introduction d'une disparité des densités dans le mélange ne semble pas avoir d'impact sur les observations. Des schémas de stratification sont également susceptibles de se développer avec régularité dans le cas du déchargement de matériaux polydisperses (**fig. 2.18**). La construction d'empilements stratifiés au cours des essais de déposition est décrite dans la littérature comme "spontanée" [8,9,108]. Les dépositions ségréguées divisent les deux espèces de grains de l'échantillon en autant de régions distinctes. Les particules fines occupent la partie haute ou centrale de l'empilement et les particules grossières, le pied de la pile (**fig. 2.17.b**). La déposition d'un mélange bidisperse selon les formes de deux populations de grains de même taille démontre une division spatiale similaire qui voit les particules anguleuses se concentrer dans la partie haute de la construction et les grains plus arrondis dans les régions extérieures du dépôt. Deux angles de repos différents à la surface libre de l'empilement peuvent même se développer et démarquer également l'occupation binaire des volumes du dépôt. Il faut donc considérer deux types de ségrégations potentielles dirigées par les différences de tailles ou de formes dans les mélanges bidisperses (**fig. 2.19**). Une différence de densités entre les espèces de particules n'a pas d'influence sur les observations de tels schémas.

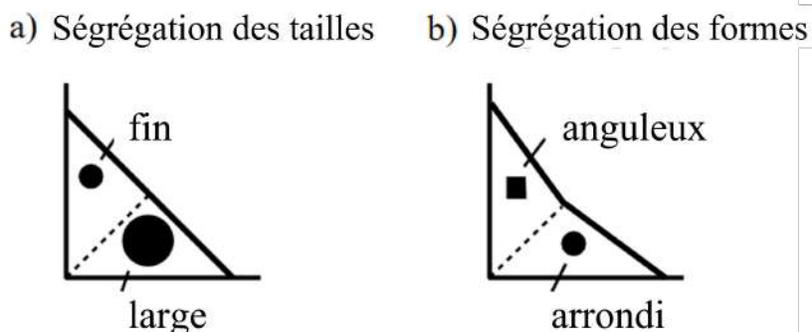


FIGURE 2.19 Schémas illustrant le développement de deux mécanismes quand les populations de grains d'un mélange bidisperse diffèrent en tailles et en formes : (a) ségrégation des tailles : les grains larges ségrèguent au pied de la pile ; (b) ségrégation des formes : les grains arrondis ségrèguent au pied de la pile (Tiré de Makse et al., 1997b).

Les empilements mélangés n'exposent enfin aucun motif de granoclassement particulier. Les concentrations de chaque population de particules composant le mélange polydispersé considéré sont réparties également au travers des constructions (**fig. 2.17.c**).

Le **tableau 2.3** résume l'ensemble des travaux physiques publiés portés à notre connaissance et démontrant le développement de schémas de granoclassement au sein de dépositions de mélanges granulaires [17]. La mention de chaque campagne d'essais est respectivement associée aux dimensions de la cellule de test, à la description des matériaux bi- ou polydispersés utilisés et aux paramètres physiques de contrôle choisis pour réaliser les dépositions.

TABLEAU 2.3 Ensemble de paramètres expérimentaux et observations associées rassemblés d'après des travaux rapportant des essais réels de dépositions de matériaux granulaires polydisperses. Chaque publication mentionnée étudie principalement le déversement de mélanges granulaires bidisperses équiconcentrés en volumes ou masses des espèces de grains (renvoi à **Sec. 2.2.3**). Les configurations des schémas d'empilements sont décrites comme suit : SE, Ségrégué ; MI, Mélangé ; ST, Stratifié. Stade* détermine les progressions relatives des dépositions en référence à la division établie par **fig. 2.16.b**. Adapté et actualisé de Fan et al., 2017.

RÉFÉRENCES	Type de ségrégation	$R = 1/s_r$	L (mm)	D (mm)	$\langle d_L \rangle$ (mm)	$\lfloor D/\langle d_L \rangle \rfloor$	Q (cm ³ /s)	Configuration	Stade*
Williams [85]	Taille	5.2	310	25	3.0	8	-	SE	II
Drahn [98]	Taille	1.3-2.0	430	-	5.0	-	-	SE	III
Shinohara [111]	Taille	14.3	300	30	1.7	17	30-80	SE	II-III
Shinohara [112]	Taille	2.0-15.0	150-180	-	-	-	14-33	SE	III
Thomas [102]	Taille	2.0-50.0	100	Pile conique	3.0	-	27-40	SE	II
Goyal [113]	Taille	1.3-5.0	220	5	1.0	5	-	SE	II
Rahman [114]	Taille	9.2-15.2	150-180	Pile conique	1.6	-	33	SE	III
Lumay [115]	Taille & forme	1.5-7.0	100	15	0.7	21	-	SE & MI	I-II
Jones [116, 117]	Taille & forme	1.0-4.0	610	38	6.0	6	85-100	SE & MI	III
Isner [118]	Taille	1.5-3.0	500	Pile évasée	3.5	≤ 30	65-181	SE & MI	I-III
Fan [94]	Taille	1.3-6.0	220-910	6-25	3.0	2-8	1-420	SE, ST & MI	I-III
Benito [119, 120]	Taille	1.5-3.0	200	10	3.0	3	0.13-0.26	SE & ST	I-II
Makse [8]	Taille & forme	1.7-6.7	300	5-10	0.8	6-12	-	SE & ST	I-II
Gray [95, 108]	Taille & forme	1.47-1.7	370	3	0.5	6	-	SE & ST	I-III
Grasselli [110]	Taille & forme	1.2-10.5	300	1-6	0.8	1-7	0.2-3.5	SE & ST	I-II
Koeppe [121]	Taille & forme	2.0	270	3-24	0.8	3-30	0.5-7.4	ST	I-II
Lecocq [122]	Taille & forme	2.0-10.0	-	2-6	1.0	2-6	2-2.5	ST	III
Shimokawa [123, 124]	Taille & forme	2.0-8.0	600	5	0.8	6	0.08-1.72	ST	I-II
Baxter [9]	Taille	2.0	500	90	1.4	64	6, 736	ST & MI	I-II
<i>Étude</i> (voir Sec. 2.3.5)	Taille & forme	2.0-4.0	500	20	1.0-3.0	6-20	10.4-31.2	ST	I-II

Mécanismes de granoclassement dans les constructions

Les observations des dépositions dans les cellules révèlent les mécanismes amenant aux schémas de granoclassement décrits. Chaque configuration des empilements est la conséquence de régimes de ségrégation différents développés par la répétition d'écoulements à la surface libre de la pile au cours de sa construction (**fig. 2.20**) [17, 94, 108].

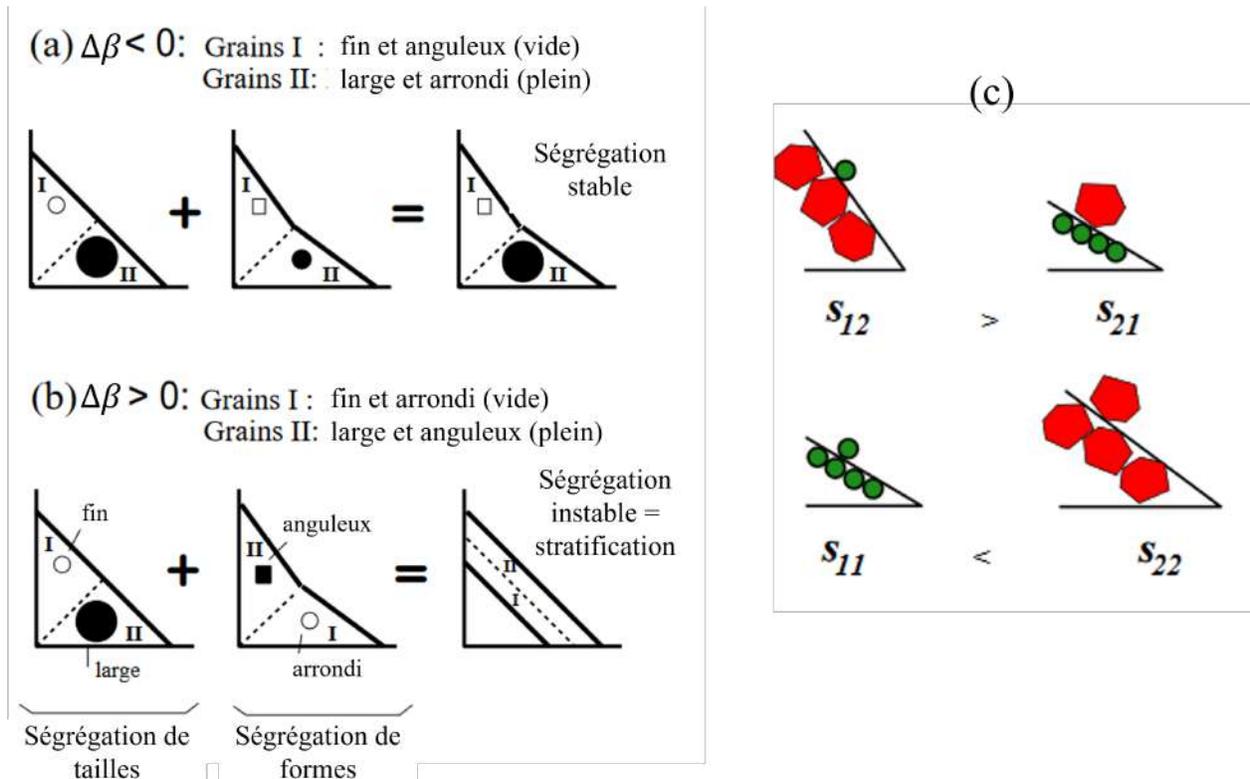


FIGURE 2.20 Schémas illustrant le développement de mécanismes de granoclassement pour des exemples de ségrégation stable (a) ou instable (b) au cours de dépositions (Tiré de Makse et al., 1997b). (c) Expressions des variations d'angles de repos en fonction de la composition de grains à la surface de la pile selon s_{12} qui exprime l'angle de repos observé pour une particule de la population 1 sur une pente composée de particules de la population 2 (Tiré de Makse et al., 1997c).

Les dépôts mélangés sont par exemple obtenus pour des régimes d'écoulement continus soutenus. Aucun motif de granoclassement particulier n'est démontré ce qui témoigne d'une cinématique des flots prépondérante devant le mécanisme de ségrégation cinétique. La division des mélanges bidisperses n'a pas le temps de s'effectuer avant que l'écoulement atteigne le pied de la déposition, ce qui explique l'homogénéité générale des empilements.

Les empilements ségrégés sont le résultat de la répétition de flots granulaires pour lesquels

le flux de ségrégation est assez rapide pour laisser la ségrégation cinétique se réaliser à la surface libre de l'échantillon. Un échantillon bidisperse en termes de tailles voit donc les particules larges atteindre les régions extérieures de la pile du fait de leur inertie. Un mélange bidisperse en termes de formes voit les particules anguleuses résister au roulement quand les grains roulés atteindront le pied de l'empilement (**fig. 2.20.a**). Les dépositions ségréguées sont majoritairement observées pour des régimes d'écoulement continus moyens à faibles.

Les mécanismes de stratification se développent généralement suite à l'exposition de régimes d'écoulement discrets à la condition que les deux populations de grains démontrent des angles de repos différents, tels que celui des particules larges β_L soit supérieur à celui des particules fines β_s ($\Delta\beta = \beta_L - \beta_s = s_{22} - s_{11} > 0$) (**fig. 2.20.b**). Des instabilités se développent en conséquence de la déposition d'un tel matériau puisque les grains larges ségrèguent au pied de la pile avec un angle de repos supérieur à celui des grains de diamètres inférieurs qui se déposent au sommet de la construction, avec une tendance à rouler vers les régions extérieures de l'empilement. Une compétition des ségrégations de tailles et de formes s'exerce alors et un phénomène de "butée" (*kink*), c'est-à-dire une élévation du dépôt des particules larges vers la moitié haute de l'empilement, prend forme (**fig. 2.21**). La rupture consécutive de la butée au terme de sa progression résulte en une avalanche granulaire au cours de laquelle une ségrégation cinétique s'opère pour laisser apparaître l'alternance des couches des grains fins et grossiers [8, 108, 109, 125]. La répétition des écoulements, des instabilités de

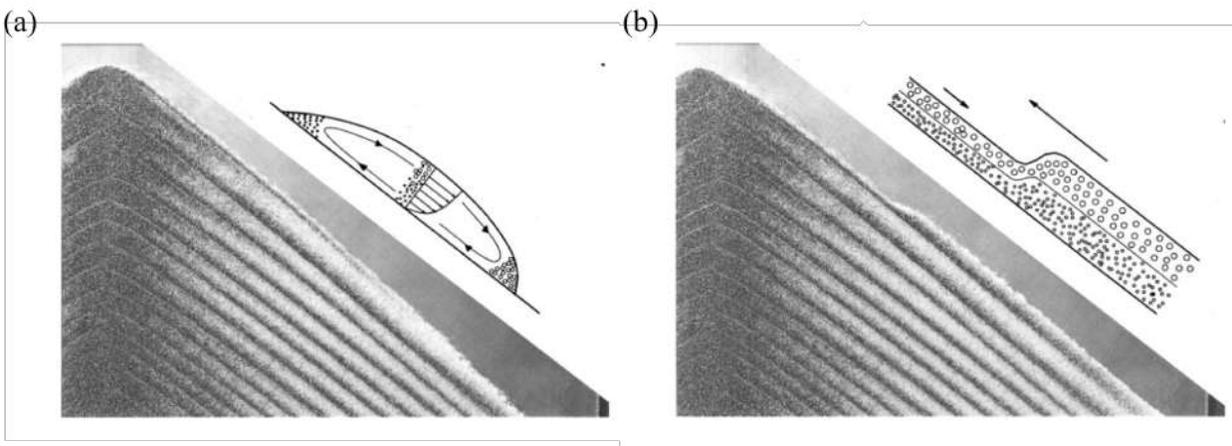


FIGURE 2.21 Photographie et schéma illustrant le profil d'une avalanche granulaire à la surface libre d'un empilement construit par la déposition d'un mélange bidisperse (a). (b) Photographie et schéma illustrant l'élévation consécutive, ou butée, au terme d'une avalanche ou d'un écoulement (Tiré de Gray et al., 1997).

construction et des avalanches résume le développement du schéma de stratification complet (**fig. 2.22**). La traduction de la condition sur les angles de repos des deux espèces de grains

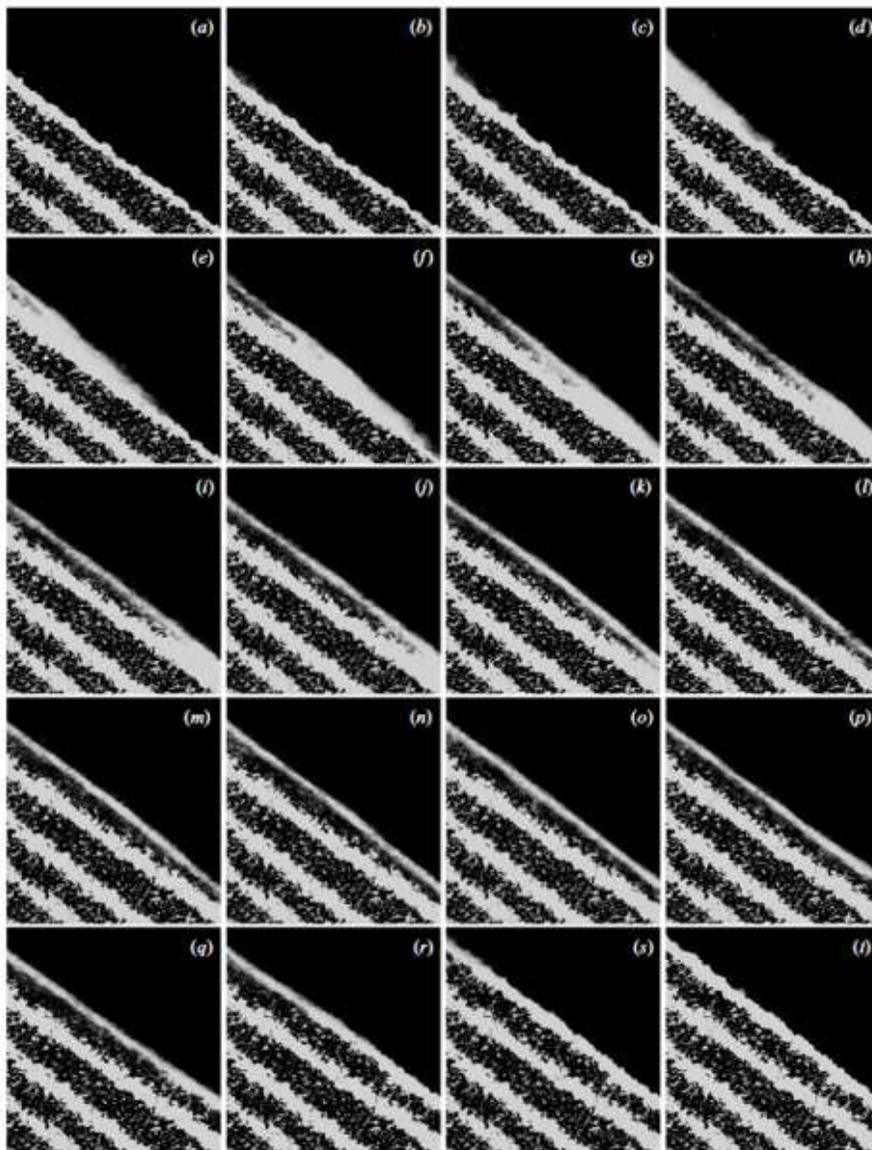


FIGURE 2.22 Séquence de photographies (a)–(t) montrant les détails de la construction d’un schéma d’empilement stratifié avec le déclenchement d’une avalanche à surface libre. L’écoulement prend place entre les deux parois latérales d’une cellule d’essai de largeur $D = 3\text{mm}$. Le mélange déposé est composé de grossiers cristaux de sucre et de plus petites billes de fer (Tiré de Gray et al., 2009).

explique comment l’introduction d’une disparité des formes des particules, pour constituer un matériau de petites particules arrondies et de particules grossières anguleuses, facilite l’observation de l’apparition de bandes stratifiées (fig. 2.20.c) [9].

Facteurs d'influence pour le cas des schémas de stratification

Disparités de tailles - Les empilements stratifiés sont premièrement remarqués lors de la déposition d'échantillons granulaires bidisperses pour lesquels sont mesurées des valeurs élevées du rapport R des diamètres respectifs moyens des grains des deux populations. Des différences de tailles marquées entre les espèces de particules favorisent la réalisation des mécanismes de percolation ou d'expulsion et assurent donc l'accélération de ségrégation cinétique au cours des avalanches qui se déploient sur des longueurs variables à la surface du dépôt. Les travaux de la littérature proposent alors la condition $R \geq 1.5$ (figs. 2.23 et 2.25.c) [110, 121].

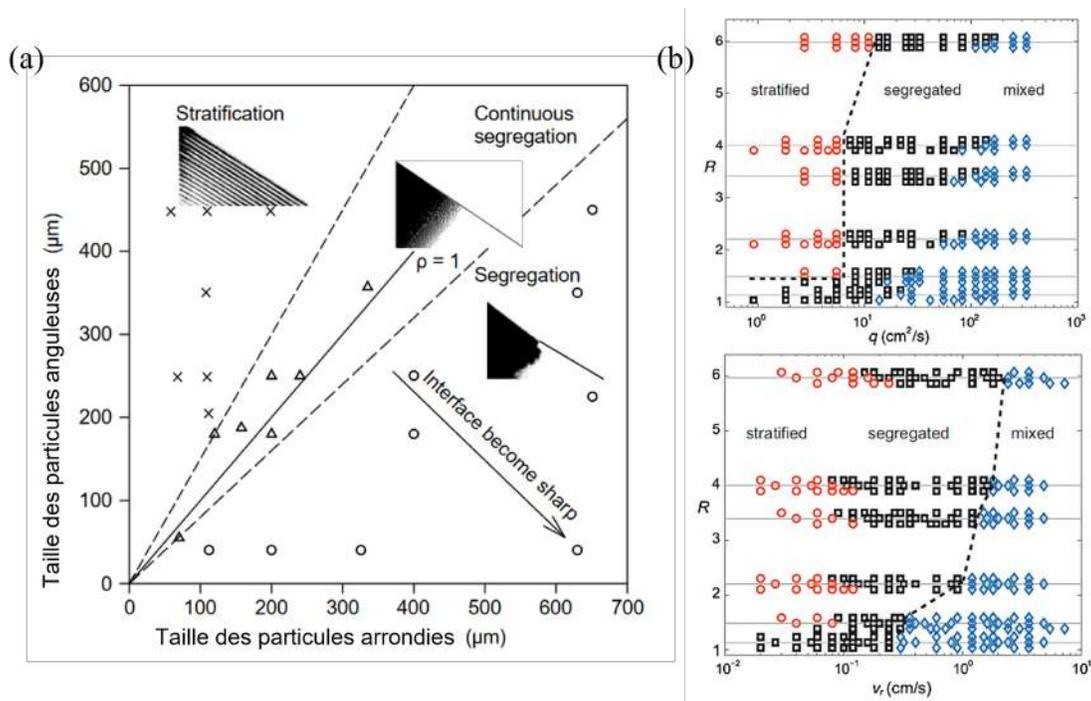


FIGURE 2.23 Diagramme de phase déterminant les schémas d'empilements observés au terme de la déposition de mélanges granulaires bidisperses dans des cellules d'essai ($f = 2.5g/s$ et $D = 3mm$) selon le rapport de tailles $R = 1/s_r$, entre de larges grains de sable anguleux et des billes de verres (Tiré de Grasselli et al., 1998) (a). (b) Diagramme de phase déterminant les schémas d'empilements observés au terme de la déposition de mélanges granulaires bidisperses dans des cellules d'essai (stratification : cercle rouge; ségrégation : carré noir; mélange : losange bleu), en fonction des paramètres q et v_r , selon l'indication du rapport des tailles $R = 1/s_r$ en ordonnées (Tiré de Fan et al., 2012).

Disparités de formes - L'utilisation de mélanges susceptibles d'exposer une disparité de formes marquée est aussi conseillée pour la reproduction de schémas de stratification. L'angularité des particules permet la mesure de $\Delta\beta$ importants nécessaires à la formation des instabilités

au cours de la déposition [8]. La forme irrégulière des grains grossiers est aussi un élément capable de freiner la cinématique de l'écoulement et donc de capturer pour un plus grand intervalle de régimes de déposition les mécanismes d'avalanches intermittents [9, 109]. Les mécanismes de stratification peuvent être obtenus sans les différences de formes entre les grains si la condition $\Delta\beta > 0$ est conservée, mais pour des régimes de déposition discrets seulement (**figs. 2.24 et 2.26**) [9, 119, 120]. Un moyen de contrôler l'apparition des bandes de stratification dans les empilements est donc le contrôle du débit de déposition Q ou f déterminé par l'opérateur des essais (**fig. 2.23.b**).

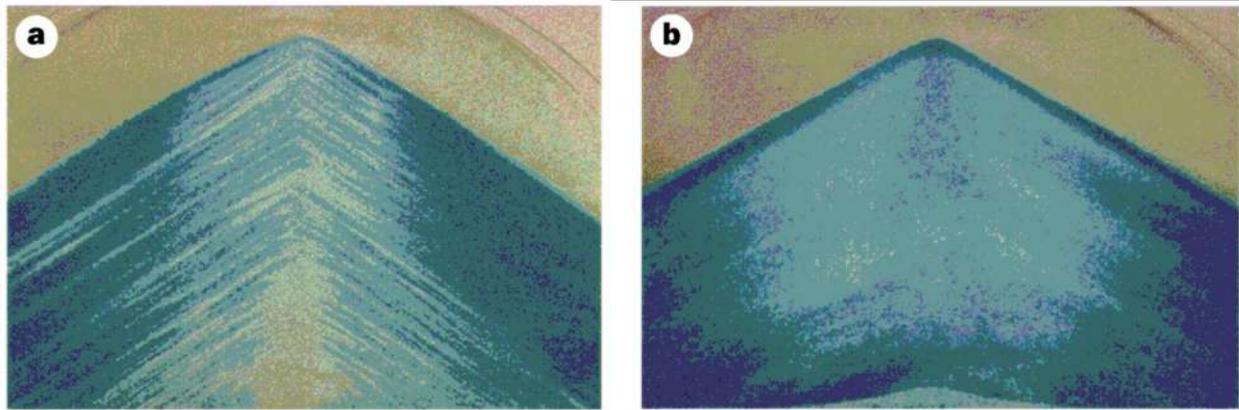


FIGURE 2.24 Photographies des dépositions d'un mélange granulaire bidisperse de grains sphériques ($R = 2, \beta_s = 26.9^\circ, \beta_L = 27.8^\circ$) dans une cellule quasi-2D : (a) empilement stratifié comme résultat d'un faible régime d'injection ($Q = 7g/s$); (b) empilement mélangé comme résultat d'un régime d'injection intense ($Q = 800g/s$) (Tiré de Baxter et al., 1998).

Largeurs des cellules de déposition - Les longueurs d'onde λ des bandes de stratification sont mesurées comme l'épaisseur de deux couches de grains successives. Les mesures de λ sont relativement constantes pour un même essai de déposition, mais leurs évolutions démontrent l'importance de la géométrie de la cellule pour la réalisation des mécanismes de granoclassement. Seules les cellules les plus "étroites", d'après le calcul du rapport $D/\langle d \rangle$, semblent adaptées à la démonstration de schémas de stratification. Des études paramétriques renseignent alors la disparition progressive des bandes de stratification avec l'élargissement de l'environnement de déposition (**fig. 2.25**) [110, 121]. La littérature recommande alors le recours à des cellules dont les dimensions vérifient $D/\langle d \rangle \leq 15$ pour la reproduction des phénomènes de stratification [17].

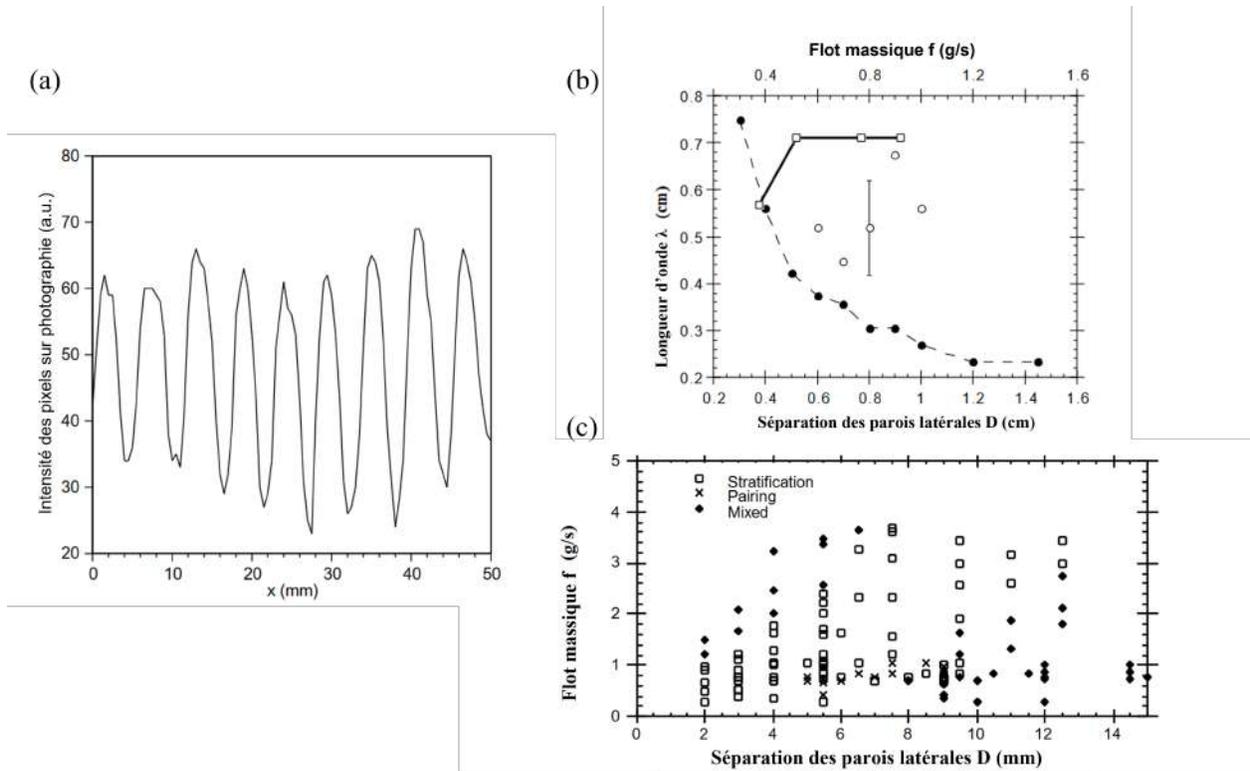


FIGURE 2.25 Mesures d'intensité lumineuse d'après une photographie d'une déposition stratifiée d'un mélange granulaire bidisperse dans une direction perpendiculaire aux bandes de stratification (Tiré de Grasselli et al., 1998) (a). (b) Tracé des mesures de longueurs d'onde de bandes de stratification après l'observation de dépositions stratifiées dans des cellules d'essai vérifiant $D \geq 6\text{mm}$. (c) Diagramme de phase pour la détermination de schémas d'empilements au terme de la déposition de mélanges granulaires bidisperses dans des cellules d'essai de largeur D variable (Tiré de Koepe et al., 1998).

Régimes de déposition - La déposition des échantillons de particules est réalisée au travers de la chute libre des grains dans la cellule. La hauteur d'injection h du matériau est alors capable d'influencer le développement des mécanismes de granoclassement en définissant l'énergie cinétique des particules. Il est observé qu'un flot de déposition avec une forte énergie cinétique peut endommager l'empilement existant au point de déposition ou générer des effets de rebonds des grains susceptibles de modifier les schémas de granoclassement en réinjectant certaines particules dans diverses régions de la pile ou d'un écoulement à la surface libre (fig. 2.26.a et b, 2.27) [98, 119, 120, 126]. Il est remarqué de la même manière qu'un procédé de déposition avec déplacement régulier du point d'injection supprime l'apparition de tout schéma de granoclassement pour les mêmes raisons.

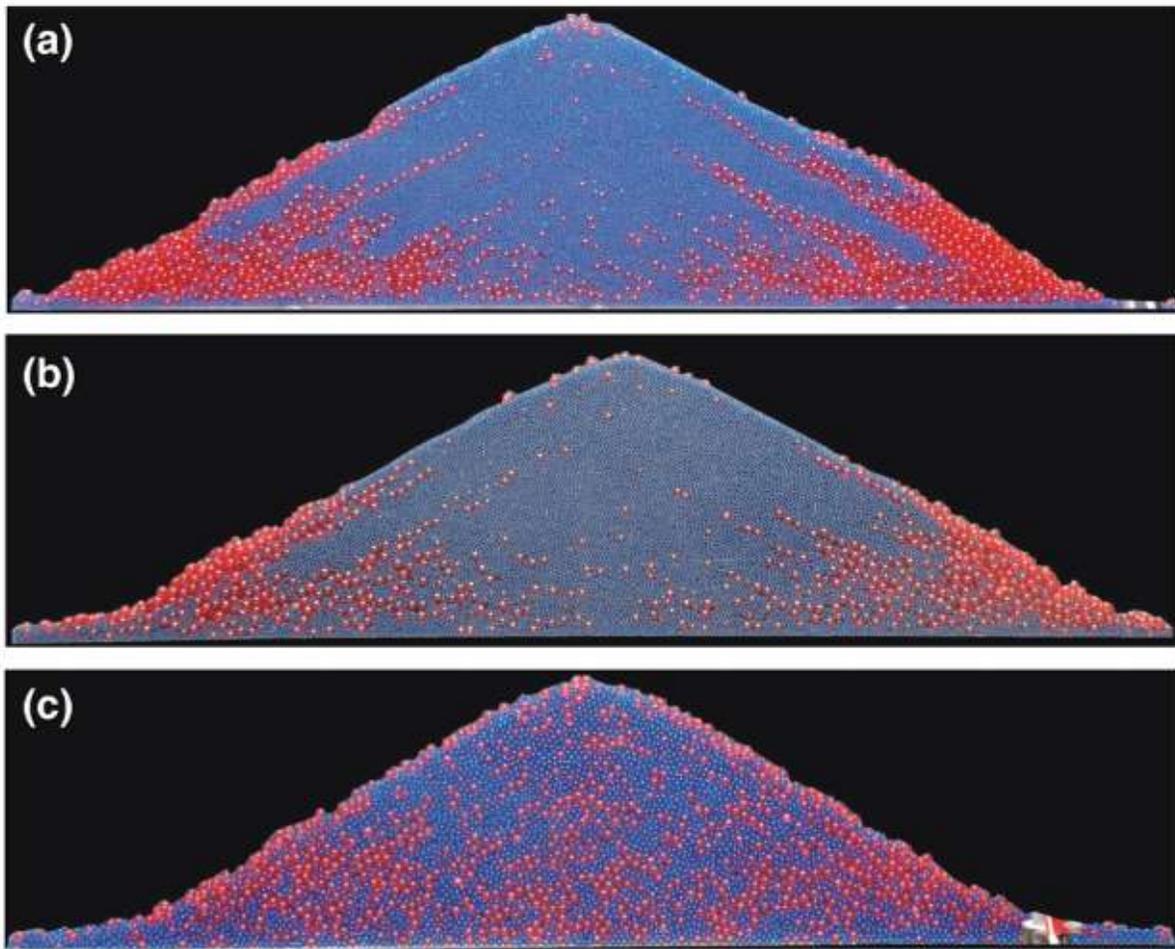


FIGURE 2.26 Photographies numériques des dépositions physiques de mélanges granulaires bidisperses tels que : (a) rapport de tailles $R = 3$, $h = 10mm$ et $m_{LS} = 0.61$; (b) rapport de tailles $R = 3$, $h = 50mm$, et $m_{LS} = 0.60$; (c) rapport de tailles $R = 1.5$, $h = 50mm$, et $m_{LS} = 0.90$ (Tiré de Benito et al., 2013).

Concentrations dans les mélanges - Les concentrations respectives des différentes espèces de grains de l'échantillon polydisperse déposé sont aussi d'importance, car les proportions de mélange définissent en partie la cinématique du phénomène de ségrégation cinétique dont la réalisation potentielle est responsable de la mise en évidence des schémas de granoclassement [99,127]. L'expression des concentrations au sein des mélanges dans la littérature est traduite à l'aide de ratios des masses des espèces ($m_{LS} = m_L/m_s$) (fig. 2.26.b et c, 2.27).

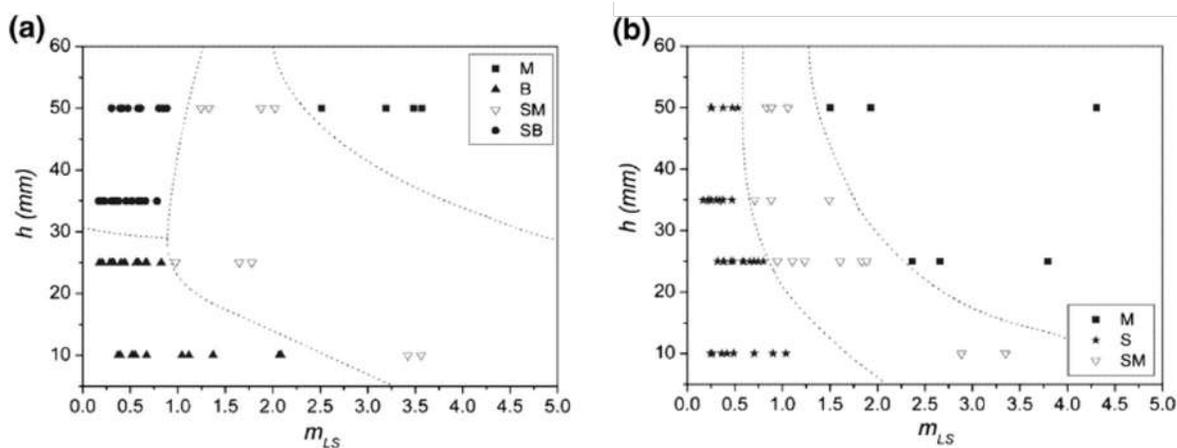


FIGURE 2.27 Diagrammes de phase pour la détermination de schémas d'empilements au terme de la déposition de mélanges granulaires bidisperses dans des cellules d'essai selon le ratio des masses des espèces m_{LS} et de la hauteur d'injection h : (a) rapport de tailles tel que $R = 3$, des lignes séparent différentes configurations d'empilements observées : M, mélange ; B, bandes ou stratification ; SM, ségrégation ; SB, ségrégation-stratification ; (b) rapport de tailles tel que $R = 1.5$, des lignes séparent différentes configurations d'empilements observées : S, ségrégation ; M, mélange ; SM, ségrégation-mélange (Tiré de Benito et al., 2013).

Modélisations des constructions d'empilements

La prédiction des schémas de granoclassement dans les empilements granulaires a consécutivement été approchée par des descriptions mathématiques dynamiques, des modèles continus et l'utilisation d'outils de simulations numériques récents.

Le premier outil de prédiction des configurations des piles granulaires proposé suit la mise en évidence des schémas de stratification dans les cellules d'essai [6, 8, 128–130]. Il s'agit d'un modèle mathématique simple qui simule la déposition de deux géométries de particules pour lesquelles sont exprimées les conditions de roulement respectives afin de représenter la différence d'angles de repos $\Delta\beta$ des deux populations de grains. L'empilement des particules s'effectue dans un quadrillage à plusieurs colonnes qui décrit la condition de roulement de chaque grain comme la différence de hauteur de la pile d'une colonne à l'autre dans la direction de l'écoulement (**fig. 2.28**). La déposition se fait particule après particule et aucune dynamique d'écoulement, de ségrégation gravitaire ou même de collision des grains n'est reproduite. La seule expression de la condition sur $\Delta\beta$ permet pourtant de reproduire des empilements ségrégués ou stratifiés, mais les manquements du modèle empêchent de le considérer comme moyen de prédiction fiable.

Les progrès des techniques de simulation informatisée mettent finalement à disposition d'autres

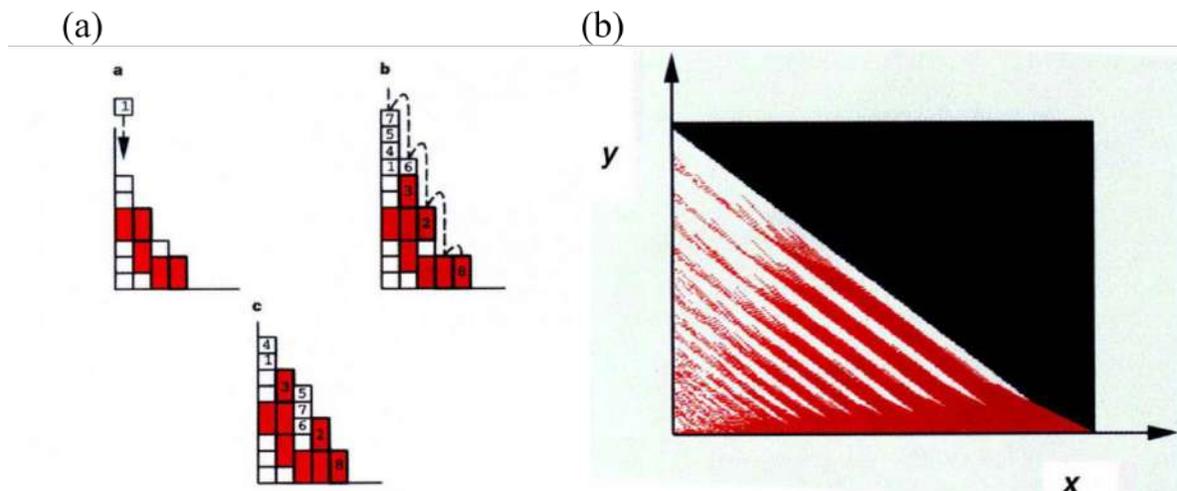


FIGURE 2.28 Schéma détaillant la dynamique du “modèle de terrain” mathématique de Makse (a) ; (b) prise de vue du résultat obtenu après l’application du modèle (Tiré de Makse et al., 1997a).

moyens. Des modélisations discrètes employant une méthode pseudo-dynamique ont notamment été utilisées, mais de manière erratique (**fig. 2.29**) [120, 126]. Les modèles résultants décrivent des interactions “stériques” qui ne prennent en compte que la gravité et l’expression de la géométrie des particules modélisées pour traduire la nature du contact entre deux grains. Une telle formulation de la physique granulaire ne peut-être longuement considérée comme satisfaisante. Des modèles numériques, plus robustes, utilisant des méthodes aux éléments discrets (MED)¹ sont dorénavant développés pour tenter de prédire avec consistance l’exposition de schémas de granoclassement au sein des empilements granulaires déposés dans des cellules quasi-2D. Des exemples existent déjà et se montrent capables de reproduire la cinématique des dépositions d’échantillons de particules et de révéler des empilements à la configuration mélangée (**fig. 2.30**) [116, 117, 127, 131–134]. Les outils numériques sont complets et simulent avec un certain succès les mécanismes évoqués précédemment dans la réalisation des phénomènes de granoclassement. Des tentatives ont effectivement été réalisées, mais les propositions de simulations apparaissent limitées par la formulation des lois physiques de leur environnement numérique, par un manque de clarté dans la description des procédures employées et l’exposition inexplicite de schémas de granoclassement brouillés (**fig. 2.31**) [135].

1. Le développement complet de la méthode numérique MED (*DEM*) est proposé dans la suite du document (renvoi à (**Sec. 2.3.3**)).

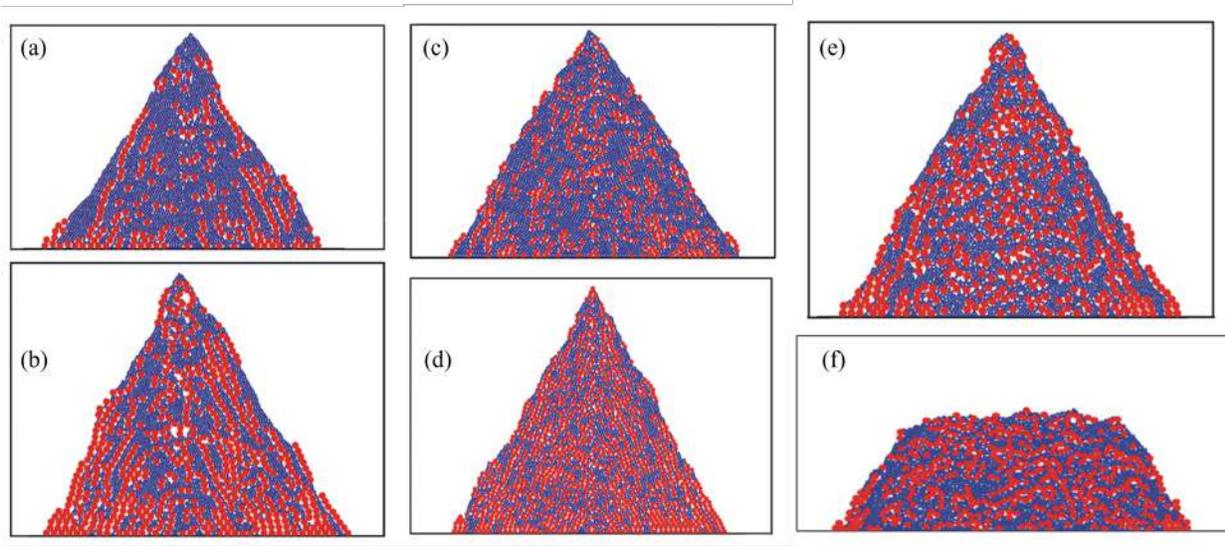


FIGURE 2.29 Prises de vues d'une étude numérique via résolution pseudo-dynamique traitant des phénomènes de ségrégation dans la construction d'empilements. Les résultats des simulations sont obtenus après les dépositions de mélanges granulaires bidisperses de disques tels que le rapport de tailles mesuré est $R = 3$ (a, b) ou $R = 2$ (c, d) avec des variations de concentrations des mélanges des deux espèces de particules; ou tel que le rapport de tailles mesuré est $R = 3$ (e, f) avec des déplacements horizontaux du point d'injection des échantillons (Tiré de Benito et al., 2014).

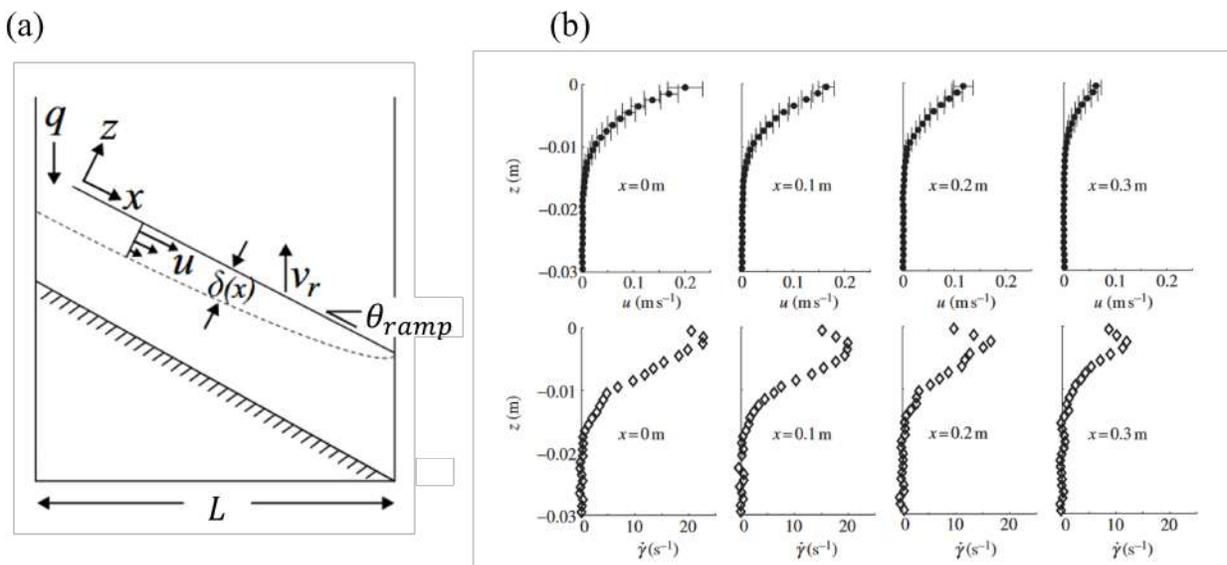


FIGURE 2.30 Schéma d'une cellule d'essai pour la construction d'un empilement confiné après l'atteinte du stade (III) d'avancée de déposition. Le système de coordonnées choisi est le résultat d'une rotation de l'angle de repos θ_{ramp} du matériau déposé et d'une élévation à la vitesse v_r (a). (b) Profils de mesures obtenus au terme de simulations de déposition MED montrant l'évolution de la vitesse u de l'écoulement à surface libre dans sa direction principale (haut) et une vitesse de cisaillement mesurée $\dot{\gamma}$ (bas) selon les dimensions (x, z) de la cellule (Tiré de Fan et al., 2013).

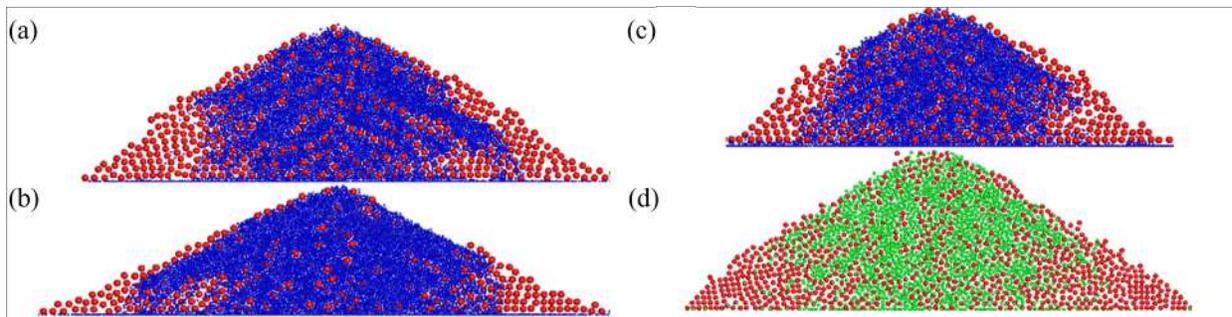


FIGURE 2.31 Prises de vues de dépositions numériques MED 3D, dans des cellules d'essai, d'échantillons granulaires bidisperses de particules sphériques tels que : (a) rapport de tailles $R = 3$, hauteur d'injection $h = 10mm$, ratio de masses $m_{LS} = 1$; (b) rapport de tailles $R = 3$, hauteur d'injection $h = 10mm$, ratio de masses $m_{LS} = 0.5$; (c) rapport de tailles $R = 3$, hauteur d'injection $h = 50mm$, ratio de masses $m_{LS} = 1$; (d) rapport de tailles $R = 1.5$, hauteur d'injection $h = 10mm$, ratio de masses $m_{LS} = 1$. Les diamètres des particules larges représentées sur la figure sont réduits d'un facteur d'échelle donné (facteur d'échelle = 0.7) (Tiré de Zhang et al., 2017).

La modélisation des écoulements granulaires pour la prédiction des développements des phénomènes de granoclassement n'est donc pas résolue et de nombreux progrès restent à accomplir notamment dans la compréhension des mécanismes particuliers de stratification [17,18]. Le **tableau 2.4** dresse la comparaison des avantages et limitations des différentes méthodes numériques pour la modélisation de déposition de matériaux granulaires.

TABLEAU 2.4 Avantages et limitations des méthodes numériques utilisées pour la modélisation de dépositions de mélanges granulaires. * d'autres travaux ont recours à une méthode numérique MED pour l'étude d'écoulements granulaires polydisperses mais ne considèrent pas les cas de dépositions complètes.

MÉTH. NUMÉRIQUE	Avantages	Limitations	Références
Modèle mathématique	Expression fondamentale d'une différence d'angle de repos $\Delta\beta$ entre les populations d'un mélange granulaire polydisperse, simplicité d'application de la méthode	Dynamique de déposition, inertie d'injection et ségrégation cinétique au travers d'écoulements non simulés	Makse [8, 109, 125, 128], Boutreux [129], Cizeau [6], Shinohara [130]
Pseudo-dynamique	Expressions de la gravité et des contraintes géométriques des particules sur leurs interactions, ressources de calculs demandées	Équations de mouvement non résolues	Benito [120], Rodriguez [126]
MED	Simulation poussée de la physique granulaire	Ressources de calculs demandées, complexité technique éventuelle de la méthode	Zhang [135] et (*Fan [132], Jones [116, 117], Isner [118, 136], Duan [131])

2.3 Études numériques et procédés employés

La dernière section de la revue de littérature propose une introduction à la modélisation de systèmes granulaires ainsi qu'aux stratégies et méthodes numériques appliquées. Les caractéristiques de définition des matériaux granulaires et l'intérêt du développement de simulations pour l'étude de leur rhéologie sont décrits. La résolution théorique des modèles numériques et la solution logicielle retenue pour la réalisation du travail proposé sont enfin amenées.

2.3.1 Modélisation des matériaux granulaires

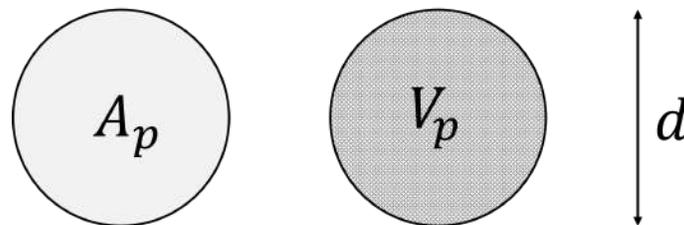
Les matériaux granulaires sont définis comme une collection de particules solides dont les mouvements respectifs sont indépendants. Des échantillons de sables ou de graviers sont par exemple à considérer comme des milieux granulaires réels. L'étude des mêmes matériaux sous diverses sollicitations a démontré sa complexité, notamment dans l'établissement des mesures

des états de contraintes à l'intérieur des systèmes [137–139]. Les résultats et connaissances empiriques disponibles ont alors servi à la réalisation de modèles théoriques pour le développement de programmes calculatoires simplifiés qui permettraient de lever les incertitudes sur les mesures de contraintes et de déplacements au sein d'assemblages de particules. Les premiers essais de modélisation des matériaux granulaires ont ainsi engagé l'introduction des solutions numériques contemporaines.

Définitions et principaux axiomes

Plusieurs critères existent pour définir l'appartenance d'une particule à une collection de grains de la classe des matériaux granulaires [138, 139].

Les particules solides composant un système granulaire sont premièrement considérées comme "larges" à l'échelle moléculaire, ce qui implique la distinction de la surface et du volume du grain (**fig. 2.32**) [138, 139]. Pour chaque particule d'un matériau granulaire il est alors possible



d : diamètre de la particule ;
 A_p : aire de la surface de la particule;
 V_p : volume de la particule.

FIGURE 2.32 Représentation schématique d'un grain avec annotation de ses dimensions.

de définir une énergie de surface, notée Γ , et un module d'élasticité, noté G , de manière à établir :

$$\frac{A_p \Gamma}{V_p G} \sim \frac{1}{d} \frac{\Gamma}{G} \ll 1 \quad (2.3)$$

- avec,

d , la taille moyenne de la particule, diamètre ; A_p , la surface de la particule ; V_p , le volume de la particule ; $\frac{\Gamma}{G}$, une grandeur appelée longueur élasto-capillaire.

Le respect de l'inéquation précédente assure que la forme de la particule ne dépend pas de sa taille ou des interactions de surface qu'elle subit.

Un critère absolu d'échelle de longueur peut ensuite être retenu pour la définition des matériaux granulaires. Soit d le diamètre de la particule considérée, l'agitation thermique de la

particule $k_B T$ doit vérifier :

$$k_B T \ll mgd \sim gd^4 \text{ i.e., } \left(\frac{k_B T}{g} \right)^{1/4} \ll d \text{ et, pour } T = 300K, 10^{-6}m \ll d \quad (2.4)$$

- avec,

k_B , la constante de Boltzmann ; T , la température du milieu en Kelvins ; m , la masse de la particule ; g , l'accélération de la pesanteur.

de telle sorte que, dans les matériaux granulaires, elle soit négligée devant l'énergie potentielle de la particule mgd . La dynamique des matériaux granulaires peut ainsi être décrite comme athermale. Plus généralement, l'énergie de référence de la particule, notamment en mécanique des sols, est relative à une pression de confinement p . L'inéquation pour l'agitation thermique devient alors :

$$k_B T \ll mgd \sim pd^3 \text{ i.e., } \left(\frac{k_B T}{p} \right)^{1/3} \ll d \text{ et, pour } T = 300K \text{ et } p = 1MPa, 10^{-9}m \ll d \quad (2.5)$$

Sans directement introduire les modèles mathématiques de définition des contacts entre particules, il est enfin important de rappeler l'approche théorique des interactions de contact pour compléter la définition des matériaux granulaires. La plupart des modélisations de contact pour les matériaux granulaires retiennent généralement des contacts de courte portée, dont les interactions mécaniques font partie. Les contacts qui prennent place dans de tels systèmes sont binaires - i.e. ne s'établissent et ne sont perçus qu'entre deux particules distinctes à la fois - , inélastiques et dissipatifs. Le cas de multiples collisions considère une vague de propagation des efforts dont les transmissions successives assurent la dissipation d'énergie au travers des contacts.

Un matériau granulaire peut ainsi se décrire comme une collection de particules solides de dimensions assez larges pour estimer que le système soit uniquement gouverné par des interactions mécaniques et sous de potentielles conditions particulières de chargement [137, 140, 141]. Il est précédemment rappelé que la distribution granulométrique des roches stériles comprend des tailles de grains dépassant la dimension du micromètre : les stériles miniers intègrent donc logiquement la classe de définition (**eqs. 2.3, 2.4 et 2.5**) des matériaux granulaires.

Échelles intrinsèques d'étude

Les assemblages granulaires ont des comportements dont la description est dépendante d'un point référentiel d'étude et peut posséder des intérêts transdisciplinaires. La modélisation des matériaux granulaires s'accompagne ainsi de la distinction de deux échelles d'étude (**fig. 2.33**) pour traduire et résoudre au mieux les divers problèmes inhérents aux milieux considérés.

L'étude des interactions, des mouvements relatifs des particules et des arrangements locaux de grains se réfère premièrement à la micro-échelle aussi appelée microstructure. La définition des interactions introduit l'échelle du contact notée δ qui mesure les déflexions des collisions. δ est petit devant l'échelle de la particule donnée par son diamètre d [137, 139, 142].

L'analyse de structures complètes et de la rhéologie des matériaux granulaires est, elle, réservée à l'échelle macro ou macrostructure. Elle englobe la dimension de l'élément de volume représentatif ou de l'empilement complet de la construction [137, 139].

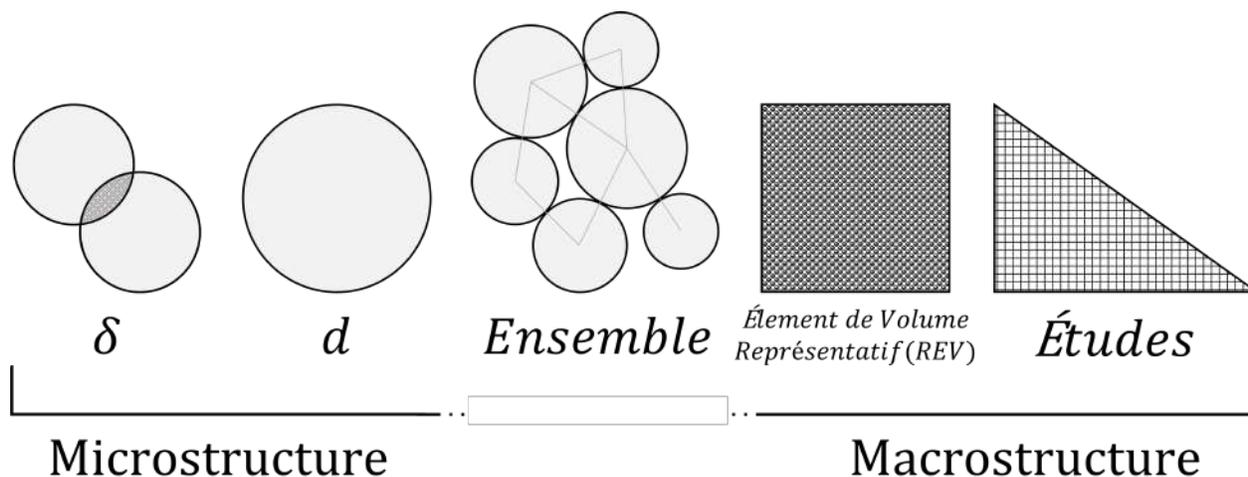


FIGURE 2.33 Échelles de description pour l'étude des matériaux granulaires.

2.3.2 Détails de la microstructure granulaire

Le travail attaché à ce mémoire se concentre en partie sur l'analyse microstructurale d'assemblages d'un nombre défini de grains. L'introduction de descripteurs de la microstructure de tels échantillons granulaires et de son évolution est donc donnée pour préparer l'étude qui suivra. Les propriétés de la microstructure granulaire sont détaillées à leur ordre le plus bas de simples mesures d'organisation des particules entre elles et de leurs contacts.

Les matériaux granulaires sont des matériaux amorphes, sans forme cristallisée, pour lesquels

un état d'arrangement ou de désordre est défini. Le désordre "métrique" correspond à la distribution aléatoire des positions relatives des grains dans le matériau.

Les interactions entre les particules d'un matériau granulaire définies à un point de contact physique donné, il est possible d'introduire les notions de réseaux de contacts et de connectivité si un enchaînement d'interactions est considéré.

Fonction de distribution radiale

L'arrangement d'une collection de particules est historiquement décrit avec l'outil de mécanique statistique qu'est la fonction de distribution radiale notée $g(r)$ [86, 143, 144] mesurant la variation de densité dans le système en fonction de la distance d'éloignement à une particule de référence. La représentation de l'arrangement d'un système avec un tel descripteur est notamment très adaptée aux systèmes moléculaires, aux colloïdes, aux liquides ou à des échantillons de grains monodisperses [145–148]. La définition de $g(r)$ montre qu'un agencement ordonné des particules entre elles n'est retrouvé qu'à de courtes distances du point de départ choisi [149, 150] dans le système, mais rarement au-delà des premières particules voisines (fig. 2.34).

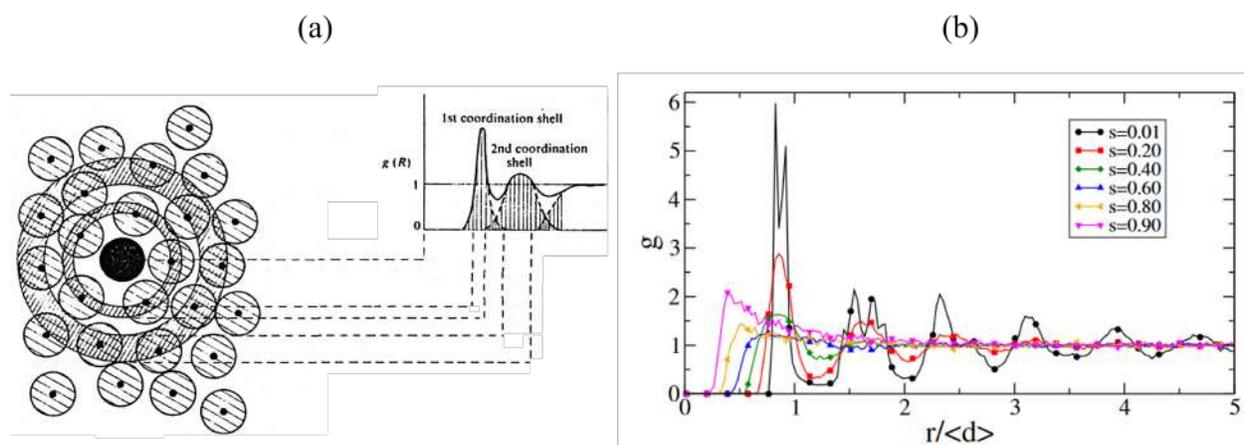


FIGURE 2.34 Représentation schématique d'un arrangement de sphères dans un solide amorphe; tracé de la fonction de distribution radiale $g(r)$ associée (Tiré de Ziman, 1979) (a). (b) Exemple de mesures de g comme une fonction de la distance radiale r normalisée par un diamètre moyen $\langle d \rangle$ pour des arrangements monodisperses de pentagones réguliers avec un étalement granulométrique S variable (Tiré de Nguyen, 2014).

Un aléatoire réside donc dans la distribution relative des particules à mesure que l'on s'éloigne du point de référence, ce qui est d'autant plus vérifié si l'on applique le calcul de la fonction de distribution radiale à des échantillons polydisperses comme le sont la majorité des matériaux

granulaires rencontrés dans la réalité. $g(r)$ et la notion de désordre métrique se révèlent donc peu adaptées à la description de la microstructure des matériaux granulaires pour lesquels il est davantage nécessaire de considérer le désordre dans la distribution des contacts.

Nombre de coordination

Une particule parmi un assemblage de grains possède un environnement local qui est partie du réseaux de contacts complet et différent de l'environnement local de la prochaine particule. L'environnement local de la particule i (**fig. 2.35**) est composé de cinq autres particules voisines. La particule j ne fait pas partie de l'environnement de i , même si les deux grains partagent des voisins communs ι_3 et ι_4 , et possède un environnement local propre. L'exemple d'empilement granulaire présenté compte $N_c = 12$ contacts dont la composante de force normale est considérée non nulle soit autant de contacts actifs. Les particules portant plus d'un contact, strictement, sont les entités qui participent à la transmission d'efforts dans le système granulaire et constituent le réseau de contacts, on en compte $N_p = 6$ dans le cas d'étude donné. Les autres particules sont décrites comme flottantes, elles ne portent aucun effort. Le nombre de coordination Z est alors défini comme le nombre moyen de contacts au sein d'un système granulaire complet et se calcule comme suit : $Z = 2N_c/N_p$. Il est déduit particulièrement de ce qui précède $Z = 4$ pour la structure étudiée (**fig. 2.35**). Z est l'un des descripteurs simples rendant compte de la connectivité moyenne d'un système granulaire.

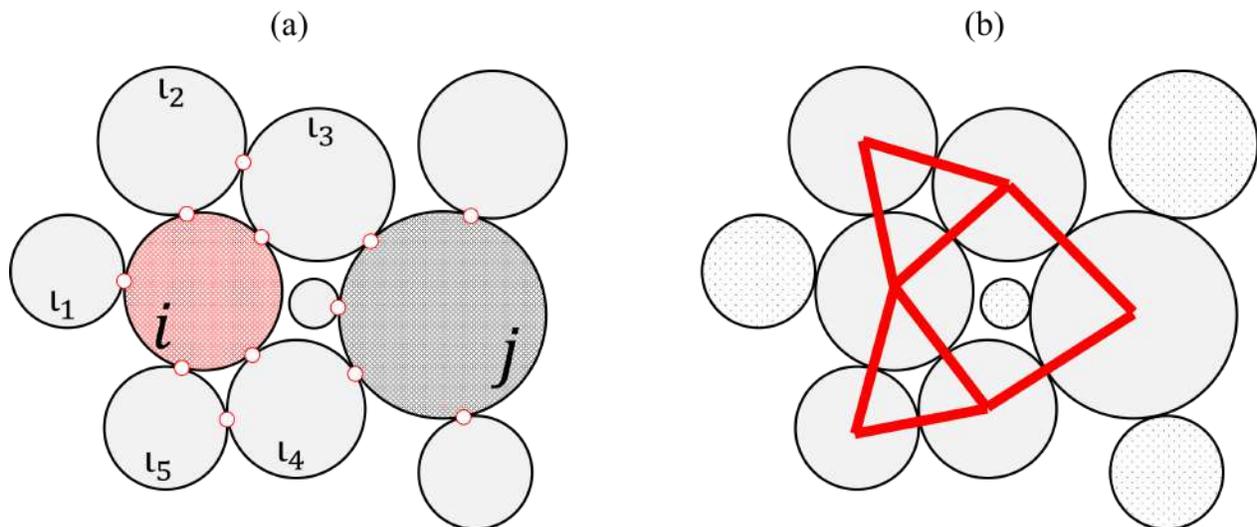


FIGURE 2.35 Représentation schématique d'environnements locaux de particules et des réseaux de contacts associés : (a) environnements locaux des particules i et j ; (b) réseaux de contacts résultants.

Les expositions de mesures de nombres de coordination ont démontré la sensibilité du calcul de Z pour différents paramètres. Le calcul du nombre de coordination est tout d'abord directement influencé par la dimension de la représentation considérée : un système 2D mesure en moyenne $Z = 4$ pour un assemblage de disques monodisperses soumis à une compression isotrope sans frottement et $Z = 6$ pour un assemblage similaire de sphères. L'étalement de la distribution de tailles des grains dans un échantillon a également pour effet d'élargir l'intervalle de mesures de Z [151, 152]. La forme des particules est aussi connue pour influencer le calcul du nombre de coordination qui augmente généralement s'il est mesuré dans des échantillons granulaires de particules anguleuses [141, 150, 153]. De telles observations sont expliquées simplement en considérant le principe d'exclusion des volumes et la condition d'établissement potentiel de contacts dans les cas d'illustration cités.

Le calcul du nombre de coordination pour des systèmes soumis à sollicitation dynamique montre enfin des corrélations avec certains paramètres expérimentaux. Il a par exemple été prouvé que la connectivité moyenne dans un système soumis à cisaillement diminue avec l'introduction de frottements ou encore, d'après la loi de rhéologie $\mu(I)$ [154–158], avec l'augmentation des valeurs prises par le nombre d'inertie I .

Il n'existe donc pas de représentation typique de structure locale pour la modélisation d'un matériau granulaire. L'ensemble des environnements proches que peut accepter une particule est largement distribué, mais contraint par l'exclusion géométrique des volumes. Il reste néanmoins possible d'utiliser des descripteurs simples pour rendre compte de l'arrangement d'un assemblage granulaire et de traduire un état de désordre associé.

Chaînes de contacts

Une conséquence du désordre mesuré précédemment pour l'agencement local d'une particule est la distribution hétérogène des forces de contact au sein des matériaux granulaires [159–161]. L'organisation des forces de contact est divisée entre un réseau de contacts fort concentré le long de chaînes de particules supportant les efforts les plus importants et, consécutivement, un réseau de contacts mineur dont les particules sont soumises à des stress d'intensités moindres [162]. L'expression de la distribution particulière des efforts dans les assemblages de grains est donc remarquable par leur localisation autour de régions définies du système. Il existe ainsi une corrélation dans l'espace entre les différentes régions d'un matériau granulaire relativement à leur participation dans la mobilisation des forces de contact. Les représentations de distributions des forces de contact au sein d'empilements granulaires sont données **fig. 2.36** [163]. La concentration des chaînes de forces dans les parties inférieures des dépôts pyramidaux est instinctive pour de tels systèmes uniquement soumis aux

effets de la gravitation quand les grains situés aux surfaces libres des empilements ne supportent logiquement aucun effort. L'hétérogénéité de la distribution des forces de contact

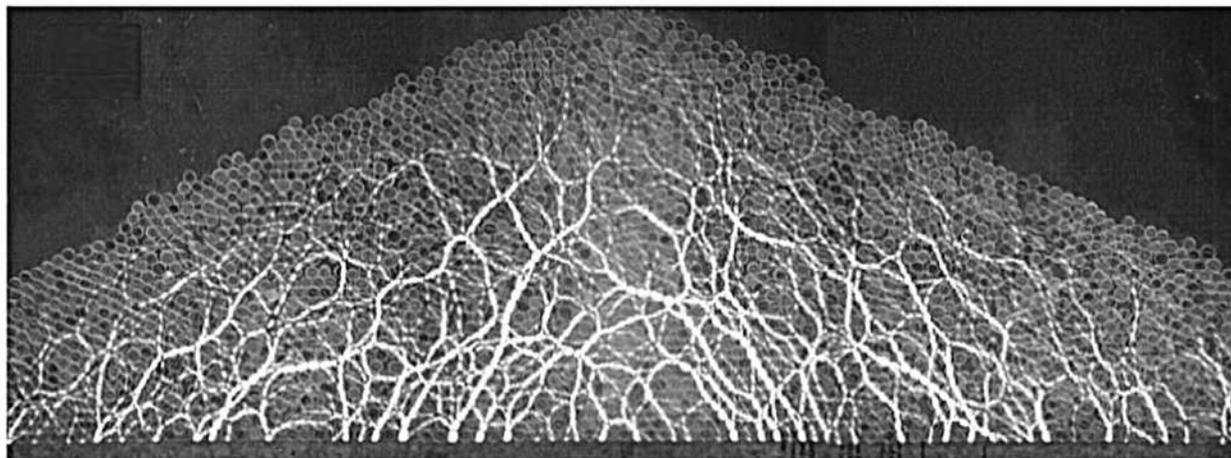


FIGURE 2.36 Photographie d'une pile de disques photoélastiques créée par une procédure de source localisée. La déposition est visualisé entre deux polariseurs pour laisser entrevoir l'organisation de sa structure interne. Les régions en surbrillance correspondent aux chaînes de contacts établies (Tiré de Geng et al., 2001).

est aussi démontrée par la mesure de leurs intensités [162, 164]. Les forces de contact sont généralement réparties sur un large intervalle de mesures autour d'une moyenne des forces normales de contact calculée $\overline{f_n}$ au travers d'un échantillon granulaire. Un résultat est que les forces larges suivent une distribution décroissante exponentielle au-delà de la force moyenne mesurée jusqu'à plusieurs ordres de grandeur de $\overline{f_n}$. Les forces inférieures à la force moyenne mesurée suivent des lois de distribution dépendantes notamment de l'état mécanique du système et souvent ramenées à des lois de puissance. Une distribution bimodale peut donc être retenue pour représenter la répartition des forces normales de contact dans un assemblage granulaire [152, 165]. Des modèles de distribution similaires sont également admis dans l'étude des forces tangentielles [166–168].

Les études des réseaux de contacts ont aussi interprété l'évolution de la distribution des forces au sein d'un système en fonction de ses propriétés. Plus l'étalement granulométrique d'un échantillon est grand et plus la distribution des forces de contact est large. La même tendance est observée lorsque l'angularité des particules d'un assemblage augmente [141, 152, 153, 169, 170]. L'élargissement de la distribution des forces s'accompagne alors généralement de l'augmentation simultanée du nombre de forces faibles mesurées.

L'établissement d'un contact et d'une force résultante a le potentiel de remanier l'environnement d'un matériau granulaire sur un rayon de longueur mesurable. Il est prouvé que la corrélation des forces de contact et du désordre qu'elles instaurent est capable de s'étendre

sur dix diamètres moyens de particules parmi le matériau [167]. Une telle mesure correspond en réalité à une estimation de l'échelle de longueur des chaînes de forces. La modélisation d'un échantillon granulaire représentatif de l'hétérogénéité ambiante dans les systèmes nécessite donc la considération d'un assemblage de dimensions au moins supérieures à la longueur d'onde du remaniement pour l'établissement des forces de contact.

La microstructure granulaire est caractérisée par un fort désordre des contacts dans l'environnement local d'une particule. Un tel désordre est notamment reflété par la large distribution des forces de contact au travers d'un échantillon de grains. Les corrélations de forces de contact s'étendent spatialement sur toute la longueur des chaînes de forces. La modélisation rigoureuse d'un matériau granulaire sous-entend de fait le dimensionnement d'un échantillon aux dimensions excédant une telle longueur pour assurer la bonne représentation de l'hétérogénéité des mêmes milieux.

Les résultats au propos de la microstructure granulaire présentés sont limités aux éléments d'analyse concernant le travail notamment consigné dans ce mémoire. La ségrégation et la stratification entendent la division par l'organisation spécifique d'échantillons de grains sur la base des différences de propriétés des particules et de leurs relations. La connectivité au sein des assemblages, les notions d'exclusions géométriques ou la logique d'établissement des réseaux de contacts sont des concepts nécessaires à intégrer dans l'interprétation de simulations modélisant le comportement de matériaux granulaires.

2.3.3 Méthodes des éléments discrets (DEM)

Les avancées de la modélisation théorique des matériaux granulaires et la démocratisation des outils informatiques ont motivé le développement de simulations numériques pour adresser les problèmes inhérents aux systèmes particulaires. Le recours à de telles solutions a permis la création de modèles numériques capables de reproduire leurs comportements. L'étude de la physique des systèmes granulaires peut dorénavant être approchée au moyen de plusieurs techniques. Les méthodes par éléments discrets (DEM) choisissent de modéliser un géomatériau comme une collection de corps rigides interagissant entre eux par des contacts frictionnels. Les méthodes DEM intègrent les équations de la dynamique avec divers algorithmes pour résoudre les équations du mouvement de chaque élément de l'assemblage. La philosophie des simulations DEM tient de nombreux avantages qui ont justifié l'utilisation d'un même outil logiciel pour mener les travaux qui font l'objet du présent mémoire.

Avantages devant les méthodes des éléments finis (FEM)

La méthode des éléments finis (FEM) standard est une méthode d'analyse numérique qui présente l'intérêt de pouvoir décrire des mécanismes macroscopiques. La résolution des problèmes employant la FEM permet la simulation du comportement d'objets complexes modélisés comme des milieux continus.

Le choix de la DEM pour réaliser une partie de l'étude est alors motivé par la capacité de la méthode à également rendre compte de phénomènes locaux à l'échelle du contact d'une collection de plusieurs corps [140, 171]. La DEM s'avère ainsi particulièrement adaptée à la modélisation des matériaux granulaires. Elle se révèle notamment capable de saisir les propriétés particulières des systèmes de particules dépendantes des interactions entre grains. La simple modélisation d'un échantillon de disques de tailles diverses porté à sollicitation permet de simuler des réponses mécaniques subtiles comme l'expression de variations de densités d'empilements ou d'exemples de ségrégation.

Les qualités de la DEM s'accompagnent cependant de certains encombrements pratiques. La méthode nécessite d'importantes ressources de calcul pour conclure des simulations de fait généralement chronophages. La préparation des échantillons modélisés, complexes, car discrétisés, se doit consécutivement d'être rigoureuse afin de ne pas répéter des essais dispendieux.

Dynamique moléculaire (MD)

La dynamique moléculaire (MD) est une technique de simulation numérique couramment utilisée pour modéliser les comportements des atomes ou des molécules cristallines. La méthode consiste en l'étude de l'évolution des systèmes particuliers dans le cadre de la mécanique classique au cours du temps. La définition des collisions pour chaque élément est définie à l'échelle de l'atome et la force de contact entre deux corps est déterminée selon le calcul de potentiels attribués aux particules dans leur mouvement. La formulation explicite des interactions caractérise ainsi la dynamique moléculaire comme une approche dite régulière (*smooth*). Un modèle numérique est alors résolu par l'intégration temporelle des équations de la dynamique qui régissent l'état du système.

La philosophie de la DEM emprunte énormément à la dynamique moléculaire si bien qu'il serait possible de décrire la méthode des éléments discrets comme une projection de la MD à l'échelle de la particule granulaire [140, 171]. La seule différence portée par la DEM est la définition des interactions à l'échelle du contact. Deux ensembles d'inconnues doivent donc être considérés pour la formulation de la méthode :

- Les **inconnues "globales"** de la cinématique, relatives aux centres d'inertie des parti-

cules modélisées, et intégrant les équations de la dynamique (déplacements \vec{x} , vitesses \vec{v} , ou actions résultantes \vec{F});

- Les **inconnues du référentiel “local”**, relatives aux interactions, qui consignent les variables de définition d’un contact potentiel pour une paire de particules (espacements relatifs δ , vitesses relatives v , ou forces \mathbf{f}).

Les trois importantes étapes de résolution des systèmes sont successivement la détection des contacts, le calcul des forces de contact et la restitution des mouvements des éléments au travers de l’échantillon modélisé. La résolution mathématique des systèmes étudiés suit la même logique d’intégration que pour la MD. La DEM peut alors se résumer à une interprétation de la dynamique moléculaire additionnée du détail des lois de contact. La paternité de la DEM appliquée aux matériaux granulaires, telle qu’elle est présentée, est attribuée aux travaux de Cundall et de ses associés [140, 171] menés dans les années 1970. La publication des mêmes études pose les bases de la théorie des méthodes numériques appliquées aux géomatériaux.

Formulation de la méthode

La procédure numérique évolue de manière discrète et le temps est découpé en une suite d’instantanés séparés par un intervalle appelé pas de temps, noté Δt et tel que $t_{i+1} = t_i + \Delta t$. La résolution de la simulation consiste à calculer la position et la vitesse de chaque particule à chacun des instants d’après les résultats obtenus aux instants directement précédents [142, 172]. Il s’agit d’un schéma d’intégration explicite. L’objectif est donc de résoudre à chaque incrément de temps l’équation² du mouvement pour chaque particule i :

$$\text{Pour } i : m\vec{a} = m\frac{\partial^2\vec{x}}{\partial t^2} = m\vec{g} + \sum_j \vec{F}_j \quad (2.6)$$

- avec,

m , la masse de la particule i ; \vec{a} , le vecteur accélération de la particule i ; \vec{x} , le vecteur position de la particule i ; \vec{g} , le vecteur accélération de la pesanteur i ; \vec{F}_j , un vecteur d’action mécanique exercée par une particule j sur la particule i .

L’application de la seconde loi de Newton donne une équation différentielle ordinaire. La résolution de (**eq. (2.6)**) pour chaque particule i permet de déterminer son accélération $\vec{a}^{(t)}$ calculée d’après les forces d’interactions $\vec{F}_j^{(t)}$. Lorsque l’état directement précédent à $t + \Delta t$ de la particule i est déterminé, la méthode numérique se poursuit avec l’intégration des équations de la dynamique, ce pourquoi plusieurs algorithmes peuvent être utilisés (*Euler* ou *Verlet* par exemple) [142]. Les schémas d’intégration permettent alors de déterminer la

2. Les particules sont considérées sphériques : aucune impulsion angulaire intégrée aux équations.

position et la vitesse de i ($\vec{x}^{(t+\Delta t)}$; $\vec{v}^{(t+\Delta t)}$) au nouvel instant considéré. L'itération de la procédure pour chaque particule du système permet ultimement de calculer son état au nouvel instant ($t + \Delta t$). L'exemple d'un algorithme simple et intuitif peut être donné par :

$$\begin{cases} \vec{x}^{(t+\Delta t)} \leftarrow \vec{x}^{(t)} + \vec{v}^{(t)} \Delta t \\ \vec{v}^{(t+\Delta t)} \leftarrow \vec{v}^{(t)} + \vec{a}^{(t)} \Delta t \end{cases} \quad \text{et, } \vec{a} = \vec{g} + \frac{1}{m} \sum_j \vec{F}_j \quad (2.7)$$

Des modèles de formulation sont donc premièrement nécessaires pour calculer les forces de contact comme fonctions des paramètres locaux de l'environnement de la particule i pour déterminer $\vec{a}^{(t)}$. Les applications des méthodes originales de la DEM, explorées par Cundall, se veulent compétentes pour traiter la modélisation de particules aux profils et comportements simples. La formulation de la DEM s'adapte à la simulation numérique de systèmes de particules composés d'éléments de géométrie sphérique et dont les contacts peuvent être approximés par des modèles de répulsion élastique amortie (**fig. 2.37**).

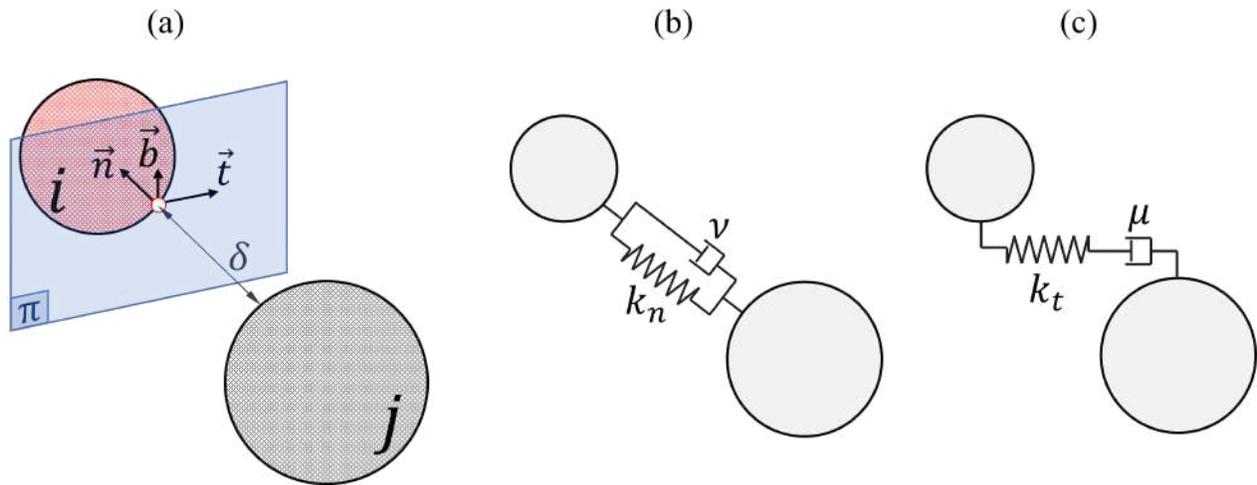


FIGURE 2.37 Modèle de contact local schématisé pour la DEM. (a) Illustration ; (b) modèle de contact de type masse-ressort-amortisseur pour les collisions normales ; (c) modèle de contact de type masse-ressort-amortisseur pour les composantes tangentes d'interactions.

La DEM étant une approche régulière, les lois des interactions sont explicites et s'expriment au moyen d'une relation force-déplacement. La distance relative entre deux particules i et j est mesurée par la variable locale δ qui définit par extension la condition de collision entre les deux éléments retenus : si δ prend une valeur positive non nulle le contact entre les deux corps ne peut exister, mais si la distance relative mesurée est nulle ou négative alors un contact se déclare et des forces se développent (**fig. 2.37**). L'interpénétration des éléments est donc tolérée sur une "déformation" virtuelle δ définissant l'établissement d'une collision.

Le contact normal entre deux particules est schématiquement représenté par les contributions parallèles d'une relation élastique et d'un dispositif amortisseur (**fig. 2.37.b**). La force normale de contact \mathbf{f}_n est ainsi décomposée en un terme élastique $\mathbf{f}_{n,j}^e$ (**eq. (2.8)**) et un terme d'amortissement physique $\mathbf{f}_{n,j}^{\nu_n}$ (**eq. (2.9)**). Les contacts caractérisés par de faibles déflexions δ acceptent généralement une approximation linéaire de l'expression hertzienne \mathbf{H} . L'introduction d'un coefficient d'amortissement dissipatif ν_n fait alors sens dans une réalité physique pour traduire le caractère inélastique des interactions entre particules.

$$\mathbf{f}_{n,j}^e = \mathbf{H}(-\delta_n)^{3/2}, \text{ d'où l'approximation linéaire : } \mathbf{f}_{n,j}^e = \begin{cases} -k_n \delta_n, & \text{si } \delta_n < 0 \\ 0, & \text{sinon} \end{cases} \quad (2.8)$$

- avec,

k_n , la raideur normale du contact ; δ_n , la composante normale de la déflexion du contact.

$$\mathbf{f}_{n,j}^{\nu_n} = \begin{cases} -\nu_n \frac{\partial \delta_n}{\partial t} \mathbf{i.e.} & -\nu_n v_n, & \text{si } \delta_n < 0 \\ 0, & \text{sinon} \end{cases} \quad (2.9)$$

- avec,

v_n , la composante normale de la vitesse relative entre deux particules.

Le développement d'une force tangentielle \mathbf{f}_t est observé dans la limite de définition du critère de frottement de Coulomb pour $\mathbf{f}_{t,j}^e < \mu \mathbf{f}_{n,j}^e$ [173]. La nouvelle composante du contact est schématisée par une relation élastique linéaire additionnée du coefficient d'amortissement μ (**fig. 2.37.c**). La force de friction \mathbf{f}_t est incrémentée, à chaque itération de temps, par $\Delta \mathbf{f}_{t,j}$ reliée au déplacement tangentiel et disparaît logiquement si le contact est perdu.

$$\Delta \mathbf{f}_{t,j} = \begin{cases} -k_t (v_t \Delta t) \frac{v_t}{|v_t|}, & \text{si } \mathbf{f}_{t,j}^e < \mu \mathbf{f}_{n,j}^e \\ 0, & \text{sinon} \end{cases} \quad (2.10)$$

- avec,

k_t , la raideur tangentielle du contact ; v_t , la composante tangentielle de la vitesse relative entre deux particules.

L'obtention de la forme de δ et les connaissances empiriques du comportement des systèmes simulés permettent enfin de définir des paramètres critiques nécessaires à la bonne exécution de la procédure de calcul numérique. L'incrément de temps Δt (**eq. (2.11)**) doit par exemple être soigneusement choisi pour réaliser la correcte intégration des équations du mouvement et déterminer avec précision les réactions des corps au moment d'une collision. Δt est donc généralement dimensionné comme une partition de la période d'oscillation $\Delta t_{critical}$ du sys-

tème . Le coefficient d'amortissement visqueux ν_n est aussi limité par la définition d'un seuil d'amortissement $\nu_{critical}$. Les valeurs retenues pour ν_n varient en fonction du coefficient de restitution de Newton e_n exprimé comme le rapport des vitesses relatives avant et après contact entre deux particules (**eq. (2.13)**).

$$\Delta t_{critical} = \frac{2\pi}{\sqrt{\frac{k_n}{m} - \left(\frac{\nu_n}{2m}\right)^2}} \text{ et, } \nu_{critical} = 2\sqrt{mk_n} \quad (2.11)$$

$$\Delta t = \frac{\Delta t_{critical}}{X} \text{ pour } X \in \mathbb{N}^* \text{ et, } \nu_n = 2\epsilon\sqrt{mk_n} \text{ avec } \epsilon = \mathbf{f}(e_n) \leq 1 \quad (2.12)$$

Le même coefficient de restitution e_n , intégrant le calcul de ν_n , introduit une caractérisation de la dissipation d'énergie au sein d'un contact [142, 174]. La condition $e_n \in [0; 1[$ vérifie notamment l'inélasticité de la collision considérée. Le niveau de raideur κ relie par exemple la propriété de rigidité des grains à la taille des particules modélisées, aux conditions de pression et à la raideur du contact.

$$e_n = \frac{-v_n^+}{v_n^-} \text{ et, } \kappa = \frac{k_n}{p\langle d \rangle^{\Omega-2}} \quad (2.13)$$

- avec,

v_n^- , la vitesse relative normale incidente entre deux particules, avant collision ; v_n^+ , la vitesse relative normale de restitution entre deux particules, après collision ; Ω , la dimension du modèle numérique.

Le nombre d'inertie I quantifie quant à lui l'état dynamique d'un matériau granulaire soumis à sollicitation et renseigne un régime d'étude auquel associer un comportement particulier capable d'être vérifié expérimentalement.

La DEM est une méthode de résolution numérique de modèles mécaniques réguliers. Sa formulation permet l'intégration explicite des équations du mouvement pour chaque élément modélisé. Un nouvel état de l'échantillon granulaire constitué est donc calculé à chaque itération de temps pour rendre compte de son évolution. Les différents indicateurs cités et conditions aux limites présentées garantissent la stabilité de la solution numérique ainsi que la description d'un comportement simulé pourvu d'un réel sens physique.

2.3.4 Dynamique des contacts (CD)

La dynamique des contacts (CD) est une méthode de simulation numérique directement dérivée de la DEM. La CD est un prolongement de la DEM formulé dans le cadre d'une approche non régulière (*nonsmooth*) qui traduit les modèles de la mécanique par une description mathématique plus sophistiquée [175] dont les développements algorithmiques sont l'héritage de Moreau et Jean [174, 176–180]. La complexité de la dynamique des contacts s'accompagne néanmoins de nouveaux avantages qui permettent notamment la modélisation de matériaux granulaires représentatifs et motivent, de fait, son application spécifique pour la réalisation de l'ensemble des simulations de cette étude.

Formulation de la méthode

La dynamique des contacts est une formulation particulière de la DEM pour laquelle la formulation de la mécanique et les algorithmes de résolution des systèmes changent. La CD implémente des lois de contact non régulières exprimant les phénomènes de collision et les chocs frictionnels sans modèle d'approximation élastique ou visqueux. Les modèles d'interactions sont alors définis par des fonctions multivaluées qui considèrent un ensemble de solutions pour une variable argument. La méthode CD est donc adaptée à la modélisation de particules considérées parfaitement rigides ou indéformables pour lesquelles des sauts de vitesses et de forces réactionnelles sont effectivement mesurés au cours de l'événement d'un contact. Le schéma d'intégration est dorénavant implicite et consiste à déterminer une solution à $(t + \Delta t)$ en résolvant des équations intégrant des valeurs en t et $(t + \Delta t)$. Les lois de forces ne sont plus définies par des relations ordinaires ou continues. Les expressions des modèles de description physique ne sont donc pas dérivables et il est nécessaire de considérer une écriture intégrée sur l'incrément de temps Δt des équations de la dynamique³.

$$m \int_t^{t+\Delta t} \vec{a}^{(t)} dt = m \int_t^{t+\Delta t} \frac{d\vec{v}^{(t)}}{dt} dt = m\vec{g} + \sum_j \int_t^{t+\Delta t} \vec{F}_j^{(t)} dt \quad (2.14)$$

Les modèles de contacts entre particules pour la CD sont donc différents de ceux de la DEM (**fig. 2.38**). Les lois d'interactions sont des relations non régulières qui calculent le transfert des mouvements dû aux collisions par l'intermédiaire de coefficients de restitution. L'évaluation de la réalisation d'un contact est alors vérifiée sur les valeurs prises par une vitesse relative normale v_n : si v_n est nulle un contact peut s'établir et une force réactionnelle se développer, mais si v_n prend une valeur positive aucun contact n'est détecté et la résolution

3. Les particules sont considérées sphériques : aucune impulsion angulaire intégrée aux équations.

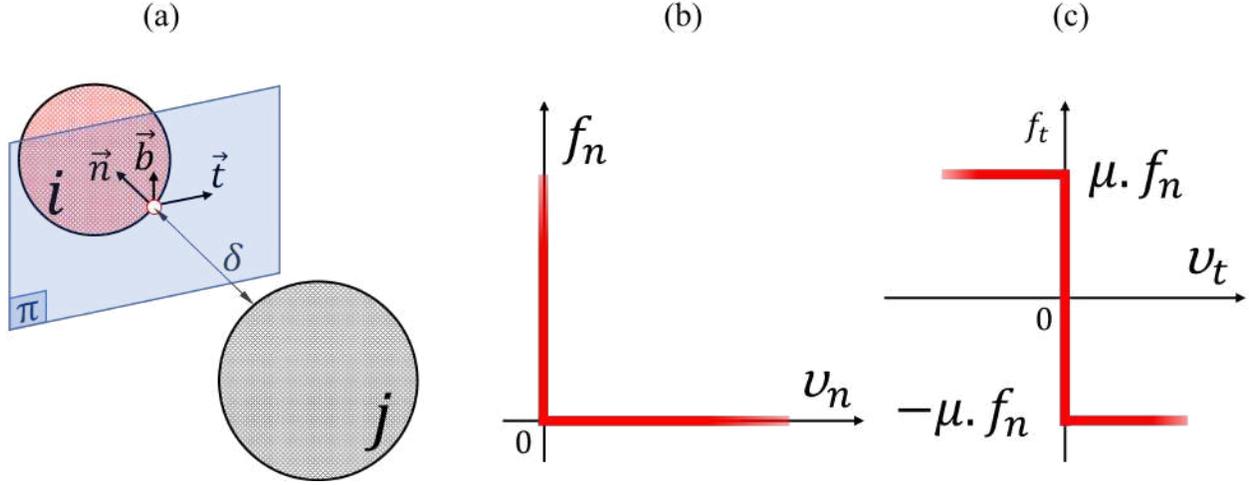


FIGURE 2.38 Modèle de contact local schématisé pour la CD. (a) Illustration ; (b) condition de Signorini définie relativement à une vitesse normale relative v_n entre particules ; (c) loi de frottement de Coulomb.

de l'interaction conclut que les particules sont éloignées à la fin de l'incrément de temps. La formulation des interactions normales et l'expression de v_n sont résumées par :

$$\begin{cases} \mathbf{f}_n \geq 0, & \text{si } v_n = 0 \\ \mathbf{f}_n = 0, & \text{si } v_n > 0 \end{cases}, \text{ sachant } v_n = \frac{e_n v_n^- + v_n^+}{1 + e_n} \quad (2.15)$$

La mécanique non régulière pour la détermination d'une impulsion normale est donc rédigée à l'aide d'un modèle d'inclusions connu comme les relations de complémentarité de Signorini (**fig. 2.38.b**) [181,182]. La condition de contact est en réalité définie pour une vitesse relative v_n qui n'est pas calculée à un incrément de temps donné. v_n est une grandeur fonction des vitesses relatives (v_n^-, v_n^+) et du coefficient de restitution e_n mesurant la dissipation d'énergie cinétique aux centres de masse des éléments. La traduction de l'inélasticité du contact normal avait déjà été introduite pour la formulation de la méthode DEM générale et s'écrit $e_n \in [0; 1[$. La formulation de la loi de frottement de Coulomb dans le cadre de la mécanique non régulière est illustrée par **fig. 2.38.c** et donnée par :

$$\begin{cases} -\mu \mathbf{f}_n \leq \mathbf{f}_t \leq \mu \mathbf{f}_n, & \text{si } v_t = 0 \\ \mathbf{f}_t = -\mu \mathbf{f}_n \frac{v_t}{|v_t|}, & \text{si } v_t \neq 0 \end{cases}, \text{ sachant } v_t = \frac{e_t v_t^- + v_t^+}{1 + |e_t|} \quad (2.16)$$

- avec,

v_t^- , la vitesse relative normale incidente entre deux particules, avant collision ; v_t^+ , la vitesse

relative normale de restitution entre deux particules, après collision.

La détermination de l'impulsion tangentielle résultante est alors fonction de la vitesse relative tangentielle v_t dont l'expression diffère peu de celle de v_n pour les relations de Signorini. Le coefficient de restitution tangentielle e_t est calculé comme le rapport des vitesses relatives tangentielles avant et après collision, respectivement v_t^- et v_t^+ [183]. L'élasticité du contact est logiquement supposée pour la modélisation de matériaux granulaires et e_t prend donc ses valeurs dans l'intervalle $] - 1; 1[$. Le domaine de l'intervalle qui associe des valeurs négatives à e_t exprime la restitution des vitesses dans une direction opposée à la direction incidente.

Les formulations des interactions permettent la détermination des forces réactionnelles dans le repère local du contact. La résolution des équations de la dynamique donne ensuite les vitesses de chaque élément puis la restitution des mouvements au travers de l'échantillon est compilée pour décrire le nouvel état du système à l'incrément de temps suivant. Le cas du traitement d'une collision binaire est simple et possède une solution unique. Le cas d'un système aux contacts simultanés est logiquement plus complexe et nécessite alors un algorithme itératif pour adresser le calcul des inconnues de vitesses et de forces.

Algorithme de résolution

Le schéma d'intégration utilisé dans la procédure d'application de la CD est implicite, mais exige une détermination explicite du réseau de contacts entre particules. La résolution d'une étape de la simulation considère simultanément la cinématique de chaque élément de l'échantillon modélisé et l'ensemble des collisions établies pour déterminer les vitesses et forces de contact grâce aux équations de la dynamique. Le système d'équations consécutivement construit est adressé par itérations successives d'après une méthode de type *Gauss-Seidel* non linéaire [142, 172]. La procédure algorithmique résout périodiquement la cinématique et la réaction de chaque contact listé en intégrant l'influence potentielle de toute autre impulsion déjà connue. Les itérations sont alors répétées jusqu'à l'atteinte d'un critère de convergence pour une solution générale décrivant l'évolution du système complet. Le schéma d'intégration implicite pour une étape est arrêté lorsqu'une solution stable et acceptable est donc trouvée. L'application de la méthode Gauss-Seidel aux équations de la dynamique (**eq. (2.14)**) généralisée pour l'ensemble d'un échantillon granulaire modélisé de n particules peut se traduire

comme suit :

$$M\Delta V = \mathbf{F} = \begin{cases} \mathbf{F}_1(p^{(t)}) \\ \mathbf{F}_i(p^{(t)}) \\ \mathbf{F}_n(p^{(t)}) \end{cases} = \begin{cases} \mathbf{F}_1(p_1^{(t)}, \dots, p_i^{(t)}, \dots, p_n^{(t)}) \\ \mathbf{F}_i(p_1^{(t)}, \dots, p_i^{(t)}, \dots, p_n^{(t)}) \\ \mathbf{F}_n(p_1^{(t)}, \dots, p_i^{(t)}, \dots, p_n^{(t)}) \end{cases} \quad (2.17)$$

- avec,

M , la matrice d'inertie du système; ΔV , la variation finie, ou saut, des vitesses entre les instants t et $t + \Delta t$; \mathbf{F} , la matrice des actions mécaniques extérieures formulée dans le repère global; $p^{(t)}$, les vecteurs qui portent les variables locales de la formulation des contacts pour chaque particule i .

La nouvelle formulation donnée par **eq. (2.17)** écrit les équations de la dynamique pour un assemblage de n particules modélisées comme un système de n équations non linéaires à n vecteurs inconnus. La méthode Gauss-Seidel propose itérativement plusieurs vecteurs solutions $p^{(t+\Delta t)}$ qui portent les inconnues des problèmes de contact associé à chaque particule i qu'elles soient calculées pour les instants t , $p_i^{(t)}$, ou $t + \Delta t$, $p_i^{(t+\Delta t)}$. L'itération pour le cas de la résolution du contact i est arrêtée lorsqu'un vecteur $p^{(t+\Delta t)}$ vérifie l'équation du repère global F_i en satisfaisant un critère de convergence η . Le développement pratique de la méthode est décrit ci-dessous :

Axiome : Soit $p^{(t)} = (p_1^{(t)}, \dots, p_i^{(t)}, \dots, p_n^{(t)})$ le vecteur portant l'état des n particules du système à l'instant t , le vecteur $p^{(t+\Delta t)} = (p_1^{(t+\Delta t)}, \dots, p_i^{(t+\Delta t)}, \dots, p_n^{(t+\Delta t)})$ de l'incrément de temps suivant $t + \Delta t$ se calcule avec la méthode de Gauss-Seidel comme suit.

Étape 1 : Résolution du problème de contact de la particule **1** : calcul de $p_1^{(t+\Delta t)}$, connaissant les états des autres éléments du système $(p_2^{(t)}, \dots, p_n^{(t)})$, comme solution de l'équation $\mathbf{F}_1(p_1^{(t+\Delta t)}, p_2^{(t)}, \dots, p_n^{(t)}) = \eta$.

Étape i : Résolution du problème de contact de la particule **i** : calcul de $p_i^{(t+\Delta t)}$, connaissant les états des autres éléments du système $(p_1^{(t+\Delta t)}, \dots, p_{i-1}^{(t+\Delta t)}, p_{i+1}^{(t)}, \dots, p_n^{(t)})$, comme solution de l'équation $\mathbf{F}_i(p_1^{(t+\Delta t)}, \dots, p_{i-1}^{(t+\Delta t)}, p_i^{(t+\Delta t)}, p_{i+1}^{(t)}, \dots, p_n^{(t)}) = \eta$.

Étape n : Résolution du problème de contact de la particule **n** : calcul de $p_n^{(t+\Delta t)}$, connaissant les états des autres éléments du système $(p_1^{(t+\Delta t)}, \dots, p_{n-1}^{(t+\Delta t)})$, comme solution de l'équation $\mathbf{F}_n(p_1^{(t+\Delta t)}, \dots, p_{n-1}^{(t+\Delta t)}) = \eta$.

La formulation non régulière de la mécanique et donc des lois de contact entre particules ne permet pas de garantir l'unicité de la solution rendue pour la collision de particules

parfaitement rigides. La procédure d'intégration retenue par la CD reportant les valeurs des vitesses et forces déterminées précédemment à l'initiation de chaque nouvelle étape de calcul restreint la variation des solutions accessibles par l'algorithme à une grandeur généralement inférieure à la résolution de convergence choisie. Le critère de convergence est souvent exprimé comme un critère de normalisation du calcul des forces de réactions relativement à leurs normes établies à l'étape directement précédente. Plusieurs critères existent et il est possible de s'adapter à l'étude considérée. Le critère de convergence de Moreau recherche par exemple l'approximation de la stabilité des forces de contact ⁴.

Choix de la méthode numérique

La formulation régulière de la mécanique donnée par les méthodes numériques aux éléments discrets standards (DEM) approche les contacts particulières en leur attribuant des modèles harmonisés pseudo-élastiques. La définition de lois de forces comme des expressions différentiables permet une intégration temporelle explicite des équations du mouvement pour résoudre l'état des systèmes modélisés. L'un des principaux défauts d'une telle approche réside dans le choix de l'approximation des lois de contacts qui nécessite l'utilisation d'incrément de temps très réduits pour assurer la stabilité numérique des solutions données par les méthodes de résolution. L'habitude est alors l'introduction d'amortissements artificiels dans les modèles d'interactions, comme décrits précédemment, malheureusement capables d'altérer la qualité des simulations et donc les comportements simulés.

Des travaux d'optimisation ont donc cherché une formulation stricte des interactions mécaniques avec l'objectif d'assurer la robustesse des analyses numériques. La dynamique des contacts a ainsi été développée en réponse avec l'application de lois de contacts non régulières et l'intégration implicite des équations du mouvement. La méthode suppose des contacts dissipatifs et ne nécessite pas le lissage de la loi de friction de Coulomb ou du modèle hertzien élastique. La suppression du détail de telles relations permet de réaliser les simulations avec des pas de temps allongés. Le cadre de la mécanique non régulière supprime partiellement l'incertitude sur la détermination des forces et de la cinématique des systèmes. Les approximations potentielles de calculs sont alors utilisées pour ajuster la précision de la méthode. Des adaptations de l'incrément de temps ou des critères de convergence choisis peuvent toujours être considérées si les dépassements et déviations de résolution apparaissent trop significatifs. La méthode CD ne considère plus de déformations virtuelles des contacts et l'important réside désormais dans les procédures de détection des collisions. L'algorithme identifie chaque point

4. Si le lecteur souhaite obtenir davantage de détails sur la théorie des méthodes numériques aux éléments discrets, et plus particulièrement sur la formulation des algorithmes de calcul introduits par la dynamique des contacts, il est encouragé à s'intéresser aux références [142, 172, 184].

de contact défini entre éléments dans le repère local pour déterminer les forces de réaction en conséquence. Une seule force résultante pondérée est ensuite appliquée par contact binaire au barycentre de chaque particule dans le repère global au terme de la résolution. La stratégie de détection imaginée par la CD est générale et s'étend notamment à la caractérisation d'impacts entre particules anguleuses exposant des définitions d'interactions différentes. Le cas de la modélisation de polyèdres se doit par exemple de composer avec des contacts ponctuels, linéaires ou surfaciques représentés par un ou plusieurs points d'interaction (**fig. 2.39**) [141]. L'usage de la DEM classique se révèle incapable de traiter de tels modèles de collision de

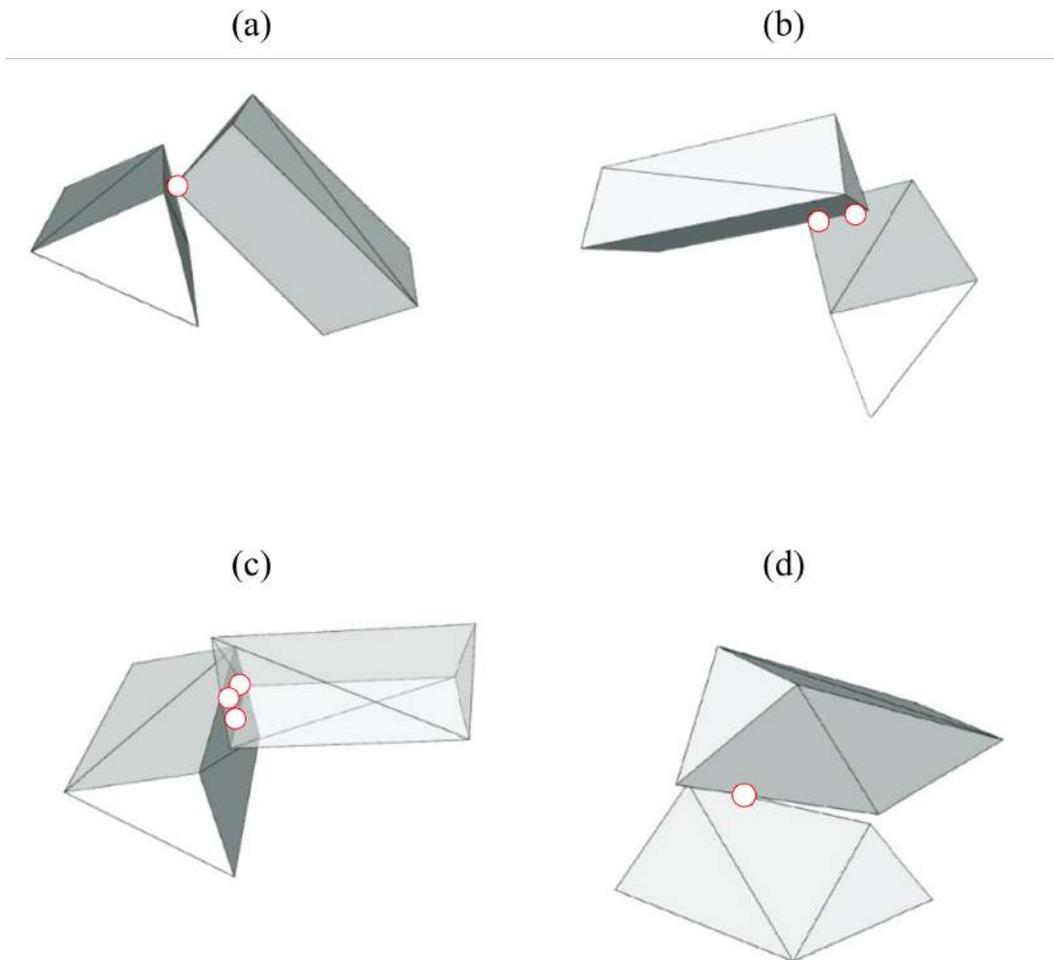


FIGURE 2.39 Représentations des différents types de contacts observables entre deux polyèdres : (a) sommets-face ; (b) arête-face ; (c) face-face ; (d) arête-arête. Les points de contacts identifiés sont représentés comme des cercles blancs (Tiré de Azéma et al., 2013a).

par le traitement explicite réservé aux interactions normales, surtout approprié à la gestion des chocs ponctuels entre corps sphériques. Il serait dès lors nécessaire d'implémenter des lois spécifiques à chaque type de contact afin de compléter les modèles DEM standards pour

envisager des applications similaires. La formulation de la CD lève naturellement de pareilles limitations en appliquant diverses procédures de détection des contacts susceptibles d'évoluer en fonction des besoins de simulation [140, 185–187].

L'utilisation de la CD comme technique de modélisation discrète se révèle donc particulièrement adaptée au cadre de l'étude présentée. Le recours à la dynamique des contacts pour la réalisation des simulations numériques est justifié par une recherche de la reproduction fidèle d'échantillons de roches stériles aux formes anguleuses et le besoin d'une transcription rigoureuse des interactions mécaniques entre particules. L'introduction de l'usage des techniques aux éléments discrets pour les études des phénomènes de ségrégation et stratification des matériaux granulaires est apparue efficace. L'extension de tels travaux à la formulation particulière de la dynamique des contacts s'inscrit ainsi parmi les efforts de démocratisation de solutions logicielles complexes pour la résolution de problèmes de terrain.

2.3.5 LMGC90

LMGC90 est un logiciel développé dans le Laboratoire de Mécanique et Génie Civil (LMGC) de l'Université de Montpellier (France), aussi laboratoire du Centre National de Recherche Scientifique (CNRS), sous l'impulsion de Jean et Dubois [188]. LMGC90 est une nouvelle implémentation de la CD non régulière au sein d'un outil de simulation codé avec **Fortran 90** et dont l'utilisation nécessite la maîtrise du langage de programmation **Python**. Il s'agit d'un logiciel open-source et modulable qui adresse majoritairement le développement et l'application de travaux de recherche. Les principaux domaines d'étude ayant recours à LMGC90 sont la géotechnique, le génie civil et la biomécanique (**fig. 2.40**).

Les études numériques présentées dans le cadre de ce travail sont développées et réalisées exclusivement grâce à LMGC90. Le logiciel est capable de créer des collections de particules rigides ou déformables et de formes diverses, en 2D ou 3D, puis de les soumettre à sollicitation. Les systèmes ainsi modélisés sont résolus à l'aide de méthodes qui regroupent de nombreux algorithmes théoriques issus de l'héritage de la mécanique non régulière [189–193].

La plate-forme LMGC90 utilise les développements de la CD et ses derniers perfectionnements. La méthode numérique non régulière implicite est robuste et efficace pour simuler de larges collections de solides avec la description d'impacts et de contacts frictionnels. La contrepartie de l'emploi de cet outil réside alors dans la nécessité de définir avec rigueur les échantillons granulaires modélisés, la complexité grandissante des systèmes avec la génération de formes particulières de particules et les temps de calcul non négligeables induits.

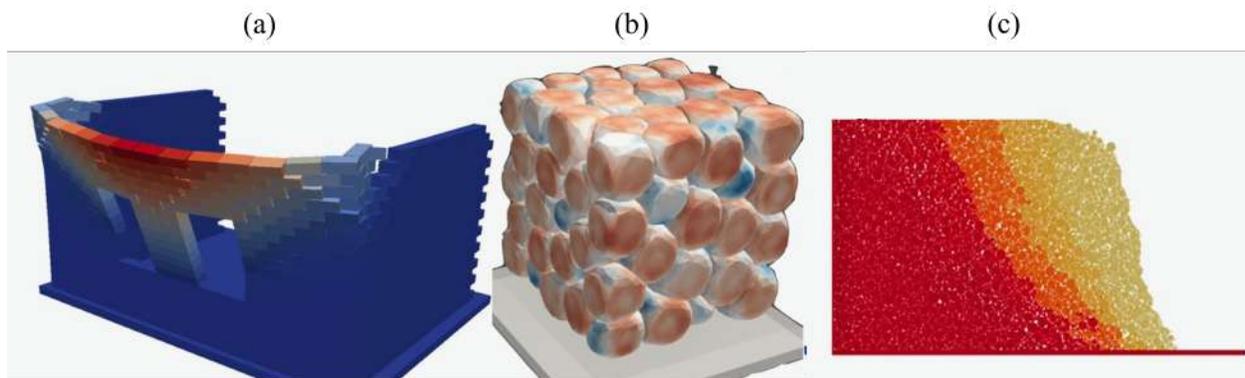


FIGURE 2.40 Exemples illustrés d'applications du logiciel LMGC90 à différents domaines d'étude : (a) maçonnerie ; (b) mécanique des matériaux déformables ; (c) physique granulaire (Tiré d'une publication internet [LMGC90](#)).

*

La majorité des grandeurs et mesures, exprimées par les équations montrées dans les sections traitant des interprétations des essais numériques présentés (renvoi à **Secs. 4 et 5**), est issue des fichiers historiques des simulations (*logs*) LMGC90. Les lectures interactives des mêmes fichiers pour rassembler les informations recherchées et les implémentations des relations proposées pour procéder aux calculs consécutifs sont aussi réalisées à l'aide de codes complémentaires rédigés en Fortran 90.

2.4 Synthèse et critique de la revue de littérature

La gestion d'importants volumes de rejets miniers de type roches stériles est assurée par la construction des haldes à stériles sur les sites d'exploitation. De tels empilements sont le lieu de stockage de plusieurs millions de tonnes de matériau et leur qualité d'ouvrages de restauration fait de la question de leur stabilité un sujet d'importance. Les techniques populaires de construction des empilements de roches stériles sont remarquées pour initier la ségrégation du matériau déposé au cours de son transport à la surface libre des dépôts. Le développement de mécanismes de granoclassement est alors capable de causer l'altération de l'intégrité des haldes avec la formation, de schémas, de distributions hétérogènes des stériles miniers dans les structures internes des empilements. L'apparition de schémas de déposition est principalement fonction de l'exposition de disparités des propriétés de tailles et

de formes des particules. Les schémas rapportés dans les empilements de roches stériles sont majoritairement ségrégués ou stratifiés. La prédiction des mécanismes de granoclassement est donc d'un intérêt certain pour les activités minières sur site. Il n'existe pourtant encore aucun moyen pratique proposant la projection ou la mesure de l'intensité de tels phénomènes précédant les opérations de déposition des roches stériles.

La reproduction d'écoulements granulaires en laboratoire est effectuée avec la répétition d'essais de déposition de matériaux choisis dans des cellules étroites, quasi-2D. L'étude des phénomènes de ségrégation et de stratification dans les empilements granulaires est un sujet dont l'approche n'est pas rendue simple tant il existe de paramètres susceptibles d'influencer les schémas de granoclassement observés après déversement. Une hiérarchie des impacts de l'ensemble des facteurs connus n'est d'ailleurs pas établie et les travaux de la littérature ne s'accordent pas tous sur le traitement systématique de certains paramètres, ce qui renforce les incertitudes de détermination des phénomènes rapportés. Les différentes observations rassemblées (**tab. 2.3**) se résument alors plus à un ensemble de conclusions empiriques desquelles il apparaît encore difficile de tirer des interprétations fondées. Des travaux de reproduction d'essais expérimentaux au travers de modèles numériques, comme tout récemment menés, semblent une procédure de travail adaptée à la réalisation de progrès dans la résolution du problème de prédiction des phénomènes de granoclassement. Il n'existe pourtant, à notre connaissance, encore aucun modèle numérique discret complet adapté à la prédiction de dépositions ségréguées ou stratifiées.

Les méthodes numériques de type DEM sont particulièrement développées pour la résolution de systèmes granulaires dynamiques, leur emploi est donc logique pour l'étude numérique des phénomènes de granoclassement. Enfin, la DC, comme prolongement de la DEM avec la traduction non régulière de la mécanique, est un moyen sophistiqué, mais dont l'utilisation garantit la qualité des simulations réalisées. L'accès à des techniques de modélisation intégrant la DC est disponible avec le logiciel LMGC90.

CHAPITRE 3 ESSAIS RÉELS DE DÉPOSITION

D’après la définition de l’objectif spécifique OS1 du projet de recherche, les développements du présent chapitre entendent reproduire expérimentalement la déposition de mélanges granulaires exposant des schémas de granoclassement. L’objectif est notamment de se prouver l’apparition “spontanée” des schémas particuliers de stratification dans des cellules d’essai étroites au cours du déversement de mélanges granulaires, et de quantifier les résultats obtenus quant aux géométries d’empilements et aux distributions des régions de déposition granoclassées. Le chapitre détaille les préparations et le déroulé des expériences réalisées. Les résultats sont ensuite comparés à des précédents publiés pour en justifier les observations.

3.1 Méthodologie expérimentale

Le contexte et l’environnement dans lesquels la partie expérimentale de l’étude s’est déroulée sont tout d’abord précisés. La fabrication de l’appareillage et la sélection des échantillons sont expliquées. Les procédures appliquées pour la mise en œuvre des essais sont résumées depuis leur élaboration jusqu’à leur interprétation.

Contexte de reproduction des essais

Les essais présentés ont été réalisés dans le courant de l’été 2020. Le contexte sanitaire et les mesures en vigueur ont restreint l’accès aux laboratoires de l’école ainsi qu’à du matériel approprié pour réaliser des pratiques et acquisitions rigoureuses dans les meilleures conditions.

3.1.1 Fabrication de la cellule de déposition

La conception de la cellule de test est la première étape pour la reproduction des expériences. Le banc d’essai est dessiné d’après la documentation disponible, qu’il s’agisse d’articles (renvoi à **Sec. 2**) ou de médias photo et vidéo (**fig. 3.1.a**¹). L’appareil est fabriqué dans un local domestique avec des moyens matériels limités. Un schéma de la cellule de test est donné **fig. 3.1.b** et ses dimensions sont rappelées par le **tableau 3.2**. Les parois étroites de déposition (le long de D) sont réalisées en bois et les parois latérales (le long de L) sont découpés dans du verre. Il est bon de préciser que les façades de la cellule ne sont pas traitées avec un nettoyant antistatique (comme la littérature peut le suggérer [8]); des interactions électrostatiques sont de fait susceptibles de se développer entre les particules et les murs latéraux.

1. <https://www.youtube.com/watch?v=CpZaRn0Bez0>, lien en clair pour les versions imprimées.

Les quatre parois sont finalement jointes par des pinces à ressort. La cellule est assemblée et déclarée prête à l'emploi après s'être assuré de son équilibre.

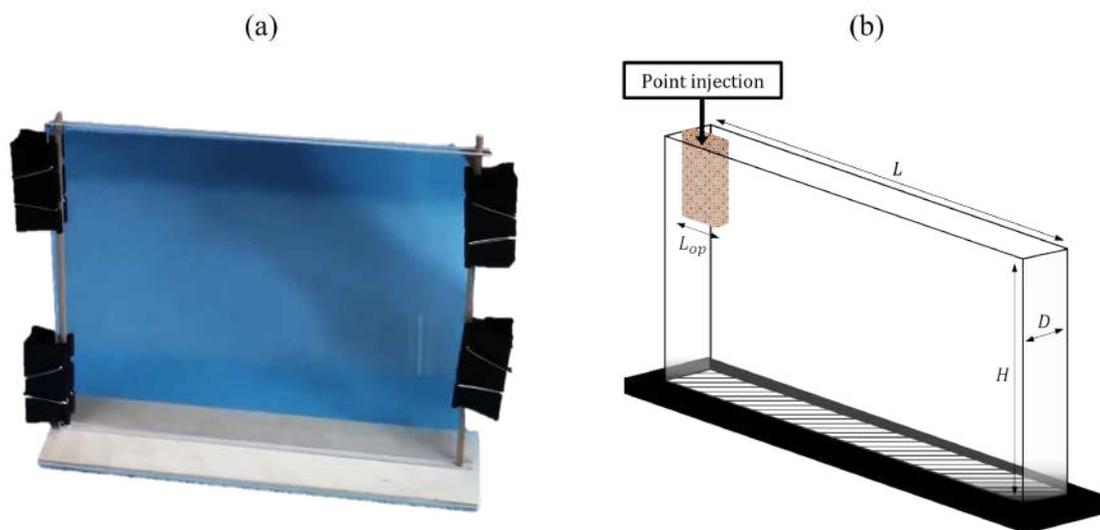


FIGURE 3.1 Photographie d'une cellule de déposition fabriquée hors laboratoire (Tiré de la vidéo *Mathematical impressions: spontaneous stratification*) (a); (b) schéma conceptuel associé d'une cellule d'essai quasi-2D.

3.1.2 Sélection des matériaux granulaires

La sélection des matériaux pour la réalisation des mélanges granulaires à déverser est la seconde phase de préparation des essais. L'idéal est de concevoir artificiellement des échantillons bidisperses avec des variations de tailles, mais également de formes pour décrire un scénario relativement favorable à l'apparition des phénomènes de granoclassement étudiés. Le défi est alors de constituer des mélanges de deux populations de grains introduits avec la même fraction massique ($m_{LS} = 1$) et présentant les différences de propriétés recherchées, le tout sans outil de mesure ou de détermination précis à disposition pour caractériser chaque échantillon. Les matériaux recherchés doivent également être secs et faiblement ou non cohésifs. Une différence de couleur entre chaque espèce de grains est aussi souhaitée afin de les dissocier au cours de la déposition et pour d'éventuelles photographies.

Il est donc choisi de s'orienter vers des composants de mélanges présentant des disparités prononcées et visibles à l'œil nu, ou justifiables à l'aide d'informations vérifiées. Quatre matériaux sont ainsi rassemblés pour créer deux échantillons granulaires bidisperses avec des variations de tailles, de formes et de couleur entre chaque population de particules. Un matériau est prélevé en nature et les trois autres sont des produits manufacturés (dont les informations sont donc rendues disponibles et renseignées dans le **tableau 3.1**) :

- Le **premier mélange** (fig. 3.2) est constitué d'un sable prélevé du lit d'un ruisseau puis séché au four avant utilisation, et d'un sucre alimentaire rouge en cristaux.
- Le **second mélange** (fig. 3.3) est constitué d'un sable fin de couleur blanche et d'un sable grossier anguleux dont les grains sont teints en noir. Les deux matériaux sont initialement vendus comme des produits de décor pour aquarium.

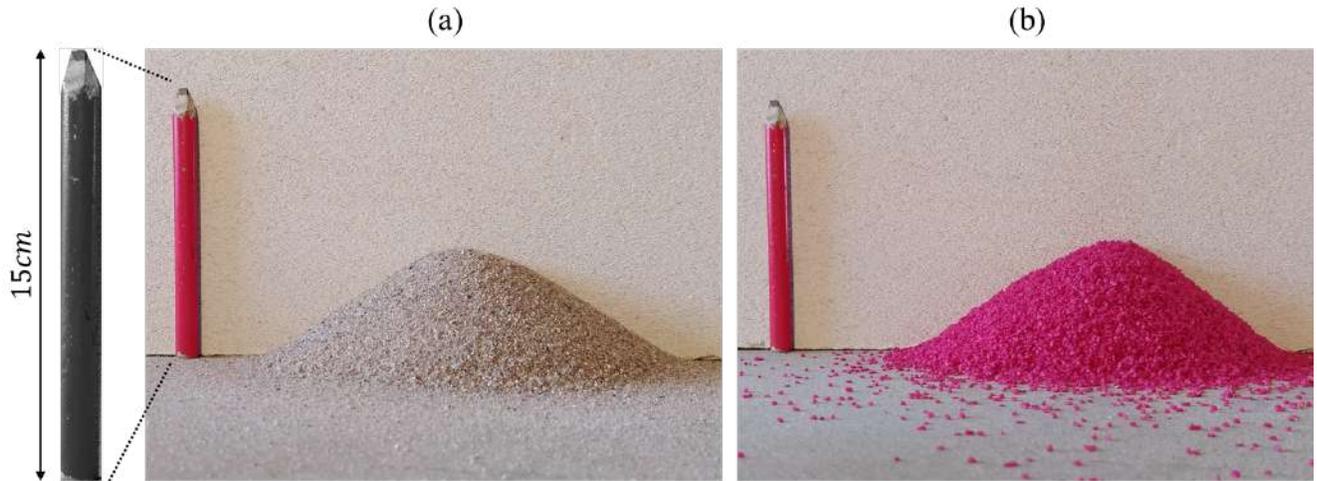


FIGURE 3.2 Premier mélange granulaire bidisperse composé (a) de grains blancs fins arrondis et (b) de particules rouges grossières anguleuses. Le rapport des tailles des grains est estimé tel que 1:2.

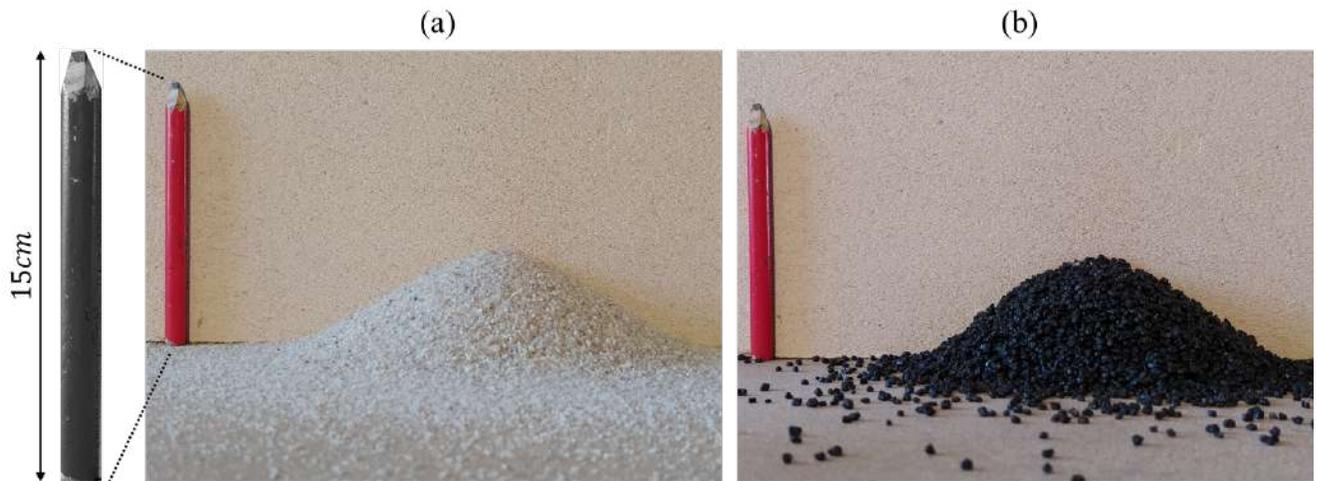


FIGURE 3.3 Second mélange granulaire bidisperse composé (a) de grains blancs fins arrondis et (b) de particules noires grossières anguleuses. Le rapport des tailles des grains est estimé tel que 1:4.

3.1.3 Réalisation des mélanges bidisperses

Le mélange des matériaux par paire n'est pas directement effectué puisque des manipulations sont d'abord réalisées pour tenter d'estimer un angle de repos β propre à chacun (**tab. 3.1**). Les prises de vues et les modes opératoires pour les essais ne sont pas d'une qualité comparable à celle d'un laboratoire (renvoi à **Sec. 2.3.5**). Les estimations d'angle de repos β consistent en un dépôt lâche d'une masse de $m_{ech} = 750g$ de chaque matériau sous forme de pile par le renversement d'un conteneur situé à une hauteur de $h = 300mm$ au-dessus d'une surface boisée plane. Chaque opération est répétée dix fois pour chacun des quatre matériaux et le calcul de la moyenne des dix mesures donne enfin une valeur approchée de β . La méthode de mesure des angles de repos est schématisée par **fig. 3.4** et β se calcule tel que $\tan(\beta) = 2H_{dump}/L_{dump}$.

TABLEAU 3.1 Description des compositions des mélanges granulaires bidisperses utilisés dans la réalisation des essais réels de déposition.

PARAMÈTRE	1-fin	2-grossier	Rapport des tailles R, s_r
Diamètre moyen des particules $\langle d \rangle$ (mm)	≈ 0.50	1.00 ± 0.05	2.0, 1/2
Masse volumique sèche ρ (g/cm ³)	sables	1.59	-
Angle de repos estimé β (°)	≈ 30	≈ 35	-
Couleur de matériau	blanc	rouge	-
Diamètre moyen des particules $\langle d \rangle$ (mm)	0.75 ± 0.10	3.00 ± 0.50	4.0, 1/4
Masse volumique sèche ρ (g/cm ³)	1.60	1.60	-
Angle de repos estimé β (°)	≈ 29	≈ 36	-
Couleur de matériau	blanc	noir	-

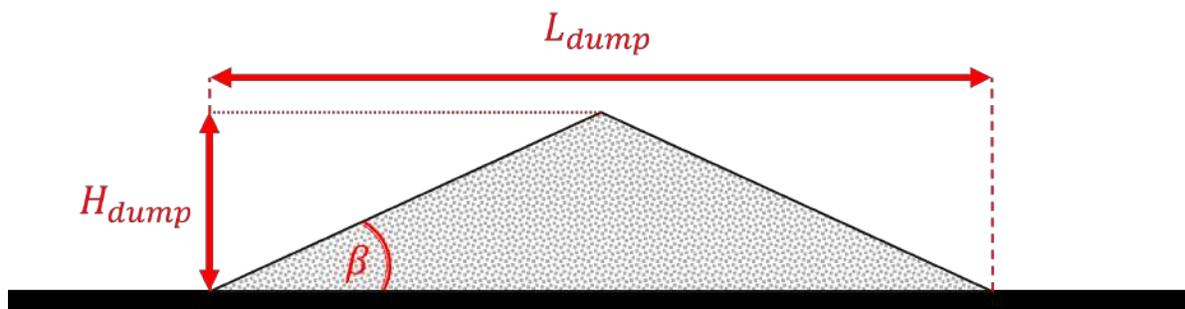


FIGURE 3.4 Représentation schématique de la méthode de mesures d'angles de repos β .

Les deux mélanges sont ensuite effectués et affichent chacun une masse $m_{ech} = 1,500g$ (soit l'addition de $m_{ech} = 750g$ pour chaque composant) après l'incorporation des matériaux. Ils sont alors placés dans des conteneurs qui servent de versoir ou de systèmes d'approvisionnement et les essais peuvent débuter.

3.1.4 Procédure de dépôt

Les essais sont répétés à deux reprises pour chacun des mélanges. Les paramètres contrôlés ou calculés au cours des expériences sont résumés par le **tableau 3.2**.

La déposition des échantillons bidisperses est filmée puis des prises de vues sont réalisées au terme de la construction de la pile (**figs. 3.5 et 3.6**). Le déversement est chronométré pour déterminer le flux massique moyen de la déposition f . Le visionnage de la réalisation d'une partie des essais est disponible en suivant ce [lien](#)².

TABLEAU 3.2 Dimensions des cellules d'essais physiques, paramètres de préparation des échantillons granulaires et de procédure des dépositions.

PARAMÈTRE	VALEUR
Longueur de cellule, L (mm)	500
Hauteur de cellule, H (mm)	500
Largeur de cellule, D (mm)	20
Longueur d'ouverture, L_{op} (mm)	≤ 30
Masse de mélange déposée, m_{ech} (g)	1,500
Ratio de masses, m_{LS}	1
Rapport de tailles, R, s_r	2,1/2 ou 4,1/4
Disparité de formes	oui
Débit massique de déposition, f (g/s)	10 à 30
Débit volumique de déposition, Q (cm ³ /s)	10.4 à 31.2
Débit surfacique de déposition, q (cm ² /s)	5.2 à 16.1
Hauteur d'injection, h (mm)	500

3.2 Exploitation des essais réalisés

La confection des échantillons bidisperses artificiels, contrainte par un accès à des ressources restreintes, positionne d'ores et déjà les quelques essais réalisés dans des lieux jusqu'alors inexplorés pour l'étude des phénomènes de ségrégation et stratification dans les cellules étroites. La déposition d'échantillons exposant des intervalles de tailles plurimillimétriques, non référencés avant de récentes études expérimentales [119], et une disparité de formes n'a en effet pas encore été documentée à ce jour pour l'étude de schémas de granoclassement dans les

2. <https://youtu.be/JXRBnuN6R0I>, lien en clair pour les versions imprimées.

piles [8, 95, 108, 110, 115, 121–124]. L’absence de précédent est tenue en compte pour l’interprétation et la comparaison des résultats présentés.

3.2.1 Observations des résultats

Le média vidéo mis à disposition et les photographies réalisées au terme des dépositions (**figs. 3.5 et 3.6**) ont permis de dresser les observations des essais.

Description de schémas de granoclassement

Chaque répétition pour chaque déposition d’échantillons bidisperses démontre l’apparition “spontanée” de schémas de stratification. Les photographies présentent clairement l’établissement de couches alternées de chacun des composants du mélange considéré. Les bandes formées sont parallèles à la surface libre du dépôt. L’initiation des mécanismes de stratification n’est cependant pas immédiate et il faut patienter au début de la construction de la pile avant de voir le granoclassement s’opérer. La période de dépôt introductive prend fin avec le développement de butées qui opposent le repos des deux espèces du mélange à des angles β différents : les grains grossiers anguleux sont alors retrouvés au pied de la construction quand les petits grains plus arrondis arrêtent leur course près du point de déposition. La rupture des butées intervient avec le développement d’avalanches qui servent consécutivement de moyens à la ségrégation cinétique des deux espèces de particules.



FIGURE 3.5 Schémas d’empilements comme résultats obtenus au terme des dépositions du premier mélange granulaire dans une cellule d’essai quasi-2D.

Les différences notables entre les schémas d’empilements observés apparaissent fonctions des mélanges déposés. Les schémas des piles construites présentent N_λ bandes de stratification ou “paires de bandes”, de longueurs d’onde λ associées. Une longueur d’onde λ est mesurée



FIGURE 3.6 Schémas d'empilements comme résultats obtenus au terme des dépositions du second mélange granulaire dans une cellule d'essai quasi-2D.

comme l'addition des épaisseurs de deux couches de grains d'espèce différente consécutives. La méthode de mesure de λ pour un empilement est schématisée par **fig. 3.7**, avec la longueur d'onde définie telle que $\lambda = N_\lambda / L_\lambda$. Les essais de déposition réalisés avec le premier mélange rapportent des mesures de N_λ supérieures, et de λ inférieures, aux mesures obtenues avec les essais utilisant le second échantillon. Les schémas de stratification observés avec la déposition du premier mélange sont également légèrement plus déterminés.

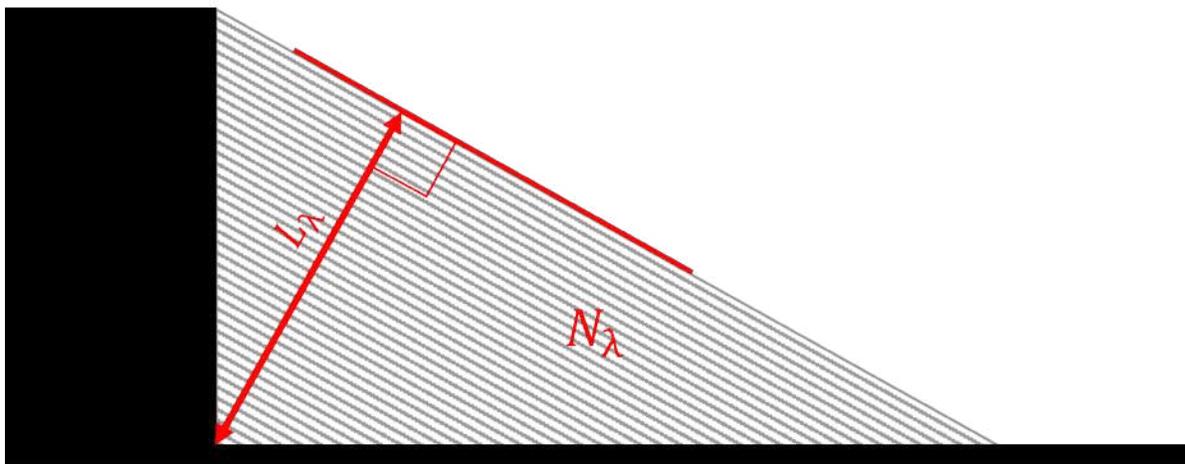


FIGURE 3.7 Représentation schématique de la méthode de détermination des longueurs d'onde λ des bandes dans le cas d'empilements stratifiés.

Les différents résultats qualitatifs et quantitatifs détaillés sont rassemblés dans le **tableau 3.3**.

TABLEAU 3.3 Description des schémas d'empilements réels obtenus.

PARAMÈTRE	Premier mélange	Second mélange
Couleur des matériaux	blanc/rouge	blanc/noir
Diamètre moyen des particules $\langle d \rangle$ (mm)	0.75	1.87
Nombre de particules selon D , $D/\langle d \rangle$	26.67	10.69
Observation du mécanisme de butée (<i>kink</i>) : OUI/NON	OUI	OUI
Nombres de bandes N_λ	10	7 à 8
Longueur d'onde moyenne des bandes $\bar{\lambda}$ (mm)	26 à 28	35 à 40
Angle de repos β (°)	39 à 41	40 à 42
Nombre de répétitions de dépositions	2	2

Phénomène de ségrégation préalable à l'injection et rebonds de particules

Il est aussi intéressant de porter un regard sur le système d'injection des mélanges utilisé au cours des essais : les mélanges quittent le conteneur pour être déposés dans la cellule en exhibant un écoulement déjà ségrégué avec les grains grossiers au sommet de l'écoulement et les grains fins dans sa partie inférieure. De légers effets de rebonds de particules au moment de leur déposition sont enfin remarqués, mais leur influence est faible puisqu'ils n'influencent pas les schémas développés dans les empilements.

3.2.2 Interprétations des résultats

Formation et variations des schémas de granoclassement

L'organisation des dépôts des échantillons correspond aux attentes théoriques puisque l'ordre d'alternance des matériaux est vérifié et confirme la bonne reproduction des cinématiques de ségrégation respectivement dirigées par les disparités de tailles et de formes entre les deux populations de particules. Les différences d'angles de repos entre les espèces de grains sont responsables de la formation des butées à la surface libre de la pile. L'instabilité des formations de butées résulte en avalanches au cours desquelles les mêmes différences de propriétés favorisent la ségrégation cinétique du mélange au travers de l'écoulement : les particules grossières gagnent le front de l'avalanche et les hauteurs du flot alors que les particules fines percolent vers l'intérieur du dépôt. Le dépassement de l'étape d'initiation de l'empilement avant l'apparition des bandes de stratification est expliqué par l'exposition d'une longueur de pente suffisante pour laisser la ségrégation cinétique s'opérer et former les schémas d'alternance observés.

La variation des fréquences d'apparition des bandes de stratification et de leur longueur d'onde en fonction des échantillons peut être imputée au diamètre moyen $\langle d \rangle$ de chaque mélange rapporté à la largeur de la cellule fixée D . Les évolutions remarquées suivent pourtant une corrélation inverse à celle imaginée avec le ratio $D/\langle d \rangle$ qui traduit l'influence des parois de déposition sur les mécanismes de granoclassement en exprimant le nombre moyen de particules sur la largeur du dépôt. La théorie [121] décrit l'augmentation de λ avec la diminution de D mais il est également possible d'imaginer un frein du développement de la ségrégation cinétique pour des valeurs de $D/\langle d \rangle$ faibles. La constatation de la variation des longueurs d'onde au cours d'une même déposition est attribuée aux fluctuations de débit massique d'injection de l'échantillon f directement conséquences du contrôle manuel des essais (renvoi aux médias vidéos). Les limites des conditions de reproduction des expériences sont alors démontrées. Une cause similaire est retenue comme explication potentielle de la variation des schémas entre les dépositions des deux mélanges.

Ségrégation préalable à la déposition des matériaux

L'observation d'une ségrégation anticipée des mélanges avant leur déversement peut-être simplement expliquée. L'inclinaison du conteneur pour permettre la déposition des échantillons constitue une géométrie semblable à une rampe inclinée dont le parcours par le transport des mélanges jusqu'à leur versement dans la cellule cause une ségrégation cinétique préalable aux mécanismes développés par la construction de la pile. Le phénomène est simplement remarqué et son influence semble difficilement mesurable puisque le moindre remaniement de ses échantillons est censé initier leur ségrégation. Il est donc considéré qu'une telle constatation est naturelle et ne doit pas influencer le développement des mécanismes de granoclassement initiés par la construction du dépôt.

3.3 Comparaison des résultats des essais aux travaux et données existants

Il est choisi de limiter le panel des références auxquelles mesurer nos essais à des études exposant des conditions similaires de réalisation. La comparaison qualitative des résultats obtenus ne s'effectue donc qu'en rapport avec de précédents travaux considérant des échantillons bi-disperses en termes de tailles et de formes des grains, ou d'autres mélanges déposés à des intervalles de débits d'injection approchant ceux mesurés dans le cadre de l'étude présentée.

3.3.1 Dépôts de mélanges avec disparité des formes de grains

Deux uniques références issues du **tableau 2.3** proposent des diagrammes de phase pour la déposition de mélanges bidisperses incluant des disparités de formes entre les populations de particules et démontrent des schémas de stratification, respectivement pour différentes valeurs de R (**fig. 3.8.a**) et des couples de paramètres $(f, D)^3$ (**fig. 3.8.b**) [110, 121]. Les diagrammes sont repris et adaptés avec l'affichage d'intervalles d'intérêt comme des zones rouges correspondant aux conditions décrites par les essais présentés dans le chapitre. Les travaux cités ne mentionnent cependant que des mélanges dont les tailles sont limitées par $\langle d \rangle \leq 0.8mm$, ou des largeurs de cellules et de débits massiques également inférieurs aux paramètres des expériences rapportées dans ce document. Les régions des diagrammes passées en rouge sont de fait des faisceaux qui extrapolent les résultats publiés pour estimer les schémas de granoclassement obtenus. La méthode permet alors de vérifier que, pour les paramètres rappelés dans le **tableau 3.2**, des schémas de stratification étaient attendus avec les essais reproduits.

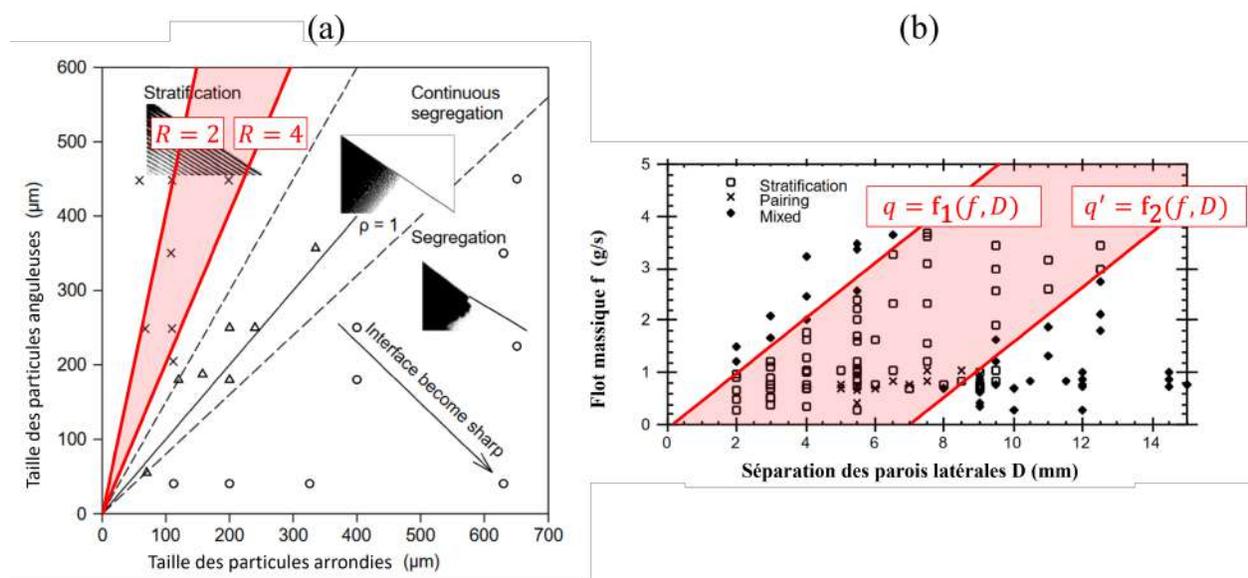


FIGURE 3.8 Comparaison des paramètres explorés par les essais physiques de dépositions (soulignés en rouge) aux diagrammes de prédiction des schémas d'empilements issus de précédents de la littérature pour des dépositions de mélanges granulaires bidisperses en termes de tailles et de formes des particules. Diagramme de phase (adapté de Grasselli et al., 1998) (a); (b) diagramme de phase pour un rapport de tailles tel que $R = 2$, (adapté de Koeppe et al., 1998).

3.3.2 Exemples d'essais identifiés par débits de déposition

3. À chaque couple de valeurs (f, D) est attribuable un débit surfacique de déposition q , comme introduit depuis le **tableau 2.2**, d'où les annotations de **fig. 3.8.b**.

Une seule référence issue de la littérature propose un diagramme de phase pour la déposition de mélanges bidisperses avec des débits massiques d'injection similaires à ceux déterminés pour les essais de l'étude et démontre des schémas de stratification [94]. Le diagramme est repris et adapté avec l'affichage des intervalles de paramètres physiques de déposition reproduits comme des zones rouges (**fig. 3.9**). Les régimes de déposition explorés par cette étude

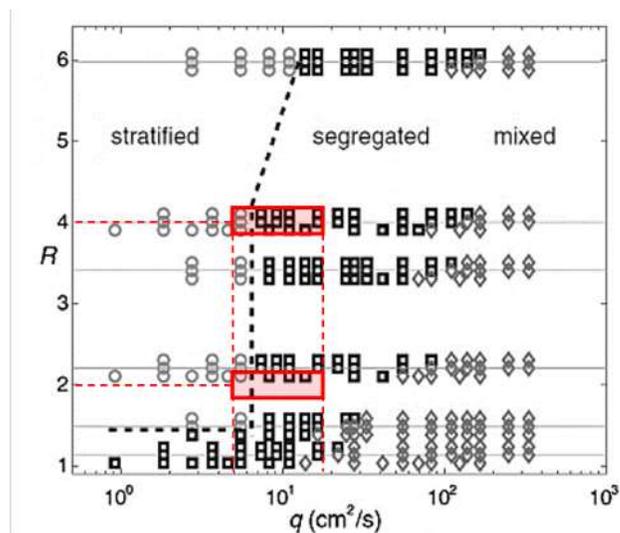


FIGURE 3.9 Comparaison des paramètres explorés par les essais physiques de dépositions (soulignés en rouge) aux diagrammes de prédiction des schémas d'empilements issus de précédents de la littérature pour des débits massiques de déposition variables dans le déversement de mélanges granulaires bidisperses en termes de tailles des particules (Adapté de Fan et al., 2012).

sont exprimés comme des valeurs de débits surfaciques q . Les empilements construits pour la réalisation du diagramme sont obtenus avec le déversement d'échantillons composés de deux populations de grains sphériques de tailles distinctes. Il est donc attendu que les mélanges assemblés intégrant des disparités de formes des grains vérifient les bandes de stratification observées pour des intervalles prédisant un même schéma de stratification avec les échantillons de l'étude d'origine, et potentiellement pour des intervalles annonçant la ségrégation ou l'homogénéisation des échantillons de particules sphériques [9]. Les corrélations évoquées sont en effet confirmées et tendent à prouver que la disparité de formes des grains demeure un facteur catalytique pour l'observation de phénomènes de stratification.

La comparaison des résultats aux travaux de la littérature vérifie les observations discutées et prouve la préparation rigoureuse et adaptée de la campagne d'essais pour la reproduction des mécanismes de stratification.

La réalisation des expériences présentées permet de vérifier les revues de connaissances données dans la littérature et de comprendre davantage le développement des schémas de granoclassement dans les empilements. La reproduction personnelle des essais aide à se saisir des enjeux et points critiques des dépositions. Des conditions favorables à l'obtention de dépôts ségrégués ou stratifiés et à incorporer dans des modèles numériques pour approfondir l'étude des phénomènes sont définies sur la base des observations expérimentales.

CHAPITRE 4 SIMULATIONS NUMÉRIQUES DE DÉPOSITION DE MÉLANGES GRANULAIRES BIDISPERSÉS

Les résultats obtenus après la réalisation des travaux expérimentaux rapportés dans le chapitre précédent ouvrent la voie au développement de simulations numériques sur la base des observations rapportées. Il est rappelé que l'objectif principal de ce travail est le développement de modélisations numériques capables de reproduire des mécanismes de ségrégation et de stratification en simulant la construction d'empilements granulaires. Pourtant, la création d'outils de modélisation ne cherche pas la reproduction exacte des essais physiques réalisés, mais préférentiellement de mettre en œuvre un outil numérique de reproduction des phénomènes de granoclassement dans les empilements granulaires.

En ce sens, l'approche numérique développée cherche à combler un vide dans les travaux scientifiques rapportés : reproduire qualitativement les phénomènes de granoclassement avec des modèles DEM basés seulement sur des propriétés physiques des grains - soit leurs tailles, formes, et coefficients de frottement de Coulomb au contact -, sans introduire aucun paramètre d'ajustement ou de calibration, tels que la résistance au roulement ou la rigidité élastique aux contacts. Un tel résultat est aligné avec l'objectif spécifique OS2, défini comme le développement des modèles numériques capables de démontrer des phénomènes de ségrégation. Finalement, le travail présenté dans le présent chapitre se tourne vers l'objectif spécifique OS3, qui consiste en des analyses quantitatives des résultats des simulations afin de déterminer des conditions propices et limites au développement de phénomènes de granoclassement.

Le déroulé du chapitre décrit les réflexions et les méthodes appliquées pour la modélisation numérique des cellules de déposition et des échantillons granulaires bidispersés. Le contrôle des paramètres des simulations de déposition est aussi détaillé, et différents essais numériques réalisés sont présentés et interprétés.

Un article de conférence intégrant une partie des résultats rassemblés dans le chapitre est enfin mis à disposition en annexes (**Ann. C**).

4.1 Méthodologie numérique

La reprise de la méthodologie appliquée pour la réalisation des expériences réelles propose de débiter la création des modèles numériques par la conception de l'environnement de déposition. La géométrie de la maquette numérique est définie par la conception de la cellule

d'essai imaginée pour les simulations. Plusieurs itérations de cellules ont été développées jusqu'à l'obtention d'un modèle satisfaisant. L'élaboration des premières simulations 2D a donc servi à l'évaluation de la pertinence de différentes géométries. La projection des mêmes modèles en 3D a ensuite cherché l'optimisation des solutions existantes.

4.1.1 Modélisation de l'environnement de déposition numérique

Le développement de l'environnement des simulations a débuté avec des exemples simples dans un espace en deux dimensions.

Cellules de déposition 2D

Quatre concepts de géométries distincts de cellules de déposition ont été reproduits, testés puis écartés ou conservés tour à tour.

- Une cellule pour la réalisation de dépôts pyramidaux classiques avec déchargement direct du matériau au centre. L'idée de la réalisation d'une pile entière est rapidement mise de côté en supposant la symétrie de la structure des empilements. La suppression de la moitié des dépôts représente une économie triviale des ressources de calcul nécessaires pour la réalisation des simulations ;
- Une cellule de dépôts pyramidaux avec entonnoir ou silo. L'utilisation d'un premier réservoir de particules introduit un nouvel aléatoire lié aux effets de son déchargement pour initier la déposition du mélange de grains. Le modèle reproduit un dispositif expérimental réel largement rapporté parmi les travaux existants lequel, pour l'objectif de premières simulations, représente une complexité supplémentaire dans la résolution du système numérique ;
- Une cellule de dépôts semi-pyramidaux avec rampe inversée d'injection. Un tel environnement de déposition reproduit l'exemple particulier des essais réels déjà présentés (renvoi à **Sec. 2.3.5**). Le déversement du matériau depuis une rampe intermédiaire cause l'agitation prononcée de la déposition et complexifie la résolution du système numérique. Le flot d'injection de l'échantillon granulaire termine sa course dans le conteneur avec un état de ségrégation avancé et les particules sont sujettes à de nombreux rebonds sur les parois de la cellule ou à la surface du dépôt. Le modèle est finalement abandonné pour le manque de contrôle qu'il induit sur la cinématique de déposition et les incertitudes de l'influence d'un déchargement agité pour l'obtention de schémas de granoclassement dans les empilements ;
- Une cellule d'empilements semi-pyramidaux avec déposition directe du matériau. Il

s'agit du modèle sélectionné pour les campagnes d'études numériques, il est donc repris et présenté à maintes reprises dans le développement des travaux qui suit.

Les dimensions des cellules modélisées sont calquées sur le modèle de la cellule expérimentale fabriquée pour la réalisation des essais réels et consignées dans le **tableau 4.4**. La dimension de la largeur D n'est logiquement pas précisée pour les environnements numériques en deux dimensions. Des visualisations sous forme de prises de vues ou de médias vidéos des exemples de géométries de cellules évoquées sont notamment données en annexes (**Ann. A**).

La gestion des frottements exercés par les parois latérales des cellules et l'expression de la rugosité de leur base est un autre biais de la conception des environnements de déposition. Il est simplement choisi de n'implémenter aucune loi de frottement entre les grains et les parois latérales pour transcrire les traitements antistatiques régulièrement précisés dans la littérature. La rugosité des bases des cellules est alors exprimée soit par l'application de lois de frottement particulières pour contrôler les aptitudes de roulement des particules sur des surfaces planes ou par la création de bases aux géométries irrégulières.

Cellules de déposition 3D

Le recours aux environnements 3D est justifié par la volonté de développer des modèles semblables aux essais physiques, notamment après la constatation de limites attribuées aux espaces en deux dimensions et discutées **Sec. 4.3**. La géométrie conservée à la suite des premières simulations numériques d'une cellule d'empilements semi-pyramidaux (avec déposition directe du matériau) est reproduite avec l'ajout d'une dimension de largeur D . Les cellules modélisées dans les espaces en trois dimensions sont de fait des environnements finis dont la réalisation permet l'étude comparative des dépositions avec des exemples réels.

Une représentation schématique de l'environnement numérique reproduit est donnée **fig. 4.1**. La conception proposée simule la déposition complète d'empilements granulaires depuis la phase d'initiation (I) jusqu'à un régime constant de construction (III), après l'atteinte de l'extrémité opposée du dispositif. Une autre suggestion de géométrie de cellule de déposition entend l'addition d'une rampe surélevée pour avancer le stade de construction des dépôts directement jusqu'à la phase d'extension latérale des constructions (II). Une représentation schématique du nouvel environnement numérique imaginé est introduite **fig. 4.2**.

Les dimensions des cellules étroites classiques modélisées sont données dans le **tableau 4.4**. Les dimensions des concepts de cellules avancés sont précisées dans le **tableau 4.6**. Des visualisations sous forme de prises de vues ou de médias vidéos d'un exemple de chaque cellule pour les espaces en trois dimensions sont proposées dans le développement du chapitre.

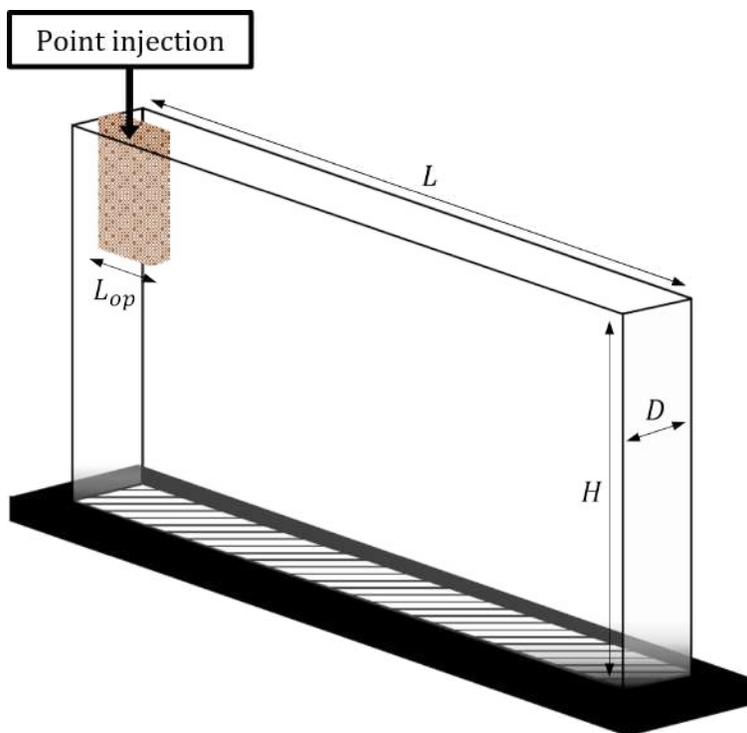


FIGURE 4.1 Schéma conceptuel de la géométrie de cellule d'essai classique, à base plane.

La gestion des frottements entre les particules et les parois des cellules est analogue à celle employée pour les simulations dans des espaces en deux dimensions. Il apparaît seulement plus complexe de concevoir une aspérité géométrique des bases des cellules sans la génération d'un nombre de corps conséquents pour reproduire une surface irrégulière. La recherche de la garantie de temps de calcul raisonnables pour la résolution des systèmes numériques encourage donc l'utilisation de lois de frottement adaptées pour traduire la rugosité des bases des environnements de déposition.

4.1.2 Propriétés générales des matériaux modélisés

La préparation rigoureuse des mélanges granulaires bidisperses pour les simulations de déposition est nécessaire à la détermination du contexte d'étude des schémas de granoclassement dans les empilements.

Les matériaux générés numériquement ont pour objectif de présenter des propriétés propres ou similaires à celles des rejets miniers de type roches stériles. Il est donc choisi de modéliser des

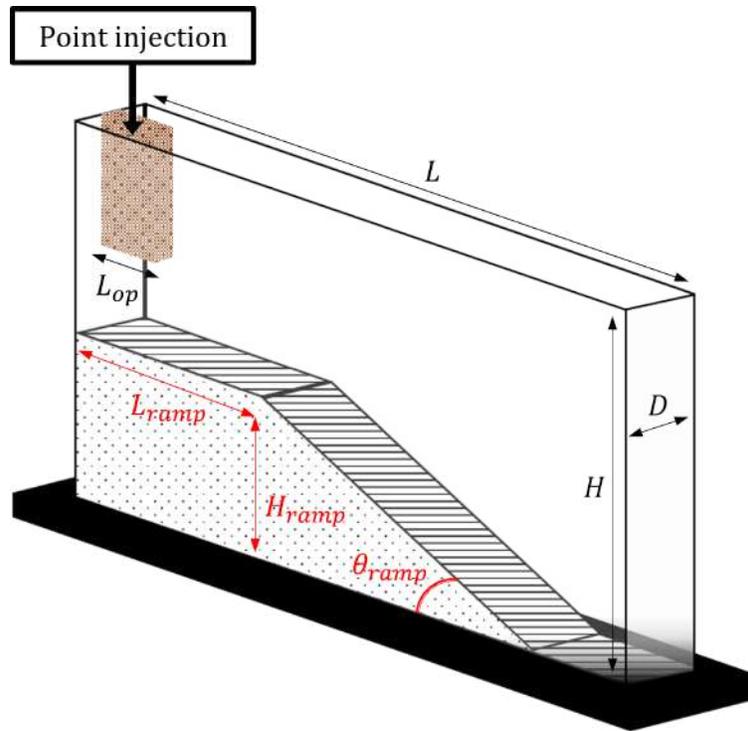


FIGURE 4.2 Schéma conceptuel de la seconde géométrie de cellule d'essai intégrant une rampe inclinée.

matériaux secs, non cohésifs avec des comportements en frottement définis par des coefficients μ capables de traduire les profils des stériles miniers observés dans la réalité, à défaut de systématiquement définir les effets de forme des particules. La masse volumique des matériaux est unique et fixée telle que $\rho = 2,700 \text{ kg/m}^3$. Chaque matériau est également caractérisé par la mesure d'un angle de repos β et d'un diamètre moyen $\langle d \rangle$. La méthodologie de constitution des échantillons explique enfin l'absence de distributions granulométriques usuelles auxquelles on préfère la précision d'étalements granulométriques S .

Le dépôt numérique simple de chaque matériau, après génération, et l'application de la méthode de mesure des angles de pentes des empilements (**fig. 3.4**) permettent de dresser le **tableau 4.1**. Il présente quelques-unes des propriétés intrinsèques mentionnées des espèces de grains aux côtés d'autres descripteurs introduits dans la suite.

4.1.3 Propriétés générales des échantillons modélisés

La modélisation des échantillons de particules considère la proposition de plusieurs paramètres descriptifs pour l'expression de la nature et de l'intensité des disparités entre les populations de grains.

Les échantillons réalisés sont des mélanges bidisperses constitués de deux populations de

TABLEAU 4.1 Mesures des angles de repos pour différentes espèces de grains modélisés. (M.a), (M.b) et (M.c) traduisent respectivement les dénominations des MÉLANGE (a), (b) ou (c) comme défini (voir **fig. 4.6**).

PARTICULES	DIM Ω	$\langle d \rangle$ (mm)	S	$\langle \alpha \rangle$	μ	β (°)
Disques fins	2	1.00±0.20	0.2	0	0.2	≈ 21
Disques grossiers	2	3.00±0.60	0.2	0	0.2-0.4	≈ 22
Polygones fins	2	1.00±0.20	0.2	(> 0)	0.4	≈ 33
Polygones grossiers	2	3.00±0.60	0.2	(> 0)	0.4	≈ 35
Sphères fines (M.a)	3	1.00±0.20	0.2	0	0.2	≈ 21
Sphères grossières (M.a)	3	3.00±0.60	0.2	0	0.4	≈ 23
Polyèdres fins (M.b)	3	1.00±0.20	0.2	0.295	0.4	≈ 35
Polyèdres grossiers (M.b)	3	3.00±0.60	0.2	0.583	0.4	≈ 38
Polyèdres fins (M.c)	3	1.00±0.20	0.2	0.382	0.4	≈ 37
Polyèdres grossiers (M.c)	3	3.00±0.60	0.2	0.840	0.4	≈ 39

grains distinctes. Les deux espèces de particules sont distinguées selon les tailles et, éventuellement, par les formes ou les angularités moyennes de leurs grains. La génération de chaque échantillon bidisperse, en plus d'intégrer une disparité des tailles et/ou des formes des particules, prévoit une caractérisation visuelle des populations en leur attribuant des couleurs définies pour les identifier aisément au cours des simulations. Les représentations proposées restent inchangées sur l'ensemble du document : la population fine des échantillons granulaires est rouge, leur fraction grossière est teinte en gris. Seul l'article de conférence publié (**Ann. C**) fait exception et choisit deux autres coloris.

Les réflexions qui portent sur la sélection des descripteurs et des méthodes employées pour la modélisation des échantillons sont adaptées et précisées en fonction de la dimension de l'espace des environnements numériques (2D ou 3D, Ω) lorsque nécessaire.

Disparité des tailles de grains

La disparité des diamètres des grains entre les deux populations est résumée par l'indication du ratio des tailles R , ou s_r , calculé comme le rapport des diamètres moyens $\langle d \rangle$ aussi identifiés d_s et d_L , respectivement pour les espèces de petites et larges particules d'un même mélange. La construction de tous les échantillons bidisperses utilisés respecte la condition $R = 3$ ou $s_r = 1/3$. Les grains générés sont milli- ou plurimillimétriques et chaque mélange est construit en vérifiant $d_s = 1mm$ et $d_L = 3mm$.

Les intervalles de tailles de particules appartenant à une même population sont enfin bornés avec l'introduction systématique d'un étalement granulométrique S . Un même critère de

contrôle $S = 0.2$ est alors adopté pour la modélisation de chaque espèce de grains afin de prévenir tout phénomène de cristallisation particulier au cours des simulations de déposition.

$$S = \frac{d_{max} - d_{min}}{d_{max} + d_{min}} \quad (4.1)$$

- avec,

d_{max} , le diamètre maximal d'une population de grains; d_{min} , le diamètre minimal d'une population de grains.

La répartition des tailles des grains appliquée parmi chaque population respecte une distribution uniforme des volumes des particules de telle manière que le nombre d'éléments de diamètre d soit proportionnel à la grandeur d^{-3} .

Disparité des formes de grains

Le comportement mécanique des matériaux granulaires peut-être impacté par la forme des particules composant les mélanges à l'étude. Les modèles numériques imaginés investiguent l'influence de la géométrie des grains sur les dépositions des matériaux. Une introduction des descripteurs de la disparité des formes des grains des mélanges bidisperses modélisés, promise à la section **2.1.1**, est donc donnée dans le court développement qui suit.

La caractérisation des formes des particules angulaires, notamment rencontrées parmi les roches stériles, par des méthodes expérimentales est un sujet d'intérêt discuté depuis plusieurs décennies. Les méthodes d'évaluation des paramètres géométriques des particules au sein des modèles numériques utilisés sont présentées au travers de trois paramètres de mesure pertinents pour la qualification des angularités d'un grain polygonal ou polyédrique. Le détail des procédures employées est illustré par l'étude de cas particulière d'un objet en trois dimensions dans l'environnement de simulation MED du logiciel LMGC90. Il est considéré que la projection des éléments retenus pour la description du polyèdre est facilement rapportée à l'analyse de la géométrie d'un polygone.

La géométrie d'une particule polyédrique modélisée avec LMGC90 est résumée par un ensemble de n_v points générés en différents lieux d'une sphère unité de diamètre $\langle d \rangle$ pour constituer le squelette du corps numérique. L'objet 3D obtient ensuite sa texture avec la création de ses faces comme autant de plans définis par trois points connectés du précédent ensemble. L'application d'un tel maillage triangulaire implique qu'un polyèdre du programme généré avec n_v sommets possède $n_f = 2n_v - 4$ faces.

La **figure 4.3** montre la génération d'un ensemble de particules granulaires où l'aléatoire

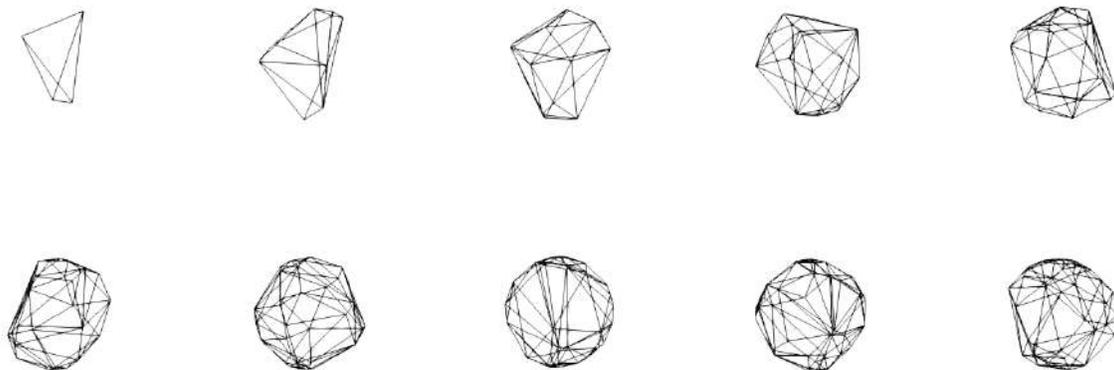


FIGURE 4.3 Représentation des structures d'un ensemble de polyèdres générés aléatoirement et classés par ordre croissant selon leur nombre de sommets n_v , de faces n_f (d'en haut à gauche en bas à droite).

TABEAU 4.2 Description des caractères de formes des polyèdres de **fig. 4.3**.

POLYÈDRE	n_v	n_f	χ_1	χ_2	Ψ	$\langle \alpha \rangle$
1	4	4	0.609	0.550	0.342	0.584
2	9	14	0.776	0.745	0.768	0.875
3	14	24	0.928	0.911	0.884	0.686
4	19	34	0.959	0.856	0.882	0.583
5	24	44	0.921	0.898	0.925	0.500
6	29	54	0.987	0.831	0.922	0.443
7	34	64	0.972	0.945	0.945	0.420
8	39	74	0.978	0.834	0.924	0.382
9	44	84	0.981	0.877	0.941	0.373
10	49	94	0.966	0.946	0.950	0.327
SPHÈRE	-	-	1	1	1	0

régit la distribution des sommets de chaque polyèdre sur la sphère unité¹. La procédure est choisie et répétée pour des valeurs croissantes de n_v afin de concevoir différentes particules polyédriques qui illustrent la construction des géométries des grains. La même méthode est utilisée pour la réalisation des mélanges bidisperses des simulations selon des paramètres choisis. L'exemple sert de support pour expliciter la description des angularités de particules avec les moyens numériques à disposition.

Plusieurs articles publiés proposent une rétrospective exhaustive des travaux de recherche menés jusqu'alors pour explorer la description des formes des particules [29–31]. Parmi le nombre conséquent de mesures et d'indices énoncés dans la littérature, il apparaît judicieux

1. L'augmentation de n_v se poursuivrait théoriquement jusqu'à la génération d'une particule atteignant le modèle de la sphère parfaite pour $n_v \rightarrow \infty$.

de retenir trois paramètres indépendants de formes pour le développement proposé. Chaque paramètre présenté est emprunté d'une catégorie définie d'évaluation de forme des particules : indices d'allongement, sphéricité et angularité.

Un large horizon de moyens de caractérisation de la géométrie des grains est ainsi donné. Il est cependant important de noter que la grande diversité des outils de mesure des formes de particules existants constitue une preuve des difficultés persistantes pour l'établissement d'une unique procédure commune ou la construction d'un seul indice suffisamment efficace pour décrire la géométrie de particules avec un fort pouvoir de discrimination entre les assemblages de grains. Chaque mesure dépend, à un moment donné, d'une évaluation subjective, qu'il s'agisse des directions et orientations des trois axes orthogonaux ou des dessins des contours des objets considérés. Il n'est donc pas simple de se prononcer sur les géométries des grains d'après un ensemble fini de descripteurs. De telles mesures sont, certes, simples à mettre en œuvre, mais leur accessibilité est à opposer avec leur traduction ambiguë de la description des formes. L'interprétation des formes de particules est systématiquement rendue difficile par les nombreuses irrégularités naturelles des matériaux.

L'émergence des simulations numériques et d'autres procédures assistées par ordinateur jettent une nouvelle lumière sur l'utilisation des indices de description de formes pour les objets particuliers. Comme rappelé, aucun indice ou ensemble de mesures ne pourrait être considéré comme "optimum" dans toute situation de caractérisation. Un tel axiome permet de comprendre que les mêmes outils de description des géométries des particules pourraient être choisis en référence à des distributions de mesures et établis avec des variations autour de valeurs moyennes calculables sur de larges populations pour déterminer des informations fiables depuis les modélisations. Cela explique pourquoi leur intégration dans des simulations numériques modélisant des matériaux granulaires est appropriée. L'utilisation de tels paramètres descriptifs dans des environnements numériques donne à l'utilisateur le moyen contrôler des variables traduisant les formes des grains et d'évaluer leur influence sur des problèmes mécaniques complexes.

Les trois paramètres évoqués sont présentés et développés à la suite. Leur définition ainsi que leur expression pour le cas d'un objet sphérique sont rappelées. Enfin, chaque indice de mesure est calculé pour l'ensemble générique de particules exposé **fig. 4.3** dans le but de rendre compte de sa traduction des géométries polyédriques. Les différents résultats sont consignés dans le **tableau 4.2**.

- **Paramètre d'élongation**, χ ; la mesure de l'élongation d'une particule est souvent associée aux notions de rapports de formes, d'aplatissement ou d'excentricité. L'al-

longement est exprimé comme le ratio des longueurs d'un objet particulaire prises dans les directions d'un repère orthogonal de l'espace : deux rapports sont calculés et composent un couple de paramètres. Une définition de l'indice de mesure est donnée **fig. 4.4**. La méthode de calcul de χ est des plus simples et démontre logiquement pour une sphère $\chi_1 = \chi_2 = 1$.

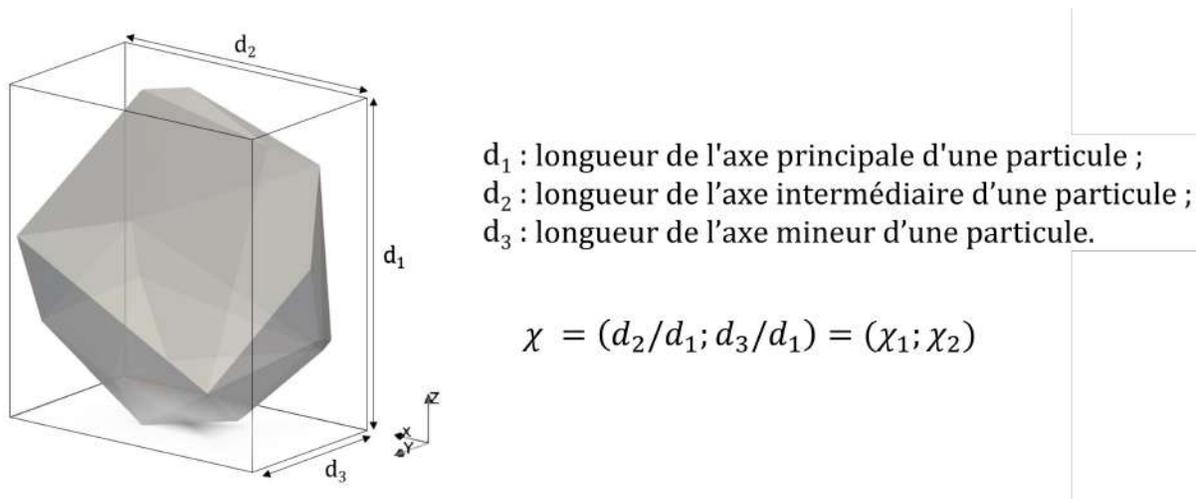


FIGURE 4.4 Représentation d'un polyèdre et définition des paramètres d'excentricité.

- **Paramètre de sphéricité, Ψ** ; l'indice de sphéricité [28] introduit un autre concept de la forme comme le ratio de la surface réelle d'une particule ramenée à la surface d'une sphère de même volume que l'objet. Il s'agit d'un outil de mesure conceptuel associant à la fois des notions de forme et de rondeur. L'expression de Ψ est donnée par **eq. (4.2)**. Le cas d'étude de la sphère démontre $\Psi = 1$.

$$\Psi = \frac{\pi^{1/3}(6V_p)^{2/3}}{A_p} \quad (4.2)$$

Le paramètre de sphéricité est particulièrement bien adapté à l'application du logiciel LMGC90 puisque la construction théorique de Ψ repose sur l'idée que chaque particule peut être contenue dans une sphère, soit un postulat référant à l'actuelle procédure de génération des polyèdres avec l'outil numérique.

- **Angularité moyenne, $\langle \alpha \rangle$** ; l'angularité moyenne d'un polyèdre est définie comme la moyenne arithmétique des mesures d'angle α extérieur, ou dièdre (*diedral angle*), entre l'ensemble des faces connectées d'un même corps particulaire. La construction du paramètre $\langle \alpha \rangle$ (**fig. 4.5, eqs. 4.3 et 4.4**) est déduite de certains travaux récents [141] sans pour autant avoir déjà été explicitée, au meilleur de nos connaissances, dans un

document publié. L'angularité moyenne $\langle \alpha \rangle$ d'une sphère est fixée telle que $\langle \alpha \rangle = 0$.

$$\sin(\alpha) = \frac{\| \vec{n}_1 \wedge \vec{n}_2 \|}{\| \vec{n}_1 \| \cdot \| \vec{n}_2 \|} \quad (4.3)$$

$$\langle \alpha \rangle = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \alpha_i \quad (4.4)$$

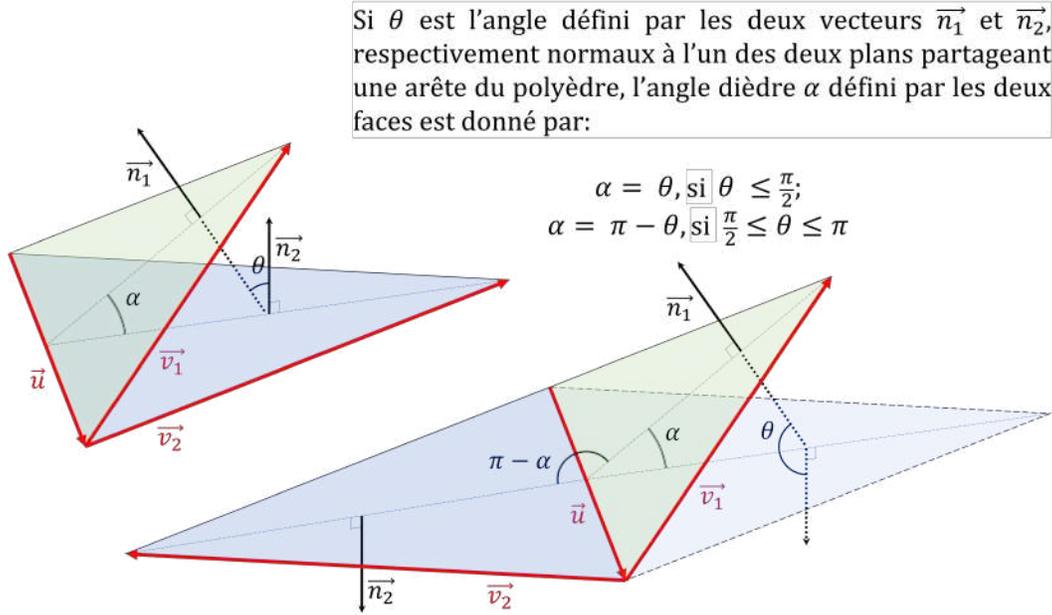


FIGURE 4.5 Définition d'un angle dièdre α défini par deux faces jointes d'un polyèdre.

Le contrôle effectif des aspects de formes des particules modélisées est réalisé en composant avec les trois indices de mesure présentés. La méthode de génération des grains exposée est telle que la distribution aléatoire de n_v sommets sur une sphère unité peut donner lieu à la création de particules aux profils variés. Une étude complémentaire de la variance respective de chaque paramètre est alors décidée pour estimer leur pouvoir de discrimination ; l'analyse est détaillée en annexe (**Ann. B**). L'utilisation simultanée des paramètres d'allongement χ , de sphéricité Φ et d'angularité moyenne $\langle \alpha \rangle$, est décidée et permet ainsi d'obtenir une description complète des formes des grains afin de construire les échantillons de l'étude.

Concentration des mélanges, ratio des masses et des volumes

L'expression de la concentration des mélanges granulaires bidisperses modélisés reprend l'indice m_{LS} déjà introduit comme le rapport des masses des deux espèces de particules déposées

au cours des essais expérimentaux (renvoi à **Sec. 2.3.5**). Le contexte des simulations numériques élargit l’horizon du paramètre m_{LS} dès lors qu’une unique valeur de ρ est fixée au moment de la création des matériaux (**eq. (4.5)**). Le paramètre m_{LS} se traduit donc également comme le rapport des volumes des deux espèces de particules des échantillons.

$$m_{LS} = \frac{m_L}{m_s} = \frac{\rho}{\rho} \cdot \frac{m_L}{m_s} = \frac{V_L}{V_s} \quad (4.5)$$

La confection des mélanges granulaires de l’environnement numérique retient des valeurs de m_{LS} choisies entre 0.5 et 1. La justification d’un tel choix pour m_{LS} est expliquée par la volonté de limiter le biais que pourraient représenter des inégalités de concentration d’une espèce de grain devant l’autre sur le déroulement des dépositions. L’objectif principal des simulations est de démontrer l’intensité des mécanismes de granoclassement : les premiers essais numériques complétés explorent des valeurs de m_{LS} distinctes souvent traitées par la littérature (renvoi à **Sec. 2.2.3**), la précision des modèles - notamment accompagnée par la transition aux environnements en trois dimensions - considère $m_{LS} = 1$ et reproduit le contexte “idéal” des expériences réelles déjà présentées.

4.1.4 Mélanges granulaires modélisés

La méthode de modélisation des mélanges granulaires imaginés pour les simulations associe deux populations indépendantes de particules aux propriétés choisies. Les descripteurs introduits dans les sections précédentes permettent alors d’exprimer précisément les caractéristiques des différentes espèces de grains et de l’échantillon bidisperse complet. Chaque mélange est construit de telle sorte qu’il respecte les stratégies et conditions de déposition des simulations : espace de dimension 2D ou 3D, disparité des tailles et des formes des grains.

Il est proposé de détailler la procédure de modélisation des mélanges avec une présentation des trois échantillons réservés aux simulations dans les espaces en trois dimensions (3D). Les mélanges (M.a), (M.b) et (M.c) conservent la même disparité de tailles des grains telle que $R = 3$; leur identification est ajoutée pour remarquer les variabilités de leur caractère de forme général. Les prises de vues de deux éléments particuliers tirés respectivement des deux populations de grains parmi les échantillons mentionnés sont données **fig. 4.6** pour illustrer la constitution par combinaison des mélanges réalisés.

Le mélange (M.a) est uniquement composé de particules sphériques, il représente le cas initial de déposition d’échantillons granulaires par la considération unique d’une disparité des tailles des éléments. Les deux autres échantillons ajoutent les disparités de formes des grains avec

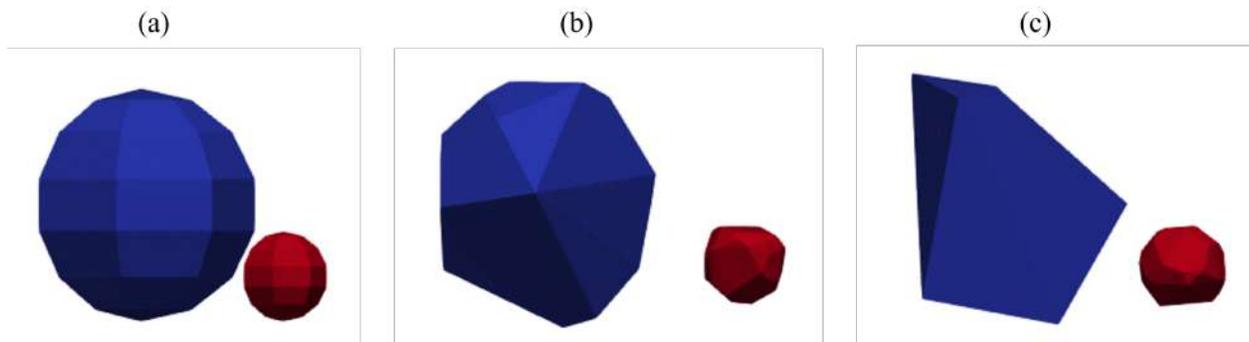


FIGURE 4.6 Représentations des trois échantillons granulaires bidisperses générés pour les simulations numériques 3D : (a) mélange de grains sphériques (M.a) ; (b) mélange de grains polyédriques (M.b) ; (c) mélange de grains polyédriques à l’angularité prononcée (M.c).

la composition de mélanges aux particules polyédriques². Il est considéré que l’échantillon (M.b) modélise un mélange au paramètre d’angularité “modéré” et que le dernier échantillon (M.c) décrit un mélange à l’angularité “prononcée”. Les tendances de formes des particules sont fonctions du nombre de sommets n_v des éléments de chaque population de grains, puis mesurées et contrôlées à l’aide des indices de formes connus. En ce sens, le choix arbitraire $n_v \geq 8$ a pour objectif de diminuer les occurrences de constitution de particules à trop forte excentricité (**Ann. B**). Le **tableau 4.3** résume les descriptions des trois mélanges bidisperses³ constitués.

TABLEAU 4.3 Description des disparités de formes des échantillons granulaires bidisperses (M.a), (M.b) et (M.c).

MÉLANGE	$\langle d \rangle$ (mm)	n_v	n_f	χ_1	χ_2	Ψ	$\langle \alpha \rangle$
MÉLANGE (a)							
1-grossier	1.00 ± 0.20	-	-	1	1	1	0
2-fin	3.00 ± 0.60	-	-	1	1	1	0
MÉLANGE (b)							
1-grossier	1.00 ± 0.20	20	36	0.959	0.856	0.882	0.583
2-fin	3.00 ± 0.60	60	116	0.983	0.953	0.957	0.295
MÉLANGE (c)							
1-grossier	1.00 ± 0.20	8	12	0.840	0.691	0.754	0.840
2-fin	3.00 ± 0.60	40	76	0.962	0.898	0.938	0.382

2. LMGC90 n’offre pas la possibilité de gérer l’interaction de corps sphériques et polyédriques, c’est pourquoi les échantillons granulaires introduisant des disparités de formes ne sont composés que de polyèdres.

3. Une brève comparaison des résultats du **tableau 4.3** avec le **tableau 4.1** permet de vérifier la corrélation existante entre la mesure des angles de repos β et la géométrie des particules modélisées.

4.2 Contrôle des simulations de déposition

Le contexte des simulations se complète avec la définition des paramètres numériques de déposition des mélanges granulaires. Les différents éléments abordés dans la suite permettent de définir le régime de déposition des simulations en référence aux contrôles d'indicateurs parmi ceux systématiquement retenus pour la caractérisation d'essais réels (**tab. 2.2**). Les conditions de déposition pour les deux géométries de cellule envisagées sont notamment respectivement résumées par les **tableaux 4.4 et 4.6**.

4.2.1 Hauteur de déposition et vitesses de chute des grains

Le régime d'injection, ou d'écoulement, imposé au sein des simulations est choisi selon des résultats expérimentaux démontrant l'obtention de schémas de ségrégation et de stratification pour la déposition d'échantillons de grains sphériques bidisperses [9, 119, 120]. Il est bon de rappeler que de tels contextes de déposition sont considérés par la littérature comme des optima pour l'apparition de schémas d'empilements. Les hauteurs d'injection des mélanges granulaires sont ainsi fixées telles que $h = 10mm$ ou $h = 50mm$. De telles considérations se traduisent alors consécutivement en termes d'énergie cinétique puisque la déposition des particules considère leur chute libre jusqu'à la rencontre d'un obstacle constitué par une paroi de la cellule ou d'autres grains. La vitesse correspondante des grains au terme de leur chute est donc déduite sachant $\mathbf{v}_{cl} = \sqrt{2gh}$.

4.2.2 Débit massique de déposition des grains

La définition de l'espace géométrique des points d'injection des grains permet ensuite de conclure sur l'expression du débit massique de déposition. L'étalement de l'injection des grains selon L est représenté par une longueur d'ouverture L_{op} sur laquelle sont disposées L_{op}/d_{max} particules d'une population aléatoirement sélectionnée parmi le mélange initial. L'introduction d'une fréquence de déposition marquée par un intervalle de temps correspondant Δt et la connaissance de la masse particulaire moyenne de l'échantillon $\langle m \rangle$ permettent d'établir une équation du flux massique de déposition f donnée par **eq. (4.6)**.

$$f = \frac{1}{\Delta t} \cdot \frac{L_{op}}{d_{max}} \langle m \rangle \quad (4.6)$$

Une simple condition assurant la non-interpénétration des particules au moment de leur génération (**eq. (4.7)**) est également à respecter pour le choix de Δt et vérifie l'intégrité des

simulations numériques.

$$\Delta t \geq d_{max} \cdot \mathbf{v}_{cl} \quad (4.7)$$

Le calcul de f pour les essais numériques 3D est aussi fonction de la variable D puisque les points de déposition sont renouvelés autant que possible sur la largeur de la cellule de test connaissant d_{max} . Un simple coefficient multiplicateur permet alors de retrouver le débit massique f correspondant de la déposition et **eq. (4.6)** devient :

$$f = \frac{D}{d_{max}} \cdot \frac{L_{op}}{d_{max} \Delta t} \langle m \rangle \quad \text{i.e.,} \quad f = \frac{1}{\Delta t} \frac{L_{op} D}{d_{max}^2} \langle m \rangle \quad (4.8)$$

Les expressions des débits volumiques Q et surfaciques q de déposition des particules, souvent rapportées dans la littérature, peuvent consécutivement être obtenues pour renseigner les simulations d'après le **tableau 2.2**.

4.2.3 Distance de séparation entre les murs latéraux

Les simulations de déposition dans les espaces en trois dimensions exigent l'appréciation de la distance de séparation des parois latérales des cellules étroites déjà notée D . Les valeurs de D explorées par les essais numériques sont délimitées de telle sorte que la déposition des matériaux soit au moins rendue possible en respectant la condition $D \geq d_{max}$. Les valeurs prises par D se rapportent finalement à des intervalles de mesure étudiés avec succès pour l'obtention de schémas de ségrégation et de stratification dans des publications de travaux expérimentaux [119, 120, 126].

4.3 Résultats des simulations de déposition

Les résultats des simulations sont présentés et critiqués dans un ordre chronologique pour laisser transparaître la succession des réflexions menées au cours de la campagne d'étude numérique principale. Des représentations des dépositions issues des simulations sont d'abord régulièrement mises à disposition pour donner une interprétation qualitative des éventuels schémas d'empilements observés ; puis, l'introduction de deux méthodes calculées d'évaluation des tendances de granoclassement dans les piles est proposée.

Les prises de vues et autres médias affichés exposent ainsi généralement un état avancé des dépositions, à l'atteinte de leur terme (déposition complète des mélanges granulaires préparés).

Des sélections d'itérations des empilements et constructions granulaires obtenus sont effec-

tuées pour représenter les résultats des simulations de dépositions imaginées. Chaque modèle numérique élaboré met en avant des extraits de déposition pour lesquels les éléments de contrôle définissant les scénarios explorés sont précisés (renvoi à **Secs. 4.1 et 4.1.4**).

*

Les paramètres de contrôle définis pour les réalisations des simulations de déposition de matériaux granulaires bidisperses avec la géométrie de cellule classique sont consignés dans le **tableau 4.4**.

TABLEAU 4.4 Paramètres principaux des simulations réalisées (2D ou 3D) avec la première géométrie de cellule d'essai (**fig. 4.1**).

PARAMÈTRE	VALEUR
Longueur de cellule, L (mm)	500
Hauteur de cellule, H (mm)	500
Largeur de cellule, D (mm)	-(2D) ou 3 et 10 (3D)
Longueur d'ouverture, L_{op} (mm)	15 et 30
Rapport de tailles, R, s_r	3.0, 1/3
Disparité de formes	oui (polyèdres)
Ratio de masses, m_{LS}	0.5 ou 1
Masse volumique sèche, ρ (g/cm^3)	2.7
Coefficient de frottement, μ	0.2 à 0.4
Débit massique de déposition, f (g/s)	0.1 à 10
Débit volumique de déposition, Q (cm^3/s)	0.06 à 6.1 (3D)
Débit surfacique de déposition, q (cm^2/s)	0.06 à 20.5
Hauteur d'injection, h (mm)	10 à 50

4.3.1 Modélisations 2D des dépositions

La **figure 4.7**⁴ présente une sélection de résultats des simulations de déposition effectuées dans des environnements en deux dimensions. Les dépôts de trois types d'échantillons bidisperses sont affichés pour des concentrations en mélanges des espèces choisies entre $m_{LS} = 0.5$ et 1. Deux des échantillons déversés sont uniquement constitués de disques : le premier ne distingue pas le comportement en friction des deux populations de grains, le second associe

4. Une partie des essais présentés par **fig. 4.7** sont intégrés comme résultats au sein d'une publication de conférence. Une description quantitative des tendances effectives de ségrégation observées parmi les mêmes dépositions y est d'ailleurs donnée avec l'introduction de l'indice calculé de granoclassement m_I (renvoi à **Sec. 4.3.4**). D'autres informations complémentaires sont encore à retrouver dans la section dédiée à l'article (**Ann. C**).

un coefficient de frottement supérieur aux disques larges. Le troisième échantillon modélisé introduit des disparités de formes en associant des grains représentés comme de larges polygones ou des disques de diamètres inférieurs.

Description de schémas d'empilements

Les observations des empilements obtenus démontrent une influence nette de l'existence de disparités de coefficients de frottement au sein des mélanges bidisperses sur les schémas d'organisation exposés après déversement. Il s'agit de la mise en évidence de différences d'angles de repos β mesurés (**tab. 4.1**) pour les espèces de particules constituant les échantillons polydisperses et qui, si vérifiée, se veut capable d'initier des mécanismes de granoclassement spécifique avec le déchargement des matériaux. Les dépositions de mélanges ne validant pas un tel critère reproduisent alors des schémas de ségrégation clairs, et attendus, après le développement de mécanismes basés sur l'exposition des disparités de tailles entre grains grossiers et fins (**fig. 4.7.a**). Les déversements des échantillons démontrant des formes anguleuses ou des coefficients de frottement prononcés pour les particules larges sont alors à l'origine de dépôts dont les agencements de structures sont mélangés (**fig. 4.7.b et c**). Aucune observation marquée de stratification n'est à noter pour les mêmes itérations de déposition malgré des exemples de ségrégation des tailles de grains dans les régions extérieures des piles.

Limitations des observations de dépositions

Il est espéré que les utilisations simultanées d'une hauteur d'injection réduite $h = 10\text{mm}$ et d'un débit massique limité $f = 0.1\text{g/s}$, pour les essais avec des différences de comportements en friction ou de caractères de formes, puissent exhiber des empilements granulaires stratifiés d'après plusieurs références [110, 119, 121]. Pourtant, le développement des épisodes d'écoulements (avalanches) à la surface libre des échantillons cause un remaniement profond des piles sous-jacentes et semble empêcher la création permanente de schémas stratifiés, car les motifs de bandes alternés qui pourraient voir le jour sont régulièrement détruits. De telles remarques sont répétées et semblent indépendantes des propriétés des mélanges déposés ou des paramètres de déposition explorés.

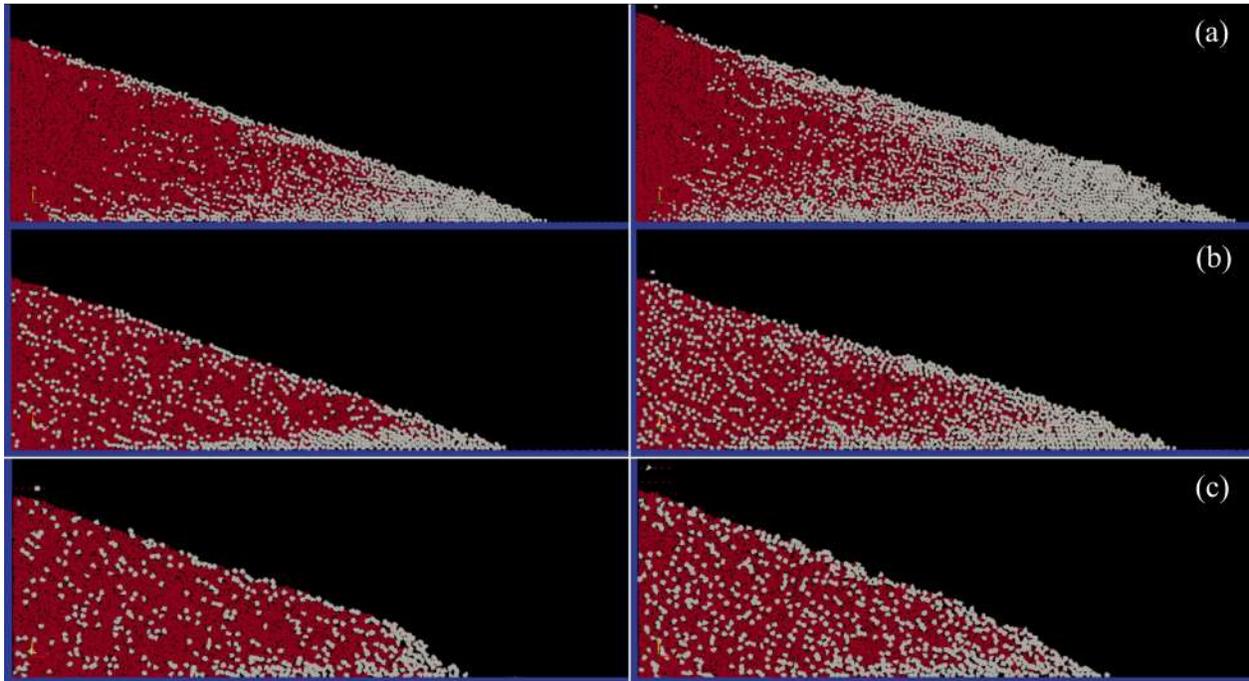


FIGURE 4.7 Schémas d'empilements obtenus comme résultats des simulations 2D pour la déposition d'échantillons bidisperses aux propriétés et proportions de mélanges variables ; rapport de tailles tel que $R = 3$, hauteur d'injection telle que $h = 10mm$ et débit massique de déposition tel que $f = 0.1g/s$. Prises de vues des dépositions : (a) d'un mélange bidisperse de disques avec un même comportement en frottement, (b) mélange bidisperse de disques avec une disparité de coefficients de frottement, (c) mélange bidisperse de disques et de polygones (c) ; (de gauche à droite) $m_{LS} = 0.5$ et $m_{LS} = 1$.

4.3.2 Modélisations 3D des dépositions - 1^{re} géométrie de cellule

Par rapport aux modèles 2D, les mélanges granulaires modélisés voient modifiée la nature des éléments particuliers qui les composent en leur attribuant un volume et des descriptions des caractères de formes précisées. Trois nouveaux échantillons bidisperses sont réalisés et nommés (M.a), (M.b) et (M.c). L'ajout d'une dimension supplémentaire aux environnements de déposition délimite alors un lieu fini ainsi qu'une variable de contrôle supplémentaire représentée par la largeur des dépôts notée D .

Dépositions de mélanges bidisperses de particules sphériques

La **figure 4.8** montre deux prises de vues d'un empilement pyramidal issu d'une première déposition du mélange (M.a). Les représentations affichées et un média vidéo⁵ de la simula-

5. <https://youtu.be/w7Ehwr7AnkI>, lien en clair pour les versions imprimées.

tion de déversement associée détaillent la construction de la pile granulaire. Les paramètres

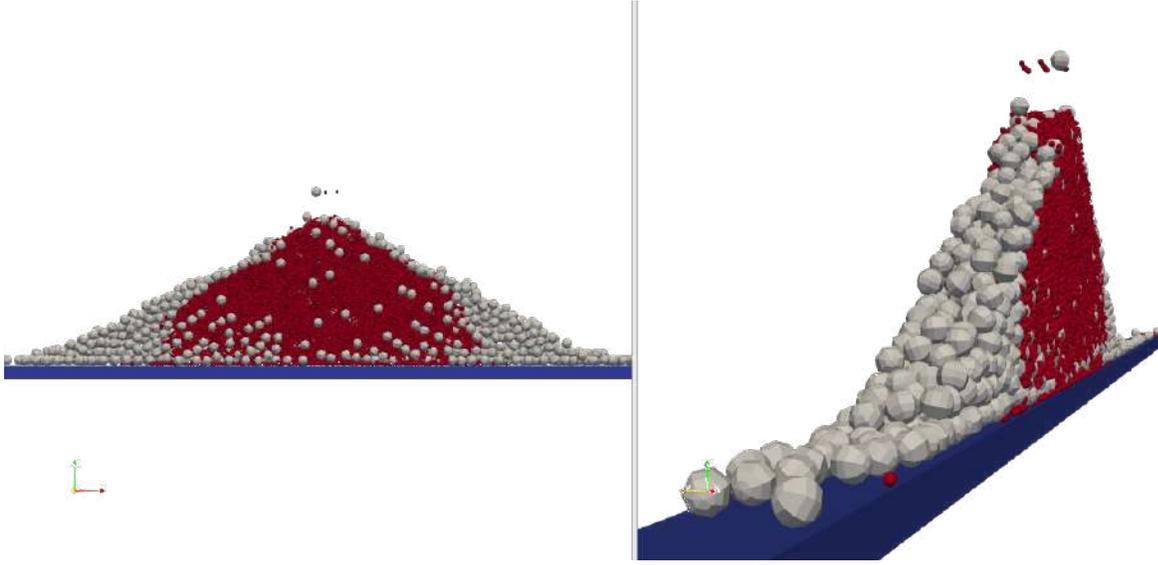


FIGURE 4.8 Déposition pyramidale 3D du mélange bidisperse (M.a) analogue aux schémas d'empilements tirés de (Zhang et al., 2017) (voir **fig. 2.31**); largeur de cellule $D = 10mm$, ratio de masses tel que $m_{LS} = 1$, rapport de tailles tel que $R = 3$, hauteur d'injection telle que $h = 10mm$ et débit massique de déposition tel que $f = 1.0g/s$.

de contrôle de déversement définis pour l'essai décrit reproduisent un régime de déposition discret et l'assemblage prend forme avant que l'apparition d'avalanches régulières intervienne de part et d'autre de l'empilement. Les écoulements à la surface libre du dépôt se développent alors sans endommager les étapes de construction déjà achevées. Les mesures des angles de repos des schémas d'empilements simulés sont résumées dans le **tableau 4.5**; les valeurs de β obtenues pour les dépositions modélisées de grains sphériques sont semblables aux pentes des constructions de billes de verre ou de sable roulé issues d'essais réels [9, 119]. La concentration marquée des mesures de pentes autour d'une moyenne $\bar{\beta}$ précise démontre la bonne reproductibilité des essais numériques. Une légère augmentation des pentes est remarquée avec l'intensification des régimes de déposition décrits par les débits d'injection imposés, une conjecture conforme à l'influence documentée des parois latérales des cellules sur les écoulements granulaires [37, 39, 194]. Le terme de l'essai de déposition présente un empilement démontrant une tendance marquée de ségrégation des grains grossiers dans les régions périphériques du dépôt, mais aussi la suggestion de fines bandes alternées de particules comme produits des avalanches ségréguées successives.

La reproduction des cinématiques de déposition simulées et observées semble corrigée avec l'introduction des modélisations en trois dimensions.

D'autres essais de déposition du mélange (M.a) sont alors entrepris pour vérifier la conservation de mécanismes de déversement satisfaisants au-delà du cas de régime de déposition discret isolé. Des études de variations de paramètres tels que f ou D sont alors mises en avant afin de montrer l'établissement de cinématiques de déposition vraisemblables, notamment pour des régimes d'injection plus soutenus (**fig. 4.9**⁶, média vidéo⁷). Les modifications des moyens de déposition reproduisent en effet pareillement les mécanismes de déposition, mais les schémas d'empilements peuvent s'en trouver altérés. Les tendances de ségrégation demeurent ; cependant, l'augmentation des intensités de déposition apparaît corrélée à une disparition graduelle des esquisses de schémas stratifiés rapportés précédemment. De telles remarques rejoignent ainsi plusieurs hypothèses de travaux publiés concernant la détermination fragile de contextes de déposition pour l'exposition de phénomènes de stratification particuliers [9, 17].

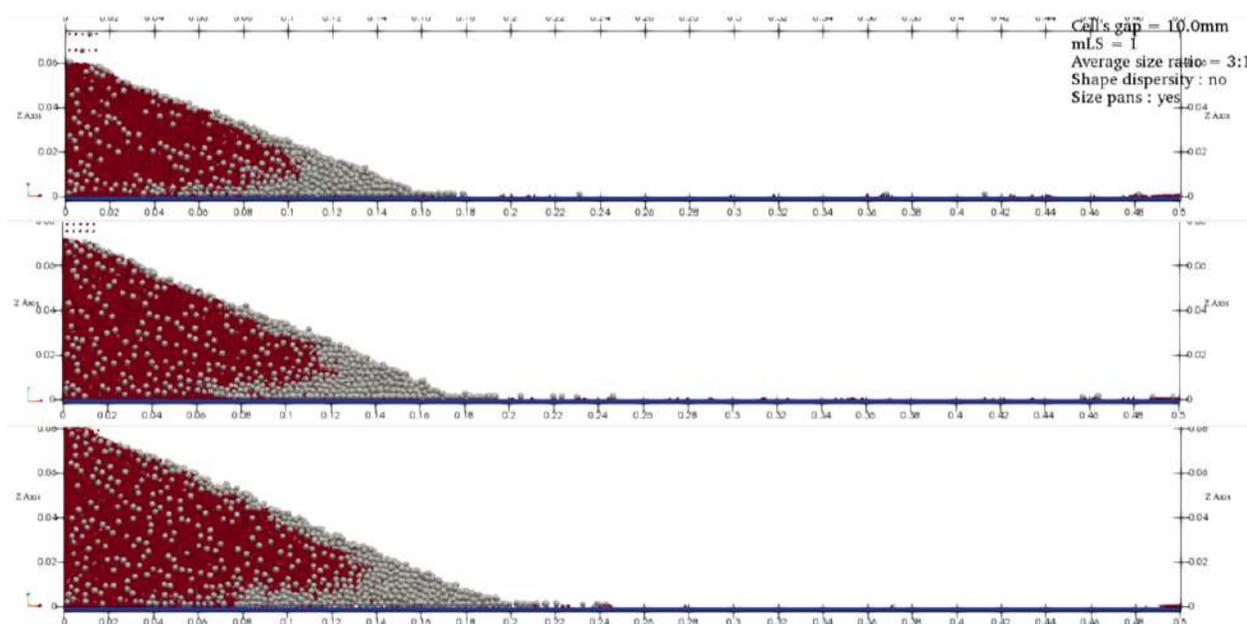


FIGURE 4.9 Schémas d'empilements obtenus comme résultats des simulations 3D pour la déposition des mélanges bidisperses composés de grains sphériques, soit le mélange (M.a) ; largeur de cellule $D = 10\text{mm}$, ratio de masses tel que $m_{LS} = 1$, rapport de tailles tel que $R = 3$, (de haut en bas) $f = 1.5\text{g/s}$, $f = 3\text{g/s}$ et $f = 4.5\text{g/s}$.

6. Une partie des essais présentés par **fig. 4.9** complète un ensemble de résultats au sein d'une publication de conférence. Une description quantitative des tendances effectives de ségrégation observées parmi les mêmes dépositions y est d'ailleurs donnée avec l'introduction de l'indice calculé de granoclassement m_I (renvoi à **Sec. 4.3.4**). D'autres informations complémentaires sont encore à retrouver dans la section dédiée à l'article (**Ann. C**).

7. (<https://youtu.be/vl5sia9aLl0>, lien en clair pour les versions imprimées).

Introduction des caractères de formes naturels des grains

Les poursuites des modélisations 3D s'intéressent à la traduction des disparités de formes des grains dans les nouveaux environnements de simulations. L'accès à la génération de polyèdres offre désormais un moyen de représentation naturel des angularités et des appétences au roulement des particules. La **figure 4.10** donne à voir des empilements granulaires semi-pyramidaux issus de la déposition des échantillons bidisperses (M.b) et (M.c) composés de particules grossières plus anguleuses que les polyèdres de diamètres réduits. L'expression

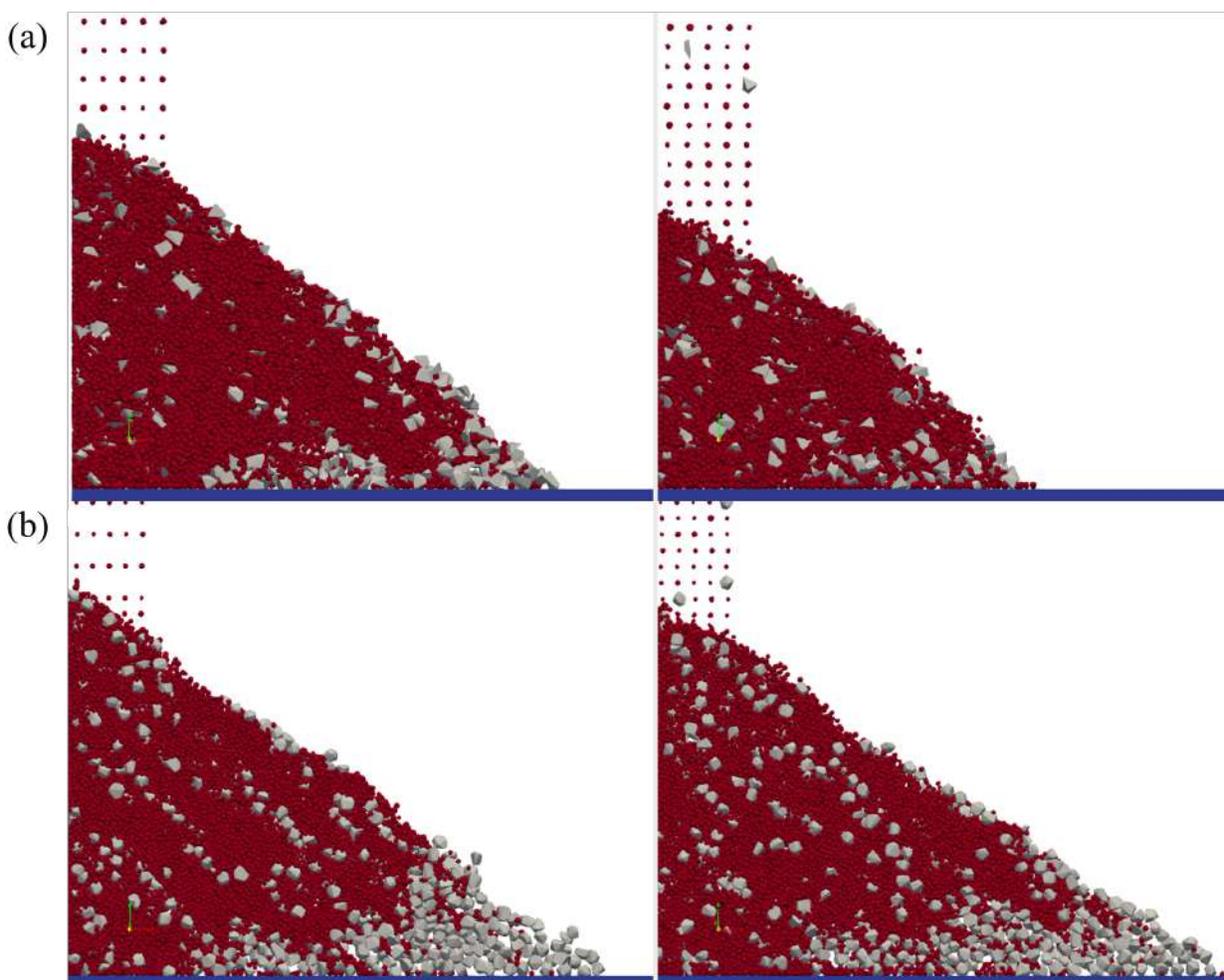


FIGURE 4.10 Schémas d'empilements obtenus comme résultats des simulations 3D pour la déposition des mélanges bidisperses composés de grains polyédriques; largeur de cellule $D = 3mm$, ratio de masses tel que $m_{LS} = 1$, rapport de tailles tel que $R = 3$. Prises de vues des dépositions du mélange (M.c) à $f = 0.5g/s$ (gauche) et $f = 1.5g/s$ (droite) (a); (b) prises de vues des dépositions du mélange (M.b) à $f = 0.5g/s$ (gauche) et $f = 1.5g/s$ (droite).

naturelle des caractères de formes est rapidement remarquable, avec des dépôts plus élevés

et moins étendus horizontalement. Les mesures d'angles de repos β des schémas d'empilements simulés sont résumées dans le **tableau 4.5**. Les mesures des pentes obtenues après la déposition des mélanges bidisperses de particules anguleuses sont supérieures aux valeurs rapportées pour les empilements de grains sphériques. L'avantage de la traduction naturelle des formes des grains est alors d'autant plus remarqué que les valeurs de β mesurées sont de l'ordre de mesures de pentes de dépôts réels de roches stériles [35, 36, 40].

Le développement caractéristique d'avalanches à la surface libre des constructions est cycliquement observé. Les prises de vues affichées rendent compte des impressions de granoclassement obtenues au terme du déversement des échantillons. Les itérations de dépôts du mélange (M.c) sont difficiles à interpréter, car il s'avère que les géométries des particules grossières sont telles que les aspérités et vides formés par leurs angularités sont majoritairement recouverts ou comblés par des particules fines ; le même phénomène est alors largement susceptible d'influencer les arrangements consécutifs au développement des mécanismes de granoclassement toujours rapportés (**fig. 4.10.a**). Une telle particularité écarte malheureusement les résultats issus des dépositions de l'échantillon (M.c) de toute considération pour traiter le sujet d'étude, seule une légère tendance des grains de larges diamètres à ségréguer dans les parties basses des empilements peut être avancée. Les dépositions répétées du mélange (M.b) sont au contraire les scénarios de déversement obtenus les plus pertinents pour les descriptions des dispositions de granoclassement (**fig. 4.10.b**). Les schémas d'organisation des empilements révèlent à la fois des tendances marquées de ségrégation des particules grossières anguleuses au pied des piles, et une déposition alternée des populations des grains en bandes sur deux ou trois diamètres d'épaisseur⁸. De tels résultats simulés se démarquent comme les plus probants.

Un média vidéo de la simulation numérique pour le précédent exemple de déposition (**fig. 4.10.b**) est rendu disponible en suivant ce [lien](#)⁹.

Les représentations d'empilements proposés et des itérations de simulations similaires prouvent comment l'utilisation d'environnements 3D se veut logiquement plus adaptée à la simulation de phénomènes de granoclassement. L'initiation des reproductions de déposition dans des espaces en trois dimensions propose divers avantages relatifs à la qualité de modélisation numérique des phénomènes étudiés. Pourtant, un allongement significatif des temps de calcul est nécessaire à la résolution de telles simulations. Une recherche de moyens de réduction des contraintes de temps de résolutions des modèles aboutit alors à la confection d'une géométrie de cellule de déposition réfléchie pour simuler les dépositions depuis un stade avancé de

8. Une description quantitative des tendances effectives de granoclassement observées parmi les mêmes dépositions est donnée avec l'introduction de l'indice calculé de granoclassement m_{Δ_d} (renvoi à **Sec. 4.3.4**).

9. <https://www.youtube.com/watch?v=4p8eosT10kI>, lien en clair pour les versions imprimées.

construction des empilements.

TABLEAU 4.5 Mesures des angles de repos pour les empilements granulaires 3D obtenues après déposition des différents matériaux bidisperses modélisés. σ_β est l'écart-type mesurant les dispersions autour de $\bar{\beta}$. 15 simulations de dépositions ont été réalisées dans les intervalles de paramètres de contrôle définis pour chacun des mélanges considérés et intègrent les calculs des valeurs présentées.

MÉLANGE	DIM Ω	$R = 1/s_r$	m_{LS}	$\bar{\beta}$ (°)	σ_β (°)
MÉLANGE (a)	3	3.0	1	22.8	1.0
MÉLANGE (b)	3	3.0	1	35.1	0.8
MÉLANGE (c)	3	3.0	1	38.7	0.9

4.3.3 Modélisations 3D des dépositions - 2^{nde} géométrie de cellule

Les paramètres de contrôle définis pour les réalisations des simulations de déposition de matériaux granulaires bidisperses avec la géométrie de cellule adaptée sont consignés dans le **tableau 4.6**.

TABLEAU 4.6 Paramètres principaux des simulations 3D réalisées avec la seconde géométrie de cellule d'essai intégrant une rampe inclinée de déposition (**fig. 4.2**).

PARAMÈTRE	VALEUR
Longueur de cellule, L (mm)	500
Hauteur de cellule, H (mm)	500
Largeur de cellule, D (mm)	3 et 10
Longueur d'ouverture, L_{op} (mm)	15 et 30
Longueur de la rampe, L_{ramp} (mm)	15
Hauteur de la rampe inclinée, H_{ramp} (mm)	60 ou 160
Angle de la pente, θ_{ramp} (°)	20° (M.a) ou 35° (M.b)
Rapport de tailles, R, s_r	3.0, 1/3
Disparité de formes	oui (polyèdres)
Ratio de masses, m_{LS}	1
Masse volumique sèche, ρ (g/cm ³)	2.7
Coefficient de frottement, μ	0.2 à 0.4
Débit massique de déposition, f (g/s)	0.1 à 10
Débit volumique de déposition, Q (cm ³ /s)	0.06 à 6.1
Débit surfacique de déposition, q (cm ² /s)	0.06 à 20.5
Hauteur d'injection, h (mm)	10 ou 50

La nouvelle géométrie de cellule imaginée a pour objectif l'avancement des simulations de déposition déjà présentées à un stage de progression supérieur pour y étudier les développe-

ments des mécanismes de ségrégation connus (**fig. 4.2**). Il est attendu que la reproduction des écoulements à la surface libre de dépôts à plus grande échelle puisse démontrer la formation de schémas de granoclassement davantage affirmés avec des avalanches prolongées. L'accélération décidée des déversements pour dépasser l'étape d'initiation de construction des empilements est alors réalisée par la modélisation d'une rampe surélevée représentant le volume d'une pile inférieure dont la pente θ_{ramp} reprend les mesures β des angles de repos des précédentes simulations, respectivement pour chaque mélange déposé.

Les **figures 4.11 et 4.12**¹⁰ présentent les derniers résultats de simulations de déposition obtenus, chacun identifié par un triplet de paramètres $(D, H_{ramp}, \theta_{ramp})$ et un échantillon granulaire associé choisi entre (M.a) et (M.b). Les prises de vues rassemblées proposent fina-

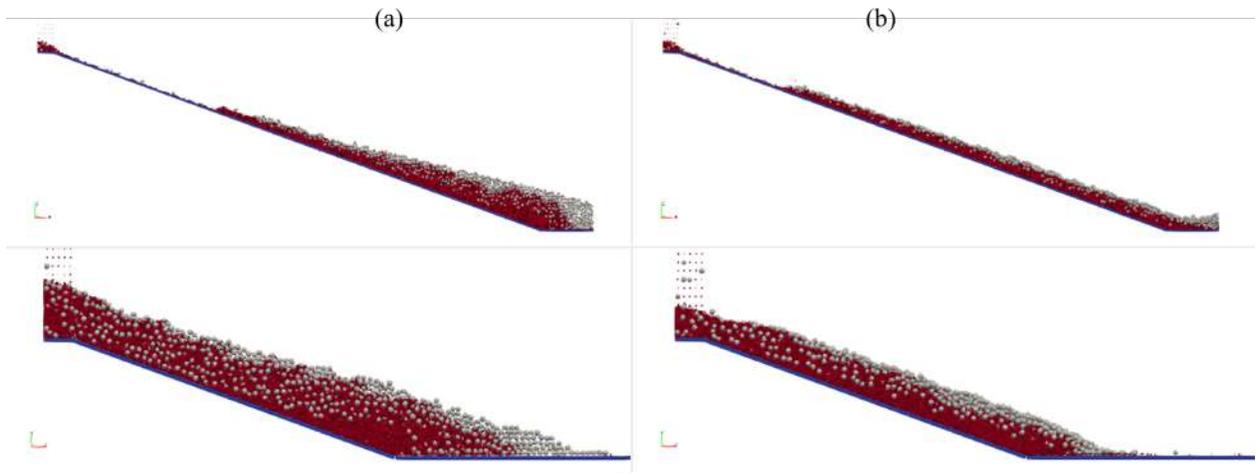


FIGURE 4.11 Schémas d'empilements obtenus comme résultats des simulations en 3D intégrant la seconde géométrie de cellule d'essai pour la déposition du mélange bidisperse (M.a). $\theta_{ramp} = 20^\circ$, ratio de masses tel que $m_{LS} = 1$, rapport de tailles tel que $R = 3$, (de haut en bas) $H_{ramp} = 160mm$ et $H_{ramp} = 60mm$; (a) largeur de cellule $D = 3mm$; (b) largeur de cellule $D = 10mm$.

lement l'observation de schémas très similaires à ceux décrits pour les dépositions des mêmes mélanges bidisperses avec les géométries de cellules classiques. Les départs des simulations démontrent des exemples de ségrégation cinétique marqués encourageants, mais les successions des écoulements sur les surfaces libres composées de particules peinent à répéter les réalisations pour dessiner les schémas de granoclassement espérés. Les essais d'introductions de différents régimes d'écoulement avec les variations de hauteurs de rampes ne semblent d'ailleurs pas influencer les cinétiques de ségrégation ou leur intensité. Parallèlement, l'augmentation des échelles des constructions requiert l'augmentation du nombre de particules

10. idem à ¹⁰.

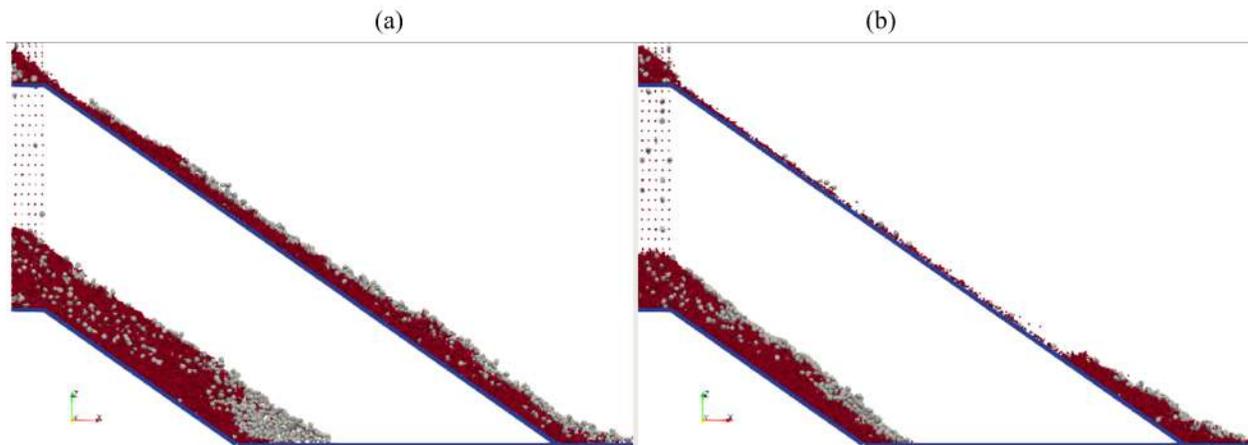


FIGURE 4.12 Schémas d’empilements obtenus comme résultats des simulations en 3D intégrant la seconde géométrie de cellule d’essai pour la déposition du mélange bidisperse (M.b). $\theta_{ramp} = 35^\circ$, ratio de masses tel que $m_{LS} = 1$, rapport de tailles tel que $R = 3$, (de haut en bas) $H_{ramp} = 160mm$ et $H_{ramp} = 60mm$; (a) largeur de cellule $D = 3mm$; (b) largeur de cellule $D = 10mm$.

déposées pour reproduire un nombre constant d’itérations de transport des grains ce qui achève rapidement la résolution efficace des simulations au-delà de quelques épisodes d’avalanches. L’adaptation du premier modèle se donne ainsi le droit de confirmer certains résultats des simulations précédentes sans pour autant s’autoriser l’édification d’interprétations et de conclusions plus importantes.

Un média vidéo de la simulation numérique pour le prochain exemple de déposition (**fig. 4.12.b**) est rendu disponible en suivant ce [lien](#)¹¹.

4.3.4 Mesures de ségrégation et de stratification

Il est imaginé d’introduire deux indicateurs quantitatifs calculés d’évaluation des dispositions de granoclassement au sein des empilements modélisés. Les intégrations respectives de l’indice de ségrégation m_I et de l’indice de diamètre moyen m_{Δ_d} sont réfléchies pour dépasser les interprétations majoritairement qualitatives des résultats de simulations déjà données et tirer parti du choix des moyens numériques pour explorer le centre des dépositions. La justification principale de la nécessité de l’adaptation de deux paramètres calculés réside dans l’absence de méthodes ou moyens adoptés en littérature pour la caractérisation de tels dépôts de matériaux, des précisions additionnelles propres à la définition de chaque indice sont données dans la suite.

11. <https://www.youtube.com/watch?v=xXYurMX8KRY>, lien en clair pour les versions imprimées.

Indice ou intensité de ségrégation

L'indice ou intensité de ségrégation m_I est un paramètre local de mesure des fractions massiques relatives $m_{LS,div}$ des populations de particules au sein de constructions de matériaux polydisperses. La définition de l'indice m_I est d'abord empruntée [119], mais son calcul et sa méthode d'application sont librement adaptés pour l'usage décrit. Une mesure d'intensité de ségrégation traduit usuellement le rapport de deux paramètres de masse fonctions des densités des matériaux utilisés. Les études de cas rapportées n'emploient pas des mélanges de grains exposant des disparités de masses volumiques ; l'expression de l'indice de ségrégation est de fait corrigée pour établir un facteur de concentration local surfacique ou volumique des espèces de particules parmi un mélange (**eq. (4.9)**).

$$m_I = \frac{m_{LS,div}}{m_{LS,div} + 1} = \frac{n_L}{n_s \cdot s_r^a + n_L} ; \begin{cases} a = 2 , \text{ pour simulations 2D} \\ a = 3 , \text{ pour simulations 3D} \end{cases} \quad (4.9)$$

- avec,

n_L , le nombre de particules grossières au sein d'une division géométrique ; n_s , le nombre de particules de petit diamètre au sein d'une division géométrique ; s_r^a , le coefficient de réduction géométrique entre les deux populations de grains adapté à un espace de dimensions modélisé.

L'application générale rencontrée pour l'indice de ségrégation est un calcul local répété du paramètre en différentes sections de même longueur au sein d'un dépôt semi-pyramidal. Les mesures d'intensité de ségrégation admettent des valeurs prises entre $m_I = 0$ et 1 pour les descriptions respectives d'une région de dépôt ségréguée uniquement constituée de grains fins et grossiers. La composition de l'ensemble des calculs pour un exemple particulier de déposition permet ainsi de rendre compte de la distribution en concentration des populations de particules et d'exhiber d'éventuels schémas d'empilements. La division des piles à intervalles réguliers peut cependant s'avérer problématique pour la projection de résultats divers selon l'échelle des dépositions ; il est alors choisi de préférer un découpage théorique des empilements qui puisse être reproduit indépendamment du nombre de particules ou de la masse de matériau déversés au cours des essais. La méthode de partition des piles en sections de même aire ou volume est consécutivement proposée et illustrée par **fig. 4.13**.

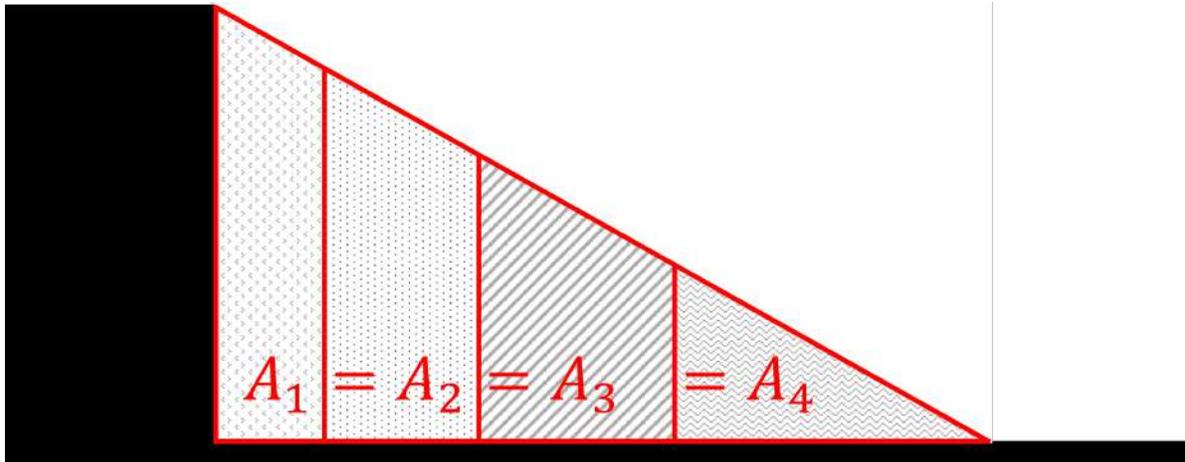


FIGURE 4.13 Représentation schématique de la méthode de division des empilements en sections d'équi-surface/volume.

Des exemples d'application de l'indice de ségrégation m_I pour l'étude de schémas de dépositions modélisées sont donnés dans un article de conférence publié (**Ann. C**), aussi produit d'une partie du travail présenté (**figs. 4.7 et 4.9**) pour des exemples de déversement d'échantillons granulaires bidisperses de disques et de sphères. Le calcul de m_I est répété avec une division des géométries d'empilements en dix sections, respectivement de même surface et de même volume. Les analyses d'intensité de ségrégation proposées démontrent alors une tendance constante et répétée des particules fines à se concentrer près du point de déposition. Des zones de configurations mélangées, où $m_I = m_{LS}$, sont remarquées entre les 7^e et 8^e divisions des dépositions. Enfin, il est prouvé que les grains larges sont systématiquement trouvés au pied des dépôts. Les résultats affichés sont conformes aux descriptions précédentes des schémas "bruts" observés et révèlent des tendances de ségrégation similaires pour les simulations de déversement respectives dans des géométries en 2D et 3D (**figs. 4.14 et 4.15**).

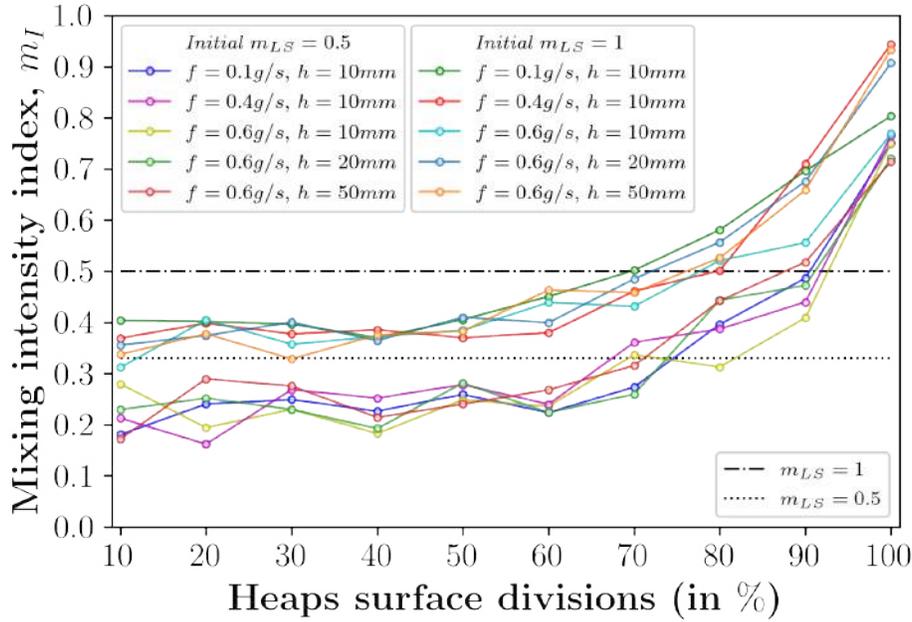


FIGURE 4.14 Calculs de l'indice de ségrégation m_I au travers de dépôts granulaires 2D de disques. Les empilements analysés sont divisés en dix sections verticales de même surface; un calcul de m_I est effectué pour chaque section. Les valeurs de m_I correspondant aux ratios de masses initiaux m_{LS} sont indiquées comme des seuils horizontaux affichés en pointillés.

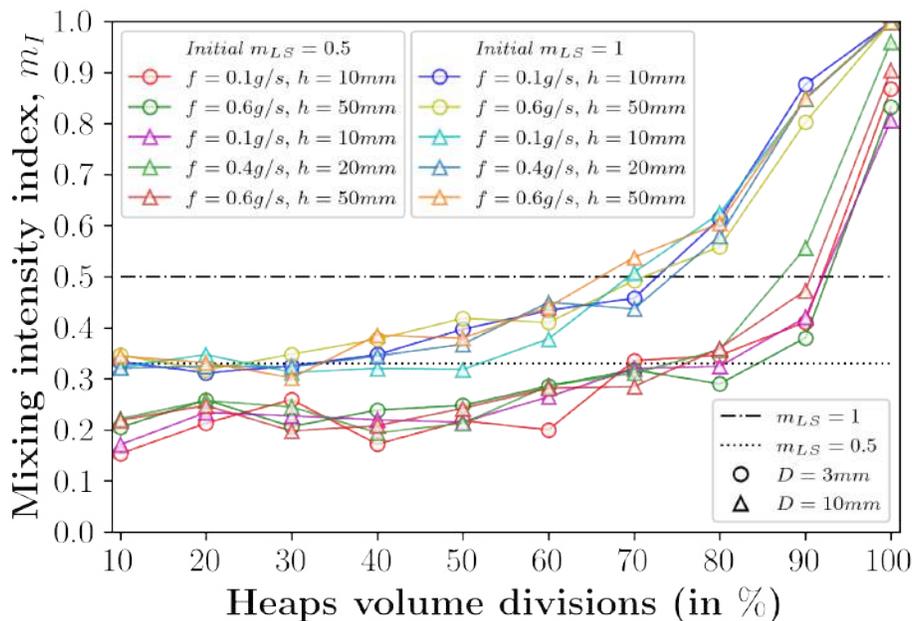


FIGURE 4.15 Calculs de l'indice de ségrégation m_I au travers de dépôts granulaires 3D de sphères (M.a). Les empilements analysés sont divisés en dix sections verticales de même volume; un calcul de m_I est effectué pour chaque section. Les valeurs de m_I correspondant aux ratios de masses initiaux m_{LS} sont indiquées comme des seuils horizontaux affichés en pointillés.

Indice de diamètre moyen

L'indice calculé de diamètre moyen m_{Δ_d} est un paramètre local de mesure de distribution des tailles des particules $\langle d \rangle$ au sein des empilements granulaires modélisés. L'élaboration de l'indice m_{Δ_d} est simple, indépendante de l'espace de dimensions considéré et réfléchi pour la description particulière de constructions issues de la déposition de matériaux bidisperses. La formulation du calcul retenu pour m_{Δ_d} est donnée **eq. (4.10)**.

$$m_{\Delta_d} = \frac{\langle d \rangle - d_{min}}{d_{max} - d_{min}} \quad (4.10)$$

Les emplois de m_{Δ_d} sont associés à la définition préalable d'un maillage des empilements de grains étudiés dont le dimensionnement des mailles, ou sections, est laissé à la discrétion de l'utilisateur (**fig. 4.16**)¹². Les mesures d'indices de diamètre moyen admettent des valeurs prises entre $m_{\Delta_d} = 0$ et 1 pour les descriptions respectives d'une région de dépôt ségréguée uniquement constituée de grains fins et grossiers. Les représentations des appréciations de l'indice de diamètre moyen pour une déposition choisie et un maillage défini sont effectuées par une mise en correspondance des valeurs calculées avec des gradients de couleurs.

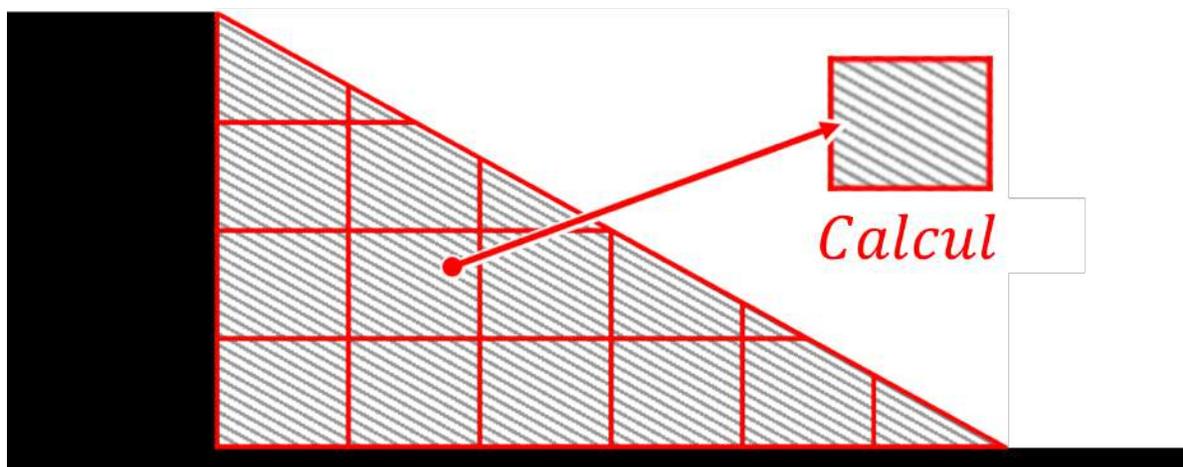


FIGURE 4.16 Représentation schématique de la méthode de maillage des empilements pour le calcul de m_{Δ_d} .

Des illustrations d'application du second indicateur de granoclassement sont tirées de l'interprétation des simulations de déposition dans des environnements en trois dimensions. Le

¹². Il est proposé de définir les hauteurs et longueurs de la maille identité comme des multiples du diamètre des particules grossières d_L constituant les mélanges granulaires déversés.

calcul de m_{Δ_d} est répété avec un maillage “standard”¹³ pour chaque itération de dépôt effectuée. Il est plus précisément choisi de montrer les tendances de distributions des tailles de grains pour les essais de déversement des mélanges (M.a) et (M.b), et ce pour l’emploi respectif des deux géométries de cellules utilisées. Le rassemblement des études paramétriques réalisées par scénario de déposition permet alors d’obtenir les représentations des distributions des diamètres de particules au travers des empilements distingués (**figs. 4.17 et 4.18**). Les résultats affichés sont conformes aux descriptions précédentes des schémas “bruts” observés et révèlent des tendances de granoclassement différentes pour les essais de déversement respectifs des échantillons (M.a) et (M.b).

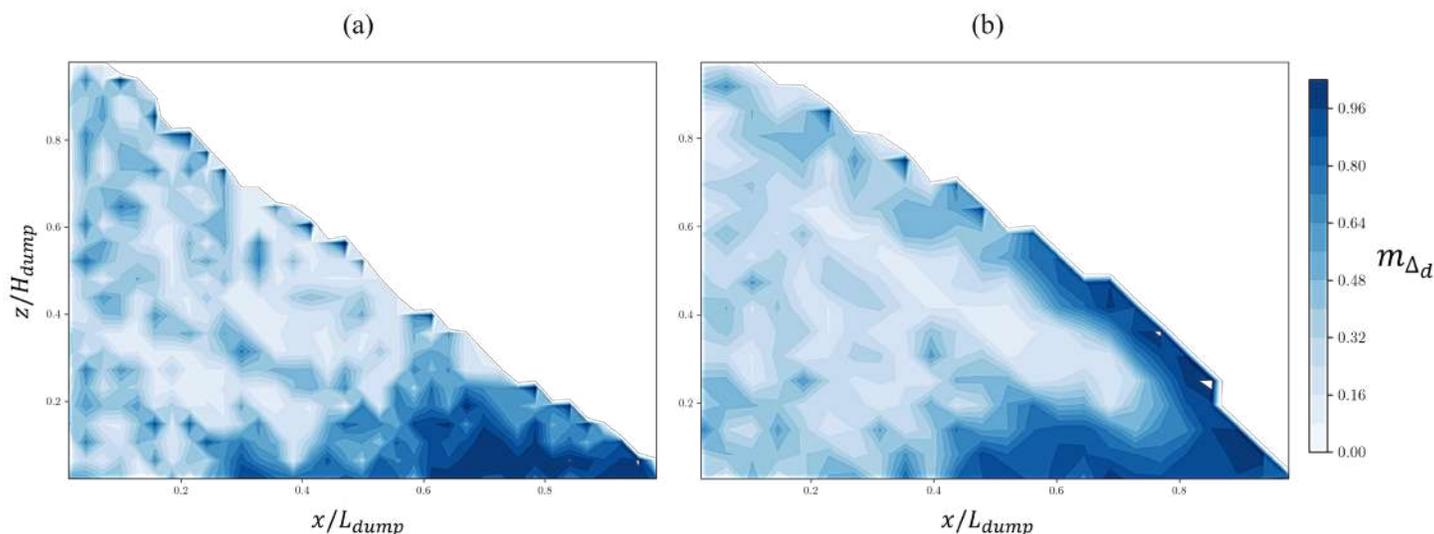


FIGURE 4.17 Moyenne calculée de l’indice m_{Δ_d} sur l’ensemble des simulations de dépositions du mélange (M.a) avec la première géométrie de cellule d’essai (a) ; (b) moyenne calculée de l’indice m_{Δ_d} sur l’ensemble des simulations de dépositions du mélange (M.b) avec la première géométrie de cellule d’essai. Les maillages retenus et présentés comptent plus de 100 divisions.

13. Les illustrations d’exemples détaillés (**figs. 4.17 et 4.18**) pour l’application de calculs de m_{Δ_d} choisissent des mailles carrées dont les côtés mesurent $3d_L$.

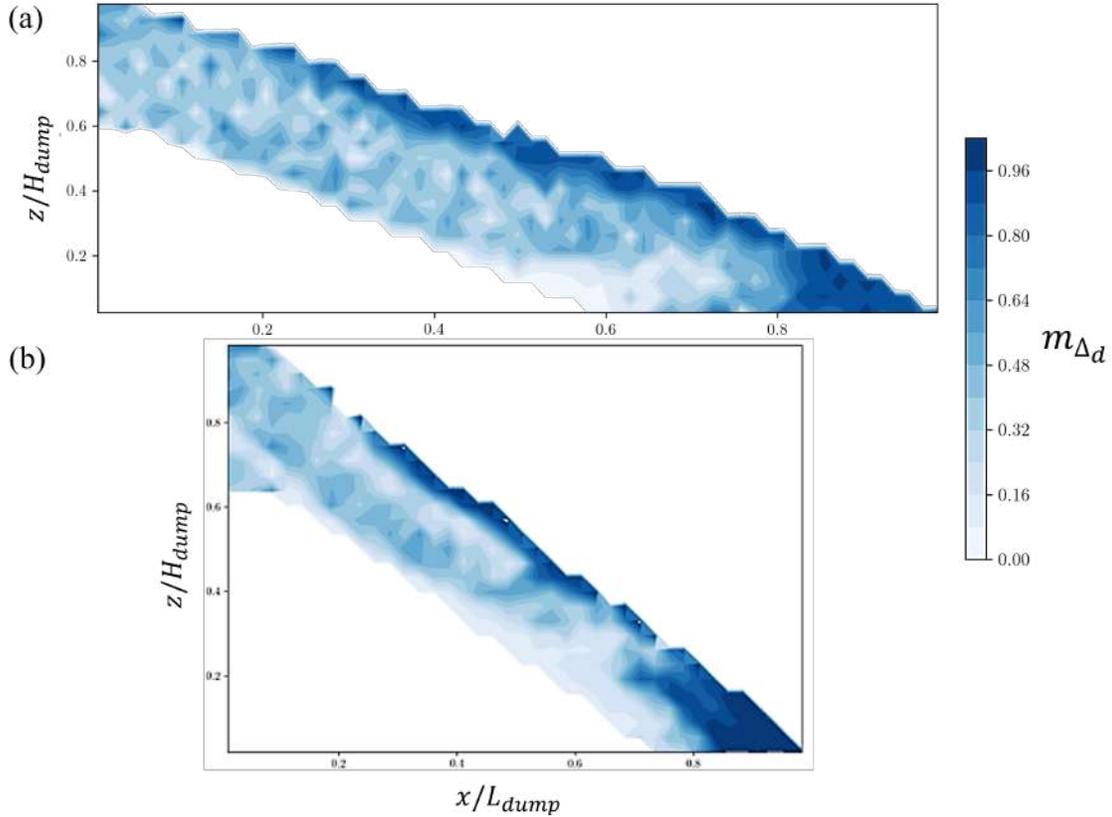


FIGURE 4.18 Moyenne calculée de l'indice m_{Δ_d} sur l'ensemble des simulations de dépositions du mélange (M.a) avec la seconde géométrie de cellule d'essai (a); (b) moyenne calculée de l'indice m_{Δ_d} sur l'ensemble des simulations de dépositions du mélange (M.b) avec la seconde géométrie de cellule d'essai. Les maillages retenus et présentés comptent plus de 100 divisions.

4.3.5 Interprétation des résultats des simulations de dépositions

Avantage des modélisations 3D sur la 2D

Les défauts de reproduction des mécanismes d'avalanches sans endommagement des empilements sont finalement attribués à l'espace de dimensions 2D des premières simulations, ce qui encourage le recours à des modèles 3D. La troisième dimension ajoutée constitue un environnement de déposition arrêté qui favorise l'édification d'empilements plus denses dont la connectivité accrue les rend plus résilients aux remaniements éventuels causés par les avalanches. Les particules déversées intègrent soit les régions stables des dépôts, soit les écoulements, dépendamment des comportements en friction ou de l'inertie des grains et de

l'état de la surface libre de la pile au moment considéré. Les écoulements déclenchés déploient alors librement des moyens de ségrégation cinétique et des mécanismes d'expulsion ou de percolation réalisés sur l'exposition des différences de diamètres des éléments.

Qualité des schémas de granoclassement et limitations des simulations

Il pourrait être argumenté que les prises de vues données des dépositions exposant des schémas qui manquent encore de régularité en ce qui concerne la stratification ; l'hypothèse est envisagée que l'ampleur des empilements réalisés jusqu'alors est limitante, que la longueur de dépôt à surface libre n'est pas suffisante pour le développement d'une ségrégation définie au cours des écoulements. L'emploi des polyèdres comme modèles de particules serait en ce sens à la fois parfaitement adapté à la traduction des angularités aléatoires des matériaux, mais coûteux par la complexité de leur définition allongeant également conséquemment les temps de calcul. L'examen des modélisations de dépositions rapportées suffit à démontrer la reproduction de mécanismes et de schémas de granoclassement attendus avec le déversement des mélanges granulaires bidisperses dans des contextes déterminés [?, 110, 121]. Les descriptions de certaines organisations d'empilements demeurent ainsi, malgré leur pertinence, moins évidentes que les schémas de ségrégation et de stratification exposés depuis des réalisations d'expériences réelles (renvoi à **Sec. 2.3.5**), notamment car la taille des échantillons numériques est limitée par les puissances des procédures de simulation. De nouvelles directions d'optimisation technique des modélisations sont donc à envisager pour améliorer les outils de prédiction présentés.

Les essais simulés ont démontré les influences des disparités de tailles et de formes parmi les grains des mélanges, des comportements en friction des particules ainsi que des environnements de cellules sur les dépositions. L'influence d'autres paramètres de déposition comme les débits de déposition (f, Q) ou les hauteurs d'injection h , dont les variations sont certes moins explorées, devrait être étudiée davantage.

4.4 Comparaisons des résultats de simulations aux travaux et données existantes

Les définitions des paramètres de déposition modélisées dans les **tableaux 4.4 et 4.6** permettent de dresser des comparaisons des résultats de simulations attendus d'après des supports ou diagrammes de phase retenus de la littérature (**tab. 2.3**).

La mise en évidence de modélisations de déposition de mélanges granulaires plurimillimé-

triques, et présentant des disparités éventuelles de formes [116, 117], n'a pas encore été documentée à ce jour pour l'étude de schémas de granoclassement dans les piles [8, 95, 108, 110, 115, 121–124]. Plus précisément, une reproduction numérique d'empilements granulaires stratifiés n'a d'ailleurs pas été clairement observée.

La comparaison des résultats obtenus ne peut s'effectuer qu'en rapport à des études expérimentales exposant des conditions similaires de déposition. L'élaboration des simulations s'appuie sur la reproduction personnelle d'expériences déjà développée (renvoi à **Sec. 5**) et les dernières publications [94, 119] démontrant le développement de schémas de granoclassement dans des piles construites avec des environnements de cellules étroites.

4.4.1 Dépôts de mélanges bidisperses de particules sphériques

La première référence de travail principale est une étude paramétrique des scénarios de déposition d'un mélange bidisperse de billes de verre ($d_{max} \leq 3mm$) [119]. Les campagnes d'essais rapportées y emploient des débits massiques d'injection réduits capables de mettre en évidence des schémas de construction ségrégués ou stratifiés dans une cellule telle que ($D \leq 10mm$) (**fig. 4.19.a**). Les échantillons constitués et les régimes de déposition explorés font donc d'une telle ressource un proche exemple expérimental auquel se fier, même si l'éventualité d'une disparité des formes des grains n'est pas mentionnée. Un diagramme de la publication est repris et précisé, avec la délimitation d'une zone rouge d'intérêt, la réalisation de dépôts pour des concentrations en mélange telles que $m_{LS} \approx 1$. La lecture du diagramme adapté prévoit alors l'obtention de deux configurations d'empilements avec la déposition de grains sphériques : la formation de bandes de stratification pour une hauteur d'injection du mélange inférieure à $h = 30mm$, et une alternance de motifs de ségrégation ou de stratification si $h \geq 30mm$. Une seconde publication est reprise pour évoquer une corrélation entre la nature des schémas d'empilements granulaires et les couples de paramètres (R , Q ou q) (**fig. 4.19.b**). Le diagramme affiche des résultats issus de la déposition de mélanges bidisperses de grains sphériques à la surface de plans inclinés qui ne reprend donc pas une procédure de construction complète. De nouvelles valeurs de q limites semblent définir les frontières de l'observation de différents schémas de granoclassement. Les régions d'intérêt, soulignées en rouge, représentent les scénarios de déposition simulés et tendent à montrer que le respect de telles conditions de déposition pourrait également conclure l'obtention d'empilements stratifiés ou ségrégués.

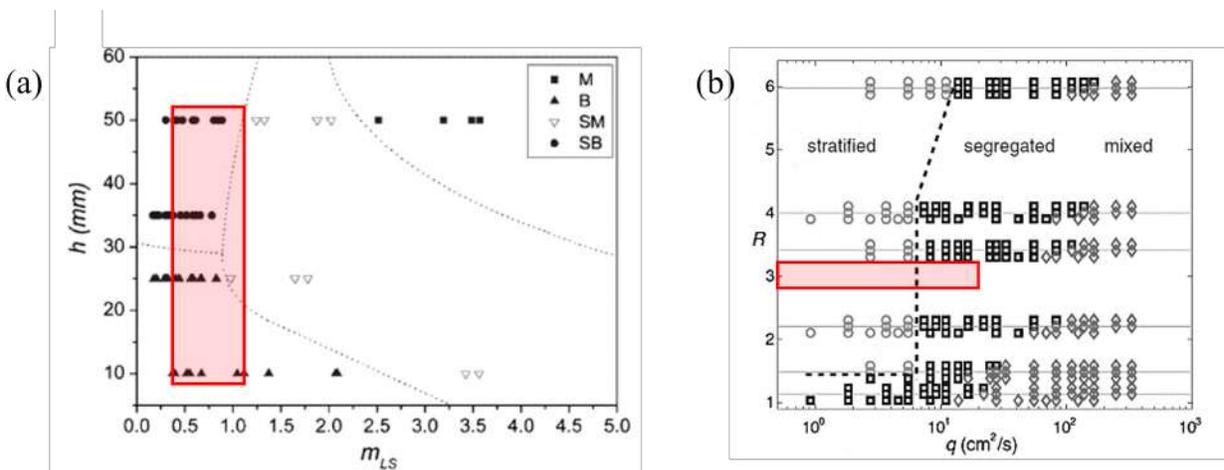


FIGURE 4.19 Comparaison des paramètres explorés par les simulations de déposition présentées (soulignés en rouge) aux diagrammes de prédiction des schémas d'empilements issus de publications d'essais physiques de la littérature pour le déversement de mélanges granulaires de sphères bidisperses avec un rapport de tailles tel que $R = 3$. Diagramme de phase (Adapté de Benito et al., 2013).

(a) ; des lignes séparent différentes configurations d'empilements observées : M, mélange ; B, bandes ou stratification ; SM, ségrégation ; SB, ségrégation-stratification. (b) Diagramme de phase (Adapté de Fan et al., 2012).

4.4.2 Dépôts de mélanges avec disparité des formes de grains

Une dernière publication est appelée¹⁴ pour représenter le dépôt de mélanges granulaires bidisperses avec disparités de formes exposant à la fois des schémas de ségrégation et de stratification (**fig. 4.20**) [121]. Les intervalles d'intérêt représentés s'adaptent aux conditions de déposition proposées par les simulations et se précisent : les zones rouges projettent l'obtention de schémas de granoclassement particuliers stratifiés ou mélangés pour des couples de valeurs (D, f) définis, soit des valeurs de débits surfaciques q données. Il apparaît que pour de faibles régimes de déposition dans les cellules les plus étroites et pour des rythmes d'injection plus marqués dans les cellules élargies, parmi les intervalles explorés et spécifiés, des schémas de stratification sont attendus à l'observation.

La projection des contextes de déposition des simulations d'après la littérature est optimiste au sujet de la reproduction de schémas de granoclassement stratifiés ou ségrégués. Les empilements obtenus à la suite de dépositions d'échantillons de grains sphériques n'ont pourtant pas démontré des schémas de granoclassement en accord avec les prévisions émises depuis

14. Les mêmes supports sont déjà utilisés pour l'exploitation des résultats expérimentaux obtenus (renvoi à **Sec. 3.3**) ; leur recours était couplé à la mention d'un autre travail dont l'usage serait ici trivial et prédit l'apparition de schémas stratifiés puisque l'on sait $R = 3$ pour les mélanges modélisés (**fig. 3.8.a**) [110].

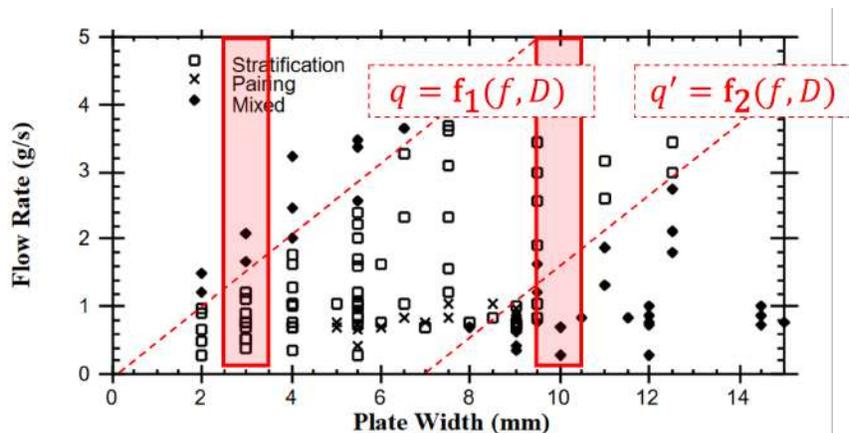


FIGURE 4.20 Comparaison des paramètres explorés par les simulations de déposition présentées (soulignés en rouge) aux diagrammes de prédiction des schémas d’empilements issus de publications d’essais physiques de la littérature pour le déversement de mélanges granulaires bidisperses en termes de tailles et de formes des particules. Diagramme de phase pour un rapport de tailles tel que $R = 2$ (adapté de Koeppel et al., 1998).

des essais réels précédents. Des schémas de ségrégation et de stratification ont cependant été retrouvés au travers d’essais numériques réalisés pour la déposition de mélanges granulaires polyédriques, exposant des disparités de formes entre les particules. La régularité et la clarté des résultats de construction simulés pourraient néanmoins gagner à être améliorées avec la recherche d’optimisation des modélisations présentées.

4.5 Volet d’étude cinématique

Les cinématiques des différentes dépositions simulées sont finalement rendues aisément observables avec certains des médias mis à disposition dans les développements précédents. Les figures présentées proposent notamment plusieurs réalisations d’empilements aux morphologies variables selon leur composition par des mélanges aux propriétés diverses. Les médias vidéos rendent autrement compte des régimes de déposition reproduits et de l’émergence des mécanismes de granoclassement selon l’affichage des paramètres mesurés.

4.5.1 Profils géométriques des empilements

Les constructions granulaires modélisées au terme des simulations exposent des profils géométriques, des mesures d’angles de repos β ou des tassements particuliers attribuables aux propriétés des mélanges qui constituent les piles obtenues. Les observations de précédentes

études similaires [40, 195] démontrent que les comportements en frottement des éléments déversés sont d'importance pour la détermination des processus de formation des empilements. L'expression de frottements élevés dans des mélanges granulaires réduit la transportabilité des particules au cours du dépôt et influe sur les profils des constructions consécutives en augmentant les angles de repos et réduisant les dispersions horizontales. Parallèlement, la capacité des frottements à réduire la flottabilité des particules peut aussi endiguer le développement de mécanismes de ségrégation au travers des écoulements dépendamment des intensités des nombreux mouvements des grains. Les morphologies des empilements sont alors enfin affectées par les distributions des tailles des grains qui conditionnent les possibilités d'agencements relatifs des particules dans l'espace de déposition. L'ensemble de ses résultats rejoignent les tendances affichées par des mesures d'angle de repos β - consignées dans le **tableau 4.1** - pour les dépositions de matériaux aux comportements frictionnels distincts exprimés par des coefficients de friction μ ou des caractères de formes des particules. De tels exemples de formation d'empilements peuvent être trouvés en consultant des représentations données dans les sections précédentes ; et les observations suivent : les empilements issus des dépositions des échantillons de disques ou de grains sphériques sont moins hauts et plus étalés que les mélanges de polygones ou de polyèdres, respectivement (**figs. 4.7, 4.9 et 4.10**).

4.5.2 Régimes de déposition et description d'écoulements

La lecture des médias vidéos proposés donne ensuite l'interprétation des cinématiques des dépositions modélisées. Les nombreuses itérations de simulations présentées, sans filtre de mesure paramétrique, montrent d'abord les reproductions de régimes de déposition dont les intensités varient avec les débits massiques de déposition f choisis. La majorité des exemples¹⁵ laissent voir l'établissement de régimes de déposition discrets marqués par le développement épisodique d'avalanches à la surface libre des empilements. La réplique de tels écoulements est d'ailleurs vérifiée avec les deux géométries de cellule imaginées. Un média vidéo particulier¹⁶ applique alors un filtre de mesure affichant le calcul des vitesses des particules dans la direction de la longueur d'une cellule étroite au cours d'un essai pour détailler l'examen des cinématiques de déposition. La représentation du champ des vitesses révèle la profondeur et l'étendue des avalanches. Les profondeurs de remaniement des écoulements sont similaires aux mesures d'essais expérimentaux publiés reprenant de proches scénarios de déposition [94, 119, 132]. Les étendues des avalanches occupent tout ou partie de la surface exposée

15. Il est rappelé que les simulations menées dans des espaces en deux dimensions ne reproduisent qu'avec difficulté des mécanismes d'avalanches responsables de remaniements suffisamment peu profonds pour ne pas endommager les empilements en construction (renvoi à **Sec. 4.3**).

16. <https://www.youtube.com/watch?v=xXYurMX8KRY>, lien en clair pour les versions imprimées.

de l'empilement et les mesures de vitesses soulignent leur épuisement progressif jusqu'aux régions extérieures des dépôts. Les évaluations qualitatives des cinématiques de dépositions sont satisfaisantes en ce qu'elles démontrent la reproduction vraisemblable des cinématiques expérimentales rapportées. Des analyses précises des cinématiques des écoulements relevés à surface libre permettraient de compléter les dernières remarques avec d'autres observations.

Les modélisations d'empilements granulaires simulées reproduisent des cinématiques de déposition jugées vraisemblables selon les observations des profils géométriques des constructions obtenues et du développement de mécanismes de granoclassement cinétiques. D'autres choix d'étude pourraient être envisagés pour décrire ou caractériser la cinématique des essais et sont donnés en exemples parmi les publications de la littérature [17, 18, 117, 194]. De tels éléments ne sont cependant pas développés pour le travail présenté. Les approfondissements des études cinématiques des simulations demeurent réservés à des productions futures.

CHAPITRE 5 SIMULATIONS NUMÉRIQUES COMPLÉMENTAIRES POUR L'ÉTUDE DU PHÉNOMÈNE DE SÉGRÉGATION AU SEIN D'UN MÉLANGE GRANULAIRE BIDISPERSE SOUMIS À CISAILLEMENT SIMPLE

Le développement d'une nouvelle étude numérique est justifié par une volonté de détailler le phénomène de ségrégation cinétique pour des échantillons granulaires bidisperses. Les simulations complémentaires sont notamment réfléchies pour dépasser les limitations techniques des précédents essais numériques en déformant un volume de particules afin de déterminer que les modélisations de déposition pourraient permettre d'obtenir des schémas de granoclassement recherchés avec des longueurs de pente et des parcours d'écoulement allongés à surface libre. Les mélanges déjà modélisés pour les reproductions de dépositions sont utilisés une seconde fois pour simuler des essais de cisaillement simple afin d'approfondir la compréhension des mécanismes de granoclassement observés dans les cellules étroites qui prennent place à la surface libre des empilements. L'étude propose le cisaillement de volumes granulaires représentatifs pour en déduire leur rhéologie et l'évolution de potentiels phénomènes de ségrégation en fonction du temps et du taux de déformation $\dot{\gamma}$. Chaque essai simulé est contrôlé par la définition d'un nombre d'inertie I . Les résultats présentés sont obtenus pour des variations de I selon le taux de cisaillement $\dot{\gamma}$ et la pression appliquée P . Les méthodes de réalisation des simulations numériques et leurs interprétations sont données. La projection de l'apport du travail à la résolution des phénomènes de granoclassement est également précisée.

5.1 Méthodologie numérique

La préparation appliquée des volumes particuliers bidisperses modélisés est nécessaire à la détermination du contexte d'étude des phénomènes de ségrégation cinétique. La modélisation des échantillons et la réalisation consécutive des volumes élémentaires pour le cisaillement sont revues pour préciser ou décrire l'environnement des simulations. La procédure d'initialisation des essais de cisaillement qui consiste en la déposition et la consolidation des échantillons choisis est notamment détaillée.

5.1.1 Propriétés générales des matériaux modélisés

Les mélanges granulaires bidisperses utilisés pour les simulations de cisaillement sont constitués des mêmes matériaux et échantillons que ceux utilisés pour l'élaboration des simulations

de déposition (renvoi à **Sec. 4.1**). Plus précisément, les mélanges considérés pour la seconde campagne d'essais numériques sont les mélanges nommés (M.a), (M.b) et (M.c) dont les propriétés sont donc déjà explicitées par les **tableaux 4.1 et 4.3**.

L'objectif des nouveaux essais numériques est de préciser le développement des mécanismes observés à la surface libre des empilements granulaires précédemment construits, ce qui motive logiquement le recours aux mêmes échantillons modélisés. L'utilisation de précédents mélanges s'inscrit dans la suite directe des simulations de déposition ayant démontré les résultats les plus pertinents. Les matériaux déposés dans les simulations intégrant des environnements 3D sont de fait sélectionnés.

5.1.2 Génération des volumes granulaires

Les volumes de particules sont réalisés en disposant aléatoirement les grains des mélanges initiaux dans une région de l'espace délimitée par ses trois dimensions. La déposition des particules se fait par niveaux d'élévation successifs. Un tel mode opératoire prévient normalement les phénomènes de ségrégation et de cristallisation potentiellement inhérents à l'étape de construction des mélanges. Les volumes comptent exactement $N = 10,000$ particules au terme de leur génération, autant de grains répartis dans un domaine de l'espace suffisamment étendu afin de satisfaire le critère énoncé. Les échantillons constitués sur un tel modèle sont dès lors considérés comme représentatifs.

La représentativité des volumes établis est une condition qu'il s'agit de vérifier pour attester de la qualité des modèles numériques présentés et donc de la vraisemblance des comportements mécaniques simulés par le matériau soumis au cisaillement. La notion de représentativité se rapporte à un élément de la théorie des matériaux granulaires déjà abordé (renvoi à **Sec. 2.3.2**). Le critère physique de satisfaction recherché s'applique aux dimensions de l'échantillon cubique porté à cisaillement et se traduit tel que : $H_0 \geq 10d_{max}$, selon H_0 la hauteur initiale du volume après consolidation. La condition traduit une estimation d'une longueur minimale H_0 pour rendre compte des hétérogénéités ambiantes de la microstructure granulaire, aussi incarnées par l'établissement des chaînes de contacts dans un échantillon.

La procédure de génération numérique des échantillons employée valide alors le critère de représentativité et d'homogénéité de distribution en suivant une méthode éprouvée [141,152].

5.1.3 Consolidation isotropique des échantillons

La dernière étape de préparation des essais de cisaillement est la consolidation isotropique des volumes de particules générés (**fig. 5.1**). La consolidation préalable des échantillons est

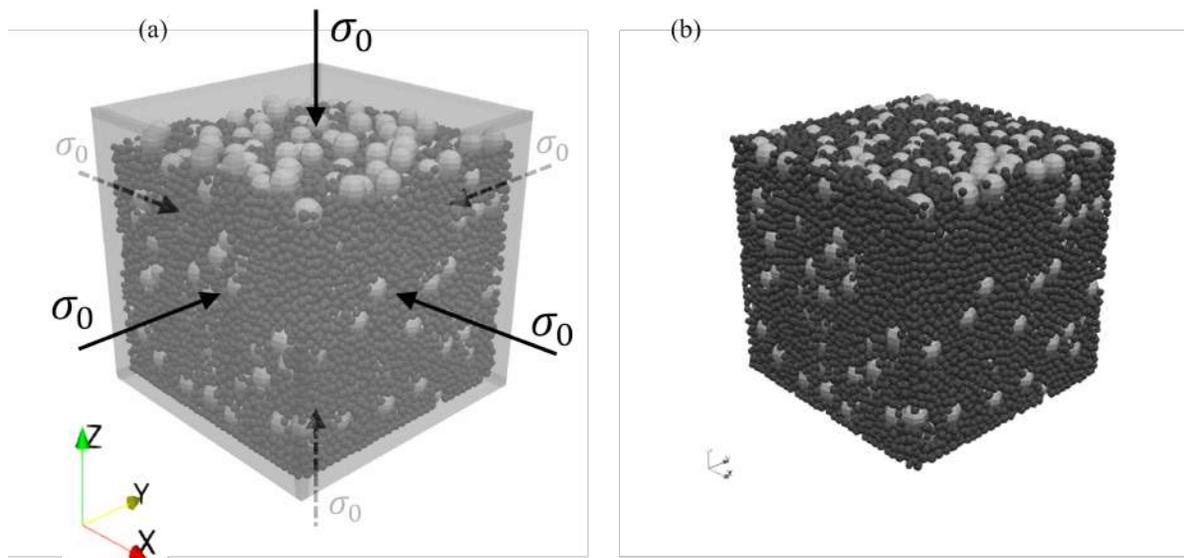


FIGURE 5.1 Conditions limites pour l'exercice de consolidation isotropique des volumes granulaires (a) avec une pression de confinement constante $\sigma_0 = 10,000Pa$; prise de vues (b) de la procédure de consolidation complétée.

accomplie à l'aide de six murs chargés de compresser les mélanges par l'application d'une pression constante $\sigma_0 = 10,000Pa$ sur les faces d'un espace cubique délimité. La phase de compression des échantillons est réalisée en négligeant le champ de pesanteur de l'environnement ainsi que les éventuelles frictions entre les particules et les parois artificielles. La procédure de consolidation est achevée lorsque les réseaux de contacts entre particules sont jugés suffisamment établis pour que le nombre d'interactions relevé fluctue au maximum de 0.1% entre deux itérations de temps numérique de calcul.

Des prises de vues précédant et suivant la consolidation de l'échantillon (M.a) sont notamment présentées en guise d'exemple de description de la procédure par **fig. 5.2**. Les réalisations des étapes de consolidation pour les échantillons issus des mélanges (M.b) et (M.c) sont également illustrées en annexes (**Ann. E**). Un média vidéo de la simulation numérique pour le précédent exercice de compression est rendu disponible en suivant ce [lien](https://youtu.be/lxda976r8No)¹.

La description de l'état des échantillons après consolidation est caractérisée par l'introduction de deux paramètres dont les valeurs références témoignent de la macrostructure ν_0 et de l'hétérogénéité f_{L0} des mélanges obtenus après préparation (**fig. 5.3**).

La fraction solide ν puis la concentration volumique en particules larges f_L théoriques sont

1. <https://youtu.be/lxda976r8No>, lien en clair pour les versions imprimées.

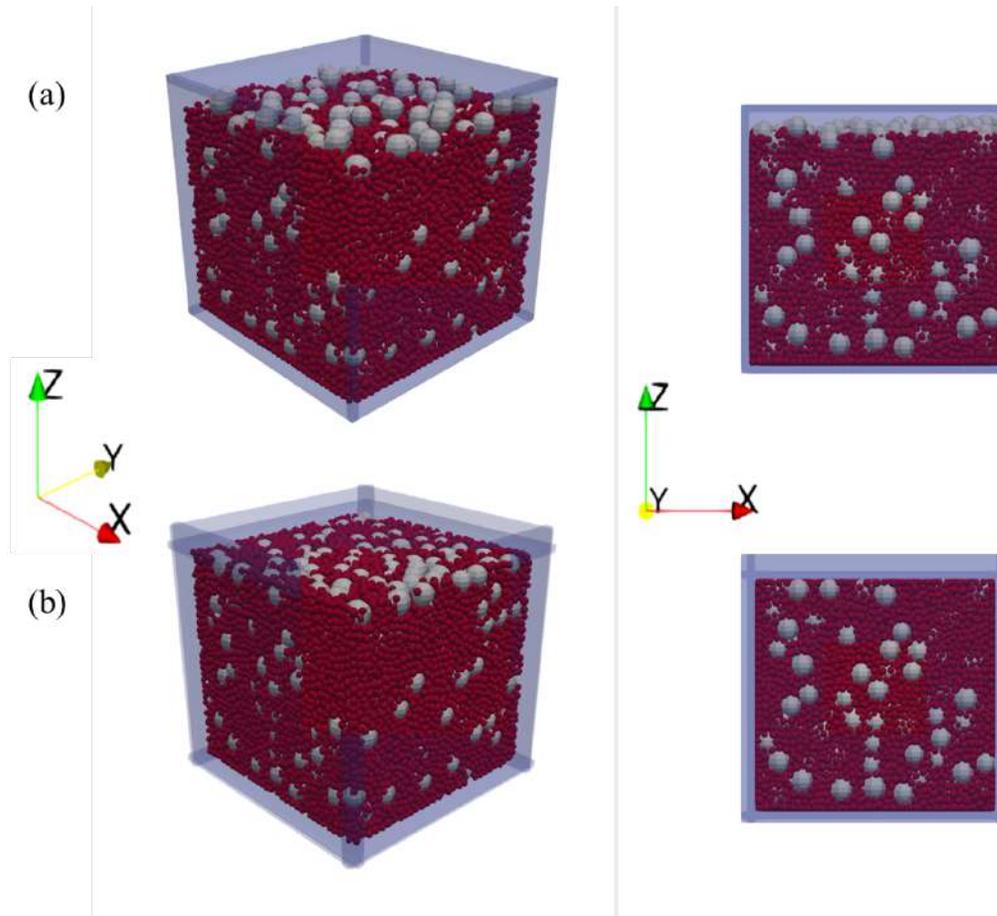


FIGURE 5.2 Prises de vues de la consolidation des échantillons granulaires du type MÉ-LANGE : (a) état initial ; (b) état final, consolidation effectuée.

respectivement déterminées selon **eq. (5.1)**.

$$\nu = \frac{V_S}{V_T} \text{ et, } f_L = \frac{V_L}{V_S} \quad (5.1)$$

- avec,

V_S , le volume de solide d'un échantillon de sol ; V_T , le volume total d'un échantillon de sol ;
 V_L , le volume de particules larges dans un échantillon granulaire bidisperse.

Les méthodes de mesure des grandeurs ν et f_L pour les évaluations appliquées de ségrégation sont développées dans les sections où de telles précisions sont jugées pertinentes (renvoi à **Secs. 5.3.1 et 5.4.2**).

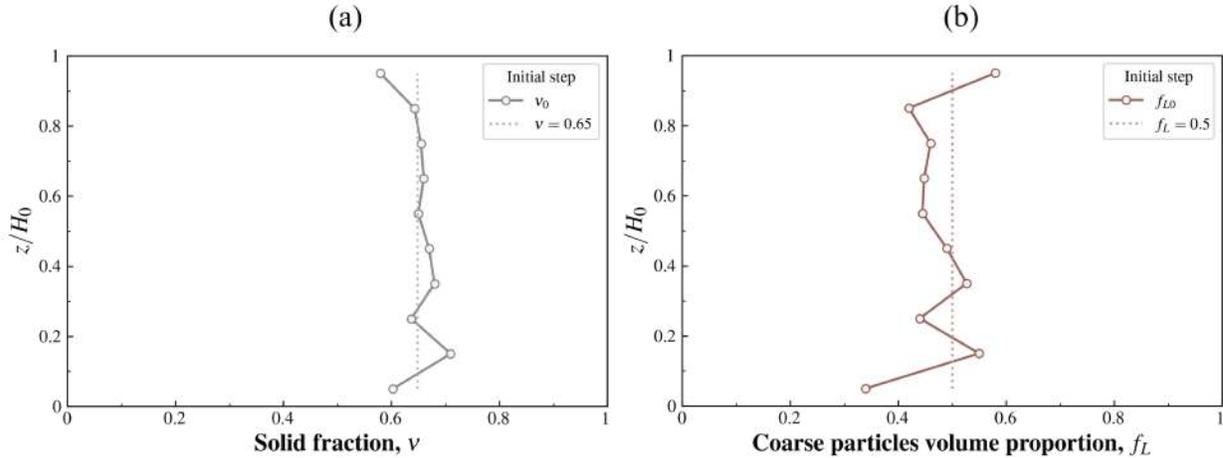


FIGURE 5.3 Mesures des profils initiaux de fraction solide ν_0 (a) et de la proportion volumique en particules larges f_{L0} (b) au travers des échantillons consolidés, avant cisaillement. $f_L = 0.5$ correspond à $m_{LS} = 1$ (car chaque espèce de grains admet une même et unique valeur ρ), comme imposé pour la génération du volume de particules modélisé.

5.2 Lancement et contrôle des essais de cisaillement simulés

Le terme de l'opération consolidation des échantillons laisse place à l'engagement des essais de cisaillement. Une mise à jour de l'affichage de quelques éléments générés et des paramètres de contrôle des modèles de simulation est tout d'abord effectuée :

- Les parois latérales de la boîte de compression sont retirées et des conditions périodiques de reproduction des corps sont imposées sur les plans de l'espace délimitant les côtés révélés des échantillons (selon les axes \vec{X} et \vec{Y}) ;
- Les phénomènes de ségrégation sont des mécanismes gravitaires et le champ de pesanteur original de l'environnement de simulation est donc rétabli pour les essais ;
- Les comportements en frottement des particules entre elles sont définis pour reproduire les propriétés des matériaux modélisés dans le cadre des simulations de déposition précédentes telles que décrites par le **tableau 4.1** ;
- Les particules en contact avec les murs supérieur et inférieur à l'achèvement de la consolidation des échantillons sont fixées aux mêmes parois pour éviter des effets de localisation de contraintes. Les mêmes particules ne sont pas considérées pour l'interprétation des résultats de simulations.

Les simulations des essais de cisaillement simple débutent aux ajustements de l'environnement

numérique (**fig. 5.4**). Une pression P est appliquée sur le mur supérieur selon l'axe \vec{Z} et un déplacement horizontal à une vitesse constante $v_x/2$ est imposé respectivement aux deux parois de cisaillement dans des directions opposées de l'axe \vec{X} . Une illustration de la procédure dictée pour les simulations est enfin donnée par **fig. 5.5**².

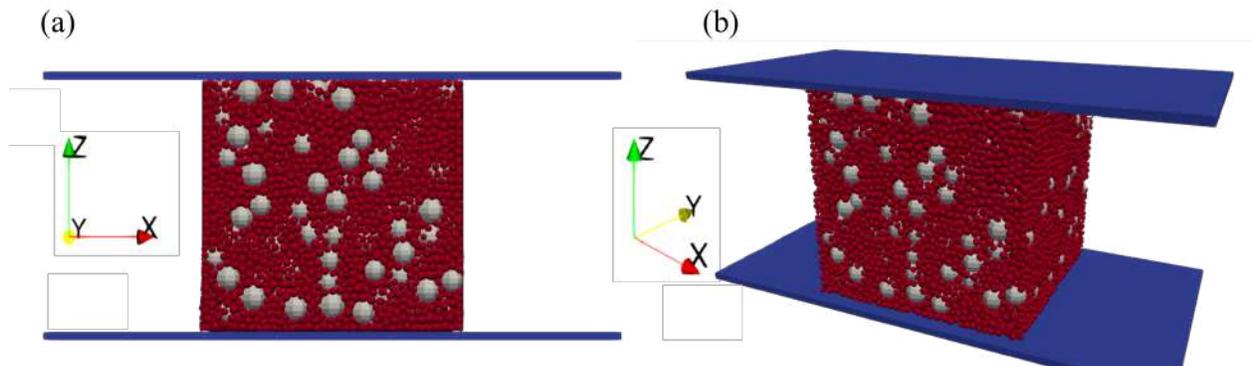


FIGURE 5.4 Prises de vues des volumes granulaires avant l'initiation de la procédure de cisaillement. Les représentations choisies sont données de côté (a) et en perspective (b).

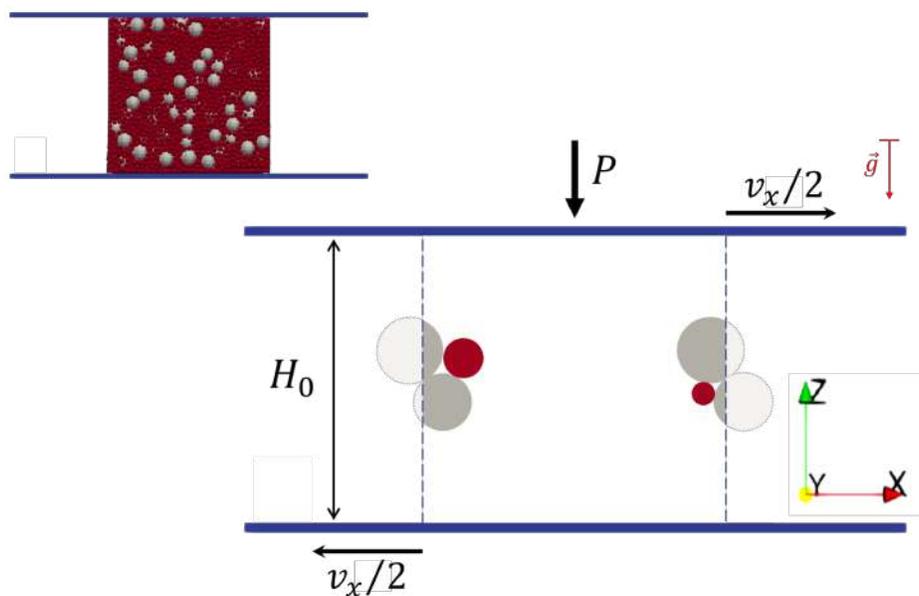


FIGURE 5.5 Schéma des essais de cisaillement simple simulés.

2. Il est important de préciser que la conduite des simulations de cisaillement s'arrête à l'étude des mélanges bidisperses de grains sphériques (M.a). Les résultats présentés ne concernent donc pas la sollicitation des échantillons de polyèdres dont l'utilisation est abrégée à la suite de leur consolidation et réservée pour le développements d'autres travaux (**Ann. E**).

5.2.1 Nombre d'inertie

L'ensemble des simulations réalisées est ordonné selon la définition d'un régime de cisaillement pour chaque essai numérique. Le régime de cisaillement d'une simulation est alors exprimé par l'introduction d'un nombre inertiel caractéristique noté I .

$$I = \frac{v_x}{H_0} \langle d \rangle \sqrt{\frac{\rho}{P}} \text{ ou, } I = \dot{\gamma} \langle d \rangle \sqrt{\frac{\rho}{P}} \quad (5.2)$$

L'élaboration des essais fait le choix d'imposer différents régimes de cisaillement aux échantillons granulaires préparés pour étudier le phénomène de ségrégation cinétique. Les contextes de sollicitation fixés correspondent à la reproduction de régimes de cisaillement relativement dynamiques, qualifiés de denses ($10^{-3} \leq I \leq 10^{-1}$) à collisionnels ($I > 10^{-1}$). La reproduction de telles conditions est voulue pour approcher l'agitation des avalanches déclenchées à la surface libre des dépôts de particules reconnues comme moyens et lieux des mécanismes de ségrégation observés. Les intervalles de valeurs de I explorés par la campagne d'essais sont résumés par le **tableau 5.1** pour différents couples de paramètres de contrôle (v_x, P).

TABLEAU 5.1 Paramètres de contrôle des simulations de cisaillement.

MÉLANGE	H_0 (mm)	ρ (g/cm ³)	$\langle d \rangle$ (mm)
MÉLANGE (a)	33	2.7	2.00 ($m_{LS} = 1$)
P (Pa)	v_x (m/s)	$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	I
10,000	0.338	11	1.10^{-2}
10,000	1.690	55	5.10^{-2}
10,000	3.380	111	1.10^{-1}
10,000	5.060	167	15.10^{-2}
10,000	6.750	220	2.10^{-1}
1,000	2.13	70	2.10^{-1}
100	0.675	22	2.10^{-1}

5.2.2 Variation des vitesses de cisaillement

Une division des essais est destinée à l'étude de l'influence de la variation de la vitesse de cisaillement sur les cinématiques de ségrégation éventuellement observées. De telles simulations sont donc réalisées pour une pression de surcharge P constante. Il est imaginé qu'une augmentation de la vitesse v_x , soit du nombre inertiel I , favoriserait le remaniement du milieu granulaire soumis à sollicitation et donc l'émergence de mécanismes de ségrégation. Les vitesses choisies pour la conduite des simulations respectent des ordres de grandeur mesu-

rés au sein des modèles numériques de déposition présentés et dans de précédents travaux expérimentaux similaires [17, 132] : l'approximation $v_x \sim 1m/s$ est retenue (**tab. 5.1**).

5.2.3 Variation des pressions de surcharge appliquées

L'influence de la variation de la pression de surcharge appliquée sur la cinématique des mécanismes de ségrégation est un autre sujet d'étude pour lequel des scénarios de simulations sont réfléchis. Trois ordres de grandeur de pression P sont déterminés : $P = 10,000Pa$, $1,000Pa$ et $100Pa$. Il est attendu que les diminutions consécutives des pressions de surcharge entre les différentes simulations puissent rendre compte de l'influence du confinement des échantillons sur le développement de mécanismes de ségrégation en approchant graduellement un cas théorique d'écoulement à surface libre. De telles simulations sont réalisées pour des régimes de cisaillement caractérisés par un nombre d'inertie constant $I = 2.10^{-1}$ (**tab. 5.1**).

5.3 Évolution du système granulaire au cours du cisaillement

Les simulations des phases de cisaillement des échantillons sont débutées suite à la définition des paramètres choisis pour chaque itération. La progression des essais de cisaillement est rapportée par la mesure d'un taux de déformation $\gamma = 2\delta_x/H_0$, avec le suivi du déplacement horizontal du mur supérieur δ_x . Le lancement des simulations s'accorde pour l'atteinte d'un premier palier de déformation des échantillons fixé tel que $\gamma = 500\%$ (ou $\gamma = 5$), estimation considérée suffisante pour dépasser le régime stationnaire de cisaillement. Les poursuites éventuelles des essais au-delà de cet état sont décidées au cas par cas.

L'étendue du cisaillement des échantillons sur une longueur $2\delta_x \sim \gamma H_0$ est estimée du même ordre de grandeur que le parcours des avalanches observées à la surface libre des échantillons déposés dans les différents essais déjà présentés dans le document. Des études de la macrostructure et de la microstructure des mélanges bidisperses sont menées au cours des simulations de cisaillement pour compléter les analyses des mécanismes de ségrégation recherchés. La validation du comportement rhéologique simulé des échantillons est majoritairement introduite au travers des exemples considérant une pression de surcharge importante $P = 10,000Pa$ pour laquelle de nombreux résultats sont connus [151–154, 157, 158].

5.3.1 Fraction solide

Le renseignement de la fraction solide ν est un premier élément de caractérisation de la macrostructure d'un milieu granulaire. La **figure 5.6.a** présente les mesures de l'évolution de ν pour différentes valeurs de nombre inertiel I sachant $P = 10,000Pa$ selon l'état d'avancée

de la déformation de l'échantillon γ . La **figure 5.6.b** précise les valeurs de fraction solide mesurées au terme des mêmes essais ($P = 10,000Pa$, $\gamma = 5$) comme une fonction des nombres d'inertie I appliqués.

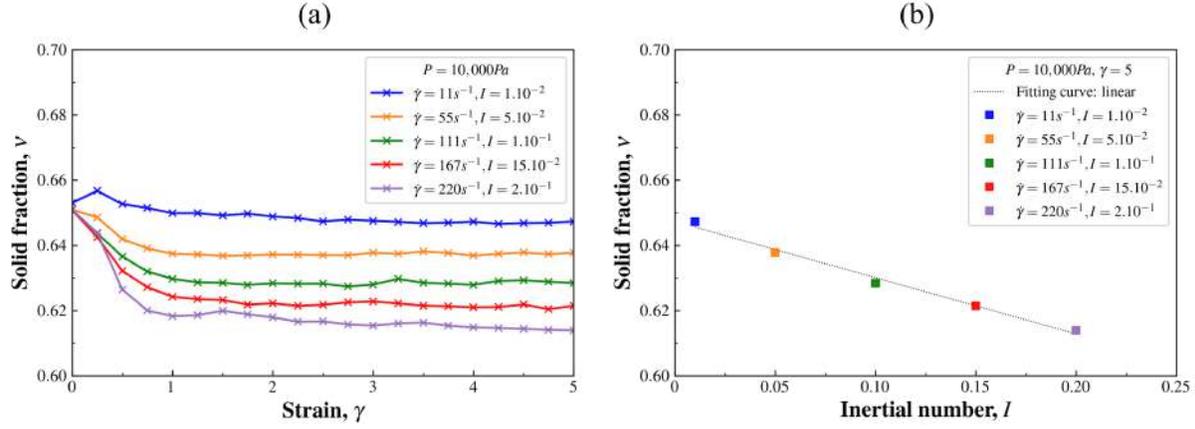


FIGURE 5.6 Évolution de la fraction solide ν à $P = 10,000Pa$ pour chaque valeur de I , en fonction du taux de déformation γ (a); (b) loi de dilatance : $\nu \sim a + bI$.

Les tendances d'évolution observées pour ν sont similaires à chaque régime de cisaillement et décrivent une rapide diminution des fractions solides des échantillons avant l'atteinte de valeurs de ν limites. Une telle remarque vérifie notamment le comportement dilatant du matériau modélisé car le volume total des échantillons croît sous l'influence du cisaillement. Il apparaît enfin que la valeur prise par ν au terme de la phase de cisaillement pour chaque déposition diminue respectivement avec l'augmentation des valeurs de I indiquées, et donc avec l'intensification des régimes des cisaillement. Les résultats proposés font écho à des lois de dilatance déjà démontrées liant linéairement les variations des valeurs de ν stationnaires et les augmentations du nombre d'inertie [154, 157, 158].

5.3.2 Résistance au cisaillement

La résistance au cisaillement est un autre paramètre mesuré à l'échelle de l'échantillon pour décrire son comportement et ses propriétés. Le calcul de la résistance au cisaillement est conduit à partir de l'élaboration du tenseur des contraintes σ pour le système granulaire à l'étude dont les composantes s'obtiennent, pour chaque contact c , d'après **eq. (5.3)**.

$$\sigma_{ij} = \frac{1}{V_T} \sum_c f_i^c l_j^c \quad (5.3)$$

- avec,

\mathbf{f} , la force mesurée du contact considéré ; \mathbf{l} le vecteur branche qui lie les centres de masses des particules du contact considéré.

La formulation des conditions géométriques périodiques imposées sur les faces latérales du volume granulaire est telle que le traitement des états de contraintes n'est rendu pertinent que sur le plan défini par $(\vec{X} ; \vec{Z})$. L'expression des contraintes principales σ_1 et σ_2 du tenseur des contraintes sur le même plan de cisaillement permet de définir les contraintes moyennes et déviatoriques, respectivement notées p_s et q_s . La reprise consécutive du modèle de Mohr-Coulomb donne alors l'expression de l'angle de friction interne ϕ' en sollicitation comme le rapport q_s/p_s , ramené à la notion de résistance en cisaillement, **eq. (5.4)**.

$$p_s = \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2} \text{ et } q_s = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \quad \text{pour, } \sin(\phi') = q_s/p_s \quad (5.4)$$

La **figure 5.7.a** présente l'évolution des mesures de q_s/p_s pour différentes valeurs de nombre inertiel I sachant $P = 10,000Pa$ comme une fonction de γ . La **figure 5.7.b** reprend les mêmes résultats pour exposer une relation de friction potentielle liant les résistances au cisaillement stationnaires et les variations des nombres d'inertie explorés.

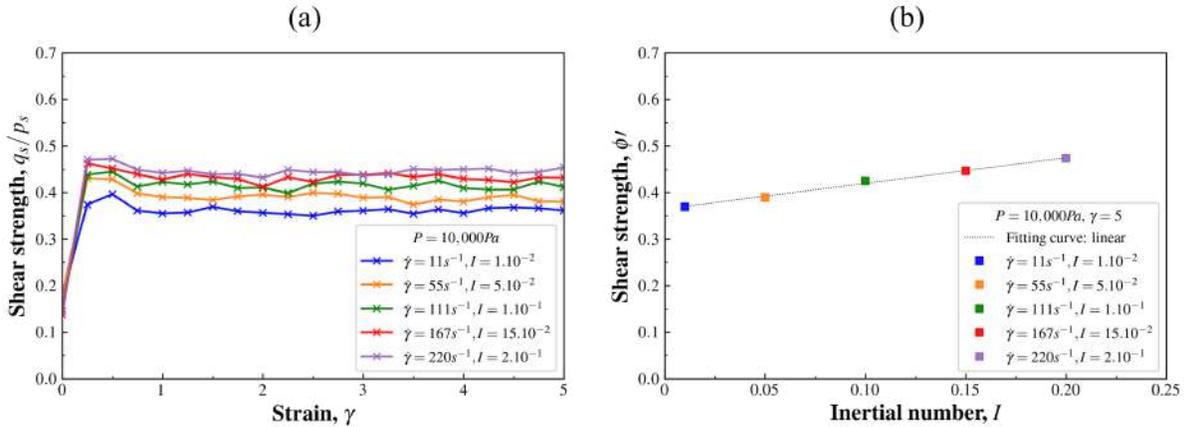


FIGURE 5.7 Évolution de la résistance au cisaillement q_s/p_s à $P = 10,000Pa$ pour chaque valeur de I , en fonction du taux de déformation γ (a) ; (b) loi de frottement : $\phi' \sim a + bI$.

L'interprétation des simulations démontre que les valeurs exposées de résistances au cisaillement augmentent systématiquement avec le taux de déformation γ au début des essais. Les résistances au cisaillement croissent jusqu'à l'atteinte rapide de valeurs seuils stables autour de légères fluctuations dès que $\gamma \approx 70\%$. L'augmentation du nombre inertiel I entre les différents scénarios de cisaillement coïncide avec l'accroissement de la résistance au cisaillement

q_s/ps mesurée en régime stationnaire. De tels résultats sont en accord avec les lois de friction du type $\mu(I)$ qui prédisent l'augmentation d'apparence linéaire du comportement en friction d'un matériau avec l'intensification des régimes de cisaillement [154, 157, 158, 196].

5.3.3 Nombre de coordination

La microstructure des mélanges est évaluée avec l'évolution du nombre de coordination Z déjà introduit depuis la théorie des matériaux granulaires (renvoi à **Sec. 2.3.2**). La **figure 5.8.a** présente les évolutions du nombre de coordination Z mesuré pour les mélanges au cours des essais de cisaillement menés pour différentes valeurs de nombre d'inertie I sachant $P = 10,000Pa$. La **figure 5.8.b** témoigne de l'influence des intensités des régimes de cisaillement sur l'établissement des contacts effectifs entre éléments et leur nombre dans un milieu granulaire soumis à une telle sollicitation.

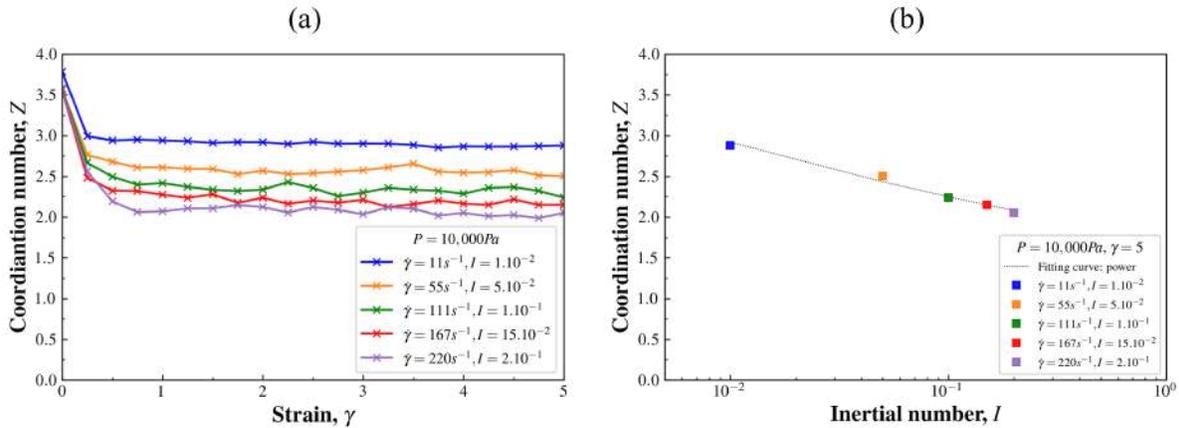


FIGURE 5.8 Évolution du nombre de coordination Z à $P = 10,000Pa$ pour chaque valeur de I , en fonction du taux de déformation γ (a); (b) variation du nombre de coordination Z en fonction de I : $Z \sim aI^b$.

L'étude des variations des nombres de coordination révèle que l'arrangement et la distribution des contacts au sein des échantillons atteignent un régime stationnaire pour un même niveau de déformation γ que celui relevé dans les analyses de macrostructure. La dégradation de l'état initial des mélanges par le cisaillement cause la diminution rapide et attendue des nombres de coordination jusqu'à des valeurs stables similaires à des précédents publiés [154, 157, 158], notamment pour un milieu polydisperse. Il apparaît alors qu'une épreuve de cisaillement peut entraîner la réorganisation d'un réseau de contacts dense en un ensemble de collisions multiples plus erratiques. L'augmentation des intensités des régimes de cisaillement cause les diminutions des nombres de coordination Z mesurés au terme des essais. La tendance

des résultats affichés tend à rejoindre l'hypothèse de l'existence d'une loi exponentielle pour décrire Z comme une fonction du nombre inertiel I .

Les analyses de structure des matériaux granulaires soumis à cisaillement pour une pression de surcharge importante $P = 10,000Pa$ et un intervalle donné de nombres inertiels I ($10^{-2} \leq I \leq 2.10^{-1}$) permettent de vérifier les comportements simulés des mélanges à l'aide de divers indicateurs calculés. Les dernières observations démontrent que l'intensification des régimes de cisaillement est responsable des augmentations de la résistance mécanique d'un échantillon et de l'ampleur de la modification de ses arrangements microstructuraux.

5.4 Mesures de ségrégation au cours du cisaillement

Les études de rhéologie des volumes de grains soumis à sollicitation se poursuivent avec le développement de mesures des états de ségrégation des mélanges au cours des essais de cisaillement. La nouvelle série d'analyses a donc pour objectif la mise en évidence de transitions d'états homogènes des échantillons initiaux vers des états ségrégués hétérogènes expliquées par la progression des procédures de cisaillement. Les démonstrations envisagées concernent des mesures de localisation des efforts de cisaillement, de fractions solides ν et de distributions des particules grossières f_L dans les volumes de grains. Il est rappelé que les profils de référence de ν et f_L au terme des phases de préparation des échantillons sont donnés **Sec. 5.1.3** comme une introduction aux indicateurs calculés de ségrégation utilisés.

L'investigation des mécanismes de ségrégation considère de nouveau les essais dimensionnés pour une pression de surcharge constante $P = 10,000Pa$ mais élargit également le panel d'itérations pris en compte aux simulations de cisaillement réalisées pour $P = 1,000Pa$ et $P = 100Pa$. Les diminutions des pressions appliquées ont pour but d'évaluer l'influence de l'intensité du confinement des échantillons sur les écoulements modélisés dans la reproduction d'exemples de ségrégation gravitaire, plus naturellement observés à la surface libre des empilements de grains. Certaines des simulations sont poursuivies au-delà du premier taux de déformation limite $\gamma = 5$ pour observer des états d'échantillons avec un avancement de cisaillement prononcé. De tels prolongements d'essais pourraient permettre d'interpréter qualitativement l'étendue des phénomènes de ségrégation développés au sein des mélanges.

Les éléments de mesures d'indicateurs calculés de ségrégation ne sont pas donnés de manière exhaustive dans la trame principale du document, seuls les plus pertinents y sont logiquement retenus et intégrés. Le reste des travaux d'interprétations de simulations est de fait consigné en annexes (**Ann. F**).

5.4.1 Profils des vitesses et localisation du cisaillement

Le tracé des profils des vitesses au travers des échantillons est abordé pour déterminer la distribution des régimes de cisaillement sur la hauteur réelle H_γ des volumes. Les **figures 5.9.a et 5.9.b** décrivent l'établissement des vitesses de cisaillement dans les mélanges granulaires au terme des essais menés pour $P = 10,000Pa$ et sachant les variations du nombre inertiel programmées, respectivement sous forme de valeurs brutes puis normalisées. Les **figures 5.10.a et 5.10.b** montrent des descriptions similaires des régimes de cisaillement établis pour $\gamma = 5$ dans le cas des simulations appliquant $I = 2.10^{-1}$ pour trois ordres de grandeur de pression de surcharge $P = 10,000Pa$, $1,000Pa$ et $100Pa$.

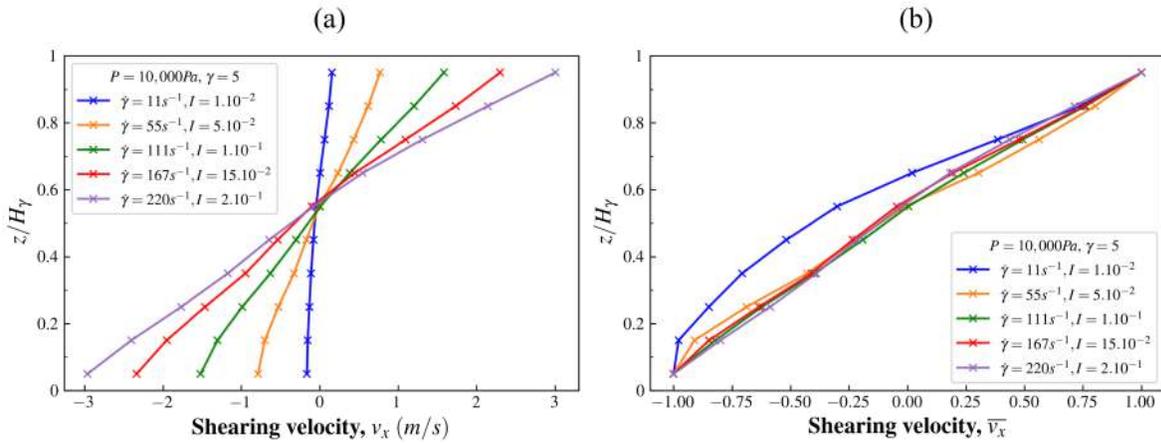


FIGURE 5.9 Évolution de la vitesse de cisaillement v_x (a) et de la vitesse de cisaillement normalisée \bar{v}_x (b), à $P = 10,000Pa$ et $\gamma = 5$ pour chaque valeur de I , selon la hauteur de l'échantillon z/H_γ .

L'étude des profils des vitesses au cours des essais a pour objectif de vérifier la sollicitation complète des échantillons ou au contraire d'identifier des régions de localisation dans les phases de cisaillement. L'application d'une même pression de surcharge $P = 10,000Pa$, identifiant le premier groupe de simulations, démontre un cisaillement égal des échantillons sur leur hauteur avec des distributions linéaires des vitesses (**fig. 5.8**). Aucun exemple de localisation de cisaillement n'est donc à relever parmi les premières itérations numériques ni à attribuer aux variations de nombre inertiel associées. Le second groupe de simulations est caractérisé par la conduite des essais de cisaillement à un régime de cisaillement constant $I = 2.10^{-1}$ et des pressions de surcharge différentes (**fig. 5.9**). Les profils des vitesses mesurés pour le second groupe de simulations mettent à jour des distributions de vitesses inconstantes sur la hauteur des échantillons et définissant donc des régions de localisations de cisaillement. En particulier, le cas de l'essai exerçant une pression de surcharge $P = 100Pa$ expose une

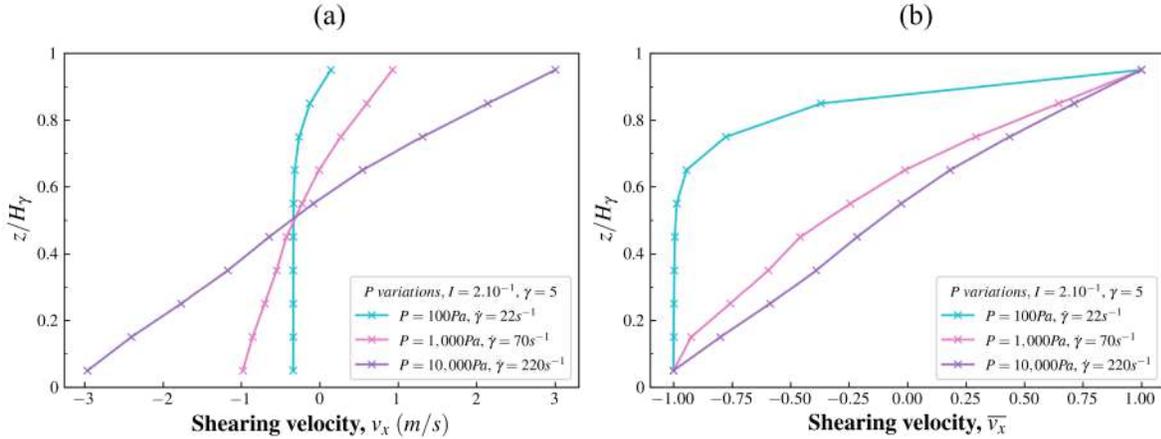


FIGURE 5.10 Évolution de la vitesse de cisaillement v_x (a) et de la vitesse de cisaillement normalisée \bar{v}_x (b), à $I = 2.10^{-1}$ et $\gamma = 5$ pour chaque valeur de P , selon la hauteur de l'échantillon z/H_γ .

localisation marquée du cisaillement dans la partie haute de l'échantillon ($z/H_\gamma \geq 0.8$). Le rassemblement des différentes observations démontre ainsi que la diminution, et les variations, des pressions de surcharge appliquées au sein des essais de cisaillement sont à l'origine de phénomènes de localisation des sollicitations sur la hauteur des échantillons. De telles remarques font sens s'il est envisagé de se représenter l'effet de la diminution des pressions de confinement utilisées pour la conduite des simulations dans l'engagement du cisaillement sur la profondeur des volumes modélisés.

Les premières distinctions relevées entre les différents scénarios de sollicitation proviennent de l'étude des distributions des régimes de cisaillement au sein des échantillons. La localisation effective des champs des vitesses et l'influence relative des pressions de surcharge sur le confinement des écoulements sont des indices qui permettent de discerner des contextes favorables à la liberté de développement de phénomènes gravitaires au travers des simulations.

5.4.2 Indicateurs calculés de ségrégation

Les indicateurs calculés de ségrégation sont choisis et dimensionnés pour décrire l'état d'homogénéité des échantillons bidisperses en exprimant l'agencement spatial relatif des deux populations de grains. Les méthodes de mesure sont réfléchies pour traduire les intensités de ségrégation dans la direction de réalisation du phénomène, soit dans la direction \vec{Z} selon la hauteur des volumes. La phase d'interprétation divise les échantillons en dix régions de même épaisseur pour effectuer le calcul local des paramètres retenus comme les descripteurs

de la progression des mécanismes de ségrégation au cours du cisaillement (eq. (5.1)) :

- **Paramètre de fraction solide, ν** ; la dilatance particulière d'un matériau granulaire polydisperse peut représenter un indice de la transition de l'organisation de l'échantillon depuis un mélange homogène, autorisant des configurations de remplissage des vides optimum, à un mélange hétérogène ou ségrégué. En ce sens, les mesures de l'évolution des fractions solides respectives des régions des volumes de grains sont un indicateur possible de l'apparition de phénomènes de ségrégation.
- **Concentration volumique des particules larges, f_L** ; la définition du paramètre est explicite. $f_L = 1$ traduit l'occupation exclusive d'une région d'un échantillon par une population de particules grossières, $f_L = 0$ l'absence du même type de particules dans une division d'un échantillon.

Les figures 5.11.a et 5.11.b décrivent l'homogénéité relative, ou les états de ségrégation, des mélanges granulaires au terme des essais de cisaillement menés pour $P = 10,000Pa$ et sachant les variations du nombre inertiel programmées, respectivement au travers des mesures des paramètres ν et f_L sur la hauteur des échantillons. Les figures 5.12.a et 5.12.b montrent des mesures similaires des indicateurs calculés de ségrégation établis pour $\gamma = 5$ dans le cas des simulations appliquant $I = 2.10^{-1}$ pour trois ordres de grandeur de pression de surcharge $P = 10,000Pa$, $1,000Pa$ et $100Pa$.

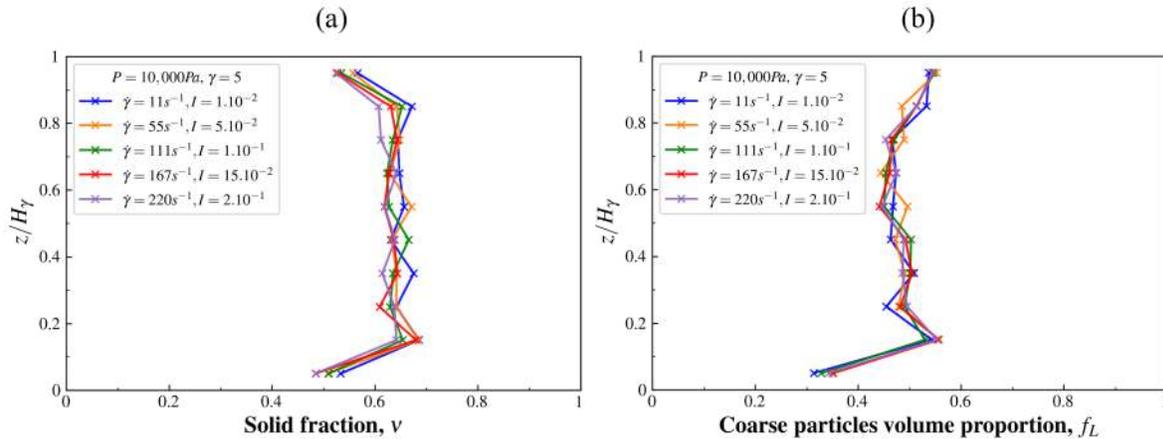


FIGURE 5.11 Évolution de la fraction solide ν (a) et de la proportion volumique en particules larges f_L (b), à $P = 10,000Pa$ et $\gamma = 5$ pour chaque valeur de I , selon la hauteur de l'échantillon z/H_γ .

Les évolutions des grandeurs ν et f_L sont étudiées simultanément, et ce pour chaque groupe de simulations. Les essais de cisaillement réalisés pour une pression de surcharge constante $P = 10,000Pa$ présentent des profils d'indicateurs de ségrégation qui ne fluctuent que peu

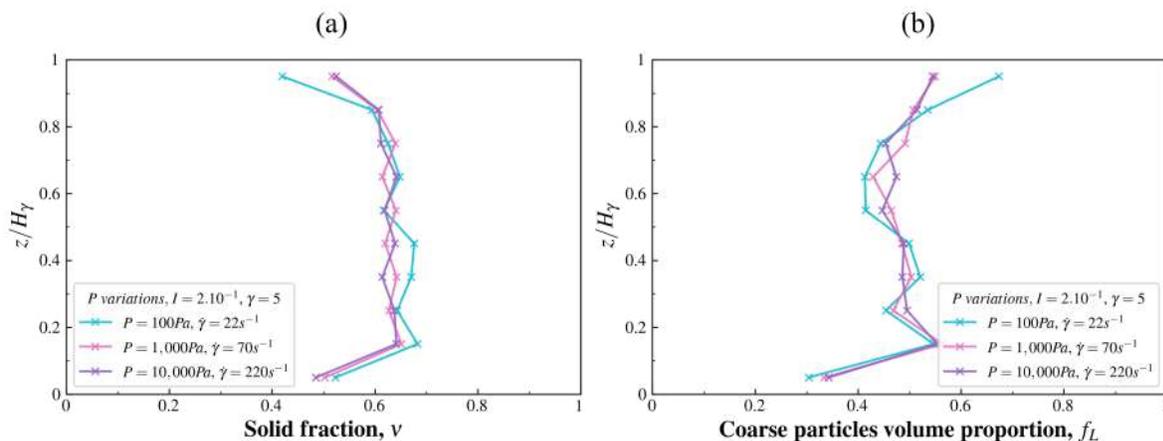


FIGURE 5.12 Évolution de la fraction solide ν (a) et de la proportion volumique en particules larges f_L (b), à $I = 2.10^{-1}$ et $\gamma = 5$ pour chaque valeur de P , selon la hauteur de l'échantillon z/H_γ .

d'un scénario à l'autre, soit avec les variations des nombres d'inertie I fixés (**fig. 5.11**). Les tendances des mesures de fractions solides et de concentrations volumiques des espèces de grains pour $\gamma = 5$ calquent aux profils exposés par **fig. 5.3** au départ des simulations. Quelques points de calcul particuliers méritent toutefois une attention d'interprétation. Les régions des échantillons au contact des parois sont notamment les plus sollicitées par les procédures de cisaillement (**fig. 5.9**) et mettent alors en évidence des valeurs de ν inférieures à celles mesurées au centre des mélanges du fait des remaniements et des phénomènes de dilatance causés par la conduite des essais. La faible concentration volumique en particules grossières systématiquement relevée au bas des échantillons est, quant à elle, le résultat d'un aléatoire sans conséquence de la méthode de préparation des mélanges. Les dernières remarques sont d'ordre général et restent vérifiées pour le second ensemble d'essais numériques. L'établissement des profils d'indicateurs calculés de ségrégation pour différentes valeurs de P révèle davantage l'influence des pressions de confinement appliquées sur les comportements des échantillons cisailés (**fig. 5.12**). L'utilisation d'une pression de surcharge $P = 100Pa$ met singulièrement en avant le développement de mécanismes de remaniement des assemblages granulaires dans les régions "hautes" des volumes où sont distinguées des mesures extrêmes de ν et f_L qui témoignent de l'initiation d'un phénomène de granoclassement. L'analyse de l'échantillon de grains à l'achèvement de l'étape de cisaillement démontre en effet qu'une région de faible fraction solide localisée dans la division supérieure du mélange a servi de lieu de ségrégation pour permettre l'accumulation de larges particules au sommet. Un schéma de ségrégation théorique est ainsi reproduit avec le cisaillement du système granulaire décrit.

Les observations rapportées confirment les hypothèses précédemment évoquées suite à la mise en évidence de cisaillements localisés au sein des simulations utilisant des pressions de surcharge réduites et imposant un confinement moindre sur les écoulements modélisés. Il apparaît que des tendances de ségrégation peuvent être démontrées avec le cisaillement de milieux polydisperses mais que l'application de pressions de surcharge élevées pour la réalisation des essais freine le développement des mécanismes attendus [197]. Les analyses données sont cependant limitées par les taux de déformation fixés au départ des simulations tels que $\gamma = 500\%$; aucun des affichages réalisables pour les stades de déformation atteints ne pourrait être considéré comme un exemple pertinent de ségrégation au sein des échantillons constitués. La poursuite des efforts pour la reproduction de phénomènes de ségrégation avec le cisaillement de mélanges granulaires bidisperses se concrétise alors dans le prolongement des essais numériques ayant démontré les meilleurs résultats.

5.4.3 Démonstration effective de ségrégation

Deux cas particuliers de simulations sont sélectionnés pour être prolongés au-delà du taux de déformation initialement envisagé. Les scénarios de cisaillement retenus sont ceux implémentant les contextes de confinement identifiés comme les plus favorables pour l'observation de phénomènes de ségrégation, soit les essais du second groupe de simulations appliquant des pressions de surcharge $P = 100Pa$ et $P = 1,000Pa$. Le réemploi de telles itérations a pour but de démontrer le développement effectif de phénomènes de ségrégation en étudiant notamment l'influence d'une différence de pression de confinement sur la cinématique des mécanismes de granoclassement reproduits. Les nouveaux objectifs de déformation des échantillons sont fixés pour la vérification de la condition $\gamma \geq 100$ et se réservent le droit d'être ajustés sur la base des observations effectuées.

Paramètres mesurés comme preuves de ségrégation

Les prolongements des essais de cisaillement sont examinés avec les mêmes outils de description quantitatifs déjà introduits. Les interprétations des simulations étendues présentent ainsi l'évolution des états ou de paramètres calculés des échantillons déformés sur la hauteur des volumes de grains z/H_γ à différentes étapes de progression des essais γ . La trame de la rétrospective des modélisations de cisaillement demeure inchangée.

La **figure 5.13** donne à voir les dynamiques d'établissement des champs des vitesses au travers des échantillons sélectionnés avec le prolongement des efforts de cisaillement. Les

résultats affichés semblent confirmer les tendances démontrées précédemment au terme des premières simulations menées pour $\gamma = 5$ (**fig. 5.10**). Les distributions des profils des vitesses dans les mélanges granulaires sont en effet fonctions des pressions de surcharge appliquées pour la conduite des essais. Des régions localisées de cisaillement sont notamment remarquées pour l'emploi de pressions de confinement réduites dans les volumes supérieures des échantillons (**fig. 5.13.a**). Les phénomènes de localisation tendent à disparaître avec l'augmentation des valeurs de P qui cause un investissement transversal du milieu cisailé par les sollicitations (**fig. 5.13.b**). Les données procurées par le prolongement des essais permettent alors d'observer la progression nouvelle d'un front de cisaillement localisé (jusqu'à $z/H_\gamma \geq 0.6$) vers la base des mélanges à mesure que le taux de déformation s'accroît. Les procédures de sollicitation des simulations n'évoluent pas au cours de leur durée ; la dernière constatation soutient donc l'idée qu'un réarrangement particulier de la structure du système granulaire pourrait influencer l'installation des régimes de cisaillement et leur localisation. De telles appréciations pourraient dès lors témoigner de l'émergence d'effets de ségrégation.

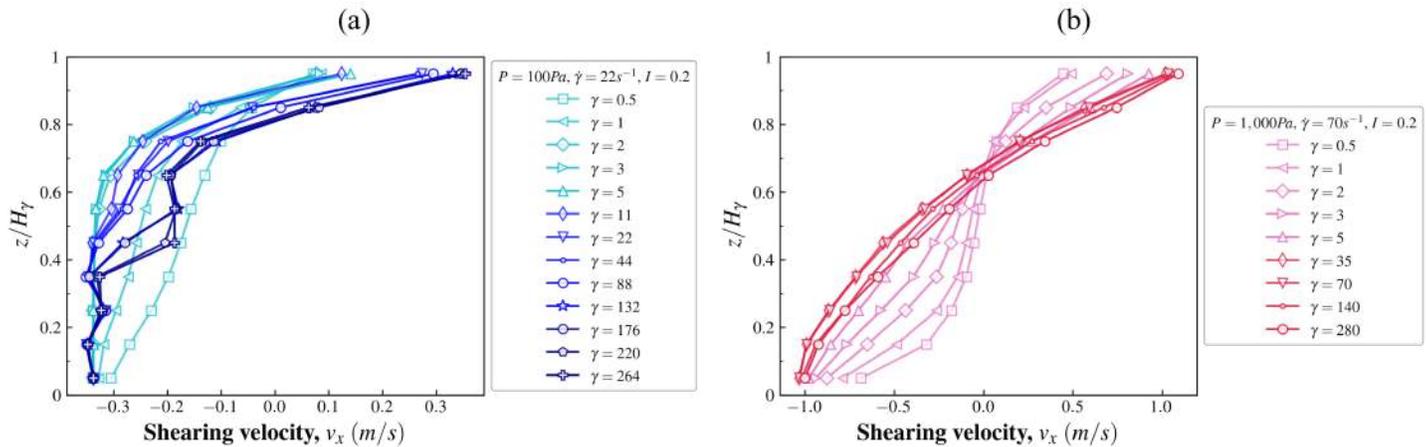


FIGURE 5.13 Évolution de la vitesse de cisaillement v_x à $I = 2.10^{-1}$ en fonction du taux de déformation γ selon la hauteur de l'échantillon z/H_γ : (a) $P = 100Pa$; (b) $P = 1,000Pa$.

L'enregistrement d'indicateurs calculés de ségrégation se poursuit également avec la prolongation des simulations de cisaillement. La **figure 5.14** présente des mesures additionnelles du paramètre de fraction solide ν à différentes avancées de déformation des échantillons, respectivement pour les deux variations de pressions de surcharge $P = 100Pa$ et $P = 1,000Pa$. Les comparaisons des profils de ν à plusieurs instants indiqués par γ vérifient tout d'abord les hypothèses macrostructurelles portées par les mesures arrêtées précédentes (**fig. 5.11**). Les profils de fraction solide relevés oscillent majoritairement autour d'une moyenne de l'indicateur ν malgré le dégagement de régions d'intérêt particulier. Les points de mesure de

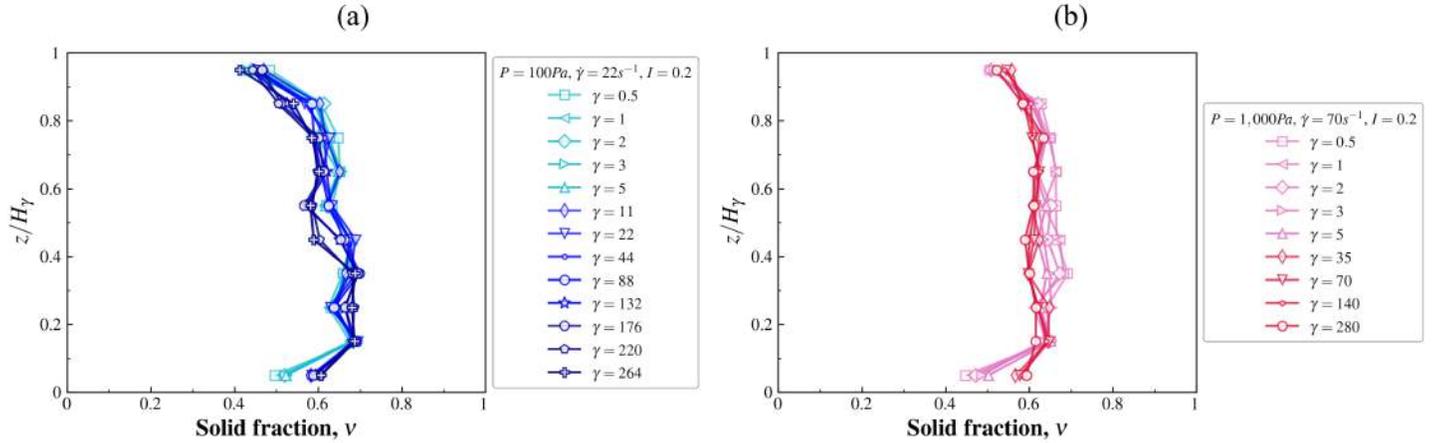


FIGURE 5.14 Évolution de la fraction solide ν à $I = 2.10^{-1}$ en fonction du taux de déformation γ selon la hauteur de l'échantillon z/H_γ : (a) $P = 100Pa$; (b) $P = 1,000Pa$.

fraction solide situés proches du mur supérieur de cisaillement exposent notamment des valeurs de ν réduites car il s'agit du lieu de dilatance des essais - soit de remaniement relatif des grains - jusqu'à l'atteinte d'un état stationnaire. Les résultats donnés font également écho à d'autres annotations. La récente démonstration d'effets de localisation prolongés du cisaillement s'accompagne de l'observation de profils de fraction solide qui traduisent et confirment les tendances d'établissement des régimes de sollicitation. La reproduction d'un contexte de confinement conséquent s'accorde avec une distribution linéaire du cisaillement sur le volume entier et se traduit par l'obtention d'un profil de fraction solide uniforme (**fig. 5.14.b**). La réduction des pressions de surcharge, à l'inverse, est à l'origine d'une répartition inégale des régimes de cisaillement et semble s'accorder à un profil ν qui prouve une diminution régressive de la densité des assemblages de l'échantillon (**fig. 5.14.a**). Le développement marqué d'un phénomène de ségrégation localisé aux hauteurs du volume de grains pour le scénario $P = 100Pa$ correspondrait alors aux derniers commentaires rapportés.

La **figure 5.15** complète l'ensemble d'indicateurs calculés proposés pour la description de la prolongation des simulations de cisaillement avec la présentation des mesures de concentrations volumiques de particules grossières f_L dans les mélanges. Les résultats donnés par ce qui constitue le dernier élément d'analyse sont les plus explicites et la pertinence de leur interprétation dépasse largement celle des relevés préliminaires (**fig. 5.12**). Les calculs de f_L à intervalles réguliers γ vérifient en réalité les plus récents développements donnés avec les études de profils des vitesses et des fractions solides. La **figure 5.15.a** retrace des phases d'agencements relatifs des populations de grains entre elles en décrivant la nette concentration graduelle des particules larges au sommet de l'écoulement modélisé, ainsi que le plongeon

simultané des particules fines. La tendance de granoclassement semble s'effectuer depuis le haut des échantillons et ne s'autorise pas à gagner le centre des mélanges avant l'obtention d'une ségrégation marquée des régions supérieures. La même remarque confirme alors les dires établis qui prétextent l'initiation localisée des phénomènes de ségrégation pour le scénario de cisaillement identifié par un contexte de confinement moindre. La **figure 5.15.b** prouve l'établissement d'un profil de concentrations f_L se précisant en évoluant sur toute la hauteur des échantillons. Les accumulations respectives des grains fins à la base du mélange ($f_L \rightarrow 0$) et des grains grossiers dans la région supérieure du volume de particules ($f_L \rightarrow 1$) coïncident avec la progression enregistrée des déformations. Un exemple de ségrégation cinétique transversal investissant l'entièreté de l'échantillon, et initié depuis sa base, est donc décrit lorsque la pression de surcharge P augmente. Un tel résultat est légèrement surprenant car les autres descriptions paramétriques essayées ne peuvent pas permettre de l'affirmer si présentées seules. La vérification d'un phénomène de ségrégation était néanmoins attendue par le biais de la prolongation de l'essai.

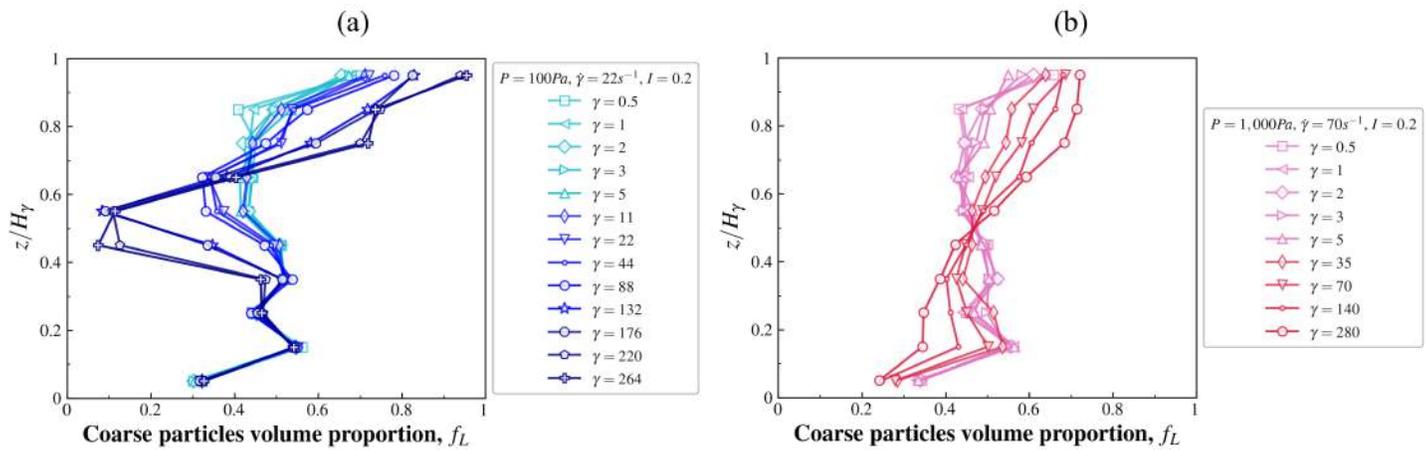


FIGURE 5.15 Évolution de la proportion volumique en particules larges f_L à $I = 2.10^{-1}$ en fonction du taux de déformation γ selon la hauteur de l'échantillon z/H_γ : (a) $P = 100 \text{ Pa}$; (b) $P = 1,000 \text{ Pa}$.

Description qualitative d'états de ségrégation avancés

Des prises de vues sont finalement exposées pour les deux essais et représentent des états de cisaillement avancés qui mettent en évidence des exemples de ségrégation marqués (**fig. 5.16**). Les simulations sont arrêtées pour des taux de déformation γ similaires dans le but de comparer les observations et les cinématiques de ségrégation. Les résultats affichés illustrent confor-

mément les interprétations des développements précédents. Les localisations et les progressions particulières des phénomènes de ségrégation cinétique sont notamment remarquables.

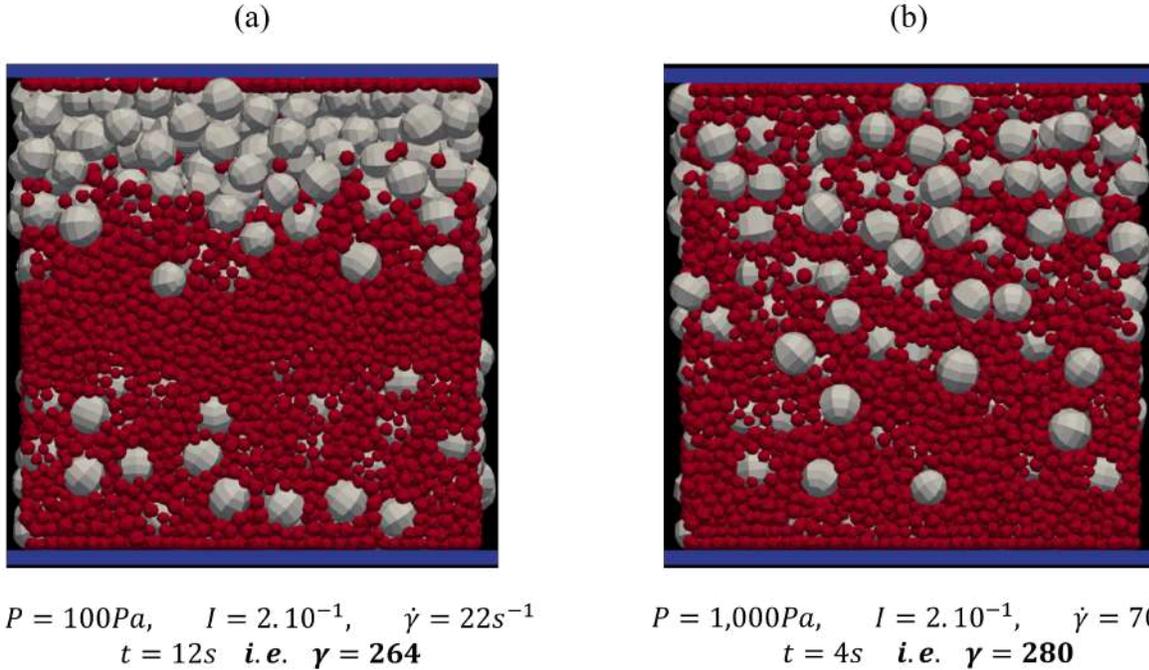


FIGURE 5.16 Prises de vues des simulations de cisaillement à $I = 2.10^{-1}$ réalisées après l'atteinte de taux de déformation $\dot{\gamma}$ avancés pour : (a) $P = 100Pa, \dot{\gamma} = 22s^{-1}$; (b) $P = 1,000Pa, \dot{\gamma} = 70s^{-1}$.

Un média vidéo de la simulation numérique pour le précédent exemple de cisaillement (**fig. 5.16.a**) est rendu disponible en suivant ce [lien](https://youtu.be/eIPZMydNujY)³.

Les dernières analyses délivrent la clef de compréhension des phénomènes et mécanismes mis à jour par la campagne de simulations complémentaire. La reproduction de phénomènes de ségrégation gravitaire cinétique par le biais d'essais de cisaillement simples est vérifiée avec l'utilisation de mélanges granulaires bidisperses. Le contexte de confinement choisi pour la conduite de la procédure de cisaillement comme l'application de pressions de surcharge apparaît avoir une influence cruciale sur les cinématiques et la localisation potentielle du phénomène de ségrégation. De tels résultats rejoignent les constats de publications présentant des essais de cisaillement physiques ou numériques [154, 196, 197]. La détermination d'un contexte de surcharge important ($P = 1,000Pa$ ou $P = 10,000Pa$) a pour effet d'initier une

3. <https://youtu.be/eIPZMydNujY>, lien en clair pour les versions imprimées.

ségrégation transversale du matériau cisailé sur toute sa hauteur et depuis la base du volume considéré (relativement aux dimensions d'échantillon déterminées pour l'étude présentée). L'observation visuelle marquée de la réalisation du phénomène de ségrégation nécessite alors l'atteinte de taux de déformation élevés γ . La réduction des pressions de surcharge appliquées ($P = 100Pa$) résulte éventuellement en la localisation du cisaillement dans les régions supérieures des volumes de grains. Le front de cisaillement déterminé progresse consécutivement vers les profondeurs des mélanges à mesure que le granoclassement se réalise. L'illustration remarquable du phénomène de ségrégation particulier est déjà rendue possible pour l'atteinte de taux de déformation moins ambitieux.

Les conclusions données par les études paramétriques rapportées confirment les hypothèses émises au cours du développement général pour l'observation de potentiels granoclassements. Les essais de cisaillement simples sont aptes à révéler des tendances et initier des mécanismes de ségrégation gravitaire au sein de systèmes granulaires bidisperses. Les simulations numériques MED imaginées apparaissent convenablement élaborées et reproduisent les phénomènes de ségrégation attendus. Une utilisation avisée des mêmes modules de simulation pourrait exister pour l'étude des écoulements granulaires et des phénomènes de ségrégation lorsque soumis à différents environnements de contraintes.

CHAPITRE 6 DISCUSSIONS

Les chapitres précédents ont dressé une étude paramétrique des phénomènes de ségrégation et de stratification dans les dépôts granulaires à l'aide de modèles numériques. Il existe pourtant de nombreux autres facteurs d'influence dont la variabilité est quelquefois démontrée, ou pourrait être capable, de modifier le développement des schémas de granoclassement dans les empilements de particules. Trois aspects choisis sont adressés en détail pour discuter leur impact sur les résultats de la déposition de matériaux granulaires. Les sujets abordés sont les influences de la géométrie du milieu de déposition, des propriétés particulières des mélanges granulaires étudiés et la traduction d'expériences réelles au travers d'outils numériques. Les réflexions évoquées couvrent donc le cas d'essais réels et/ou d'environnements de simulations.

6.1 Influence de la géométrie de l'environnement de déposition

6.1.1 Propriétés et dimensions de la cellule d'essai

La géométrie des cellules de test reproduites au cours de l'étude est déjà reconsidérée dans les sections de développement déjà parcourues. D'autres critiques sont donc levées pour traiter davantage les limitations directement imposées par un appareil de test contraignant l'écoulement naturel des matériaux déposés.

Rugosité de la base et frottements des parois latérales

La rugosité de la base ou des plans inclinés des cellules d'essais est susceptible d'affecter les angles de repos mesurés pour les dépôts granulaires et les régimes d'écoulement observés [36, 101, 198]. Le choix des matériaux de fabrication des environnements de déposition et les éventuels traitements de surface réalisés ont donc leur importance. Il est généralement considéré la reproduction de conditions de rugosité similaires à des exemples de fondations naturelles. L'utilisation d'un environnement numérique donne alors le choix de se saisir des particularités de rugosité par deux moyens que sont la reproduction géométrique des aspérités de l'environnement de déposition au moment de la création du modèle ou la définition, et l'application, à la base de la cellule de comportements de frottement spécifiques [199]. Il a été choisi de simuler la rugosité de la surface de déposition par l'utilisation de modèles d'interaction spécifiques entre les particules et la base de la cellule pour la réalisation des simulations numériques présentées.

Les premières découvertes de schémas de stratification en laboratoire suggèrent l'enduit des

parois latérales des cellules de test pour limiter les interactions électrostatiques entre les particules et les murs [8]. Les reproductions d'expériences de déposition n'ont pas suivi la même directive, mais présentent également des schémas de granoclassement clairs (renvoi à **Sec. 2.3.5**). La volonté de se soustraire aux conditions amenées par l'emploi d'un outil de déposition artificiel justifie le choix de parois non frictionnelles puisque le confinement géométrique qu'elles imposent est déjà d'importance. L'ensemble des arguments cités est alors d'autant plus légitime que l'observation des schémas de granoclassement ne peut se faire que d'après les vues données depuis les parois dans des conditions expérimentales. L'avantage des outils numériques dans de telles situations est de pouvoir explorer l'intérieur des dépôts en réalisant des coupes des dépositions simulées ou en choisissant l'affichage ou non de certains éléments des empilements. Comme il le fut décidé, les modèles numériques permettent également de supprimer les frottements existant entre les parois latérales de la cellule et les particules.

Largeur de la cellule

Des études de dépôt de matériaux granulaires incluant des variations d'espacement des parois latérales des cellules de test ont déjà démontré des résultats d'intérêts pour le développement de phénomènes de stratification [37, 39, 121]. Les réalisations d'essais prouvent que pour la déposition d'un mélange bidisperse établi l'augmentation de la largeur de la cellule est responsable de la disparition progressive de schémas de bandes stratifiées. Il est alors intéressant de comparer de telles observations avec des travaux physiques relevant l'influence de l'espacement des parois sur la rhéologie des dépôts granulaires [194]. Des variations d'angles de repos ou de dynamique d'écoulement pour la déposition d'échantillons granulaires sont constatées (**fig. 6.1**) avec l'évolution de mesures de débits d'injection du matériau et de l'indicateur adimensionnel $D/\langle d \rangle$. Les résultats présentés témoignent de l'impact significatif de la largeur de la cellule de test sur la résistance en place du matériau et les régimes d'écoulement développés dans un environnement de déposition cloisonné. Les mêmes résultats affichent alors particulièrement l'influence développée par des cellules de test étroites (soit exposant des valeurs faibles de $D/\langle d \rangle$) utilisées dans les études de phénomènes de stratification. La modification des régimes de déposition et des angles de repos des constructions pour de tels essais traduit aussi l'influence portée sur le développement du profil des vitesses des particules, des mesures d'épaisseur des écoulements et donc des régimes de cisaillement s'établissant au sein de l'appareil de test qui augmentent généralement avec de la délimitation physique de l'environnement. Le remaniement d'autant de paramètres physiques causé par le cloisonnement des écoulements est tout à fait capable de modifier les mécanismes de granoclassement dans les dépôts granulaires et les conclusions des publications se rejoignent.

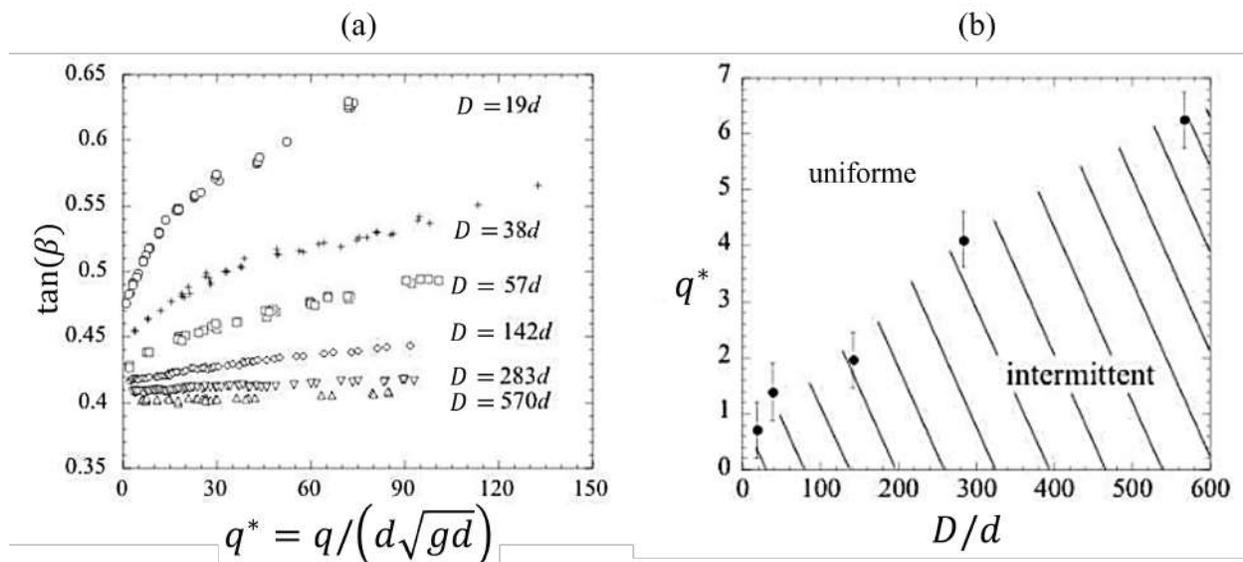


FIGURE 6.1 Mesures physiques d'angles de repos β pour différentes dépositions d'un matériau granulaire dans des cellules d'essai de largeur D en fonction du flux surfacique adimensionnel q^* (a); (b) diagramme de phase montrant la distinction des conditions d'observation des régimes d'écoulement uniformes et stationnaires selon q^* et en fonction de l'indicateur D/d (Tiré de Jop et al., 2005).

Le choix des largeurs $D \leq 20\text{mm}$ des cellules fabriquées ou modélisées est de fait discutable pour la déposition d'échantillons granulaires aux particules millimétriques, mais de telles décisions se basent sur la publication de travaux étudiant avec succès le développement de schémas d'empilements particuliers qui sont l'objet de ce travail. La complexité de la mesure exacte de l'influence de la largeur des cellules d'essais sur les schémas d'empilements s'expliquerait d'ailleurs par un impact du couplage du débit de déposition avec la délimitation du milieu de déposition ($f; D/\langle d \rangle$) encore peu explorée. Il semble important d'assurer une condition sur le calcul de l'indicateur $D/\langle d \rangle$ telle que les dimensions du dispositif de test n'interfèrent pas dans la représentation du développement d'arrangements de la microstructure granulaire. La distribution des contacts et des forces réactionnelles entre les grains intervient de manière non négligeable dans les mécanismes de granoclassement et justifie la recommandation $D/\langle d \rangle \geq 10$ imaginée au terme de ce travail. L'idéal serait bien évidemment de tendre vers l'étude du phénomène de stratification en éliminant les cellules.

6.1.2 Extension à l'étude de dépôts granulaires coniques en 3D complète

La communauté de recherche adressant les phénomènes de granoclassement limite son étude aux sujets des écoulements et des procédures de mélanges ou de décharges de matériaux dans

des environnements relativement confinés. Il n'existe encore pas à notre connaissance de publication rapportant l'observation de schémas de stratification pour des dépôts granulaires coniques avec des essais réels ou numériques. L'obtention de tels résultats ouvrirait alors de nouvelles réflexions sur l'étude du phénomène. La géométrie des schémas enfin développés, les mécanismes d'avalanches et les conditions de reproduction seraient alors à documenter. La prise en considération d'un objet de réflexion aussi conséquent est donc logiquement encouragée dans le chapitre de clôture du document (renvoi à **Sec. 7**).

6.2 Influence de la préparation des mélanges étudiés

6.2.1 Caractère bidisperse des échantillons

L'utilisation de mélanges bi- ou polydisperses est généralement recommandée pour l'étude des mécanismes de granoclassement afin de rendre compte facilement de la cinétique et de la qualité des phénomènes de ségrégation. La préparation des mélanges polydisperses est résumée par la définition de plusieurs paramètres calculables dont on discute l'influence et le choix respectivement aux simulations numériques présentées.

Disparités de tailles, de formes et de densités des grains

Le paramètre majeur définissant la polydispersité des mélanges granulaires étudiés est la différence de tailles séparant les populations de particules de l'échantillon exprimé par la grandeur R . Les variations de R sont susceptibles d'influencer la cinématique des mécanismes de granoclassement, mais leur influence se stabilise pour l'atteinte d'un seuil de tamisage (*free sifting*). Il a été décidé de fixer $R = 3$ pour la réalisation des modèles numériques sur la base d'essais expérimentaux précédents et d'après les essais reproduits. La détermination de R s'accompagne de la définition du diamètre moyen des grains de chaque population d_{min} et d_{max} qui sont aussi choisis milli ou plurimillimétriques en respect des travaux de la littérature. La distribution granulométrique de chaque matériau utilisé dans la réalisation des échantillons bidisperses est aussi précisée avec un étalement granulométrique S . Il est introduit dans les simulations pour prévenir le cas particulier d'agencement cristallisé des dépôts qui peut-être observé pour $S = 0$.

Les disparités de formes dans un échantillon de grains sont mesurables par de nombreux moyens expérimentaux ou numériques déjà exposés (renvoi à **Sec. 4.1.3**). Il a également été rappelé que l'angularité des particules joue un rôle important dans leur transport et que l'établissement d'une différence effective des formes entre deux populations de grains représente une condition favorable à l'exposition de schémas de stratification pour un intervalle

de conditions de déposition donné. Trois mélanges granulaires sont modélisés pour confronter l'influence de l'absence ou de l'intégration des disparités de formes sur la déposition des échantillons au sein des simulations numériques développées.

La dimension des mécanismes de ségrégation portant sur la différence de densités des populations de grains n'est pas adressée dans l'étude présentée. L'objectif était en effet de modéliser des échantillons granulaires dont les propriétés sont celles de roches stériles issues d'un même site d'exploitation. Il a donc été considéré une seule valeur de densité ρ pour les différentes populations de particules. Le sujet de l'étude des phénomènes de stratification ne traite d'ailleurs pas des mélanges bidisperses exposant des disparités des densités de particules, ce qui laisse entendre que l'influence du même paramètre n'est pas prépondérante dans la réalisation de tels mécanismes de granoclassement [18].

Concentration des mélanges

La concentration des mélanges est décrite par les fractions massique m_{LS} ou volumique des populations de grains dans la composition des échantillons polydisperses. Les variations de proportions de chacun des types de particules incorporés dans les mélanges réalisés influencent la déposition des empilements en modifiant substantiellement les angles de repos exposés dans le cas de la prédominance d'une des populations sur l'autre [36, 200]. L'introduction de différences de fractions des mélanges est également susceptible de changer les dynamiques de granoclassement, car elle peut exposer des gradients de concentration pour chaque espèce dans les écoulements et ainsi favoriser les tendances de ségrégation asymétriques ou la définition des modèles d'advection-diffusion [107, 127]. La majorité des essais et simulations exposés présentent les dépositions de mélanges égaux en masse $m_{LS} = 1$ (et donc en volume) dans le but de démontrer l'intensité des mécanismes de granoclassement dans leur capacité à diviser spatialement des échantillons initialement homogènes.

6.2.2 Cohésion potentielle au sein des matériaux granulaires

L'établissement d'une cohésion apparente au sein de matériaux granulaires de par les effets du développement d'une succion matricielle notamment dans le cas d'échantillons partiellement saturés est connu pour freiner le développement des mécanismes de ségrégation [41]. L'étendue des limitations des phénomènes de granoclassement est fonction de l'état de saturation du matériau et de la viscosité du fluide interstitiel considéré. Le recours à un outil numérique permet de modéliser la cohésion d'un matériau généré. Un tel paramètre est ajustable, mais il a cependant été choisi de n'associer aucun comportement cohésif aux matériaux modélisés dans le cadre des études menées.

6.2.3 Représentativité des échantillons comme roches stériles

L'objectif de l'étude pour l'industrie minière réside dans le développement de modèles numériques d'application susceptible de prédire le dépôt d'échantillons de roches stériles en tas ségrégués, en bandes stratifiées ou en mélanges homogènes. Des essais de simulations similaires de déposition d'échantillons générés pour représenter les stériles miniers sont donc à mettre en place. La calibration des modèles numériques présentés est encore cependant à améliorer avant d'envisager pouvoir traiter de tels scénarios.

Un élément supplémentaire à considérer dans une reproduction rigoureuse de la déposition de stériles en haldes est la mécanique de fragmentation des particules sous l'exercice de contraintes importantes. Les mécanismes de fragmentation sont capables de remanier profondément les matériaux granulaires, notamment dans leur structure (**fig. 6.2**) [150,201]. Il serait alors bon d'intégrer l'étude de l'interférence d'un tel phénomène dans le développement des schémas de granoclassement. Les simulations numériques de cisaillement réalisées

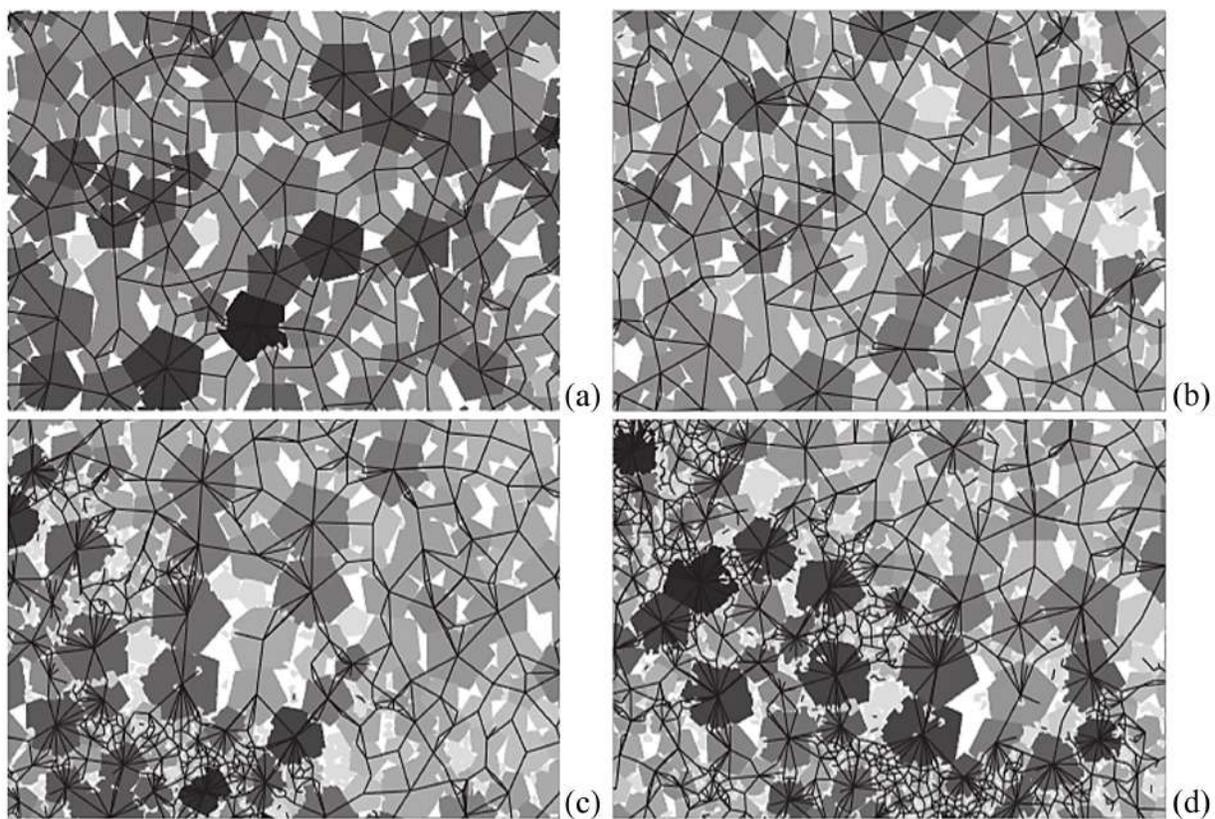


FIGURE 6.2 Prises de vues numériques de réseaux de contacts (a-d) d'un matériau granulaire en fonction de la progression des effets simulés de fragmentation des particules (Tiré de Nguyen et al., 2014).

(renvoi à **Sec. 5**) démontrent pourtant que les cinématiques de ségrégation sont freinées si l'échantillon de matériau étudié est soumis à des pressions de confinement importantes. Un tel résultat laisse donc penser que le phénomène de fragmentation ne jouerait pas un rôle important dans la construction de schémas d'empilements puisqu'il se développe majoritairement dans des régions profondes des haldes et non à la surface libre du dépôt [197].

6.3 Traduction d'essais réels avec l'emploi d'un outil numérique

6.3.1 Optimisation des méthodes de modélisation

Les simulations de déposition présentées sont des modèles numériques singuliers qui voient le nombre de corps générés augmenter avec la progression de la construction des empilements. Le nombre d'éléments du système grandit alors linéairement, mais les temps de calcul s'allongent indéfiniment. L'optimisation et l'ajustement des modèles ont donc été envisagés. De telles limitations ne sont pas rencontrées pour les simulations des essais de cisaillement simple dont l'optimisation est rendue simple et n'est pas détaillée dans la suite.

Limitation de tailles des échantillons

Les empilements granulaires réalisés à l'aide des simulations 2D ou 3D sont composés d'au plus 100,000 particules. Le souhait d'un traitement rigoureux des interactions entre grains malgré les avantages de la formulation de la dynamique des contacts dans LMG90 ne permet pas de résoudre dans des temps raisonnables l'exemple d'un écoulement de 100,000 corps. Les exemples de déposition sont donc limités dans leurs dimensions, mais démontrent des constructions qui dépassent aisément les étapes de dépôt associées à l'initialisation (I) et exposent le régime de croissance latérale de l'empilement (II) (**tab. 2.3, fig. 2.16**) théoriquement favorable à l'apparition des mécanismes de granoclassement. Des stratégies de modélisations auront donc été envisagées comme la considération d'une géométrie alternative de cellule (**fig. 4.2**) pour dépasser les limitations de déversement des échantillons avec la progression des simulations. Il est malheureusement remarqué que des initiatives de "gel" ou de suppression de parties sous-jacentes des piles déposées, non concernées par le développement d'écoulements à surface libre, ne représentent que des solutions de court/moyen terme. En effet, le dépassement d'un stade de déposition déjà simulé est corrélé avec un allongement évident de la pente de l'empilement modélisé, et donc avec une augmentation du nombre de particules prises en compte dans la résolution du système granulaire affiché. D'autres propositions de simplification de modélisations seraient donc à considérer pour explorer des états avancés de déposition.

Représentation de l'angularité des particules

Le traitement des disparités de formes des particules est rendu complet grâce à l'utilisation d'outils numériques ayant pris en compte la détermination de la géométrie des corps modélisés. La représentation des formes est d'abord abordée avec l'implémentation de comportements en friction différents entre deux populations de grains circulaires ou sphériques (**Ann. C**) [199]. Les résultats limités de la même méthode de simulation de l'angularité ont motivé la modélisation de particules polygonales ou polyédriques pour lesquelles de meilleures observations sont retenues. L'inconvénient de la traduction naturelle des formes des grains réside dans la complexité des systèmes de particules alors générés responsables d'un allongement conséquent des temps de calcul pour les simulations de déposition. Des méthodes alternatives de la simulation des formes des particules sont alors sans doute à chercher dans la réalisation d'agrégats (*clusters*) de corps simples circulaires ou sphériques pour traduire des géométries anguleuses (**fig. 6.3**) [36, 200, 202].

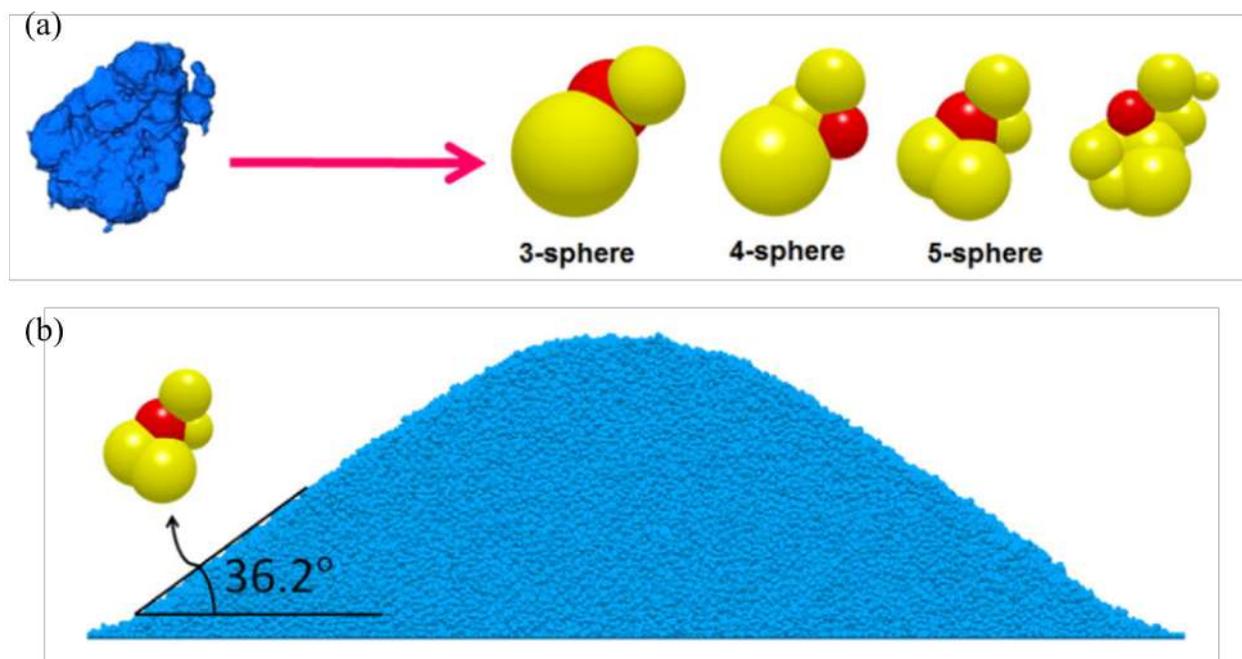


FIGURE 6.3 Représentation de moyens de traduction de formes de particules anguleuses par la création d'assemblages de sphères (a). (b) Résultat de la simulation DEM d'une déposition d'un mélange granulaire composé de particules anguleuses générées comme des agrégats de cinq sphères (5-sphere) (Tiré de Alizadeh et al., 2017).

6.3.2 Validation des résultats

Les résolutions des simulations implémentant les méthodes numériques de type MED combinent de nombreux paramètres, arbitraires ou non, définissant le comportement des matériaux modélisés et leurs interactions (renvoi à **Sec. 2.3.3**) [203]. La validation des systèmes simulés est de fait un sujet à traiter rigoureusement dans le but d'admettre les résultats produits. Différents moyens de vérification peuvent être imaginés notamment dépendamment de l'échelle d'étude du système considéré.

Plusieurs critères de validation sont utilisés dans le développement du travail présenté. La calibration des simulations proposées s'est principalement appuyée sur la mesure et la détermination de paramètres rendant compte de la macro- ou microstructure des empilements et des échantillons modélisés (renvoi à **Sec. 2.3.1**). Les simulations de dépôts granulaires sont validées par la mesure des angles de repos β des matériaux modélisés, l'observation de régimes discrets de déposition développant des avalanches intermittentes et les évolutions des dynamiques de construction des empilements, fonctions des comportements en friction des éléments ou des effets d'angularité [40, 195, 204]. Les essais de cisaillement simples menés sur les échantillons de grains sphériques sont vérifiés par différents aspects de la rhéologie des volumes granulaires qu'il s'agisse des établissements des régimes de cisaillement, des descriptions structurelles des mélanges exposant notamment des lois de comportement connues selon les variations du nombre d'inertie I pour différents indicateurs calculés (ν , ϕ ou Z), ou des cinématiques de ségrégation observées [197, 205].

La remarque est aussi faite que le développement de l'étude propose consécutivement des modèles de simulations 2D et 3D. Des différences de résultats sont observées et imputées à la transition d'un espace en deux dimensions vers un espace à trois dimensions. La recommandation de la poursuite de telles études en 3D est donc fortement plébiscitée, mais une telle prise de position ne peut remettre en cause la validité des modèles 2D qui restent adaptés au traitement d'une majorité de problèmes incluant la modélisation d'éléments granulaires.

6.3.3 Prédiction d'effets d'échelle

Il est considéré que peu d'effets d'échelle semblent imputables aux simulations développées puisqu'elles modélisent des échantillons de tailles observées et manipulées dans la reproduction d'expériences réelles proposées ou rapportées (**tableau 2.3**). Les discussions de l'existence d'effets d'échelle se concentrent finalement davantage sur l'influence du système de la cellule d'essai (renvoi à **Sec. 6.1.1**) ou la critique du nombre de corps modélisés et déposés (renvoi à **Sec. 6.3.1**). Les deux aspects cités sont débattus dans des sections précédentes du

chapitre auxquelles il est proposé de se référer.

Plus particulièrement, des effets d'échelle seront à discuter quand des modèles numériques satisfaisants seront développés et essaieront de prédire les phénomènes de granoclassement développés dans la construction des haldes à stériles sur les sites miniers. Il est cependant intéressant de préciser qu'il serait déjà possible de modéliser ou reproduire numériquement, à l'échelle, des sites d'exploitation, des échantillons de roches stériles, ainsi que des pratiques de déposition existantes. Les moyens numériques sollicités pour la réalisation des simulations présentées pourraient notamment s'en montrer capables ; mais les temps de calcul nécessaires à la résolution de systèmes granulaires de telles dimensions deviendraient déraisonnables au besoin d'envisager une simulation des dépositions de matériaux sans approche de simplification de modélisation éprouvée.

CHAPITRE 7 CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

Le travail présenté a proposé de recadrer l'étude des cas de ségrégation et de stratification des matériaux granulaires pour leurs applications à l'industrie minière. Le projet de recherche a visé à développer des modélisations numériques capables de reproduire des mécanismes de ségrégation et de stratification en simulant la construction d'empilements composés d'échantillons de particules bidisperses en termes de tailles et/ou de formes.

7.1 Conclusion

Les conclusions du travail présenté retiennent la mise en œuvre d'essais physiques de déposition de matériaux granulaires polydisperses, les modélisations numériques d'empilements construits depuis des méthodes de dépositions analogues, ainsi que le développement de simulations de cisaillement simple pour l'étude de granoclassements cinétiques dans le transport d'échantillons bidisperses.

Les essais physiques rapportés ont tout d'abord démontré des réalisations satisfaisantes pour la formation de schémas de ségrégation et de stratification dans les empilements granulaires. Les constructions de dépôts d'échantillons de particules bidisperses en termes de tailles et de formes, dans des environnements de cellules étroites, ont aisément révélé des schémas de granoclassement marqués. Les résultats de déposition ont notamment permis d'établir des profils détaillés de bandes de stratification, malgré des procédures d'expérience effectuées dans un cadre sommaire. De telles observations ont rejoint les propositions majoritaires de la littérature suggérant que seule l'exposition de disparités de propriétés suffisantes parmi les mélanges granulaires bidisperses sélectionnés était à l'origine de dépositions granoclassées, sans contrôle rigoureux des pratiques de déversement.

Les tentatives consécutives de reproduction de tels schémas d'empilements avec des moyens numériques se sont pourtant avérées moins évidentes. L'utilisateur en charge d'une modélisation a l'avantage de pouvoir maîtriser plusieurs paramètres de simulation, mais une multiplicité de facteurs d'influence pourraient être prise en compte lorsqu'il s'agit de considérer la déposition de schémas d'empilements granoclassés, parmi lesquels : les propriétés des matériaux, la hauteur d'injection des échantillons h , les débits de déposition f et les dimensions de l'environnement de cellule (L, D) . Qui plus est, aucune hiérarchie ou définition d'influence des paramètres inhérents aux problèmes de granoclassement étudiés ne semble faire consen-

sus. Les campagnes de simulations réalisées ont alors principalement souligné l'influence de l'expression des disparités des formes de particules sur la détermination des schémas d'empilements obtenus et les cinématiques de déversement des échantillons modélisés. Le meilleur moyen d'exprimer les angularités des grains et leurs effets est apparu être leur retranscription directe. La génération de grains anguleux représentant pleinement les caractères de formes des particules n'est ainsi apparue envisageable qu'avec le recours à des modèles de corps en trois dimensions (3D). La modélisation de polyèdres, davantage détaillés que des éléments sphériques, en nombre croissant a cependant résulté en un frein à la progression des simulations de déposition limitées techniquement par les ressources de calculs allouables. Le dernier exercice de simulation a alors prolongé les mécanismes de ségrégation cinétique au sein d'écoulements d'échantillons granulaires bidisperses avec le cisaillement d'un volume fini de particules selon un taux de déformation excédant les plus longues pentes de déposition modélisées précédemment. Les résultats des modélisations complémentaires ont finalement laissé entrevoir que le prolongement des dépositions simulées pourrait éventuellement déclencher l'apparition de schémas de granoclassement complets.

Il n'est pas apparu simple de produire systématiquement des descriptions quantitatives de schémas de granoclassement depuis des essais physiques de déposition ; les vérifications des mesures d'angles de repos des empilements simulés ont alors été prises comme validation des modèles proposés. Ainsi, les pentes des dépositions modélisées de particules sphériques ont vérifié des valeurs de β comprises entre 22 et 24° comme observé pour des essais de laboratoire étudiant les dépositions de billes de verres. Les simulations de déversement de grains polyédriques ont exposé des empilements dont les angles de repos fluctuent entre 35 et 39°, pareillement aux dépôts réels de roches stériles.

Le cas particulier du phénomène de stratification naturel demeure peu adressé dans la littérature et sa reproduction avec des outils numériques n'est pas aboutie. Le qualificatif "spontané" attribué au développement du phénomène de stratification semble alors particulièrement fragile au vu des conditions à rassembler pour son observation.

Le projet de recherche exposé s'est inscrit dans une démarche d'innovation pour le développement d'outils numériques capables de reproduire des schémas ou phénomènes de granoclassement en simulant des dépositions de matériaux bidisperses. Les procédures utilisées ont été éprouvées par la réalisation du travail présenté et des recommandations sont à partager pour encourager la poursuite des efforts investis.

7.2 Recommandations

Le terme du projet de recherche a résumé les résultats et les conclusions obtenus. Le choix de prendre la continuité du travail devrait pouvoir s'appuyer sur l'expérience gagnée au cours de sa réalisation. Des recommandations sont donc données pour aider une éventuelle reprise de l'étude ou envisager de nouvelles perspectives.

Il serait tout d'abord proposé de/d' :

- Entreprendre un travail d'harmonisation des données de travaux de déposition réels ou numériques (sur la base de **tableau 2.3**) dans le but de produire des diagrammes de détermination complets pour la prédiction du développement des phénomènes de ségrégation et de stratification dans les empilements. Il est alors encouragé de respecter des procédures de rigueur pour le contrôle et la caractérisation de chaque nouvelle intention de réalisation d'essais de déposition, à savoir :
 - Délimiter exactement les intervalles des différentes propriétés de mélanges et paramètres physiques de déposition pour des études de dépôts qui renseignent l'observation de plusieurs schémas de granoclassement ;
 - Ajouter la définition de nombres adimensionnels supplémentaires (m_{LS} , $D/\langle d \rangle$) pour identifier les contextes de déposition reproduits et consécutivement référencer les résultats rassemblés indépendamment d'effets d'échelle éventuels ;
 - Rechercher si applicable et lorsque possible une information de précision de l'angularité moyenne des particules des mélanges déposés.
- Développer les analyses des empilements granulaires reproduits à l'aide d'outils numériques en introduisant des mesures d'indices de granoclassement, de connectivité, de contraintes moyennes, de contraintes déviatoriques et de potentiels de fragmentation au travers des dépôts.
- Compléter les interprétations des simulations de déposition proposées en développant notamment des études cinématiques poussées au-delà d'éléments de validation.
- Améliorer les capacités de calcul des modèles numériques employés en imaginant la traduction de l'angularité des grains avec la composition de corps simples qui remplacerait l'utilisation de corps complexes comme les polyèdres responsables d'un allongement des temps de résolution des systèmes.
- Explorer des environnements de déposition numériques plus larges avec des cellules de dimension D telle que $D/\langle d \rangle \geq 10$. La même condition pourrait être vérifiée avec l'utilisation de mélanges granulaires aux diamètres moyens $\langle d \rangle$ réduits.
- Améliorer la qualité de représentation des simulations en implémentant les traitements de nouveaux comportements physiques, en considérant la déposition de mélanges mo-

délicés davantage similaires aux matériaux réels ou reproduisant des contextes d'opération propres au terrain. Plusieurs options d'actions majeures sont alors précisées :

- Réaliser des modèles numériques capables de prendre en compte les effets de fragmentation des grains pour le développement de grandes contraintes dans les empilements de particules ;
- Simuler la déposition d'échantillons granulaires définis par des distributions granulométriques et de formes représentatives des matériaux de type roches stériles.
- Simuler la déposition des matériaux granulaires selon les méthodes et les conditions effectives de projets de terrain : ajustement des régimes de déposition, des hauteurs d'injection des matériaux et des environnements de construction des haldes.
- Étendre l'étude à la déposition d'empilements granulaires coniques en 3D complète par des essais réels et numériques.

La plupart des directions partagées sont facilement abordables et leurs applications pourraient déjà apporter d'importants résultats. Les idées avancées considèrent à la fois la réalisation d'essais réels et la création de solutions numériques. Leur achèvement mènerait à terme à la résolution de nombreux problèmes pour la prévision du développement des schémas de granoclassement dans les empilements granulaires.

RÉFÉRENCES

- [1] F.-N. Pelletier, Y. Bourguignon et R. Bilodeau, “Conversation publique sur l’avenir minier du québec : les sujets environnementaux et de territoire,” Institut du Nouveau Monde - INM, Technical Report, 2012. [En ligne]. Disponible : https://www.bibliotheque.assnat.qc.ca/DepotNumerique_v2/AffichageFichier.aspx?idf=69949
- [2] S. Canada, “L’activité humaine et l’environnement : la gestion des déchets au canada,” Ministère de l’Industrie, Technical Report, 2012. [En ligne]. Disponible : <https://www150.statcan.gc.ca/n1/pub/16-201-x/16-201-x2012000-fra.pdf>
- [3] R. S. Nichols, “Rock segregation in waste dumps,” dans Proceedings of the International Symposium on Flowthrough Rock Drains, Cranbrook, Canada, 8-11 September 1986, Conference Proceedings.
- [4] S. B. Savage et C. K. K. Lun, “Particle size segregation in inclined chute flow of dry cohesionless granular solids,” Journal of Fluid Mechanics, vol. 189, p. 311–335, 1988. [En ligne]. Disponible : <https://doi.org/10.1017/S002211208800103X>
- [5] O. Pouliquen, “Scaling laws in granular flows down rough inclined planes,” Physics of Fluids, vol. 11, p. 542–548, 1999. [En ligne]. Disponible : <https://dx.doi.org/10.1063/1.869928>
- [6] P. Cizeau, H. A. Makse et H. E. Stanley, “Mechanisms of granular spontaneous stratification and segregation in two-dimensional silos,” Physical Review E, vol. 59, p. 4408–4421, 1999. [En ligne]. Disponible : <https://dx.doi.org/10.1103/PhysRevE.59.4408>
- [7] O. Hungr, R. F. Dawson, A. Kent, D. Campbell et N. R. Morgenstern, “Rapid flow slides of coal-mine waste in british columbia, canada,” Engineering Geology, vol. 15, 2002.
- [8] H. A. Makse, S. Havlin, P. R. King et H. E. Stanley, “Spontaneous stratification in granular mixtures,” Nature, vol. 386, p. 379–382, 1997a. [En ligne]. Disponible : <https://dx.doi.org/10.1038/386379a0>
- [9] J. G. Baxter, U. Tüzün, D. Heyes, I. Hayati et P. Fredlund, “Stratification in poured granular heaps,” Nature, vol. 391, p. 136–136, 1998. [En ligne]. Disponible : <https://dx.doi.org/10.1038/34328>
- [10] S. Ouellet, R. Chapuis et C. Ovalle, “Le projet de co-déposition dans la fosse Canadian Malartic,” dans Symposium 2021 Mines et Environnement, Université du Québec en

- Abitibi-Témiscamingue (UQAT), Rouyn-Noranda, 14-16 June 2021, Conference Proceedings.
- [11] L. Valenzuela, E. Bard, J. Campaña et M. Anabalón, “High waste rock dumps — challenges and developments,” dans First International Seminar on the Management of Rock Dumps, Stockpiles and Heap Leach Pads, Perth, Australia, 5-6 March 2008, Conference Proceedings. [En ligne]. Disponible : https://dx.doi.org/10.36487/acg_repo/802_6
- [12] L. Valenzuela, E. Bard et J. Campaña, “High waste rock dumps in the mining industry,” dans XIII Pan-American Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Porlamar, Venezuela, 15-21 July 2007, Conference Proceedings.
- [13] O. Anterrieu, M. Chouteau et M. Aubertin, “Geophysical characterization of the large-scale internal structure of a waste rock pile from a hard rock mine,” Bulletin of Engineering Geology and the Environment, vol. 69, p. 533–548, 2010.
- [14] B. Lahmira, R. Lefebvre, M. Aubertin et B. Bussière, “Effect of heterogeneity and anisotropy related to the construction method on transfer processes in waste rock piles,” Journal of Contaminant Hydrology, vol. 184, p. 35–49, 2016.
- [15] O. Fala, “Analyses des conditions d’écoulement non saturé dans les haldes a stériles,” Ph.D. Thesis, 2008. [En ligne]. Disponible : <https://publications.polymtl.ca/8140/>
- [16] M. Aubertin, O. Fala, B. Bussière, V. Martin, D. Campos, A. Gamache-Rochette, M. Chouteau et R. Chapuis, “Analyse des écoulements de l’eau en conditions non saturées dans les haldes à stériles,” dans Défis et perspectives : Symposium, 2002b, Conference Proceedings.
- [17] Y. Fan, K. V. Jacob, B. Freireich et R. M. Lueptow, “Segregation of granular materials in bounded heap flow : A review,” Powder Technology, vol. 312, p. 67–88, 2017. [En ligne]. Disponible : <https://dx.doi.org/10.1016/j.powtec.2017.02.026>
- [18] J. M. N. T. Gray, “Particle segregation in dense granular flows,” Annual Review of Fluid Mechanics, vol. 50, p. 407–433, 2018. [En ligne]. Disponible : <https://dx.doi.org/10.1146/annurev-fluid-122316-045201>
- [19] T. Vuilloz, D. Cantor et C. Ovalle, “DEM modeling of segregation and stratification in pouring heaps of bidispersed mixtures of rounded particles,” dans Powders & Grains - EPJ Web of Conferences, vol. 249, Buenos Aires, Argentina, 5 July - 6 August 2021, Conference Proceedings. [En ligne]. Disponible : <https://dx.doi.org/10.1051/epjconf/202124903049>
- [20] M. Aubertin, O. Fala, J. Molson, M. Chouteau, O. Anterrieu, M. A. Hernandez, R. P. Chapuis, B. Bussière, B. Lahmira et R. Lefebvre, “Caractérisation du comportement

- hydrogéologique et géochimique des haldes à stériles,” dans Proceedings : Symposium 2008 sur l’environnement et les mines, Montréal, Canada, 2-4 November 2008.
- [21] A. K. Kalonji, “Évaluation du comportement hydrogéologique et géochimique de recouvrements faits de matériaux miniers pour contrôler la contamination provenant de résidus miniers fortement réactifs,” Thèse de doctorat, Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue, 2020. [En ligne]. Disponible : <https://depositum.uqat.ca/id/eprint/1247/>
- [22] M. Aubertin, B. Bussière et L. Bernier, “Environnement et gestion des rejets miniers,” Les Presses internationales de Polytechnique, Technical Report, 2002a. [En ligne]. Disponible : Cédérom
- [23] C. G. Larochelle, B. Bussière et T. Pabst, “Acid-generating waste rocks as capillary break layers in covers with capillary barrier effects for mine site reclamation,” Water, Air, & Soil Pollution, vol. 230, 2019. [En ligne]. Disponible : <https://dx.doi.org/10.1007/s11270-019-4114-0>
- [24] A. Laverdière, “Effet de la granulométrie sur le comportement géotechnique de roches stériles concassées utilisées comme surface de roulement sur des routes minières,” Montréal, Canada, 2019. [En ligne]. Disponible : <https://publications.polymtl.ca/3858/>
- [25] S. Azam, G. W. Wilson, G. Herasymuk, C. Nichol et L. S. Barbour, “Hydrogeological behaviour of an unsaturated waste rock pile : a case study at the golden sunlight mine, montana, usa,” Bulletin of Engineering Geology and the Environment, vol. 66, p. 259–268, 2007.
- [26] A. Peregoedova, “Étude expérimentale des propriétés hydrogéologiques des roches stériles à une échelle intermédiaire de laboratoire,” 2012.
- [27] R. D. Holtz, W. D. Kovacs et T. C. Sheahan, An introduction to geotechnical engineering. Prentice-Hall Englewood Cliffs, 1981, vol. 733.
- [28] H. Wadell, “Volume, shape, and roundness of rock particles,” The journal of Geology, vol. 40, p. 443–451, 1932.
- [29] P. J. Barrett, “The shape of rock particles, a critical review,” Sedimentology, vol. 27, p. 291–303, 1980. [En ligne]. Disponible : <https://dx.doi.org/10.1111/j.1365-3091.1980.tb01179.x>
- [30] D. I. Benn et C. K. Ballantyne, “The description and representation of particle shape,” Earth Surface Processes and Landforms, vol. 18, p. 665–672, 1993. [En ligne]. Disponible : <https://dx.doi.org/10.1002/esp.3290180709>

- [31] S. J. Blott et K. Pye, “Particle shape : a review and new methods of characterization and classification,” Sedimentology, vol. 55, p. 31–63, 2007. [En ligne]. Disponible : <https://dx.doi.org/10.1111/j.1365-3091.2007.00892.x>
- [32] R. L. Quine, “Stability and deformation of mine waste dumps in north-central nevada,” Thèse de doctorat, University of Nevada, Reno, 1993.
- [33] V. T. McLemore, P. Walsh, K. M. Donahue, L. A. F. Gutierrez, S. Tachie-Menson, H. R. Shannon et G. W. Wilson, “Preliminary status report on molycorp goathill north trenches, questa, new mexico,” Journal American Society of Mining and Reclamation, vol. 2005, p. 679–701, 2005. [En ligne]. Disponible : <https://dx.doi.org/10.21000/jasmr05010679>
- [34] V. T. McLemore, A. Fakhimi et D. van Zyl, “Literature review of others rock piles : characterization, weathering, and stability,” Questa Rock Pile Weathering Stability Project. New Mexico Bureau of Geology and Mineral Resources. New Mexico Tech, USA, Technical Report, 2009.
- [35] P. Rouse, “Comparison of methods for the measurement of the angle of repose of granular materials,” Geotechnical Testing Journal, vol. 37, p. 164–168, 2014. [En ligne]. Disponible : https://www.astm.org/DIGITAL_LIBRARY/JOURNALS/GEOTECH/PAGES/GTJ20120144.htm
- [36] N. A. Pohlman, B. L. Severson, J. M. Ottino et R. M. Lueptow, “Surface roughness effects in granular matter : Influence on angle of repose and the absence of segregation,” Physical Review E, vol. 73, 2006.
- [37] Y. Grasselli et H. Herrmann, “Shapes of heaps and in silos,” The European Physical Journal B, vol. 10, p. 673–679, 1999.
- [38] D. C. Froehlich, “Mass angle of repose of open-graded rock riprap,” Journal of Irrigation and Drainage Engineering, vol. 137, p. 454–461, 2011. [En ligne]. Disponible : [https://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)ir.1943-4774.0000316](https://dx.doi.org/10.1061/(asce)ir.1943-4774.0000316)
- [39] Y. Grasselli et H. Herrmann, “On the angles of dry granular heaps,” Physica A : Statistical Mechanics and its Applications, vol. 246, p. 301–312, 1997.
- [40] L. Dai, V. Sorkin, G. Vastola et Y. W. Zhang, “Dynamics calibration of particle sandpile packing characteristics via discrete element method,” Powder Technology, vol. 347, p. 220–226, 2019. [En ligne]. Disponible : <https://dx.doi.org/10.1016/j.powtec.2019.03.008>
- [41] A. Samadani et A. Kudrolli, “Segregation transitions in wet granular matter,” Physical Review Letters, vol. 85, p. 5102–5105, 2000. [En ligne]. Disponible : <https://dx.doi.org/10.1103/physrevlett.85.5102>

- [42] K. A. Morin, Critical literature review of acid drainage from waste rock. Canada Centre for Mineral and Energy Technology, 1991.
- [43] M. Aubertin, “Waste rock disposal to improve the geotechnical and geochemical stability of piles,” dans Proceedings of the 23rd World Mining Congress, Montréal, Canada, 29 September - 2 October 2013a, Conference Proceedings, p. 8.
- [44] M. Aubertin, M. James, M. Maknoon et B. Bussière, “Recommandations pour améliorer le comportement hydrogéotechnique des haldes à stériles. geomontreal 2013 : Geosciences for sustainability,” dans Proceedings of the 66th Geosciences for Sustainability (CGS) Conference, Montréal, Canada, 2013b, Conference Proceedings, p. 8.
- [45] C. Ovalle, S. Linero, C. Dano, E. Bard, P.-Y. Hicher et R. Osses, “Data compilation from large drained compression triaxial tests on coarse crushable rockfill materials,” Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, vol. 146, 2020.
- [46] P. M. Hawley et J. Cunning, Guidelines for Mine Waste Dump and Stockpile Design (1st Edition.). CRC Press, 2017.
- [47] E. Bard, M. E. Anabalón et J. Campaña, Waste Rock Behavior at High Pressures, 2011, p. 83–112. [En ligne]. Disponible : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/9781118601433.ch4>
- [48] E. Bard, J. Campaña, M. Anabalón et R. Apablaza, “Waste rock behavior under high pressures,” dans XIII Pan-American Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Venezuela, Porlamar, Venezuela, 15-21 July 2007.
- [49] L. Valenzuela, “Stability issues in natural and man made slopes in mining.” Rio de Janeiro, Brazil : Balkema Leiden, 28 June - 2 July 2004, Conference Proceedings, p. 467–473.
- [50] T. M. Leps, “Review of shearing strength of rockfill,” Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers, vol. 96, p. 1159–1170, 1970.
- [51] R. J. Marsal, “Large scale testing of rockfill materials,” Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, vol. 93, p. 27–43, 1967.
- [52] C. Ovalle, E. Frossard, C. Dano, W. Hu, S. Maiolino et P.-Y. Hicher, “The effect of size on the strength of coarse rock aggregates and large rockfill samples through experimental data,” Acta Mechanica, vol. 225, p. 2199–2216, 2014. [En ligne]. Disponible : <https://dx.doi.org/10.1007/s00707-014-1127-z>
- [53] D. G. Fredlund, “The stability of slopes with negative pore-water pressures,” dans The Ian Boyd Donald Symposium on Modern Developments in Geomechanics, vol. 3168. Monash University, Department of Civil Engineering, 1995, p. 99–116.

- [54] N. Lu et W. J. Likos, “Unsaturated soil mechanics,” Inc., Hoboken, USA, 2004.
- [55] M. Aubertin, T. Pabst, B. Bussière, M. James, M. Mbonimpa, M. Benzaazoua et A. Maqoud, “Revue des meilleures pratiques de restauration des sites d’entreposage de rejets miniers générateurs de dma,” dans Symposium 2015 sur l’environnement et les mines, Rouyn-Noranda, Canada, 14-17 June 2015, Conference Proceedings, p. 63.
- [56] D. G. Fredlund et A. Xing, “Equations for the soil-water characteristic curve,” Canadian geotechnical journal, vol. 31, p. 521–532, 1994.
- [57] L. A. Richards, “Capillary conduction of liquids through porous mediums,” Physics, vol. 1, p. 318–333, 1931.
- [58] D. G. Fredlund, N. R. Morgenstern et R. A. Widger, “The shear strength of unsaturated soils,” Canadian geotechnical journal, vol. 15, p. 313–321, 1978.
- [59] “Guide de préparation du plan de réaménagement et de restauration des sites miniers au Québec,” Ministère de l’Énergie et des Ressources naturelles. Québec, Rapport technique, 2016. [En ligne]. Disponible : <https://mern.gouv.qc.ca/mines/publications/index.jsp>
- [60] “Investigation and design of mine dumps : Interim guidelines,” British Columbia Mine Dump Committee, and Piteau Engineering Ltd., Technical Report, 1991.
- [61] “The design and operation of waste rock piles at noncoal mines,” U.S. E.P.A., Office of Solid Waste, Technical Report, 1995.
- [62] S. Pearce, S. Lehane et J. Pearce, “Waste material placement options during construction and closure risk reduction —quantifying the how, the why and the how much,” 2016. [En ligne]. Disponible : https://dx.doi.org/10.36487/acg_rep/1608_51
- [63] K. Raymond, N. Seigneur, D. Su et K. U. Mayer, “Investigating the influence of structure and heterogeneity in waste rock piles on mass loading rates—a reactive transport modeling study,” Frontiers in Water, vol. 3, p. 39, 2021. [En ligne]. Disponible : <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/frwa.2021.618418/full>
- [64] A. Jahanbakhshzadeh, M. Aubertin, S. Yniesta et A. Zafrani, “On the seismic response of tailings dikes constructed with the upstream and center-line methods,” dans Geo St. John’s 72nd Canadian Geotechnical Conference, St. John, Canada, 29 September - 2 October 2019, Conference Proceedings.
- [65] L. Li et M. Aubertin, “Limit equilibrium analysis for the design of backfilled stope barricades made of waste rock,” Canadian Geotechnical Journal, vol. 48, p. 1713–1728, 2011. [En ligne]. Disponible : <https://doi.org/10.1139/t11-063>

- [66] L. Li, Vers une conception de barricades plus sécuritaire dans les mines : Étude de l'interaction entre le remblai et les structures encaissantes. Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail, 2019. [En ligne]. Disponible : <https://www.irsst.qc.ca/publications-et-outils/publication/i/101035/n/conception-barricades-securitaire-mines>
- [67] I. Dawood et M. Aubertin, “Effect of dense material layers on unsaturated water flow inside a large waste rock pile : A numerical investigation,” Mine Water and the Environment, vol. 33, p. 24–38, 2014.
- [68] K. Sylvain, T. Pabst et A. Dimech, “Waste rock valorization in monolayer covers with elevated water table,” dans 18th Global Joint Seminar on Geo-Environmental Engineering, Montréal, Canada, 30-31 May 2019, Conference Proceedings.
- [69] J. Dubuc, “Étude du comportement hydrogéologique d'une couche de contrôle des écoulements placée à la surface d'une halde à stériles expérimentale,” p. 278, 2018.
- [70] G. M. Herasymuik, “Hydrogeology of a sulphide waste rock dump,” Ph.D. Thesis, University of Saskatchewan, 1996. [En ligne]. Disponible : <https://harvest.usask.ca/handle/10388/etd-11132012-133516>
- [71] L. A. Smith, D. L. López, R. Beckie, K. Morin, R. Dawson et W. Price, Hydrogeology of waste rock dumps. British Columbia Ministry of Energy, Mines and Petroleum Resources and CANMET, 1995.
- [72] P. J. Van Staden et J. Petersen, “The effects of simulated stacking phenomena on the percolation leaching of crushed ore, part 1 : Segregation,” Minerals Engineering, vol. 128, p. 202–214, 2018. [En ligne]. Disponible : <https://dx.doi.org/10.1016/j.mineng.2018.08.045>
- [73] —, “The effects of simulated stacking phenomena on the percolation leaching of crushed ore, part 2 : Stratification,” Minerals Engineering, vol. 131, p. 216–229, 2019. [En ligne]. Disponible : <https://dx.doi.org/10.1016/j.mineng.2018.11.021>
- [74] D. F. Coates et Y. S. Yu, Pit slope manual, chapter IX : waste embankments, 1977.
- [75] M. Maknoon, “Slope stability analyses of waste rock piles under unsaturated conditions following large precipitations,” Ph.D. Thesis, Dép. de génie géologique, civil et des mines, École Polytechnique, Montréal (Canada), 2016. [En ligne]. Disponible : https://publications.polymtl.ca/2345/1/2016_MaryamMaknoon.pdf
- [76] J. A. Caldwell et A. S. E. Moss, “The simplified analysis of mine waste embankments,” dans Symposium on design of non-impounding mine waste embankments, Denver, USA, 1981.

- [77] D. F. McCarthy, Essentials of soil mechanics and foundations. Reston Publishing Company Virginia, 1977.
- [78] J. E. Bowles, Physical and geotechnical properties of soils, 1979.
- [79] A. W. Bishop, “The use of pore-pressure coefficients in practice,” Geotechnique, vol. 4, p. 148–152, 1954.
- [80] N. R. Morgenstern et V. E. Price, “The analysis of the stability of general slip surfaces,” Geotechnique, vol. 15, p. 79–93, 1965.
- [81] N. R. Morgenstern, “Managing risk in geotechnical engineering,” dans X Pan-American Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, 1995.
- [82] “Directive 019 sur l’industrie minière,” Ministère du Développement durable, de l’Environnement et des Parcs. Québec, Rapport technique, 2012. [En ligne]. Disponible : https://www.environnement.gouv.qc.ca/milieu_ind/directive019/directive019.pdf
- [83] R. L. Brown, “The fundamental principles of segregation,” The Institute of Fuel, vol. 13, p. 15–23, 1939.
- [84] J. C. Williams, “The segregation of particulate materials,” Powder Technology, vol. 15, p. 245–251, 1976.
- [85] ———, “The mixing of dry powders,” Powder Technology, vol. 2, p. 13–20, 1968.
- [86] D. Bideau et A. Hansen, Disorder and granular media. North Holland, 1993, vol. 3.
- [87] C. G. Johnson, B. P. Kokelaar, R. M. Iverson, M. Logan, R. G. Lahusen et J. M. N. T. Gray, “Grain-size segregation and levee formation in geophysical mass flows,” Journal of Geophysical Research, vol. 117, p. n/a–n/a, 2012.
- [88] J. L. Baker, C. G. Johnson et J. M. N. T. Gray, “Segregation-induced finger formation in granular free-surface flows,” Journal of Fluid Mechanics, vol. 809, p. 168–212, 2016a. [En ligne]. Disponible : <https://dx.doi.org/10.1017/jfm.2016.673>
- [89] G. H. Ristow, Pattern formation in granular materials. Springer Science & Business Media, 2000, vol. 164.
- [90] J. Mellmann, “The transverse motion of solids in rotating cylinders—forms of motion and transition behavior,” Powder Technology, vol. 118, p. 251–270, 2001. [En ligne]. Disponible : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0032591000004022>
- [91] S. W. Meier, R. M. Lueptow et J. M. Ottino, “A dynamical systems approach to mixing and segregation of granular materials in tumblers,” Advances in Physics, vol. 56, p. 757–827, 2007. [En ligne]. Disponible : <https://doi.org/10.1080/00018730701611677>

- [92] A. Brucks, T. Arndt, J. M. Ottino et R. M. Lueptow, “Behavior of flowing granular materials under variable g ,” Phys. Rev. E, vol. 75, p. 032301, Mar 2007. [En ligne]. Disponible : <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevE.75.032301>
- [93] O. Pouliquen et J. W. Vallance, “Segregation induced instabilities of granular fronts,” Chaos : An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science, vol. 9, p. 621–630, 1999. [En ligne]. Disponible : <https://dx.doi.org/10.1063/1.166435>
- [94] Y. Fan, Y. Boukerkour, T. Blanc, P. B. Umbanhowar, J. M. Ottino et R. M. Lueptow, “Stratification, segregation, and mixing of granular materials in quasi-two-dimensional bounded heaps,” Physical Review E, vol. 86, 2012.
- [95] J. M. N. T. Gray et C. Ancey, “Segregation, recirculation and deposition of coarse particles near two-dimensional avalanche fronts,” Journal of Fluid Mechanics, vol. 629, p. 387–423, 2009.
- [96] O. Pouliquen, J. Delour et S. B. Savage, “Fingering in granular flows,” Nature, vol. 386, p. 816–817, 1997. [En ligne]. Disponible : <https://doi.org/10.1038/386816a0>
- [97] J. M. N. T. Gray et B. P. Kokelaar, “Large particle segregation, transport and accumulation in granular free-surface flows,” Journal of Fluid Mechanics, vol. 652, p. 105–137, 2010.
- [98] J. A. Drahn et J. Bridgwater, “The mechanisms of free surface segregation,” Powder Technology, vol. 36, p. 39–53, 1983.
- [99] P. Gajjar et J. M. N. T. Gray, “Asymmetric flux models for particle-size segregation in granular avalanches,” Journal of Fluid Mechanics, vol. 757, p. 297–329, 2014.
- [100] G. Felix et N. Thomas, “Evidence of two effects in the size segregation process in dry granular media,” Phys Rev E Stat Nonlin Soft Matter Phys, vol. 70, p. 051307, 2004. [En ligne]. Disponible : <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/15600603>
- [101] B. Marks, P. Rognon et I. Einav, “Grainsize dynamics of polydisperse granular segregation down inclined planes,” Journal of Fluid Mechanics, vol. 690, p. 499–511, 2012.
- [102] N. Thomas, “Reverse and intermediate segregation of large beads in dry granular media,” Physical Review E, vol. 62, p. 961–974, 2000. [En ligne]. Disponible : <https://dx.doi.org/10.1103/physreve.62.961>
- [103] A. Kumar, D. V. Khakhar et A. Tripathi, “Theoretical calculation of the buoyancy force on a particle in flowing granular mixtures,” Physical Review E, vol. 100, 2019. [En ligne]. Disponible : <https://dx.doi.org/10.1103/physreve.100.042909>
- [104] A. Tripathi, A. Kumar, M. Nema et D. V. Khakhar, “Theory for size segregation in flowing granular mixtures based on computation of forces on a single

- large particle,” Physical Review E, vol. 103, 2021. [En ligne]. Disponible : <https://dx.doi.org/10.1103/physreve.103.1031301>
- [105] T. Trehela, C. Ancey et J. M. N. T. Gray, “An experimental scaling law for particle-size segregation in dense granular flows,” Journal of Fluid Mechanics, vol. 916, 2021. [En ligne]. Disponible : <https://dx.doi.org/10.1017/jfm.2021.227>
- [106] V. N. Dolgunin et A. A. Ukolov, “Segregation modeling of particle rapid gravity flow,” Powder Technology, vol. 83, p. 95–103, 1995. [En ligne]. Disponible : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/003259109402954M>
- [107] P. Gajjar, C. G. Johnson, J. Carr, K. Chrispeels, J. M. N. T. Gray et P. J. Withers, “Size segregation of irregular granular materials captured by time-resolved 3D imaging,” Scientific Reports, vol. 11, 2021. [En ligne]. Disponible : <https://dx.doi.org/10.1038/s41598-021-87280-1>
- [108] J. N. T. Gray et K. Hutter, “Pattern formation in granular avalanches,” Continuum Mechanics and Thermodynamics, vol. 9, p. 341–345, 1997. [En ligne]. Disponible : <https://dx.doi.org/10.1007/s001610050075>
- [109] H. A. Makse, “Stratification instability in granular flows,” Physical Review E, vol. 56, p. 7008–7016, 1997b. [En ligne]. Disponible : <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevE.56.7008>
- [110] Y. Grasselli et H. J. Herrmann, “Experimental study of granular stratification,” Granular Matter, vol. 1, p. 43–47, 1998. [En ligne]. Disponible : <https://dx.doi.org/10.1007/PL00010909>
- [111] K. Shinohara, K. Shoji et T. Tanaka, “Mechanism of size segregation of particles in filling a hopper,” Industrial & Engineering Chemistry Process Design and Development, vol. 11, p. 369–376, 1972.
- [112] K. Shinohara et G. Enstad, “Segregation mechanism of binary solids in filling axi-symmetric hoppers,” dans Proceedings of the Second World Congress Particle Technology, 1990, p. 45–52.
- [113] R. K. Goyal et M. S. Tomassone, “Power-law and exponential segregation in two-dimensional silos of granular mixtures,” Physical Review E, vol. 74, p. 051301, 2006.
- [114] M. Rahman, K. Shinohara, H. P. Zhu, A. B. Yu et P. Zulli, “Size segregation mechanism of binary particle mixture in forming a conical pile,” Chemical Engineering Science, vol. 66, p. 6089–6098, 2011. [En ligne]. Disponible : <https://dx.doi.org/10.1016/j.ces.2011.08.024>

- [115] G. Lumay, F. Boschini, R. Cloots et N. Vandewalle, “Cascade of granular flows for characterizing segregation,” Powder Technology, vol. 234, p. 32–36, 2013. [En ligne]. Disponible : <https://dx.doi.org/10.1016/j.powtec.2012.09.028>
- [116] R. P. Jones, “Modeling segregation in spherical and non-spherical granular materials,” Ph.D., 2020. [En ligne]. Disponible : <https://www.proquest.com/docview/2425610170?pq-origsite=gscholar&fromopenview=true>
- [117] R. P. Jones, J. M. Ottino, P. B. Umbanhowar et R. M. Lueptow, “Predicting segregation of nonspherical particles,” Physical Review Fluids, vol. 6, p. 054301, 2021.
- [118] A. B. Isner, P. B. Umbanhowar, J. M. Ottino et R. M. Lueptow, “Axisymmetric granular flow on a bounded conical heap : Kinematics and size segregation,” Chemical Engineering Science, vol. 217, 2020.
- [119] J. G. Benito, I. Ippolito et A. M. Vidales, “Novel aspects on the segregation in quasi-2D piles,” Powder Technology, vol. 234, p. 123–131, 2013. [En ligne]. Disponible : <https://dx.doi.org/10.1016/j.powtec.2012.09.043>
- [120] J. G. Benito, R. O. Uñac, A. M. Vidales et I. Ippolito, “Influence of geometry on stratification and segregation phenomena in bidimensional piles,” Physica A : Statistical Mechanics and its Applications, vol. 396, p. 19–28, 2014. [En ligne]. Disponible : <https://dx.doi.org/10.1016/j.physa.2013.11.028>
- [121] J. P. Koeppe, M. Enz et J. Kakalios, “Phase diagram for avalanche stratification of granular media,” Physical Review E, vol. 58, p. R4104–R4107, 1998. [En ligne]. Disponible : <https://dx.doi.org/10.1103/PhysRevE.58.R4104>
- [122] N. Lecocq et N. Vandewalle, “Stripes ordering in self-stratification experiments of binary and ternary granular mixtures,” Physical Review E, vol. 62, p. 8241–8244, 2000.
- [123] M. Shimokawa et S. Ohta, “Dual stratification of a sand pile formed by trapped kink,” Physics Letters A, vol. 366, p. 591–595, 2007.
- [124] —, “Spontaneous formation of dual stratification patterns in a large quasi-two-dimensional sand pile,” Physical Review E, vol. 77, p. 011305, 2008.
- [125] H. A. Makse, P. Cizeau et H. E. Stanley, “Possible stratification mechanism in granular mixtures,” Physical Review Letters, vol. 78, p. 3298–3301, 1997c. [En ligne]. Disponible : <https://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.78.3298>
- [126] D. Rodríguez, J. G. Benito, I. Ippolito, J. P. Hulin, A. M. Vidales et R. O. Uñac, “Dynamical effects in the segregation of granular mixtures in quasi-2D piles,” Powder Technology, vol. 269, p. 101–109, 2015. [En ligne]. Disponible : <https://dx.doi.org/10.1016/j.powtec.2014.09.001>

- [127] Y. Fan, C. P. Schlick, P. B. Umbanhowar, J. M. Ottino et R. M. Lueptow, “Modelling size segregation of granular materials : the roles of segregation, advection and diffusion,” Journal of Fluid Mechanics, vol. 741, p. 252–279, 2014. [En ligne]. Disponible : <https://dx.doi.org/10.1017/jfm.2013.680>
- [128] H. A. Makse, P. Cizeau et H. E. Stanley, “Modeling stratification in two-dimensional sandpiles,” Physica A : Statistical Mechanics and its Applications, vol. 249, p. 391–396, 1998. [En ligne]. Disponible : [https://dx.doi.org/10.1016/s0378-4371\(97\)00497-4](https://dx.doi.org/10.1016/s0378-4371(97)00497-4)
- [129] T. Boutreux, H. A. Makse et P. G. De Gennes, “Surface flows of granular mixtures,” The European Physical Journal B, vol. 9, p. 105–115, 1999. [En ligne]. Disponible : <https://dx.doi.org/10.1007/s100510050746>
- [130] K. Shinohara et B. Golman, “Particle segregation of binary mixture in a moving bed by penetration model,” Chemical Engineering Science, vol. 57, p. 277–285, 2002.
- [131] Y. Duan, P. B. Umbanhowar, J. M. Ottino et R. M. Lueptow, “Modelling segregation of bidisperse granular mixtures varying simultaneously in size and density for free surface flows,” Journal of Fluid Mechanics, vol. 918, 2021. [En ligne]. Disponible : <https://dx.doi.org/10.1017/jfm.2021.342>
- [132] Y. Fan, P. B. Umbanhowar, J. M. Ottino et R. M. Lueptow, “Kinematics of monodisperse and bidisperse granular flows in quasi-two-dimensional bounded heaps,” Proceedings of the Royal Society A : Mathematical, Physical and Engineering Sciences, vol. 469, p. 20130235, 2013. [En ligne]. Disponible : <https://dx.doi.org/10.1098/rspa.2013.0235>
- [133] Y. Zhao, H. Xiao, P. B. Umbanhowar et R. M. Lueptow, “Simulation and modeling of segregating rods in quasi-2D bounded heap flow,” AIChE Journal, vol. 64, p. 1550–1563, 2018.
- [134] C. P. Schlick, Y. Fan, A. B. Isner, P. B. Umbanhowar, J. M. Ottino et R. M. Lueptow, “Modeling segregation of bidisperse granular materials using physical control parameters in the quasi-2D bounded heap,” AIChE Journal, vol. 61, p. 1524–1534, 2015.
- [135] D. Zhang, Z. Zhou et D. Pinson, “DEM simulation of particle stratification and segregation in stockpile formation,” dans EPJ Web of Conferences, vol. 140, Montpellier, France, 3-7 July 2017, Conference Proceedings.
- [136] A. B. Isner, P. B. Umbanhowar, J. M. Ottino et R. M. Lueptow, “Granular flow in a wedge-shaped heap : Velocity field, kinematic scalings, and segregation,” AIChE Journal, vol. 66, 2020b.
- [137] S. Torquato et H. Haslach Jr., “Random heterogeneous materials : microstructure and macroscopic properties,” Appl. Mech. Rev., vol. 55, p. 62–63, 2002.

- [138] J. Duran, Sands, powders, and grains : an introduction to the physics of granular materials. Springer Science & Business Media, 2012.
- [139] B. Cambou, M. Jean et F. Radjaï, Micromechanics of granular materials. John Wiley & Sons, 2013.
- [140] P. A. Cundall et O. D. L. Strack, “A discrete numerical model for granular assemblies,” Géotechnique, vol. 29, p. 47–65, 1979.
- [141] E. Azéma, F. Radjaï et F. Dubois, “Packings of irregular polyhedral particles : Strength, structure, and effects of angularity,” Physical Review E, vol. 87, 2013a. [En ligne]. Disponible : <https://dx.doi.org/10.1103/physreve.87.062203>
- [142] R. Mozul. (2018) Some theory around DEM (Discrete Element Methods). [En ligne]. Disponible : http://www.lmgc.univ-montp2.fr/~mozul/LMGC90_USER/UserDoc/docs_2018.rc2/dev_theory.html
- [143] D. A. McQuarrie, Statistical Thermodynamics. Harper Collins Publishers, 1973.
- [144] R. Zallen, The physics of amorphous solids. John Wiley & Sons, 1983.
- [145] J.-P. Hansen et I. R. McDonald, Theory of simple liquids. Elsevier, 1990.
- [146] D. Gidaspow et L. Huilin, “Equation of state and radial distribution functions of FCC particles in a CFB,” AIChE Journal, vol. 44, p. 279–293, 1998.
- [147] A. Donev, S. Torquato et F. H. Stillinger, “Pair correlation function characteristics of nearly jammed disordered and ordered hard-sphere packings,” Physical Review E, vol. 71, 2005.
- [148] D. Chen, E. Lomba et S. Torquato, “Binary mixtures of charged colloids : a potential route to synthesize disordered hyperuniform materials,” Physical Chemistry Chemical Physics, vol. 20, p. 17557–17562, 2018.
- [149] J. M. Ziman, Models of disorder : the theoretical physics of homogeneously disordered systems. CUP Archive, 1979.
- [150] D. H. Nguyen, “Microstructure et comportement mécanique des milieux granulaires polydisperses fragmentables,” Thèse de doctorat, Université Montpellier II-Sciences et Techniques du Languedoc, 2014.
- [151] E. Azéma, S. Linero, N. Estrada et A. Lizcano, “Shear strength and microstructure of polydisperse packings : The effect of size span and shape of particle size distribution,” Physical Review E, vol. 96, 2017.
- [152] D. Cantor, E. Azéma, P. Sornay et F. Radjaï, “Rheology and structure of polydisperse three-dimensional packings of spheres,” Physical Review E, vol. 98, 2018.

- [153] D. Cantor, E. Azéma et I. Preechawuttipong, “Microstructural analysis of sheared polydisperse polyhedral grains,” Physical Review E, vol. 101, 2020.
- [154] F. da Cruz, S. Emam, M. Prochnow, J.-N. Roux et F. Chevoir, “Rheophysics of dense granular materials : Discrete simulation of plane shear flows,” Physical Review E, vol. 72, 2005.
- [155] E. Azéma, F. Radjaï, B. Saint-Cyr, J.-Y. Delenne et P. Sornay, “Rheology of three-dimensional packings of aggregates : Microstructure and effects of nonconvexity,” Physical Review E, vol. 87, 2013b.
- [156] J. L. Baker, T. Barker et J. M. N. T. Gray, “A two-dimensional depth-averaged rheology for dense granular avalanches,” Journal of Fluid Mechanics, vol. 787, p. 367–395, 2016b. [En ligne]. Disponible : <https://dx.doi.org/10.1017/jfm.2015.684>
- [157] T. Barker, M. Rauter, E. S. F. Maguire, C. G. Johnson et J. M. N. T. Gray, “Coupling rheology and segregation in granular flows,” Journal of Fluid Mechanics, vol. 909, 2021.
- [158] T. T. Vo, S. Nezamabadi, P. Mutabaruka, J.-Y. Delenne et F. Radjai, “Additive rheology of complex granular flows,” Nature Communications, vol. 11, 2020.
- [159] D. M. Mueth, H. M. Jaeger et S. R. Nagel, “Force distribution in a granular medium,” Physical Review E, vol. 57, p. 3164–3169, 1998.
- [160] J. F. Peters, M. Muthuswamy, J. Wibowo et A. Tordesillas, “Characterization of force chains in granular material,” Physical review E, vol. 72, 2005.
- [161] L. Kondic, A. Goulet, C. S. O’Hern, M. Kramar, K. Mischaikow et R. P. Behringer, “Topology of force networks in compressed granular media,” EPL (Europhysics Letters), vol. 97, p. 54001, 2012.
- [162] F. Radjaï, M. Jean, J.-J. Moreau et S. Roux, “Force distributions in dense two-dimensional granular systems,” Physical Review Letters, vol. 77, p. 274–277, 1996.
- [163] J. Geng, E. Longhi, R. P. Behringer et D. W. Howell, “Memory in two-dimensional heap experiments,” Physical Review E, vol. 64, 2001.
- [164] S. J. Antony, “Evolution of force distribution in three-dimensional granular media,” Physical Review E, vol. 63, p. 011302, 2000.
- [165] F. Radjaï, D. E. Wolf, M. Jean et J.-J. Moreau, “Bimodal character of stress transmission in granular packings,” Physical Review Letters, vol. 80, p. 61–64, 1998.
- [166] F. Radjaï, “Modeling force transmission in granular materials,” Comptes Rendus Physique, vol. 16, p. 3–9, 2015. [En ligne]. Disponible : <https://dx.doi.org/10.1016/j.crhy.2015.01.003>

- [167] C.-H. Liu, S. R. Nagel, D. A. Schecter, S. N. Coppersmith, S. Majumdar, O. Narayan et T. A. Witten, “Force fluctuations in bead packs,” Science, vol. 269, p. 513–515, 1995.
- [168] S. N. Coppersmith, C.-H. Liu, S. Majumdar, O. Narayan et T. A. Witten, “Model for force fluctuations in bead packs,” Physical Review E, vol. 53, p. 4673, 1996.
- [169] E. Azéma et F. Radjaï, “Force chains and contact network topology in sheared packings of elongated particles,” Physical Review E, vol. 85, 2012.
- [170] C. Voivret, F. Radjaï, J.-Y. Delenne et M. S. El Youssoufi, “Multiscale force networks in highly polydisperse granular media,” Physical Review Letters, vol. 102, 2009.
- [171] P. A. Cundall, “A computer model for simulating progressive large scale movements of blocky rock systems,” dans Proceedings of the Symposium of the International Society of Rock Mechanics, vol. 1, Nancy, France, 1971, Conference Proceedings, p. 132–150.
- [172] R. Mozul. (2018) Structure of LMGC90. [En ligne]. Disponible : http://www.lmgc.univ-montp2.fr/~mozul/LMGC90_USER/UserDoc/docs_2018.rc2/dev_presentation.html
- [173] V. L. Popov, Contact mechanics and friction. Springer, 2010.
- [174] J.-J. Moreau, “New computation methods in granular dynamics,” dans Powders & Grains. Birmingham, England : AA Balkema, 1993, Conference Proceedings, p. 227–232.
- [175] E. Delassus, “Mémoire sur la théorie des liaisons finies unilatérales,” Annales scientifiques de l’École Normale Supérieure, vol. 34, p. 95–179, 1917. [En ligne]. Disponible : <http://www.numdam.org/articles/10.24033/asens.701/>
- [176] M. Jean, “The non-smooth contact dynamics method,” Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, vol. 177, p. 235–257, 1999. [En ligne]. Disponible : [https://dx.doi.org/10.1016/s0045-7825\(98\)00383-1](https://dx.doi.org/10.1016/s0045-7825(98)00383-1)
- [177] M. Jean et J.-J. Moreau, “Unilaterality and dry friction in the dynamic of rigid body collections,” 1st Contact Mechanics International Symposium, vol. 1, p. 31–48, 1992.
- [178] J.-J. Moreau, Standard Inelastic Shocks and the Dynamics of Unilateral Constraints. Springer Vienna, 1985, vol. 288, p. 173–221. [En ligne]. Disponible : https://dx.doi.org/10.1007/978-3-7091-2632-5_9
- [179] —, Unilateral Contact and Dry Friction in Finite Freedom Dynamics. Springer Vienna, 1988, vol. 302, p. 1–82. [En ligne]. Disponible : https://dx.doi.org/10.1007/978-3-7091-2624-0_1
- [180] —, Some Basics of Unilateral Dynamics. München, Germany : Springer, August 1998.

- [181] A. Signorini, “Questioni di elasticità non linearizzata e semilinearizzata,” Rend. Mat. Appl., vol. 18, p. 95–139, 1959.
- [182] G. Fichera, “Sul problema elastostatico di signorini con ambigue condizioni al contorno,” Atti Accad. Naz. Lincei, VIII. Ser., Rend., Cl. Sci. Fis. Mat. Nat., vol. 34, p. 138–142, 1963.
- [183] T. Schwager, V. Becker et T. Pöschel, “Coefficient of tangential restitution for viscoelastic spheres,” The European Physical Journal E, vol. 27, p. 107–114, 2008.
- [184] F. Radjaï et V. Richefeu, “Contact dynamics as a nonsmooth discrete element method,” Mechanics of Materials, vol. 41, p. 715–728, 2009. [En ligne]. Disponible : <https://dx.doi.org/10.1016/j.mechmat.2009.01.028>
- [185] R. Hart, P. A. Cundall et J. Lemos, “Formulation of a three-dimensional distinct element model — part ii. mechanical calculations for motion and interaction of a system composed of many polyhedral blocks,” dans International journal of rock mechanics and mining sciences & Geomechanics abstracts, vol. 25, n° 3. Elsevier, 1988, p. 117–125.
- [186] C. Hogue, “Shape representation and contact detection for discrete element simulations of arbitrary geometries,” Engineering Computations, 1998.
- [187] X. Lin et T.-T. Ng, “Contact detection algorithms for three-dimensional ellipsoids in discrete element modelling,” International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, vol. 19, p. 653–659, 1995.
- [188] F. Dubois et M. Jean, The non smooth contact dynamic method : recent LMGC90 software developments and application. Springer-Verlag, 2006, vol. 27, p. 375–378. [En ligne]. Disponible : https://dx.doi.org/10.1007/3-540-31761-9_44
- [189] F. Dubois, V. Acary et M. Jean, “The contact dynamics method : A nonsmooth story,” Comptes Rendus Mécanique, vol. 346, p. 247–262, 2018. [En ligne]. Disponible : <https://dx.doi.org/10.1016/j.crme.2017.12.009>
- [190] M. Renouf, F. Dubois et P. Alart, “A parallel version of the non smooth contact dynamics algorithm applied to the simulation of granular media,” Journal of Computational and Applied Mathematics, vol. 168, p. 375–382, 2004. [En ligne]. Disponible : <https://dx.doi.org/10.1016/j.cam.2003.05.019>
- [191] M. Renouf et P. Alart, “Conjugate gradient type algorithms for frictional multi-contact problems : applications to granular materials,” Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, vol. 194, p. 2019–2041, 2005. [En ligne]. Disponible : <https://dx.doi.org/10.1016/j.cma.2004.07.009>
- [192] V. Visseq, A. Martin, D. Iceta, E. Azema, D. Dureisseix et P. Alart, “Dense granular dynamics analysis by a domain decomposition approach,”

- Computational Mechanics, vol. 49, p. 709–723, 2012. [En ligne]. Disponible : <https://dx.doi.org/10.1007/s00466-012-0699-5>
- [193] G. De Saxcé et Z.-Q. Feng, “The bipotential method : a constructive approach to design the complete contact law with friction and improved numerical algorithms,” Mathematical and computer modelling, vol. 28, p. 225–245, 1998.
- [194] P. Jop, Y. Forterre et O. Pouliquen, “Crucial role of sidewalls in granular surface flows : consequences for the rheology,” Journal of Fluid Mechanics, vol. 541, p. 167, 2005.
- [195] T. Roessler, C. Richter, A. Katterfeld et F. Will, “Development of a standard calibration procedure for the DEM parameters of cohesionless bulk materials – part I : Solving the problem of ambiguous parameter combinations,” Powder Technology, vol. 343, p. 803–812, 2019. [En ligne]. Disponible : <https://dx.doi.org/10.1016/j.powtec.2018.11.034>
- [196] K. A. Gillemot, E. Somfai et T. Börzsönyi, “Shear-driven segregation of dry granular materials with different friction coefficients,” Soft Matter, vol. 13, p. 415–420, 2017.
- [197] A. M. Fry, P. B. Umbanhowar, J. M. Ottino et R. M. Lueptow, “Effect of pressure on segregation in granular shear flows,” Physical Review E, vol. 97, 2018. [En ligne]. Disponible : <https://dx.doi.org/10.1103/physreve.97.062906>
- [198] J. Saxton, P. Fralick, U. Panu et K. Wallace, “Density segregation of minerals during high-velocity transport over a rough bed : Implications for the formation of placers,” Economic Geology, vol. 103, p. 1657–1664, 2008.
- [199] C. M. Wensrich et A. Katterfeld, “Rolling friction as a technique for modelling particle shape in DEM,” Powder Technology, vol. 217, p. 409–417, 2012. [En ligne]. Disponible : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0032591011006000>
- [200] R. P. Jensen, P. J. Bosscher, M. E. Plesha et T. B. Edil, “DEM simulation of granular media—structure interface : effects of surface roughness and particle shape,” International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, vol. 23, p. 531–547, 1999.
- [201] B. Marks et I. Einav, “A mixture of crushing and segregation : The complexity of grain size in natural granular flows,” Geophysical Research Letters, vol. 42, p. 274–281, 2015.
- [202] M. Alizadeh, A. Hassanpour, M. Pasha, M. Ghadiri et A. Bayly, “The effect of particle shape on predicted segregation in binary powder mixtures,” Powder Technology, vol. 319, p. 313–322, 2017. [En ligne]. Disponible : <https://dx.doi.org/10.1016/j.powtec.2017.06.059>
- [203] C. Richter, T. Roessler, G. Kunze, A. Katterfeld et F. Will, “Development of a standard calibration procedure for the DEM parameters of cohesionless bulk materials

- part II : Efficient optimization-based calibration,” Powder Technology, vol. 360, p. 967–976, 2020. [En ligne]. Disponible : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0032591019308757>
- [204] P. Qiu et T. Pabst, “Waste rock disposal and segregation : Validation and upscaling of discrete element simulations,” dans Geo Virtual : Resilience and Innovation, 14-16 September 2020, Conference Proceedings. [En ligne]. Disponible : https://www.researchgate.net/publication/344476168_Waste_rock_disposal_and_segregation_Validation_and_upscaling_of_discrete_element_simulations
- [205] A. Thornton, T. Weinhart, S. Luding et O. Bokhove, “Modeling of particle size segregation : calibration using the discrete particle method,” International Journal of Modern Physics C, vol. 23, 2012.

ANNEXE A GÉOMÉTRIES DES DIFFÉRENTES CELLULES DE DÉPOSITION NON RETENUES POUR LA RÉALISATION DES SIMULATIONS

L'annexe présente l'ensemble des géométries de cellules d'essai 2D imaginées et testées avant l'élection des modèles numériques définitifs. Des représentations de chaque stratégie sont données au cours ou au terme d'une simulation de déposition. Les prises de vues sont quelquefois accompagnées de vidéos des déversements modélisés. (renvoi à **Sec. 4.1**)

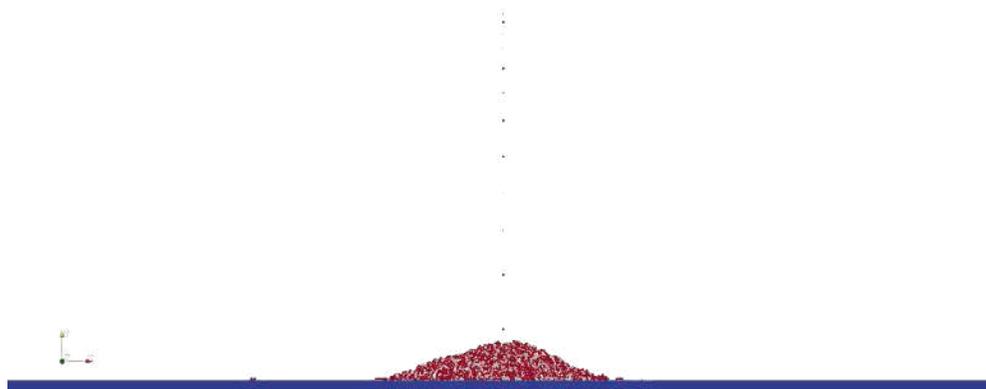


FIGURE A.1 Déposition d'un mélange granulaire bidisperse sur une surface plane par déchargement direct depuis un unique point d'injection.

Un média vidéo de la simulation numérique d'une déposition pour la précédente géométrie de cellule de test est rendu disponible en suivant ce [lien](#)¹.

1. <https://youtu.be/sutgZV6rDro>, lien en clair pour les versions imprimées.

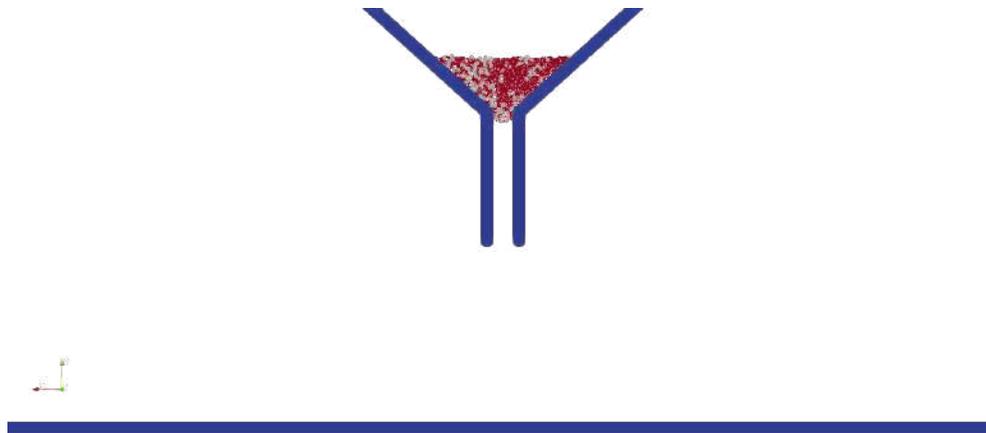


FIGURE A.2 Déposition d'un mélange granulaire bidisperse sur une surface plane par déchargement au travers d'un appareillage de type entonnoir/silo.

Un média vidéo de la simulation numérique d'une déposition pour la précédente géométrie de cellule de test est rendu disponible en suivant ce [lien](#)².

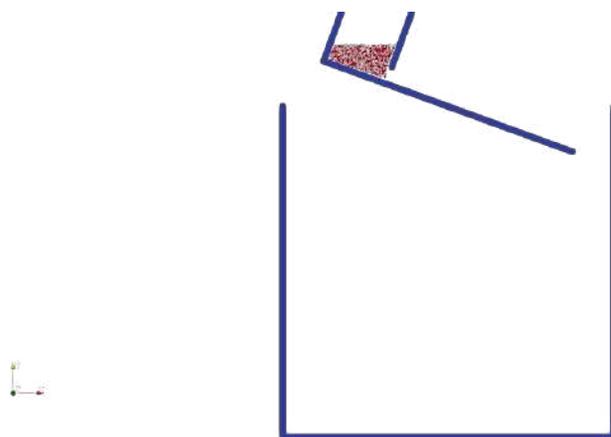


FIGURE A.3 Déposition d'un mélange granulaire bidisperse sur une surface plane par déchargement depuis la surélévation d'une rampe inversée d'injection.

Un média vidéo de la simulation numérique d'une déposition pour la précédente géométrie de cellule de test est rendu disponible en suivant ce [lien](#)³.

2. <https://youtu.be/Q04Y3rdaBi0>, lien en clair pour les versions imprimées.

3. <https://youtu.be/T-CNcmOjjCc>, lien en clair pour les versions imprimées.

ANNEXE B MISE EN ÉVIDENCE DE LA VARIANCE DES MESURES D'INDICES D'ALLONGEMENT, DE SPHÉRICITÉ ET D'ANGULARITÉ MOYENNE DES GRAINS

L'annexe partage une étude statistique complémentaire de la variabilité des indices de mesure de formes de particules polyédriques qui s'appuie sur la génération de dix mélanges granulaires avec le logiciel LMGC90. Les échantillons modélisés comptent $N = 10,000$ particules de n_v sommets, n_v croissant. Une description de la géométrie des différents matériaux selon les paramètres d'allongement χ , de sphéricité Φ et d'angularité moyenne $\langle\alpha\rangle$ est alors proposée. Les calculs d'une valeur moyenne (exemple : $\bar{\Psi}$) et d'un écart-type (exemple : σ_{Ψ}) des divers indices étudiés sont résumés pour chaque mélange granulaire dans le **tableau B.1**. (renvoi à **Sec. 4.1.3**)

TABLEAU B.1 Description des précisions d'application des méthodes d'évaluation des paramètres de formes des grains composant des échantillons aléatoirement générés de $N = 10,000$ polyèdres à n_v sommets.

MÉLANGE	n_v	n_f	$\bar{\chi}_1$	σ_{χ_1}	$\bar{\chi}_2$	σ_{χ_2}	$\bar{\Psi}$	σ_{Ψ}	$\langle\alpha\rangle$	$\sigma_{\langle\alpha\rangle}$
1	4	4	0.673	0.169	0.301	0.158	0.541	0.129	0.917	0.217
2	9	14	0.836	0.110	0.554	0.143	0.759	0.059	0.853	0.058
3	14	24	0.895	0.078	0.680	0.121	0.842	0.035	0.687	0.025
4	19	34	0.922	0.057	0.751	0.101	0.882	0.024	0.579	0.015
5	24	44	0.936	0.049	0.797	0.091	0.905	0.019	0.505	0.013
6	29	54	0.946	0.042	0.829	0.081	0.920	0.016	0.452	0.011
7	34	64	0.954	0.035	0.856	0.072	0.932	0.012	0.414	0.010
8	39	74	0.958	0.033	0.872	0.064	0.940	0.010	0.384	0.009
9	44	84	0.963	0.029	0.889	0.056	0.947	0.009	0.355	0.008
10	49	94	0.967	0.026	0.899	0.053	0.952	0.008	0.338	0.006

Les résultats de l'étude permettent d'apprécier les évolutions de l'écart-type σ de chaque paramètre avec l'augmentation de n_v pour chaque échantillon généré (**fig. B.1**). Il apparaît que le pouvoir de discrimination d'un indice est relativement impacté dépendamment du nombre de sommets des particules composant les mélanges granulaires : plus la valeur prise par l'écart-type diminue et plus le pouvoir de discrimination de l'indice est fort. La lecture du **tableau B.1** permet notamment les observations suivantes :

- La mesure d'allongement χ propose une évaluation de la forme des particules dont la pertinence est davantage limitée par le caractère rudimentaire de sa méthode de calcul plutôt que par les variations de n_v ;

- L'emploi de l'angularité moyenne $\langle\alpha\rangle$ s'avère limité pour la description des formes de particules tétraédriques ($n_v = 4$) mais révèle un fort pouvoir de discrimination, dépassant ceux χ et Ψ , dès que le profil géométrique des grains se complexifie ;
- L'indice de sphéricité Ψ incarne un intermédiaire de précision entre les deux précédentes mesures.

La réalisation de l'exercice détaillé ci-dessus et les considérations rappelées dans le cours du document ($n_v \geq 8$ notamment retenu) encouragent l'utilisation du paramètre principal $\langle\alpha\rangle$ pour contrôler les distributions de formes au travers des échantillons granulaires modélisés. χ et Ψ demeurent intégrés à des fonctions de contrôle d'aspect particulier, notamment des phénomènes d'excentricité prononcés, des grains pour générer les mélanges souhaités.

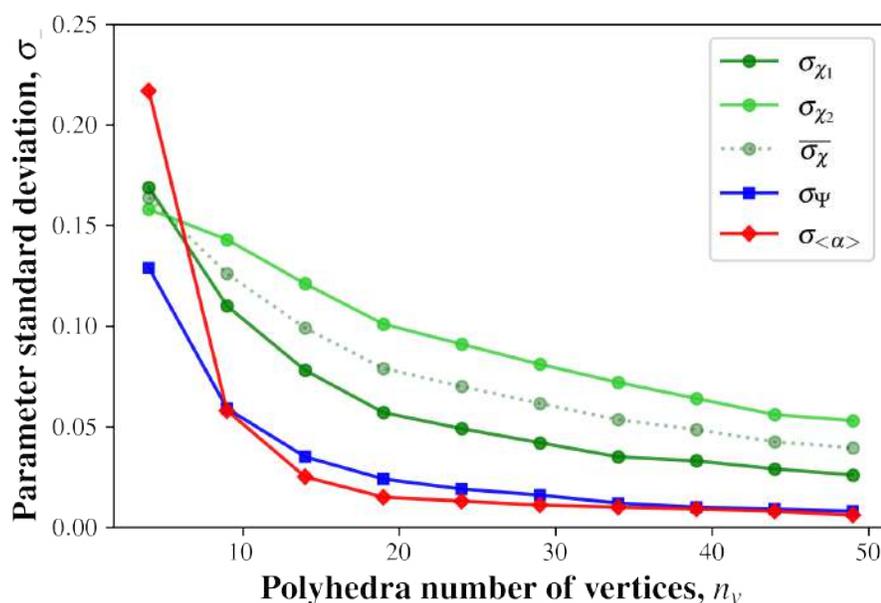


FIGURE B.1 Évolution des écarts-types des descripteurs des formes de particules σ_{χ_1} , σ_{χ_2} , σ_{Ψ} , $\sigma_{\langle\alpha\rangle}$, en fonction du nombre de sommets des grains n_v . La moyenne arithmétique $\overline{\sigma_{\chi}}$ est calculée d'après σ_{χ_1} et σ_{χ_2} .

ANNEXE C POWDERS & GRAINS 2021 - ARTICLE : DEM MODELING OF SEGREGATION AND STRATIFICATION IN POURING HEAPS OF BIDISPERSED MIXTURES OF ROUNDED PARTICLES

L'article présenté dans cette section a été soumis et publié dans le cadre de la conférence Powders & Grains 2021 (9th International Conference on Micromechanics on Granular Media) qui s'est tenue en distanciel du 05 Juillet au 06 Août 2021. Le travail résumé dans cette communication s'arrête à Septembre 2020.

Le poster qui a accompagné la participation à la conférence est donné en annexes (**Ann. D**). Pareillement, une vidéo de 3min. demandée à l'occasion de l'événement, et donc associée à la publication, est rendue disponible en suivant ce lien : [P&G_video_201960](#)¹.

La référence de l'article est donnée ci-dessous [19] :

Vuilloz, T., Cantor, D. et Ovalle, C.. (2021). DEM modeling of segregation and stratification in pouring heaps of bidispersed mixtures of rounded particles. EPJ web of conferences, 249, 03049. [doi:10.1051/epjconf/202124903049](https://doi.org/10.1051/epjconf/202124903049)²

Abstract

This study aims to assess and analyse the patterns of segregation and stratification in pouring heaps of granular mixtures composed by binary sized and uniformly shaped particles. We present 2D and 3D simulations which respectively build deposits of poured disks and spheres by means of a discrete-element approach known as contact dynamics (CD). In order to identify preferable conditions for segregation and stratification, we try several deposition scenarios varying the pouring flow rate, injection height, heap's width and mass ratio between large and small grains in our binary samples. Although some authors assert that shape dispersity might not be necessary to obtain stratification, the phenomenon seems hard to seize with mono-shaped granular media as it appears to require a close control on pouring conditions. The introduction of our DEM models and statistical analysis intend to provide examples of what could constitute efficient numerical tools to study the remaining open problems related to heap segregation patterns prediction.

Résumé

Cette étude entend évaluer et analyser les schémas de ségrégation et de stratification dans les piles granulaires de mélanges bidisperses composés de particules de même forme, mais

1. <https://youtu.be/-MAFmjN0XH8>, lien en clair pour les versions imprimées.

2. <https://doi.org/10.1051/epjconf/202124903049>, lien en clair pour les versions imprimées.

de tailles différentes. Nous présentons des simulations en 2D et 3D qui, respectivement, construisent des dépôts de disques et de sphères à l'aide d'une approche par éléments discrets intégrant la dynamique des contacts (DC). Avec pour objectif l'identification de conditions propices au développement des phénomènes de ségrégation et de stratification, nous imaginons différents scénarios de déposition qui font varier le débit d'injection, la hauteur d'injection, la largeur de la déposition et le ratio de masses entre les deux populations de grains, grossières et fines. Si certains auteurs avancent que la disparité de formes ne serait pas nécessaire à la réalisation d'exemples de stratification, le phénomène semble bien plus difficile à saisir avec des mélanges granulaires faits de particules uniformes puisqu'un contrôle rigoureux des conditions de déposition apparaît alors requis avec un tel matériau. L'introduction de nos modèles MED et d'analyses statistiques propose une sélection d'éléments qui pourraient constituer des outils numériques efficaces pour étudier le problème de la prédiction du développement de motifs de ségrégation dans les haldes.

1. Introduction

Granular flows are often found in natural environments and industry as main mechanism for transport and deposit of geomaterials. Pouring grains onto heaps produces, for instance, segregation and stratification which could affect activities such as building stockpiles of crushed mined ore and dumping in mining waste rock piles.

Segregation and stratification are responsible for a distribution of particles in distinctive assemblies driven by differences of physical properties among granular samples. Segregation has been examined highlighting the role of percolation and buoyancy as the main mechanisms of splitting by grain properties [83, 84]. Such grain kinematics have been observed in existing granular dumps [3] and studied with experiments and mathematical modeling on repeated occasions [4, 96]. Stratification, on the other hand, is less understood. Makse et al. experimentally triggered stratification by dropping a bi-dispersed mixture composed of small glass beads and larger angular sand grains in a narrow container [8, 109, 125]. By pouring particles onto a pile, they displayed a pattern with alternating layers of glass beads and sand parallel to the free surface of the heap. The key parameter for stratification was therefore attributed to the difference of repose angles between the two particles species, leading to a competition between size and shape induced segregation. The resulting unsteady state is responsible for the creation of repeated surface avalanches building the pile upwards, a motion known as "kink". Gray et al. [95, 108] verified that these avalanches act as a kinetic sieve which enforce grain rolling over the pile. In the meantime, Baxter et al. [9] drew stratification patterns from pouring binary-sized and similar shaped mixtures onto a heap, asserting that differences between repose angles or shape profiles could not be necessary to trigger the phenomenon but

were only affecting the range of fill rates inducing stratification display. More recently, Benito et al. provided evidence that stratification could be drawn from pouring binary sized mixtures only made of spherical particles, supporting the previous assertions [119, 120]. Their findings were obtained following a study on the influence of experimental parameters including size ratio, mass flux and dropping height. In particular, they found out that stratification, for such a mono-shape grain case, needs larger size ratios between the two families of particles, lower feeding rates, and a smaller cell width. Such results have been lately replicated by Zhang et al. in 3D discrete-element simulations exposing particle stratification for analogous pouring conditions [135].

In this paper, we perform 2D and 3D DEM simulations pouring binary samples of size-dispersed disks or spheres to build granular deposits. We intend to reproduce particle segregation and stratification after the pouring of mixtures involving no shape dispersity. Our numerical experiments allow us to vary and control deposition settings in attempt to display the same splitting effects as observed in the literature. We detail the numerical procedures in **Sec. 2**. The results are discussed in **Sec. 3**, including qualitative observations and quantitative assessments. We end this study with a series of conclusions and perspectives.

2. Numerical procedures

We created a DEM model based on a set of experiments that intended to display stratification from granular material pouring [8, 95, 108–110, 119, 121, 125]. Our testing device is a quasi two-dimensional cell with a fixed grain feeding system (see **fig. C.1**) allowing one to control the injection height and the flow rate of the deposition. Our modelling was possible with the use of the software LMG90, developed in the University of Montpellier, which allows one to create various deformable or non deformable objects and solve the dynamics of mechanical systems by means of the contact dynamics (CD) method [190]. The CD approach [176, 184, 189] is a nonsmooth implicit numerical method in which the equations of motions are integrated for multi-contact systems with unilateral contacts and friction.

We perform the pouring of circular grains in 2D and spheres in 3D simulations using binary size distributions. The large grains have a $3mm$ diameter while the small have a $1mm$ diameter. Particles size ratio is thus set to 3:1 according to ideal stratification cases involving no shape dispersity in granular mixtures, described by Benito et al. and Zhang et al. [119, 135] or reviewed by Fan et al. [17]. Mass fill rates and free fall heights are also chosen to fit the parameters used in these previous works for discrete avalanche initiation under a slow feeding process. Each simulation is performed for a given mass index, defined as the ratio of the total mass of coarse particles over the total mass of small ones, which describes the mixture's proportion. The testing cell is reproduced with frictionless sidewalls and a rough base to prevent

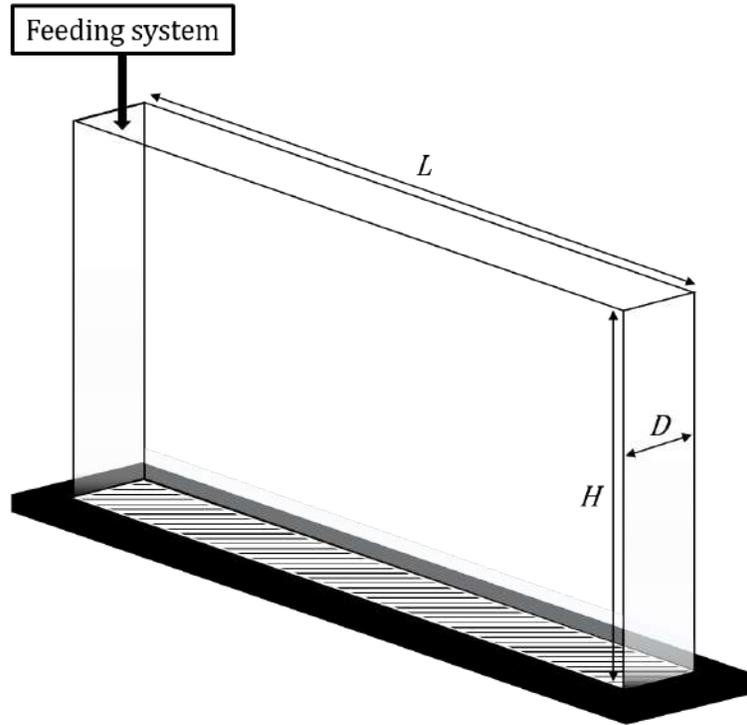


FIGURE C.1 Testing cell representation.

grains' excessive rolling. In 3D simulations, the width of the cell was varied between $D = 3\text{mm}$ or 10mm . We drop the grains next to a narrow face of the cell so the heap builds up being supported by the sidewalls and the rough base. We pour up to 60,000 particles at the final step of the deposition. Cell's dimensions, physical properties and pouring settings are summarized in **table C.1**.

TABLEAU C.1 Simulations core parameters.

Model's parameters	Value
Cell's length, L (mm)	500
Cell's height, H (mm)	500
Cell's width, D (mm)	3 or 10
Particles size ratio, s_r	3:1, $s_r = 1/3$
Samples mass ratio, m_{LS}	0.5 or 1
Particles density (kg/m^3)	2,700
Mass feeding rate, f (g/s)	0.1 to 0.6
Injection height, h (mm)	10 to 50

3. Results and discussions

In order to give a quantitative assessment of segregation in heaps, we introduce a mixing

index m_I which adapts to 2D and 3D geometries. The index express segregation intensity in terms of coarse particles proportion in a given pile region. We define m_I as :

$$m_I = \frac{n_L}{n_s \cdot s_r^a + n_L} = \frac{m_{LS,div}}{m_{LS,div} + 1}; \begin{cases} a = 2 \text{ for 2D models} \\ a = 3 \text{ for 3D models} \end{cases} \quad (\text{C.1})$$

where n_L and n_s are the number of large particles and small particles, respectively, in a heap division, s_r^a is the volume ratio factor between small and coarse particles, and $m_{LS,div}$ is the mass ratio observed in a heap division.

Figures C.3 and C.5 summarize m_I computations. For each pouring scenario, we divide the resulting pile in ten vertical stripes, perpendicular to the horizontal axis, of equal surface or volume. The mixing index is then computed for each one of these divisions to measure the distribution of particles sizes along the heap's length. The index m_I turns out to be convenient as it allows one to compare mixing quality from piles differing in dimensions. The value taken by the index in each heap division may vary between 0 and 1, from a fully segregated region containing only small particles to one with only large grains.

3.1 Segregation

Heap's representations (see **figs. C.2 and C.4**) successfully display segregated patterns both in 2D and 3D simulations. Each pouring scenario seems to distribute larger particles at the bottom of the sample due to avalanche development on the free surface of the pile. The avalanches initiate a void-filling mechanism which makes small particles sink while large ones reach the upper layer of the flow. On top of the flow, coarse particles experience a greater velocity leading them to gather at the flow front as systematically observed in Refs. [95,96]. Large particles' motion ends when the flow comes to rest on the outer parts of the granular pile while small grains early segregate inside the pile.

Those observations are additionally verified by the mixing index (see **figs. C.3 and C.5**) which consistently shows a segregation trend across the granular piles : small particles are more likely to be found near the deposition point and coarse ones segregated at the tail of the heap. These observations are in agreement with the experimental studies of Benito et al. [119] and simulations of Zhang et al. [135]. Flow segregation patterns occur for injection heights varying between 10mm and 50mm, flow rates between 0.1 and 0.6g/s, and $m_{LS} = \{0.5, 1\}$. According to both 2D and 3D simulations, the evolution of m_I along the heap is not sensitive to changes of the flow rate neither the injection height, but is dependent on the initial m_{LS} .

3.2 Stratification

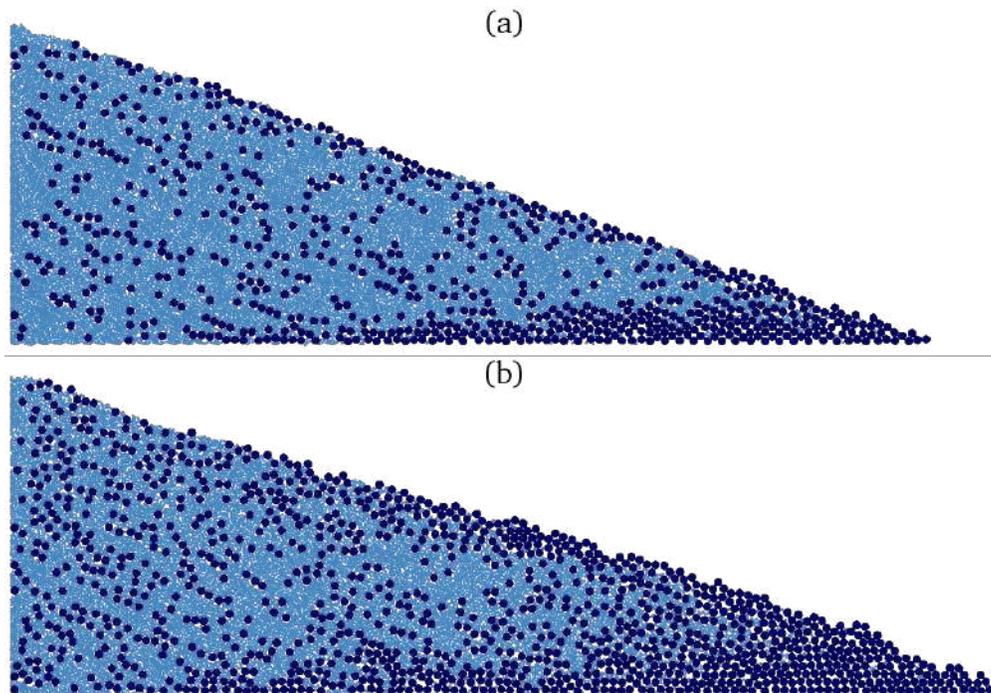


FIGURE C.2 Heaps patterns as results of 2D simulations; (a) mass ratio $m_{LS} = 0.5$, size ratio is 3:1, $f = 0.1g/s$ and $h = 10mm$; (b) mass ratio $m_{LS} = 1$, size ratio is 3:1, $f = 0.1g/s$ and $h = 10mm$.

Figure C.2 presents two examples showing a blurred intern distribution of grains obtained after the pouring process. The 2D model proved itself incapable of building a granular pile stable enough to constitute a static bed of particles on which the next layer forms. We observe large consecutive avalanches damaging the structures created by kinetic sieving. Therefore, an alternating layering of particles is not likely to occur. The repetition of this destructive mechanism then causes a broad mixing of the existing heap.

Conversely, the 3D model proves to be a better configuration to investigate stratification. The third dimension added to the testing cell helps the simulation to build a bounded heap more resilient to free surface flows development. By pouring spherical particles in a narrow container, they profit from an increased number of contacts and finite size effect which enhance their connectivity. A static bed of grains then progressively takes shape and surface flows are able to act as repeated kinetic sieves. The void-filling mechanism which has been found responsible for stratification is thus triggered. Results presented in **fig. C.4** expose granular distributions with alternating strata of large and small particles coupled to strong concentrations of coarse segregated grains at heaps' tail. **Figure C.4.c** proves that such layers appear throughout the cell's width instead of a simple pattern being displayed on the

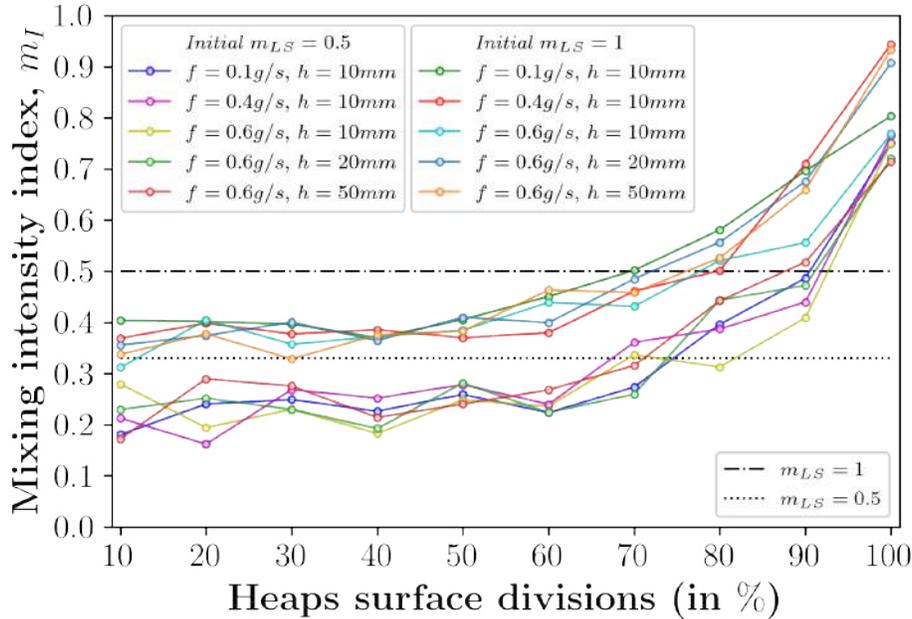


FIGURE C.3 Mixing state computation across 2D granular deposits, heaps are divided in ten vertical stripes of same surface along its length. m_I gradations corresponding to mixtures initial m_{LS} are indicated as horizontal thresholds.

walls. These patterns are similar to Zhang's et al. simulations [135] but for a broader set of deposition parameters such as those investigated by Benito et al. [119]. Yet, it remains complex to assess any stratification degree as the layers do not present similar thickness or regular separation. The fact that a close control over deposition parameters seems necessary to produce such results demonstrates non shape-dispersed mixtures stratification might only be triggered in a narrow window of pouring scenarios. Since 3D models successfully reproduce stratification mechanisms and expose layering trends, we consider that clearer stratification patterns would be observed by pouring more particles to build granular piles of bigger scales. However, DEM simulations' consumption of time and resources could limit the capabilities of modeling larger collections.

4. Conclusions

A numerical study aiming to display segregation and stratification patterns from pouring size-dispersed granular mixtures of uniformly shaped grains onto heaps has been presented. We carried out DEM simulations in the framework of the contacts dynamics approach to create 2D and 3D grain piles while varying deposition parameters.

Segregation and stratification have been described qualitatively. Segregation has also been quantitatively assessed with the definition of a mixing index expressing coarse particles vo-

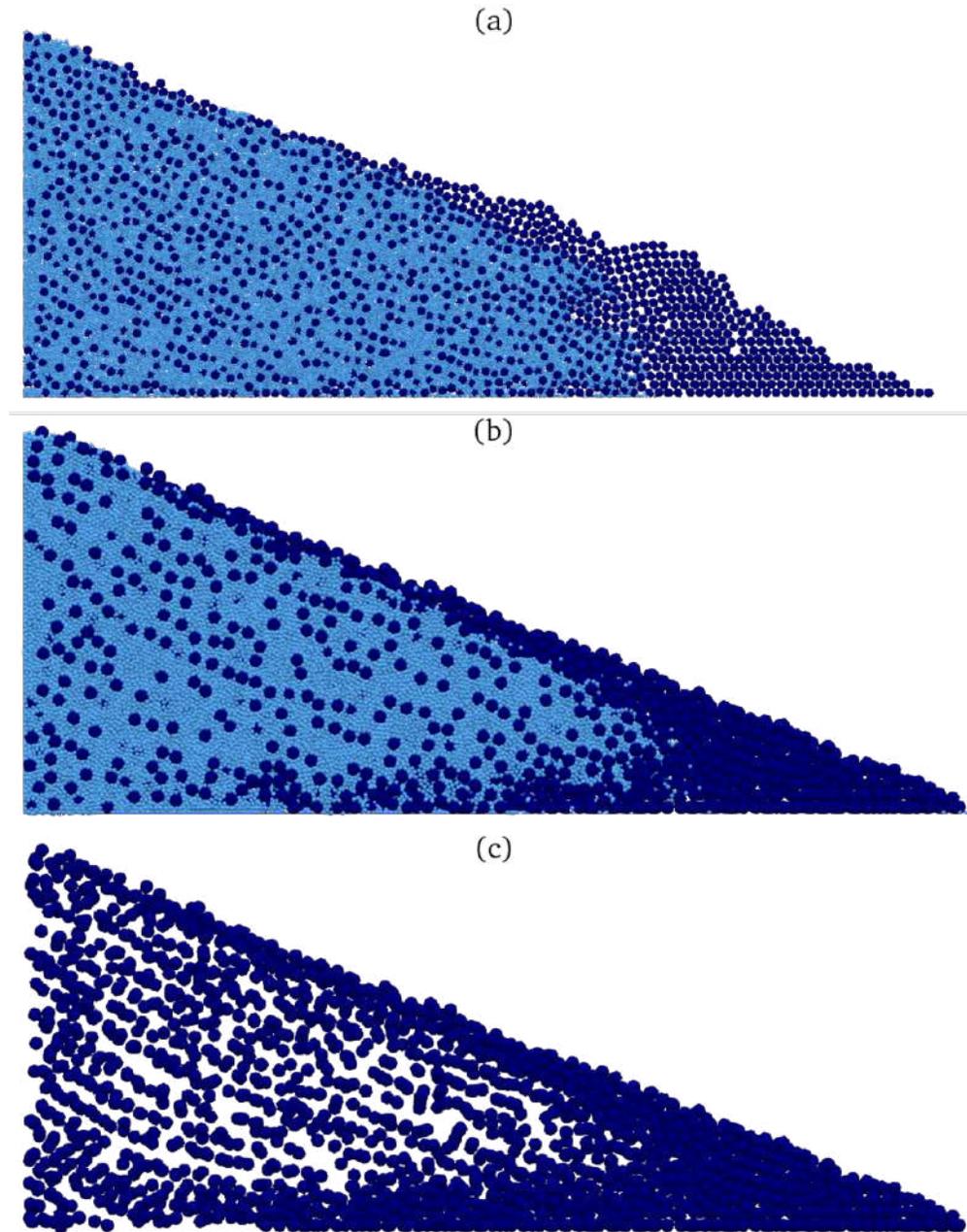


FIGURE C.4 Heaps patterns as results of 3D simulations ; (a) mass ratio $m_{LS} = 1$, size ratio is 3:1, $f = 0.6g/s$, $h = 50mm$ and $D = 3mm$, (b) mass ratio $m_{LS} = 1$, size ratio is 3:1, $f = 0.4g/s$, $h = 10mm$ and $D = 10mm$; then (c) presents (b) deposit with the smaller particles hidden.

lume proportion in various heaps' regions. Both 2D and 3D simulations successfully displayed segregation for every deposition setting, but only 3D simulations demonstrated granular patterns which can be related to stratification. By pouring spherical particles, stratification mechanisms have been observed acting to build layered patterns. Our results support recent

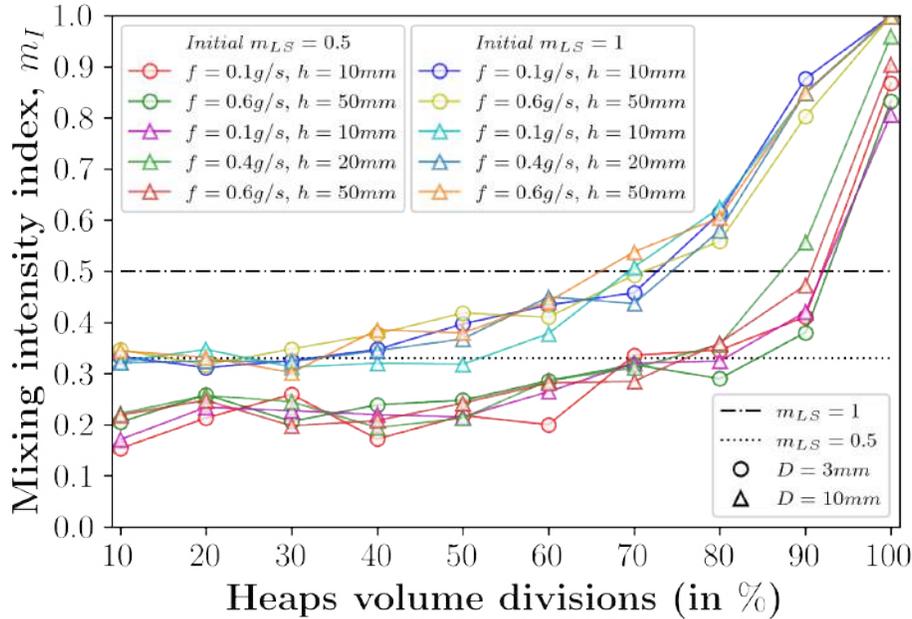


FIGURE C.5 Mixing state computation across 3D granular deposits, heaps are divided in ten vertical stripes of same volume along its length. m_I gradations corresponding to mixtures initial m_{LS} are indicated as horizontal thresholds.

upstream experimental and numerical studies showing mono-shaped samples stratification in narrow testing cells. Close control over pouring parameters appeared though necessary to trigger only size-dispersed samples stratification, which should make reconsider its so-called “spontaneity”. Still, mechanisms of free surface segregation have been successfully observed with the lateral growth of the heaps.

As perspective of this work, similar numerical studies involving shape-dispersed mixtures are essential to assess whether shape dispersity might remain a catalytic condition to stratification display in such pouring conditions. In order to validate such models, the investigation of heap flow kinematics is also required.

5. Acknowledgements

This research work benefited from the financial support of the Natural Sciences and Engineering Research Council of Canada (NSERC) [Ref. RGPIN-2019-06118], the Fonds de recherche du Québec - Nature et technologies (FRQNT) [Ref. 2020-MN-281267] and the industrial partners of the Research Institute on Mines and the Environment (RIME) UQAT-Polytechnique (irme.ca/en)³.

3. <https://irme.ca/en/>, lien en clair pour les versions imprimées.

References

- [9] J. Baxter, U. Tüzün, D. Heyes, I. Hayati, P. Fredlund, *Nature* **391**, 136 (1998)
- [119] J.G. Benito, I. Ippolito, A.M. Vidales, *Powder. Technol.* **234**, 123-131 (2013)
- [120] J.G. Benito, R.O. Unac, A.M. Vidales, I. Ippolito, *Physica A* **396**, 19-28 (2014)
- [83] R.L. Brown, *J. I. Fuel* **13**, 15-19 (1939)
- [189] F. Dubois, V. Acary, M. Jean, *CR Mecanique* **346**, 247-262 (2018)
- [17] Y. Fan, K.V. Jacob, B. Freireich, R.M. Lueptow, *Powder. Technol.* **312**, 67-68 (2018)
- [110] Y. Grasselli, H.J. Herrmann, *Granul. Matter* **1**, 43-47 (1998)
- [95] J.M.N.T. Gray, C. Ancey, *J. Fluid Mech.* **629**, 387-423 (1009)
- [108] J.M.N.T. Gray, K. Hutter, *Continuum Mech. Therm.* **9**, 341-345 (1997)
- [176] M. Jean, *Comput. Method Appl. M.* **177**, 235-257 (1999)
- [121] J.P. Koeppe, M. Enz, J. Kakalios, *Phys. Rev. E* **58**, 4104-4107 (1998)
- [8] H.A. Makse, S. Havlin, P.R. King, H.E. Stanley, *Nature* **386**, 379-382 (1997)
- [125] H.A. Makse, P. Cizeau, H.E. Stanley, *Phys. Rev. Lett.* **78**, 3298-3301 (1997)
- [109] H.A. Makse, *Phys. Rev. E* **56**, 7008-7016 (1997)
- [3] R.S. Nichols, *Rock segregation in waste dumps*, in Proceedings of the International Symposium on Flow-through Rock Drains, 8-11 September 1986, Cranbrook, Canada (1986)

[96] O. Pouliquen, J. Delour, S.B. Savage, *Nature* **386**, 816-817 (1997)

[184] F. Radjai, V. Richefeu, *Mech. Mater.* **41**, 715-728 (1009)

[191] M. Renouf, P. Alart, *Comput. Method. Appl. M.* **194**, 2019-2041 (1005)

[4] S.B. Savage, C.K.K. Lun, *J. Fluid Mech.* **189**, 311-335 (1988)

[84] J.C. Williams, *Powder. Technol.* **15**, 245-251 (1976)

[135] D. Zhang, Z. Zhou, D. Pinson, *DEM simulation of particle stratification and segregation in stockpile formation*, in Proceedings of the conference Powders and Grains, 3-7 July 2017, Montpellier, France (2017)

ANNEXE D POWDERS & GRAINS 2021 - POSTER



DEM modeling of segregation and stratification in pouring heaps of bidispersed mixtures of rounded particles



Tristan VUILLOZ^{1,2,*}, David CANTOR^{1,2}, Carlos OVALLE^{1,2}

¹ Department of Civil, Geological and Mining Engineering, Polytechnique Montréal, Québec, Canada
² Research Institute of Mining and Environment, RIME UQAT-Polytechnique, Montréal, Québec, Canada

CONTEXT

Granular flows are often found in natural environments and industry as main mechanism for transport and deposit of geomaterials. Pouring grains onto heaps produces, for instance, segregation and stratification which could affect activities such as building stockpiles of crushed mined ore and dumping in mining waste rock. The development of such phenomena in granular deposits may result in heterogeneous internal structures causing potential damage to the physical and chemical stability of those constructions. The prediction of segregation or stratification occurrence and the measure of their intensity have then become of great interest; the breakthrough of numerical processes in research might help to answer these challenges.

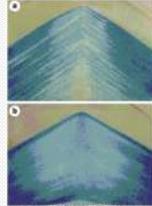


Figure 1. A. Screenshot from 3D simulation in view feeding process. B. Underneath heap formed in the feeding process.

[1] J. Baxter, U. Tüzün, D. Heyes, I. Hayati, P. Fredlund, Nature **391**, 136 (1998)

OBJECTIVES

This work is aimed at studying to what extent deposition processes and specific granular composition, here bidisperse in terms of sizes, could influence the development of segregation and stratification phenomena in bounded pouring heaps.

The main objective was to develop a numerical model to simulate the deposition of granular samples by means of a discrete element method (DEM). Both 2D and 3D models were designed to build deposits of disks and spheres, respectively.

We varied simulations scenarios to explore the effects of the following deposition settings:

- Samples mass ratio, m_{LS}
- Mass feeding rate, f
- Injection height, h

NUMERICAL MODEL AND DEM SIMULATIONS

Cell's dimensions, physical properties and pouring settings are summarized in **Table 1**.

I. BIDISPERSE SAMPLE GENERATION

- We perform the pouring of circular grains in 2D and spheres in 3D simulations using binary size distributions.
- The large grains have a 3 mm diameter while the small have a 1 mm diameter. Particle's size ratio is set to 3:1.
- Particles species of a given nominal size have a uniformly size polydispersity defined with a particle size span $S = 0.2$ to prevent any ordering.

$$S = \frac{d_{max} - d_{min}}{d_{max} + d_{min}}$$
 (in terms of maximum and minimum diameter, respectively d_{max} and d_{min})
- Each simulation is performed for a given mass index, defined as the ratio of the total mass of coarse particles over the total mass of small ones, which describes the mixture's proportion.
- We consider only dry frictional interactions between the particles.

II. BUILDING GRANULAR DEPOSITS

Our testing device is a quasi two-dimensional cell with a fixed grain feeding system (see **Figure 1**) allowing one to control the injection height and the flow rate of the deposition. The testing cell is reproduced with frictionless sidewalls and a rough base to prevent grains' excessive rolling. In 3D simulations, the width of the cell varied between $D = 3$ or 10 mm.

We drop the grains next to a narrow face of the cell so the heap builds up being supported by the sidewalls and the rough base. We pour up to 60,000 particles at the final step of the deposition.

Figure 1. Testing cell representation.

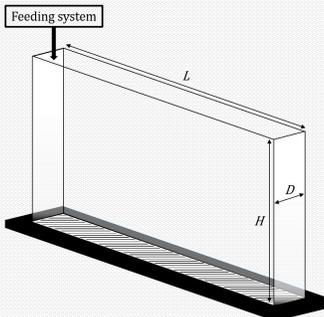


Table 1. Simulations core parameters.

Model's parameters	Value
Cell's length, L (mm)	500
Cell's height, H (mm)	500
Cell's width, D (mm)	3 or 10
Particles size ratio, s_r	3:1, $s_r = 1/3$
Samples mass ratio, m_{LS}	0.5 or 1
Particles density (kg/m^3)	2,700
Mass feeding rate, f (g/s)	0.1 to 0.6
Injection height, h (mm)	10 to 50

This research work benefited from the financial support of the Natural Sciences and Engineering Research Council of Canada (NSERC), the Fonds de recherche en géologie - Nature et technologies (FRQNT) and the industrial partners of the Research Institute on Mines and the Environment (IRME) UQAT-Polytechnique.



HEAP PATTERNS

Figures 2 and 4 present screenshots from our simulations in which small grains are colored in light blue and coarse particles are colored in a dark tone. Heap's representations (see **Figs. 2** or **4**) successfully display segregated patterns both in 2D and 3D simulations. Each pouring scenario seems to distribute larger particles at the bottom of the sample due to avalanche development on the free surface of the pile. The 3D model proves to be a better configuration to investigate stratification.

Figure 2. Heaps patterns as results of 2D simulations; (a) mass ratio $m_{LS} = 0.5$, size ratio is 3:1, $f = 0.1$ g/s and $h = 10$ mm; (b) mass ratio $m_{LS} = 1$, size ratio is 3:1, $f = 0.1$ g/s and $h = 10$ mm.

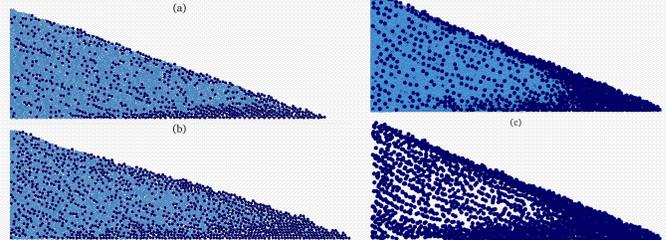


Figure 4. Heaps patterns as results of 3D simulations; (a) mass ratio $m_{LS} = 1$, size ratio is 3:1, $f = 0.6$ g/s, $h = 50$ mm and $D = 3$ mm, (b) mass ratio $m_{LS} = 1$, size ratio is 3:1, $f = 0.4$ g/s, $h = 10$ mm and $D = 10$ mm; then (c) presents (b) deposit with the smaller particles hidden.

MIXING INTENSITY ASSESSMENT

We introduce a mixing index m_i which adapts to 2D and 3D geometries. The index express segregation intensity in terms of coarse particles proportion in a given pile region.

We define m_i as:

$$m_i = \frac{n_L}{n_S \cdot s_r^a + n_L} = \frac{m_{LS} \cdot dtv}{m_{LS} \cdot dtv + 1}; \begin{cases} a = 2 \text{ for 2D models} \\ a = 3 \text{ for 3D models} \end{cases}$$

where n_L and n_S are the number of large particles and small particles, respectively, in a heap division, s_r^a is the volume ratio factor between small and coarse particles, and $m_{LS} \cdot dtv$ is the mass ratio observed in a heap division. For each pouring scenario, we divide the resulting pile in ten vertical stripes, perpendicular to the horizontal axis, of equal surface or volume.

$m_i = 0$ for a fully segregated division only containing small particles
 $m_i = 1$ for a fully segregated division only containing big particles

Figure 3. Mixing state computation across 2D granular deposits**.

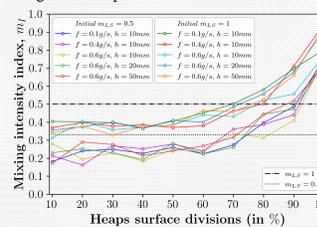
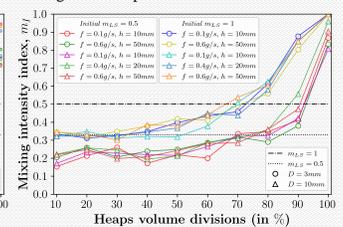


Figure 5. Mixing state computation across 3D granular deposits**.



** m_i gradations corresponding to mixtures initial m_{LS} are indicated as horizontal thresholds.

SUMMARY AND CONCLUSIONS

- Segregation and stratification have been described qualitatively.
- Segregation has also been quantitatively assessed with the definition of a mixing index expressing coarse particles volume proportion in various heaps' regions. Both 2D and 3D simulations successfully displayed segregation for every deposition setting.
- Only 3D simulations demonstrated granular patterns which can be related to stratification.
- By pouring spherical particles, stratification mechanisms have been observed acting to build layered patterns.

- > Similar numerical studies involving shape-dispersed mixtures are essential to assess whether shape dispersity might remain a catalytic condition to stratification display.
- > In order to validate such models, the investigation of heap flow kinematics is also required.

CONTACTS

*e-mail: tristan.vuilloz@polymtl.ca

For additional information about this project and research works led by the IRME UQAT-Polytechnique : irme.ca



ANNEXE E SIMULATIONS NUMÉRIQUES ADDITIONNELLES : PRÉPARATION D'ÉCHANTILLONS DE POLYÈDRES POUR ESSAIS DE CISAILLEMENT

L'annexe présente la préparation des échantillons de polyèdres (M.b) et (M.c) pour la réalisation d'essais de cisaillement précédemment envisagés afin d'évaluer l'influence de la disparité des formes des particules sur la cinématique de ségrégation dans les assemblages granulaires. Plusieurs prises de vues avant puis après compression des échantillons sont données ; un média vidéo de la procédure de simulation numérique engagée est également partagé dans chaque cas. (renvoi à **Sec. 5.1.3**)

- MÉLANGE (b)

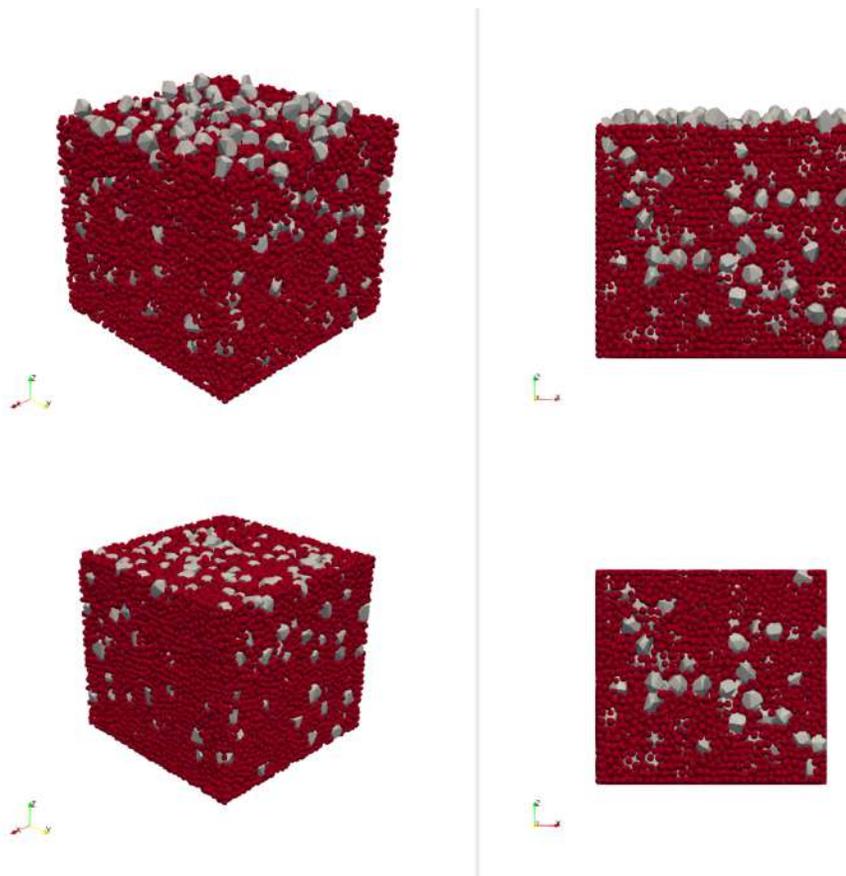


FIGURE E.1 Prises de vues - avant (haut) et après (bas) - de la réalisation d'un exercice numérique de compression d'un échantillon de polyèdres du type MÉLANGE (b) ; sans affichage des murs de confinement.

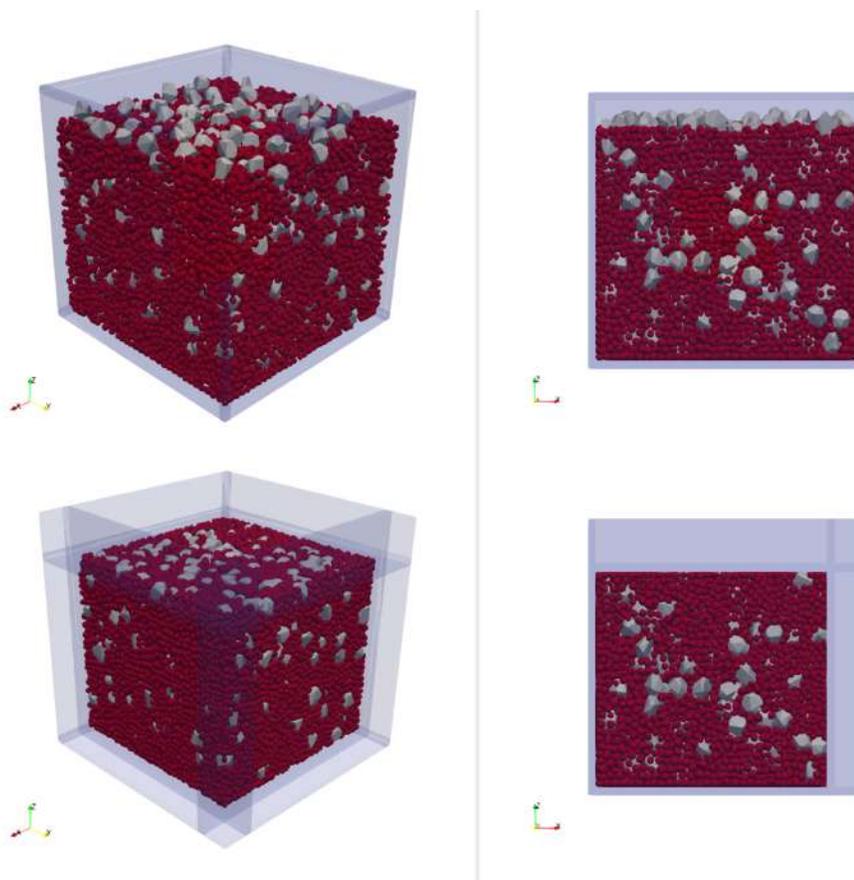


FIGURE E.2 Prises de vues - avant (haut) et après (bas) - de la réalisation d'un exercice numérique de compression d'un échantillon de polyèdres du type MÉLANGE (b) ; avec affichage des murs de confinement.

Un média vidéo de la préparation de l'échantillon est rendu disponible en suivant ce [lien](https://youtu.be/0rr2OA7cpaA)¹.

1. <https://youtu.be/0rr2OA7cpaA>, lien en clair pour les versions imprimées.

- MÉLANGE (c)

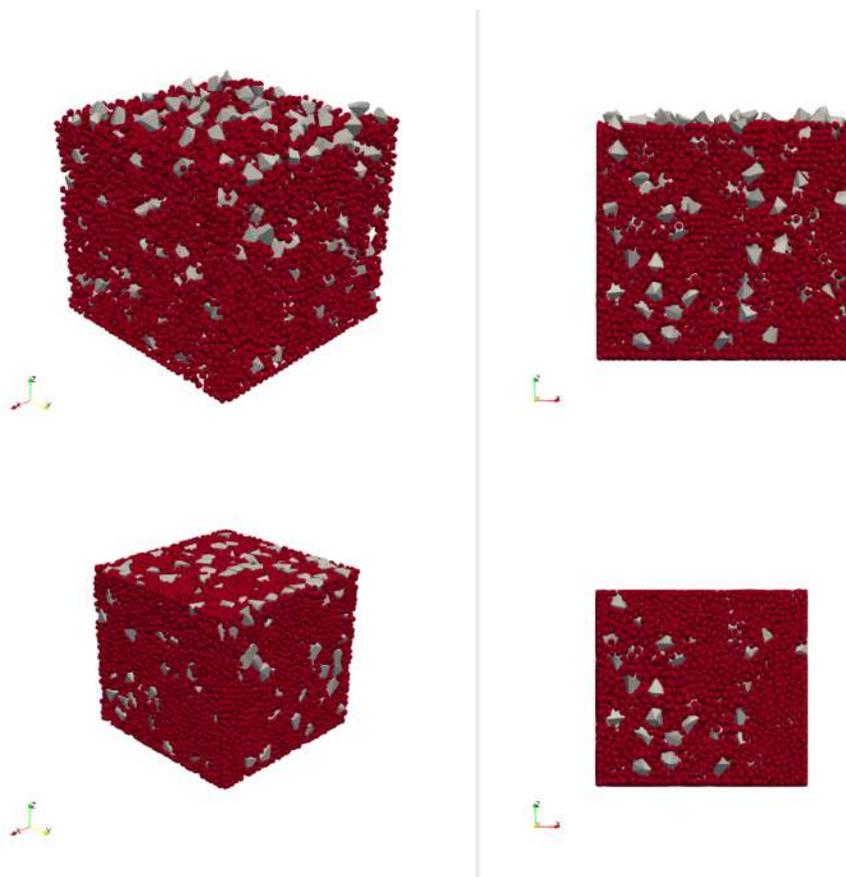


FIGURE E.3 Prises de vues - avant (haut) et après (bas) - de la réalisation d'un exercice numérique de compression d'un échantillon de polyèdres du type MÉLANGE (c) ; sans affichage des murs de confinement.

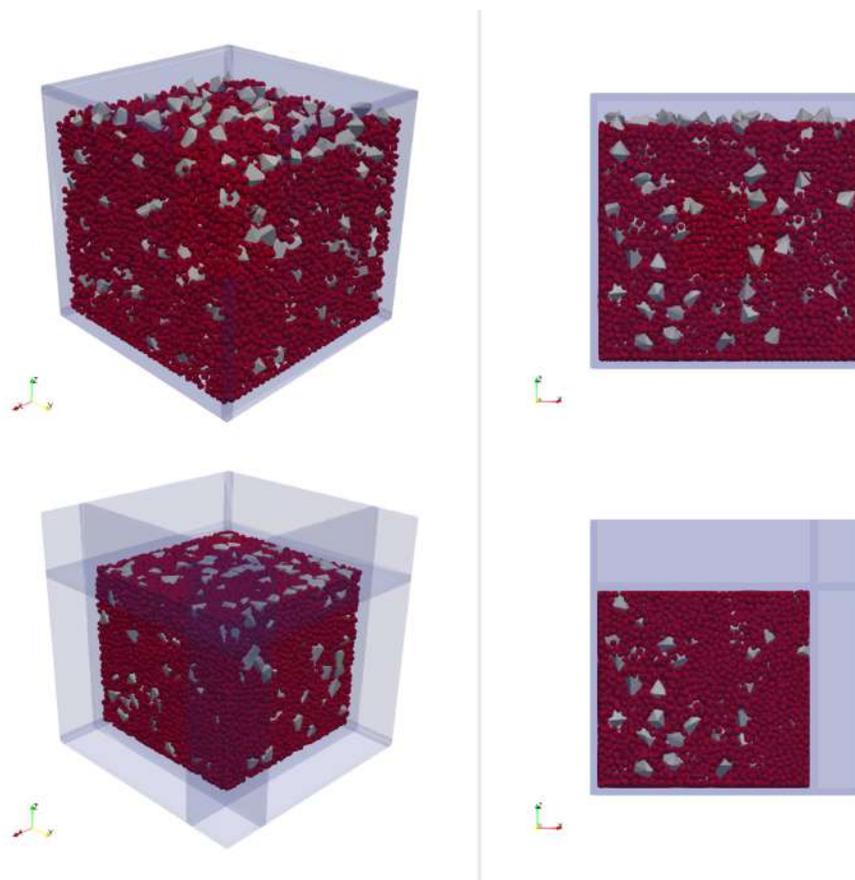


FIGURE E.4 Prises de vues - avant (haut) et après (bas) - de la réalisation d'un exercice numérique de compression d'un échantillon de polyèdres du type MÉLANGE (c) ; avec affichage des murs de confinement.

Un média vidéo de la préparation de l'échantillon est rendu disponible en suivant ce [lien](https://youtu.be/weOHSd71aHc)².

2. <https://youtu.be/weOHSd71aHc>, lien en clair pour les versions imprimées.

**ANNEXE F MESURES DE SÉGRÉGATION ET DE LOCALISATION DU
CISAILLEMENT POUR LES ESSAIS NUMÉRIQUES DE CISAILLEMENT
RÉALISÉS À $P = 10,000Pa$ ET POUR DES NOMBRES D'INERTIE TELS
QUE $I \leq 2.10^{-1}$, JUSQUE $\gamma = 5$**

L'annexe partage les études particulières de cinématique de ségrégation au cours des essais de cisaillement à $P = 10,000Pa$ et pour des nombres d'inertie tels que $I \leq 2.10^{-1}$, jusque $\gamma = 5$. (renvoi à **Sec. 5.4**)

- $I = 1.10^{-2}$, $P = 10,000Pa$, $\dot{\gamma} = 11s^{-1}$

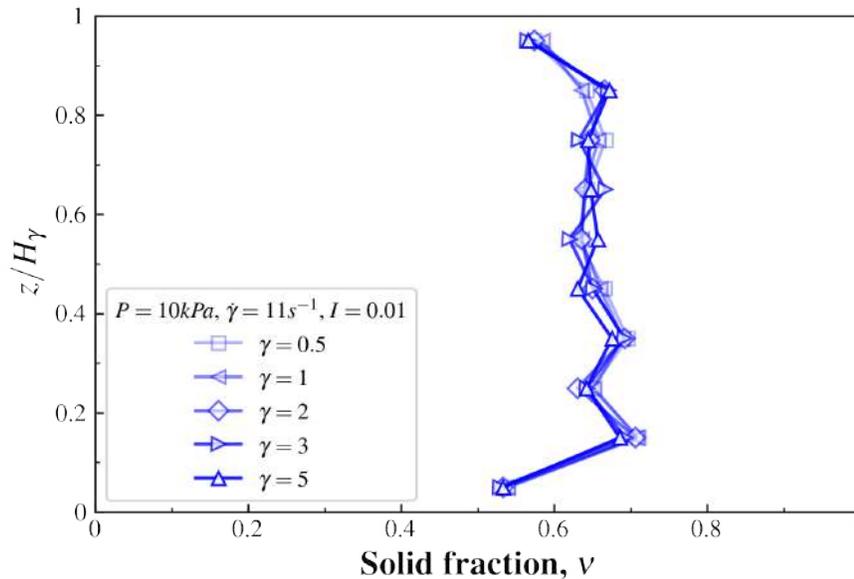


FIGURE F.1 Évolution de la fraction solide ν à $I = 1.10^{-2}$, $P = 10,000Pa$, $\dot{\gamma} = 11s^{-1}$, en fonction du taux de déformation γ selon la hauteur de l'échantillon z/H_γ .

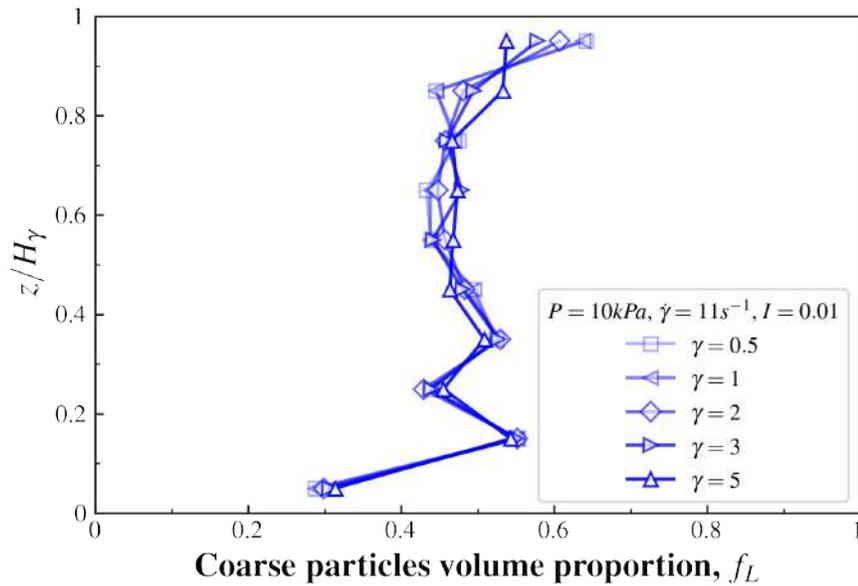


FIGURE F.2 Évolution de la proportion volumique en particules larges f_L à $I = 1.10^{-2}$, $P = 10,000Pa$, $\dot{\gamma} = 11s^{-1}$, en fonction du taux de déformation γ selon la hauteur de l'échantillon z/H_γ .

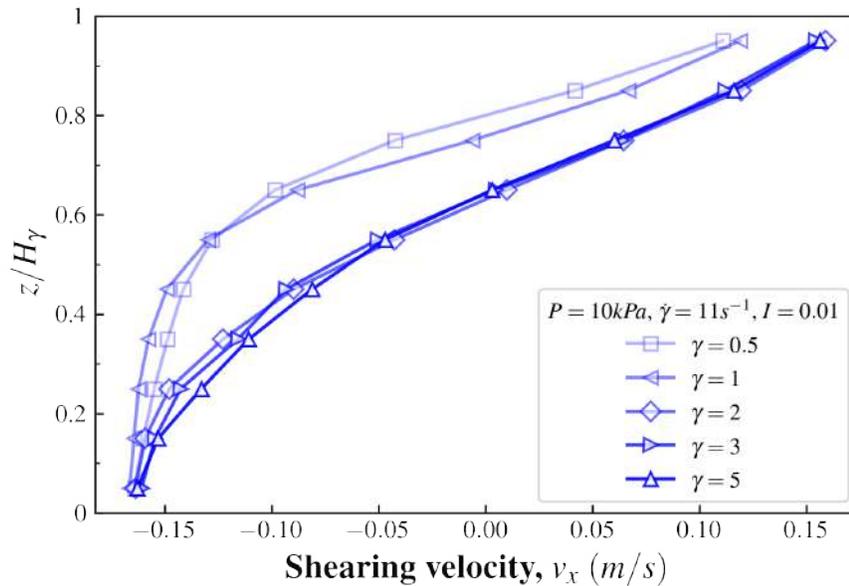


FIGURE F.3 Évolution de la vitesse de cisaillement v_x à $I = 1.10^{-2}$, $P = 10,000Pa$, $\dot{\gamma} = 11s^{-1}$, en fonction du taux de déformation γ selon la hauteur de l'échantillon z/H_γ .

- $I = 5.10^{-2}$, $P = 10,000Pa$, $\dot{\gamma} = 55s^{-1}$

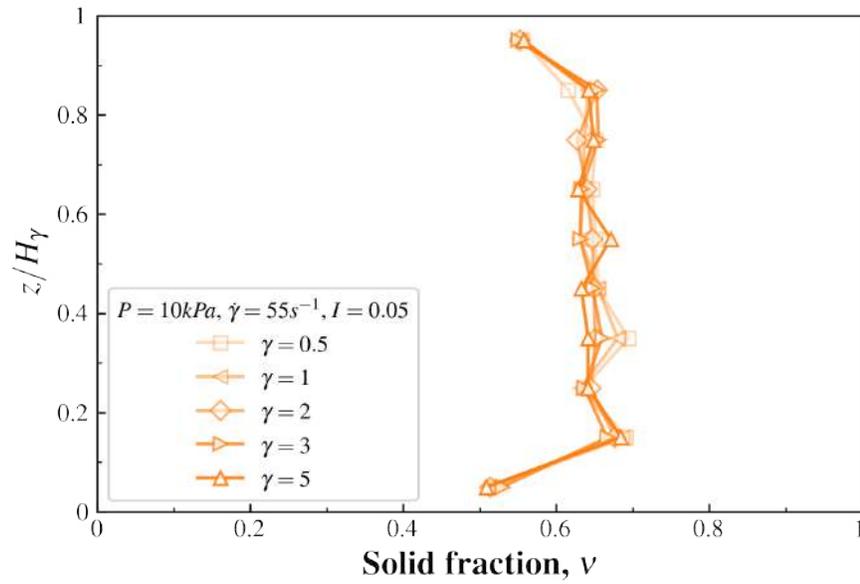


FIGURE F.4 Évolution de la fraction solide ν à $I = 5.10^{-2}$, $P = 10,000Pa$, $\dot{\gamma} = 55s^{-1}$, en fonction du taux de déformation γ selon la hauteur de l'échantillon z/H_γ .

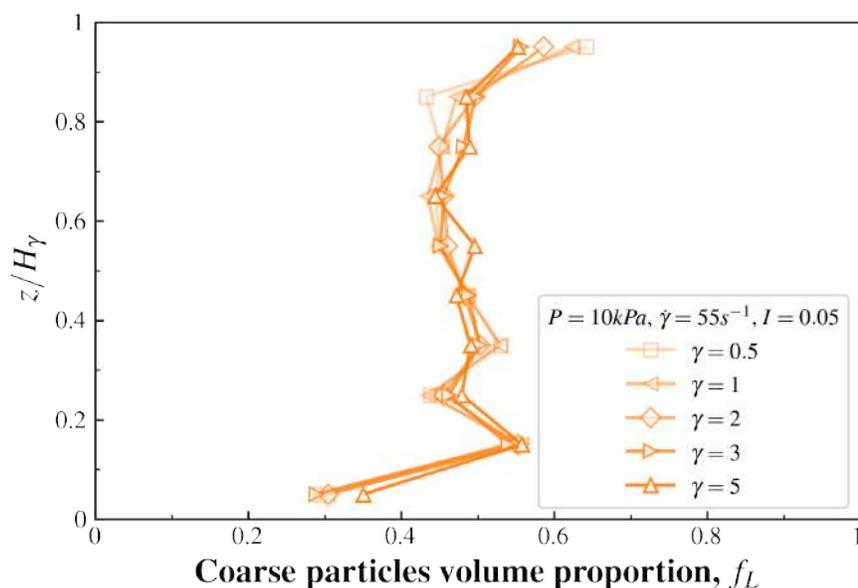


FIGURE F.5 Évolution de la proportion volumique en particules larges f_L à $I = 5.10^{-2}$, $P = 10,000Pa$, $\dot{\gamma} = 55s^{-1}$, en fonction du taux de déformation γ selon la hauteur de l'échantillon z/H_γ .

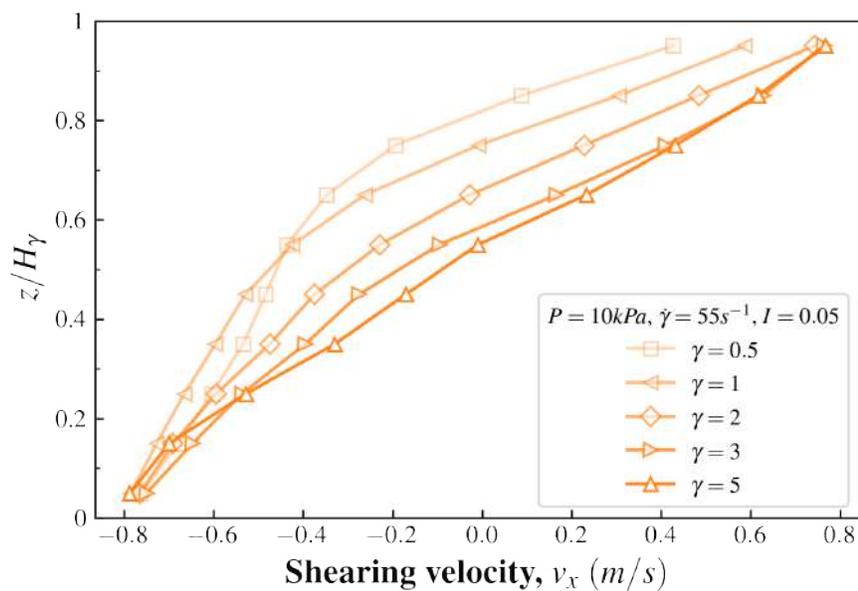


FIGURE F.6 Évolution de la vitesse de cisaillement v_x à $I = 5.10^{-2}$, $P = 10,000Pa$, $\dot{\gamma} = 55s^{-1}$, en fonction du taux de déformation γ selon la hauteur de l'échantillon z/H_γ .

- $I = 1.10^{-1}$, $P = 10,000Pa$, $\dot{\gamma} = 111s^{-1}$

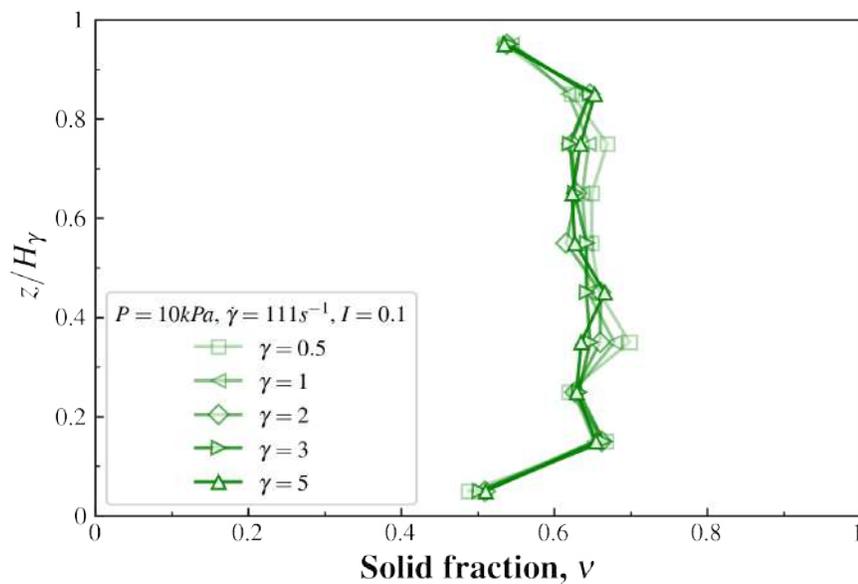


FIGURE F.7 Évolution de la fraction solide ν à $I = 1.10^{-1}$, $P = 10,000Pa$, $\dot{\gamma} = 111s^{-1}$, en fonction du taux de déformation γ selon la hauteur de l'échantillon z/H_γ .

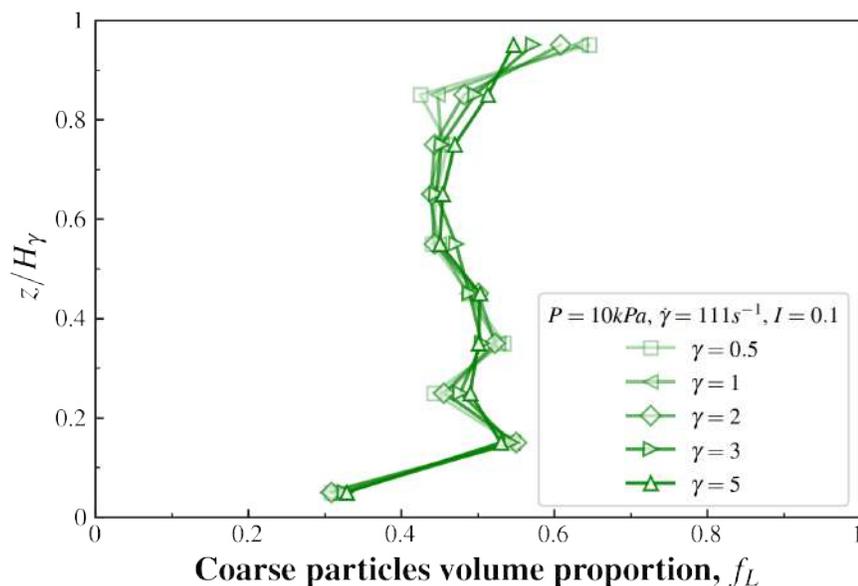


FIGURE F.8 Évolution de la proportion volumique en particules larges f_L à $I = 1.10^{-1}$, $P = 10,000Pa$, $\dot{\gamma} = 111s^{-1}$, en fonction du taux de déformation γ selon la hauteur de l'échantillon z/H_γ .

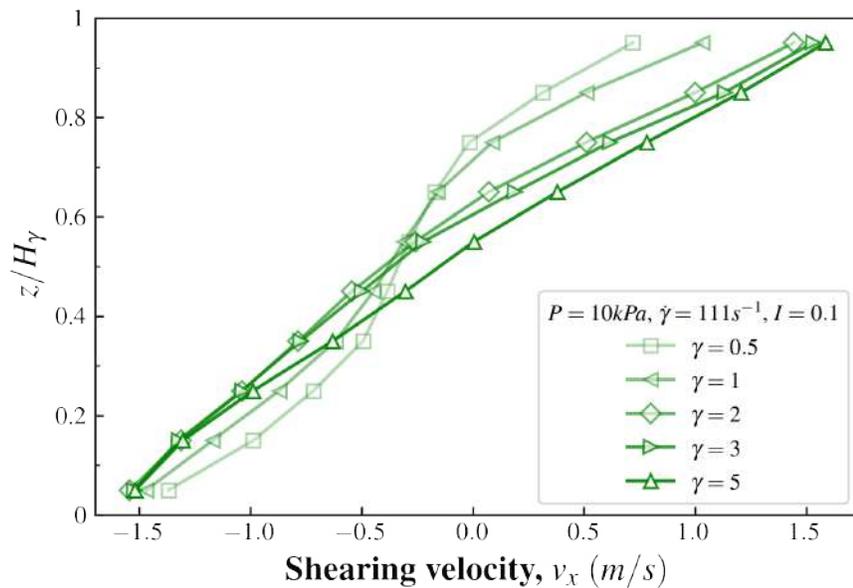


FIGURE F.9 Évolution de la vitesse de cisaillement v_x à $I = 1.10^{-1}$, $P = 10,000Pa$, $\dot{\gamma} = 111s^{-1}$, en fonction du taux de déformation γ selon la hauteur de l'échantillon z/H_γ .

- $I = 15 \cdot 10^{-2}$, $P = 10,000 Pa$, $\dot{\gamma} = 167 s^{-1}$

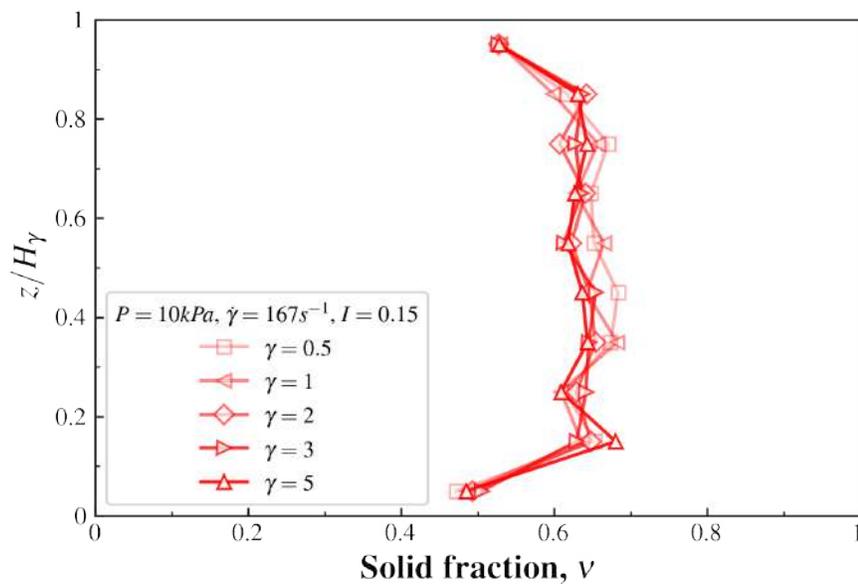


FIGURE F.10 Évolution de la fraction solide ν à $I = 15 \cdot 10^{-2}$, $P = 10,000 Pa$, $\dot{\gamma} = 167 s^{-1}$, en fonction du taux de déformation γ selon la hauteur de l'échantillon z/H_γ .

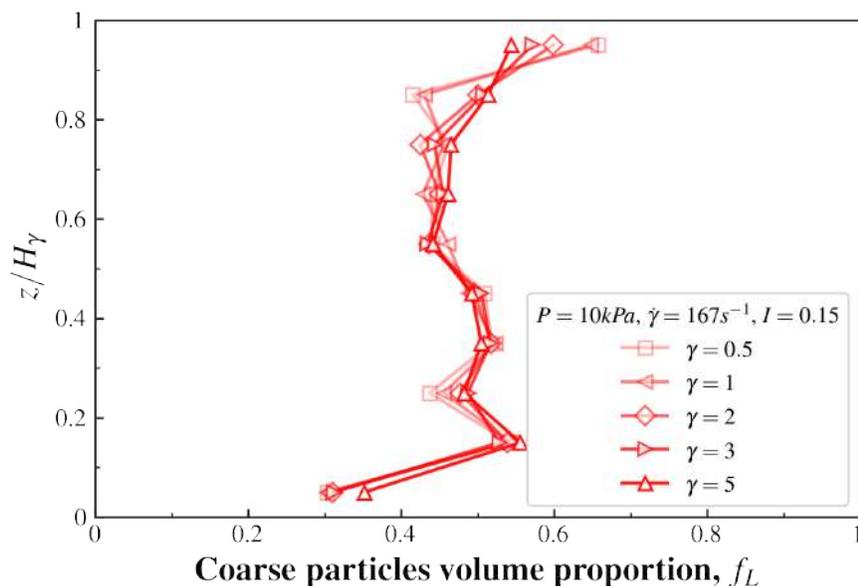


FIGURE F.11 Évolution de la proportion volumique en particules larges f_L à $I = 15 \cdot 10^{-2}$, $P = 10,000Pa$, $\dot{\gamma} = 167s^{-1}$, en fonction du taux de déformation γ selon la hauteur de l'échantillon z/H_γ .

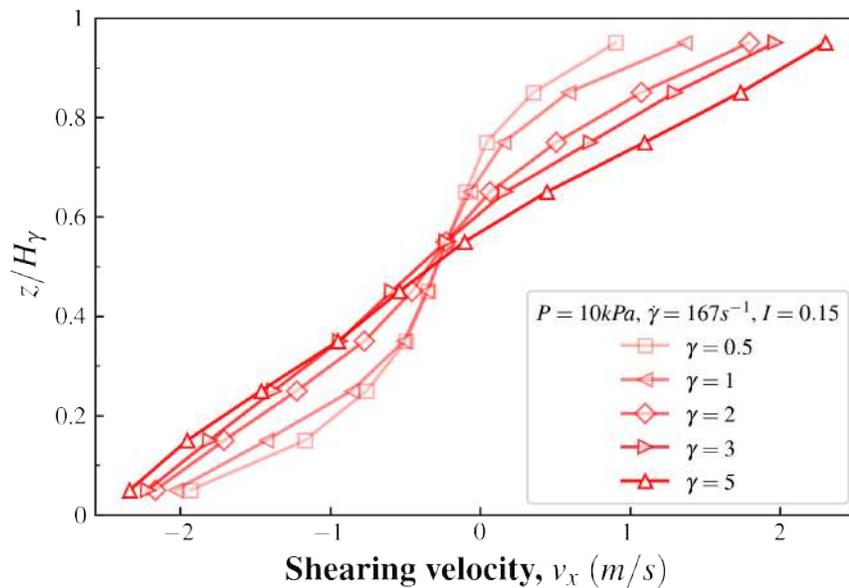


FIGURE F.12 Évolution de la vitesse de cisaillement v_x à $I = 15 \cdot 10^{-2}$, $P = 10,000Pa$, $\dot{\gamma} = 167s^{-1}$, en fonction du taux de déformation γ selon la hauteur de l'échantillon z/H_γ .

- $I = 2.10^{-1}$, $P = 10,000Pa$, $\dot{\gamma} = 220s^{-1}$

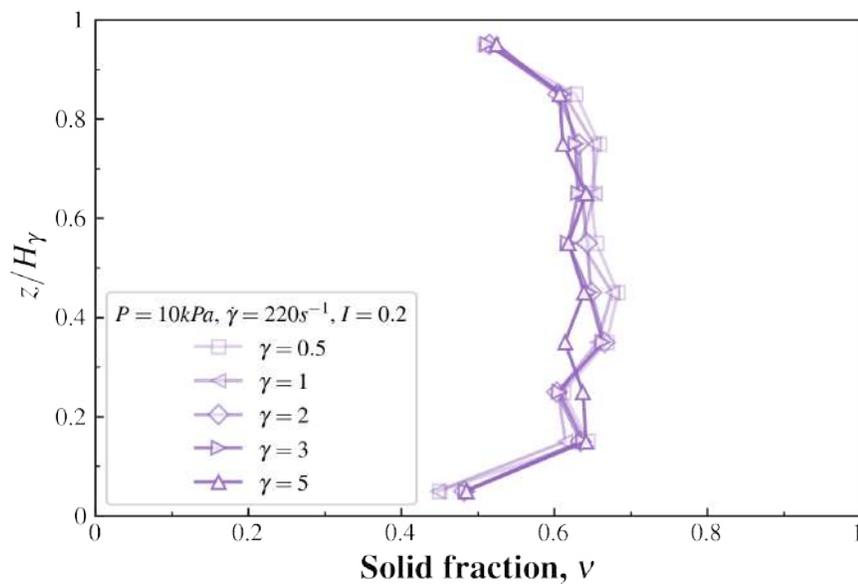


FIGURE F.13 Évolution de la fraction solide ν à $I = 2.10^{-1}$, $P = 10,000Pa$, $\dot{\gamma} = 220s^{-1}$, en fonction du taux de déformation γ selon la hauteur de l'échantillon z/H_γ .

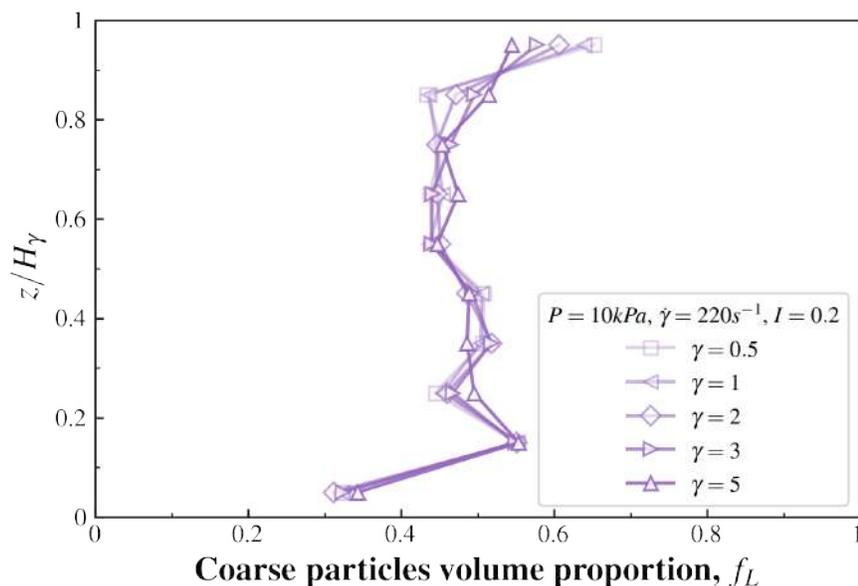


FIGURE F.14 Évolution de la proportion volumique en particules larges f_L à $I = 2 \cdot 10^{-1}$, $P = 10,000Pa$, $\dot{\gamma} = 220s^{-1}$, en fonction du taux de déformation γ selon la hauteur de l'échantillon z/H_γ .

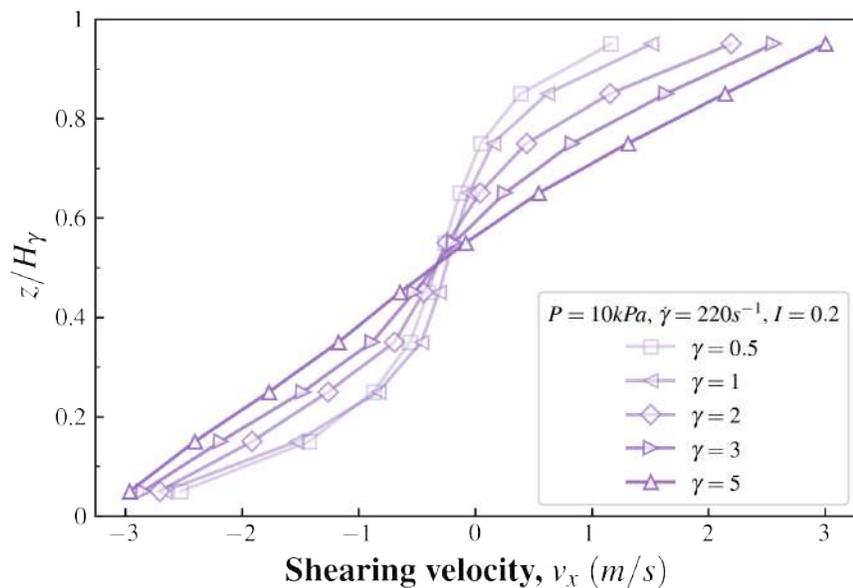


FIGURE F.15 Évolution de la vitesse de cisaillement v_x à $I = 2 \cdot 10^{-1}$, $P = 10,000Pa$, $\dot{\gamma} = 220s^{-1}$, en fonction du taux de déformation γ selon la hauteur de l'échantillon z/H_γ .