

Année 2015

N° d'ordre

--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

UNIVERSITE D'ARTOIS & ECOLE NATIONALE SUPERIEURE DES MINES
DOUAI

THESE

Pour obtenir le grade de

DOCTEUR

Spécialité : Sciences pour l'ingénieur

Option : Génie Civil

Présentée et soutenue publiquement par

Khadija EL CHEIKH

DOCTORAT DELIVRE CONJOINTEMENT PAR L'UNIVERSITE D'ARTOIS ET L'ECOLE
NATIONALE SUPERIEURE DES MINES DOUAI

**Étude de l'interface milieu granulaire – paroi rugueuse par approches
expérimentale et numérique – Application aux bétons**

Soutenue le 24 Mars 2015 devant la commission d'examen composée de :

Rapporteurs :	M. Patrice COOREVITS M. Michel MOURET	Professeur des universités, Université de Picardie Jules-Verne Maître de Conférences-HDR, Université Paul Sabatier, Toulouse
Examineurs :	M. Karim AÏT-MOKHTAR M. Yannick MELINGE	Professeur des universités, Université de la Rochelle Professeur des universités, Université de Cergy-Pontoise
Directrice de thèse :	Mme Chafika DJELAL-DANTEC	Professeur des universités, LGCgE, Université d'Artois
Co-directeurs de thèse :	M. Yannick VANHOVE M. Sébastien REMOND	Professeur des universités, LGCgE, Université d'Artois Professeur, LGCgE, Ecole des Mines de Douai
Co-encadrant :	M. Patrick PIZETTE	Maître assistant, LGCgE, Ecole des Mines de Douai

Laboratoire d'accueil : Génie Civil et géo-Environnement
Ecole Doctorale Sciences Pour l'Ingénieur (EDSPI 072)

*« **La réussite** est l'accumulation
d'échecs, d'erreurs, de faux
départs, de confusions, et **la**
volonté de continuer malgré tout »*

NICK GLEASON

Avant- propos

Cette étude a été réalisée au laboratoire de Génie Civil et géo-Environnement (LGCgE), à l'Université d'Artois de Béthune et à l'Ecole des Mines de Douai. Je tiens à remercier ici tous ceux qui ont contribué au succès de ce travail.

Je remercie Monsieur Karim AÏT-MOKHTAR, Professeur des universités à l'Université de la Rochelle, pour l'honneur qu'il m'a fait en étant président du jury.

Je souhaiterais remercier mes rapporteurs, Monsieur Patrice COORVETIS, Professeur des universités à l'Université de Picardie Jules-Verne et Monsieur Michel MOURET, Maître de Conférences-HDR à l'Université Paul Sabatier de Toulouse pour les multiples conseils et le temps qu'ils ont accordé à la lecture de cette thèse et à l'élaboration de leur rapport.

Je voudrais remercier Monsieur Yannick MELINGE, Professeur des universités à l'Université de Cergy-Pontoise pour avoir accepté d'examiner ce travail et pour les discussions scientifiques très fructueuses que nous avons eues.

Mes vifs remerciements sont adressés à ma directrice de thèse Madame Chafika DJELAL- DANTEC, Professeur des universités à l'Université d'Artois de Béthune. Son aide a été déterminante pour l'avancement et la réalisation de ma thèse.

Mes remerciements vont particulièrement à mon co-directeur de thèse Monsieur Sébastien REMOND, Professeur à l'Ecole des Mines de Douai, pour la qualité de son encadrement, pour sa patience, sa rigueur et sa disponibilité durant tout le travail. Je tiens d'emblée à te remercier spécialement de tout l'intérêt que tu as bien voulu porter à mon travail, tes conseils, tes explications et remarques pertinentes.

J'exprime ma gratitude à mon co-directeur Monsieur Yannick VANHOVE, Professeur des universités à l'Université d'Artois de Béthune, pour ses explications et conseils durant la thèse.

Je remercie aussi mon co-encadrant Monsieur Patrick PIZETTE, Maître assistant à l'Ecole des Mines de Douai, qui m'a aidée à valoriser mon travail numérique et à enrichir mes compétences en modélisation numérique.

Je tiens à formuler mes remerciements à mes collègues de l'Ecole des Mines de Douai et de l'IUT de Béthune qui m'ont apportée leur soutien et qui ont contribué à l'élaboration de ce travail.

J'adresse mes plus sincères remerciements à tous mes proches et amis qui m'ont toujours soutenue et encouragée.

Je tiens à signifier ma reconnaissance à l'ensemble des personnes qui ont facilité mon travail dans le cadre de cette étude.

Je dédie ce mémoire :

A ma mère, qui m'a comblée de son soutien inconditionnel.

A mon père, mes sœurs et mes frères, pour le courage qu'ils m'ont offert.

A ma sœur Nouha, pour ses conseils et son support.

Enfin, les mots me manquent pour exprimer ma profonde reconnaissance à mon mari Ghassan, qui m'a aidée à rebondir après chaque échec.

Résumé

Lors de la mise en œuvre du béton dans les coffrages ou lors du pompage du béton, une couche, appelée couche limite, constituée d'eau et de fines, se forme près de l'interface. Diverses études ont montré que le frottement à l'interface béton-paroi dépend essentiellement des propriétés rhéologiques de la couche limite, de sa composition et de la rugosité de la paroi. L'objectif principal de cette étude est de comprendre les phénomènes se produisant à l'interface à l'échelle des grains. Toutefois, compte tenu de la complexité de deux corps en contact : couche limite et paroi, le système étudié est simplifié. La complexité du matériau béton a ainsi été simplifiée, en considérant que ce milieu est constitué de grains sphériques monodisperses et sans cohésion. Par ailleurs, la rugosité de la paroi formée en réalité par des aspérités irrégulières, est représentée par des géométries simples. L'étude repose sur l'utilisation de deux modèles, un modèle analogique et un modèle numérique.

L'approche analogique est constituée d'un dispositif expérimental monté sur le tribomètre. Le cisaillement s'effectue en déplaçant, une baguette crénelée placée sous un empilement de billes confiné par une masse. Trois baguettes représentant trois rugosités différentes sont utilisées. Les résultats expérimentaux montrent que les conditions à l'interface (vitesse, rugosité, pression) influent sur le frottement et sur les mécanismes à l'interface.

L'approche numérique est basée sur la méthode des éléments distincts. La rugosité de la paroi est modélisée par un assemblage de sphères collées sur un plan mobile. Les résultats obtenus montrent une bonne concordance entre les approches numérique et expérimentale. De même, l'étude numérique réalisée en conditions périodiques et pour différentes rugosités montre que les conditions à l'interface influent sur le frottement et sur le comportement du milieu près de l'interface (profils de vitesses, épaisseur de la couche cisailée, etc.).

Mots clés : Frottement, Cisaillement granulaire, Rugosité, Couche Limite, DEM, Interface, Milieu Granulaire.

***A**bstract*

When fresh concrete is placed into formworks or during concrete pumping, a layer, called boundary layer, consisting of water and fines, is formed at the interface. Various studies have shown that the friction between the concrete and the wall (form or pipe) is closely linked to the rheological properties of the boundary layer, its composition and the wall roughness. This study aims at understanding the wall-concrete interface phenomena at a grain scale. However, due to the complex nature of the two bodies in contact: boundary layer and wall, a simplified system has been considered. The concrete has been simplified by assuming that it consists of monodispersed spherical grains and without cohesion. Moreover, the irregular asperities of the wall roughness are represented by simple geometries. The study is based on the use of two models, an analog model and a numerical model.

The analog approach consists of an experimental device fitted on the tribometer. The test consists in moving rough plates under stacks of confined monodispersed beads. The roughness of the plate is represented by crenels. Three plates representing different roughnesses are used. The experimental results show that the friction and the interface mechanisms are affected by the interface conditions (velocity, roughness, pressure).

The numerical approach is based on the Discrete Element Method (DEM). The wall roughness is modeled by an assembly of spheres fixed on a moving plane. The results obtained by numerical simulations compared with those of the analog model show a good confrontation. As well, the numerical study carried out with periodic boundary conditions and for different roughnesses shows that the interface conditions affect the friction and the behavior of the medium near the interface (velocities profiles, thickness of the shear layer, etc.).

Keywords: *Friction, Granular shear, Roughness, Boundary layer, DEM, Interface, granular medium.*

Table des matières

Liste des Figures

Liste des Tableaux

Introduction générale 1

CHAPTER I Etude bibliographique

I.1 La tribologie appliquée au Génie Civil..... 4

I.1.1 Tribologie, surfaces et interfaces..... 4

I.1.2 Frottement appliqué au Génie Civil..... 5

I.2 Frottement à l'interface béton frais-paroi 6

I.2.1 Principales problématiques tribologiques du béton frais..... 7

I.2.2 Analyse des problèmes tribologiques 8

I.3 Etude à l'interface d'une paroi rugueuse..... 14

I.3.1 Béton frais-paroi rugueuse: tribomètre plan-plan..... 15

I.3.2 Milieu granulaire-paroi rugueuse: modèle analogique 18

I.3.3 Milieu granulaire-paroi rugueuse: modélisation numérique discrète 23

I.3.4 Diverses études 26

I.4 Méthode des Eléments Discrets (DEM)..... 29

I.4.1 Lois du mouvement 29

I.4.2 Détection des contacts 31

I.4.3 Lois de contact..... 32

I.5 Conclusion..... 35

I.6 Objectifs et démarches de l'étude 36

CHAPTER II Modèle analogique

II.1 Introduction..... 39

II.2 Modèle analogique 39

II.2.1 Description du modèle analogique 39

II.2.2 Protocole expérimental.....	40
II.2.3 Conditions aux limites.....	42
II.2.4 Grandeurs observables	44
II.3 Mécanismes à l'interface billes-baguettes	49
II.4 Compacité de l'empilement initial.....	51
II.5 Influence des conditions aux limites sur les grandeurs observables	52
II.5.1 Vitesse de déplacement	52
II.5.2 Influence de la rugosité de la baguette	56
II.5.3 Force normale.....	61
II.6 Conclusion	64
CHAPTER III Simulation du modèle analogique par la Méthode des	
Eléments Discrets (DEM)	
III.1 Introduction	67
III.2 Présentation du code numérique : DemGCE	67
III.2.1 Les conditions aux limites	68
III.2.2 Exécution du calcul et traitement des données utilisant DemGCE.....	69
III.3 Simulation numérique de l'essai expérimental.....	70
III.3.1 Parois latérales et baguette rugueuse	70
III.3.2 Préparation de l'empilement.....	71
III.3.3 Données de sortie : force tangentielle, profil de cisaillement et nombre de grains sortants	75
III.3.4 Analyse de répétabilité.....	78
III.4 Etude paramétrique	81
III.4.1 Introduction.....	81
III.4.2 Coefficient de frottement de glissement (μ_{gg}) et (μ_{gp}).....	83
III.4.3 Coefficient de roulement (μ_r).....	88
III.5 Etude comparative : essais expérimentaux et simulations numériques.....	90
III.5.1 Compacité de l'empilement initial.....	90
III.5.2 Influence des conditions aux limites sur les grandeurs observables.....	92
III.6 Limites du dispositif expérimental.....	99

III.7 Conclusion.....	100
CHAPTER IV Cisaillement plan sans gravité d'un milieu granulaire sur une paroi rugueuse	
IV.1 Programme de travail	102
IV.2 Simulations numériques.....	103
IV.2.1 Description du système simulé	103
IV.2.2 Protocole de simulation	104
IV.2.3 Grandeurs observables.....	108
IV.3 Conditions de simulations.....	113
IV.4 Reproductibilité et étude sur le comportement global.....	115
IV.5 Influence des conditions à l'interface : Rugosité aléatoire et ordonnée	121
IV.5.1 Rugosité aléatoire	122
IV.5.2 Rugosité en créneaux.....	131
IV.6 Etude sur l'histoire du confinement	133
IV.7 Etude sur la polydispersité du milieu	136
IV.8 Conclusion	137
CHAPTER V Interface béton-paroi : étude préliminaire par approches expérimentale et numérique	
V.1 Introduction.....	140
V.2 Essai expérimental	140
V.2.1 Description de l'essai expérimental	140
V.2.2 Béton frais.....	141
V.2.3 Caractéristiques des plaques	144
V.3 Etude sur la couche à l'interface béton frais-paroi.....	146
V.3.1 Protocole d'extraction de la pâte proche de l'interface.....	147
V.3.2 Tamisage de la pâte.....	147
V.3.3 Filtration.....	148
V.3.4 Analyse granulométrique	149
V.3.5 Conditions de mesure granulométrique	150

V.3.6 Analyse granulométrique de la pâte proche de l'interface béton frais-paroi	152
V.4 Cisaillement d'une suspension bidisperse.....	155
V.5 Conclusion.....	157
Conclusion générale et perspectives.	159
Annexes	

Liste des figures

Figure I-1 - Système tribologique.	4
Figure I-2 - Domaines d'application de la tribologie.	5
Figure I-3 - Quelques exemples de frottement en Génie Civil.	6
Figure I-4 - Ecoulement du béton dans les tuyaux de pompage [4, 3].	9
Figure I-5 - Tribomètre à cylindres coaxiaux développé par Kaplan : (a) tribomètre vide et (b) tribomètre rempli de béton [4].	10
Figure I-6 - Tribomètre fabriqué par Chapdelaine [2].	11
Figure I-7 - Prélèvement et procédure d'analyse de la couche limite d'après Ngo [3].	12
Figure I-8 - Schéma de principe du tribomètre plan/plan développé par Vanhove [5].	13
Figure I-9 - Proportion des constituants du mélange extrait pour quatre bétons [8].	14
Figure I-10 - Evolution de la contrainte de frottement en fonction de la pression de contact pour un BAP (vitesse = 2,5 mm/s ; (1) $R_a = 0,3 \mu\text{m}$ et (2) $R_a = 1,6 \mu\text{m}$) [5, 44].	15
Figure I-11 - Présentation schématique de l'interface béton-plaque acier ($R_a = 0,3 \mu\text{m}$) [44].	16
Figure I-12 - Présentation schématique de l'interface béton-plaque acier ($R_a = 1,6 \mu\text{m}$) [44].	16
Figure I-13 - Concentration d'agréats en fonction de la distance par rapport à la paroi [53].	17
Figure I-14 - Variation des contraintes tangentielles statique (a) et dynamique (b) en fonction de la rugosité pour différente teneur en eau [49].	18
Figure I-15 - Dispositif conçu par Djelal [49]: (a) Montage expérimental et (b) Principe du schéma expérimental.	19
Figure I-16 - dispositions des plaquettes sur la tige mobile [49].	19
Figure I-17 - Six géométries d'écoulement [54].	20
Figure I-18 - Cellule d'écoulement et (b) Vitesse moyenne des grains situés à la surface libre pour deux types des parois [63].	21
Figure I-19 - Effet de la rugosité des parois sur le comportement en sortie d'un jet granulaire de diamètre $D_0 = 14 \text{ mm}$ [67].	22
Figure I-20 - Ecoulement granulaire dans un tube : (a) parois lisses et (b) parois rugueuses [68].	22

Figure I-21 - (a) dispositif expérimental ; (b) épaisseur du dépôt pour différentes angles d'inclinaison ($\lambda = 425 \mu\text{m}$, $c=0.55$ et espacement moyen entre les billes collées = $120 \mu\text{m}$) et (c) de gauche à droite $d \gg d_c$; $d \approx d_c$ et $d \ll d_c$ [75].	23
Figure I-22 - Système étudié par Koval [76, 77].	24
Figure I-23 - Influence de la rugosité à la paroi sur l'épaisseur de la zone cisailée (λ) pour différentes géométries annulaires (a), sur le taux de cisaillement normalisé par la vitesse à la paroi V_θ (b) et sur les profils de vitesse normalisée par la vitesse à la paroi V_θ (c) [76].	25
Figure I-24 - (a) Géométrie de cisaillement plan (a) et (b) Influence de la rugosité sur les profils de vitesse [80].	26
Figure I-25 - Influence de l'état de surface de l'inclusion sur le coefficient du frottement apparent d'après Schlosser [81] .	26
Figure I-26 - (a) Evolution du coefficient de frottement au pic en fonction de la rugosité (Uesugi et Kishida [83]) et (b) Influence de la rugosité sur l'épaisseur d'interface (b) (Hassan [14]).	27
Figure I-27 - (a) Géométrie des inclusions étudiées d'après Hryciw et Irsyam [84], (b) zone passive entre deux nervures selon Hryciw et irsyam [84] et (c) Géométrie des inclusions étudiées d'après Dove et Jarrett [85].	28
Figure I-28 - Schéma de principe du cycle de calcul DEM.	30
Figure I-29 - (a) Volume de calcul et (b) procédure de détection des contacts entre les grains [108].	31
Figure I-30 - Schéma représentatif d'un chevauchement entre deux grains 1 et 2 en contact.	32
Figure I-31- Démarche de l'étude.	38
Figure II-1 - Vue de l'ensemble du dispositif monté sur le tribomètre.	40
Figure II-2 - Schéma du dispositif monté sur le tribomètre.	40
Figure II-3 - Différentes étapes de versement de billes par couches.	41
Figure II-4 - Montage expérimental.	41
Figure II-5 - Représentation schématique du mouvement d'un grain en fonction de la vitesse de glissement ; $R_a = 1,6 \mu\text{m}$ d'après Vanhove [5].	42
Figure II-6 - Baguettes de rugosités R1, R2 et R3.	43
Figure II-7 - Frottement entre deux corps secs et solides.	45
Figure II-8 - Mesure du coefficient de frottement baguette/base.	45
Figure II-9 - Variation de la force F_{base} en fonction de la force normale.	46
Figure II-10 - Calcul de la force F_{gr} à partir des forces F_{mes} et F_{base} .	47

Figure II-11 - Exemple d'un traitement d'images dans la configuration initiale et la configuration finale.	48
Figure II-12 - (a) Blocage d'une bille ; (b) Ouverture à proximité de la paroi.	49
Figure II-13 - Etapes d'identification d'un mécanisme.	50
Figure II-14 - Calcul de la compacité initiale de l'empilement pour R1 et pour une force normale appliquée sur la baguette de 175 N.	51
Figure II-15 - R1 : Variation de la force tangentielle en fonction de la distance de déplacement (a ; b et c) et en fonction du temps (d) pour les vitesses : 1 , 5 et 10 mm/s.	53
Figure II-16 - R1 : Profils de cisaillement pour des vitesses de déplacement de 1, 5 et 10 mm/s.	54
Figure II-17 - Mécanismes observés durant le déplacement de la baguette R1.	55
Figure II-18 - Variation de la force tangentielle pour les baguettes : R1, R2 et R3.	57
Figure II-19 - Positionnement d'une bille sur R2 dans la configuration initiale.	58
Figure II-20 - Mécanismes observés durant le déplacement de la baguette R2.	58
Figure II-21 - Positionnement d'une bille sur R3 dans la configuration initiale.	59
Figure II-22 - Mécanismes observés durant le déplacement de la baguette R3.	59
Figure II-23 - Profils de cisaillement pour les trois baguettes : R1, R2 et R3.	60
Figure II-24 - Variation de la force tangentielle (régime dynamique) en fonction de la force normale pour R1, R2 et R3.	61
Figure II-25 - Pic observé sur le régime dynamique de R3 pour une force normale de 275 N.	62
Figure II-26 - Profils de cisaillement de R1, R2 et R3, pour différents forces normales.	63
Figure II-27 – Nombre de billes sortantes pour R1 , R2 et R3.	64
Figure III-1 - Conditions aux limites utilisées.	68
Figure III-2- Organigramme du fonctionnement de DemGCE.	69
Figure III-3 - Paroi rugueuse : (a) Baguettes du dispositif expérimental; (b) Modélisation numérique DEM (code DemGCE).	71
Figure III-4 – Préparation de l'empilement.	72
Figure III-5 - Algorithme du contrôle de la pression normale.	73
Figure III-6 - Exemple du contrôle de la pression normale sur le milieu granulaire.	74
Figure III-7 – Simulation numérique DemGCE de l'ouverture.	75
Figure III-8 - (a) Dispositif expérimental et (b) Simulation du dispositif expérimental.	75
Figure III-9 - Calcul de la force tangentielle.	76

Figure III-10 - Exemple d'enregistrement de la force tangentielle.	77
Figure III-11 - Affichage d'un profil de cisaillement.	77
Figure III-12 - Comptage du nombre de grains sortant de la boîte.	78
Figure III-13 - Profils de cisaillement pour les cinq états initiaux.	80
Figure III-14 - Principaux paramètres de l'étude paramétrique.	82
Figure III-15 - Force tangentielle en fonction du coefficient de frottement de glissement (μ_{gg}).	83
Figure III-16 - Profils de cisaillement expérimental et numériques μ_{gg} égale à 0,1 et 0,35.	84
Figure III-17 - Nombre de grains sortants en fonction du coefficient de frottement de glissement (μ_{gg}).	85
Figure III-18 - Force tangentielle en fonction du coefficient de frottement de glissement (μ_{gp}).	86
Figure III-19 – Profils de cisaillement expérimental et numériques.	87
Figure III-20 - Nombre de grains sortants en fonction du coefficient de frottement de glissement (μ_{gp}).	87
Figure III-21 - Force tangentielle en fonction du coefficient de roulement (μ_r).	88
Figure III-22 - Profils de cisaillement expérimental et numérique.	89
Figure III-23 - Nombre de grains sortants en fonction du coefficient de frottement de glissement (μ_r).	90
Figure III-24 - Calcul de la compacité expérimentale et numérique pour une force normale de 125 N exercée sur la baguette R1.	91
Figure III-25 - Variation de la force tangentielle en fonction de la force normale pour R1.	93
Figure III-26 - Analyse de la sortie de billes pour R1 et pour une force normale de 175 N.	94
Figure III-27 - Variation de la force tangentielle en fonction de la force normale pour R2.	94
Figure III-28 - Billes sortantes pour R1 et R2.	95
Figure III-29 – Variation de la force tangentielle en fonction de la force normale pour R3.	96
Figure III-30 - Variation expérimentale et numérique de la force tangentielle en fonction de la force normale pour les rugosités R1 ; R2 ; R3.	97
Figure III-31 - Variation du nombre des billes sortantes expérimental et numérique en fonction de la force normale pour les rugosités R1 ; R2 ; R3.	98
Figure III-32 - Formation d'un tourbillon après le déplacement de la paroi rugueuse (R2) avec une vitesse 40 mm/s et une force normale de 85 N.	99
Figure IV-1 – Schéma du système simulé : les parois rugueuses sont en rouges et le milieu granulaire est constitué par des grains gris.	103

Figure IV-2 - Deux types de rugosités étudiées : Rugosités aléatoire et ordonnée.	105
Figure IV-3 - Préparation des empilements : (a) Génération des grains, (b) Déplacement des parois rugueuses et (c) Empilement confiné et stable.	106
Figure IV-4 - Algorithme de contrôle de la pression normale.	107
Figure IV-5 - Exemple de contrôle d'une pression normale de 100 kPa pour une vitesse de déplacement de la paroi de $10 d_{\text{moyen}}/\text{s}$ (rugosité aléatoire $d_p = 2 d_{\text{moyen}}$).	108
Figure IV-6 - Evolution de la force tangentielle sur les parois rugueuses supérieure et inférieure (rugosité aléatoire $d_p = 2 d_{\text{moyen}}$; $P = 100 \text{ kPa}$ et $V_0 = 10 d_{\text{moyen}}/\text{s}$).	109
Figure IV-7 – Exemples des profils de vitesses instantané et moyen (rugosité aléatoire).	110
Figure IV-8 – Différentes grandeurs observables liées à la vitesse.	111
Figure IV-9 – Exemple de calcul de la compacité.	112
Figure IV-10 – Etude de la reproductibilité (rugosité $d_p = 2d_{\text{moyen}}$) : (a) Evolution de la contrainte tangentielle ; (b) Profil de compacité ; (c) Profil de vitesse et (d) Fluctuations de vitesses.	115
Figure IV-11 – Etude de la reproductibilité (rugosité $d_p = 0,5 d_{\text{moyen}}$) : (a) Evolution de la contrainte tangentielle ; (b) Profil de compacité ; (c) Profil de vitesse et (d) Fluctuations de vitesses.	118
Figure IV-12 – Graphiques de trois types des régimes observés par Albert et al [159].	120
Figure IV-13 – Zoom de la variation de la contrainte tangentielle pour deux rugosités formées respectivement par des grains de diamètre égal à $0,5 d_{\text{moyen}}$ et $2 d_{\text{moyen}}$.	121
Figure IV-14 – Différentes rugosités étudiées pour une concentration de grains de $C_p 100\%$.	123
Figure IV-15 – Différentes concentrations pour une rugosité $d_0,5$.	123
Figure IV-16 – Variation de la contrainte tangentielle en fonction de la contrainte normale pour différentes vitesses de cisaillement et différentes rugosités ($C_p 100\%$).	124
Figure IV-17 – Variation de la contrainte tangentielle en fonction de la rugosité d_n ($C_p 100\%$) pour des vitesses de cisaillement de $10 d_{\text{moyen}}/\text{s}$ (a) et $100 d_{\text{moyen}}/\text{s}$ (b). Les traits correspondent au profil de vitesse.	125
Figure IV-18 – Calcul de l'épaisseur de la bande de cisaillement.	127
Figure IV-19 – Ecoulement du béton dans un tuyau [4, 3].	127
Figure IV-20 – Variation de la contrainte tangentielle en fonction de la concentration des grains (C_p) pour différentes rugosités d_n (vitesse de cisaillement de $10 d_{\text{moyen}}/\text{s}$).	129
Figure IV-21 – Disposition des grains sur une surface rugueuse pour différentes concentrations.	130
Figure IV-22 – Schémas des systèmes simulés. Rugosités en créneaux : R1, R2 et R3.	131

Figure IV-23 – Variation de la contrainte tangentielle en fonction des rugosités : R1, R2 et R3 pour différents niveaux de confinement et vitesses de cisaillement.	132
Figure IV-24 – Formation d’une bande de cisaillement et d’un bloc pour R1, $P = 50$ kpa et $V_0 = 100$ d_{moyen}/s . Figure de gauche : grains représentés par leurs centres après 10 secondes de cisaillement ; Figure de droite : profil de vitesse.	133
Figure IV-25 – Deux méthodes de confinement étudiées.	134
Figure IV-26 – Etude sur la méthode de confinement (rugosité $d = 2 d_{moyen}$) : (a) Evolution de la contrainte tangentielle ; (b) Profil de compacité ; (c) Profil de vitesse et (d) Fluctuations de vitesses.	135
Figure IV-27 – Schémas des systèmes étudiés.	137
Figure V-1 - Tribomètre plan-plan (a) et détail d’un porte-échantillon (b) [5].	141
Figure V-2 - Courbes granulométriques des composants.	142
Figure V-3 - Protocole de malaxage.	143
Figure V-4 - Classe de consistance mesurée au cône d’Abrams [NF P 18–305].	143
Figure V-5 - Représentation schématique d’un profil de rugosité.	144
Figure V-6 - Fiche technique du rugosimètre TR200.	145
Figure V-7 - Détermination des points de mesure.	145
Figure V-8 - Rugosités (R_a et R_t) en μm des plaques 1, 2 et 3.	146
Figure V-9 - Pâte collée sur la plaque.	147
Figure V-10 - (a) Particules grossières et (b) Passants à $80 \mu m$.	148
Figure V-11 - (a) Système de filtration et (b) Résidu récupéré.	148
Figure V-12 - (a) Granulomètre laser LS 13 320 ; (b) Prélèvement de suspension et (c) Introduction de la suspension dans la cellule.	150
Figure V-13 - Distribution granulométrique des grains de ciment avec et sans ultrasons.	151
Figure V-14 - Distribution granulométrique des grains de ciment pour deux solutions d’agitation.	152
Figure V-15 - Analyse granulométrique de la pâte extraite de la plaque 1 pour différents temps d’agitation.	153
Figure V-16 - Analyse granulométrique de la pâte extraite de la plaque 3 pour différents temps d’agitation.	153
Figure V-17 - Analyses granulométriques des pâtes extraites des plaques 1 et 3 pour un temps d’agitation de 10 minutes.	154

Figure V-18 - Analyse granulométrique de la pâte extraite de la plaque 2 pour différents temps d'agitation. 155

Figure V-19 - Concentration en petites sphères aux états initial et cisailé près de l'interface. 156

Liste des tableaux

Tableau II-1- Forces normales appliquées sur la baguette.	44
Tableau II-2 - Compacités pour différentes forces normales exercées sur les baguettes R1, R2 et R3.	52
Tableau II-3 - Nombre de billes sortantes pour les vitesses : 1, 5 et 10 mm/s.	56
Tableau III-1 - Diamètre et nombre des grains de la paroi rugueuse.	70
Tableau III-2 - Les paramètres géométriques et matériaux de l'étude de la répétabilité.	79
Tableau III-3 - Force tangentielle et nombre de grains sortants pour cinq états initiaux.	79
Tableau III-4 - Paramètres géométriques et matériaux et conditions aux limites utilisés dans l'étude paramétrique.	82
Tableau III-5 - Compacités expérimentale et numérique pour différentes forces normales exercées sur les baguettes R1, R2 et R3.	91
Tableau III-6 - Conditions de simulations.	92
Tableau III-7 - Nombre de billes sortantes de la boîte par l'expérience et par la simulation pour R1.	93
Tableau III-8 - Nombre de billes sortantes par expérience et par simulation pour R2.	95
Tableau III-9- Nombre de billes sortantes par l'expérience et par la simulation pour R3.	96
Tableau IV-1 – Paramètres utilisés pour les simulations.	104
Tableau IV-2 – Conditions de simulations.	115
Tableau IV-3 – Contraintes tangentielles maximale et moyenne et fluctuations de la contrainte tangentielle dans le régime stationnaire pour les trois états initiaux étudiés.	116
Tableau IV-4 – Compacité moyenne et rapport entre les fluctuations de compacité dans la zone près de la paroi et la zone centrale de la cellule pour les trois états initiaux étudiés (rugosité $d_p = 2d_{\text{moyen}}$).	117
Tableau IV-5 – Compacité moyenne et rapport entre les fluctuations de compacité dans la zone près de la paroi et la zone centrale de la cellule pour les trois états initiaux étudiés (rugosité $d_p = 0,5d_{\text{moyen}}$).	119
Tableau IV-6 – Contraintes tangentielles maximale et moyenne et les fluctuations de la contrainte tangentielle dans le régime stationnaire pour les trois états initiaux étudiés.	120
Tableau IV-7 – Nombre de grains équivalent à chaque concentration de la rugosité d_n .	122

Tableau IV-8 – Vitesse de glissement relative dans les différentes conditions à l’interface.	126
Tableau IV-9 - Epaisseur de la bande de cisaillement N_c (Nombre de couches d’épaisseur d_{moyen}) pour différentes rugosités d_n ($d_{0,5}$, $d_{0,75}$ et d_1), pressions normales P (50, 100 et 200 kPa) et vitesses de déplacement de la paroi rugueuse V_0 (10 et 100 d_{moyen}/s).	127
Tableau IV-10 – Distances maximale de pénétration des grains dans les creux formés par des grains de la paroi ($d_{0,5}$).	130
Tableau IV-11 – Epaisseur de la bande de cisaillement N_c (Nombre de couches d’épaisseur d_{moyen}) pour différentes rugosités, pressions normales P et vitesses de déplacement de la paroi rugueuse V_0 .	133
Tableau IV-12 - Paramètres utilisés pour l’étude sur la méthode de confinement.	134
Tableau IV-13 – Variation de la contrainte tangentielle en fonction de la polydispersité du milieu.	137
Tableau V-1 – Composition du béton	142
Tableau V-2 – Caractéristiques des granulats.	142
Tableau V-3 - Paramètres de la rugosité R_a et R_t des plaques 1, 2 et 3.	146

Introduction générale

La tribologie est la science des frottements [1]. Un frottement intervient lorsque deux corps en contact sont mis en mouvement l'un par rapport à l'autre, produisant une force qui s'oppose au mouvement. En Génie Civil, on pourrait multiplier les exemples pour lesquels la tribologie est appliquée : le frottement entre les grains ensilés et la paroi d'un silo, le frottement entre un extrudé et la paroi de l'extrudeuse, etc.

Dans le cas du béton frais, le frottement peut intervenir lors de son pompage ou lors de sa mise en œuvre dans les coffrages. La technique du pompage est très utilisée de nos jours. Pour amener le béton vers les endroits désirés, il est nécessaire que le béton soit pompable. Dans certains cas, le béton n'avance pas dans la tuyauterie et cette dernière se bouche. Le débouchage de la tuyauterie exige la localisation du bouchon et le démontage du conduit, ce qui prend du temps et augmente le coût de fabrication. Afin d'éviter l'apparition des bouchons, la compréhension des phénomènes entravant l'avancement du béton dans le tuyau est devenue une nécessité. Pour prévoir la pompabilité du béton, plusieurs recherches ont été menées sur des bétons de différentes caractéristiques rhéologiques [2, 3]. Dans les dernières années, plusieurs études ont montré qu'en plus du comportement rhéologique du béton, les conditions d'interface (tribologie) influent sur son avancement dans le tuyau [3, 4].

De même, plusieurs études ont été réalisées pour prédire les poussées exercées par le béton sur les coffrages [5, 6, 7]. L'estimation des poussées permet d'éviter la déformation des coffrages et de réduire le coût de fabrication. Ces poussées dépendent du frottement entre le béton et la paroi. Un frottement important engendre une diminution de la poussée exercée par le béton sur les coffrages [5, 8]. Par ailleurs, l'état de la surface de la paroi et le choix de l'agent de démoulage sont des paramètres non négligeables susceptibles d'aboutir à l'apparition de défauts de parement [8, 9].

Pour apporter des explications aux problèmes rencontrés sur le chantier, la compréhension des mécanismes impliqués dans le frottement béton frais-paroi est nécessaire. Des tribomètres à mouvement rotatif ou linéaire ont été conçus puis développés pour étudier le frottement à l'interface béton frais-paroi ou béton frais-huile-paroi. Les études réalisées sur ces tribomètres ont mis en évidence l'existence d'une couche lubrifiante, appelée couche limite, directement en contact avec la paroi [3, 4, 5]. Diverses études ont montré que le frottement à l'interface béton-paroi dépend essentiellement des propriétés rhéologiques de cette couche, de sa composition et de la rugosité de la paroi [3, 5, 8]. Toutefois, malgré les progrès importants qui ont été réalisés, la caractérisation de la couche limite présente toujours de nombreuses difficultés.

A l'heure actuelle, la littérature n'apporte pas de réponses précises sur les caractéristiques de la couche limite (quelle est son épaisseur, quels sont les mécanismes de sa formation, etc.). L'explication des phénomènes qui se produisent à l'interface est complexe. En effet, en plus de la complexité du matériau béton (grande étendue granulaire, fluide interstitiel,

propriétés variables au cours du temps, ...), plusieurs paramètres liés aux caractéristiques du béton (seuil de cisaillement et viscosité) et à celles de la paroi (état de surface, lubrification : présence des huiles de démoulage dans le cas des coffrages) peuvent intervenir. Ces différentes difficultés rendent l'interface béton frais-paroi difficile à étudier.

L'objectif principal de cette étude est de comprendre les phénomènes se produisant à l'interface béton-paroi à l'échelle des grains. Toutefois, compte tenu de la complexité des deux corps en contact, c'est-à-dire la couche limite avec des multiples composants et la paroi avec des aspérités irrégulières, nous avons décidé de simplifier le système étudié. Pour le béton, sa complexité a ainsi été réduite, en considérant que ce milieu est constitué de grains sphériques monodisperses et sans cohésion (l'influence du fluide interstitiel est négligée). Pour la rugosité de la paroi formée en réalité par des aspérités irrégulières, elle est représentée dans cette étude par une paroi rugueuse constituée de géométries simples de type "créneaux" ou "sphériques". Pour mobiliser un frottement, cette paroi rugueuse est mise en mouvement sous le matériau granulaire. Nous nous intéressons donc à l'étude du frottement le long d'une interface simplifiée formée de deux corps en contact : un milieu granulaire et une paroi rugueuse. L'étude est réalisée par des approches expérimentale et numérique discrète.

Le premier chapitre présente une synthèse des travaux réalisés sur la couche limite. L'influence des conditions à l'interface, en particulier de la rugosité, sur les phénomènes macroscopiques est également présentée dans ce chapitre. Cette synthèse a révélé la nécessité de modéliser l'interface béton frais-paroi, les principes de la méthode aux éléments discrets, utilisée dans la suite de notre travail, sont donc également présentés.

La description du modèle expérimental analogique conçu est rapportée dans le chapitre 2. Le principe de ce dispositif consiste à déplacer à vitesse constante une plaque crénelée sous un empilement confiné, formé de billes de verre monodisperses. Les résultats obtenus sont ensuite présentés. Ces résultats portent sur l'influence des conditions à l'interface (vitesse, rugosité, pression) sur le frottement et sur les mécanismes à l'interface.

L'étude expérimentale a été complétée par une étude numérique basée sur la méthode aux éléments discrets via un code de calculs DEM développé en interne. Le troisième chapitre débute par la description du code numérique. Ensuite la modélisation du dispositif expérimental et la confrontation entre les résultats expérimentaux et numériques sont présentées.

Le chapitre 4 présente les résultats et l'analyse des données relatives au cisaillement d'un milieu granulaire sur une paroi rugueuse en conditions périodiques (absence des parois latérales). La rugosité est modélisée par des sphères dispersées sur un plan. L'influence des conditions à l'interface sur le comportement du milieu près de l'interface (profils de vitesses, épaisseur de la couche cisailée, glissement,) est étudiée.

Le cinquième chapitre est consacré à une étude préliminaire sur l'influence de la rugosité de la paroi sur la composition de la couche extraite près de la paroi. Un protocole expérimental

sur la récupération et l'analyse granulométrique de la couche limite est tout d'abord présenté. Les résultats des analyses granulométriques des différentes couches extraites sont ensuite présentés. Ce chapitre se termine par une simulation numérique réalisée sur une suspension bidisperse (formée de deux tailles de grains).

Finalement, dans la conclusion générale, le travail effectué est résumé et des perspectives pouvant faire l'objet de prochaines études sont proposées.

CHAPITRE I

Étude bibliographique

I.1 La tribologie appliquée au Génie Civil

I.1.1 Tribologie, surfaces et interfaces

La tribologie, ou science des surfaces solides en contact, traite des multiples aspects de l'usure et du frottement, soit à sec, soit en présence de lubrifiant. Elle étudie aussi les propriétés d'adhérence [1, 10]. C'est une science pluridisciplinaire. En effet, l'étude d'un problème tribologique nécessite de faire appel à la mécanique (mécanique des solides, mécanique et physico-chimie des surfaces) et aux acquis récents des sciences de la matière (élaboration, comportement) [11].

Un système tribologique est composé des surfaces de deux corps en mouvement l'un contre l'autre et de leur environnement [Figure I-1]. L'analyse de la couche intermédiaire permet d'établir des relations entre les mécanismes microscopiques et les propriétés macroscopiques, telles que l'usure ou le frottement. Du point de vue de la dégradation des surfaces, la couche intermédiaire est appelée « troisième corps » [12]. Elle est formée de particules solides détachées par différents mécanismes et éventuellement d'un lubrifiant.

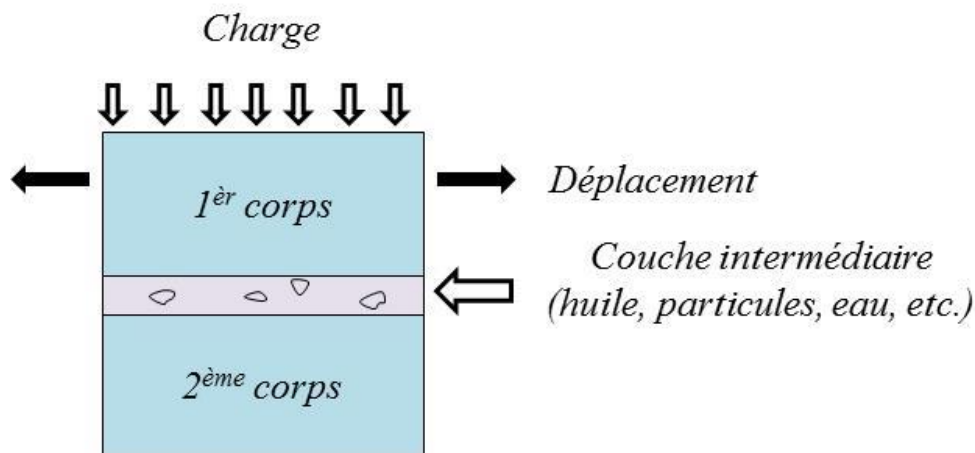


Figure I-1 - Système tribologique.

Le terme « tribologie », évoque généralement des domaines industriels, en particulier les secteurs où les enjeux de conservation d'énergie ou de fiabilité des équipements interviennent d'une manière cruciale. Mais la tribologie intervient également dans de nombreux domaines [Figure I-2]. Nous nous sommes intéressés dans ce chapitre à la tribologie appliquée au Génie Civil.

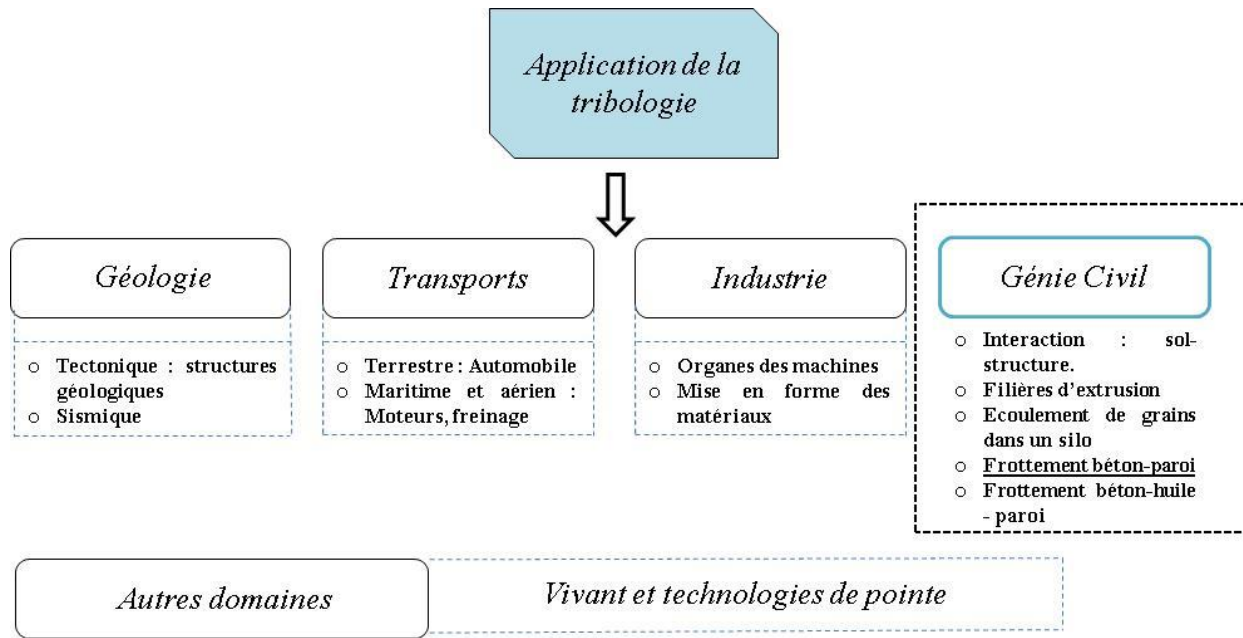


Figure I-2 - Domaines d'application de la tribologie.

I.1.2 Frottement appliqué au Génie Civil

En Génie Civil, une grande partie des ouvrages réalisés implique la prise en compte précise des lois d'interface (contact et frottement). Nous allons détailler quelques exemples présentés dans la **Figure I-3**.

Le frottement latéral entre les parois d'une fondation profonde et le sol représente souvent la fraction prépondérante de la capacité portante d'une fondation [13, 14]. L'inclinaison de la poussée exercée par un sol pulvérulent sur un mur de soutènement dépend étroitement des caractéristiques du sol et du frottement entre le sol et le mur [15]. De même, l'extrusion d'un profilé est largement influencée par le frottement entre le matériau et la paroi de la filière [16]. Des frottements peuvent être générés sur la paroi de la filière et contribuent à l'effort requis pour l'extrusion [17, 18]. La puissance dissipée par le frottement lors de l'extrusion peut atteindre la moitié de la puissance nécessaire [19].

Le dimensionnement des parois des silos est fondé sur les efforts appliqués par le milieu lors de son stockage (condition statique) ou en mouvement (condition dynamique). La matière pulvérulente exerce une surcharge verticale sur la paroi du fait des frottements sur celle-ci. Il est donc primordial de comprendre le comportement d'un milieu granulaire statique ou en écoulement afin de prédire les contraintes mises en jeu (surcharge verticale imposée à la paroi par frottement) de manière à éviter l'effondrement du silo [20, 21, 22, 23].

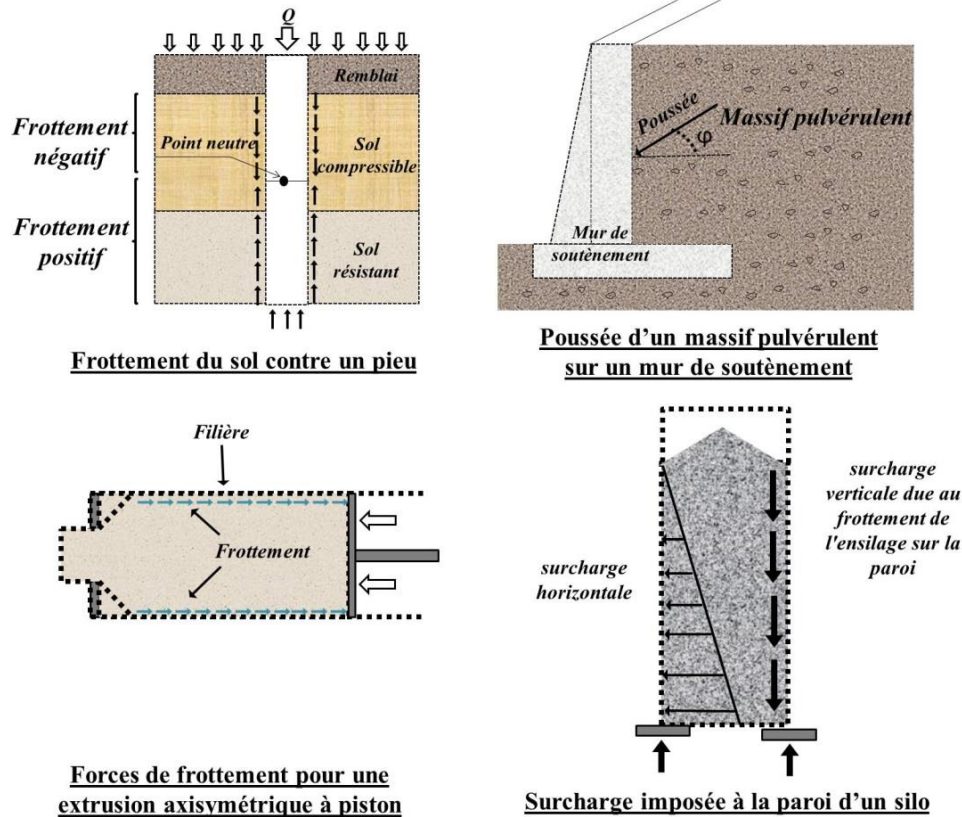


Figure I-3 - Quelques exemples de frottement en Génie Civil.

Dans le cas du béton, le frottement à l'interface béton frais-paroi joue également un rôle primordial lors de la mise en œuvre. Lorsque le béton arrive sur le chantier, il peut être versé directement à l'intérieur de coffrages ou déversé dans une pompe. La capacité à pomper un béton dans les tuyaux et le remplissage des coffrages par du béton peuvent être affectés par les propriétés d'écoulement du béton (comportement rhéologique) mais aussi par les conditions à l'interface béton-paroi (tribologie) [4, 24]. Le comportement rhéologique d'un béton dépend de ses caractéristiques intrinsèques. Par contre, la tribologie est destinée à mesurer les paramètres de l'interface béton frais-paroi qui sont liés aux caractéristiques de la paroi et au comportement rhéologique du béton près de celle-ci.

Sous quel aspect le frottement à l'interface béton frais-paroi peut-il intervenir lors de sa mise en place? Comment l'interface béton-paroi a-t-elle été étudiée?

I.2 Frottement à l'interface béton frais-paroi

L'objectif principal de la rhéologie est de décrire le comportement de la matière en écoulement sous l'effet d'une contrainte appliquée. Dans la littérature, il existe des nombreuses études réalisées sur le comportement rhéologique du béton [2, 24, 25, 26, 27, 28, 29]. Mais, la compréhension du comportement à l'interface béton-paroi doit être étudiée dans le cadre d'un

comportement tribologique. Dans cette section, nous allons présenter les principales problématiques tribologiques rencontrées lors de la mise en place du béton (pompage et remplissage des coffrages).

I.2.1 Principales problématiques tribologiques du béton frais

I.2.1.1 Béton frais-tuyau de pompage

Les principaux problèmes tribologiques rencontrés dans le cas du pompage des bétons sont : la formation de bouchons, la sous-estimation de la pression de pompage et les pertes de charges [4, 3].

Lors de l'écoulement du béton dans le tuyau, des bouchons peuvent se former [4, 3]. Il faut alors démonter la tuyauterie et la déboucher. Cette procédure est longue et engendre des surcoûts importants. Les bouchons peuvent apparaître dans la phase de démarrage, en cours de pompage, en phase de redémarrage et en phase de nettoyage [4, 24, 3, 30].

Les bouchons dans la phase de démarrage sont les plus fréquents. Pour minimiser les risques de ce type de bouchons, l'ingénieur pompe une certaine quantité de barbotine (ciment + eau) avant de pomper le béton dans la tuyauterie. Généralement, le rôle attribué à la barbotine est celui d'un lubrifiant favorisant le glissement du béton sur la paroi. Mais la barbotine sert surtout à retenir en suspension les gros granulats projetés dans la barbotine par un effet d'inertie [4, 3].

La formation des bouchons en phase de redémarrage est aussi liée au frottement à l'interface béton-paroi [4, 3]. Lors d'un arrêt du pompage (détournement de la flèche de répartition, etc.), les granulats du béton sédimentent. Sous l'effet de la sédimentation, la surface de contact entre les granulats du béton et la paroi devient plus importante, ce qui provoque une augmentation du frottement entre les granulats et la paroi. Pour vaincre les frottements à l'interface, une pression de pompage plus importante est nécessaire sinon des bouchons risquent de se former.

De plus, la connaissance de la pression nécessaire pour pomper un béton en fonction du diamètre du tuyau de pompage utilisé ou des débits requis est l'une des exigences demandées par les maîtres d'ouvrage. Il est donc important d'établir un modèle de prédiction de la pression de pompage [4, 2]. Kaplan [4, 24] a montré que pour prédire la pression nécessaire pour un pompage réussi, les propriétés rhéologiques du béton [31] en plus des propriétés tribologiques doivent être prises en compte.

Lors de son écoulement dans une conduite, le béton subit des pertes de charges (ou pertes de pression). Parmi les principales causes de la perte de charges au cours du pompage, le frottement du béton contre la paroi est la plus citée. Lorsque le béton est saturé (béton sans air), Ede [32] a montré que la perte de charge dans la conduite pouvait être considérée comme linéaire. Nikuradsé [33] a confirmé que selon le régime d'écoulement, le coefficient de perte de

charge linéaire dépend de la rugosité des parois. L'étude réalisée par Kaplan [4] a montré que pour la plupart des bétons, les profils de pression de pompage sont linéaires pour un débit donné et que les pertes de pression sont dues au cisaillement localisé dans une couche près de l'interface. Les différentes études se rapportant à cette couche seront présentées par la suite.

I.2.1.2 Béton frais-coffrages

Les principaux problèmes tribologiques rencontrés dans le cas de la mise en place des bétons dans les coffrages sont : la rupture brusque des coffrages et les défauts de parements. Les exigences des clients et des maîtres d'ouvrages deviennent de plus en plus élevées, que ce soit pour le dimensionnement des coffrages ou pour l'aspect des parements.

Le dimensionnement des coffrages dépend essentiellement des poussées exercées par le béton sur les parois. Les coffrages fabriqués doivent résister aux poussées exercées par le béton. Une pression sous-estimée peut provoquer une déformation du coffrage, qui peut à son tour conduire à la rupture brutale du coffrage ou une distorsion de la structure. Par contre, une surestimation de la pression augmente le coût de fabrication des coffrages. Il est donc important de prédire les poussées exercées par le béton contre les coffrages. Ces poussées dépendent du frottement à l'interface béton-paroi. En effet, un frottement important réduit la poussée des bétons sur les coffrages [5, 8].

Dans certains cas, un agent de démoulage est appliqué sur une paroi coffrante pour offrir une séparation du béton durci du coffrage [8, 9]. L'aspect des parements est lié, à la composition du béton, à l'huile de démoulage, au coffrage et surtout au décoffrage [9]. Des défauts peuvent apparaître à la surface de la structure dus à un frottement important entre le béton et les coffrages.

Ces différents problèmes rencontrés et le manque de données concernant le frottement à l'interface béton-paroi ont conduit les chercheurs à concevoir ou à développer des dispositifs de mesure du frottement béton-paroi.

I.2.2 Analyse des problèmes tribologiques

Dans le cas du pompage, les dispositifs conçus pour mesurer le frottement béton-paroi ou pour prédire la pression de pompage sont largement décrits dans la littérature : Alekseev [34], Ede [32], Best et Lane [35], Weber [36], Morinaga [37] et Browne et Bamforthe [38]. De même, le frottement à l'interface béton-paroi a été étudié par divers tribomètres : Bleschik [39], Tanigawa et al [40], Fujiwara [41], Proske [42], Kown et al [43] et Vanhove [5, 44, 45]. Ces études ont proposé des modèles pour prédire les poussées des bétons contre les coffrages [43, 5], et ou un calcul de coefficient de frottement ou de la contrainte de frottement sur une paroi représentant les coffrages [39, 40, 42, 41, 45].

Mais, la littérature qui a été consacrée jusqu'à maintenant à la mesure des paramètres d'interface et à la compréhension des phénomènes régissant le frottement à l'interface, en particulier sur la couche cisailée près de l'interface est peu abondante [5, 44].

De quelle couche s'agit-il ? Quels sont les travaux réalisés sur cette couche ? Quelles sont les difficultés rencontrées lors de ces études ?

De quelle couche s'agit-il ?

La plupart des chercheurs s'entendent sur le fait que le comportement tribologique du béton frais à l'interface béton-paroi dépend essentiellement de la composition du béton, de la rugosité de la paroi et des propriétés rhéologiques du béton directement en contact avec la paroi [3, 5, 8]. En ce qui concerne le béton directement en contact avec la paroi, plusieurs auteurs ont montré l'existence d'une couche lubrifiante [4, 3, 5, 8]. Il s'agit d'une couche de quelques millimètres d'épaisseur formée près de la paroi et composée de la pâte et des fines ($d < 80 \mu\text{m}$). Son comportement diffère de celui du béton loin de la paroi. Elle est appelée « couche limite » dans la plupart des études. Plusieurs auteurs [4, 25, 2, 46] ont montré qu'au début du pompage, le béton n'est pas cisailé dans les tuyauteries, il avance par glissement grâce à la couche limite formée à l'interface béton-paroi [Figure I-4]. Cette couche joue donc le rôle d'un lubrifiant et permet l'écoulement du béton.

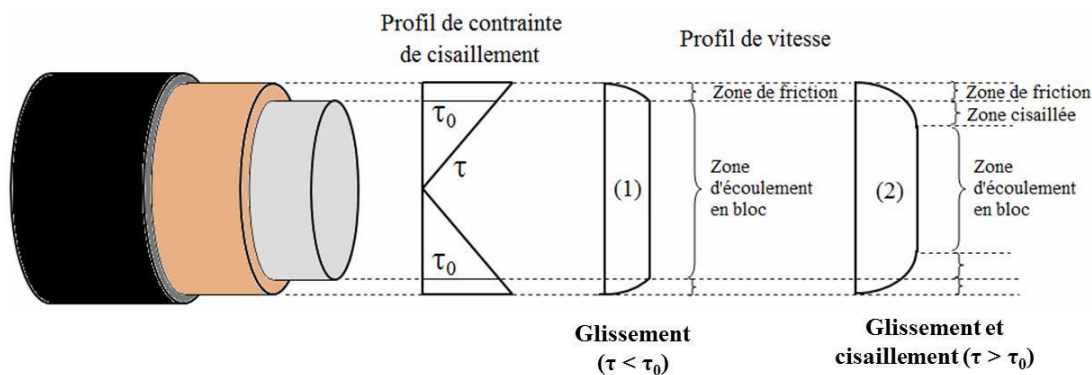


Figure I-4 - Ecoulement du béton dans les tuyaux de pompage [4, 3].

I.2.2.1 Tribomètre à cylindres coaxiaux

Un tribomètre à cylindres coaxiaux en utilisant le bâti du rhéomètre du LCPC a été proposé par Kaplan [4] pour mesurer les paramètres de l'interface béton-acier (seuil à l'interface τ_0 et constante visqueuse à l'interface η_0) [Figure I-5]. Ce tribomètre est composé d'une gamelle de 350 mm de diamètre et de 120 mm de hauteur et d'un cylindre de 150 mm de diamètre tournant dans la gamelle. Le béton est placé dans l'entrefer de 100 mm. La rotation du cylindre intérieur entraîne la formation d'une couche limite de coulis à l'interface acier-béton.

Les essais réalisés par Kaplan [4] sur un circuit-pilote, sur le rhéomètre et sur le tribomètre à cylindres coaxiaux lui ont permis d'établir une loi de comportement de la couche limite décrite dans l'équation [Eq. I-1]. La contrainte à l'interface $\tau_{surface}$ (en Pa) varie linéairement avec la vitesse relative de glissement v (m/s) :

$$\tau_{surface} = \tau_{0i} + \eta_i v \quad [\text{Eq. I-1}]$$

τ_{0i} est le seuil à l'interface (en Pa) et η_i la constante visqueuse (Pa.s/m).

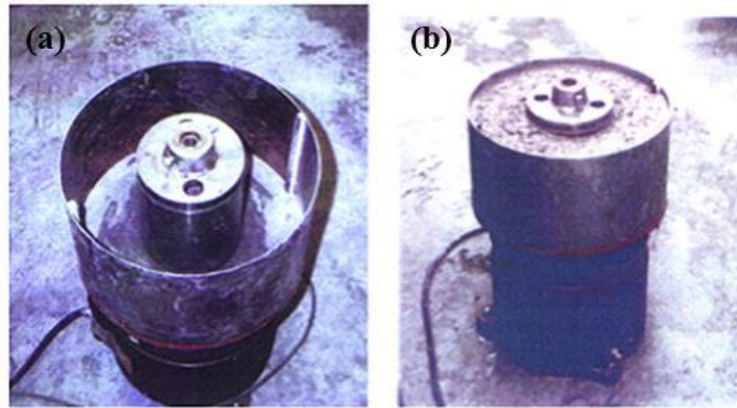


Figure I-5 - Tribomètre à cylindres coaxiaux développé par Kaplan : (a) tribomètre vide et (b) tribomètre rempli de béton [4].

D'après Kaplan [4], les pertes de pression lors du pompage sont dues principalement au cisaillement localisé dans la couche limite. Ceci permet d'expliquer le sens physique des paramètres à l'interface (le seuil de cisaillement et la viscosité). Le seuil de cisaillement permet de calculer l'effort minimal nécessaire pour refouler le béton dans le circuit et la constante visqueuse à l'interface est liée à l'épaisseur de la couche limite [Eq.I-2] :

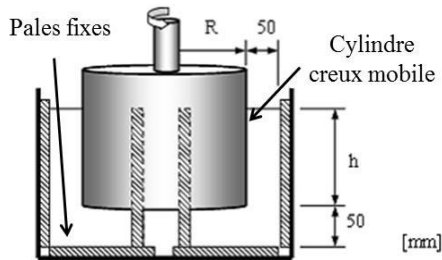
$$\eta_i = \frac{\mu_p}{e} \quad [\text{Eq.I-2}]$$

μ_p est la viscosité plastique de la pâte (Pa.s) et e l'épaisseur de la couche limite (m).

L'hypothèse émise par Kaplan sur la composition de la couche limite est qu'elle est constituée uniquement des grains inférieurs à 80 μm . Le calcul de son épaisseur de façon précise a présenté des difficultés, due à l'absence de données permettant sa mesure.

Pour mesurer les contraintes de frottement entre le béton frais et une paroi d'acier ou de caoutchouc (paroi du boyau de pompage), un tribomètre à béton a été adapté par Chapdelaine [2] au bâti du rhéomètre décrit dans [4] [Figure I-6]. L'agitateur en forme de H a été remplacé par un cylindre creux tournant à surface de caoutchouc et ainsi qu'un autre, de même géométrie, avec une surface en acier.

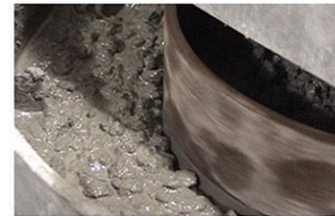
Chapdelaine [2] a admis la même hypothèse de Kaplan sur la couche limite. Il a décrit la couche limite par une couche lubrifiante formée en périphérie et composée de la pâte et d'une partie des particules fines provenant des granulats. La comparaison entre les paramètres d'interface mesurés avec le tribomètre en caoutchouc et celui en acier a montré que la contrainte de cisaillement à l'interface est plus élevée pour une paroi de caoutchouc. Ceci montre que les conditions d'interface influent sur l'écoulement du béton.



Croquis du tribomètre



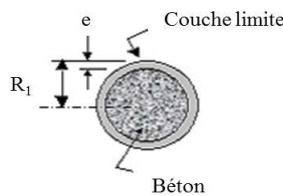
vue générale avec tribomètre en caoutchouc



vue de près avec tribomètre en acier en mouvement

Figure I-6 - Tribomètre fabriqué par Chapdelaine [2].

Dans son étude, Chapdelaine n'a pas défini une méthode de mesure de l'épaisseur de la couche limite. Il a utilisé l'équation [Eq.I-3] pour évaluer le pourcentage volumique de pâte P nécessaire pour former une couche limite d'épaisseur e d'environ $e = 1$ mm :



Boyau de pompage

$$P = \frac{(R_1)^2 - (R_1 - e)^2}{(R_1)^2} \quad [\text{Eq.I-3}]$$

Après les travaux de Kaplan [4] et Chapdelaine [2], Ngo [3, 47] a développé un tribomètre reprenant le principe du rhéomètre à cylindres coaxiaux. Le tribomètre développé lui a permis de réaliser des analyses de la composition de la couche limite formée sur plusieurs séries de bétons.

D'après Ngo [3], la formation de la couche limite peut s'expliquer à partir du processus de migration (ségrégation) des gravillons du béton. Le mouvement du cylindre tournant entraîne un dégagement des gros graviers vers l'extérieur de la zone cisailée. Des particules fines remplissent les vides laissés par les gros graviers en constituant une couche limite. En se basant sur cette hypothèse, il a estimé que la couche limite est la couche tapissant le fond du trou après le soulèvement du cylindre ou la couche concentrée au centre de la surface de l'échantillon après la rotation d'un disque à la surface du béton [Figure I-7]. Le prélèvement de la couche limite a été fait avec une cuillère. De même, son épaisseur a été mesurée d'une manière approximative en observant le film de la formation de cette couche au cours du temps. Les estimations ont montré que selon la composition du béton, l'épaisseur varie entre 1 et 9 mm. Après le prélèvement de la couche limite, Ngo [3] a suivi la méthode décrite dans la Figure I-7 pour étudier sa composition.

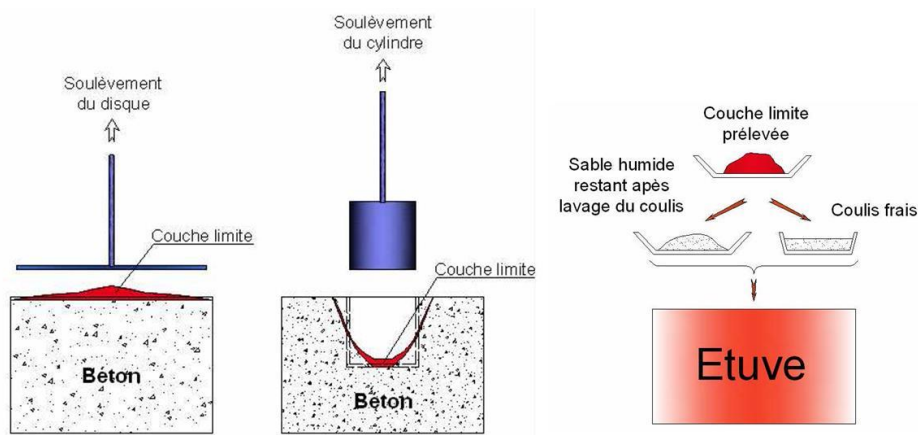


Figure I-7 - Prélèvement et procédure d'analyse de la couche limite d'après Ngo [3].

Les tribomètres utilisés pour mesurer le frottement à l'interface béton-paroi ou pour étudier la couche limite ne comportent pas tous un cylindre tournant dans une gamelle fixe contenant du béton. Un tribomètre à mouvement rectiligne de type plan/plan a été ainsi utilisé par Vanhove [5, 45] et Bouharoun [8, 48] pour réaliser des études à l'interface béton-paroi. Ce tribomètre a été également utilisé par Libessart [9] pour mettre en évidence des mécanismes intervenant à l'interface béton-huile-coffrage.

I.2.2.2 Tribomètre plan-plan

Afin de simuler les problèmes de frottement rencontrés lors de la mise en œuvre du béton dans les coffrages ou lors de son pompage dans le tuyau, le principe d'un tribomètre conçu pour l'étude des pâtes d'argiles [16, 49, 50] a été adapté par Vanhove [45] au cas du béton frais [Figure I-8]. Son principe consiste à faire glisser une plaque métallique représentant la paroi d'un coffrage entre deux porte-échantillons de diamètre 120 mm. La vitesse de la plaque peut atteindre 330 mm/s dans le sens de la traction et 320 mm/s dans le sens opposé. Le béton, placé dans les porte-échantillons, est mis sous pression à l'aide d'un vérin pneumatique. La pression

normale appliquée sur le béton peut atteindre 550 kPa. Les paramètres étudiés expérimentalement par Vanhove correspondent généralement aux conditions de chantier. En effet, la vitesse de déplacement de la plaque métallique utilisée correspond à une vitesse moyenne de mise en œuvre du béton dans les coffrages de 6 m/h (1,67 mm/s). De même, les pressions normales étudiées correspondent à celles exercées par le béton frais sur une hauteur de coffrage comprise entre 1 et 4 m environ ce qui correspond respectivement à des pressions de 30 à 90 kPa. Le coefficient de frottement entre le béton et la plaque est obtenu à partir de la loi de Coulomb en faisant le rapport entre la force normale appliquée sur le béton et la force de frottement entre le béton et la plaque.

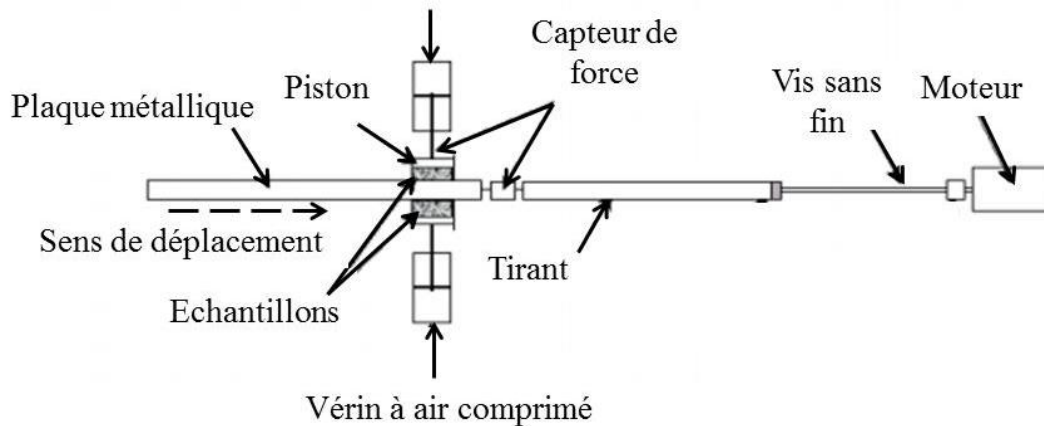
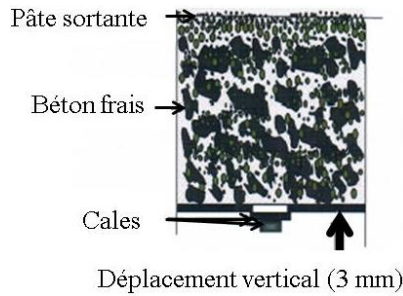


Figure I-8 - Schéma de principe du tribomètre plan/plan développé par Vanhove [5].

De même, le tribomètre plan/plan développé par Vanhove, lui a permis d'étudier l'influence de la pression normale et des paramètres d'interface tels que la rugosité de la plaque et la vitesse de glissement sur le frottement à l'interface [44]. Nous allons voir dans la section suivante qu'à partir des résultats obtenus sur ce tribomètre, différents modèles phénoménologiques à l'échelle microscopique ont été proposés.

Bouharoun [8] a utilisé l'appareil développé par Vanhove pour étudier l'influence de la formulation du béton sur le comportement tribologique à l'interface béton-coffrage. Après un essai de frottement à une vitesse de glissement constante, la couche proche de la plaque métallique est extraite en plaçant le porte-échantillon verticalement sur une table, et en poussant le fond mobile de 3 mm. Le matériau sortant du porte-échantillon est ensuite prélevé à l'aide d'une raclette. Avec cette méthode, une couche d'épaisseur inférieure à 3 mm ne peut être extraite. De plus, la présence des granulats de quelques millimètres de diamètre empêche un prélèvement plus important. L'épaisseur h de la couche récupérée a été estimée en mesurant sa densité γ [Eq.I-4]. Cette épaisseur varie entre 1 et 2 mm. Après son prélèvement, le mélange récolté a été mis en étuve. Ensuite, l'analyse granulométrique du matériau séché a été réalisée.



$$h = \frac{m}{\gamma \pi r^2} \quad [\text{Eq.I-4}]$$

m est la masse de la couche récupérée et r le rayon du porte-échantillon.

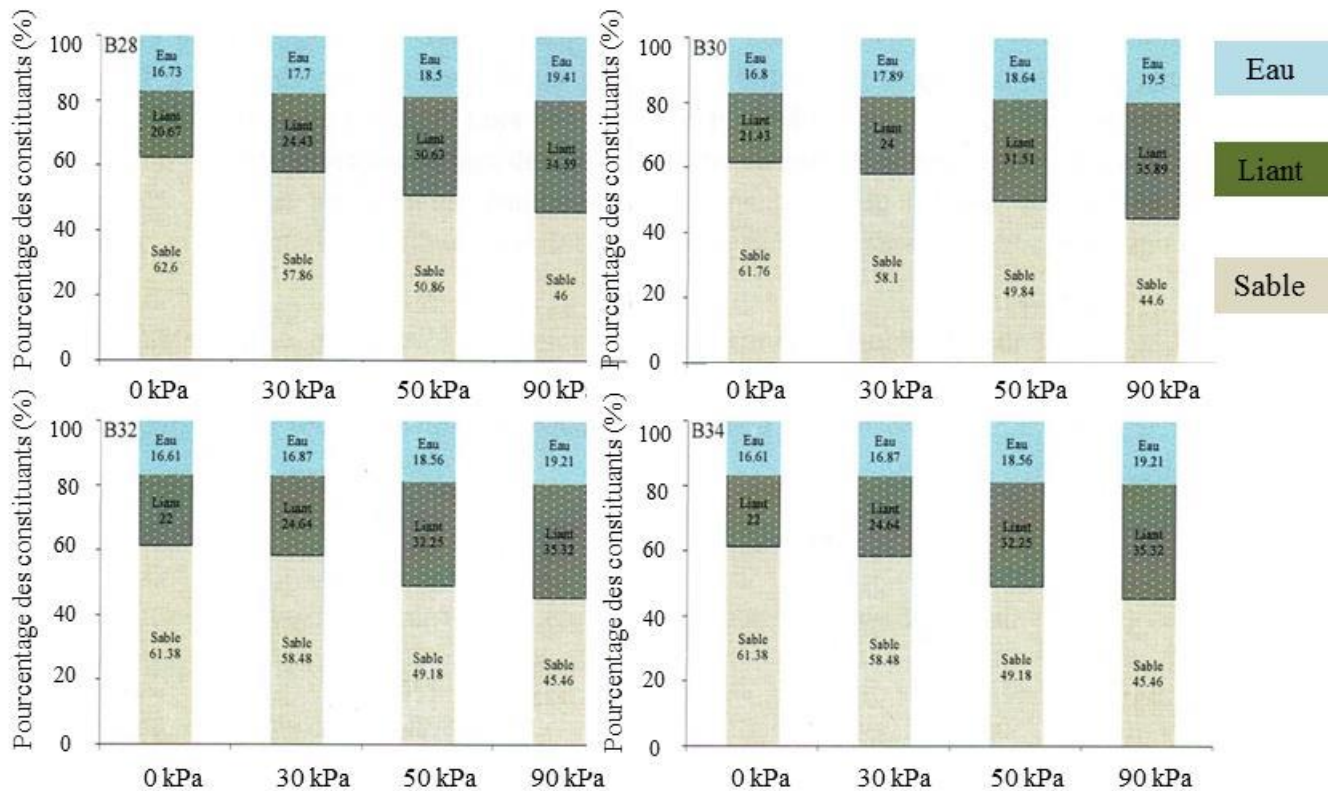


Figure I-9 - Proportion des constituants du mélange extrait pour quatre bétons [8].

Quatre bétons B28, B30, B32 et B34 ayant respectivement 28%, 30%, 32% et 34% du volume de pâte ont été utilisés. Les résultats ont montré que l'augmentation de volume de pâte et de la pression normale engendre un accroissement de la quantité des fines à l'interface et par conséquent, une augmentation de l'épaisseur de la couche d'interface [Figure I-9].

I.3 Etude à l'interface d'une paroi rugueuse

Les caractéristiques d'une paroi sont des paramètres essentiels susceptibles d'influencer le frottement entre les surfaces en contact et le comportement d'un milieu près de la paroi. Le principal paramètre caractérisant une paroi est sa rugosité. Celle-ci correspond à une légère

inégalité de la surface « aspérités » [voir Annexe1]. Nous présentons dans cette section les travaux de recherche concernant le cisaillement du béton frais ou d'un milieu granulaire sec sur une paroi rugueuse.

I.3.1 Béton frais-paroi rugueuse: tribomètre plan-plan

Les travaux précédemment présentés ont mis en évidence l'existence d'une couche limite au niveau de la paroi. Certains se sont également penchés sur sa composition. Il aurait été intéressant de décrire les phénomènes intervenant à l'interface en faisant varier des paramètres de l'interface. Mais, la réalisation d'une telle étude nécessite une analyse à l'échelle des grains constituant la couche limite.

Afin d'améliorer la mise en place des bétons dans les coffrages, les phénomènes intervenant à l'interface béton-paroi ont été étudiés par Vanhove [5, 44] sur le tribomètre plan-plan. Les essais ont été réalisés sur un béton autoplaçant frottant contre une plaque métallique. La plaque métallique a été confectionnée à partir des caractéristiques des parois de coffrages. Les gammes des pressions appliquées sur le béton, des vitesses de glissement de la plaque et les rugosités retenues ont visé à couvrir celles rencontrées sur chantier. Les rugosités R_a [51] de plaques choisies sont de $0,3 \mu\text{m}$ et de $1,6 \mu\text{m}$.

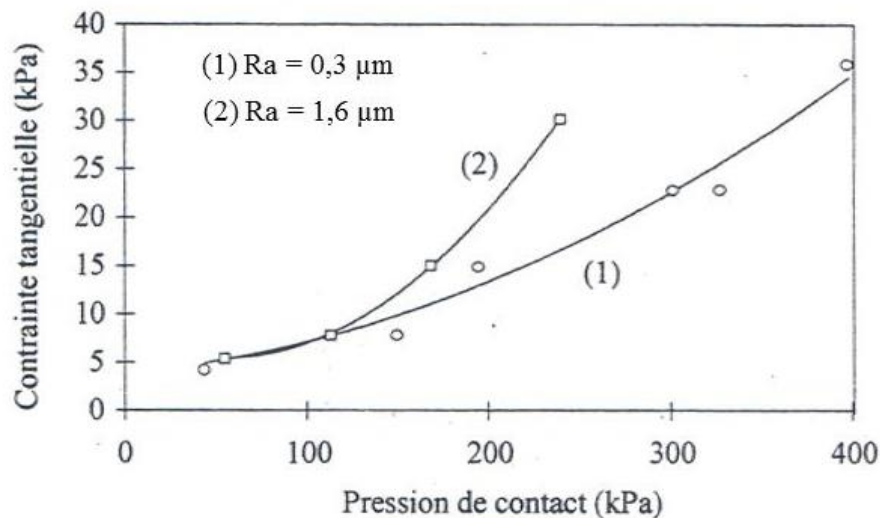


Figure I-10 - Evolution de la contrainte de frottement en fonction de la pression de contact pour un BAP (vitesse = $2,5 \text{ mm/s}$; (1) $R_a = 0,3 \mu\text{m}$ et (2) $R_a = 1,6 \mu\text{m}$) [5, 44].

Les résultats obtenus en variant la pression normale (pression de contact) ont montré que la contrainte de frottement croît d'une façon non linéaire avec la pression de contact [Figure I-10]. Sur cette courbe, il est possible d'identifier deux comportements différents séparés par une pression critique. Une pression critique a été estimée à environ 140 kPa pour une rugosité R_a de la plaque de $0,3 \mu\text{m}$ et à environ de 110 kPa pour une rugosité R_a de $1,6 \mu\text{m}$ [5].

La contrainte de frottement pour une plaque de rugosité de $1,6 \mu\text{m}$ est plus élevée que celle pour $0,3 \mu\text{m}$. Pour une pression inférieure à la pression critique du béton, un cisaillement dans la couche limite entraîne de faibles contraintes de frottement. Lorsque la pression appliquée sur le béton est supérieure à la pression critique, le béton commence à suivre un comportement granulaire. Les grains viennent au contact de la plaque métallique conduisant à des contraintes de frottement plus élevées. Vanhove a supposé que les deux types d'évolution de la courbe traduisent des frottements différents.

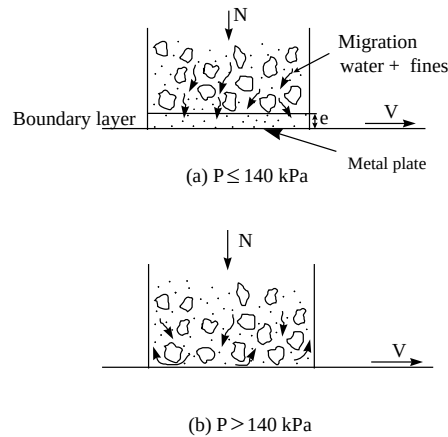


Figure I-11 - Présentation schématique de l'interface béton-plaque acier ($R_a = 0,3 \mu\text{m}$) [44].

En effet, pour une rugosité de la plaque faible ($0,3 \mu\text{m}$) et une pression normale $P < 140 \text{ kPa}$, [Figure I-11-a], le cisaillement s'opère principalement entre la plaque et la couche limite. Quand les pressions augmentent ($P > 140 \text{ kPa}$), Vanhove a supposé que la phase liquide initialement emprisonnée à l'interface migre dans l'échantillon sous l'effet de la pression [Figure I-11-b]. Le matériau en contact avec la surface métallique va alors suivre un comportement granulaire lors du cisaillement, c'est ce qui explique l'augmentation du coefficient du frottement.

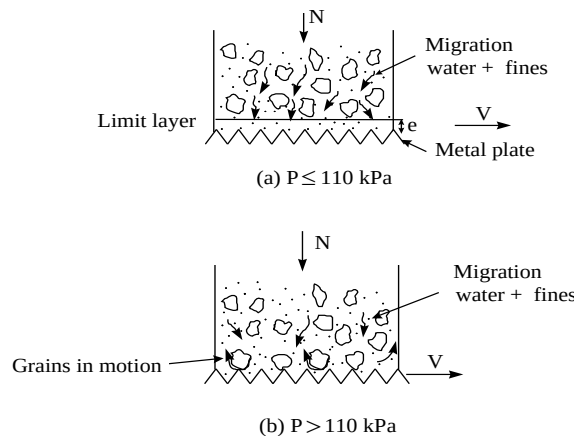


Figure I-12 - Présentation schématique de l'interface béton-plaque acier ($R_a = 1,6 \mu\text{m}$) [44].

Lorsque la plaque a une rugosité de $1,6\text{ }\mu\text{m}$, le coefficient de frottement entre le béton et la plaque est sensiblement égal au cas précédent pour des pressions inférieures à 110 kPa . La rugosité R_t est de $13,6\text{ }\mu\text{m}$, ce qui laisse la possibilité à une partie des éléments de la couche limite de se loger dans les aspérités. Le cisaillement se fait principalement dans cette couche.

Pour des pressions supérieures à 110 kPa , une partie de la couche limite va migrer vers des zones moins sollicitées [Figure I-12-b]. Les grains de sable ou les gravillons vont être directement en contact avec les sommets des aspérités. La force exercée par les sommets lors du déplacement de la plaque va entraîner une rotation de ces derniers, d'où une dissipation d'énergie importante. Il en résulte une augmentation plus rapide du coefficient de frottement et une usure de la surface métallique. En effet après une série d'essais qui correspond à environ 70 passages du béton sur la plaque, les grains ont à la fois élargi et approfondi les aspérités. Un R_a de $2\text{ }\mu\text{m}$ et un R_t [51] de $26,8\text{ }\mu\text{m}$ ont été trouvés.

Expérimentalement, la difficulté pour décrire ou mettre en évidence les phénomènes de l'interface matériau cisailé-paroi rugueuse réside dans l'instrumentation du contact à toutes les échelles des matériaux du contact. En effet, s'il est facile d'instrumenter l'appareil de mesure (capteur de force,...) il est plus difficile d'instrumenter les matériaux en contact et plus particulièrement dans le cas de la couche limite du fait des échelles des particules du ciment et du filler et de son confinement entre la plaque en acier et le béton. En effet, Schwendenmann [52, 53] a développé des instruments de mesure pour étudier le béton autoplaçant lors de sa mise en oeuvre dans les coffrages. Les méthodes utilisant les rayonnements ionisants ont été appliquées. Les résultats ont montré qu'il est possible d'observer une diminution de la concentration d'agréats près de la paroi (effet de paroi) [Figure I-13].

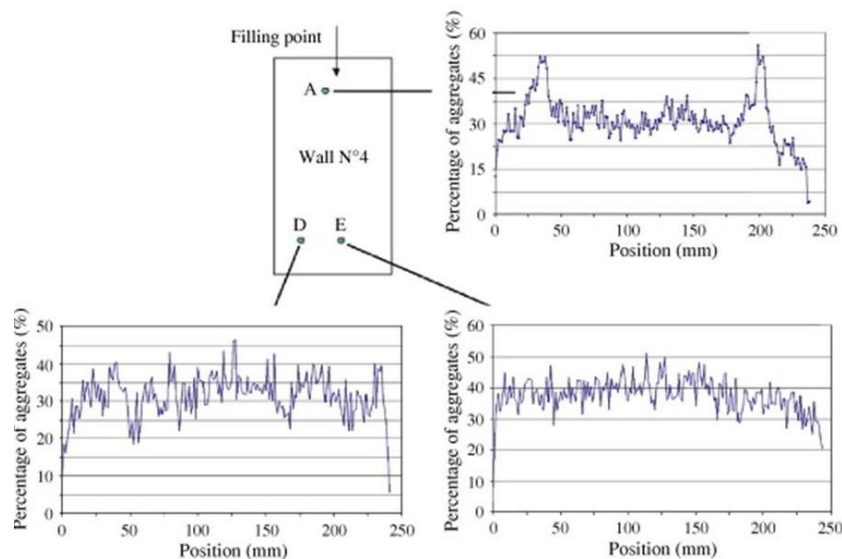


Figure I-13 - Concentration d'agréats en fonction de la distance par rapport à la paroi [53].

Une autre possibilité pour comprendre des phénomènes de l'interface matériau-paroi rugueuse est la simulation à l'échelle des grains de l'interface. Cette simulation peut se faire soit par des dispositifs expérimentaux, soit par la modélisation numérique. Nous présentons par la suite, les principales études qui ont été réalisées par ces deux approches sur des milieux granulaires secs.

I.3.2 Milieu granulaire-paroi rugueuse: modèle analogique

I.3.2.1 Interface pâte d'argile-paroi rugueuse

Un tribomètre plan-plan adapté aux frottements rencontrés lors d'une extrusion a été conçu par Djelal [5, 8]. Ce tribomètre a été utilisé pour étudier dans diverses conditions le frottement d'échantillons de pâte d'argile pressée contre des plaques de nature différente. Les résultats obtenus ont montré que la rugosité a une influence non négligeable sur la contrainte de frottement [Figure I-14]. En effet, quelle que soit la teneur en eau, la courbe décrivant la variation de la contrainte tangentielle à l'interface en fonction de la rugosité présente un minimum pour une rugosité de $1.2 \mu\text{m}$ (rugosité critique). Cette valeur est de l'ordre de la dimension moyenne de la particule de kaolin ($1 \mu\text{m}$). De plus, la contrainte tangentielle à l'interface est aussi élevée pour une rugosité inférieure à la taille de la particule que lorsqu'elle lui est dix fois supérieure. Pour une rugosité supérieure à une dizaine de microns, la rugosité ne semble plus affecter le frottement.

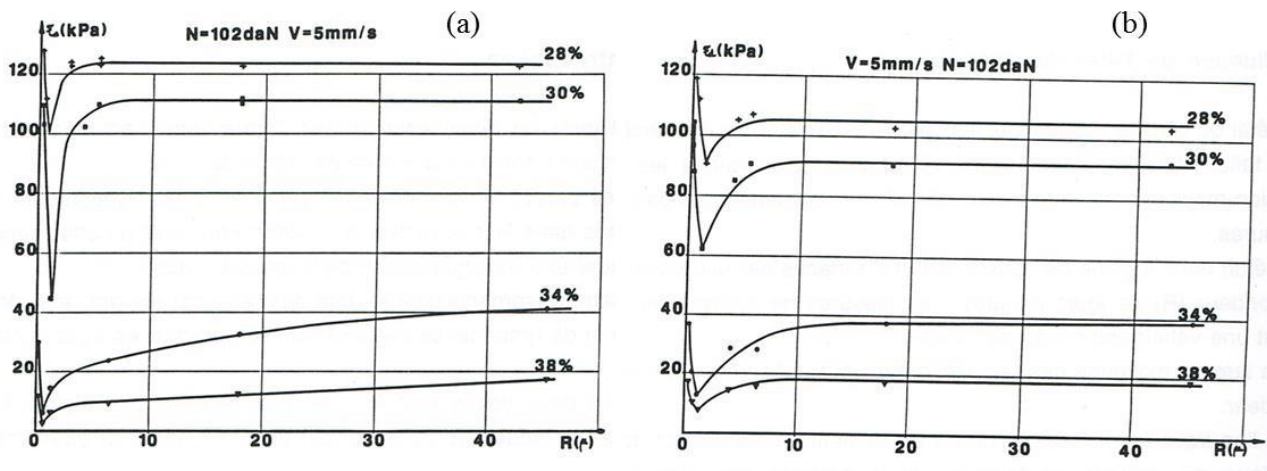


Figure I-14 - Variation des contraintes tangentielles statique (a) et dynamique (b) en fonction de la rugosité pour différente teneur en eau [49].

Pour comprendre en quoi les valeurs du diamètre des particules et de la rugosité ont une influence sur le frottement, un modèle simple a été construit [Figure I-15].

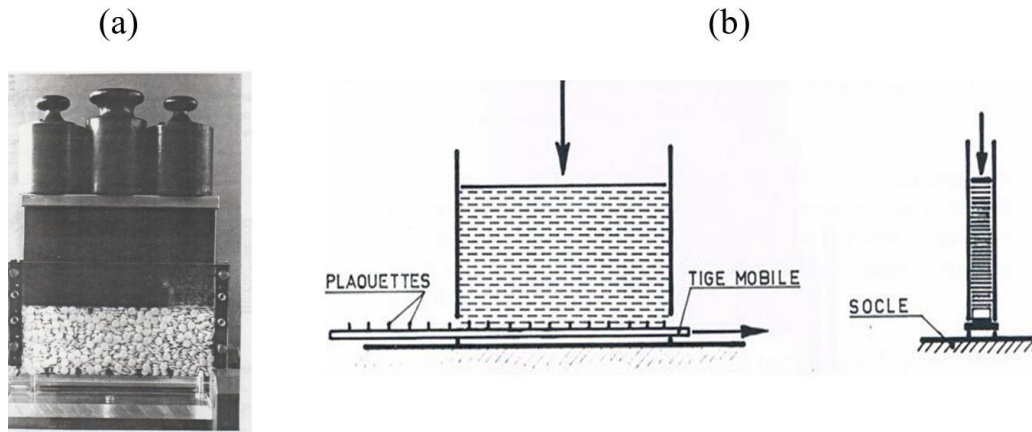


Figure I-15 - Dispositif conçu par Djelal [49]: (a) Montage expérimental et (b) Principe du schéma expérimental.

Le principe du modèle analogique consiste à simuler les aspérités de la plaque par des plaquettes fixées perpendiculairement sur un support rectiligne et les particules par des disques en matière plastique indéformable. Le montage est constitué de deux parois de plastique transparent montées sur un socle [Figure I-15-b]. Une tige coulissante est située à la base du montage. Les particules introduites par la partie supérieure sont pressées contre la tige coulissante par une pièce métallique portant des poids. L'ensemble de la pièce métallique et les poids simule l'effort normal. Afin de cisailier le milieu et de mesurer la force exercée sur la tige, le dispositif est monté sur le tribomètre. Les essais ont été filmés et photographiés. Les mécanismes les plus fréquents ont été ainsi représentés [16, 49].

Trois cas ont été étudiés [Figure I-16] :

- Cas 1 : Les intervalles entre les plaquettes sont très inférieurs au diamètre du disque, et la hauteur des plaquettes est inférieure à l'épaisseur du disque.
- Cas 2 : Les intervalles entre les plaquettes sont égaux au diamètre du disque, et la hauteur des plaquettes est égale à l'épaisseur du disque. Ce cas représente la rugosité critique.
- Cas 3 : Les intervalles entre les plaquettes sont très largement supérieurs au diamètre du disque, et la hauteur des plaquettes est largement supérieure à l'épaisseur du disque.

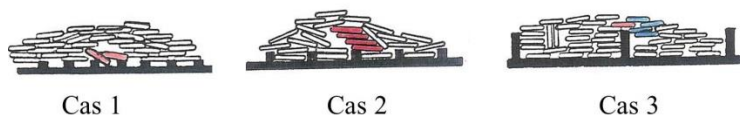


Figure I-16 - dispositions des plaquettes sur la tige mobile [49].

Les résultats obtenus ont permis de mettre en évidence certains phénomènes à l'interface liés à la rugosité de la plaque. Lorsque la profondeur des aspérités est égale à celle de la taille de la particule (rugosité critique), la contrainte de frottement est minimale. De même, les observations des mécanismes ont permis de comprendre comment la profondeur des rainures de la surface par rapport à la taille de la particule intervient sur le frottement.

En effet, la force de frottement a pour origine l'énergie nécessaire pour vaincre les combinaisons de frottement entre les particules indéformables, surtout les rotations qui ont été observées d'autant plus fréquemment que la rugosité R s'éloigne de la taille moyenne de la particule par voie inférieure ou supérieure. Dans les cas où les dimensions des plaquettes sont largement supérieures ou inférieures à celles des disques, le milieu est non ordonné et les disques subissent des rotations. Par contre, dans le cas où les disques en plastique ont la même dimension que les caractéristiques de la baguette le milieu est arrangé et donc une faible énergie est nécessaire pour vaincre les combinaisons de frottement entre les particules.

C'est en se basant sur les mécanismes observés par Djelal, que Vanhove [5] a proposé les modèles phénoménologiques présentés précédemment pour expliquer les phénomènes mis en jeu à l'interface béton frais – paroi.

I.3.2.2 Ecoulement granulaire-paroi rugueuse

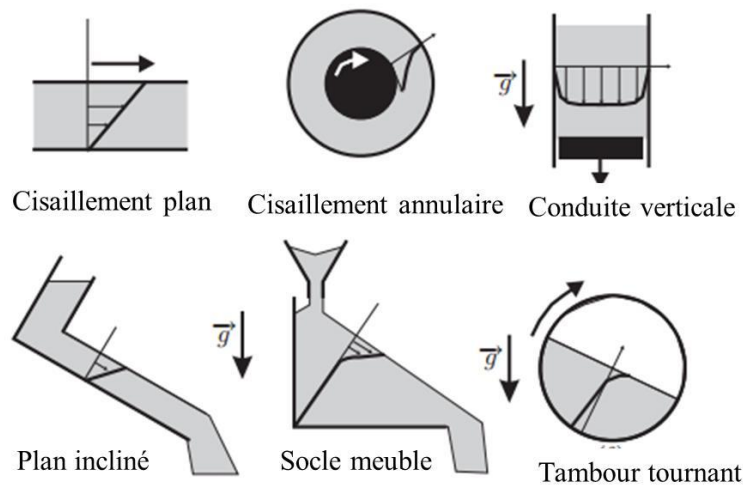


Figure I-17 - Six géométries d'écoulement [54].

Pour répondre à certaines problématiques liées aux facteurs de risques naturels (avalanches, séismes, glissement de terrain) ou à la vidange d'un silo, les propriétés des écoulements granulaires ont fait l'objet de divers études à la fois expérimentales et numériques [20, 21, 54, 55, 56, 57, 58, 59, 60]. Les problématiques liées à l'écoulement granulaire ont été étudiées dans six configurations présentées dans la **Figure I-17**. Seules les principales études liées à l'influence de la rugosité de la paroi sur le comportement de l'écoulement seront

présentées dans ce chapitre. Nous avons choisi de présenter les études réalisées sur les deux premières configurations (cisaillements plan et annulaire) dans la section suivante de la modélisation numérique. Tandis que les autres configurations font partie de la section actuelle.

Dans la littérature, il existe plusieurs travaux réalisés sur un socle meuble [**Figure I-17**]. Dans ce cas, les grains s'écoulent sur un substrat composé par le même type de grains en écoulement [54, 61, 62]. Métayer [63] a étudié l'influence de l'état des parois (rugosité) sur l'écoulement d'un milieu granulaire. L'essai consiste à introduire des grains de diamètre 500 μm entre deux plaques verticales de verre séparées d'une distance de 17d. Deux types des parois ont été utilisés : lisses et rugueuses. Lorsque les grains sont introduits de façon continue, un écoulement apparaît à la surface libre de l'empilement [**Figure I-18-a**].

La **Figure I-18-b** présente les profils de vitesse obtenus en utilisant des parois lisses ou des parois rugueuses pour un même angle d'écoulement. La mesure de la vitesse moyenne dans le sens de l'écoulement des grains situés à la surface libre a montré que les grains qui sont au contact des parois lisses ont une vitesse moyenne inférieure d'environ 10% au reste de l'écoulement [**Figure I-18-b**]. Tandis qu'une diminution de la vitesse moyenne des grains au contact avec les parois rugueuses d'environ 40% par rapport au centre de la cellule a été notée [**Figure I-18-b**]. De même, dans le cas des parois rugueuses, les grains situés à la surface présentent un profil de vitesse plus nettement parabolique que lorsque les parois sont lisses [**Figure I-18-b**]. Ceci montre qu'une rugosité plus élevée de la paroi entraîne une diminution importante de la vitesse moyenne des grains.

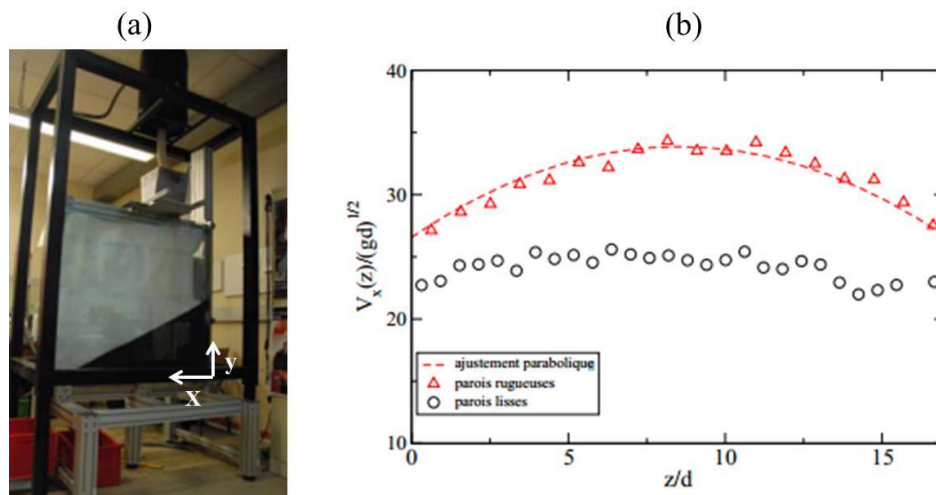


Figure I-18 - Cellule d'écoulement et (b) Vitesse moyenne des grains situés à la surface libre pour deux types des parois [63].

D'autres auteurs ont étudié les jets granulaires, c'est-à-dire le flux de masse à travers un orifice [64, 65, 66]. En 2012, Prado [67] a étudié l'effet de la rugosité des parois d'un entonnoir sur le comportement en sortie d'un jet granulaire. Le milieu granulaire est composé de micro-

billes de verre de diamètre d . Pour réaliser les jets granulaires, un entonnoir de diamètre de sortie $D0$ a été utilisé. Les billes du milieu granulaire sont versées dans l'entonnoir de la partie supérieure et ensuite l'écoulement à la sortie a été filmé.

La rugosité a été imposée en collant sur les parois de l'entonnoir une couche de micro-billes de verre de taille caractéristique $r \approx 300 \mu\text{m}$. Les résultats obtenus ont montré que la transition d'un régime dans lequel un jet granulaire se comporte comme un fluide incompressible, à un régime dans lequel le jet se disperse en sortie de manière similaire à un gaz se fait en augmentant la rugosité des parois [Figure I-19]. En effet, la rugosité impose des fluctuations de vitesse plus importantes donc une agitation et une dispersion des billes à la paroi.

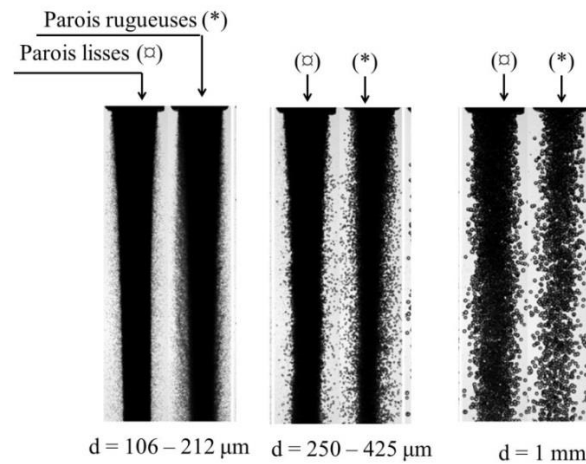


Figure I-19 - Effet de la rugosité des parois sur le comportement en sortie d'un jet granulaire de diamètre $D0 = 14 \text{ mm}$ [67].

D'autres expériences d'écoulement granulaire en conduite ont montré que la largeur de la zone cisailée dépend fortement de la rugosité de la paroi [68] et que la vitesse des grains à la paroi d'une conduite ne correspond pas nécessairement à la vitesse des billes au cœur de la conduite [69, 70, 21] [Figure I-20].

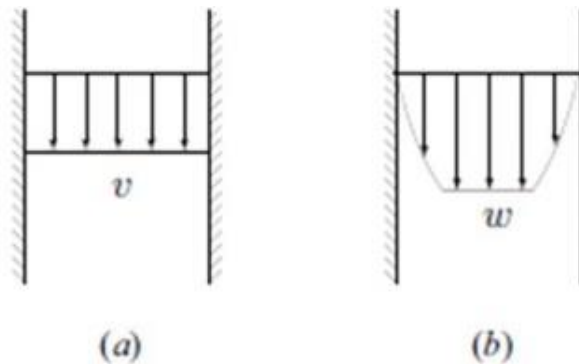


Figure I-20 - Ecoulement granulaire dans un tube : (a) parois lisses et (b) parois rugueuses [68].

La rhéologie des écoulements granulaires à surface et à bords libres sur un plan rugueux incliné a fait l'objet d'études expérimentales [71, 72] et numériques [73]. Nous avons choisi de présenter le travail de Goujon [74, 75] lié aux comportements des grains sur une paroi rugueuse inclinée.

Le plan rugueux est réalisé en collant une monocouche de billes de verre monodisperses sur un support. Le collage a été fait d'une manière aléatoire. Les grandeurs caractéristiques du plan rugueux sont le diamètre de billes collées λ et la compacité du plan c . La compacité du plan est définie comme le rapport de la surface occupée par les billes divisée par la surface totale. L'angle d'inclinaison θ du plan est contrôlé. Le matériau granulaire est constitué de billes en verre monodisperses. Lorsqu'il s'écoule sur la pente, il s'étale et s'arrête en laissant un dépôt. L'épaisseur h_{stop} du dépôt est mesurée. Les résultats obtenus ont montré qu'il existe un diamètre d_c à partir duquel l'épaisseur du dépôt h_{stop} est maximale [Figure I-21-b]. Le diamètre d_c est indépendant de l'angle d'inclinaison du plan rugueux et il dépend fortement du diamètre des billes collées et de la compacité c . En effet, lorsque $d > \lambda$, les billes sont plus grandes que les rugosités du plan λ et que les espacements entre les billes collées sur le plan. La rugosité relative est donc faible et les billes coulent facilement. De même, pour $d < \lambda$ le remplissage des trous du plan par les petites billes diminue la rugosité du plan, et permet aux petites billes de s'écouler plus facilement sur ce plan. En revanche lorsque la rugosité relative est proche de 2, l'écoulement des billes est plus difficile et l'épaisseur du dépôt est maximale.

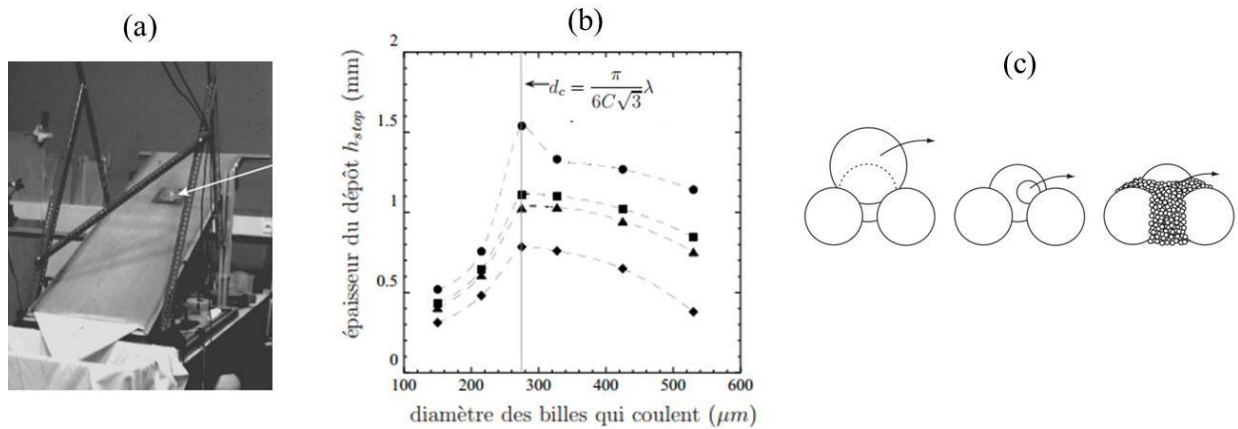


Figure I-21 - (a) dispositif expérimental ; (b) épaisseur du dépôt pour différentes angles d'inclinaison ($\lambda = 425 \mu m$, $c = 0.55$ et espacement moyen entre les billes collées = $120 \mu m$) et (c) de gauche à droite $d \gg d_c$; $d \approx d_c$ et $d \ll d_c$ [75].

I.3.3 Milieu granulaire-paroi rugueuse: modélisation numérique discrète

Les exemples présentés précédemment sur l'interface milieu granulaire-paroi rugueuse sont des travaux expérimentaux réalisés sur des modèles analogiques. Nous avons dit que l'étude de l'influence de la rugosité de la paroi sur le comportement granulaire à l'interface a été réalisée

également par la modélisation numérique. Nous présentons ici les principaux travaux menés par la modélisation numérique discrète sur le cisaillement d'un milieu granulaire sur une paroi rugueuse (cisaillement plan ou annulaire **Figure I-17**).

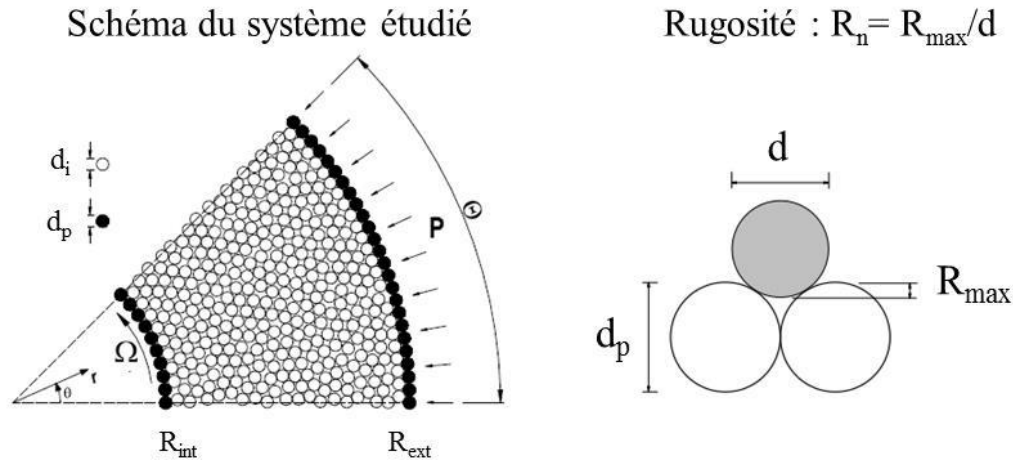


Figure I-22 - Système étudié par Koval [76, 77].

Koval [76] a étudié le comportement granulaire à l'interface d'une paroi rugueuse à l'aide d'une géométrie annulaire de type couette [78, 79, 77]. L'étude a été réalisée en 2D. Les efforts de cisaillement sont transmis aux matériaux par un mouvement de rotation imposé par la paroi interne. Le matériau est simulé par des disques de diamètres d_i et soumis à des contraintes radiales contrôlées. Pour éviter la cristallisation, les diamètres des grains ont une distribution uniforme sur un intervalle $[d - 0,2d ; d + 0,2d]$. La rugosité de la paroi interne et celle de la paroi externe est modélisée par des disques de diamètre d_p . La paroi externe n'a pas de mouvement angulaire. Afin d'appliquer des conditions périodiques, un secteur angulaire a été traité [**Figure I-22**].

Pour un régime quasi-statique, les résultats ont montré [**Figure I-23**] :

- Une valeur plus forte de la rugosité conduit à une épaisseur cisailée (λ) plus importante [**Figure I-23-a**].
- Une augmentation nette du taux de cisaillement près de la paroi a été observée pour une rugosité à la paroi plus importante [**Figure I-23-b**].
- La discontinuité entre la vitesse du matériau près de la paroi (glissement) et la vitesse maximale dans le milieu granulaire est plus forte pour une rugosité de la paroi plus faible [**Figure I-23-c**].
- La forme des profils de vitesse dépend de la rugosité de la paroi [**Figure I-23-c**].

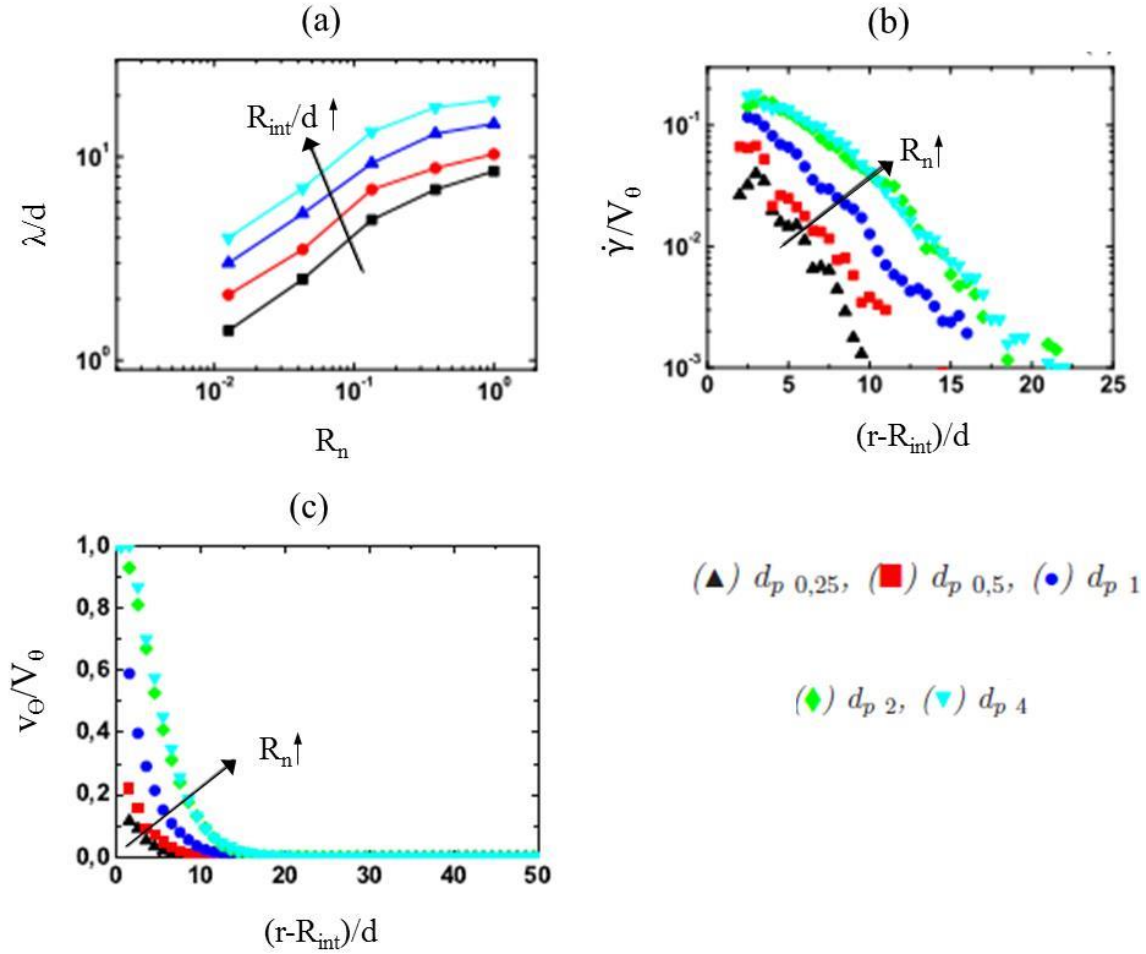


Figure I-23 - Influence de la rugosité à la paroi sur l'épaisseur de la zone cisailée (λ) pour différentes géométries annulaires (a), sur le taux de cisaillement normalisé par la vitesse à la paroi V_0 (b) et sur les profils de vitesse normalisée par la vitesse à la paroi V_0 (c) [76].

En 2004, Da Cruz [80] a étudié l'effet de la rugosité de la paroi sur le comportement d'un matériau granulaire cisailé. Le milieu granulaire est constitué d'une assemblée de n disques (2D). L'étude a été réalisée par la modélisation discrète d'un essai de cisaillement plan et de cisaillement annulaire. Seuls les résultats de l'influence de la rugosité sur le comportement granulaire près de la paroi d'un matériau cisailé par cisaillement plan sans gravité sont présentés ici [Figure I-24-a].

Dans la géométrie de cisaillement plan, le matériau est cisailé entre deux parois rugueuses parallèles distantes de H . Une des parois est fixée et l'autre se déplace à une vitesse imposée V . Des conditions aux limites périodiques sont appliquées selon la direction de l'écoulement. La pression normale exercée par la paroi mobile sur le matériau est contrôlée durant la simulation. La rugosité des parois fixe et mobile est modélisée par des disques collés sur les parois.

La [Figure I-24-b] présente les résultats des simulations qui ont été faites pour tester l'influence de la rugosité, en prenant des grains collés aux parois deux fois plus petits ($R=0,5$) ou deux fois plus grands ($R=2$) que la taille du diamètre moyen du milieu. La vitesse de glissement près de la paroi augmente lorsque R diminue. Près de la paroi, une discontinuité du profil est observée dans le cas de R égale à 1 et 0,5. Les particules proches de la paroi restent piégées et ont donc une vitesse relative nulle. Toutefois le système reste homogène au cœur.

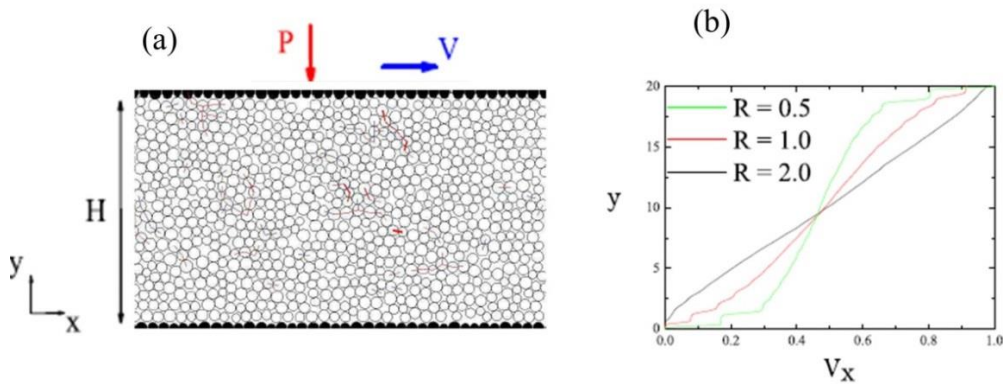


Figure I-24 - (a) Géométrie de cisaillement plan (a) et (b) Influence de la rugosité sur les profils de vitesse [80].

I.3.4 Diverses études

Plusieurs chercheurs se sont intéressés à l'influence de la rugosité d'inclusion de renforcement sur le comportement global d'interface et sur l'épaisseur de la zone d'interface mise en jeu.

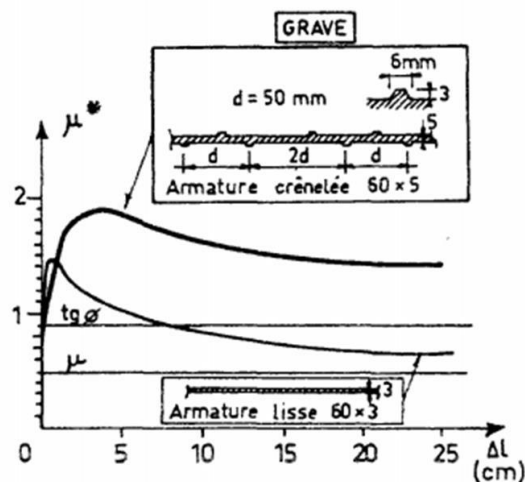


Figure I-25 - Influence de l'état de surface de l'inclusion sur le coefficient du frottement apparent d'après Schlosser [81] .

Schlosser et Guilloux [81] ont mis en évidence par des essais d'extraction d'armatures lisses et nervurées, dans des ouvrages en terre armée que le comportement d'interface est influencé par la rugosité des armatures (lisse ou crénelée) : le coefficient de frottement apparent au pic est d'autant plus important que l'armature est rugueuse [Figure I-25]. La valeur du coefficient de frottement apparent résiduel est proche de la valeur au pic si l'armature est rugueuse ou proche de la moitié de sa valeur au pic dans le cas d'armature lisse. Les mêmes résultats sur le coefficient de frottement au pic ont été trouvés par Yoshimi et Kishida [82] sur le cisaillement annulaire. Uesugi et Kishida [83] par des essais de cisaillement simple ont mis en évidence l'existence d'une rugosité critique au-delà de laquelle le coefficient de frottement apparent au pic est constant [Figure I-26-a]. Ce résultat a été justifié par le fait que, pour une rugosité faible de l'inclusion (barre), le glissement a lieu au niveau de l'interface, mais pour une rugosité plus importante, le glissement a lieu dans la masse au-dessus de l'interface, mettant ainsi en jeu le coefficient de frottement interne du matériau granulaire.

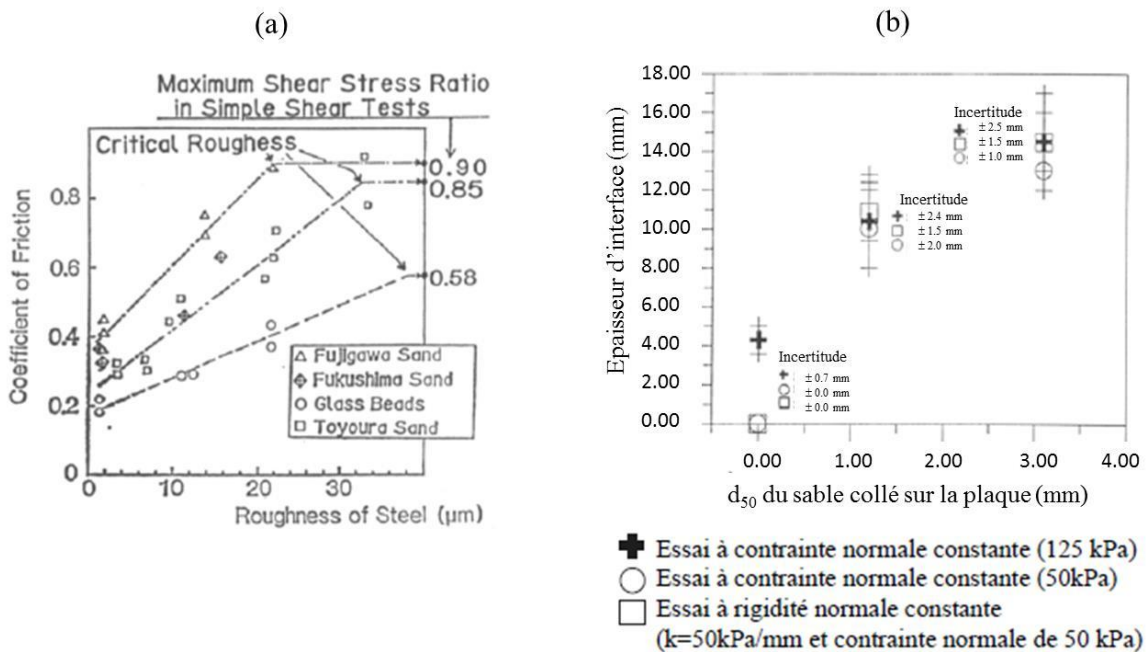


Figure I-26 - (a) Evolution du coefficient de frottement au pic en fonction de la rugosité (Uesugi et Kishida [83]) et (b) Influence de la rugosité sur l'épaisseur d'interface (b) (Hassan [14]).

Hassan [14] a mené une riche étude tant expérimentale que numérique du comportement à l'interface par le biais d'essai de cisaillement direct à contrainte de confinement constante ou raideur constante. Il a montré que l'épaisseur de l'interface est plus importante lorsque la rugosité normalisée l'est [Figure I-26-b]. Son épaisseur est de l'ordre de 0 à 1 diamètre pour une inclusion lisse et de l'ordre de 6 à 7 pour inclusion rugueuse en contact avec un milieu lâche. D'autre part, il a étudié de manière quantitative le champ de rotation des particules. Les résultats

ont mis en évidence des rotations très importantes uniquement dans le cas d'une inclusion rugueuse dans une zone proche de l'inclusion.

Hryciw et Irsyam [84] ont étudié l'influence de la géométrie de l'interface par des essais de cisaillement plan mettant en jeu des inclusions présentant des nervures [Figure I-27-a]. Ils ont montré que la géométrie des nervures carrées favorise la formation d'une zone passive, ayant pour conséquence une augmentation de la résistance au cisaillement [Figure I-27-b]. Une autre géométrie caractérisée par la hauteur et l'angle des nervures a été étudié par Dove et Jarret [85] sur le cisaillement direct [Figure I-27-c]. Il apparaît que l'angle de la nervure (asperity angle Figure I-27-c) et sa hauteur (asperity height Figure I-27-c) favorisent la formation d'une zone passive.

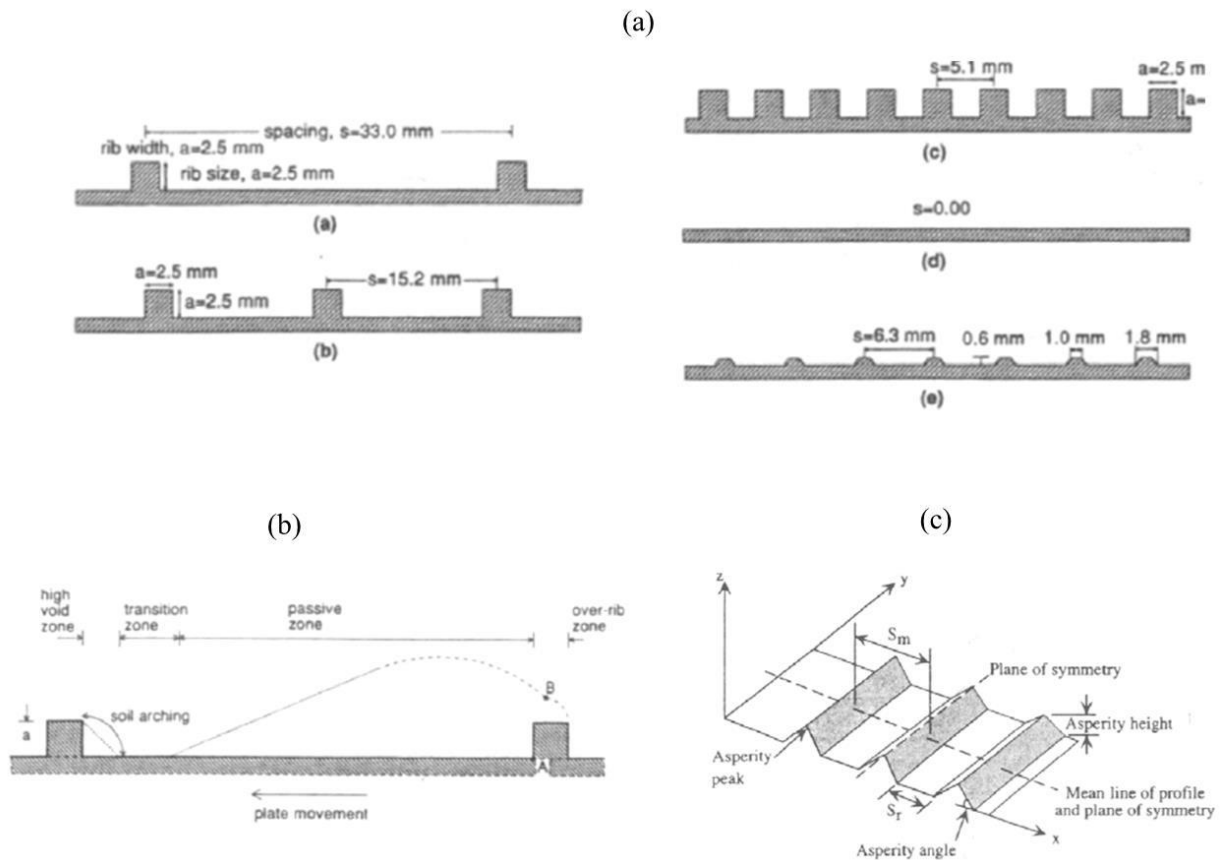


Figure I-27 - (a) Géométrie des inclusions étudiées d'après Hryciw et Irsyam [84], (b) zone passive entre deux nervures selon Hryciw et Irsyam [84] et (c) Géométrie des inclusions étudiées d'après Dove et Jarrett [85].

Les différents modèles de milieu continu ont été ainsi utilisés pour les études des localisations de déformation et du comportement d'interface. Pour une plus ample discussion, nous renvoyons aux études par simulations d'essai biaxial [86], annulaire [87], enfoncement d'une fondation superficielle [88] et remplissage de silo [89].

Nous avons vu que les études réalisées sur l'influence de la rugosité sur le comportement granulaire sont généralement basées sur la nature discontinue du milieu. Se sont ainsi développées différentes méthodes numériques capables de simuler le comportement d'assemblages de grains. Après une présentation générale de différentes méthodes numériques dédiées aux milieux granulaires, nous allons introduire dans ce chapitre l'une de ces méthodes, « la méthode des éléments discrets » (DEM) telle qu'elle est implémentée dans le code numérique utilisé pour nos simulations du cisaillement d'un milieu granulaire sur une paroi rugueuse.

I.4 Méthode des Eléments Discrets (DEM)

Le choix de la méthode numérique adaptée à l'étude dépend du type de résultats attendus et des caractéristiques propres au milieu étudié. En modélisation numérique par la Méthode des Eléments Finis (FEM), le milieu est étudié dans le cadre de la mécanique des milieux continus, avec l'hypothèse que l'échelle d'observation est très supérieure à la taille des grains [90, 91]. Ce type de méthodes peut être utilisé dans différents domaines tels que le génie civil [92, 93], la géophysique [94]... Mais il ne permet pas de résoudre les problèmes liés aux milieux discontinus.

Les méthodes numériques basées sur la prise en compte individuelle des grains sont qualifiées de Méthodes des Eléments Discrets (DEM : Discrete Element Method) : le système physique est traité comme un assemblage de corps distincts [95]. Deux principales approches de DEMs ont été distinguées par Jean et al [96], les « smooth » DEM et les « non smooth DEM » :

- Non-Smooth-DEM : Dans cette approche, les grains sont considérés indéformables, y compris au niveau des contacts. Des lois unilatérales, élastiques, de choc ou de frottement de Coulomb peuvent être utilisées pour décrire les actions inter-granulaires. Parmi ces méthodes, nous pouvons citer la Dynamique des Contacts (DC), connue aussi sous le nom Non-Smooth Contact Dynamic (NSCD) [97, 98]. Pour plus de détails, on pourra se reporter à [99, 100] .
- Smooth-DEM : Cette approche a pour origine les travaux développés par Cundall et Strack pour les applications liées à la mécanique des roches [101, 102]. Les grains peuvent s'interpénétrer au voisinage des contacts. Les lois d'interaction entre les grains sont décrites par des fonctions continues et différentiables. Les forces de contact sont décrites par des systèmes de ressort et d'amortisseurs (cas linéaires ou non-linéaires).

I.4.1 Lois du mouvement

Les méthodes DEM reposent sur l'utilisation de la relation fondamentale de la dynamique (loi de Newton). Chaque grain est considéré comme une masse dont le mouvement est déterminé par l'ensemble des forces (F_i) et des moments (M_i) exercés sur lui en fonction du temps. Au

temps t , chaque grain (i), de masse (m_i) et de moment d'inertie (I_i) subira une accélération en translation (a_i) et en rotation (θ_i) telles que :

$$m_i \vec{a}_i = \sum \vec{F}_i \quad [\text{Eq.I-5}]$$

$$I_i \vec{\theta}_i = \sum \vec{M}_i \quad [\text{Eq.I-6}]$$

Les différentes informations sur la trajectoire de chaque grain (vitesse et position) pendant un intervalle de temps spécifique (dt) sont données par l'intégration des équations de mouvement [103]. Dans notre travail, un algorithme semi-implicite d'Euler est utilisé [104]. Cet algorithme consiste à calculer les accélérations à partir des forces (ou des moments pour les rotations) s'exerçant sur chaque grain et de sa masse (ou de son inertie pour les rotations) [Eq.I-5]. Ensuite, entre les instants (t) et ($t+dt$) la vitesse de chaque grain est calculée à partir de son accélération à l'instant (t) [Eq.I-7].

$$V_i(t + dt) - V_i(t) = a_i(t).dt \quad [\text{Eq.I-7}]$$

La position de chaque grain (X_i) est ensuite déduite à partir de sa vitesse $V_i(t)$ [Eq.I-7] :

$$X_i(t + dt) - X_i(t) = V_i(t).dt \quad [\text{Eq.I-8}]$$

Le calcul de la vitesse et du déplacement angulaires se fait de la même façon que celui de la vitesse et du déplacement linéaires (2^{ème} loi de Newton). Entre chaque calcul des déplacements, les forces entre les grains sont recalculées en tenant compte des nouvelles positions.

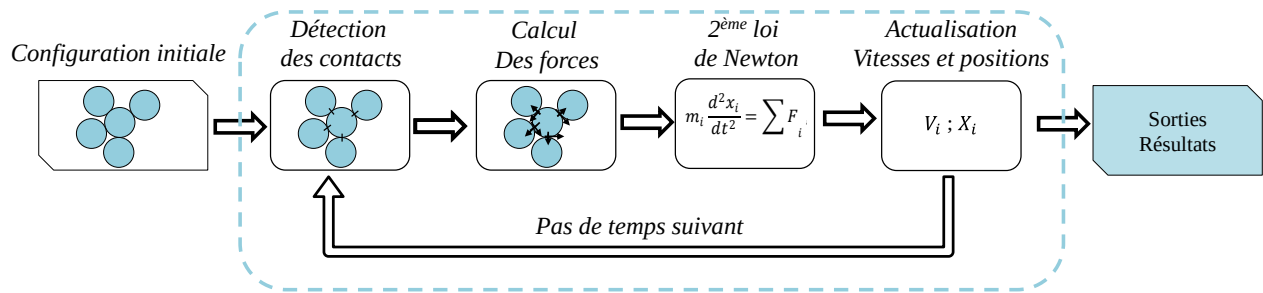


Figure I-28 - Schéma de principe du cycle de calcul DEM.

La **Figure I-28** illustre une boucle typique de calcul DEM. Dans la configuration initiale, l'ensemble des positions, vitesses et accélérations des grains est connu. Le pas de temps approprié est alors typiquement une petite fraction de la durée d'une collision. Dans le cas des milieux fortement agités, la DEM peut donner lieu à des calculs longs où le pas de temps doit être faible pour décrire avec précision à l'aide de l'algorithme de calcul les mouvements des grains. Le grain ne doit se déplacer que d'une petite distance par pas de temps (par rapport à son diamètre).

I.4.2 Détection des contacts

Les grains du milieu sont en mouvement, des nouveaux contacts peuvent apparaître et d'autres présents à l'instant précédent ont pu disparaître. Dans la littérature, il existe plusieurs algorithmes de détection des contacts entre les grains [97, 105, 106]. Nous ne détaillerons pas les différents algorithmes même si ceux-ci s'avèrent être d'un très grand intérêt. Nous nous limitons ici à l'algorithme dit des cellules liées utilisé dans notre code de calcul [107]. Son principe consiste à découper le système en cellules de même taille. Chaque grain peut être à l'intérieur d'une cellule ou couper une ou plusieurs cellules. La **Figure I-29** est une représentation schématique de la procédure suivie pour détecter les contacts. A gauche, le volume de calcul en 3D et à droite les différentes possibilités qu'a un grain de diamètre D de couper les cellules. Il est possible de prendre en compte des grains dont le diamètre est inférieur à la taille de la cellule.

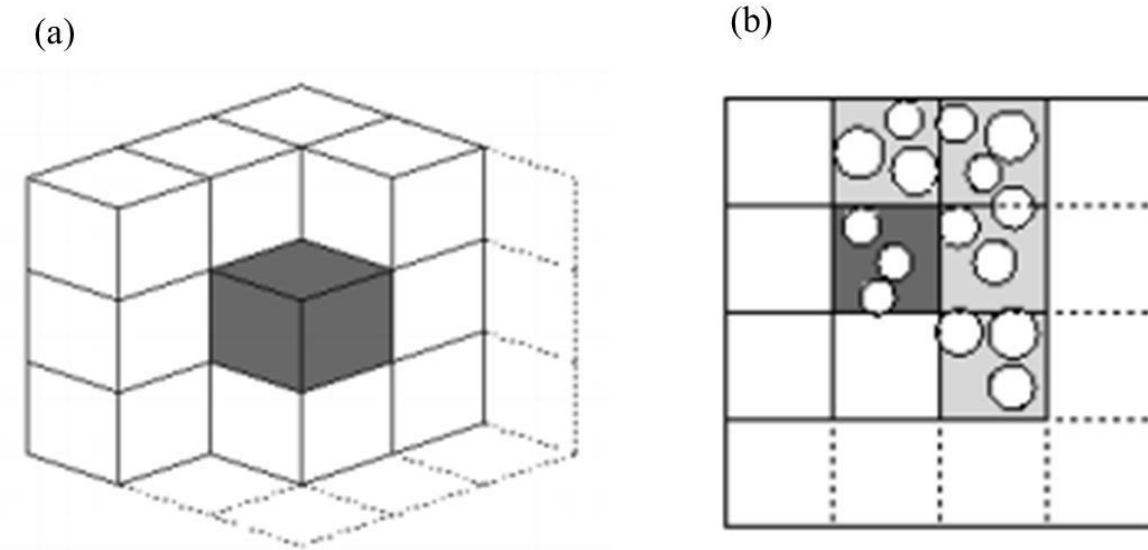


Figure I-29 - (a) Volume de calcul et (b) procédure de détection des contacts entre les grains [108].

De cette manière, une liste des grains contenus à l'intérieur d'une cellule ou la coupant peut être établie. Les contacts entre un grain et ses voisins peuvent n'être calculés qu'avec les

particules qui sont repérées au sein des mêmes cellules, ce qui permet un gain de temps de calcul important. Les limites de l'espace digitalisé peuvent être gérées par des conditions aux limites (parois) ou par des conditions périodiques (sans parois).

I.4.3 Lois de contact

Nous avons dit que dans les méthodes smooth-DEM, les grains sont supposés déformables. Dans cette approche, les déformations sont prises en compte par une légère interpénétration δ_n entre deux grains 1 et 2 en contact [Eq.I-7] :

$$\delta_n = |X_1 - X_2| - R_1 - R_2 \quad [\text{Eq.I-9}]$$

X_1 et X_2 sont les positions des centres des grains 1 et 2 en contact et R_1 et R_2 leurs rayons. Si δ_n est positive, les grains ne sont pas en contact, et dans ce cas, il n'y a pas d'interaction entre eux. Par contre, lorsque l'interpénétration est négative, les deux grains se chevauchent [Figure I-30].

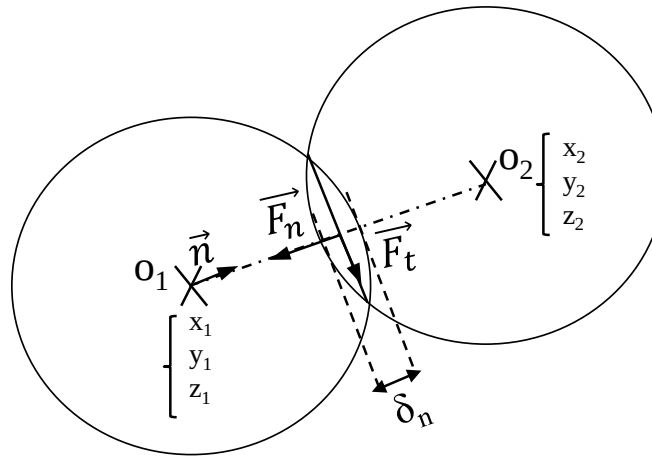


Figure I-30 - Schéma représentatif d'un chevauchement entre deux grains 1 et 2 en contact.

Le calcul des forces d'interaction entre les grains (force normale, force tangentielle etc.) en contact est nécessaire pour l'application de la relation fondamentale de la dynamique. Ces forces sont calculées en fonction de l'interpénétration δ_n . Si deux grains 1 et 2 sont en contact, la force F_{12} exercée par le grain 1 sur le grain 2 est la somme vectorielle de deux composantes :

$$\vec{F}_{12} = F_n \vec{n} + F_t \vec{t} \quad [\text{Eq.I-10}]$$

F_n et F_t sont respectivement les composantes normale et tangentielle de la force de contact. $\vec{n}$ et $\vec{t}$ sont les vecteurs unités du repère local.

Plusieurs modèles de contact existent permettant de calculer les forces d'interaction entre deux grains [109, 110]. Les forces de contact peuvent suivre une simple loi s'apparentant à une loi de Hooke, dans laquelle les interactions entre grains sont décrites par des contacts linéaires élastiques. La simplicité du modèle linéaire facilite son implémentation et l'interprétation des résultats. Mais, en réalité quand deux grains entrent en contact, les forces d'interaction sont plus compliquées que celles décrites dans le modèle linéaire. Il existe un autre modèle de contact plus réaliste où les grains interagissent entre eux par une loi d'interaction non-linéaire complétée par une composante dissipative. Si les interactions et les contacts entre les grains ont un effet important sur le phénomène étudié, tel que l'étude de la déformation du système, dans ce cas le modèle non linéaire est conseillé. Par contre, quand les mouvements des grains sont rapides tel que l'écoulement granulaire, la loi linéaire peut être utilisée [111, 112]. Nous présentons dans ce chapitre le modèle utilisé dans notre code de calcul [113].

La composante normale de la force de contact est composée d'une partie élastique non-linéaire (loi de Hertz) et d'une partie dissipative (modèle de Pöschel et Schwager) [107, 114, 115]. La partie élastique permet de décrire la force au niveau du contact de deux grains s'indentant de façon élastique. Ses paramètres sont le module de Young E et le coefficient de Poisson ν . Pour la partie dissipative, le modèle fait intervenir un coefficient d'amortissement A et l'interpénétration δ_n .

$$\vec{F}_{n,2 \rightarrow 1} = -\frac{4\sqrt{R^*}}{3} \left(\frac{1 - \nu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \nu_2^2}{E_2} \right)^{-1} \left(\delta_n^{\frac{3}{2}} + \frac{A_1 + A_2}{2} \dot{\delta}_n \sqrt{\delta_n} \right) \cdot \vec{n} \quad [\text{Eq.I-11}]$$

R^* est le rayon effectif $R^* = (R_1 \times R_2) / (R_1 + R_2)$.

La composante tangentielle au niveau de la surface de contact à l'état collant (glissement partiel due à des micro-glissements) est donnée par le modèle de Hertz-Mindlin [116, 117] et le critère de Coulomb.

$$\vec{F}_{t,2 \rightarrow 1(t)} = \vec{F}_{t,2 \rightarrow 1(t-\Delta t)} + \Delta \vec{F} \quad [\text{Eq.I-12}]$$

$$\Delta \vec{F} = K_t \vec{V}_{12(t)} \Delta t \quad [\text{Eq.I-13}]$$

K_t est la raideur tangentielle donnée par l'équation [Eq.I-14], $V_{12}(t)$ est la vitesse relative ($V_1 - V_2$) dans la direction tangentielle à l'instant (t) et Δt est le pas de temps.

$$K_t = 8 G_{12} \sqrt{\delta_n R^*} \quad [\text{Eq.I-14}]$$

$$G_{12} = \frac{1}{2} \left(\frac{E_1}{(2 - \nu_1)(1 + \nu_1)} \right) \left(\frac{E_2}{(2 - \nu_2)(1 + \nu_2)} \right) \quad [\text{Eq.I-15}]$$

G_{12} est le module de cisaillement [Eq.I-15]. En cas de glissement total le critère de Coulomb est appliqué : La composante tangentielle de la force de contact est égale à la composante normale de la force de contact multipliée par le coefficient de frottement μ entre les deux grains en contact. La force tangentielle est représentée alors par l'équation [Eq.I-16].

$$F_t = \min (F_{t,2 \rightarrow 1}(t) ; \mu F_{n,2 \rightarrow 1}) \quad [\text{Eq.I-16}]$$

L'amortissement du mouvement d'un grain est géré par la force de frottement et par un moment opposé à son roulement. Le roulement est amorti en diminuant la vitesse de rotation par l'application d'un moment opposé au roulement. La résistance au roulement est donnée par l'équation [Eq.I-17] [118, 119], μ_r est le coefficient de frottement de roulement et ne dépend que de la nature des matériaux en contact, ω_{12} est la vitesse de rotation relative du grain 1 par rapport à 2 [Eq.I-18]. Cette résistance s'oppose à la rotation des grains.

$$\overrightarrow{M}_{12} = -R^* \mu_r |F_{12,n}| \frac{\overrightarrow{\omega}_{12}}{|\omega_{12}|} \quad [\text{Eq.I-17}]$$

$$\overrightarrow{\omega}_{12} = \overrightarrow{\omega}_1 - \overrightarrow{\omega}_2 \quad [\text{Eq.I-18}]$$

ω_1 et ω_2 sont les vitesses angulaires des grains 1 et 2.

Pour conclure, à chaque pas de temps, pour chaque paire de grains interagissant, les forces d'interaction entre ceux-ci sont calculées. Les accélérations linéaire et angulaire de chaque grain sont ainsi déduites à partir du calcul de la somme des forces et des moments exercés sur

chacun d'entre eux via la deuxième loi de Newton. Sur chaque grain, un schéma d'intégration semi-explicite d'Euler est utilisé pour en déduire les vitesses et les positions au pas de temps suivant comme déjà présenté dans l'algorithme de calcul.

I.5 Conclusion

Les lois d'interface interviennent dans une grande partie des ouvrages réalisés sur des milieux granulaires secs (ensilage des grains, interactions sol-structure, etc.) ou sur des milieux granulaires dans un fluide (béton frais).

En ce qui concerne le béton frais directement en contact avec la paroi, plusieurs auteurs ont montré l'existence d'une couche lubrifiante appelée « couche limite ». Cette couche joue le rôle d'un lubrifiant et elle provoque l'écoulement du béton dans le tuyau. Près de la paroi le béton est cisailé tandis que dans le centre l'écoulement du béton se fait en bloc. De même, les caractéristiques et les propriétés physiques de la couche limite sont particulières car sa composition diffère du reste du mélange.

Afin de caractériser cette couche, plusieurs tribomètres ont été conçus. La détermination de l'épaisseur de cette couche et l'analyse de sa composition de façon précise ont présenté des difficultés, dues à l'absence des données de mesure de son épaisseur et des moyens expérimentaux permettant son extraction.

Pour expliquer les phénomènes intervenant à l'interface béton-coffrages pour différentes rugosités et pour des pressions inférieures ou supérieures à la pression critique, Vanhove [5] a proposé différents modèles phénoménologiques à l'échelle microscopique. D'après Vanhove, pour des pressions de contact inférieures à une pression critique le cisaillement s'opère dans la couche limite. Lorsque la pression de contact dépasse une pression critique le milieu près de la paroi suit un comportement granulaire. Dans un comportement granulaire, les grains du béton frottent contre les aspérités de la rugosité, ce qui explique l'augmentation de la contrainte de frottement pour une plaque de rugosité de $1,6\ \mu\text{m}$, par comparaison à une plaque de rugosité $0,3\ \mu\text{m}$.

D'autres études ont été réalisées sur l'influence de la rugosité de la paroi sur le comportement du milieu près de l'interface par la simulation. Cette simulation a été faite soit par des dispositifs expérimentaux, soit par des modélisations numériques. Les résultats expérimentaux et numériques ont montré que la rugosité de la surface a une influence non négligeable sur le frottement et sur le comportement du milieu près de la paroi. En général, ces études sont basées sur la nature discontinue du milieu.

Les principes de base de la méthode smooth DEM ont ensuite été présentés. Une méthode de ce type sera mise en œuvre dans la suite de la thèse.

I.6 Objectifs et démarches de l'étude

La littérature montre que le frottement béton frais-paroi dépend à la fois des caractéristiques du béton, en particulier de la couche limite et des caractéristiques de la paroi. Pour mieux comprendre les mécanismes liés à ce frottement une étude à l'interface béton frais - paroi est nécessaire. Toutefois, on a vu que la caractérisation de la couche limite était très complexe.

L'interface béton frais-paroi peut être traitée comme un système tribologique formé par deux corps dont l'un frotte contre l'autre. Ces deux corps sont « la couche limite » et « la paroi ». Mais parallèlement à la complexité du matériau béton, la caractérisation géométrique de l'état de la surface de la paroi est délicate. En effet, la couche limite est formée d'eau et de fines constituées par l'ensemble des grains non uniformes de diamètre inférieur à 80 μm . De même, la rugosité de la paroi est constituée d'un ensemble d'aspérités irrégulières. La complexité de la réalité du système tribologique couche limite – paroi rend son étude délicate. D'où la nécessité de proposer une modélisation de l'interface simplifiée.

L'objectif de la présente étude est d'étudier les mécanismes à l'échelle des grains à l'interface simplifiée. Pour simplifier l'interface, des hypothèses sur les deux corps en contact doivent être prises. En effet, les grains de la couche limite ont des géométries complexes et une étendue granulométrique large. Il était difficile de répondre à ces deux exigences. Pour cette raison, ce matériau sera modélisé par des grains sphériques et monodisperses.

De plus, la couche limite est une suspension concentrée dont la modélisation est extrêmement complexe. Toutefois, le frottement à l'interface est essentiellement régi par le frottement entre les deux corps solides (grains et paroi). Pour cette raison, l'interface est étudiée en absence du fluide interstitiel.

De même, afin de simplifier l'irrégularité de la surface, la rugosité est modélisée par des géométries simples « créneaux » ou « sphères ». Le choix des dimensions et des dispersions de ces géométries est basé sur la capacité des grains à se loger dans les aspérités.

Suite à ces différentes hypothèses, l'interface d'un milieu granulaire cisailé sur une paroi rugueuse est étudiée par des expériences sur un modèle analogique et par des simulations par la méthode aux éléments discrets.

Les expériences sont menées sur des plaques crénelées. Les mécanismes présents à l'interface sont étudiés pour différentes rugosités, vitesses et pressions de contact. Compte tenu des différents avantages de la modélisation numérique, en particulier l'accès à la microstructure, le travail expérimental est complété par une étude numérique. L'étude numérique consiste tout d'abord à modéliser le dispositif expérimental. Une confrontation entre les essais expérimentaux

et les simulations numériques est réalisée. Le code est ensuite utilisé pour modéliser l'interface d'un milieu granulaire sur une paroi rugueuse en conditions périodiques. Dans l'étude numérique, la rugosité est simulée en collant des sphères sur un plan se déplaçant à vitesse constante. L'étude est réalisée pour différentes conditions de l'interface.

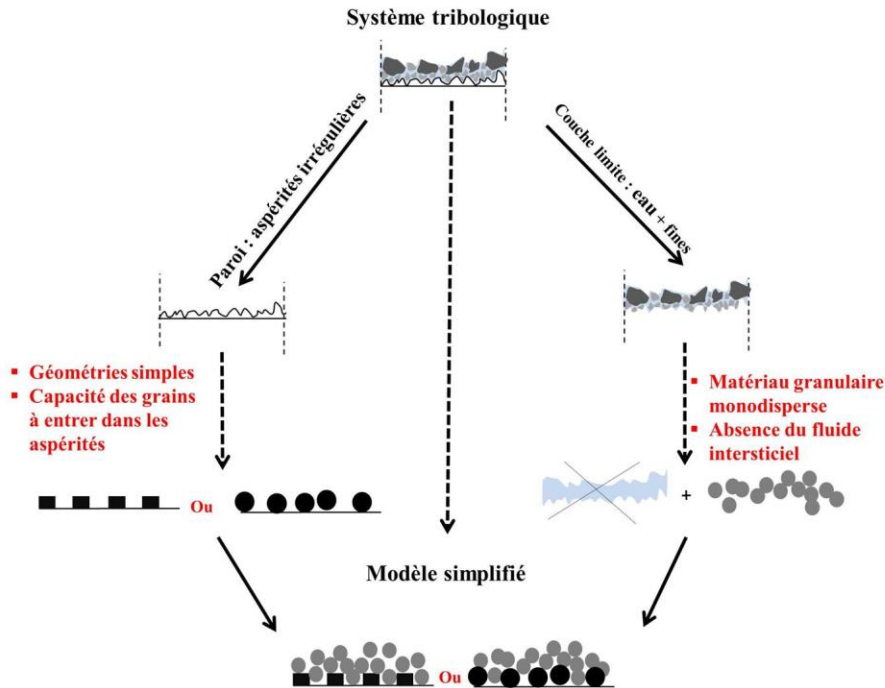
L'organigramme présenté dans la **Figure I-31** résume la démarche de cette étude.

Problématique : Influence des caractéristiques du béton frais et des conditions à l'interface (rugosité, pression de contact et vitesse de cisaillement) sur la formation de la couche limite



L'interface béton frais – paroi constitue un système tribologique dont la couche intermédiaire est la couche limite

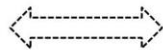
- La couche limite est formée de l'eau et des grains de différentes tailles
- La rugosité de la paroi est formée des aspérités irrégulières



Dispositif expérimental



Confrontation



Modèle numérique

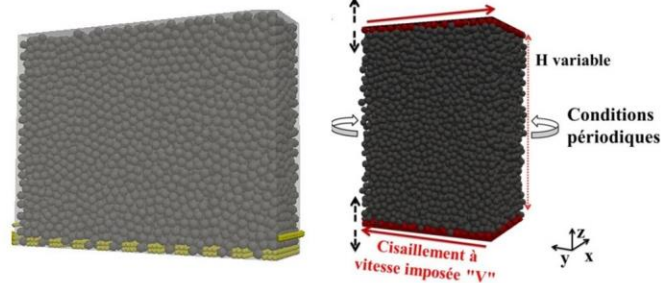


Figure I-31- Démarche de l'étude.

CHAPITRE II

M*odèle analogique*

II.1 Introduction

Pour simplifier l'étude de la modélisation de l'interface béton-paroi et sans chercher à reproduire à l'échelle du grain l'ensemble des constituants du béton, un modèle simple a été mis au point. Ce modèle s'inspire de celui utilisé par Djelal [49, 16] pour mettre en évidence certains phénomènes à l'interface pâte de kaolin-plaque liés à la rugosité. Le kaolin est constitué de particules de faible étendue granulaire. Tandis que les grains de la couche limite ont des géométries complexes et une étendue granulométrique large. La modélisation de cette couche est donc extrêmement complexe. De plus, la caractérisation géométrique de l'état de la surface de la paroi est délicate. En effet, la rugosité de la paroi est constituée d'un ensemble d'aspérités irrégulières. Pour simplifier l'étude de l'interface béton-paroi, des hypothèses sur la paroi et sur les grains de la couche limite ont été prises.

Le principe du modèle analogique présenté dans ce chapitre consiste à simuler les aspérités de la plaque par des « crêneaux » usinés perpendiculairement sur un support rectiligne (baguette) et les grains du béton par des matériaux modèles ayant une géométrie simple : des billes de verre monodisperses. Du fait de la complexité du matériau béton, nous allons limiter cette complexité, en considérant des billes sans cohésion. Ceci signifie que nous négligeons l'influence éventuelle du fluide interstitiel. Ce modèle devrait nous permettre d'observer et de mieux comprendre les phénomènes se produisant à l'interface lors du cisaillement d'un milieu granulaire sur une paroi rugueuse.

Les conditions aux limites imposées sur la baguette sont : vitesse de déplacement horizontale, force normale et rugosité. Par contre, la force tangentielle exercée sur la baguette, le profil de cisaillement et le nombre de billes sortantes de la boîte du dispositif constituent les grandeurs observables. Dans ce chapitre, nous décrivons le dispositif expérimental et le protocole suivi. Ensuite, l'étude de l'influence des conditions aux limites sur les grandeurs observables est évoquée. Nous finissons par une conclusion des différents points traités.

II.2 Modèle analogique

II.2.1 Description du modèle analogique

Le dispositif expérimental est constitué d'une boîte parallélépipédique rectangle (250 mm de hauteur, 300 mm de longueur et 80 mm de profondeur). Ces dimensions maximales sont imposées par celles du tribomètre plan-plan. Le milieu granulaire est formé d'un empilement de billes de verre. L'empilement est monodisperse ($\varnothing = 10 \text{ mm} \pm 0,5 \text{ mm}$) et est constitué d'environ 6450 billes (masse volumique 2600 kg/m^3). Un diamètre de 10 mm a été choisi pour faciliter l'observation du mouvement dans la configuration tridimensionnelle. Les parois de la boîte sont en plexiglass permettant de visualiser le mouvement des billes près de la paroi. La boîte est munie à sa base d'une baguette servant de support à l'empilement. L'ensemble est monté sur le tribomètre plan/plan [Figure II-1 et Figure II-2].

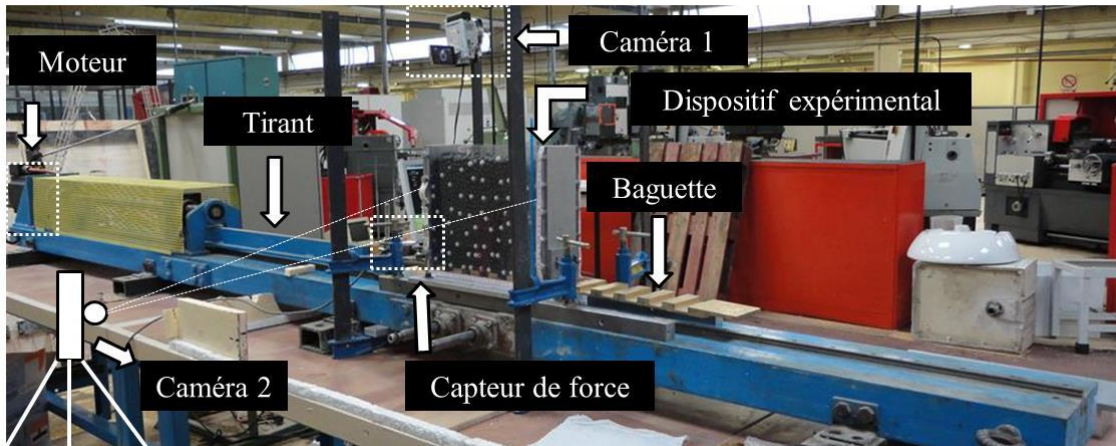


Figure II-1 - Vue de l'ensemble du dispositif monté sur le tribomètre.

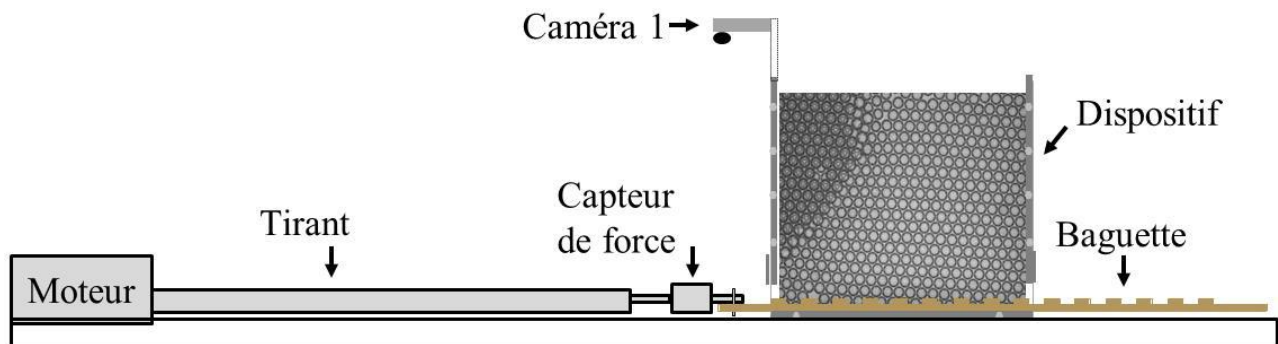


Figure II-2 - Schéma du dispositif monté sur le tribomètre.

II.2.2 Protocole expérimental

Nous avons choisi une procédure de mise en place des billes permettant d'étudier le profil de cisaillement du milieu granulaire cisailé. L'empilement initial est ainsi composé de trois colonnes de billes de deux couleurs différentes. Pour obtenir trois colonnes de largeur identique, deux plaques en plastique équidistantes de 100 mm sont placées verticalement dans la boîte munie à sa base d'une baguette [Figure II-3-a]. Ensuite, 2150 billes sont introduites dans chaque colonne en cinq couches, soit 430 billes par couches [Figure II-3-b]. Puis, les deux plaques en plastique sont retirées verticalement [Figure II-3-c]. Le remplissage en couches permet de maintenir les plaques en plastique verticales durant le remplissage. En effet, pour un remplissage direct de 2150 billes dans une colonne, les billes exercent une pression horizontale sur la plaque en plastique et qui n'est plus en équilibre.

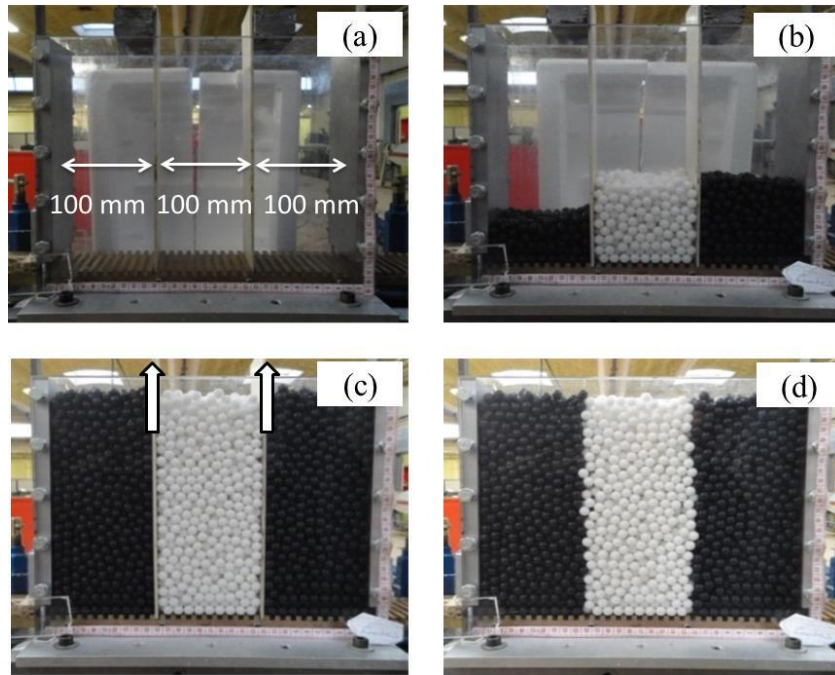


Figure II-3 - Différentes étapes de versement de billes par couches.

Un couvercle en forme de T peut être posé permettant d'appliquer une pression normale sur la partie supérieure de l'empilement tout en autorisant la dilatation de celui-ci. Sur ce couvercle, des masses peuvent être disposées permettant ainsi de faire varier la pression normale [Figure II-4].

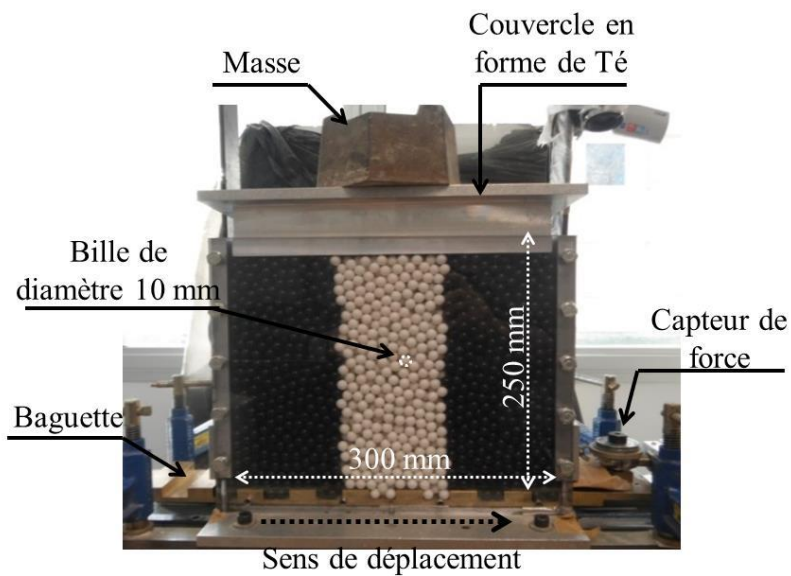


Figure II-4 - Montage expérimental.

L'essai expérimental consiste à cisailier par déplacement horizontal de 300 mm et à vitesse constante la baguette sous le milieu granulaire. La mise en mouvement de la baguette s'effectue à l'aide d'un moteur accouplé à une vis sans fin. Cette vis animée d'un mouvement de rotation va transmettre, par l'intermédiaire d'un écrou, un mouvement de translation au tirant. Celui-ci transmet son mouvement à la baguette. Durant le déplacement de la baguette, un capteur de force compression/traction liant le tirant à la baguette permet de mesurer la force exercée sur la baguette. L'étendue de mesure du capteur est de 2000 N avec une précision de ± 10 N [Figure II-4].

Deux caméras (25 images/s) ont été utilisées pour filmer les essais [Figure II-1]. La première (caméra 1) est placée au-dessus du dispositif et permet de compter le nombre de billes sortantes de la boîte durant l'essai. La deuxième caméra (caméra 2) placée en face de la paroi du dispositif permet de filmer le mouvement des billes au contact avec la face en plexiglass. Toutes les prises de vue assurent une perpendicularité entre l'axe de vue et le plan objet.

II.2.3 Conditions aux limites

Les conditions aux limites utilisées sont celles imposées à la baguette : rugosité, vitesse de déplacement et force normale. Les essais expérimentaux ont été réalisés pour différentes conditions aux limites. Nous commençons tout d'abord par la description des rugosités « baguettes » utilisées. Ensuite, les vitesses de déplacement et les forces normales choisies pour les essais sont présentées.

Afin d'expliquer la variation de la contrainte de frottement pour différentes vitesses de déplacement de la plaque, Vanhove [5] a proposé une description du mouvement d'un grain au niveau de l'interface. En effet, d'après Vanhove lorsque le grain est pris dans la rugosité, il a tendance à entraîner d'autres grains proches de la paroi, ce qui engendre une augmentation de la contrainte de frottement. Mais lorsque la vitesse dépasse une vitesse critique, le grain a de moins en moins le temps de bouger. Il ne traverse pas un plan de cisaillement. La tendance des grains à se loger dans les aspérités peut donc entraîner une variation de la contrainte de frottement à l'interface.

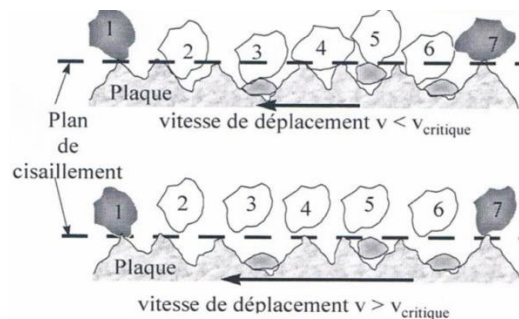


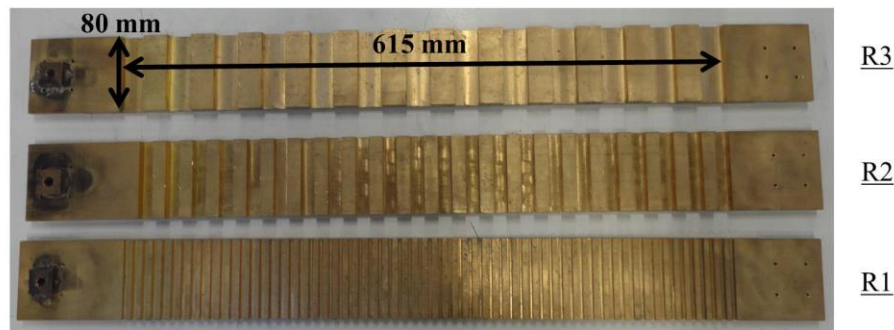
Figure II-5 - Représentation schématisée du mouvement d'un grain en fonction de la vitesse de glissement ; $R_a = 1,6 \mu\text{m}$ d'après Vanhove [5].

Trois configurations sont étudiées pour lesquelles nous avons choisi des aspérités plus grandes ou plus petites devant la taille d'un grain de ciment. Pour faire varier la rugosité de la baguette, trois baguettes en laiton ont été fabriquées [Figure II-6]. C'est un matériau facile à usiner, c'est l'un des principaux métaux utilisés par l'industrie du décolletage (fabrication de petites pièces tournées en très grandes séries). Les baguettes mesurent 815 mm de longueur et 80 mm de largeur. La possibilité des billes de se loger ou non dans les creux a notifié le choix de la hauteur et de l'espacement des créneaux.

Trois cas ont été étudiés :

- R1 : Les billes ($\varnothing=10\text{mm}$) ne peuvent pas se loger dans les creux. La hauteur des créneaux et l'espacement séparant deux créneaux sont de 5 mm.
- R2 : Une bille peut se loger dans un creux. La hauteur des créneaux est de 10 mm et l'espacement séparant deux créneaux est de 15 mm.
- R3 : Deux billes peuvent se loger dans un creux. La hauteur des créneaux est de 10 mm et l'espacement séparant deux créneaux est de 25 mm.

Vue de dessus



Vue de profil

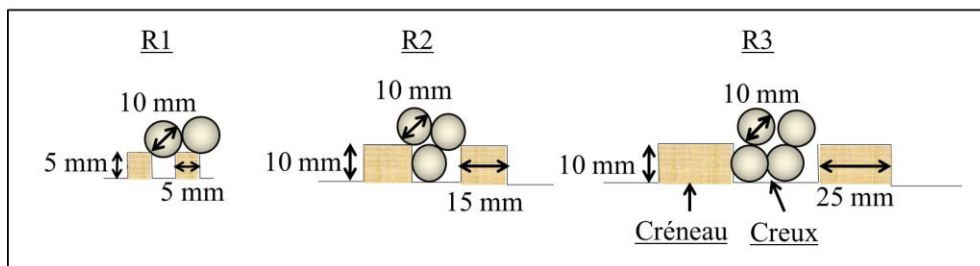


Figure II-6 - Baguettes de rugosités R1, R2 et R3.

La régulation de la vitesse de déplacement de la baguette se fait à l'aide d'un contrôleur μSMCC commercialisé par la société BALDOR. Les vitesses de déplacement imposées aux baguettes sont de 1, 5 et 10 mm/s. Elles ont été choisies de manière à pouvoir mesurer la force exercée sur la baguette et à observer les phénomènes à l'interface billes/baguette. En effet, pour

une vitesse supérieure à 10 mm/s, le temps d'enregistrement de la force est trop court. De plus, les mouvements rapides des billes rendent difficile l'observation des mécanismes à l'interface.

En tribologie, l'étude du frottement a été étudiée pour différentes valeurs de pressions de contact. Dans le cas de la mise en place du béton dans les coffrages, le béton exerce une poussée ou une pression latérale qui varie le long des coffrages. Il est donc important dans notre dispositif d'observer les mécanismes à l'interface pour différentes valeurs de la force normale appliquée sur la baguette. Dans notre étude, la force normale résulte du poids des billes, et des forces appliquées par les masses disposées sur le milieu granulaire. Les valeurs arrondies à 5 N de la force normale sont présentées dans **Tableau II-1**. Notons que durant le cisaillement les mouvements de billes sous le couvercle ne lui permettent pas de rester horizontal, ce qui signifie que la charge appliquée au milieu granulaire n'est pas uniforme.

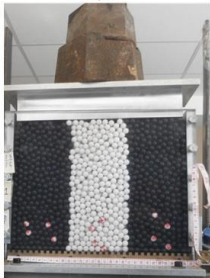
Force normale [N]	85	125	175	275
Pression équivalente [kPa]	3,5	5	7,5	11,5
				

Tableau II-1- Forces normales appliquées sur la baguette.

II.2.4 Grandeurs observables

Les grandeurs observables constituent l'ensemble des grandeurs physiques mesurées ou observées durant l'essai. Dans notre cas, les grandeurs observables sont la force de frottement, le profil de cisaillement et le nombre de billes sortantes de la boîte.

II.2.4.1 Force de frottement

La baguette placée sous le milieu granulaire prend appui sur la base du dispositif en aluminium. Lors du mouvement, la baguette frotte d'une part contre les billes du milieu granulaire et d'autre part contre la base du dispositif. Le capteur de force placé entre la baguette et le tirant donne alors la force F_{mes} qui correspond à deux forces de frottement [Eq. II-1] :

- F_{gr} : Force de frottement entre les billes et la baguette. C'est la force nécessaire aux billes pour franchir les obstacles (les créneaux et les billes qui y sont logées).
- F_{base} : Force de frottement entre la baguette et la base du dispositif.

$$F_{\text{mes}} = F_{\text{gr}} + F_{\text{base}} \quad [\text{Eq. II-1}]$$

La force que l'on souhaite étudier est la force de frottement F_{gr} . Il faut donc tout d'abord déterminer la force de frottement de la baguette contre la base.

a. Force de frottement entre la baguette et la base (F_{base})

D'après Coulomb, dans les deux configurations de la **Figure II-7**, la même force T est nécessaire pour tirer les trois masses (M_1 , M_2 et M_3). Cette force est proportionnelle à la masse totale et indépendante de la disposition des masses sur la baguette (en supposant que la baguette est suffisamment rigide) et de la vitesse de déplacement. La courbe représentant la variation de la force tangentielle en fonction de la force normale pour deux corps secs en contact est une droite passant par l'origine. La pente de cette droite représente le coefficient de frottement entre les deux corps ($\mu = F_{\text{tangentielle}} / F_{\text{normale}}$).

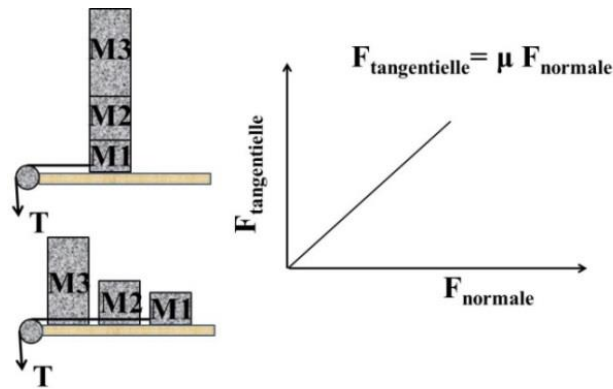


Figure II-7 - Frottement entre deux corps secs et solides.

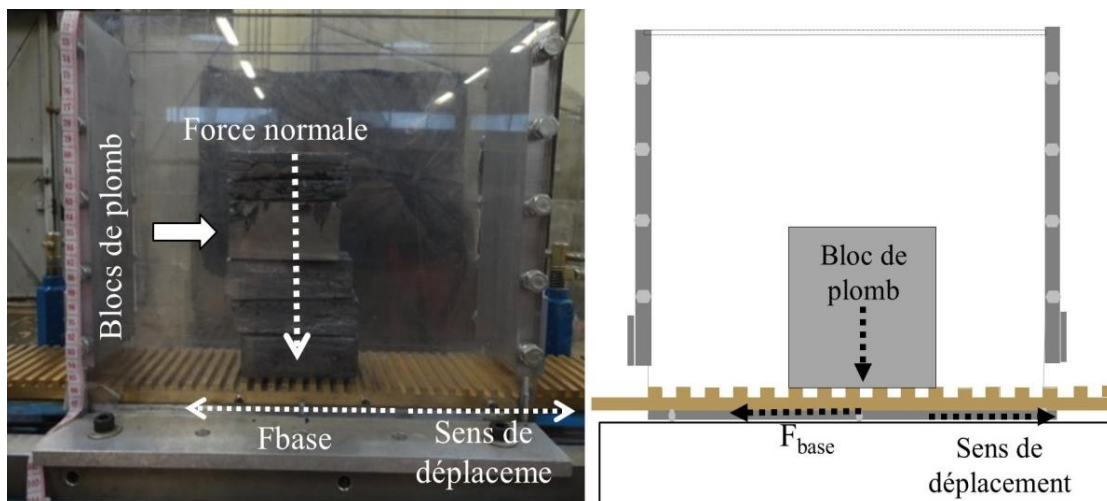


Figure II-8 - Mesure du coefficient de frottement baguette/base.

La mesure de la force F_{base} s'appuie sur le principe établi par Coulomb. Des blocs de plomb de masse volumique 11350 kg/m^3 , ont été placés sur la baguette R1 [Figure II-8]. La force normale correspond à la masse totale des blocs de plomb et de la baguette. Elle peut être variée en ajoutant ou en retirant des blocs. La force tangentielle F_{base} est la force mesurée par le capteur. Pour différentes valeurs de la force normale, les mesures ont été réalisées en déplaçant la baguette à une vitesse de 1 mm/s . Lors du mouvement, les blocs de plomb et la baguette se déplacent à la même vitesse, l'ensemble se comporte comme un seul bloc.

La Figure II-9 montre la variation de la force tangentielle F_{base} en fonction de la force normale. Les premiers résultats obtenus en déplaçant la baguette avec le tirant du tribomètre ont montré que les points de mesures n'étaient pas alignés. En effet, deux droites différentes ont été obtenues pour les valeurs élevées de force normale et pour les faibles valeurs. Dans ce dernier cas, la droite ne passait pas par l'origine. Nous avons pu attribuer cet artéfact aux vibrations provenant du moteur du tribomètre. En effet, en réalisant des mesures manuelles en tirant sur la baguette à la main, il a été possible d'obtenir une unique droite pour toutes les valeurs de la force normale.

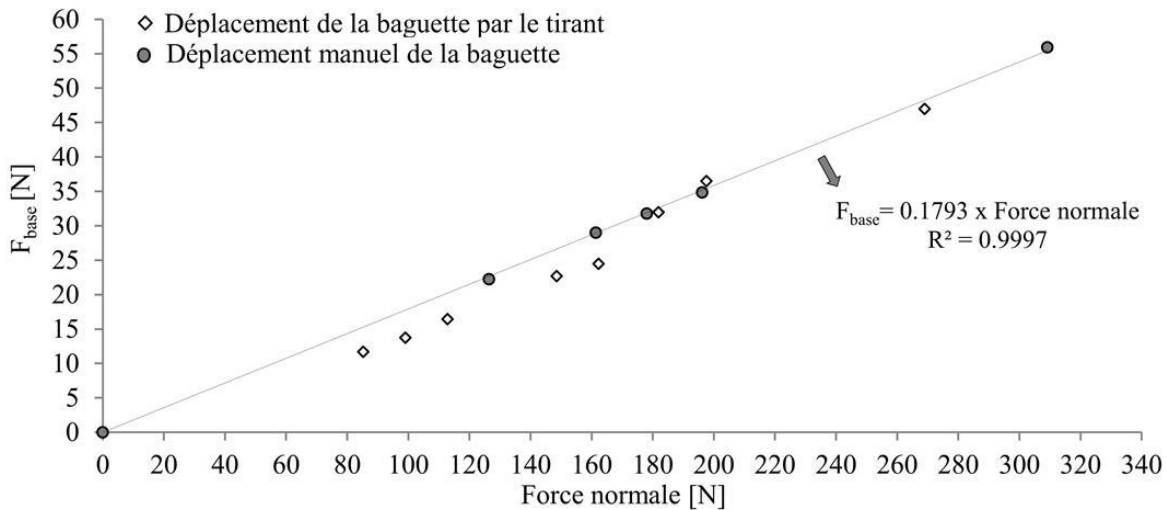


Figure II-9 - Variation de la force Fbase en fonction de la force normale.

Cette droite passe par l'origine et a pour équation :

$$F_{\text{base}} = 0,179 \times \text{Force normale} \quad [\text{Eq. II-2}]$$

Le coefficient de frottement entre la baguette laiton et la base aluminium est de 0,179. Cette valeur est cohérente avec celle de 0,2 obtenue par Nurruzaman [120] pour une vitesse relative de $0,5 \text{ m/s}$ et pour une durée de frottement de 25 secondes. La comparaison entre les

deux méthodes de mesure de la force F_{base} , en tirant la baguette avec le tirant ou manuellement, montre qu'à partir d'une force tangentielle de 30 N, les vibrations du moteur ne perturbent pas la valeur de la force tangentielle mesurée.

b. Force de frottement entre les billes et la baguette (F_{gr})

La force F_{gr} est calculée par la soustraction de deux forces, la force F_{mes} mesurée par le capteur et la force F_{base} déduite de l'équation [Eq. II-2]. La **Figure II-10** présente un exemple type de calcul de la force F_{gr} .

Sur la courbe représentant l'évolution de la force F_{mes} et F_{gr} trois régimes sont identifiés :

- Une rapide augmentation de la force jusqu'à une valeur maximale, correspondant à un réarrangement granulaire (frottement statique).
- Une diminution de la force pour atteindre un régime dynamique.
- Un régime dynamique (frottement dynamique) au cours duquel la force de frottement oscille autour d'une valeur moyenne.

Chaque essai a été répété trois fois. Pour chaque essai, la force moyenne est calculée dans la phase de régime dynamique. Sur les courbes présentées par la suite, chaque point et chaque barre d'erreur représentent respectivement la moyenne et l'écart type correspondant aux trois essais réalisés.

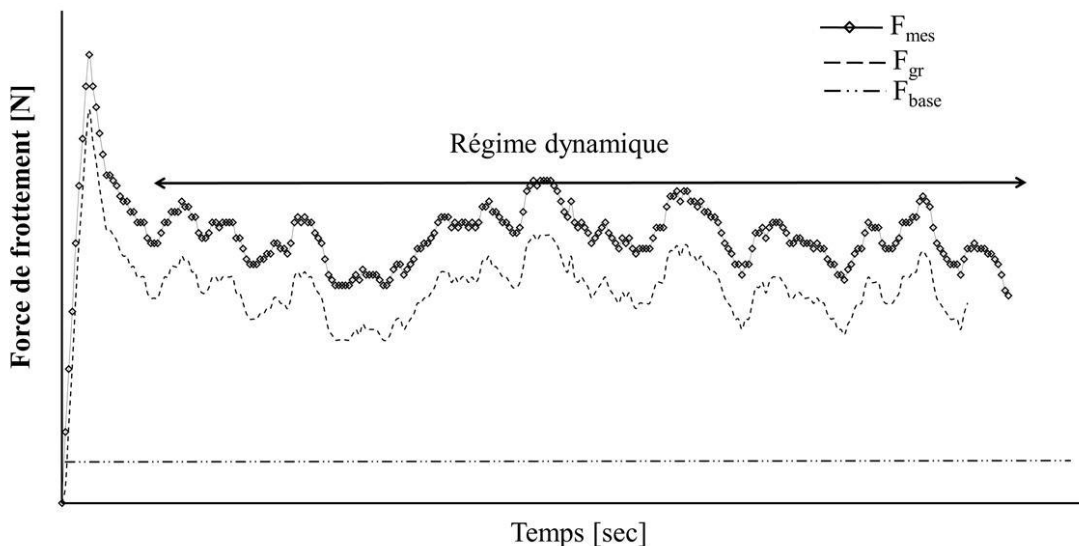


Figure II-10 - Calcul de la force F_{gr} à partir des forces F_{mes} et F_{base} .

II.2.4.2 Profil de cisaillement

Le logiciel d'analyse d'images FIJI/ImageJ est un logiciel multi-plateforme et open source de traitement et d'analyse d'images développé par les instituts américains de la santé

(National Institutes of Health) [121]. Ce logiciel a été utilisé pour mesurer des déplacements, repérer la position des billes et tracer les contours de la colonne formée de billes blanches dans les configurations initiale et finale de l'empilement. Par la suite, nous appellerons « profil de cisaillement » l'image qui correspond à la configuration finale de l'empilement.

La **Figure II-11** montre un exemple de traitement des images dans la configuration initiale [**Figure II-11-a**] et la configuration finale [**Figure II-11-b**] sur lesquelles les contours de la colonne formée de billes blanches sont tracés. De plus, ce logiciel permet de transformer un film en une séquence d'images, ce qui pourrait être utile pour décrire les mouvements des billes en traitant une série d'images successives.

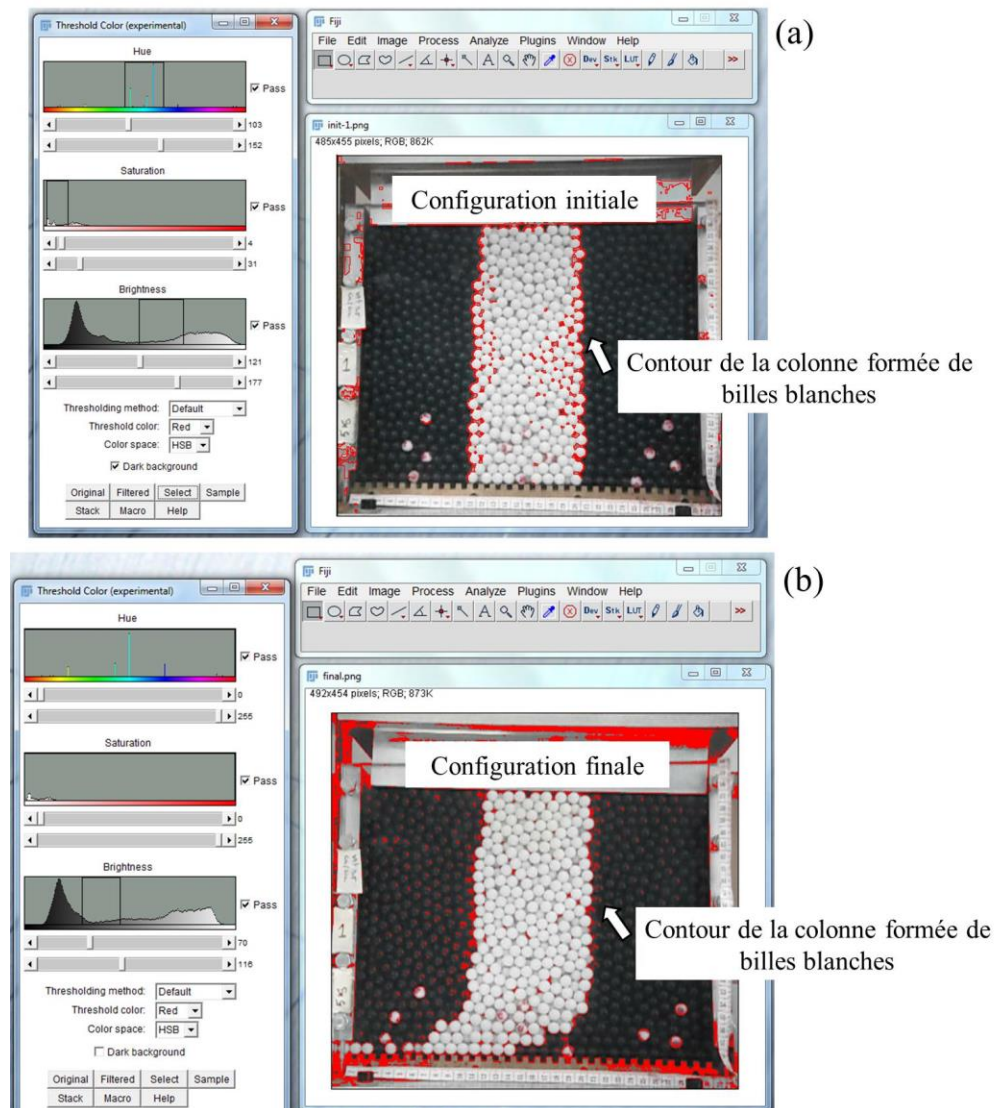


Figure II-11 - Exemple d'un traitement d'images dans la configuration initiale et la configuration finale.

II.2.4.3 Nombre de billes sortantes

Pour permettre la sortie des billes sans qu'elles ne soient bloquées au cours de l'essai [Figure II-12-a], deux ouvertures ont été réalisées à l'extrémité des parois [Figure II-12-b]. La hauteur de ces ouvertures est réglée manuellement, l'ouverture peut aller jusqu'à 12 mm (2 mm de plus que la taille des billes). En effet, en déplaçant la baguette, certaines billes se bloquent et se cassent entre les créniaux de la baguette et la paroi frontale. Pour toute ouverture inférieure à 11 mm des blocages nombreux ont été observés. Pour les essais expérimentaux présentés par la suite, la hauteur de l'ouverture a été systématiquement réglée à 12 mm.

Le nombre de billes sortantes est défini comme étant le nombre total de billes sortantes par l'ouverture à la fin de l'essai.

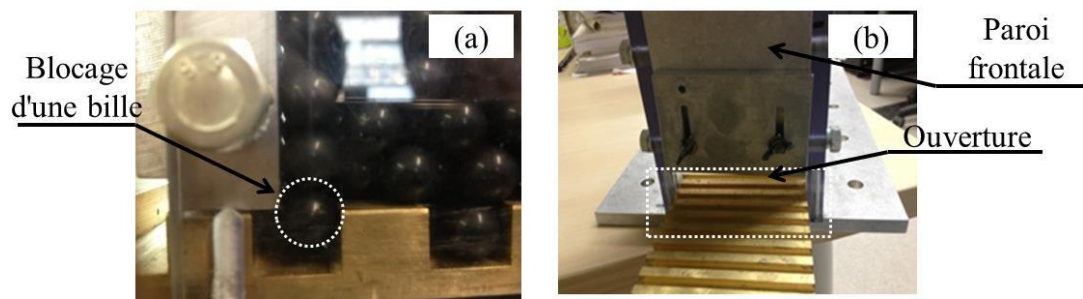


Figure II-12 - (a) Blocage d'une bille ; (b) Ouverture à proximité de la paroi.

II.3 Mécanismes à l'interface billes-baguette

Dans certaines configurations, nous présentons les mécanismes possibles à l'interface billes-baguette. Il s'agit de la description des mouvements des billes de la première couche. Les mécanismes sont décrits en utilisant FIJI.

La première couche est formée d'environ 30 billes. Pour chaque film nous observons systématiquement le mouvement de chaque bille de la première couche en passant par les étapes suivantes [Figure II-13]:

- Transformation du film en séquence d'images (image/seconde).
- Marquage de la bille par un cercle.
- Création d'un montage à partir de la séquence d'images.

Nous notons ici que dans notre étude nous avons identifié les mécanismes mais nous n'avons pas étudié leur fréquence (nombre de fois observé).

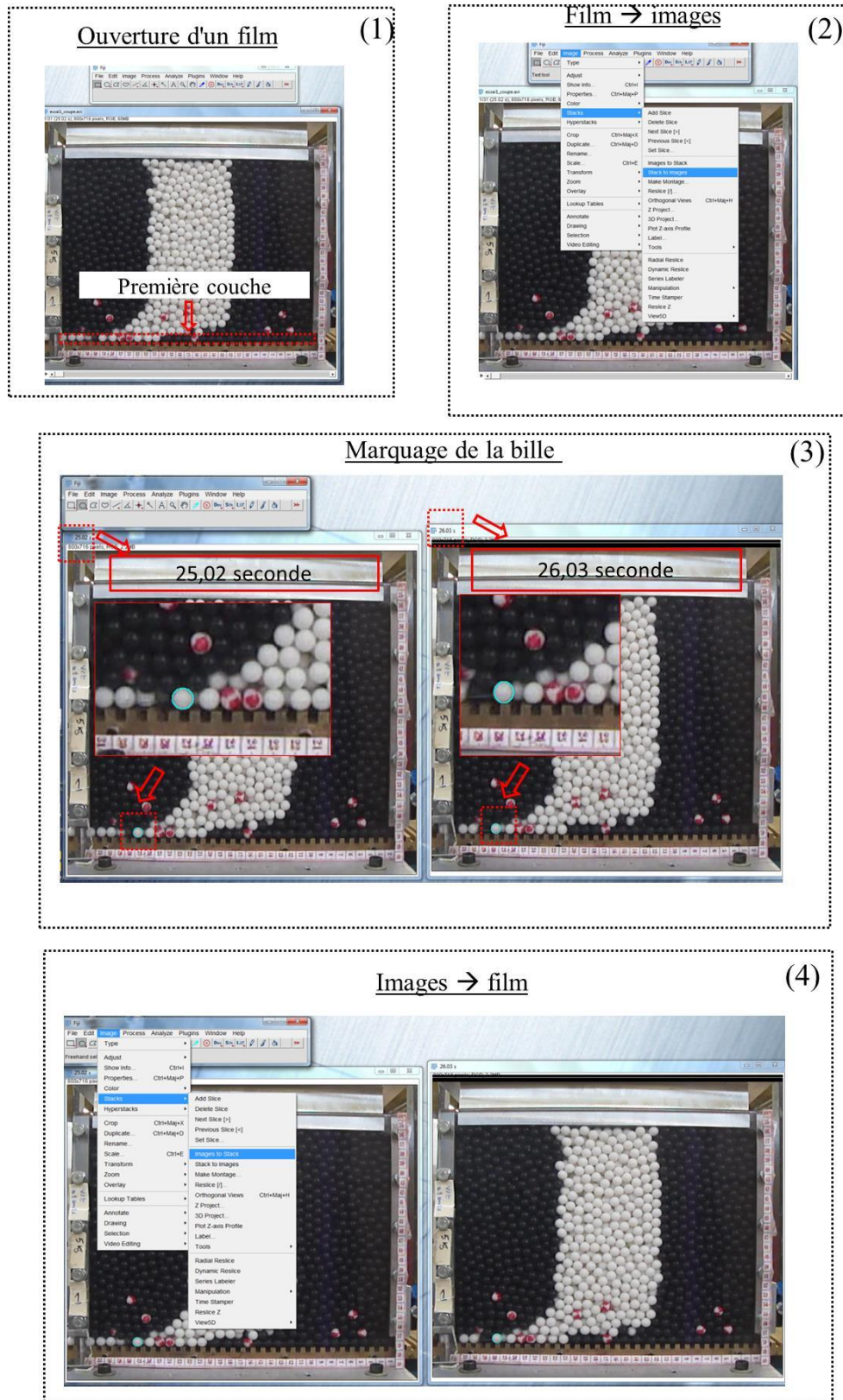
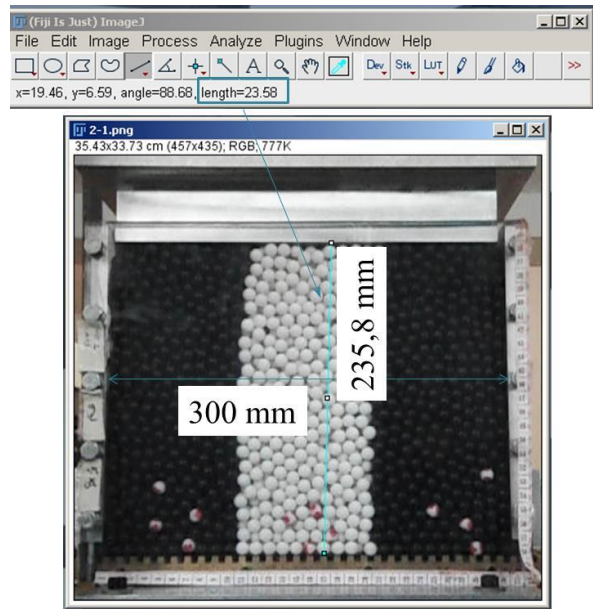


Figure II-13 - Etapes d'identification d'un mécanisme.

II.4 Compacité de l'empilement initial

Un empilement tridimensionnel est caractérisé par sa compacité (volume occupé par les billes/volume total). La compacité d'un empilement monodisperse versé sans arrangement particulier dans un récipient assez grand devant le diamètre des billes est de l'ordre de 0,6 avec une variabilité de quelques centièmes [122, 123, 124, 125]. Naturellement un empilement tridimensionnel est désordonné [126]. Pour un empilement désordonné compact, la compacité peut atteindre 0,64 à l'aide d'un traitement mécanique approprié (vibrations, tassement, etc) [122, 127, 128].

Nous rappelons que l'empilement est préparé par versement des billes en couches dans chaque colonne. La compacité de l'empilement est calculée à partir de sa hauteur. Celle-ci est déterminée avec FIJI en traçant une ligne dont la longueur est mesurable entre la base et la partie supérieure de l'empilement. La **Figure II-14** présente un exemple de calcul de la compacité initiale pour la baguette R1 et pour une force normale de 175 N.



$$\text{compacité} = \frac{V_{\text{billes}}}{V_{\text{empilement}}}$$

V_{billes} = volume occupé par les billes

$V_{\text{empilement}}$ = hauteur x 300mm x 80 mm

80 mm est la profondeur de la boîte

Figure II-14 - Calcul de la compacité initiale de l'empilement pour R1 et pour une force normale appliquée sur la baguette de 175 N.

Pour la même force normale appliquée sur la baguette, les compacités des empilements à la configuration initiale entre les trois rugosités (R1, R2 et R3) ont été comparées. Chaque valeur présentée dans le **Tableau II-2** correspond respectivement à la compacité moyenne de trois mesures et leur écart-type. Globalement, la compacité varie entre 0,590 et 0,606, ce qui nous permet de conclure que la compacité ne semble pas affectée par les rugosités et par les charges appliquées sur l'empilement.

Force normale [N]	85	125	177	275
Compacité				
R1	$0,599 \pm 0,008$	$0,600 \pm 0,004$	$0,597 \pm 0,003$	$0,596 \pm 0,001$
R2	$0,593 \pm 0,002$	$0,600 \pm 0,001$	$0,600 \pm 0,002$	$0,597 \pm 0,005$
R3	$0,593 \pm 0,001$	$0,598 \pm 0,002$	$0,598 \pm 0,002$	$0,602 \pm 0,004$

Tableau II-2 - Compacités pour différentes forces normales exercées sur les baguettes R1, R2 et R3.

II.5 Influence des conditions aux limites sur les grandeurs observables

Cette section met en avant l'influence des conditions aux limites sur les grandeurs observables. Egalement, les mécanismes observés à l'interface billes-baguette sont décrits. Dans tout ce qui suit, nous appellerons « force tangentielle », la force F_{gr} de frottement entre les billes et la baguette. De même, nous considérons que le premier pic de chaque courbe représente le régime transitoire et que le reste des points constitue le régime dynamique. La valeur moyenne de la force tangentielle est calculée dans le régime dynamique. Nous estimons que la rugosité est plus importante lorsque nous augmentons la hauteur des crêneaux ou la distance séparant deux crêneaux successifs. La rugosité R1 est alors la rugosité la plus faible et la rugosité R3 est celle la plus élevée.

II.5.1 Vitesse de déplacement

L'étude de l'influence de la vitesse de déplacement de la baguette sur les grandeurs observables a été réalisée sur la baguette R1. La force normale appliquée sur la baguette est de 175 N, ce qui correspond à une pression normale de 7,3 kPa. Les vitesses imposées à la baguette sont de 1, 5 et 10 mm/s pour une distance de déplacement de 300 mm.

II.5.1.1 Force tangentielle

Les courbes (a, b et c) de la **Figure II-15** présentent la variation de la force tangentielle en fonction de la distance de déplacement respectivement pour une vitesse de 1, 5 et 10 mm/s. La **Figure II-15-d** présente l'évolution temporelle de la force tangentielle pour les vitesses de 1, 5 et 10 mm/s. Le régime dynamique commence à partir d'une distance de déplacement d'environ 10 mm pour la vitesse de 1 mm/s [**Figure II-15-a**] et d'une distance d'environ 20 mm pour les

autres vitesses [Figure II-15-b et Figure II-15-c]. Nous expliquons tout d'abord la forme de la courbe représentant la variation de la force tangentielle. Nous soulignons ensuite les différences remarquées pour les vitesses de 1, 5 et 10 mm/s.

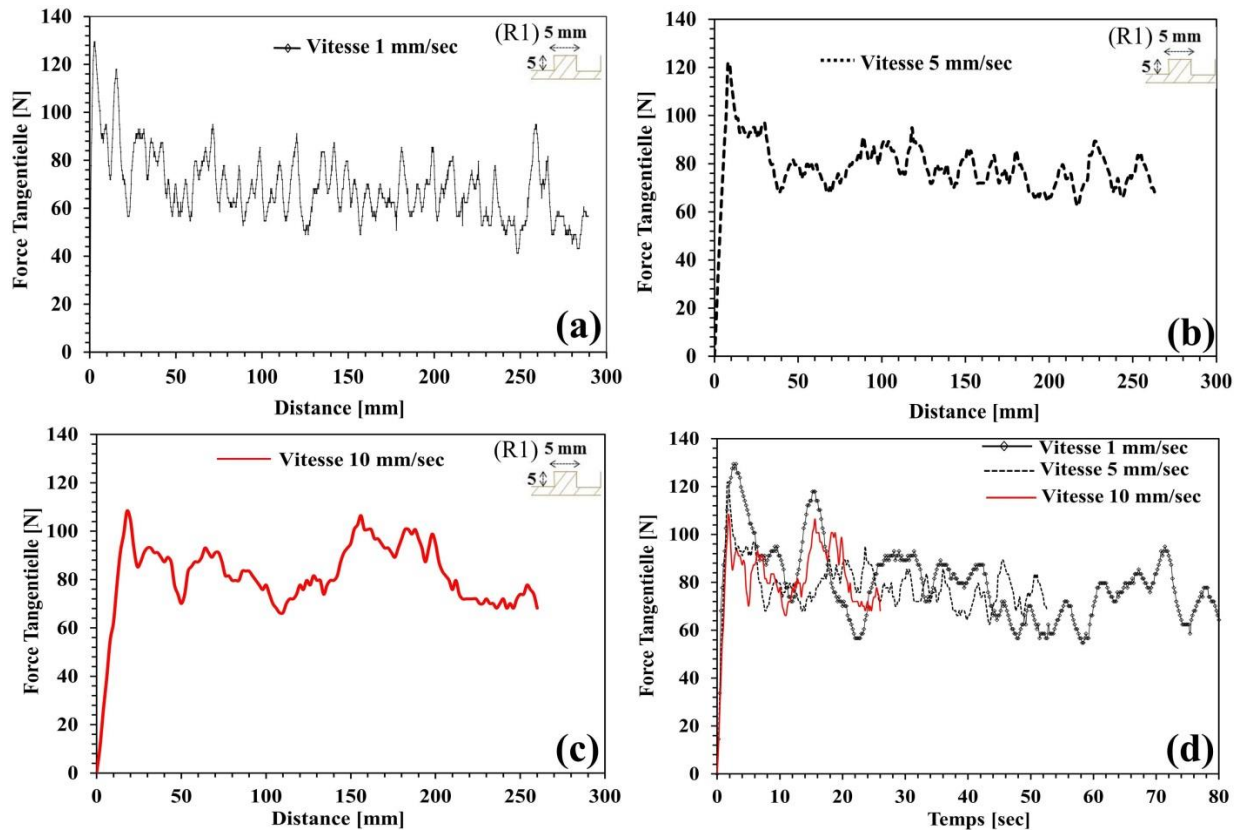


Figure II-15 - R1 : Variation de la force tangentielle en fonction de la distance de déplacement (a ; b et c) et en fonction du temps (d) pour les vitesses : 1, 5 et 10 mm/s.

Pour se déplacer, la baguette entraîne les billes qui sont au repos dans la configuration initiale. Le mouvement de la baguette provoque une augmentation de la force tangentielle jusqu'à une valeur maximale (premier pic) correspondant à la force nécessaire pour déplacer les billes de leurs positions initiales. La diminution de la force après le premier pic, peut être expliquée par l'augmentation du volume des interstices à l'interface. En effet, sous l'effet du déplacement de la baguette, les billes initialement dans un état statique (compacité $\approx 0,6$) vont s'écarter pour pouvoir se déplacer. Elles vont laisser de la place entre elles, ce qui réduit les contacts entre les billes et les créneaux, et la force tangentielle diminue. Ensuite, sous l'effet du mouvement de la baguette, les billes se réarrangent et la force tangentielle oscille dans le régime dynamique.

La diminution des contacts entre les billes et les créneaux peut être expliquée par la dilatanse de Reynolds [129]. En effet, Reynolds a montré que lors de la déformation d'un

empilement dense, les grains doivent se désenchevêtrer. Le mouvement relatif des grains va induire une diminution de la fraction volumique au cours de la déformation.

La vitesse de déplacement ne semble pas avoir d'influence notable sur la force tangentielle moyenne. Cette dernière est de l'ordre de 75, 78 et 83 N respectivement pour une vitesse de 1, 5 et 10 mm/s. Les oscillations sont décrites par l'écart-type des points de mesure dans le régime dynamique, il est de l'ordre de 12 N (16%), 7 N (9%) et 13 N (16 %) respectivement pour une vitesse de 1, 5 et 10 mm/s.

II.5.1.2 Profils de cisaillement

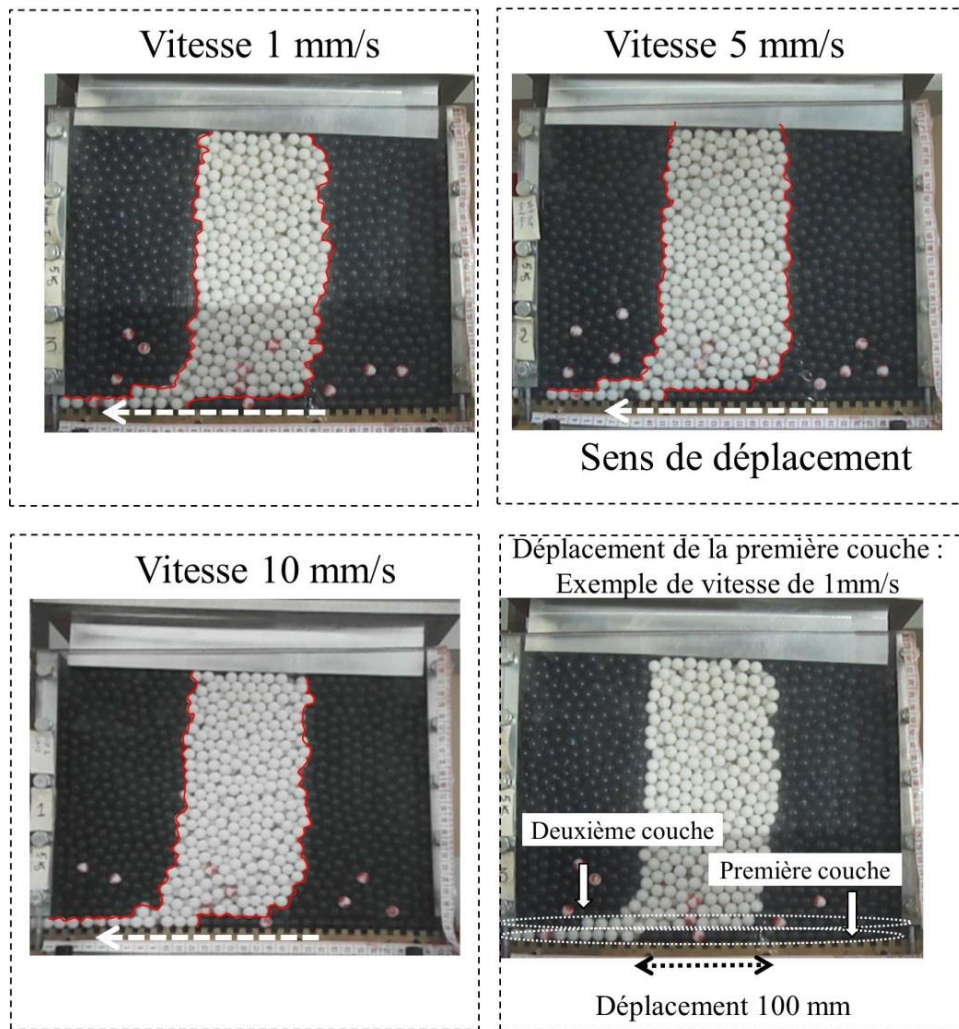


Figure II-16 - R1 : Profils de cisaillement pour des vitesses de déplacement de 1, 5 et 10 mm/s.

La **Figure II-16** présente les profils de cisaillement pour des vitesses de déplacement de 1, 5 et 10 mm/s. Ils correspondent à un même nombre de billes sortantes de la boîte. Dans les trois cas, un déplacement relatif entre la première couche et la baguette a été observé. En effet,

pour une distance de déplacement de la baguette de 300 mm, la première couche n'est pas entraînée parfaitement par la baguette, elle se déplace d'une distance d'environ de 100 mm. Ensuite, lors de son déplacement, la première couche entraîne les billes des couches supérieures sans créer une désorganisation près de la baguette. Nous rappelons que la charge appliquée sur le milieu granulaire n'est pas uniforme sous l'effet des mouvements de billes sous le couvercle.

La **Figure II-17** présente les mécanismes observés à l'interface de la baguette. Près de l'interface billes-baguette, dans la configuration initiale les billes se positionnent dans les creux d'une profondeur de 1 mm. Lorsqu'une vitesse est imposée à la baguette, pour se déplacer, quelle que soit la vitesse, la bille peut subir au moins un des mouvements suivants :

- Entraînement : la bille reste dans le creux (position initiale) et se déplace à la même vitesse que la baguette [**Figure II-17-b**].
- Rotation : La bille reste dans sa position initiale et la baguette se déplace sous la bille. Les arrêtes des créneaux provoquent un mouvement de rotation pour la bille [**Figure II-17-c**].
- Rotation et déplacement : La bille franchit les arrêtes des créneaux en se déplaçant dans le sens opposé au déplacement de la baguette [**Figure II-17-d**].

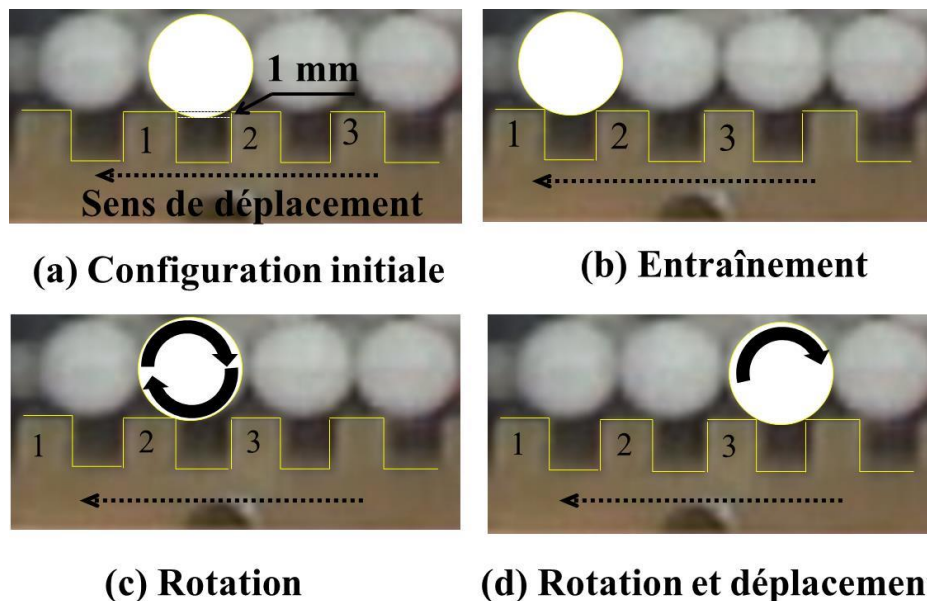


Figure II-17 - Mécanismes observés durant le déplacement de la baguette R1.

Les mêmes mécanismes ont été observés pour les différentes vitesses. La vitesse ne semble pas avoir d'influence sur les profils de cisaillement.

II.5.1.3 Nombre de billes sortantes

Le nombre de billes sortantes est étudié dans ce chapitre parce qu'il sera un paramètre d'une comparaison expérimental/numérique présentée dans le chapitre suivant.

Le **Tableau II-3** présente le nombre de billes sortantes pour les trois vitesses étudiées. Le nombre de billes sortantes et l'écart présentés dans le **Tableau II-3** correspondent respectivement à la moyenne de trois essais et leur écart-type. Le nombre de billes sortantes de l'ouverture semble indépendant de la vitesse de déplacement de la baguette.

Vitesse [mm/sec]	1	5	10
Nombre de billes sortantes	180	174	179
Ecart	6	5	6

Tableau II-3 - Nombre de billes sortantes pour les vitesses : 1, 5 et 10 mm/s.

Pour les essais présentés par la suite, la vitesse de déplacement de la baguette est fixée à 5 mm/s. Pour cette valeur, les oscillations dans le régime dynamique et l'écart du nombre de billes sortantes sont plus faibles par rapport aux autres vitesses.

II.5.2 Influence de la rugosité de la baguette

L'étude de l'influence de la rugosité sur les grandeurs observables a été réalisée sur les baguettes R1, R2 et R3. La force normale appliquée sur la baguette est d'environ 85 N (poids propre des billes), ce qui correspond à une pression normale d'environ 3,5 kPa. Nous rappelons que la vitesse de déplacement de la baguette est de 5 mm/s.

II.5.2.1 Force tangentielle

La variation de la force tangentielle en fonction du déplacement des baguettes R1, R2 et R3 est présentée respectivement dans les **Figure II-18-a, b et c**. La **Figure II-18-d** présente l'évolution de la force tangentielle pour les trois baguettes.

Le régime dynamique commence à partir d'une distance de déplacement de la baguette d'environ 10 mm pour R1 et à partir d'une distance de déplacement d'environ 20 mm pour R2 et R3. Nous constatons que la valeur maximale de la force tangentielle (premier pic) augmente avec la rugosité [**Figure II-18-d**]. Cette valeur est de l'ordre 38 N, 48 N, et 52 N respectivement pour R1, R2 et R3. Par contre, en régime dynamique les valeurs moyennes de la force tangentielle correspondant à R1 (21 N) et R2 (22 N) sont proches. Tandis que, la valeur de la force tangentielle devient plus élevée pour R3 (30 N).

Afin d'expliquer l'influence de la rugosité sur la force tangentielle, pour chaque rugosité nous avons décrit les mécanismes observés à l'interface billes-baguette lors du cisaillement.

Pour la baguette R1 (cas où les billes ne peuvent pas se loger dans les creux), à l'état initial chaque bille de la première couche se positionne dans un creux d'une profondeur de 1 mm. Lorsque la baguette R1 se déplace, la bille est animée d'un mouvement (rotation ou déplacement). Lors du déplacement de la baguette, la bille franchit systématiquement les différents obstacles (60 creux et 60 créneaux) et les mécanismes observés sont ceux présentés dans la **Figure II-17**.

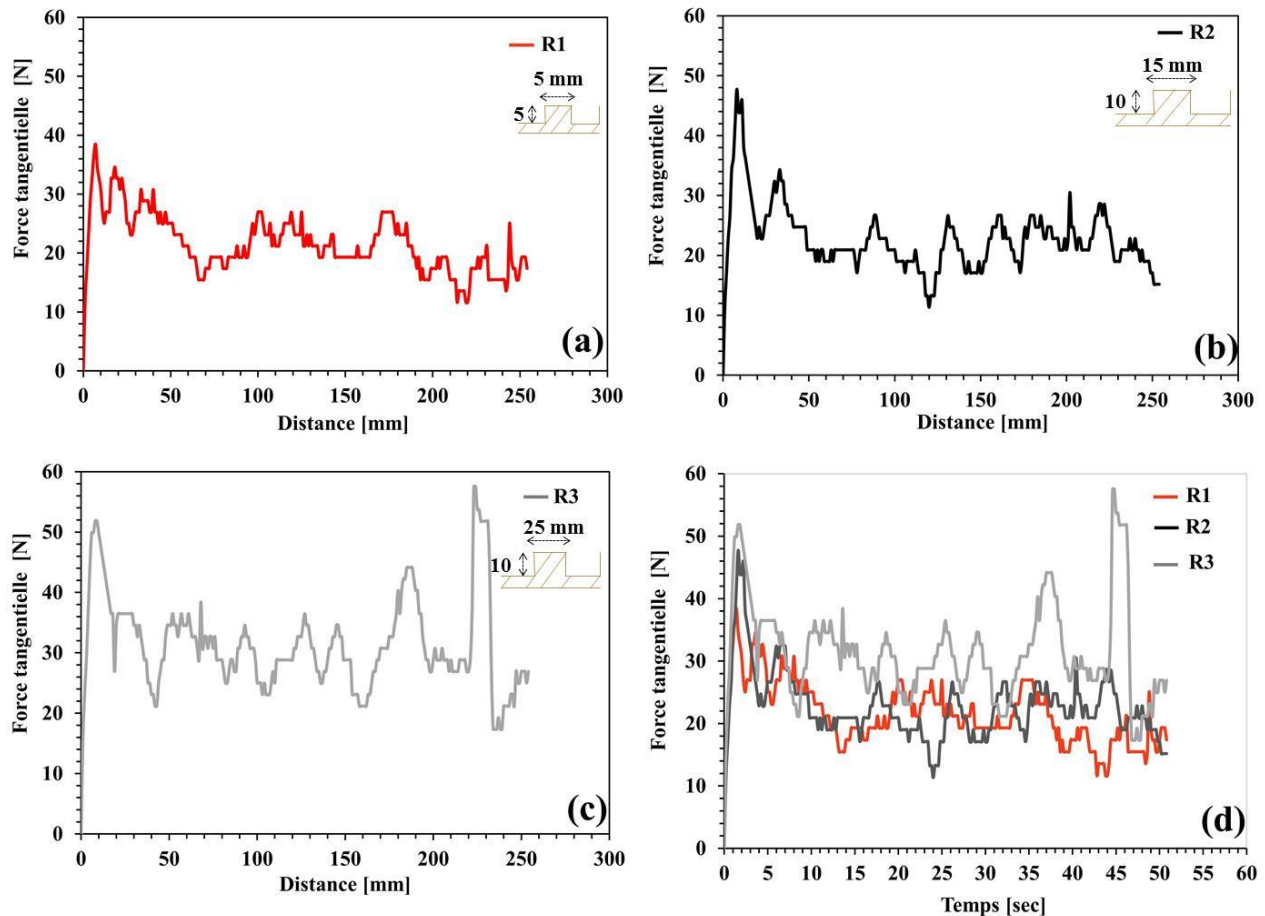
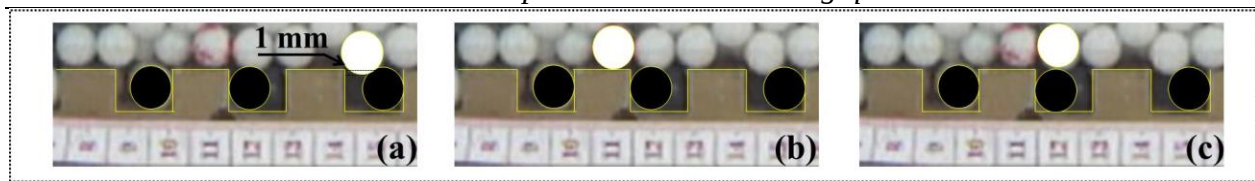


Figure II-18 - Variation de la force tangentielle pour les baguettes : R1, R2 et R3.

Dans le cas de la baguette R2, dans la configuration initiale, les billes de la première couche peuvent se positionner dans un creux de profondeur de 1 mm [**Figure II-19 –a**], sur les créneaux [**Figure II-19-b**] ou sur une bille logée entre deux créneaux [**Figure II-19-c**]. Ces différentes possibilités de positionnement à l'état initial dans le cas de la baguette R2 peuvent expliquer la différence observée au niveau du pic de la force tangentielle (38 N pour R1 et 48 N pour R2).



R2 : Configuration initiale

Figure II-19 - Positionnement d'une bille sur R2 dans la configuration initiale.

Lors du déplacement de la baguette R2 la bille de la première couche peut :

- Tourner sur la surface des créneaux [Figure II-20-a].
- Pousser la bille logée entre deux créneaux, entrer dans un creux de profondeur de 1 mm et ensuite dépasser la bille logée [Figure II-20-b].
- Dépasser les arêtes des créneaux [Figure II-20-c].
- Entrer dans un creux d'une profondeur de 1 mm et ensuite dépasser la bille logée entre deux créneaux [Figure II-20-d].

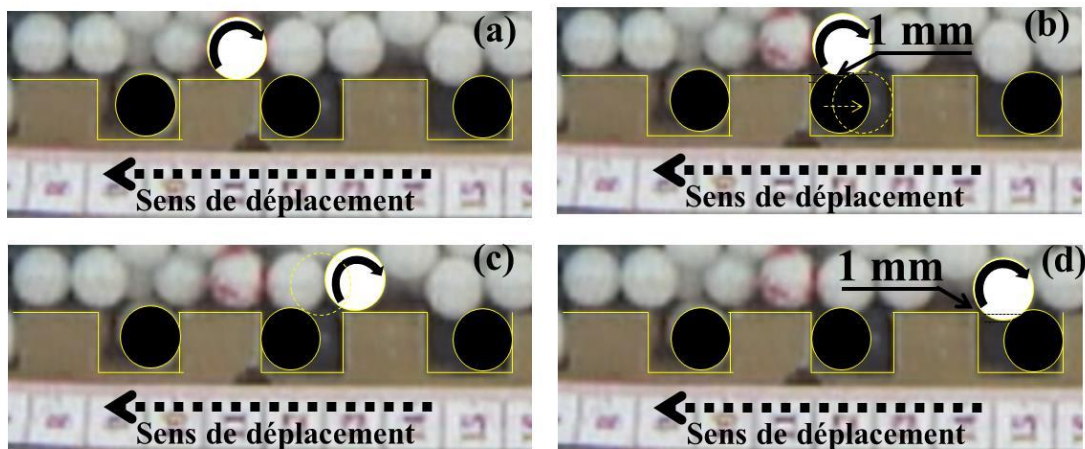
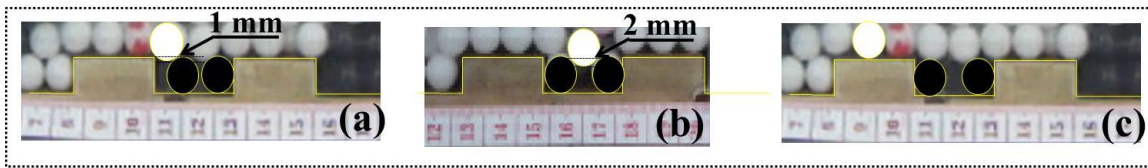


Figure II-20 - Mécanismes observés durant le déplacement de la baguette R2.

Les mécanismes observés sur R2 sont différents de ceux observés sur la baguette R1, mais ils n'ont pas engendré une variation de la force tangentielle moyenne par comparaison avec celle de R1.

Pour la baguette R3 (cas où deux billes peuvent se loger dans un creux), à la configuration initiale la bille peut se positionner dans un creux d'une profondeur de 1 mm, sur la surface des créneaux ou dans un creux d'une profondeur de 2 mm formé par deux billes logées entre deux créneaux.



R3 : Configuration initiale

Figure II-21 - Positionnement d'une bille sur R3 dans la configuration initiale.

Lors du déplacement de la baguette R3 la bille de la première couche doit franchir 12 créneaux et 12 creux. Lors de son mouvement, elle peut :

- Tourner sur la surface des créneaux [Figure II-22-a].
- Entrer dans un creux d'une profondeur de 1 mm et ensuite dépasser la bille logée entre deux créneaux [Figure II-22-b].
- Pousser la bille logée entre deux créneaux, entrer dans un creux de profondeur de 1 mm et ensuite dépasser la bille logée [Figure II-22-c].
- Sortir d'un creux de profondeur de 2 mm et dépasser une bille logée [Figure II-22-d].

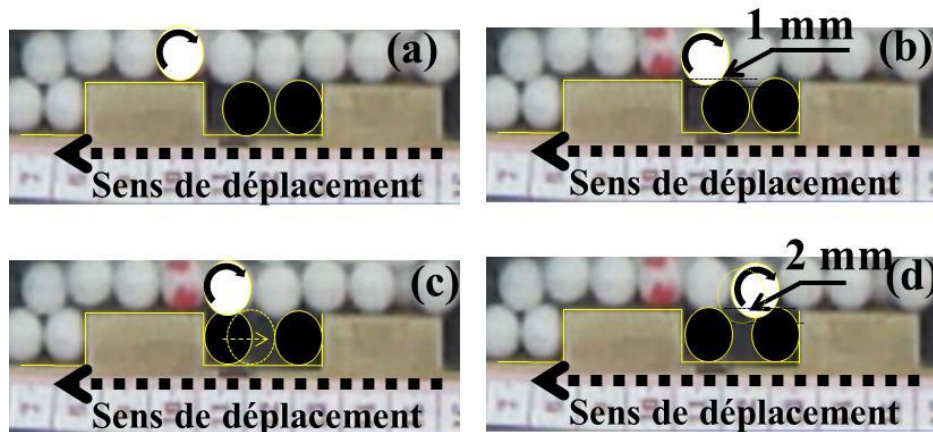


Figure II-22 - Mécanismes observés durant le déplacement de la baguette R3.

Il semble que de s'extraire d'un creux de profondeur de 2 mm provoque un désordre près de l'interface ce qui pourrait expliquer l'augmentation de la force tangentielle (premier pic et régime dynamique) pour R3 par rapport à R1 et R2. Le franchissement des gros obstacles (creux de profondeur de 2 mm) se traduit par des oscillations et des pics notables dans le régime dynamique de la courbe d'enregistrement de la force tangentielle [Figure II-18-c].

Les différents mécanismes observés dans les cas de R1, R2 et R3 permettent de conclure que le franchissement de quelques gros obstacles (sortir d'un creux de profondeur de 2 mm) nécessite une force plus importante que de multiples franchissements d'obstacles réduits (cas de

la baguette R1 et R2). Ces mécanismes sont différents de ceux observés par Djelal [49] où un mouvement de rotation des particules engendre une force de frottement plus importante. De plus, pour la gamme de rugosités étudiées par Djelal, un frottement minimal correspond à une rugosité de même ordre de grandeur que la taille moyenne d'une particule de kaolin. Tandis que, parmi les trois rugosités étudiées, nous avons trouvé une force tangentielle presque identique pour R1 et R2. Cette force devient plus importante pour R3.

II.5.2.2 Profil de cisaillement

La **Figure II-23** présente les profils de cisaillement pour les baguettes R1, R2 et R3. Sous l'effet du déplacement de la baguette, la première couche de billes se déplace et entraîne les billes des couches supérieures. L'épaisseur de la bande de billes déplacées est d'environ trois fois le diamètre de billes pour R1 et R2 et d'environ quatre fois le diamètre de billes pour R3 (sauf pour une force normale de 275 N discutée dans la section suivante). Les mouvements de billes dans la bande de billes déplacées dépendent des mécanismes de la première couche. En effet, lorsque les billes de la première couche rencontrent des gros obstacles (cas de R3) leur mouvements perturbent le reste de l'empilement ce qui pourrait augmenter l'épaisseur de la bande de billes déplacées.

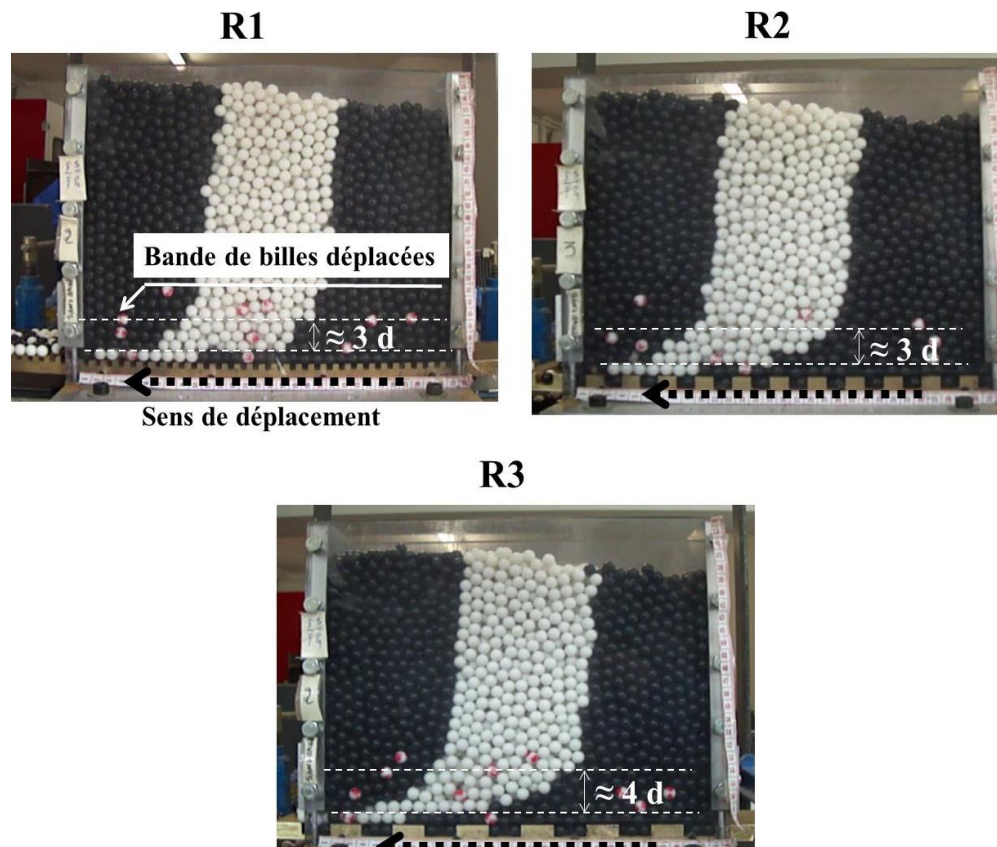


Figure II-23 - Profils de cisaillement pour les trois baguettes : R1, R2 et R3.

II.5.3 Force normale

Dans cette partie, nous présentons l'influence de la force normale sur la force tangentielle pour les trois baguettes. La force normale appliquée sur la baguette résulte du poids des billes, et des forces appliquées par les masses. Nous rappelons que la vitesse de déplacement de la baguette est de 5mm/s.

La **Figure II-24** présente la variation de la force tangentielle en fonction de la force normale pour R1, R2 et R3. Il faut rappeler que chaque point de la courbe et chaque barre d'erreur représentent respectivement la moyenne et l'écart type sur trois mesures.

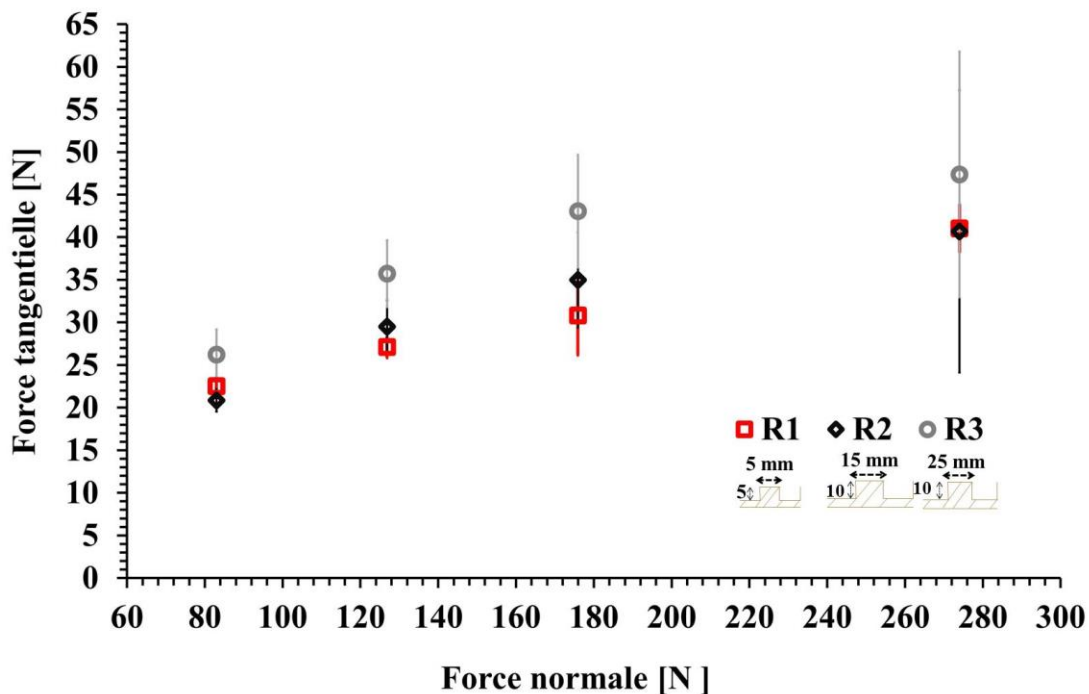


Figure II-24 - Variation de la force tangentielle (régime dynamique) en fonction de la force normale pour R1, R2 et R3.

La force tangentielle augmente avec l'augmentation de la force normale. Pour les baguettes R1 et R2, nous n'avons pas trouvé de différence notable de la force tangentielle. Mais, nous remarquons que quelle que soit la force normale, la force tangentielle exercée sur la baguette R3 est plus élevée par rapport à celle exercée sur R1 et R2. En effet, nous avons conclu dans le paragraphe II.5.2.1 que le franchissement de quelques « gros obstacles » (sortir d'un creux de profondeur de 2 mm) nécessite une force plus importante que de multiples franchissements d'obstacles réduits. Lorsque la force normale augmente, le milieu devient plus confiné ce qui peut entraver le franchissement des obstacles. Dans ce cas, pour franchir les obstacles, la bille applique une force plus élevée sur l'arrête du créneau et ou sur la bille logée dans le creux de la baguette. Le créneau applique la même force sur la bille (force de réaction) et

si cette force dépasse la limite à la rupture de la bille, elle se casse, ce qui se traduit par un pic dans le régime dynamique [Figure II-25]. Les valeurs de la force tangentielle correspondant à ces pics ont été retirées des calculs de la force tangentielle moyenne. Dans certains cas, lorsque les billes cassées influent sur l'arrangement granulaire, l'essai a été répété. Les billes cassées ont été observées uniquement dans le cas de la baguette R3. Nous n'avons pas pu observer si les billes cassées sont une indication de blocages à la sortie de la boîte ou des obstacles plus gros en surface de la paroi rugueuse.

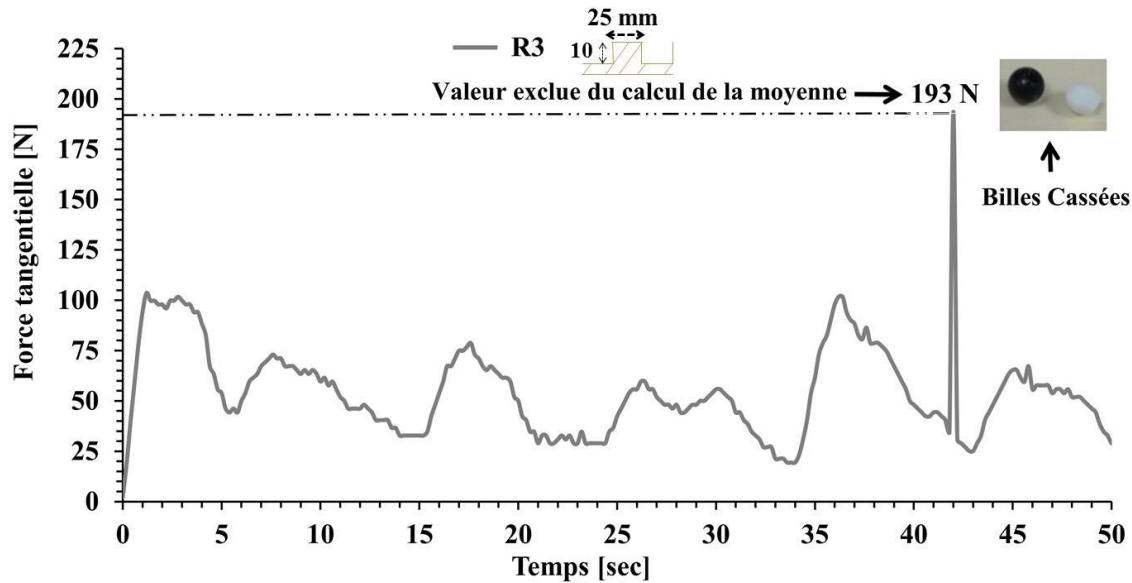


Figure II-25 - Pic observé sur le régime dynamique de R3 pour une force normale de 275 N.

II.5.3.1 Profils de cisaillement

La Figure II-26 présente les profils de cisaillement pour les différentes forces normales appliquées sur R1, R2 et R3. Ces profils correspondent à la fin de l'essai et non au même nombre de billes sortantes. Nous ne présentons pas ici les mécanismes à l'interface parce qu'ils sont décrits en détails dans le paragraphe II.5.2.1.

Une force normale inférieure à 175 N n'a pas d'influence remarquable sur les profils de cisaillement. L'épaisseur de la bande de billes déplacées est d'environ trois fois le diamètre des billes pour R1 et R2 et d'environ quatre fois le diamètre des billes pour R3.

Tandis que pour une force normale de 275 N un désordre granulaire a été observé près de l'interface surtout dans la première couche de billes. Pour cette force les mouvements des billes deviennent plus difficiles pour franchir les obstacles, ce qui peut entraîner une désorganisation dans le milieu. De même, l'épaisseur de la bande de billes déplacées devient plus faible, d'environ égale au diamètre des billes dans le cas R3.

Force normale 85 N

R1



Sens de déplacement

R2



R3



Force normale 125 N



Force normale 175 N



Force normale 275 N

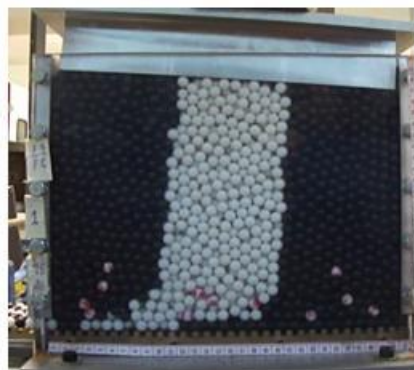


Figure II-26 - Profils de cisaillement de R1, R2 et R3, pour différents forces normales.

II.5.3.2 Nombre de billes sortantes

La **Figure II-27** présente le nombre de billes sortantes en fonction de la force normale pour R1, R2 et R3. A partir de cette figure, nous pouvons tirer deux conclusions. La première est que pour la même baguette, la force normale n'influe pas sur le nombre de billes sortantes. Les nombres moyens de billes sortantes pour les baguettes R1, R2 et R3 sont respectivement 170, 260 et 315 billes (la moyenne pour les quatre points). La deuxième conclusion est que le nombre de billes sortantes pour R3 est plus élevé que celui pour R2. De même, le nombre de billes sortantes pour R2 est plus élevé que celui pour R1. En effet, dans le cas où aucune bille ne peut se loger dans le creux (R1), c'est seulement la première couche de billes qui peut sortir de l'ouverture. Tandis que pour les deux autres baguettes, en plus de la première couche, les billes logées dans les creux de la baguette peuvent sortir par l'ouverture. Le nombre de billes logées dans les creux de la baguette R3 est plus élevé que celui de la baguette R2, par conséquent, le nombre de billes sortantes pour la baguette R3 est plus élevé que celui de la baguette R2.

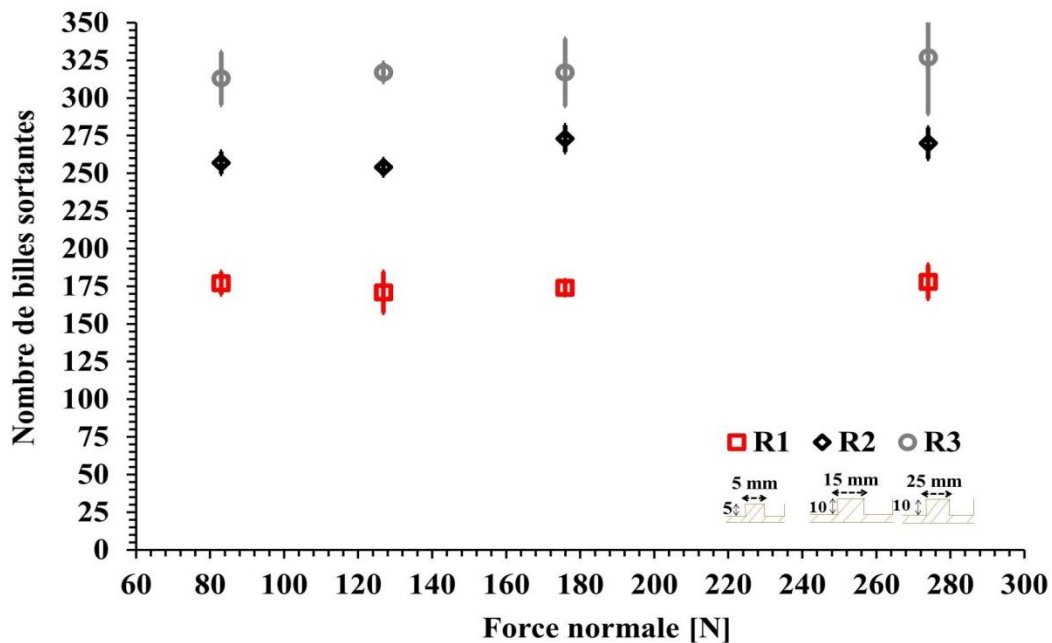


Figure II-27 – Nombre de billes sortantes pour R1 , R2 et R3.

II.6 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons abordé l'étude expérimentale du cisaillement d'un milieu granulaire sur une paroi rugueuse. Nous avons décrit tout d'abord le dispositif expérimental et le protocole suivi. Les mesures réalisées sur la compacité ont montré qu'elle varie entre 0,59 et 0,606 quelle que soit la rugosité et la charge appliquée sur le milieu granulaire.

Ensuite, une étude de l'influence des conditions aux limites sur les grandeurs observables a été présentée.

L'étude réalisée sur la vitesse de déplacement de la baguette R1 a montré que :

- La vitesse de déplacement ne semble pas avoir d'influence notable sur la force tangentielle moyenne dans le régime dynamique. Pour une vitesse de déplacement de 1, 5 et 10 mm/s la force tangentielle moyenne est respectivement de l'ordre de 75, 78 et 83N.
- Dans la configuration initiale, les billes de la première couche se positionnent dans un creux de profondeur de 1 mm. Lorsque la baguette se déplace, les mécanismes observés à l'interface bille-baguette sont : entraînement, rotation et déplacement.
- Les mêmes mécanismes ont été observés pour les différentes vitesses.
- Le nombre de billes sortantes de la boîte est indépendant de la vitesse de déplacement de la baguette.

Lors du déplacement de la baguette R2 une bille de la première couche peut :

- Tourner sur la surface des créneaux.
- Entrer dans un creux d'une profondeur de 1 mm et ensuite dépasser la bille logée entre deux créneaux.
- Pousser la bille logée entre deux créneaux, entrer dans un creux de profondeur de 1 mm et ensuite dépasser la bille logée.
- Dépasser les arêtes des créneaux.

Et dans le cas de la baguette R3, il s'ajoute par rapport à R2 :

- Sortir d'un creux de profondeur de 2 mm et dépasser une bille logée.

La valeur maximale de la force tangentielle (premier pic) augmente avec l'augmentation de la rugosité. Tandis que dans le régime dynamique, les valeurs moyennes de la force tangentielle dans les cas de R1 et R2 sont proches et la force tangentielle moyenne devient plus élevée pour R3. A partir des mécanismes observés dans les cas de R1, R2 et R3, nous avons conclu que le franchissement de quelques gros obstacles (sortir d'un creux de profondeur de 2 mm) nécessite une force plus importante que de multiples franchissements d'obstacles réduits (cas de la baguette R1 et R2). Surtout que des billes cassées ont été observées uniquement durant les essais réalisés sur la baguette R3. Ces mécanismes sont différents de ceux observés par Djelal [49] où un mouvement de rotation des particules engendre une force de frottement plus importante. De plus, pour la gamme de rugosités étudiées par Djelal, un frottement minimal correspond à une rugosité de même ordre de grandeur que la taille moyenne d'une particule de

kaolin. Tandis que, parmi les trois rugosités étudiées, nous avons trouvé une force tangentielle presque identique pour R1 et R2. Cette force devient plus importante pour R3.

La force tangentielle augmente avec l'augmentation de la force normale. Une force normale inférieure à 175 N n'a pas d'influence remarquable sur les profils de cisaillement. L'épaisseur de la bande de billes déplacées est d'environ trois fois le diamètre des billes pour R1 et R2 et d'environ quatre fois le diamètre des billes pour R3. Tandis que pour une force normale de 275 N un désordre granulaire a été observé près de l'interface surtout dans la première couche de billes. De même, pour une force normale de 275 N l'épaisseur de la bande de billes déplacées devient plus faible, d'environ égale au diamètre des billes dans le cas R3. Pour la même baguette, pour les différentes forces normales appliquées sur la baguette on a presque le même nombre de billes sortantes de l'ouverture.

Avec notre dispositif expérimental, nous avons pu expliquer l'écart de mesures observées pour les trois baguettes par des phénomènes présents à l'interface. Mais, tous les phénomènes décrits sont ceux qui sont près de la paroi parce que nous ne pouvons pas observer les mouvements des billes dans le milieu. Par conséquent, les mécanismes observés ne sont pas liés seulement à la rugosité. En effet, les mouvements des billes sont affectés par les parois et par l'ouverture. La structure du milieu granulaire près de la paroi est différente de celle des grains loin de la paroi. De même, sur les profils de cisaillement, nous remarquons que les billes se dirigent vers l'ouverture ce qui confirme que les mouvements des billes près des baguettes sont aussi affectés par l'ouverture. La solution qui nous a paru la plus pertinente pour étudier l'interface du milieu granulaire cisailé sur une paroi rugueuse « sans artéfacts » est de compléter cette étude expérimentale par une étude numérique en conditions périodiques (sans parois latérales). Pour ce faire, une modélisation basée sur la Méthode des Eléments Discrets a été réalisée. Avant d'étudier l'interface d'un milieu granulaire cisailé par la modélisation numérique, une étude comparative entre les essais expérimentaux et les simulations numériques a été réalisée. L'objectif de l'étude comparative est de comprendre dans quelles conditions notre modèle numérique est capable de reproduire les phénomènes observés lors d'un essai de cisaillement. Cette étude est présentée dans le chapitre 3.

CHAPITRE III

***Simulation du modèle analogique par la Méthode
des Eléments Discrets (DEM)***

III.1 Introduction

Les essais réalisés sur le dispositif expérimental ont permis de décrire les mouvements de billes près de la paroi. Toutefois, l'accès à la microstructure présente des difficultés. Généralement, les modèles éléments discrets sont utilisés pour modéliser et expliquer des phénomènes physiques à partir des informations microscopiques. Pour cette raison, l'étude expérimentale est souvent complétée par une modélisation numérique discrète. La modélisation numérique discrète permet aussi d'étudier l'influence des différents paramètres qui peuvent intervenir, en les incorporant ou non dans le modèle numérique.

Les différents avantages de la modélisation numérique nous ont amené à simuler par la méthode aux éléments discrets les phénomènes liés à l'interface d'un milieu granulaire cisailé sur une paroi rugueuse [130, 131]. Le code numérique utilisé est un code interne. Une confrontation entre les résultats expérimentaux et numériques permet de montrer que le code numérique est capable de reproduire les comportements macroscopiques observés. Une étude comparative avec les essais expérimentaux présentés dans le chapitre précédent fait l'objet de ce chapitre.

Nous présentons d'abord le concept du code numérique utilisé et nous décrivons aussi les données nécessaires à son application. Ensuite, nous expliquons la procédure suivie pour simuler via notre code numérique le dispositif expérimental. Une étude de l'influence des différents paramètres qui peuvent intervenir dans les résultats est ensuite présentée. Enfin, les simulations numériques sont comparées aux résultats expérimentaux.

III.2 Présentation du code numérique : DemGCE



Le code numérique « DemGCE » (Discrete element modeling of Granular materials for Civil Engineering) utilisé dans le cadre de notre étude est un outil 3D basé sur l'approche smooth DEM. C'est un code interne développé par le département de Génie Civil & Environnemental de Mines Douai. L'objectif principal de ce code est de simuler les applications en génie civil (béton, sol, etc.). Cet outil numérique a été utilisé pour la simulation des matériaux granulaires secs [132, 113], de cisaillement d'un agglomérat [133, 134], de l'écoulement du béton [135] et de l'essai triaxial [136].

Dans le code DemGCE, un grain est représenté par une sphère. Cette forme géométrique simple a été choisie pour faciliter la détection des contacts entre les grains. L'algorithme de détection des contacts utilisé et les lois d'interactions implémentées dans le code sont présentés dans le chapitre 1.

Différents types de forces sont pris en compte dans le code DemGCE, comme la force de gravité, les forces de contact (normale et tangentielle), les forces de Van der Waals, les forces

électrostatiques, la force de Stokes ... Le choix des modèles de forces et des forces à prendre en compte dépend de l'étude. Par exemple si l'étude est réalisée aux grandes échelles (grains de dimensions supérieures à 100 μm), certaines forces comme les forces de Van der Waals sont supposées négligeables [133]. Dans notre étude le milieu granulaire est formé de grains secs de diamètre 10 mm. Par conséquent, les interactions prises en compte sont la force de gravité et les forces de contact (normale et tangentielle). Les autres forces sont supposées négligeables. Les forces de contact implémentées dans le code sont décrites dans le chapitre 1 paragraphe I.4.3 [113].

III.2.1 Les conditions aux limites

Les conditions aux limites d'une simulation numérique sont des conditions imposées par l'utilisateur sur les bords de la boîte de simulation. Certaines conditions aux limites comme la rugosité, la vitesse de déplacement, etc. sont liées à un segment ou une face propre de la boîte de simulation. Avant de réaliser une simulation numérique, il est nécessaire d'identifier ces conditions aux limites parce qu'elles affectent de manière déterminante les résultats.

Dans le code DemGCE, les conditions aux limites de la géométrie sont : plan, cylindre cône, objets et conditions périodiques. Seules les conditions aux limites utilisées dans notre étude sont présentées [Figure III-1].

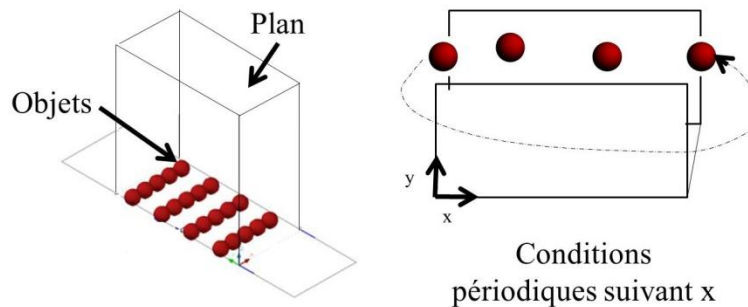


Figure III-1 - Conditions aux limites utilisées.

- Plan : ce type de conditions aux limites est assuré dans le code DemGCE par une sphère de rayon infini.
- Sphères ou objets : nous avons implémenté dans le code une fonction « `add_objects_spheres ()` ». L'implémentation de cette fonction a été inspirée du code DP3D (Discrete Powder 3D), code dédié à la science des matériaux [137]. L'objectif de cette fonction est de simuler une paroi rugueuse. Elle permet de coller sur un plan, des sphères appelées par la suite « objets ». Chaque objet est identifié par son identifiant « `iobj` ». L'utilisateur doit donc remplir dans un fichier « `init_obj` » la position, les composantes de la vitesse linéaire et angulaire, et le rayon de chaque objet.

De même, il est possible dans notre code de simuler une boîte infinie en appliquant des conditions aux limites de type périodique (système sans parois latérales) [Figure III-1]. Lorsqu'un grain du milieu passe au travers d'une des faces de la boîte de simulation, il réapparaît un grain identique par périodicité par la face opposée. La périodicité est appliquée lorsque le bord d'un grain dépasse la dernière cellule du système dans une direction déterminée.

III.2.2 Exécution du calcul et traitement des données utilisant DemGCE

Les fichiers nécessaires pour l'exécution de la simulation se trouvent dans un répertoire source (src). Par contre, le répertoire de calcul doit contenir 4 fichiers :

- param.in : dans ce fichier l'utilisateur doit fournir les informations liées aux données de base comme les dimensions du système, le nombre de particules concernées, plus des indications sur le milieu granulaire, conditions aux limites et type de calcul.
- init_micro : ce fichier décrit l'état initial du milieu granulaire, c'est la microstructure du milieu granulaire (identifiants des grains, leurs positions, leurs vitesses angulaires et de rotation et leur rayon) à $t = 0$.
- init_micro_cont : c'est l'histoire de chargement des contacts entre les grains à l'état initial.
- init_obj : ce fichier contient les informations (identifiants, positions, vitesses et rayon) liées aux conditions aux limites de type objets.

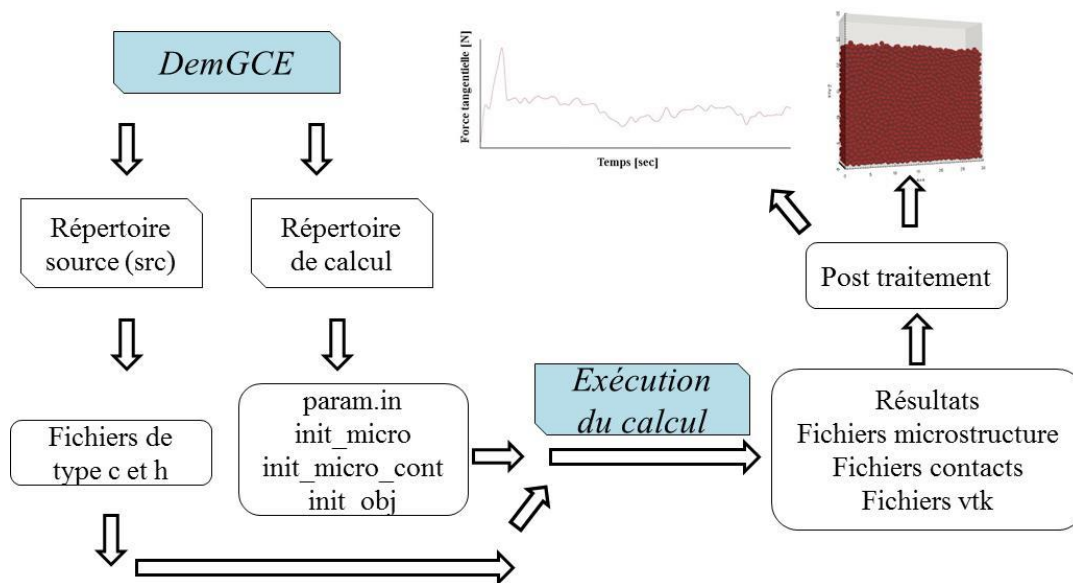


Figure III-2- Organigramme du fonctionnement de DemGCE.

La Figure III-2 présente le principe de l'exécution d'une simulation en utilisant le code DemGCE. A la fin de la simulation, le fichier résultats (valeurs des forces, compacité, etc.) et

d'autres fichiers de type micro et vtk sont sauvegardés dans le répertoire de calcul. Les fichiers de type micro et vtk permettent respectivement d'accéder aux informations liées à la microstructure du milieu granulaire et aux conditions aux limites. Pour visualiser l'empilement en 3D et traiter les résultats, nous avons utilisé le logiciel libre ParaView (Parallel Visualization Application) [138]. C'est un logiciel multi-plateformes permettant la visualisation interactive de gros volumes de données en 2D et 3D. Ce logiciel offre la possibilité de suivre l'évolution durant le temps du système étudié par vidéo, de tracer des lignes, de faire des coupes, de prendre des images, etc. Dans cette étude, tout affichage en 3D a été réalisé grâce à cet outil.

III.3 Simulation numérique de l'essai expérimental

Nous présentons d'abord la méthode suivie pour la simulation de l'essai expérimental. Cette méthode comporte la simulation des conditions aux limites et la préparation de l'empilement. Ensuite, nous décrivons les phases du post-traitement (calcul de la force tangentielle, obtention du profil de cisaillement et comptage du nombre de grains sortants de la boîte). Cette section se termine par une étude de la répétabilité de la simulation numérique.

III.3.1 Parois latérales et baguette rugueuse

Sur le dispositif expérimental, on distingue deux types de parois : une paroi rugueuse et mobile (baguette) et quatre parois planes et fixes (parois latérales). Une paroi plane est modélisée dans notre code numérique via les conditions aux limites de type plan. A noter que des parois latérales sont rajoutées pour représenter au plus près les conditions aux limites de l'essai expérimental mais peuvent être enlevées pour simuler un milieu semi-infini (conditions aux limites de type périodiques).

	R1	R2	R3
Diamètre des grains [mm]	2,5	5,0	5,0
Nombre des grains	7776	1968	1968

Tableau III-1 - Diamètre et nombre des grains de la paroi rugueuse.

La **Figure III-3** et le **Tableau II-1** présentent respectivement la modélisation de la paroi rugueuse (baguette) et leurs caractéristiques géométriques (diamètre et nombre). La modélisation des créneaux expérimentaux est délicate puisque la modélisation par des éléments discrets a des limites. En effet, les créneaux de baguettes ont des arêtes vives et des surfaces planes. Avec des éléments discrets « sphères en 3D », il est difficile de répondre à ces deux exigences. Pour simplifier la modélisation de créneaux, nous avons choisi de les modéliser par des paquets de grains sphériques collés sur une surface plane. Pour ce faire, utilisons la fonction

« add_objects_spheres () ». Nous rappelons que cette fonction est implémentée pour permettre le placement de grains sur un plan.

De même, le mouvement de grains de la paroi rugueuse n'est pas déterminé par la résolution de la loi fondamentale de la dynamique comme c'est le cas pour les autres grains dans le milieu granulaire. La distribution des grains de la paroi rugueuse, leur diamètre et la distance séparant deux paquets de grains successifs permettent de varier les dimensions des créneaux. La paroi rugueuse est donc la paroi formée par le plan inférieur et les grains collés sur ce plan. La modélisation de la paroi rugueuse est réalisée avant le début de la phase de la génération des grains du milieu granulaire. En effet, pour respecter le protocole expérimental suivi, les grains doivent sédimenter sur la paroi rugueuse. Après la sédimentation des grains et afin de cisailier l'empilement granulaire, un déplacement horizontal et à vitesse constante est imposé à la paroi rugueuse.

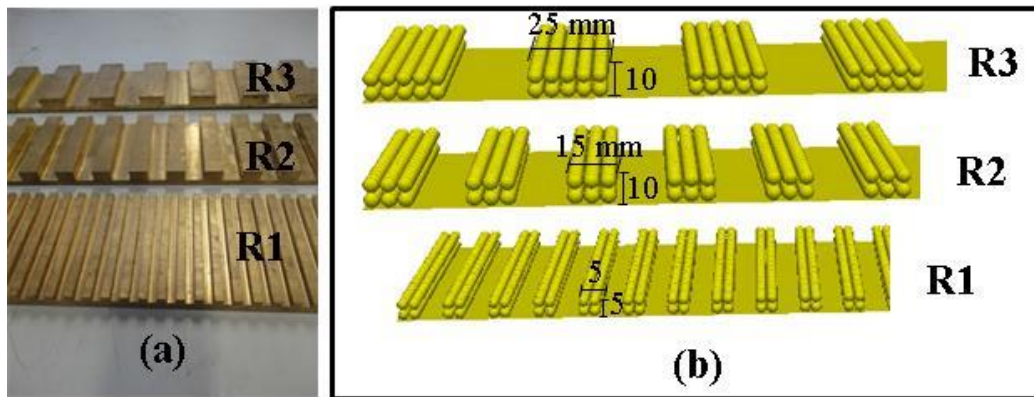


Figure III-3 - Paroi rugueuse : (a) Baguettes du dispositif expérimental; (b) Modélisation numérique DEM (code DemGCE).

Par défaut, les parois fixes et la paroi rugueuse mobile ont les mêmes paramètres matériaux que les grains du milieu granulaire. Les principaux paramètres matériaux sont : module de Young ($E = 1,0E+8$ Pa), coefficient de Poisson ($\nu = 0,29$), coefficient de frottement de glissement ($\mu_s = 0,15$), le coefficient de roulement ($\mu_r = 0,002$) et la constante d'amortissement ($A = 4,5E-5$).

III.3.2 Préparation de l'empilement

La préparation d'un empilement granulaire consiste dans un premier temps à générer des grains dans le volume de calcul. Dans la littérature, il existe plusieurs algorithmes de génération des grains. Citons par exemple les algorithmes séquentiels et ceux gravitationnels. Pour les algorithmes séquentiels, on peut citer les algorithmes RSA (Random Sequential Adsorption) [139, 140], MRSA (Modified Random Sequential Adsorption) [141] et CCA (Cluster Cluster

Agregation) [142]. Ainsi pour les algorithmes gravitationnels, nous pouvons citer l'algorithme de Visscher et Bolsterli [143] ou l'algorithme de Powell [144].

L'algorithme utilisé pour la génération de grains ou du « gaz de grains », est l'algorithme RSA. Il permet de préparer un empilement granulaire en quelque sorte semblable à la préparation d'un empilement destiné à l'expérimentation. Le principe du mode RSA est le suivant : un grain est d'abord placé dans une position aléatoire dans le volume de calcul, ensuite un autre grain est placé de telle sorte qu'il ne recouvre pas le grain précédent. La même procédure se répète, jusqu'à la génération de la totalité des grains. Dans cette phase les grains générés ne sont pas autorisés à bouger. Avec cette procédure, la compacité de grains générés ne dépasse pas 0,38, nous avons donc visé une compacité de 0,3 [Figure III-4].

Pour notre empilement, 6450 grains de 10 mm de diamètre sont générés dans le volume de calcul. Le nombre de grains, leur diamètre et les dimensions du volume sont égaux à ceux de l'expérimentation. Les caractéristiques micromécaniques des grains sont proches de celles des billes de verre utilisées pour l'essai expérimental. Ensuite, l'ensemble de grains est lâché sans vitesse initiale et sédimente sous l'effet de la gravité pour constituer un empilement granulaire stable (compacité voisine de 0,62) [Figure III-4].

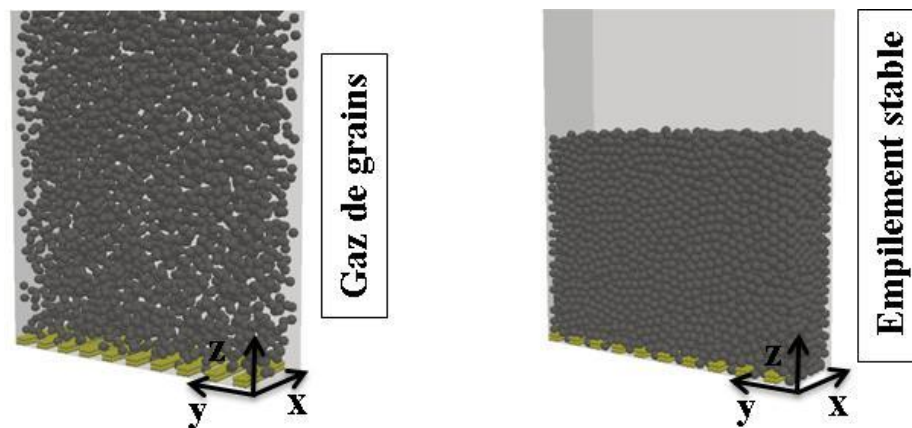


Figure III-4 – Préparation de l'empilement.

III.3.2.1 Plan supérieur et contrôle de la pression normale

Expérimentalement, pour appliquer une pression normale sur le milieu granulaire, des masses sont ajoutées sur la surface supérieure du milieu. Au cours de l'essai expérimental, la pression normale n'est pas uniformément distribuée sur la surface de l'empilement. En effet, le niveau des masses ajoutées sur le milieu granulaire est affecté par le niveau du milieu granulaire lui-même qui s'incline sous l'effet de la sortie de billes par l'ouverture. Au contraire, par la modélisation numérique la pression normale peut être contrôlée au cours de la simulation.

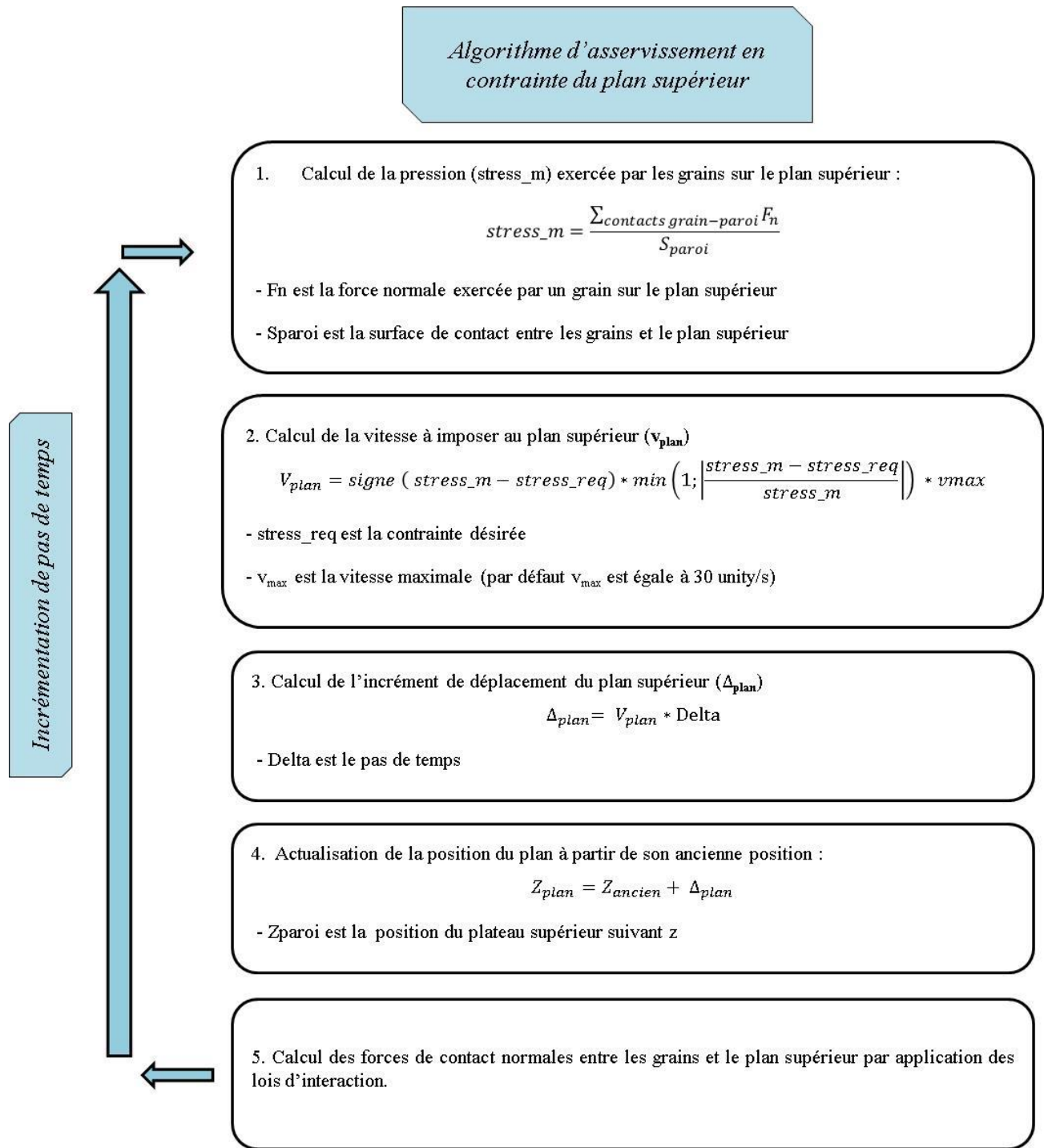


Figure III-5 - Algorithme du contrôle de la pression normale.

Dans nos simulations numériques, pour exercer une pression normale sur le milieu granulaire, nous avons adopté la procédure suivante [Figure III-5] :

- Placement d'un plan sur la surface supérieure du milieu granulaire.

- Calcul de la somme des forces exercées par les grains du milieu sur le plan supérieur.
- Calcul de la pression normale en divisant la somme des forces calculée sur la surface du plan supérieur.
- Si la pression normale calculée est inférieure à la pression désirée nous déplaçons le plan vers le milieu et nous recalculons la pression normale. Si elle est supérieure à la pression désirée, nous déplaçons le plan supérieur vers le haut.
- Déplacement du plan supérieur vers le haut ou vers le milieu jusqu'à atteindre la pression désirée.

La **Figure III-6** présente un exemple du contrôle d'une pression normale de 7900 Pa.

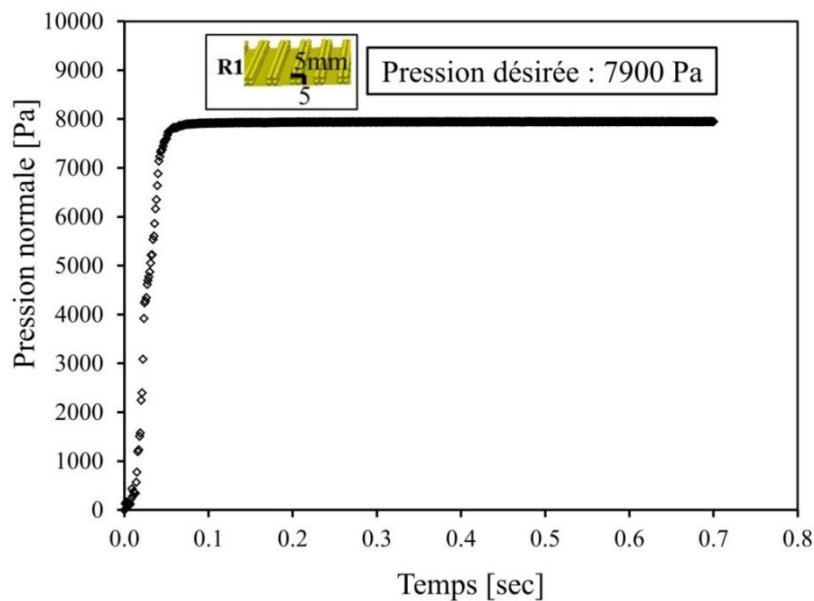


Figure III-6 - Exemple du contrôle de la pression normale sur le milieu granulaire.

III.3.2.2 Ouverture

Expérimentalement pour permettre la sortie des billes sans qu'elles ne soient bloquées au cours de l'essai, deux ouvertures ont été réalisées à l'extrémité des parois. La **Figure III-7** montre un exemple de simulation d'une ouverture de hauteur de 12 mm. L'ouverture a été modélisée aussi par des grains via les conditions aux limites de type objets, mais les grains de l'ouverture ne sont pas soumis à la même cinématique que les sphères objets utilisées pour modéliser la baguette rugueuse. Tout d'abord, nous plaçons une paroi plane latérale et perpendiculaire à la direction de déplacement de la paroi mobile à une distance $x = n$ cellules de la paroi mobile. En effet, comme le volume de calcul est divisé en cellules, l'ouverture formée est donc de hauteur de n cellules. Pour régler la hauteur de l'ouverture, nous ajoutons des grains.

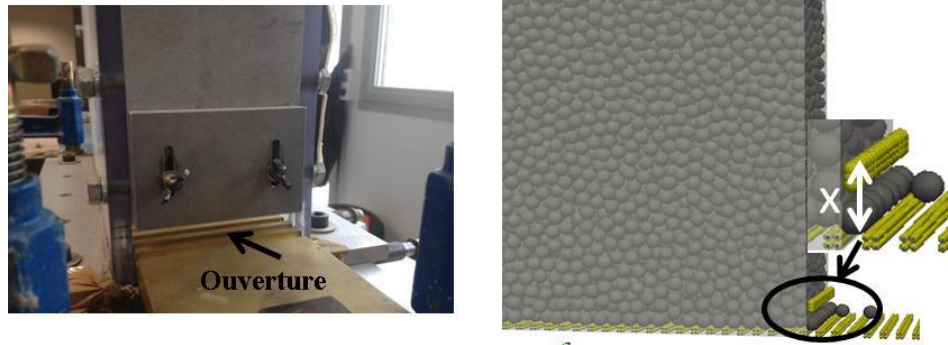


Figure III-7 – Simulation numérique DemGCE de l'ouverture.

La **Figure III-8** montre un exemple de simulation de l'essai expérimental : une pression normale est appliquée par le plan supérieur et une vitesse de cisaillement horizontale est imposée à la paroi rugueuse.

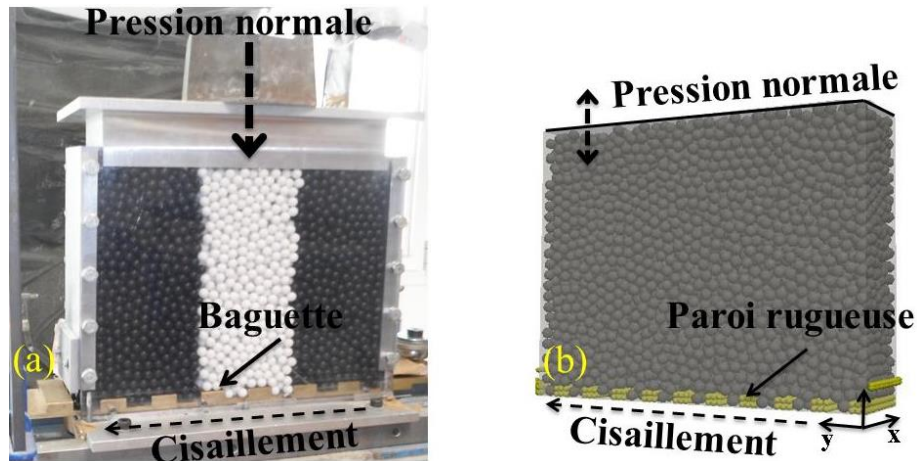


Figure III-8 - (a) Dispositif expérimental et (b) Simulation du dispositif expérimental.

III.3.3 Données de sortie : force tangentielle, profil de cisaillement et nombre de grains sortants

La comparaison entre l'expérience et la simulation numérique est faite sur : la force tangentielle entre le milieu granulaire et la paroi rugueuse : à ne pas confondre avec les forces de contact tangentielles, le profil de cisaillement et le nombre de billes sortantes de la boîte.

Dans cette partie, nous décrivons tout d'abord la méthode utilisée pour le calcul de la force tangentielle entre le milieu granulaire et la paroi rugueuse. Ensuite, nous présentons un exemple décrivant les différentes étapes suivies pour afficher un profil de cisaillement. Nous finissons par la méthode utilisée pour le comptage du nombre de grains sortants.

III.3.3.1 Calcul de la force tangentielle

Dans nos simulations numériques, la force tangentielle calculée est la force de frottement entre les grains du milieu granulaire et la paroi rugueuse dans la direction de cisaillement. C'est donc la somme des forces appliquées par les grains du milieu granulaire sur le plan inférieur et sur les grains de la rugosité dans la direction de cisaillement [Figure III-9].

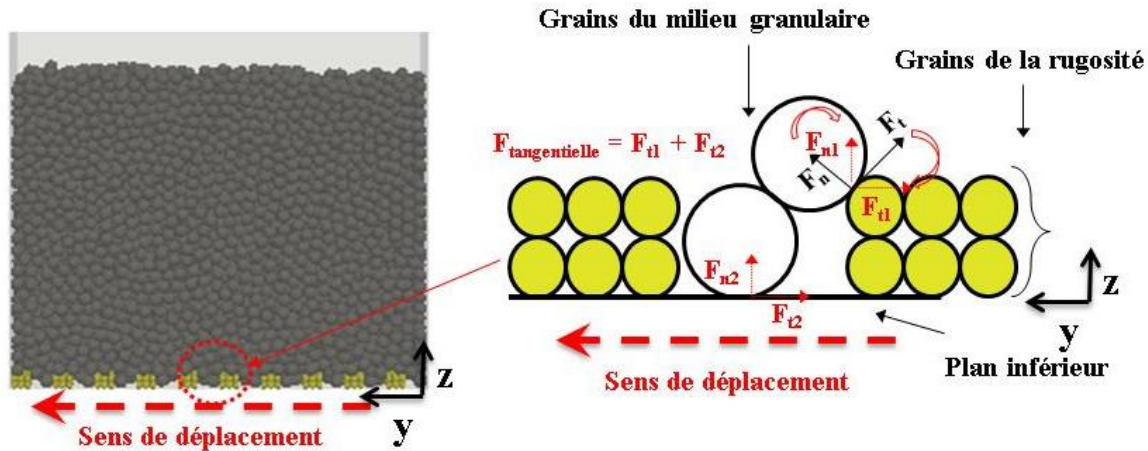


Figure III-9 - Calcul de la force tangentielle.

Pour calculer la force tangentielle, nous passons par les étapes suivantes pour chaque pas de temps:

- Détection des contacts entre les grains du milieu et la paroi rugueuse (plan inférieur et grains de la rugosité).
- Calcul à l'échelle locale et par les lois d'interaction des composantes normale F_n et tangentielle F_t du vecteur force au point de contact.
- Projection du vecteur force dans le repère global (F_{ni} et F_{ti}), i est le point de contact.
- Calcul de la somme de toutes les composantes projetées dans le repère global dans la direction du cisaillement ($\sum F_{ti}$).
- Incrémentation du pas de temps.

Cette méthode de calcul de la force tangentielle nous permet de représenter l'évolution de la force tangentielle au cours du temps. La **Figure III-10** donne un exemple type d'enregistrement au cours du temps de la force tangentielle dans la direction de cisaillement. Cette courbe est formée d'un pic suivi par une légère variation de la force (phase stationnaire). Dans les résultats présentés par la suite, la valeur de la force tangentielle calculée est la moyenne de cette force dans la phase stationnaire.

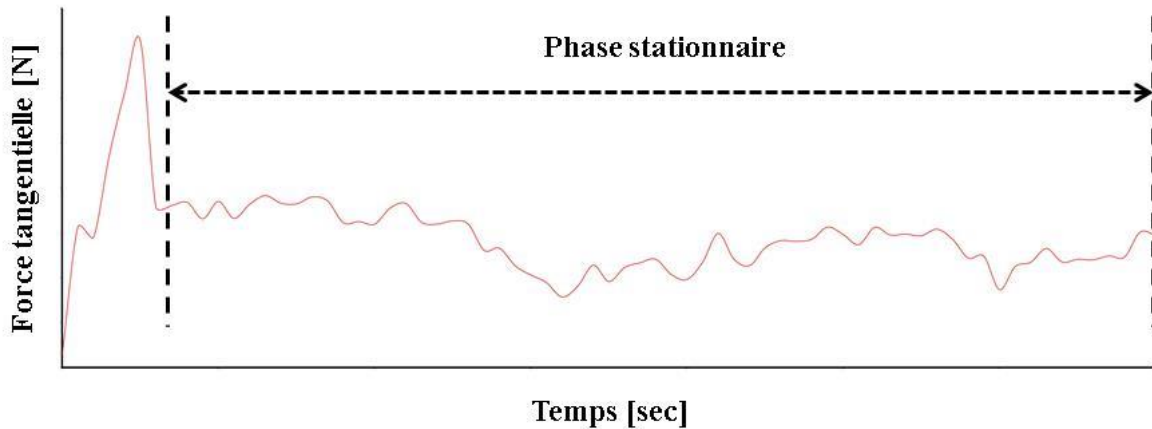


Figure III-10 - Exemple d'enregistrement de la force tangentielle.

III.3.3.2 Visualisation d'un profil de cisaillement

La visualisation d'un profil de cisaillement consiste tout d'abord à diviser à l'état initial ($t = 0$) l'empilement granulaire en trois colonnes de même largeur. Nous attribuons ensuite aux grains de la colonne intermédiaire (identifiés selon leurs positions) la couleur blanche et pour les autres grains la couleur noire.

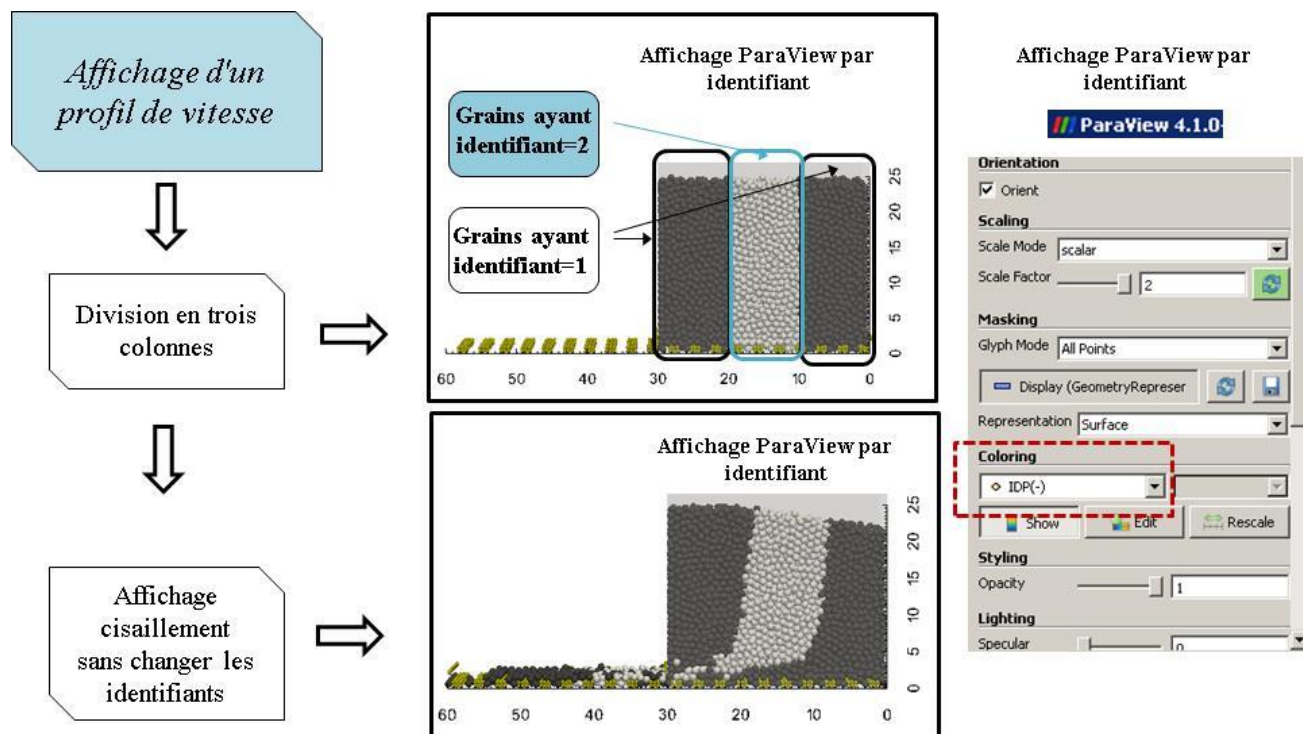


Figure III-11 - Affichage d'un profil de cisaillement.

La **Figure III-11** présente un schéma représentatif des étapes d’affichage d’un profil de cisaillement via ParaView. Avec ParaView, il est possible d’attribuer une couleur unique aux grains de même identifiant. Il suffit donc de donner aux grains de la colonne intermédiaire un identifiant différent de celui des autres grains dans le milieu granulaire. En déplaçant la paroi rugueuse, nous observons la formation du profil de cisaillement.

III.3.3.3 Comptage du nombre de grains sortants

La **Figure III-12** présente la méthode de comptage du nombre de grains sortant de la boîte de calcul utilisée dans notre étude. Cette méthode consiste à trier et compter les grains ayant une coordonnée y dans la direction de cisaillement supérieure à la largeur de la boîte (300 mm). Le tri est fait à partir d’un fichier microstructure (fichier décrivant les identifiants, positions, vitesses linéaires et angulaires et le rayon des grains).

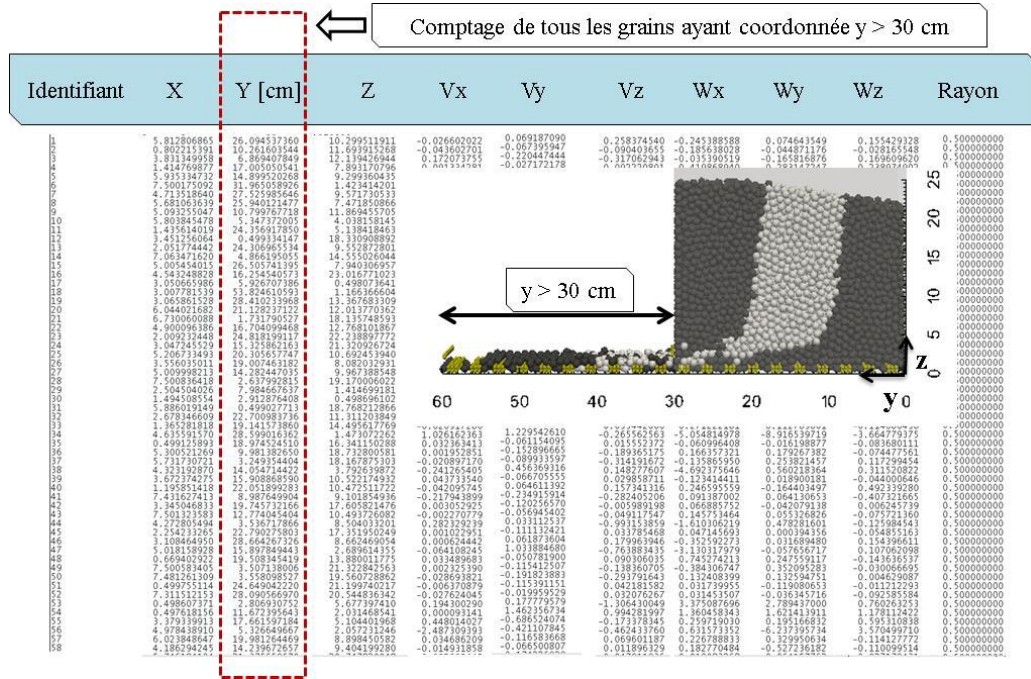


Figure III-12 - Comptage du nombre de grains sortant de la boîte.

III.3.4 Analyse de répétabilité

L’analyse de la répétabilité d’une simulation numérique permet d’ajouter des barres d’erreur sur les graphes pour indiquer l’incertitude dans les résultats présentés. Une simulation numérique est répétable lorsque les mêmes résultats sont obtenus et les mêmes phénomènes sont observés pour différents états initiaux de l’empilement granulaire (configuration initiale de l’empilement granulaire avant d’exercer un déplacement de la paroi rugueuse).

Pour faire varier l'état initial, nous avons modifié les positions initiales des grains dans la phase de leur génération par la méthode RSA. Cinq états initiaux sont étudiés. Le **Tableau III-2** résume les principaux paramètres géométriques et matériaux utilisés pour l'étude de la reproductibilité. Dans la partie de l'étude de répétabilité, la force normale est d'environ 85 N. Elle représente le poids de l'empilement granulaire (aucune pression n'est appliquée sur l'empilement) : à ne pas confondre avec la force de contact normale. Le pas de temps est 1,0 E-6 s et la hauteur de l'ouverture est de 12 mm. L'étude de la reproductibilité de notre simulation numérique a été faite en comparant pour cinq états initiaux les valeurs de la force tangentielle entre les grains du milieu et la paroi rugueuse, le profil de cisaillement et le nombre de grains sortants. Les résultats présentés ont montré que la reproductibilité est assurée pour les différents critères de mesure.

Dimensions (x ; y ; z) [mm]	Rugosité 	Force normale [N]	Nombre de grains	Vitesse de cisaillement [mm/s]
(80 ; 300 ; 250)	R2	85	6450	10
Module de Young (E) [Pa]	Coefficient de Poisson (ν)	Coefficient de frottement de glissement (μ)	Coefficient de roulement (μ_r)	Constante d'amortissement (A)
1,0 E+8	0,29	0,15	0,002	4,5 E-5

Tableau III-2 - Les paramètres géométriques et matériaux de l'étude de la répétabilité.

Le **Tableau III-3** présente les valeurs de la force tangentielle et les nombres de grains sortants obtenus pour les cinq états initiaux. La dernière colonne représente la moyenne des cinq simulations. Elle est égale à 26 N avec un écart type de 0,8 N (3%) pour la force et 277 grains avec un écart type de 3 grains (1%) pour le nombre de grains sortants de la boîte.

	Etat initial 1	Etat initial 2	Etat initial 3	Etat initial 4	Etat initial 5	Moyenne
Force tangentielle [N]	25,2	26,4	26,5	24,8	26,8	26 ± 0,8
Nombre de grains sortants	274	278	273	281	278	277 ± 3

Tableau III-3 - Force tangentielle et nombre de grains sortants pour cinq états initiaux.

Les résultats numériques montrent que la force tangentielle et le nombre de grains sortants sont répétables pour différentes configurations initiales. La **Figure III-13** présente les profils de cisaillement pour les cinq états initiaux. Les profils sont tracés pour un même nombre de grains sortants (277 grains). Une légère variation de l'arrangement granulaire près de l'interface est observée. Mais globalement, les profils sont assez similaires et donc reproductibles. Une comparaison avec la répétabilité expérimentale est présentée dans la section III.3.4

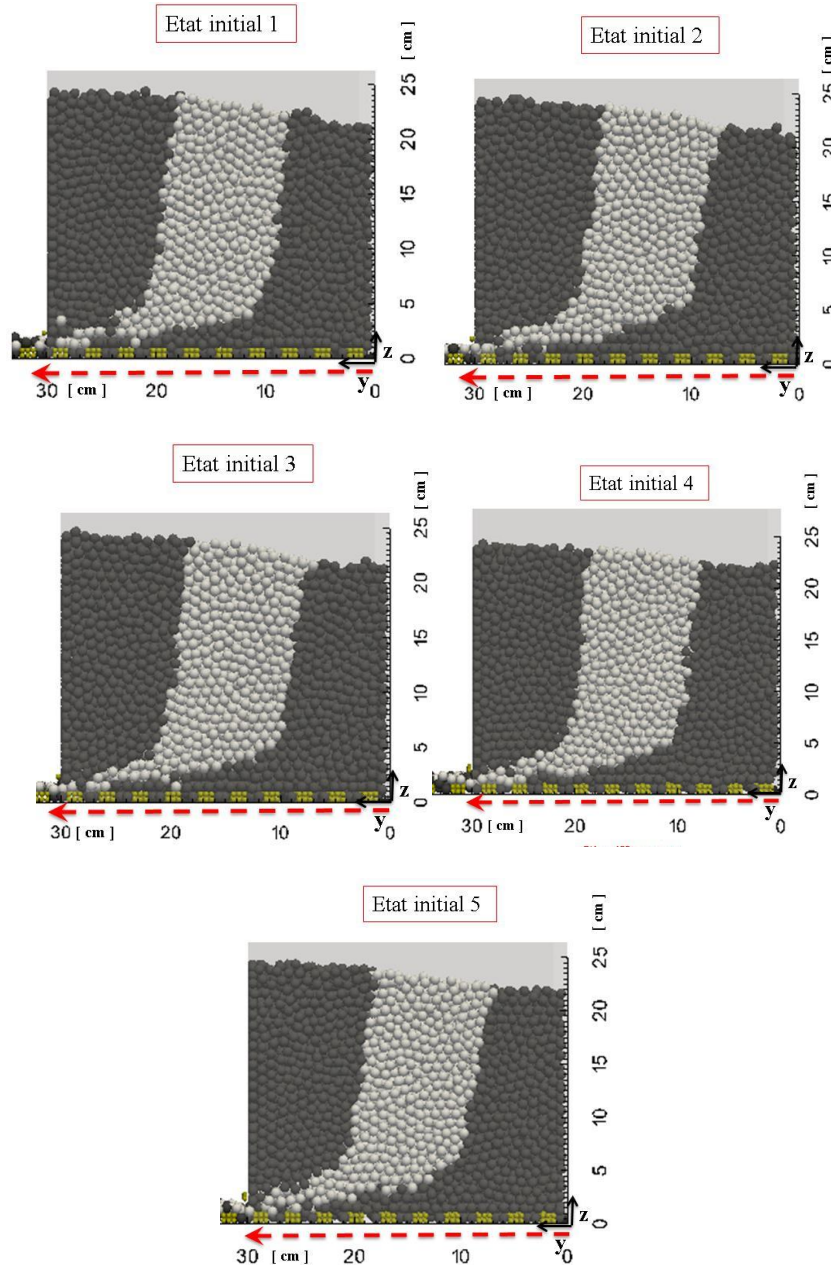


Figure III-13 - Profils de cisaillement pour les cinq états initiaux.

III.4 Etude paramétrique

III.4.1 Introduction

La modélisation numérique d'un phénomène expérimental consiste à prendre en compte les principes fondamentaux de la physique et à déterminer les paramètres essentiels à sa description. Les paramètres ne sont pas indépendants, ils sont reliés entre eux par des équations, qui sont la traduction mathématique des lois de la physique. Une variation des paramètres matériaux entraîne une variation des résultats numériques. Le comportement macroscopique d'un matériau est donc essentiellement une réponse des propriétés microscopiques. De même, un écart important entre la réalité et les résultats numériques qui sont censés la décrire peut être généré du fait que certains paramètres matériaux choisis pour la simulation ne représentent pas ceux de l'essai expérimental. Dans certaines études, le principe de l'étude paramétrique consiste à chercher le jeu des paramètres ou des modèles qui permettent la meilleure reproduction par simulation numérique d'un phénomène expérimental [145, 146]. Ensuite, les paramètres matériaux qui donnent finalement les résultats numériques les plus proches des résultats expérimentaux seront choisis pour la simulation.

Dans notre étude, nous ne cherchons pas à choisir quels paramètres permettent d'améliorer substantiellement la précision des résultats numériques relatifs à la simulation. Nous avons procédé à une étude paramétrique pour comprendre quels paramètres influencent le comportement macroscopique d'un milieu granulaire cisailé. Nous avons choisi de faire varier trois paramètres : les coefficients de frottement de glissement grain/grain et grain/paroi et le coefficient de roulement grain/grain notés respectivement (μ_{gg}) , (μ_{gp}) et (μ_r) . Le coefficient de frottement de glissement et celui de roulement entre les grains du milieu et les grains de la rugosité sont par défaut égaux respectivement à (μ_{gg}) et (μ_r) .

L'étude paramétrique a été réalisée sur la rugosité R2, paroi rugueuse formée des crêneaux de 10 mm de hauteur et de 15 mm de largeur. La force normale exercée sur la paroi rugueuse résulte uniquement du poids propre de l'empilement granulaire (85 N). Le nombre de grains dans le volume de calcul est égal à celui des billes dans l'essai expérimental (6450 billes de diamètre 10 mm). La hauteur de l'ouverture est de 12 mm. Pour la vitesse de cisaillement ou la vitesse de déplacement de la paroi rugueuse, l'essai expérimental a été réalisé sur une distance de 300 mm avec une vitesse de 5 mm/s. Par contre, avec notre modèle numérique le déplacement de la paroi rugueuse d'une distance de 300 mm et avec une vitesse de 5 mm/s demande une durée de calcul assez longue. De même, nous avons déjà montré dans le chapitre 2 que le nombre de billes sortantes et la valeur de la force tangentielle ou la force de cisaillement entre le milieu granulaire et la paroi rugueuse dans le régime stationnaire sont indépendants de la vitesse de déplacement de la baguette. Pour ces deux raisons, une vitesse de 10 mm/s a été choisie pour la simulation numérique. Le coefficient de frottement de glissement grain/grain ou grain/paroi et le coefficient de roulement sont par défaut respectivement égaux à 0,15 et 0,002. Le coefficient

d'amortissement (A) est choisi d'une manière à avoir un coefficient de restitution des grains de 0,8. Le pas de temps est égal à 1,0 E-6 s. Le **Tableau III-4** et la **Figure III-14** résument les principaux paramètres (matériaux et géométriques) et les conditions aux limites utilisés pour l'étude paramétrique.

Dimensions (x ; y ; z) [mm]	Rugosité 	Force normale [N]	Nombre de grains	Vitesse de cisaillement [mm/s]
(80 ; 300 ; 250)	R2	85	6450	10
Module de Young (E) [Pa]	Coefficient de Poisson (ν)	Coefficient de frottement de glissement (μ)	Coefficient de roulement (μ_r)	Constante d'amortissement (A)
1,0 E+8	0,29	0,1 --- > 0,35 (0,15)	0 --- > 0,01 (0,002)	4,5 E-5

Tableau III-4 - Paramètres géométriques et matériaux et conditions aux limites utilisés dans l'étude paramétrique.

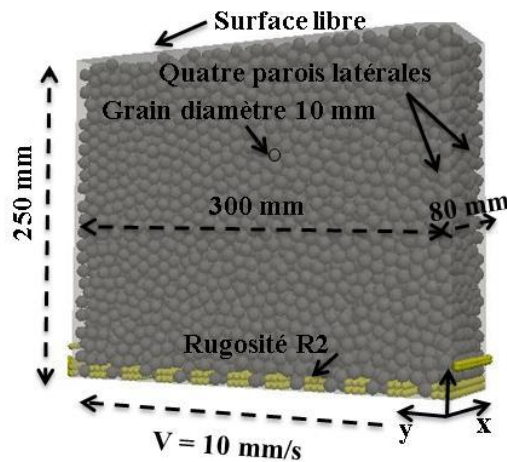


Figure III-14 - Principaux paramètres de l'étude paramétrique.

Les influences respectives de chacun des paramètres (μ_{gg}), (μ_{gp}) et (μ_r) sont étudiées sur la force tangentielle (force moyenne dans la phase stationnaire), les profils de cisaillement et le nombre de grains sortants par comparaison avec l'essai expérimental. Les forces tangentielles et les nombres de grains sortants sont présentés sous forme d'histogrammes. Les profils de cisaillement ne sont présentés dans le corps de ce chapitre que lorsque des différences

significatives ont été observées. Lorsque les variations ne sont pas notables, les profils de cisaillement ont été renvoyés à l'Annexe2.

Nous présentons tout d'abord l'influence du coefficient de frottement de glissement grain/grain (μ_{gg}) sur la force tangentielle, le profil de cisaillement et le nombre de grains sortants. Ensuite, nous présentons l'étude réalisée sur le coefficient de frottement de glissement (μ_{gp}). Et nous finissons la section de l'étude paramétrique par le coefficient de roulement (μ_r).

III.4.2 Coefficient de frottement de glissement (μ_{gg}) et (μ_{gp})

La **Figure III-15** présente les valeurs de la force tangentielle pour les différents coefficients de frottement de glissement grain/grain variant entre 0,1 et 0,35. Le coefficient de glissement grain/paroi et celui de roulement sont respectivement 0,15 et 0,002. La colonne bleue représente la valeur obtenue par l'essai expérimental. Pour un coefficient μ_{gg} inférieur à 0,3, la force tangentielle augmente avec l'augmentation du coefficient μ_{gg} . A partir de 0,3 la force tangentielle semble plafonner. En effet, plus le coefficient de frottement entre les grains du milieu et les grains de la rugosité est faible, plus le glissement est facile. En augmentant ce coefficient, nous augmentons la force de frottement. A partir d'un coefficient égal à 0,3, le coefficient de frottement semble avoir moins d'influence sur la force tangentielle.



Figure III-15 - Force tangentielle en fonction du coefficient de frottement de glissement (μ_{gg}).

Par comparaison avec l'essai expérimental, la force tangentielle numérique de différents coefficients de frottement est toujours plus élevée que la force expérimentale. Par contre, la

valeur numérique de la force tangentielle la plus proche de la valeur expérimentale (21 N) est celle pour un coefficient μ_{gg} de 0,1 (25 N). Deux hypothèses sont possibles : la première est qu'en réalité le coefficient de frottement verre/verre est proche de 0,1 et l'augmentation de ce coefficient entraîne un éloignement des vraies propriétés du matériau. La deuxième hypothèse est que la modélisation des créniaux de la baguette par des paquets de grains augmente la force tangentielle. En effet, les paquets de grains ont une surface plus rugueuse par rapport à la surface des créniaux (expérimentale : surface lisse) ce qui peut entraîner une augmentation de la force tangentielle.

La **Figure III-16** présente le profil de cisaillement expérimental et les profils de cisaillement numériques pour des coefficients de frottement grain/grain de 0,1 et 0,35. Les profils de cisaillement numériques qui correspondent aux autres coefficients et qui ne sont pas présentés sont renvoyés à l'Annexe2.

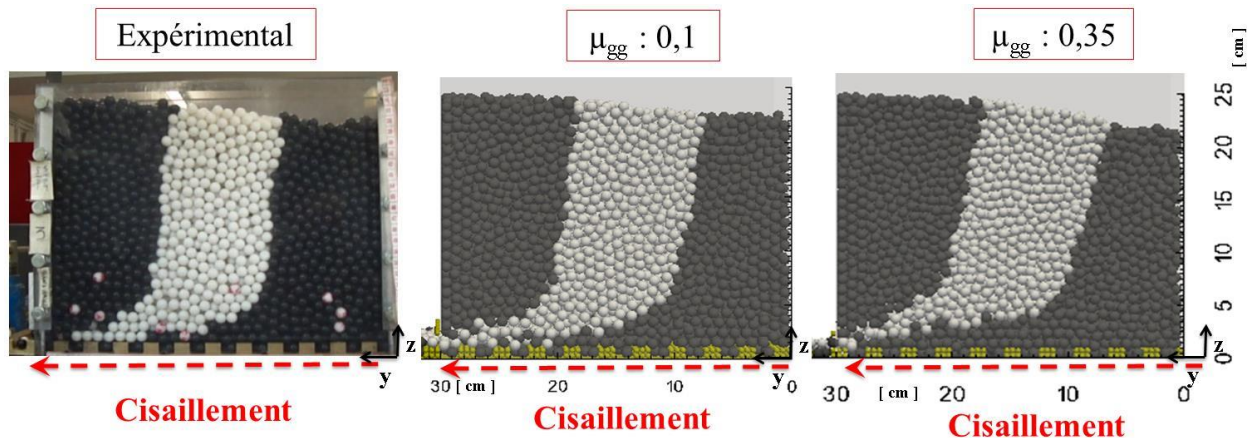


Figure III-16 - Profils de cisaillement expérimental et numériques μ_{gg} égale à 0,1 et 0,35.

Sur le profil de cisaillement expérimental, la première couche de billes (couche de billes qui se déplace sur les créniaux) a subi un déplacement horizontal dans la direction de cisaillement. En se déplaçant, la première couche entraîne les trois couches qui la surmontent. Les mouvements des quatre couches n'ont pas créé un désordre significatif dans l'empilement près de la baguette. Tandis qu'en faisant varier le coefficient de frottement μ_{gg} , les variations de l'arrangement granulaire près de la paroi rugueuse sont plus notables que celles observées en variant l'état initial. La comparaison entre les profils de cisaillement numériques pour différents coefficients de frottement et le profil de cisaillement expérimental montre que le désordre dans les couches de grains près de la paroi rugueuse est plus grand dans la simulation par rapport à l'expérience. L'explication traitée dans les paragraphes précédents reste valable pour expliquer le désordre de grains observé sur les profils de cisaillement numériques. En effet, la modélisation des créniaux par des grains rend la surface plus rugueuse ce qui peut créer un désordre. Dans l'expérience, chaque bille peut se déplacer sur la surface lisse des créniaux par un mouvement

horizontal sans perturber les billes voisines. Par contre, dans la simulation un grain subit un mouvement ondulatoire pour dépasser les grains de la rugosité. Ce mouvement peut créer plus facilement un désordre. De même, lorsque le coefficient de frottement entre les grains du milieu et les grains de la rugosité augmente, le déplacement des grains par glissement est affecté.

La **Figure III-17** montre le nombre de grains sortants en variant le coefficient de frottement μ_{gg} . Dans la simulation, le nombre de grains sortants varie entre 243 et 286 grains. Dans l'expérience, ce nombre est de 257 ± 8 . Par conséquent, dans la simulation les variations du nombre de grains sortants restent dans une fourchette assez proche de la dispersion expérimentale.

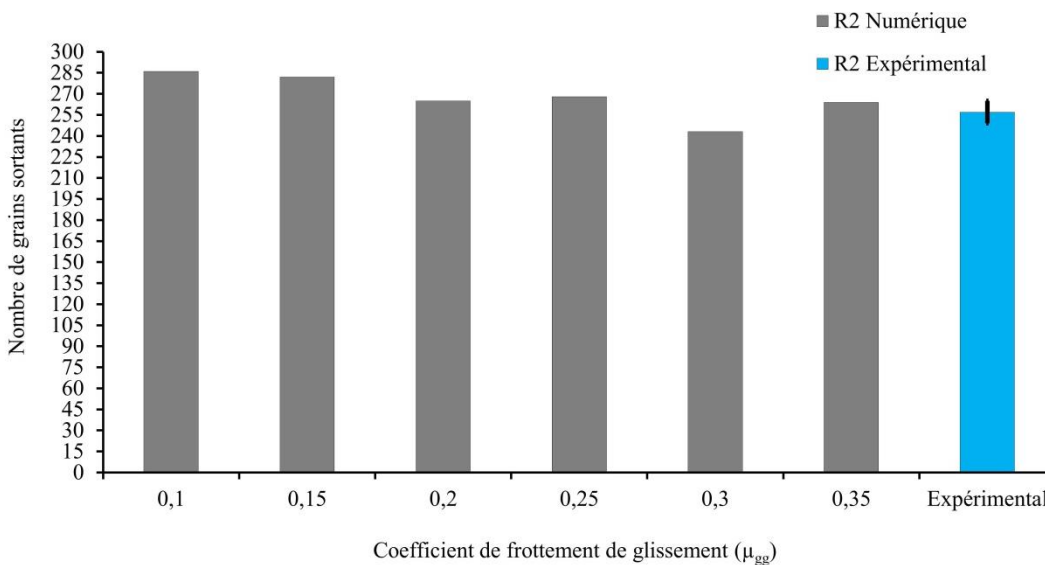


Figure III-17 - Nombre de grains sortants en fonction du coefficient de frottement de glissement (μ_{gg}).

Pour étudier l'influence du coefficient de frottement de glissement grain/paroi μ_{gp} sur la force tangentielle, les profils de cisaillement et le nombre de grains sortants, nous avons fait varier ce coefficient entre 0,1 et 0,35. Nous rappelons que le coefficient μ_{gp} est le coefficient de frottement entre les grains du milieu granulaire et les parois planes y compris le plan inférieur. Le coefficient μ_{gg} est de 0,15 et le coefficient de roulement est de 0,002. De même le coefficient de frottement entre les grains du milieu et les grains de la rugosité est égal à μ_{gg} (0,15).

La **Figure III-18** présente la variation de la force tangentielle en fonction du coefficient μ_{gp} . La valeur minimale numérique de la force tangentielle est 26 N, elle augmente légèrement avec le coefficient μ_{gp} jusqu'à atteindre une valeur de 28,5 N pour les coefficients μ_{gp} de 0,3 et de 0,35.

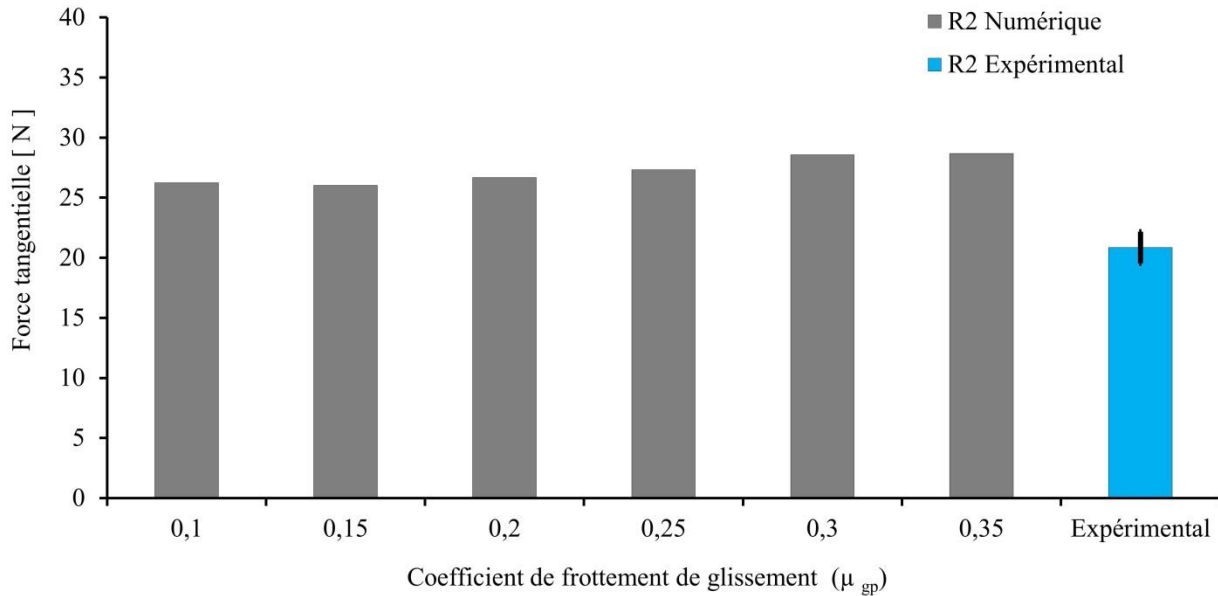


Figure III-18 - Force tangentielle en fonction du coefficient de frottement de glissement (μ_{gp}).

Lorsque la paroi rugueuse se déplace, les grains du milieu qui frottent avec les parois planes sont les grains placés dans les creux séparant deux paquets de grains et ceux qui frottent contre les parois latérales. Dans les creux, les grains se déplacent à la même vitesse que la paroi rugueuse, puisqu'ils ne peuvent pas dépasser la hauteur des paquets. De plus, leur surface de contact avec le plan inférieur est plus faible que la surface de contact entre les grains du milieu et les parois latérales. Donc leurs frottements avec la paroi inférieure est relativement faible par rapport aux frottements entre les grains du milieu et les parois latérales. Cependant la variation légère de la force tangentielle en fonction de l'évolution du coefficient de frottement grain/paroi nous permet de conclure que le frottement entre les grains du milieu et les parois latérales est négligeable devant le frottement entre les grains du milieu et la paroi rugueuse.

Par contre, l'écart entre les valeurs numériques de la force tangentielle et la valeur expérimentale peut être expliqué comme nous l'avons déjà interprété précédemment par la modélisation des créneaux de la baguette par des paquets de grains et le désordre observé près de la paroi rugueuse.

Pour les profils de cisaillement [Figure III-19], le profil expérimental est mieux reproductible pour un coefficient μ_{gp} supérieur ou égal à 0,15 [voir Annexe2]. Pour un coefficient μ_{gp} égal à 0,1 la colonne intermédiaire (colonne formée par des grains de couleur blanche) est plus inclinée par rapport aux autres profils et le désordre près de la paroi rugueuse est plus important par rapport aux autres profils. En effet, 0,1 est la valeur minimale du coefficient μ_{gp} utilisée dans notre étude. Donc c'est la valeur pour laquelle nous exerçons moins de frottement

entre les grains du milieu et les parois latérales. De même, sur le profil de cisaillement nous n'observons que les grains qui sont près ou au contact avec la paroi. Donc les mouvements de ces grains jouent un rôle primordial sur la description du profil de cisaillement. Apparemment un coefficient μ_{gp} égal à 0,1 permet aux grains près de la paroi latérale de bouger plus facilement par rapport aux autres cas où le coefficient μ_{gp} est plus élevé. Pour les autres valeurs de coefficient de frottement, nous n'avons pas trouvé une différence notable par rapport à l'expérience. En effet, nous avons déjà évoqué que le frottement entre les grains du milieu et les parois est négligeable devant le frottement grains/paroi rugueuse. Ceci expliquerait le peu d'influence du coefficient μ_{gp} sur les résultats macroscopiques.

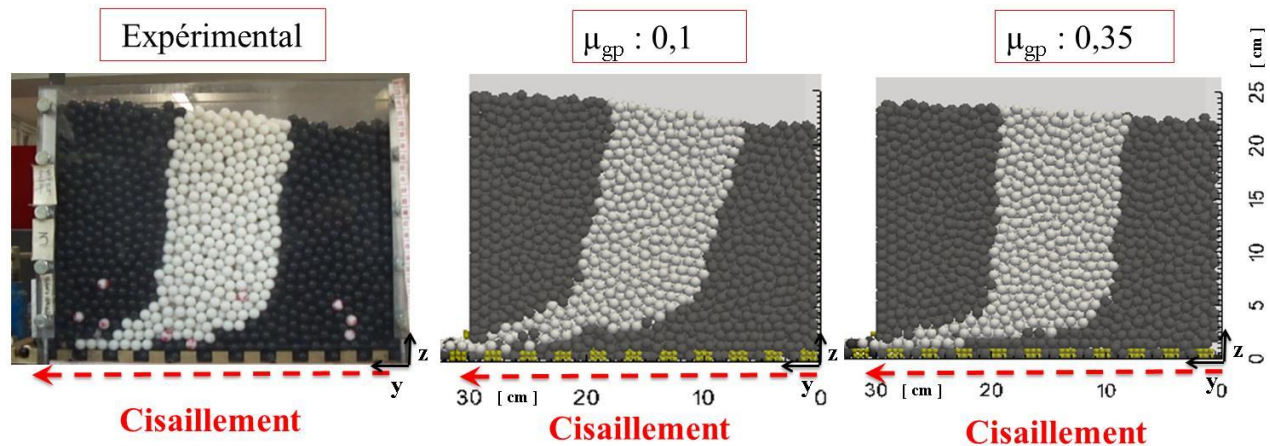


Figure III-19 – Profils de cisaillement expérimental et numériques.

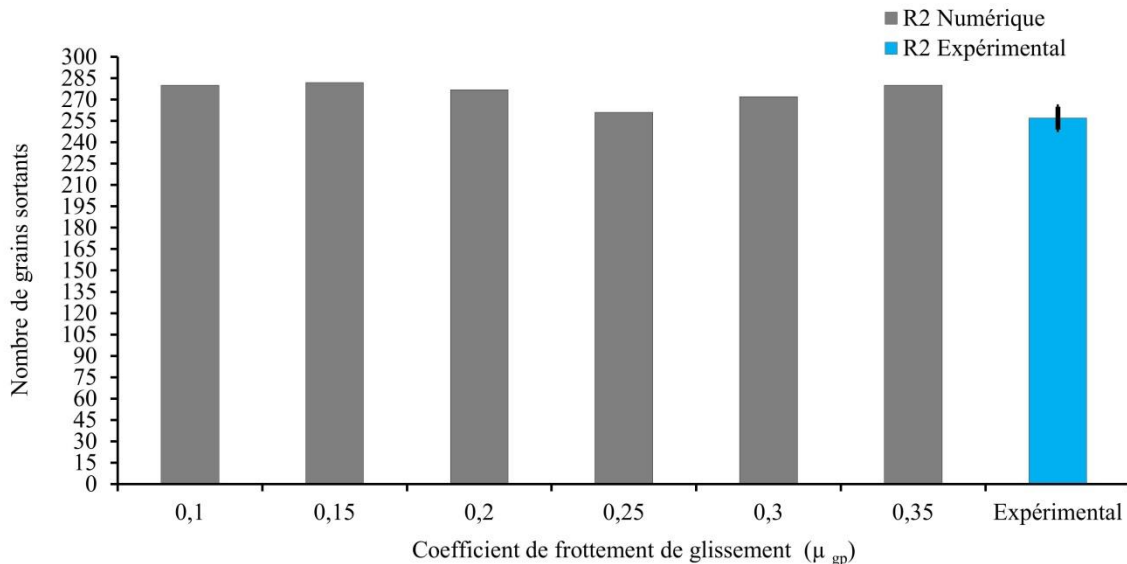


Figure III-20 - Nombre de grains sortants en fonction du coefficient de frottement de glissement (μ_{gp}).

La **Figure III-20** présente la variation du nombre de grains sortant en fonction du coefficient de frottement μ_{gp} . Les variations du nombre de grains sortants sont faibles pour les différentes valeurs de μ_{gp} . La valeur minimale de ce nombre est 261 grains pour un coefficient μ_{gp} égal à 0,25. Ce nombre atteint son maximum de 282 grains pour un coefficient μ_{gp} égal à 0,35. Mais nous considérons que l'écart entre les simulations numériques et l'essai expérimental (257 ± 8 billes) n'est pas important. Ce que nous avons aussi obtenu en faisant varier le coefficient μ_{gg} . Le coefficient μ_{gp} n'a pas donc un effet considérable sur le nombre de grains sortants.

En conclusion, les coefficients de frottement de glissement μ_{gg} et μ_{gp} ont une influence assez limitée sur la force tangentielle et le profil de cisaillement. En revanche, les écarts observés sont expliqués par la modélisation des crêneaux par des paquets de grains sphériques. En effet, la modélisation des grains crée un désordre à l'interface plus important que le désordre expérimental. Ceci entraîne une augmentation de la force tangentielle. De même, pour les coefficients μ_{gg} et μ_{gp} étudiés, nous avons trouvé un nombre de grains sortants de la boîte proche de celui obtenu par l'expérience.

III.4.3 Coefficient de roulement (μ_r)

La résistance au roulement est le moment qui s'oppose à la rotation d'un grain. Cette résistance est essentiellement liée au coefficient de roulement μ_r . Nous avons fait varier le coefficient de roulement μ_r entre 0,0 et 0,01. Les coefficients de frottement de glissement μ_{gg} et μ_{gp} sont égaux à 0,15. Pour un pas de temps de 10^{-6} s et un coefficient de roulement supérieur à 0,01, le calcul devient instable [voir Annexe2].

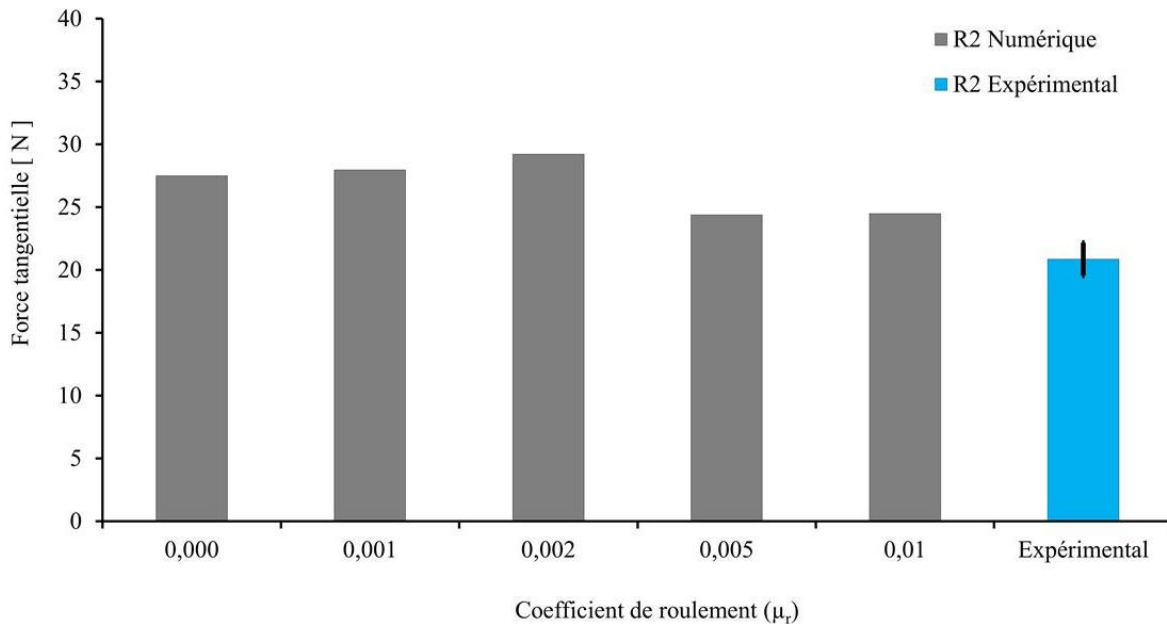


Figure III-21 - Force tangentielle en fonction du coefficient de roulement (μ_r).

La **Figure III-21** montre la variation de la force tangentielle pour différentes valeurs de coefficient de roulement. La force tangentielle augmente légèrement avec le coefficient μ_r jusqu'à une valeur de 29 N correspondant à un coefficient μ_r de 0,002. Ensuite, elle décroît vers 24 N pour les coefficients de roulement de 0,005 et 0,01. Les vitesses de rotations des grains expliqueraient la diminution de la force tangentielle. En effet, pour un coefficient de roulement supérieur à 0,002, la norme de la vitesse de rotation d'un grain peut atteindre 200 rd/s. Alors que, pour un coefficient de roulement inférieur à 0,002, la norme de la vitesse de rotation d'un grain est inférieure à 25 rd/s. Par contre, la valeur de la force tangentielle est plus proche de celle expérimentale pour les coefficients de frottement de 0,005 et 0,01. Ces résultats n'étaient pas attendus. En effet, lorsque le coefficient de roulement augmente, la rotation des particules devient plus difficile ce qui devrait augmenter la force de frottement. L'explication de l'écart au niveau de la force tangentielle entre les simulations numériques et l'étude expérimentale est la même que celle avancée précédemment pour l'étude de l'influence des autres paramètres sur le comportement macroscopique (représentation de la rugosité par des grains).

La **Figure III-22** présente le profil de cisaillement expérimental et numérique pour un coefficient de roulement de 0,01. Les autres profils de vitesse sont présentés dans l'Annexe2. La différence notable que nous avons observée entre la simulation et l'expérience est le désordre de l'empilement numérique près de la surface rugueuse. Ce désordre par rapport à l'expérience a été observé pour les différentes valeurs de coefficient de roulement. L'hypothèse qui reste valable ici est que la modélisation de la baguette par des grains favorise la création d'un désordre près de la paroi.

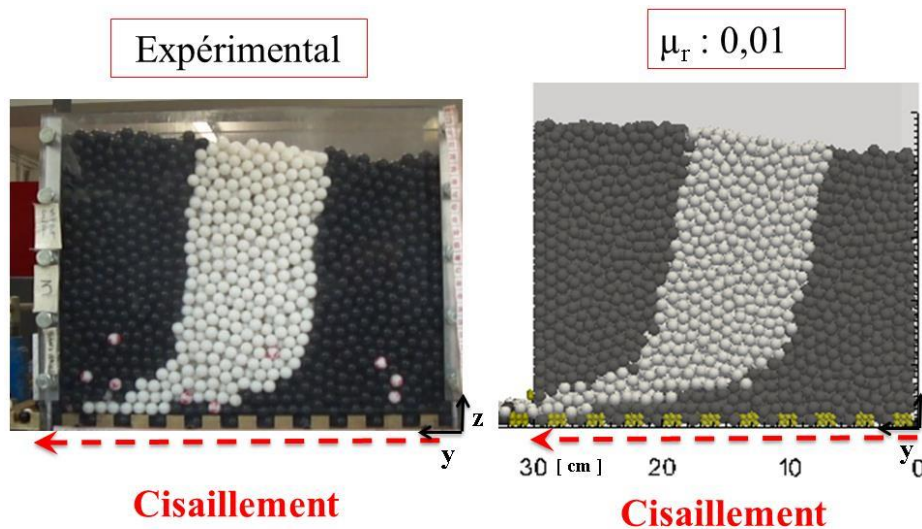


Figure III-22 - Profils de cisaillement expérimental et numérique.

En ce qui concerne le nombre de grains sortants [**Figure III-23**], une bonne concordance est obtenue entre la simulation et l'expérience quelle que soit la valeur de μ_r .

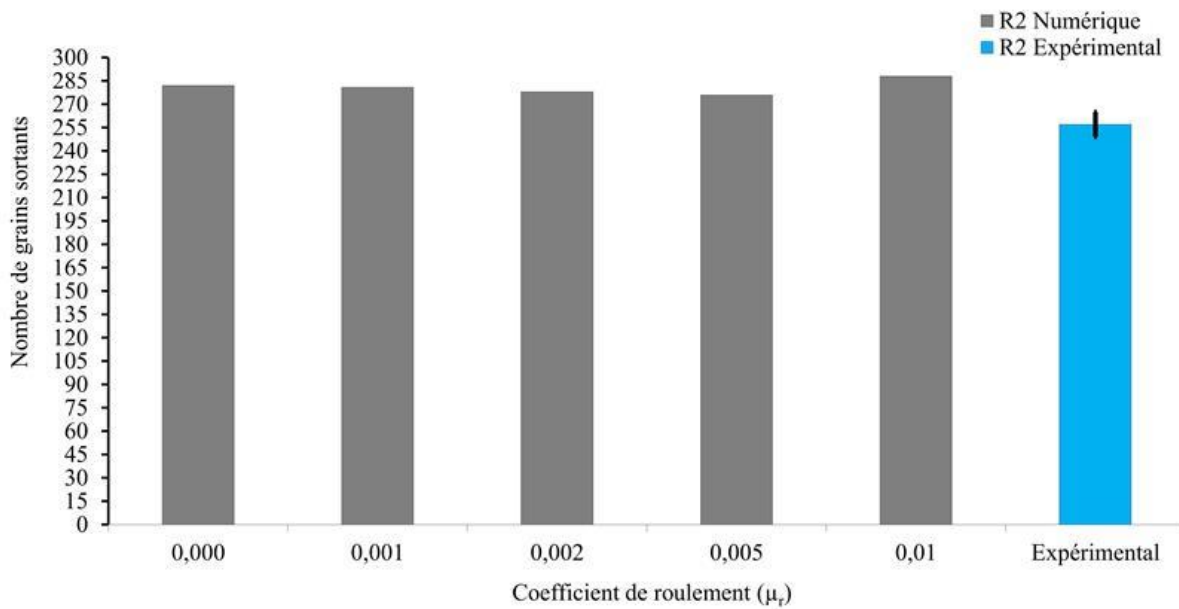


Figure III-23 - Nombre de grains sortants en fonction du coefficient de frottement de glissement (μ_r).

III.5 Etude comparative : essais expérimentaux et simulations numériques

Nous présentons dans cette section les résultats d'une comparaison entre les essais expérimentaux et les simulations numériques pour les trois baguettes (R1, R2 et R3). Cette comparaison nous permet de savoir dans quelles conditions notre code numérique permet de reproduire un essai de cisaillement de type plan/plan. La description détaillée des expériences sur lesquelles s'appuient la comparaison est présentée dans le chapitre 2.

III.5.1 Compacité de l'empilement initial

L'algorithme RSA utilisé pour la génération des grains a permis de préparer un empilement granulaire semblable à la préparation d'un empilement destiné à l'expérimentation. Pour comparer l'état initial de l'empilement granulaire expérimental et numérique, nous avons comparé sa compacité expérimentale et numérique. La compacité est le volume occupé par les grains du milieu sur le volume total.

La compacité numérique est calculée en ajoutant sur le code une fonction « compacity () ». Cette fonction permet de découper le milieu granulaire en couches de même épaisseur et de calculer la compacité dans chaque couche en divisant la somme du volume de ses grains sur son propre volume. Ensuite, nous obtenons un profil de compacité. La compacité numérique est donc

la moyenne des valeurs constituant le profil de la compacité, y compris la zone affectée par les parois supérieure et inférieure [Figure III-24]. Pour calculer la compacité expérimentale, nous avons utilisé le logiciel du traitement d'images FIJI (Image J) [Figure III-24].

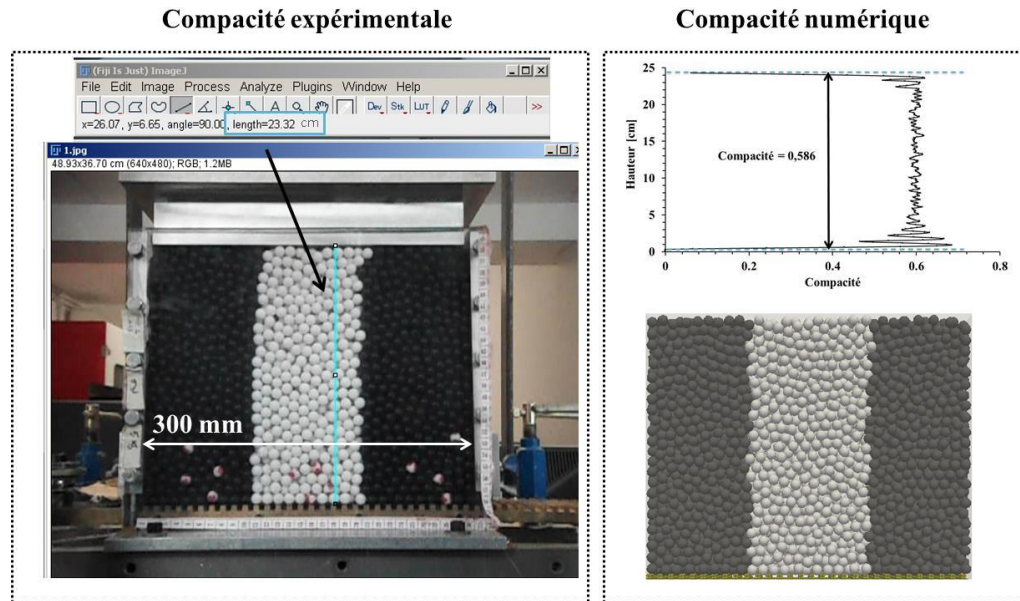


Figure III-24 - Calcul de la compacité expérimentale et numérique pour une force normale de 125 N exercée sur la baguette R1.

Le **Tableau III-5** présente la compacité numérique et expérimentale du milieu granulaire pour les trois baguettes R1, R2 et R3 et pour différentes forces normales.

Force normale [N]	85	125	175	275
Compacité				
R1_Numérique	0,567	0,586	0,589	0,591
R1_Expérimentale	0,599 ± 0,008	0,600 ± 0,004	0,597 ± 0,003	0,596 ± 0,001
R2_Numérique	0,570	0,587	0,590	0,591
R2_Expérimentale	0,593 ± 0,002	0,600 ± 0,001	0,600 ± 0,002	0,597 ± 0,005
R3_Numérique	0,574	0,589	0,590	0,591
R3_Expérimentale	0,593 ± 0,001	0,598 ± 0,002	0,598 ± 0,002	0,602 ± 0,004

Tableau III-5 - Compacités expérimentale et numérique pour différentes forces normales exercées sur les baguettes R1, R2 et R3.

Dans le **Tableau III-5**, chaque valeur de la compacité expérimentale est la moyenne de trois calculs avec leur écart type. Les valeurs de la compacité numérique initiale sont très proches de celles de la compacité expérimentale. L'algorithme RSA suivi d'une sédimentation sous gravité permet alors d'obtenir un empilement granulaire de compacité proche de celle de l'empilement expérimental.

III.5.2 Influence des conditions aux limites sur les grandeurs observables

Dans cette partie, nous présentons une comparaison entre l'expérience et la simulation numérique de l'influence des conditions aux limites (rugosité et force normale) sur les grandeurs observables (force tangentielle, nombre de billes sortantes et profil de cisaillement).

Il faut seulement se rappeler que la vitesse de déplacement de la baguette est de 5 mm/s pour les essais expérimentaux et de 10 mm/s pour la simulation numérique. La force normale est la force verticale appliquée sur la baguette, c'est donc la résultante du poids du milieu granulaire et des masses ajoutées sur le milieu. La force tangentielle est la force de frottement entre le milieu granulaire et la paroi rugueuse. La hauteur de l'ouverture est de 12 mm. Le **Tableau III-6** présente les paramètres géométriques et matériaux et les conditions aux limites utilisés dans les simulations numériques de l'étude comparative.

Dimensions (x ; y ; z) [mm]	Rugosité	Force normale [N]	Nombre de grains	Vitesse de cisaillement [mm/s]
(80 ; 300 ; 250)	R1 ; R2 ; R3	85 ; 125 ; 175 ; 275	6450	10
Module de Young (E) [Pa]	Coefficient de Poisson (ν)	Coefficient de frottement de glissement (μ)	Coefficient de roulement (μ_r)	Constante d'amortissement (A)
1,0 E+8	0,29	0,15	0,002	4,5 E-5

Tableau III-6 - Conditions de simulations.

La **Figure III-25** présente la variation de la force tangentielle en fonction de la force normale pour R1. La force tangentielle augmente avec l'augmentation de la force normale. Les deux courbes expérimentale et numérique décrivent une droite ne passant pas par l'origine. L'ordonnée à l'origine de la droite expérimentale est deux fois plus grande que celle de la courbe numérique. Alors que, la pente de la droite numérique est supérieure à celle de la courbe expérimentale. Ceci signifie que lorsque la force normale augmente, la force tangentielle numérique augmente plus rapidement que la force tangentielle expérimentale. De plus, l'écart entre l'expérience et la simulation devient plus important pour des forces normales plus élevées.

Cet écart est expliqué par la modélisation des crêneaux (lisses et arêtes vives) par des grains (ondulatoire et arêtes arrondies). Cependant, le contrôle de la pression normale (essai expérimental : non uniformément distribuée et modélisation numérique : pression contrôlée) pourrait expliquer l'augmentation de l'écart avec la force normale. Le manque de données expérimentales sur la variation de la pression normale ne nous permet pas de valider cette hypothèse.

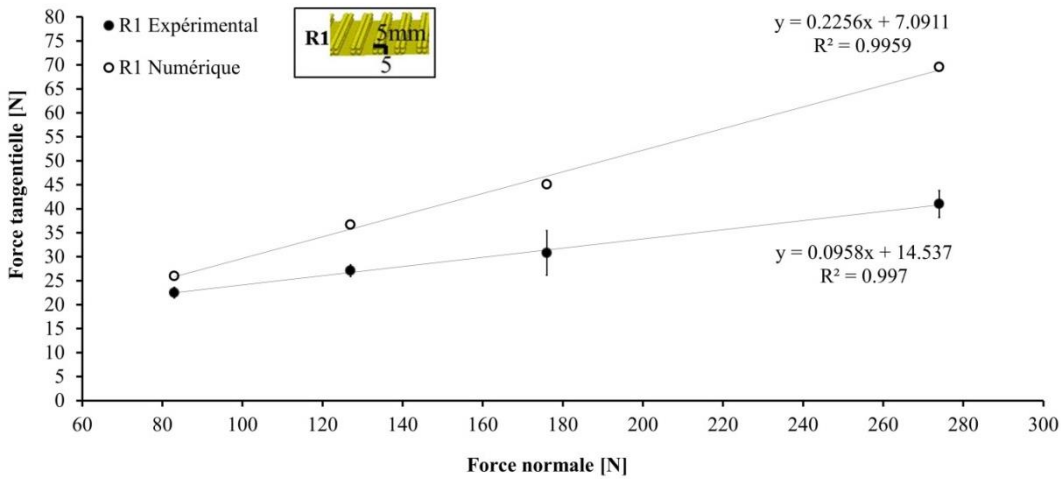


Figure III-25 - Variation de la force tangentielle en fonction de la force normale pour R1.

Le **Tableau III-7** montre la variation du nombre de billes sortantes par l'expérience et par la simulation pour différentes forces normales exercées sur R1. Chaque mesure expérimentale est la moyenne de trois essais et le nombre suivant (après $\pm$) représente l'écart type de trois essais réalisés. La précision sur le nombre de billes sortantes par la simulation a été estimée à partir de l'étude de répétabilité réalisée sur R2. L'écart entre l'expérience et la simulation est de l'ordre de 35 billes (22 %). Pour expliquer cet écart, nous avons regardé les films permettant de surveiller le nombre de billes sortantes au cours de l'essai et de la simulation numérique.

Force normale [N]	85	125	175	275
R1 Expérimental	177 $\pm$ 8	172 $\pm$ 14	174 $\pm$ 5	165 $\pm$ 12
R1 Numérique	205 $\pm$ 3	209 $\pm$ 3	208 $\pm$ 5	219 $\pm$ 7

Tableau III-7 - Nombre de billes sortantes de la boîte par l'expérience et par la simulation pour R1.

Nous avons constaté que, pour la rugosité expérimentale R1, les billes ne sortent pas de la boîte d'une manière continue. C'est à dire, le débit de billes n'est pas constant au cours de l'essai. La **Figure III-26** présente la sortie de billes par l'expérience et par la simulation pour

une force normale de 175 N exercée sur la baguette R1. Mais, il n'était pas évident de trouver les explications à cette observation puisque nous ne pouvons pas observer sur l'essai expérimental les mouvements des billes loin de la paroi. Au contraire, numériquement le débit des grains sortants est stable et aucun blocage des grains à la sortie n'a été observé. L'hypothèse que nous pouvons avancer dans ce cas est que les arêtes vives de l'ouverture bloqueraient dans certaines configurations la sortie de billes, ce qui pourrait créer « des espaces vides » [Figure III-26].

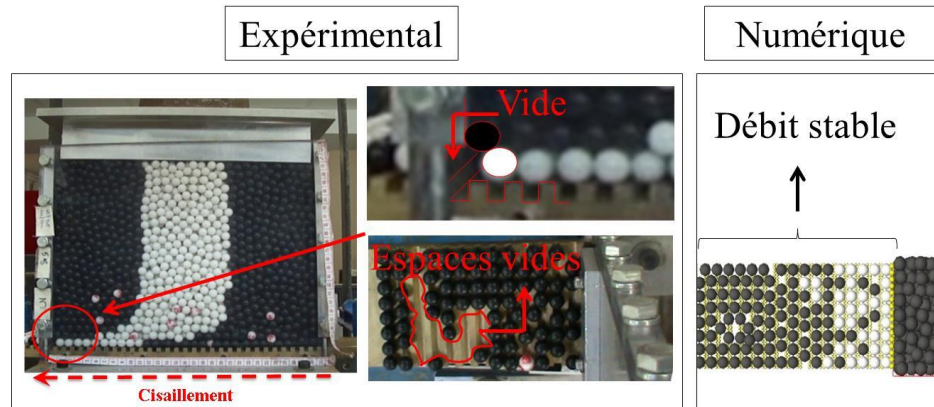


Figure III-26 - Analyse de la sortie de billes pour R1 et pour une force normale de 175 N.

La Figure III-27 présente la variation de la force tangentielle en fonction de la force normale pour R2. La force tangentielle augmente avec l'augmentation de la force normale. Expérimentalement, Les barres d'erreurs de la force tangentielle correspondant à la force normale maximale étudiée sont non négligeables devant la valeur moyenne de la force tangentielle. Pour cette raison, nous montrons ce point dans les résultats mais ils sortent du cadre de l'étude comparative de R2.

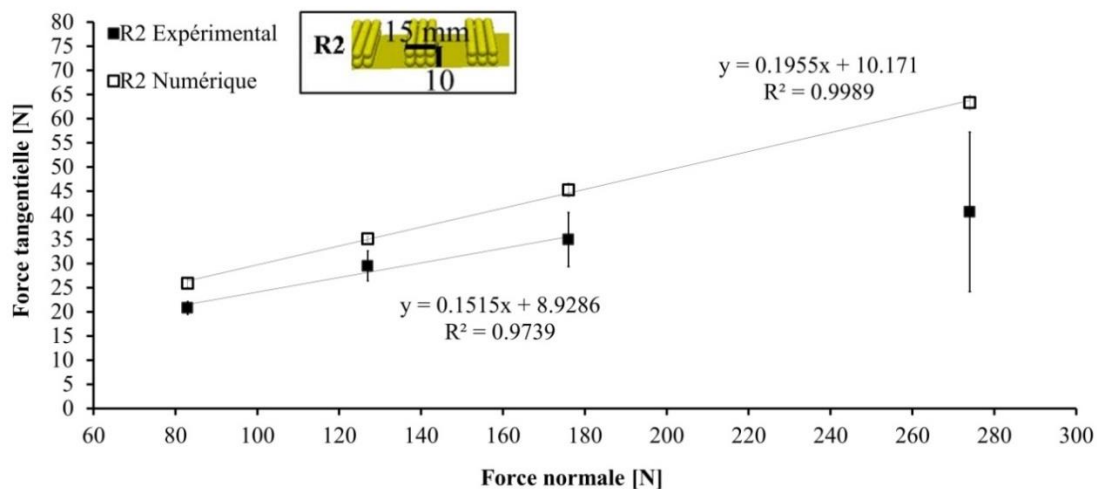


Figure III-27 - Variation de la force tangentielle en fonction de la force normale pour R2.

La comparaison expérimentale/numérique de la variation de la force tangentielle en fonction de la force normale montre une meilleure concordance que pour R1. Les droites expérimentale et numérique ont la même ordonnée à l'origine et l'écart entre la pente de la tendance de variation expérimentale et celle numérique est non remarquable par rapport à l'écart observé sur R1. Par contre, l'écart entre la force tangentielle expérimentale et celle numérique est presque constante et d'environ 7 N (le fait de modéliser les créneaux par des grains).

Le **Tableau III-8** présente la variation du nombre de billes sortantes pour différentes forces normales exercées sur la baguette R2.

Force normale [N]	85	125	175	275
R2 Expérimental	257 ± 8	254 ± 6	273 ± 9	270 ± 11
R2 numérique	277 ± 3	279 ± 3	277 ± 5	279 ± 7

Tableau III-8 - Nombre de billes sortantes par expérience et par simulation pour R2.

Le nombre de billes sortantes est plus élevé pour R2 que pour R1. Ceci était prévisible car pour la rugosité R2 les billes sortantes sont les billes dans les creux séparant deux créneaux successifs et les billes de la première couche. Au contraire de la rugosité R1, pour laquelle juste la première couche de billes près des créneaux sort de la boîte [Figure III-28].

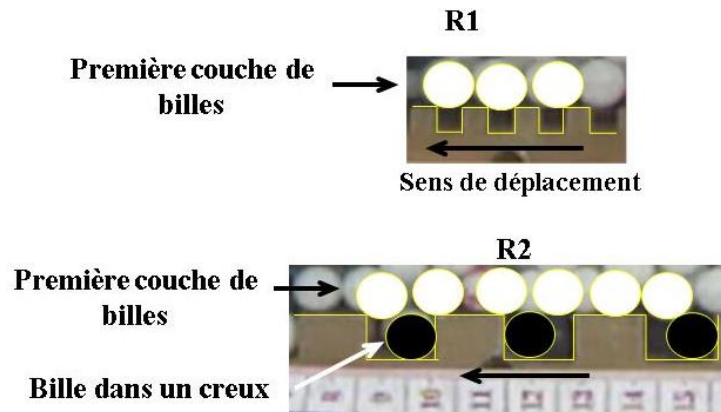


Figure III-28 - Billes sortantes pour R1 et R2.

La comparaison entre l'expérience et la simulation pour R2 montre une bonne concordance. En effet, pour l'expérience et pour la simulation la force normale n'influe pas sur le nombre de billes sortantes. De même, l'écart entre l'expérience et la simulation est considéré comme étant non notable (5 %) par rapport à R1.

La **Figure III-29** présente la variation de la force tangentielle en fonction de la force normale pour la rugosité R3. Le quatrième point de mesure expérimentale (correspond à la force normale maximale) sort du cadre de l'étude comparative pour la même raison expliquée précédemment (barres d'erreurs non négligeables). La tendance linéaire de variation expérimentale et numérique montre une bonne concordance. Au contraire des autres rugosités, les valeurs des trois premiers points de mesure de la force tangentielle expérimentale sont plus élevées que les valeurs numériques. Nous avons dit dans le chapitre 2 que près de la baguette R3, des blocages et des phénomènes plus complexes par rapport aux autres baguettes ont été observés. Tandis que numériquement, nous n'avons pas observé des blocages, ce qui pourrait expliquer des forces tangentielles expérimentales plus élevées.

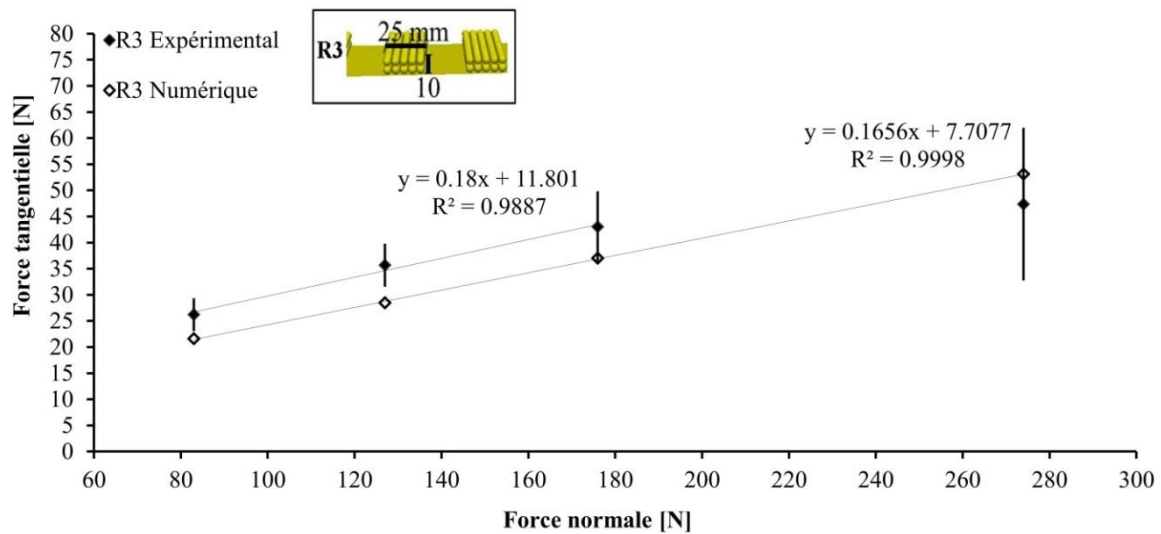


Figure III-29 – Variation de la force tangentielle en fonction de la force normale pour R3.

Le **Tableau III-9** montre le nombre de billes sortantes par l'expérience et par la simulation pour différentes forces normales exercées sur R3. La précision sur le nombre de billes sortantes par la simulation a été estimée à partir de l'étude de répétabilité réalisée sur R2. Nous remarquons que pour les trois rugosités, les valeurs numériques les plus proches des valeurs expérimentales sont celles de la rugosité R3 (1% de variation).

Force normale [N]	85	125	175	275
R3 Expérimental	314 ± 18	317 ± 7	317 ± 23	327 ± 38
R3 Numérique	315 ± 3	316 ± 3	322 ± 5	315 ± 7

Tableau III-9– Nombre de billes sortantes par l'expérience et par la simulation pour R3.

La **Figure III-30** et la **Figure III-31** présentent les variations de la force tangentielle et du nombre de billes sortantes en fonction de la force normale exercée sur R1, R2 et R3. Dans ces

deux figures, nous excluons les points de mesure qui correspondent à une force normale de 275 N.

Sur la **Figure III-30**, la différence principale entre l'expérience et la simulation est que pour l'expérience quelle que soit la force normale, la force tangentielle correspondante à la rugosité R3 est plus élevée que celles correspondantes à R1 et R2. Alors que par la simulation ce n'est pas le cas. La modélisation des arêtes vives (expérimentale) par des arêtes arrondies (numérique), le contrôle de la pression (non uniforme pour l'expérience et contrôlée pour la simulation), les paramètres non calés par rapport à l'expérience pourraient expliquer cette différence.

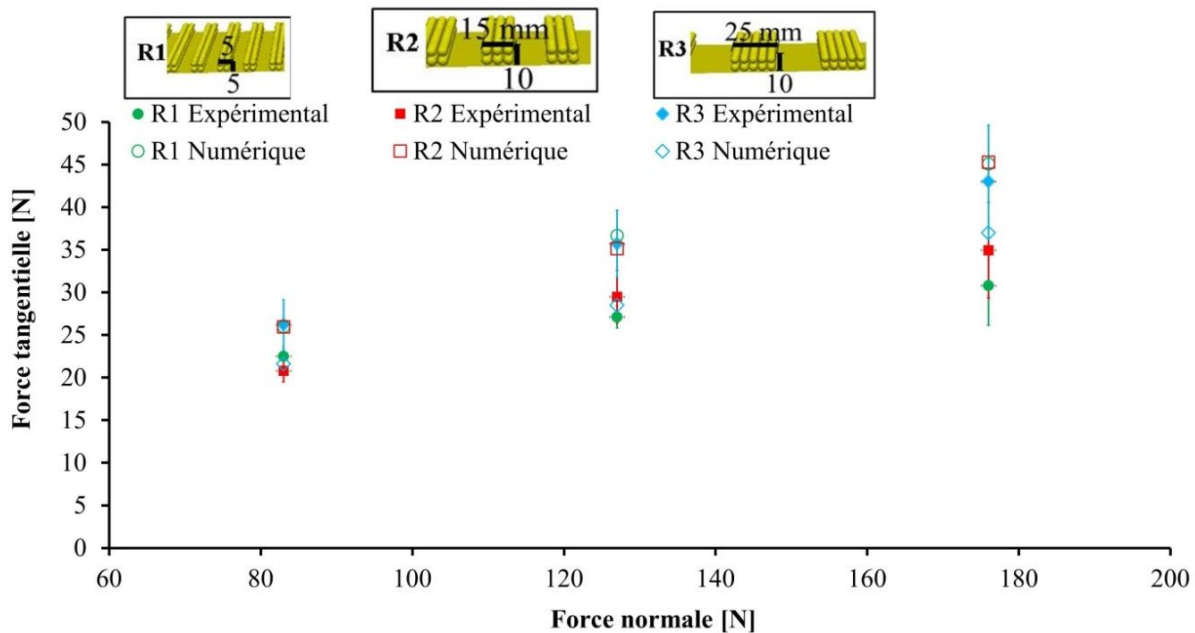


Figure III-30 - Variation expérimentale et numérique de la force tangentielle en fonction de la force normale pour les rugosités R1 ; R2 ; R3.

La **Figure III-31** montre que pour une rugosité plus élevée, le nombre de billes sortantes devient plus important. Au contraire, l'écart entre l'expérience et la simulation diminue lorsque la rugosité augmente. Une bonne concordance entre l'expérience et la simulation est observée au sujet de l'influence de la force normale sur le nombre de billes sortantes.

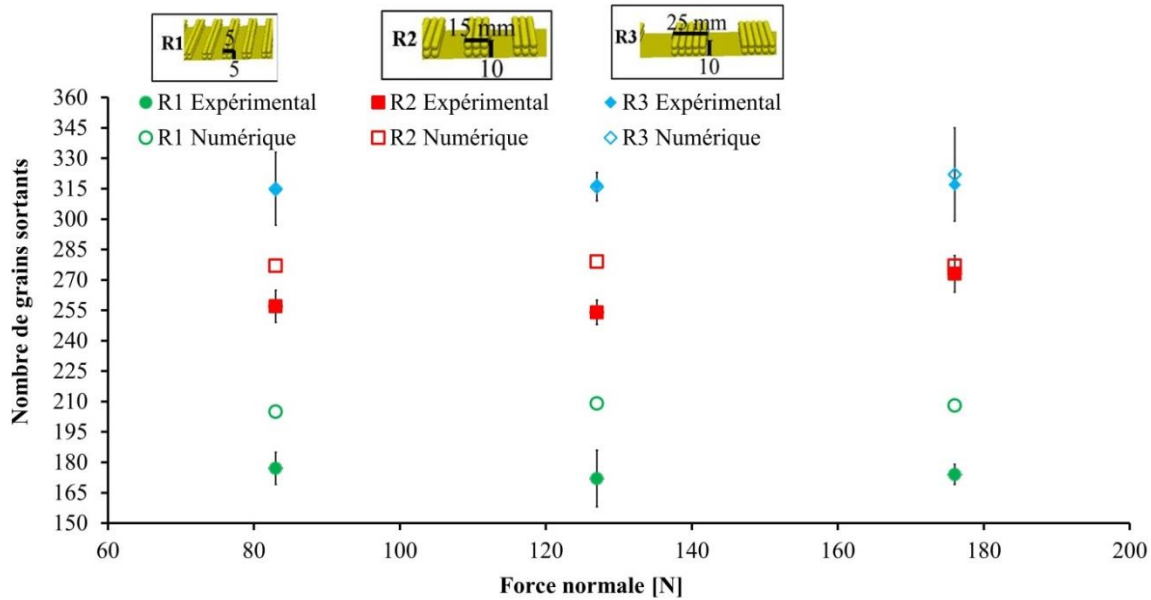


Figure III-31 - Variation du nombre des billes sortantes expérimental et numérique en fonction de la force normale pour les rugosités R1 ; R2 ; R3.

L'écart observé entre l'expérience et la simulation peut être expliqué par :

- La représentation approchée de la rugosité (paquets de grains au lieu de vrais crêneaux). La surface des paquets de grains est plus rugueuse que celle des vrais crêneaux ce qui entraîne une augmentation de la force de cisaillement entre les grains du milieu et les paquets. Cette hypothèse n'est pas applicable sur R3.
- Le jeu de paramètres d'entrée utilisés (non fixés à partir d'essais sur les billes).
- La pression verticale exercée sur l'empilement granulaire uniforme dans le modèle numérique et non uniforme pour l'expérimentation. Numériquement, nous pouvons contrôler la pression normale et la garder uniforme durant la simulation. Tandis qu'il était difficile durant l'essai de mesurer l'évolution et l'uniformité de la pression normale exercée sur le milieu granulaire. Nous estimons alors que lorsque nous augmentons la masse ajoutée sur le milieu granulaire la pression normale devient moins stable, ce qui conduirait à un écart plus élevé entre la pression normale réelle et celle contrôlée par la simulation numérique.

En ce qui concerne les profils de cisaillement [voir Annexe2], une bonne concordance entre les profils de cisaillement expérimentaux et numériques a été observée pour la baguette R3. Tandis que pour R1 et R2, dans certains cas nous avons trouvé une comparaison cohérente (R1 et force normale de 125 N) et dans d'autres cas, nous avons remarqué un désordre dans la simulation qui n'a pas été observée par l'expérience (R2 et force normale de 85 N). Nous rappelons que pour la simulation numérique la surface de l'empilement est plane parce que le

contrôle de la pression est uniforme. Au contraire dans l'expérience, la masse repose sur le milieu granulaire en autorisant son déplacement.

III.6 Limites du dispositif expérimental

Les essais expérimentaux réalisés sur le dispositif nous ont permis d'identifier certains phénomènes liés aux rugosités de baguettes. De même, ces essais ont constitué la référence pour une étude comparative qui montre une concordance satisfaisante entre les résultats numériques et expérimentaux. Par conséquent, le dispositif expérimental était un outil indispensable pour étudier l'influence de la rugosité sur le comportement granulaire et pour montrer que notre code numérique est capable de reproduire les comportements macroscopiques observés dans les essais.

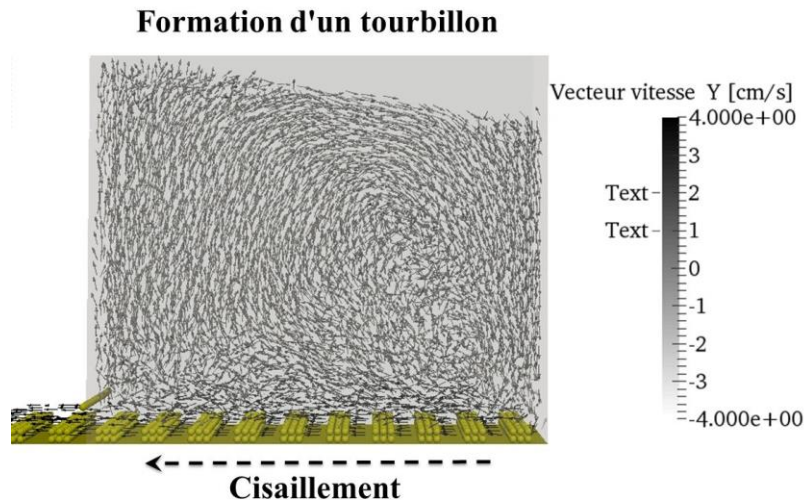


Figure III-32 - Formation d'un tourbillon après le déplacement de la paroi rugueuse (R2) avec une vitesse 40 mm/s et une force normale de 85 N.

Toutefois, nous avons vu que l'analyse des résultats obtenus sur le modèle analogique repose essentiellement sur l'observation des phénomènes visibles près de la paroi. L'arrangement du milieu granulaire près des parois est différent de celui dans le milieu (effet de paroi [147]). Ceci signifie que les parois latérales affectent les résultats. De même, lorsque la baguette se déplace sous le milieu granulaire, les billes exercent une force sur la paroi perpendiculairement à la direction du déplacement et celles qui sont près des créneaux sortent par l'ouverture. Nous imposons alors un champ de vitesses aux billes. La **Figure III-32** montre les vecteurs vitesses linéaires des grains tracés via ParaView après un déplacement de la baguette de 300 mm. Cette figure montre clairement l'influence de l'ouverture et des parois sur les mouvements des grains. En effet, les grains de la première couche près de la paroi rugueuse décrivent un mouvement horizontal en se dirigeant vers l'ouverture. Pour les autres grains du milieu, les mouvements sont

affectés par la paroi frontale. Ils tournent en créant « un tourbillon granulaire ». En conditions périodiques (absence des parois latérales), ces phénomènes ne seraient pas présents.

En plus, au cours de l'essai expérimental le contrôle de la pression normale exercée sur le milieu granulaire n'est pas uniforme. Le mouvement des masses ajoutées sur le milieu granulaire est autorisé et affecté par les mouvements des billes sous les masses. De même, le système que nous avons étudié n'est pas symétrique. En effet, nous cisailons un milieu granulaire en présence de la gravité par un déplacement imposé d'une baguette placée sous le milieu. Et sur l'autre surface du milieu, une pression normale est exercée.

Ces différentes limites nous ont mené à étudier la modélisation numérique de l'interface milieu granulaire/paroi rugueuse dans un système de calcul périodique et symétrique. Ceci fait l'objet de l'étude du quatrième chapitre.

III.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté le code DemGCE développé en interne à Mines-Douai et utilisé dans le cadre de cette étude. Ensuite, nous avons expliqué la simulation de l'essai expérimental (conditions aux limites, préparation de l'empilement et analyse des résultats). De même, nous avons montré que la force tangentielle, le nombre de grains sortants et les profils de cisaillement sont reproductibles pour des différentes configurations initiales.

Avant d'évoquer la comparaison entre les essais expérimentaux et les résultats numériques, une étude paramétrique a été présentée. Dans l'étude paramétrique, nous avons fait varier les coefficients de frottement de glissement grain/grain μ_{gg} et grain/paroi μ_{gp} et le coefficient de roulement μ_r .

Les résultats ont montré que les coefficients de glissement ont une influence assez limitée sur la force tangentielle et le profil de cisaillement. En revanche, les écarts observés sont expliqués par la modélisation des créneaux par des paquets de grains sphériques. En effet, la modélisation des grains crée un désordre à l'interface plus important que le désordre expérimental. Ceci entraîne une augmentation de la force tangentielle. De plus, la variation légère de la force tangentielle en fonction du coefficient de frottement grain/paroi nous a permis de conclure que le frottement entre les grains du milieu et les parois latérales est négligeable devant le frottement entre les grains du milieu et la paroi rugueuse. De même, pour les coefficients μ_{gg} et μ_{gp} étudiés, nous avons trouvé un nombre de grains sortants de la boîte proche de celui obtenu par l'expérience.

Pour le coefficient de roulement μ_r , la force tangentielle augmente légèrement avec ce coefficient jusqu'à une valeur maximale correspondant à un coefficient de 0,002. Ensuite, elle décroît pour les coefficients de roulement de 0,005 et 0,01. Les vitesses de rotations des grains expliqueraient la diminution de la force tangentielle. La différence notable que nous avons

observée entre la simulation et l'expérience est le désordre de l'empilement numérique près de la surface rugueuse. L'hypothèse qui reste valable ici est que la modélisation de la baguette par des grains favorise la création d'un désordre près de la paroi. En ce qui concerne le nombre de grains sortants, nous avons trouvé une bonne concordance entre la simulation et l'expérience.

Que faut-il retenir de l'analyse comparative des essais expérimentaux avec les résultats numériques ?

La comparaison s'avère parfois délicate du fait à la fois des incertitudes expérimentales (précision des mesures) et des limites de notre modèle numérique (modélisation des créneaux de la baguette par des paquets de grains). Mais en général la comparaison est satisfaisante surtout au niveau du profil de cisaillement et du nombre de grains sortants. L'écart entre la force tangentielle calculée par notre modèle numérique et celle mesurée expérimentale a été expliqué par :

- La représentation approchée de la rugosité (paquets de grains au lieu de vrais créneaux). La surface des paquets de grains est plus rugueuse que celle des vrais créneaux ce qui entraîne une augmentation de la force de cisaillement entre les grains du milieu et les paquets.
- Le jeu de paramètres d'entrée utilisés (non fixés à partir d'essais sur les billes).
- La pression verticale exercée sur l'empilement granulaire uniforme dans le modèle numérique et non uniforme pour l'expérimentation.

Nous avons fini ce chapitre par une discussion des limites du dispositif expérimental qui peuvent affecter les résultats. En effet, les mouvements des billes observés sont affectés par les parois (effet de paroi), le système étudié est non symétrique et la pression normale exercée sur le milieu granulaire est non uniforme. Ces limites nous ont amené à étudier la simulation numérique de l'interface milieu granulaire/paroi rugueuse dans un système de calcul périodique et symétrique. Ceci fait l'objet de l'étude du chapitre suivant.

CHAPITRE IV

***Cisaillement plan sans gravité d'un milieu
granulaire sur une paroi rugueuse***

IV.1 Programme de travail

Dans les chapitres 2 et 3, nous avons étudié l'influence de la rugosité sur les mécanismes à l'interface milieu granulaire-paroi rugueuse. Ces études ont permis de comprendre certains phénomènes liés à la rugosité. Le dispositif utilisé (ou simulé) a présenté également quelques limites : effets de bords latéraux, blocages de billes, formation d'un tourbillon dans l'empilement, description des mouvements de grains loin des parois latérales... Dans ce chapitre, nous avons contourné la limitation expérimentale en étudiant numériquement par la méthode DEM le cisaillement plan-plan d'un milieu granulaire en conditions périodiques et sans gravité.

De nombreuses études numériques sur le cisaillement plan-plan des matériaux modèles dans des géométries simples ont été réalisées [54, 80, 148, 149, 150, 151]. Un milieu granulaire confiné entre deux parois rugueuses est cisailé par déplacement horizontal de la paroi. Lors du cisaillement et une fois que l'état d'écoulement stationnaire est atteint, les profils de compacité, le taux de cisaillement, les fluctuations des vitesses dans la direction de cisaillement et les contraintes normales et tangentielles exercées sur la paroi mobile sont mesurés [54]. Généralement, les états stationnaires sont caractérisés par des grandeurs ou profils moyennés dans le temps [54, 80]. Plusieurs études ont montré qu'à l'interface, le milieu est fortement agité puisqu'il est affecté par la paroi [54, 76, 80]. Afin d'éviter l'effet de la paroi sur le calcul des grandeurs moyennées décrivant le comportement rhéologique du matériau cisailé, les cinq premières couches sont généralement exclues. Au contraire des études réalisées sur la rhéologie de l'écoulement granulaire, les études consacrées à la tribologie de l'interface milieu granulaire-paroi rugueuse sont moins nombreuses (voir chapitre 1 paragraphes I.3.2 ; I.3.3 et I.3.4). Par ailleurs, dans la plupart des études réalisées, la rugosité imposée à la paroi mobile et la taille du système simulé ont été conçus de manière à étudier des systèmes entièrement cisailés. Lorsque les profils moyens de vitesse mesurés sont linéaires, c'est-à-dire lorsque le milieu est uniformément cisailé près et loin de la paroi, un taux de cisaillement constant peut être défini.

La couche limite est une couche formée à l'interface dont le comportement diffère du reste du milieu loin de la paroi [2, 3, 4]. En se basant sur cette description de la couche limite, nous nous sommes essentiellement intéressés dans ce chapitre à étudier l'influence des conditions à l'interface milieu granulaire-paroi rugueuse sur l'état de cisaillement du milieu près et loin de la paroi. Les conditions à l'interface sont modifiées en variant : la pression normale, la vitesse horizontale et la rugosité imposées aux parois rugueuses. La contrainte tangentielle, les profils de vitesse et de compacité sont ensuite mesurés.

Nous débutons ce chapitre par une description de la simulation suivie d'une présentation du protocole de simulation et des grandeurs observables. Ensuite, une étude sur la reproductibilité et sur le comportement global du système est présentée. L'influence des conditions à l'interface sur les grandeurs mesurables est alors étudiée de manière systématique.

Le chapitre se termine par une étude sur les influences respectives de l'histoire du confinement et de la polydispersité du milieu cisailé.

IV.2 Simulations numériques

IV.2.1 Description du système simulé

La **Figure IV-1** présente un schéma du système simulé. La géométrie étudiée est la plus simple possible : cisaillement plan en 3D. Dans la configuration initiale, un nombre de grains noté N_g est placé entre deux parois rugueuses parallèles. Les grains sont légèrement polydisperses (10%) de diamètre moyen d_{moyen} égal à 1,0 cm. Le milieu est soumis à un cisaillement en déplaçant, à vitesse imposée V_0 , les deux parois rugueuses en sens opposé. Par ailleurs, lors du cisaillement la pression normale P est contrôlée sur chaque paroi en autorisant leur déplacement vertical. Le système étudié est considéré comme une partie d'un système infini par l'utilisation des conditions aux limites périodiques, c'est-à-dire que tout grain sortant par l'un des côtés du système revient du côté opposé en conservant ses propriétés. Cette périodicité permet d'éliminer les effets de bords qui seraient dus à la présence de parois latérales.

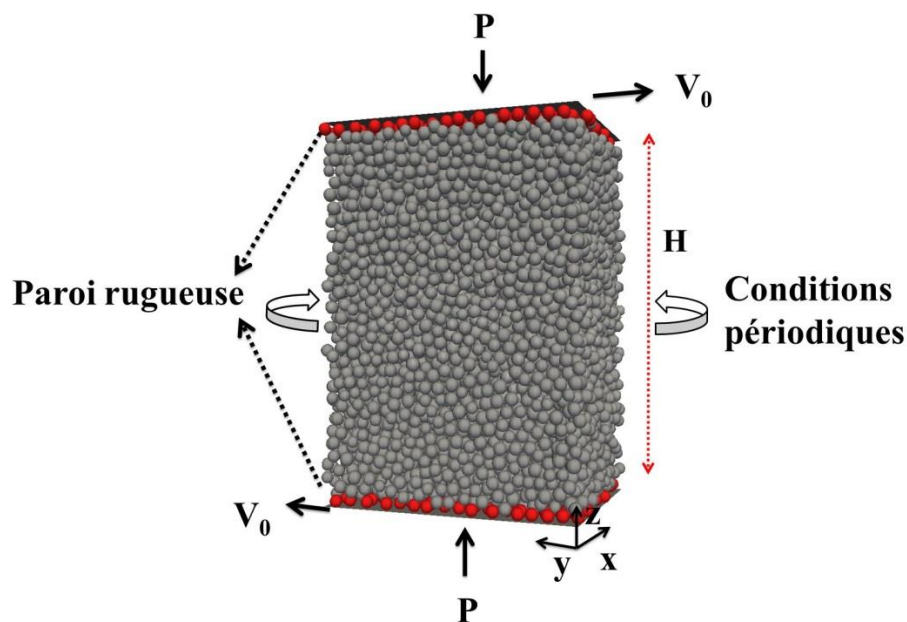


Figure IV-1 – Schéma du système simulé : les parois rugueuses sont en rouges et le milieu granulaire est constitué par des grains gris.

En ce qui concerne les lois de contacts, la méthode Smooth DEM présentée dans le chapitre 1 est utilisée. Les simulations présentées dans ce chapitre sont réalisées avec le code numérique DemGCE présenté dans le chapitre 3. De même, les paramètres utilisés pour les simulations ont été choisis à partir de l'étude paramétrique présentée dans le chapitre 3. Ces

paramètres sont rappelés dans le **Tableau IV-1**. Les grandeurs physiques présentées par la suite sont représentées en fonction de d_{moyen} .

Coefficient de frottement grain/grain et grain/paroi	Coefficient de roulement	Coefficient de restitution	Pas de temps [sec]	Module de Young [Pa]	Coefficient de Poisson
0,15	0,002	0,8	1,0 E -6	1,0 E +8	0,29

Tableau IV-1 – Paramètres utilisés pour les simulations.

IV.2.2 Protocole de simulation

Pour réaliser des simulations de cisaillement plan, trois étapes sont nécessaires :

- La première étape est **la préparation des parois rugueuses**.
- La deuxième étape est **la préparation d'un empilement confiné**.
- La troisième étape est **le cisaillement de l'empilement**, tout en contrôlant la pression normale appliquée.

IV.2.2.1 Parois rugueuses

La rugosité de la paroi est modélisée en collant des grains monodisperses de diamètre d_p sur les plans supérieur et inférieur. Deux types de rugosités sont étudiés [**Figure IV-2**]. Le premier type est une rugosité « aléatoire » dont la génération comporte plusieurs étapes [**Figure IV-2**]. Tout d'abord, des grains sont placés aléatoirement sur le plan inférieur au moyen d'un algorithme RSA bidimensionnel [139]. La compacité maximale qui peut être atteinte au moyen de cet algorithme (en 2D) ne peut dépasser 0,547 avec des grains de même taille [152]. Des compacités plus faibles peuvent également être spécifiées avant la génération des grains. Ensuite, des grains de même taille et de mêmes coordonnées suivant x et y que ceux de la rugosité du plan inférieur, sont collés sur le plan supérieur à une distance r égale à leur rayon. La dispersion des grains sans arrangement particulier a été choisie pour étudier une rugosité plus proche de la réalité dont les aspérités sont irrégulières.

Le deuxième type de rugosité est formé de paquets (rangées superposées) de grains périodiques, ce sont les rugosités R1, R2 et R3 que nous avons modélisées dans le chapitre 3, mais cette fois ci en conditions périodiques. Les rangées de grains superposés permettent d'étudier la rugosité utilisée dans l'étude expérimentale en évitant les effets des parois latérales. Pour toutes les simulations présentées par la suite, le terme « paroi rugueuse » est associé à l'ensemble du plan et des grains jointifs.

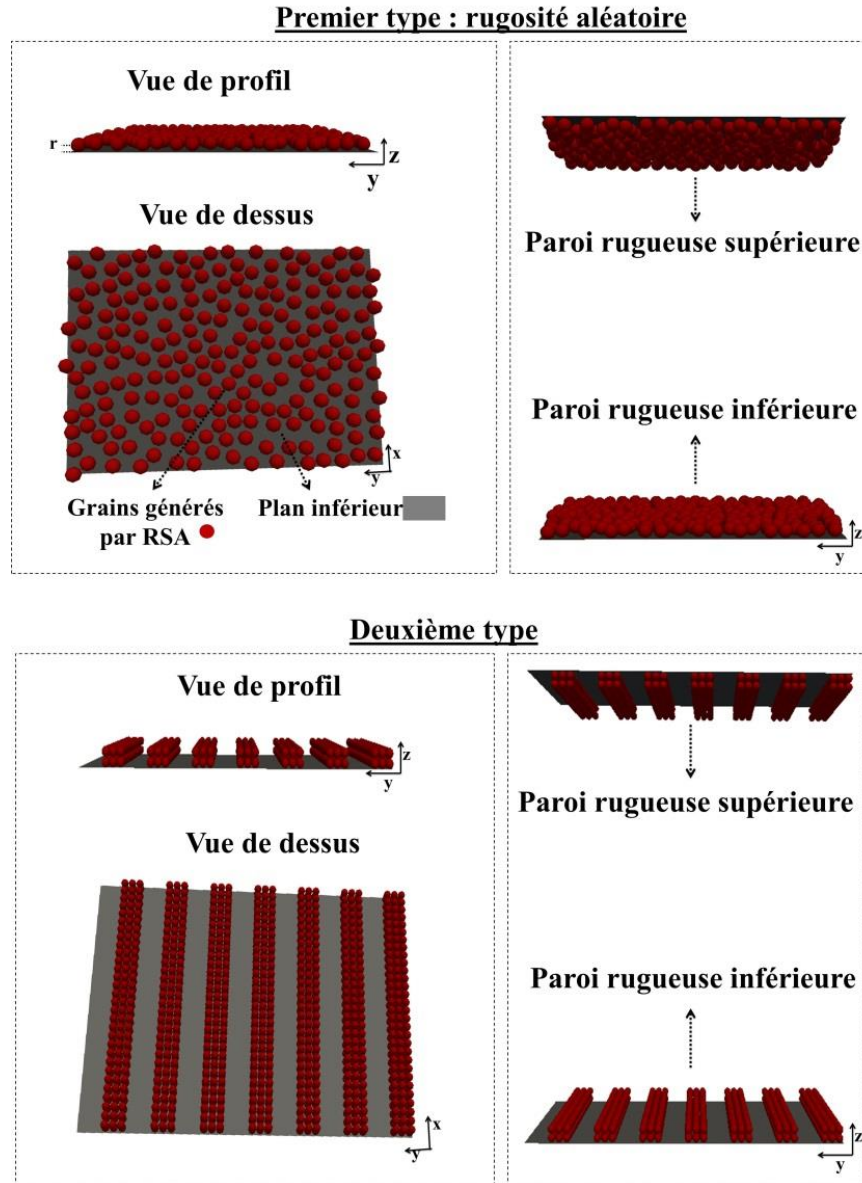


Figure IV-2 - Deux types de rugosités étudiées : Rugosités aléatoire et ordonnée.

IV.2.2.2 Préparation des empilements et contrôle de la pression

La préparation de l'empilement consiste à partir d'un état lâche. Tout d'abord, des grains monodisperses sont générés aléatoirement dans la cellule de simulation, entre deux parois rugueuses, par l'algorithme de génération RSA [Figure IV-3-a]. Dans cette phase, les grains sont immobiles et sans contact entre eux. La compacité est de l'ordre de 0,38 [152]. Ensuite, les deux parois rugueuses se déplacent verticalement en sens opposé pour augmenter la compacité du milieu [Figure IV-3-b]. Les grains du milieu se réarrangent sous l'effet du mouvement de chaque paroi. La phase de la préparation de l'empilement se termine lorsque la pression normale

désirée est atteinte (à ce stade, la pression est maintenue constante pendant une durée de simulation de 5 secondes, de manière à laisser le système se relaxer) et l'empilement granulaire est stable (compacité $\Phi \approx 0,62$) [Figure IV-3-c]. L'avantage de cette méthode de préparation est qu'elle permet d'obtenir un milieu granulaire confiné et préparé dans des conditions symétriques puisque le confinement se fait en l'absence de gravité.

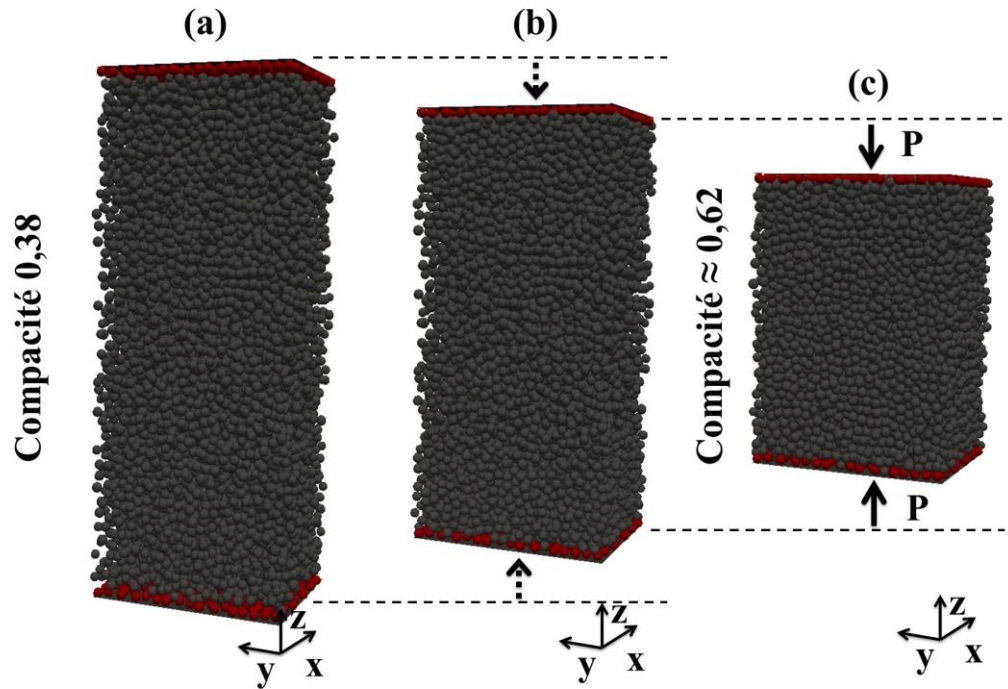


Figure IV-3 - Préparation des empilements : (a) Génération des grains, (b) Déplacement des parois rugueuses et (c) Empilement confiné et stable.

Le contrôle de la pression normale appliquée sur les parois rugueuses se fait par le calcul à chaque instant de la vitesse de déplacement des parois lors de la préparation. Cette vitesse dépend de la différence entre la pression normale exercée par les grains sur chaque paroi et la pression normale désirée [Figure IV-4]. Le système se stabilise lorsque la pression exercée par les grains sur la paroi est égale à la pression désirée et la compacité est homogène au centre du milieu.

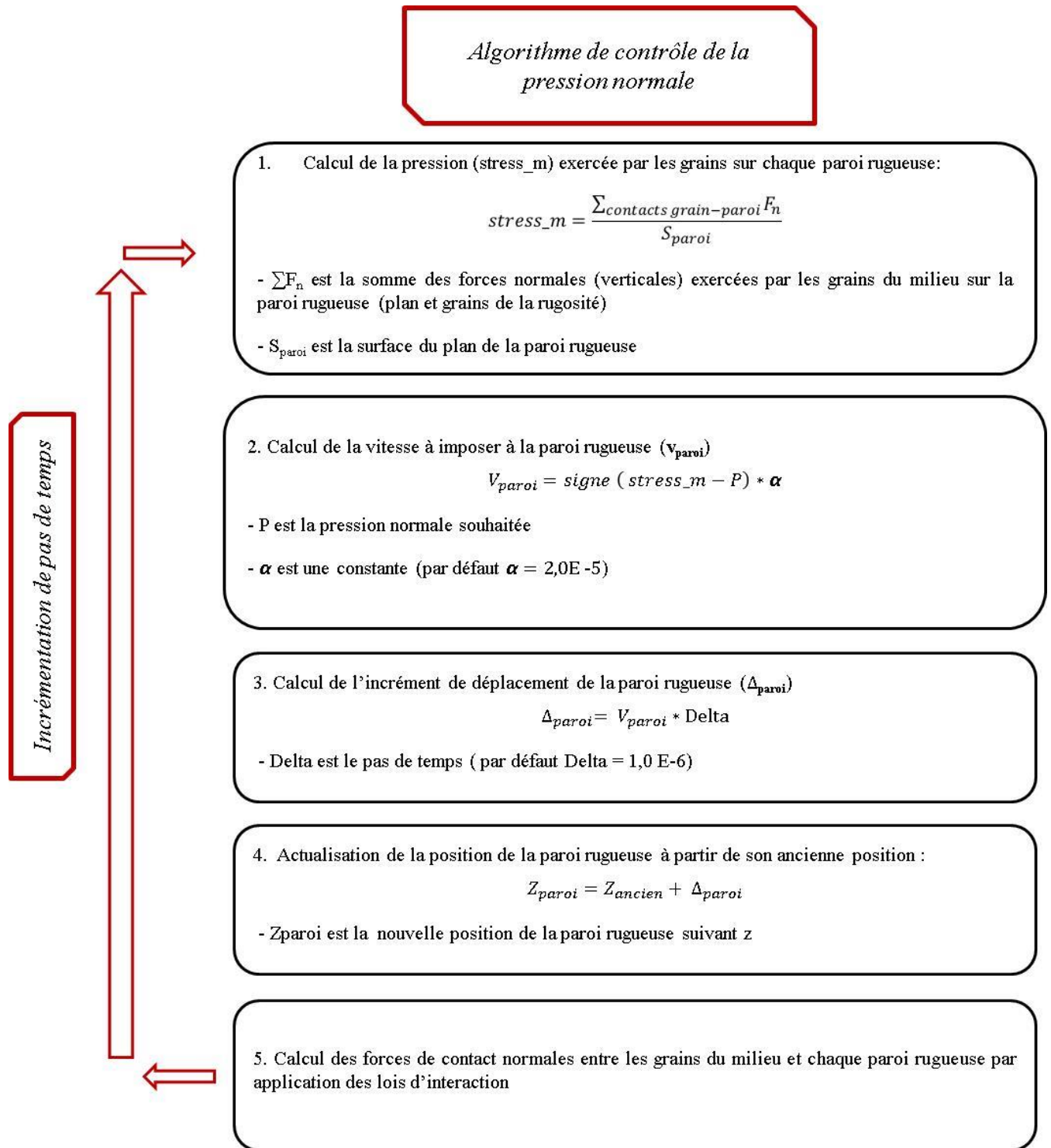


Figure IV-4 - Algorithme de contrôle de la pression normale.

IV.2.2.3 Cisaillement

Après la préparation de l'empilement confiné, le milieu granulaire est cisailé en appliquant des sollicitations (pression normale, vitesse et absence de gravité) symétriques. En effet, le système est sollicité de manière symétrique par un déplacement horizontal à vitesse imposée V_0 en sens opposé appliqué aux deux parois.

Les grains collés sur les parois rugueuses ont les mêmes caractéristiques matériaux que les grains du milieu, mais leur mouvement n'est pas décrit par les lois d'interactions. Ils se déplacent à la même vitesse que celle imposée au plan correspondant. Lors du cisaillement, la pression normale sur chaque paroi rugueuse est contrôlée [**Figure IV-5**]. Comme dans le cas du confinement, le contrôle de la pression se fait en autorisant le mouvement vertical de chaque paroi [**Figure IV-4**]. Ainsi, la hauteur H varie durant le cisaillement (variation maximale d'environ 2% par rapport à la hauteur initiale). La durée de cisaillement est de dix secondes. Ce temps est largement suffisant pour atteindre un état stationnaire. L'état stationnaire est caractérisé par des faibles variations dans le temps de la pression normale (fluctuations d'environ 2%) et de la force de frottement entre le milieu et la paroi rugueuse (d'environ 3%).

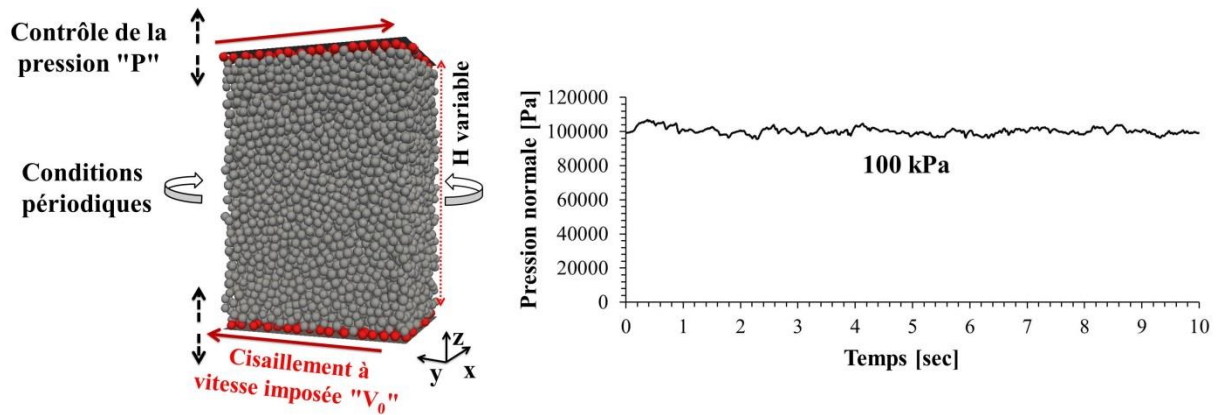


Figure IV-5 - Exemple de contrôle d'une pression normale de 100 kPa pour une vitesse de déplacement de la paroi de 10 d_{moyen} /s (rugosité aléatoire $d_p = 2 d_{\text{moyen}}$).

IV.2.3 Grandeurs observables

Les systèmes étudiés permettent d'obtenir des informations sur l'état du cisaillement du milieu et sur sa microstructure. Ces informations sont des grandeurs en principe mesurables appelées observables, telles que la force ou la contrainte tangentielle, le profil de vitesse et le profil de compacité. Ces grandeurs sont largement étudiées lors du cisaillement d'un milieu granulaire statique ou dynamique. A partir des grandeurs mesurables instantanées, des grandeurs moyennées dans le temps sont calculées pour caractériser l'état d'écoulement du milieu [54, 76, 80].

IV.2.3.1 Force tangentielle

Lors du cisaillement, les grains du milieu exercent sur la paroi rugueuse une force de frottement qui s'oppose au mouvement de la paroi. La force de frottement agissant tangentiellement sur la paroi rugueuse sera nommée « force tangentielle ». Le calcul de cette force dans le code DemGCE est présenté dans le chapitre 3 paragraphe III.3.3.1. La **Figure IV-6** présente un exemple de l'évolution de la force tangentielle sur les parois rugueuses supérieure et inférieure.

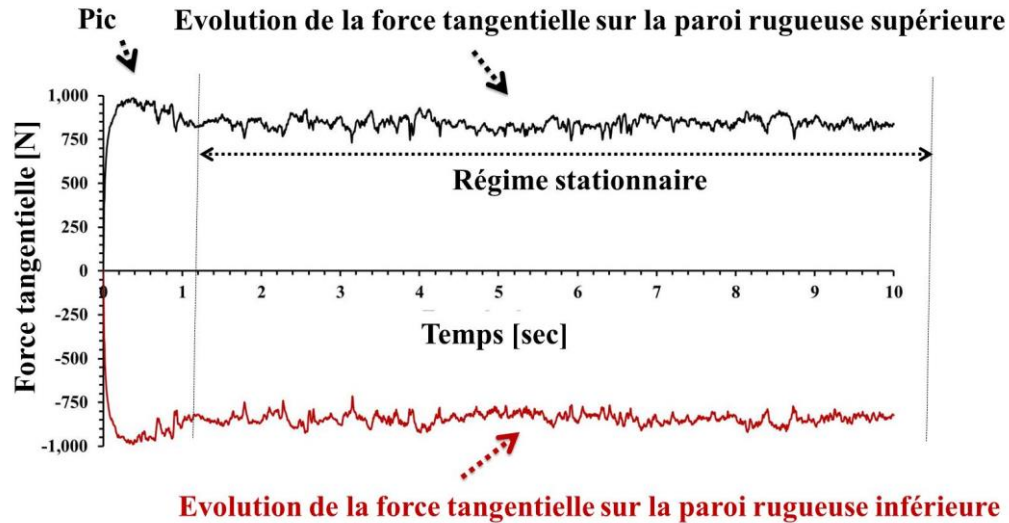


Figure IV-6 - Evolution de la force tangentielle sur les parois rugueuses supérieure et inférieure (rugosité aléatoire $d_p = 2 d_{moyen}$; $P = 100$ kPa et $V_0 = 10 d_{moyen} / s$).

La force tangentielle est caractérisée par deux régimes :

- Un régime transitoire : la force tangentielle absolue augmente jusqu'à sa valeur maximale (pic), ensuite elle diminue.
- Un régime stationnaire : la force tangentielle varie légèrement autour de sa valeur moyenne. Dans ce régime, la force tangentielle représente la force nécessaire pour que le système continue à cisailer le milieu granulaire (maintenir le cisaillement).

Dans ce travail nous nous intéressons uniquement au régime stationnaire. Une comparaison entre l'évolution de la force tangentielle sur la paroi supérieure et sur la paroi inférieure est systématiquement réalisée. Pour chaque simulation, des valeurs absolues très proches de cette force sont obtenues sur chaque paroi rugueuse. La valeur de la contrainte tangentielle présentée dans la suite correspond au rapport entre la valeur moyenne de la force tangentielle dans le régime stationnaire et la surface du plan de la paroi rugueuse.

IV.2.3.2 Profil de vitesse suivant la direction de cisaillement

Le profil de vitesse représente la variation des vitesses des grains dans la direction du cisaillement en fonction de la hauteur du système. Ce profil permet de décrire l'état de cisaillement du milieu. Par exemple, un profil linéaire met en évidence un cisaillement uniforme. Un profil de vitesse moyen est tracé à partir des profils de vitesses instantanés en régime stationnaire.

- Pour chaque profil de vitesse instantané (pr), le milieu granulaire est découpé en n couches horizontales d'épaisseur égale au diamètre moyen des grains du milieu.
- La vitesse moyenne $V_{moyen,j}$ dans la couche (j) est calculée : c'est la somme des vitesses de tous les grains dans la couche j de tous les profils (pr) divisée par le nombre de grains correspondant.

$$V_{moyen,j} = \sum_{pr=1}^{pr=n_{pr}} \sum_{i=1}^{i=n_j(pr)} \frac{V_{i,j}(pr)}{n_j(pr)} \quad [\text{Eq. IV-1}]$$

$V_{i,j}(pr)$ est la vitesse instantanée du grain (i) dans la couche (j) dans la direction de cisaillement pour le profil (pr) et $n_j(pr)$ est le nombre de grains dans la couche (j) pour un profil (pr).

- Le profil de vitesse est donc l'ensemble des points représentant les vitesses moyennes calculées dans chaque couche pour $j = 1$ à $j = n$ couches [Figure IV-7].

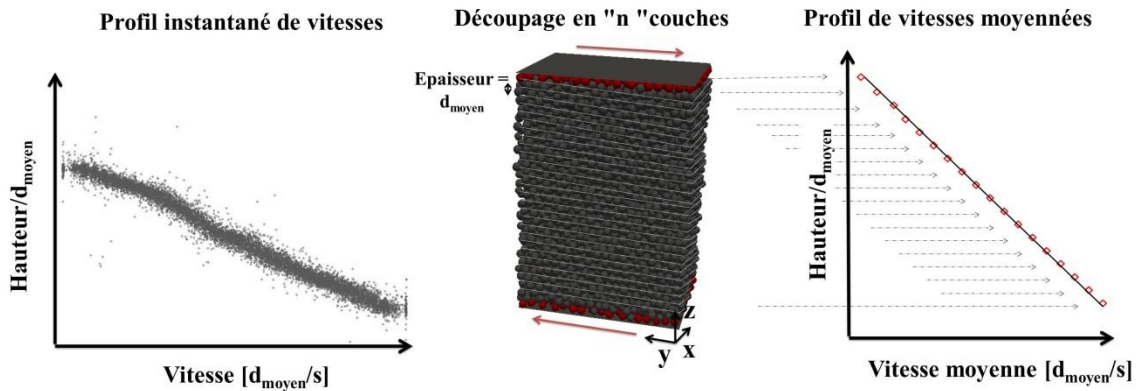


Figure IV-7 – Exemples des profils de vitesses instantané et moyen (rugosité aléatoire).

La Figure IV-8 présente des exemples de grandeurs observables liées à la vitesse de déplacement des grains suivant la direction de cisaillement. A partir du profil de vitesse, il est possible de calculer le rotationnel des vitesses [Eq. IV-2]. La relation de l'équation IV-2 signifie

qu'en moyenne la rotation des particules coïncide avec celle d'un matériau continu soumis au taux de cisaillement. Cette relation a été déjà démontrée pour des écoulements denses [153, 154] ou des déformations quasi-statiques [155].

$$\omega_x = \frac{1}{2} (dv_y(z)/dz) \quad [\text{Eq. IV-2}]$$

ω_x est la vitesse de rotation autour de l'axe horizontal perpendiculaire à la direction de cisaillement (ici c'est l'axe x) moyennée dans le temps. La **Figure IV-8-b** montre que près de la paroi, le taux de cisaillement ($dv_y(z)/dz$) et la vitesse de rotation des grains w_x sont plus faibles par rapport au centre. Le calcul théorique de la vitesse de rotation a été systématiquement vérifié dans nos simulations.

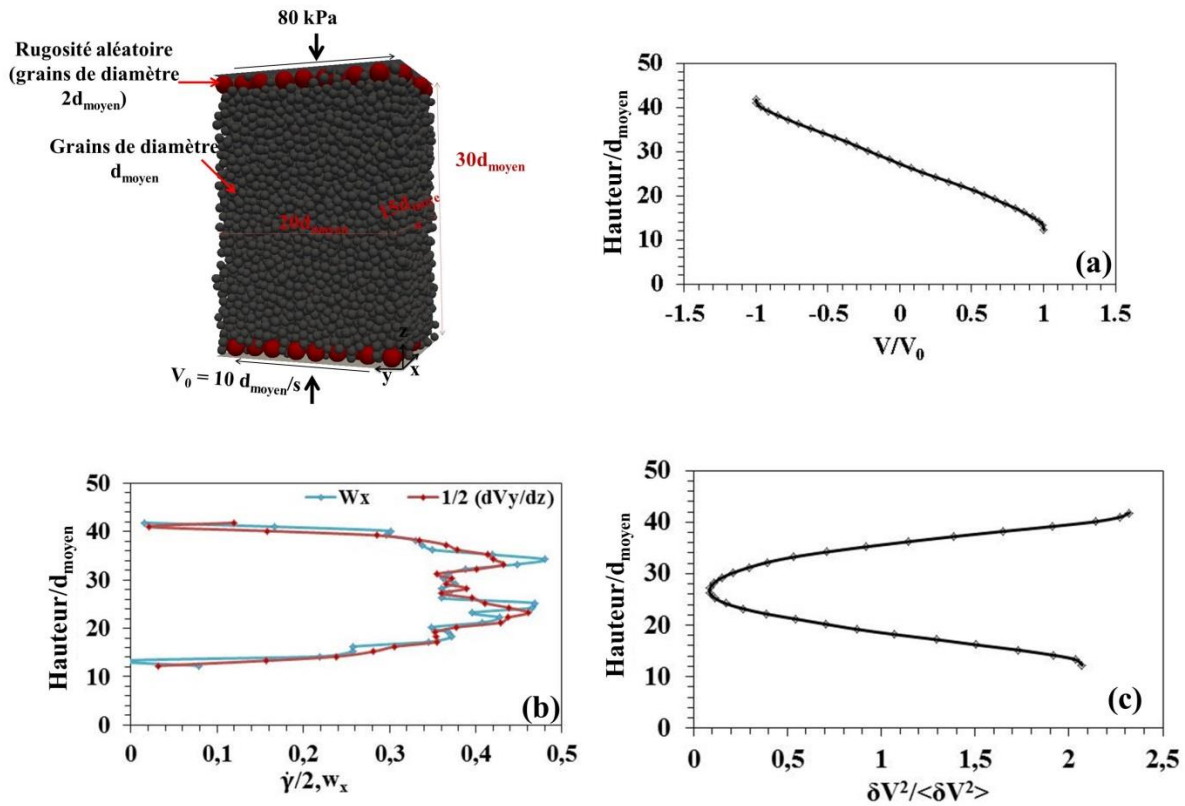


Figure IV-8 – Différentes grandeurs observables liées à la vitesse.

La dispersion des vitesses de grains autour de leur vitesse moyenne est définie comme les fluctuations de vitesses δV^2 : c'est l'écart quadratique moyen de vitesses par rapport à la vitesse moyenne $\langle V(pr) \rangle$. Ce qui correspond à une notion de température granulaire [80]. Naturellement, le milieu est agité par les parois, ceci se traduit par des fluctuations importantes [Figure IV-8-c].

$$\delta V_j^2 = \sum_{pr=1}^{pr=npr} \sum_{i=1}^{i=nj(pr)} \frac{1}{n_j} (V_{i,j}(pr) - \langle V(pr) \rangle)^2 \quad [\text{Eq. IV-3}]$$

$n_j(pr)$ est le nombre de grains dans la couche (j), $V_{i,j}(pr)$ est la vitesse du grain i dans la couche j pour un profil instantané (pr) et $\langle V(pr) \rangle$ est la moyenne de vitesses de tous les grains du système pour un profil (pr).

Pour les courbes présentées dans ce chapitre, la hauteur du système est normalisée par le diamètre moyen de grains du milieu (d_{moyen}), les vitesses par la vitesse imposée aux parois rugueuses V_0 et les fluctuations de vitesses par leur moyenne $\langle \delta V^2 \rangle$. De plus, pour toutes les courbes présentées par la suite, les points ne commencent pas par une hauteur (ordonnée) égale à zéro parce que durant le confinement les deux parois rugueuses se déplacent verticalement en sens opposé, ce qui nous donne une indication sur la distance parcourue par les parois.

IV.2.3.3 Profil de compacité

Nous rappelons que la compacité (Φ) est la fraction du volume occupé par les grains par rapport au volume total. C'est une donnée géométrique, la masse n'intervient pas. Lorsque le milieu granulaire est cisailé les grains se réarrangent et la compacité locale du système peut être modifiée. Afin de tracer un profil de compacité, nous avons ajouté au code DemGCE une fonction « compacity () ». Cette fonction permet de tracer un profil de compacité moyennée dans le temps.

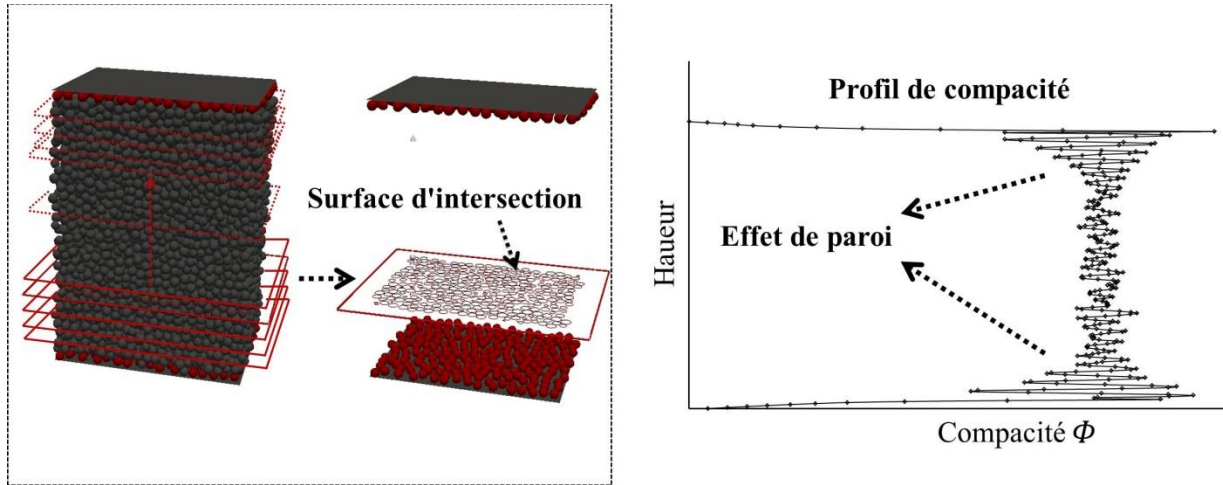


Figure IV-9 – Exemple de calcul de la compacité.

A un temps donné t (début du régime stationnaire) :

- La cellule de simulation est découpée en couches d'épaisseur $0,1d_{\text{moyen}}$ (diamètre moyen de grains).
- Pour un profil de compacité instantané (pr), la surface d'intersection ($S_{ij}(pr)$) entre un grain (i) et chaque plan de coupe de surface S_{plan} est ensuite calculée.
- Au niveau de chaque plan de coupe, la compacité moyennée dans le couche (j) est ensuite calculée Φ_{pj} . n_{pr} est le nombre de profils de compacité instantané dans la phase stationnaire (n_{pr} est égale à 150).

$$\Phi_{pj} = \frac{1}{n_{pr}} \sum_{pr=1}^{pr=n_{pr}} \sum_{i=1}^{i=n_j(pr)} \frac{S_{ij}(pr)}{S_{plan}} \quad [\text{Eq. IV-4}]$$

Ainsi, le profil de compacité obtenu est un profil présentant des fluctuations importantes près de la paroi (effet de paroi) [**Figure IV-9**]. Pour tous les profils de compacité présentés par la suite, les grains de la rugosité n'ont pas été pris en compte dans le calcul de la compacité. En d'autres termes, la compacité au niveau de la paroi correspond seulement à la fraction volumique des grains piégés entre les aspérités de la rugosité. Au niveau de la paroi rugueuse, la compacité est faible puisque une partie du volume est occupée par la rugosité. Du fait de la présence de la paroi, les grains se réarrangent sur quelques couches, dans celles-ci la compacité oscille en plusieurs sinusoïdes. Plus loin de la paroi, la région centrale est non affectée par la paroi et la compacité atteint une valeur moyenne notée $\langle \Phi \rangle$.

IV.3 Conditions de simulations

Dans la littérature, les études réalisées sur le cisaillement plan d'assemblages de grains secs ont permis de prédire l'état de cisaillement du système selon un nombre inertiel sans dimensions I [54, 156, 80, 151, 157].

$$I = \dot{\gamma} d \sqrt{\frac{\rho}{P}} \quad [\text{Eq. IV-5}]$$

$\dot{\gamma}$ est le taux de cisaillement [s^{-1}], d est le diamètre moyen des grains du milieu [m], ρ est la masse volumique [kg/m^3] et P est la pression normale exercée sur le milieu [Pa]. Un nombre inertiel faible (inférieur à 10^{-2}) correspond à un régime quasi-statique et frictionnel. A l'inverse, un nombre inertiel élevé (supérieur à 10^{-1}) correspond à un régime dynamique et collisionnel. Les résultats ont montré que dans un régime quasi-statique un profil de vitesse linéaire est obtenu. Tandis que dans le régime dynamique, un glissement apparaît près de la paroi et le profil de vitesse devient légèrement en forme de S [54]. En ce qui concerne les conditions de simulations, en 2D [80, 150], les systèmes étudiés sont généralement constitués de disques (entre

1000 et 5000) légèrement polydisperses de diamètre moyen d (± 10 -20%). Les grains sont placés à l'intérieur d'une fenêtre de longueur L (en général $40 d$). Le matériau est cisailé entre deux parois parallèles distantes de H (de 20 à 100 d). Une des parois est fixée et l'autre se déplace à une vitesse imposée V . En 3D [151, 158], le système étudié est constitué d'une base carrée de telle sorte que la longueur est à peu près égale à la largeur et la hauteur de la boîte de cisaillement est deux fois plus grande que sa largeur. Cao [157] a étudié un système de largeur et de hauteur respectivement égale à 20 et 30 d .

Les conditions de nos simulations ont été déterminées à partir des études numériques précédentes réalisées sur le cisaillement granulaire et à partir d'une campagne de simulations préliminaires. Nous étudions un empilement granulaire composé de 10000 grains sphériques. Les contacts entre les grains sont non-cohésifs (absence de fluide interstitiel). Afin d'éviter la cristallisation (apparition de larges zones ordonnées : les centres des grains s'organisent suivant les sites d'un réseau régulier) une légère polydispersité est introduite (± 10 %). Le diamètre moyen des grains est $d_{\text{moyen}} = 1,0$ cm, leur distribution est uniforme et leur masse volumique est de 2500 kg/m³. Les grains sont placés dans une boîte parallélépipédique rectangle (15 d_{moyen} de profondeur, 20 d_{moyen} de longueur et 30 d_{moyen} de hauteur).

Le cisaillement d'un milieu granulaire est généralement étudié pour différents niveaux de confinement. Dans ce chapitre nous avons choisi les pressions normales suivantes : 50, 100 et 200 kPa. Si la pression du béton contre le coffrage est considérée hydrostatique, les valeurs choisies (50, 100 et 200 kPa) sont respectivement du même ordre de grandeur que la poussée du béton sur un coffrage de hauteur de 2, 4 et 8 m ($P_{\text{hydro}} = 25 \cdot H$). De plus, pour une pression normale inférieure à 50 kPa, la préparation du système simulé est longue pour obtenir un système homogène. Et lorsque la pression normale dépasse 200 kPa, le recouvrement moyen entre deux grains pour un module de Young de 10 E+8 Pa devient supérieur à 3% du diamètre moyen de grains. Pour ces différentes raisons nous avons limité notre étude aux trois valeurs de pression normale suivantes : 50, 100 et 200 kPa.

De même, nous allons voir dans cette étude que l'état de cisaillement dépend étroitement de la rugosité de la paroi. Pour cette raison, nous avons choisi des conditions pour lesquelles le nombre inertiel est faible (inférieur à 1,0 E-2 pour des vitesses de cisaillement égales à 10 et 100 d_{moyen}/s). Normalement, dans ces conditions, le profil de vitesse devrait être linéaire. En ce qui concerne la rugosité de la paroi, contrairement aux autres études réalisées où la rugosité est formée par des grains de même taille que le diamètre moyen des grains constituant le milieu, nous avons fait varier la concentration et le diamètre des grains collés sur les parois rugueuses. Avec ce système, nous avons étudié l'influence des conditions à l'interface (rugosité, P et V_0) sur l'état de cisaillement du milieu et sur les autres grandeurs mesurables (contrainte tangentielle, compacité,...). Le **Tableau IV-2** résume les conditions de simulations utilisées.

Dimensions	N_g	Polydispersité	V_0	P	Rugosité de la paroi
[x ; y ; z d_{moyen}]		$\pm 10\%$	[d_{moyen} /sec]	[kPa]	dp/d_{moyen}
[15 ; 20 ; 30 d_{moyen}]	10000	$d_{moyen} = 1,0$ cm	10 - 100	50-100-200	Aléatoire $dp : 0,5 \rightarrow 2$

Tableau IV-2 – Conditions de simulations.

IV.4 Reproductibilité et étude sur le comportement global

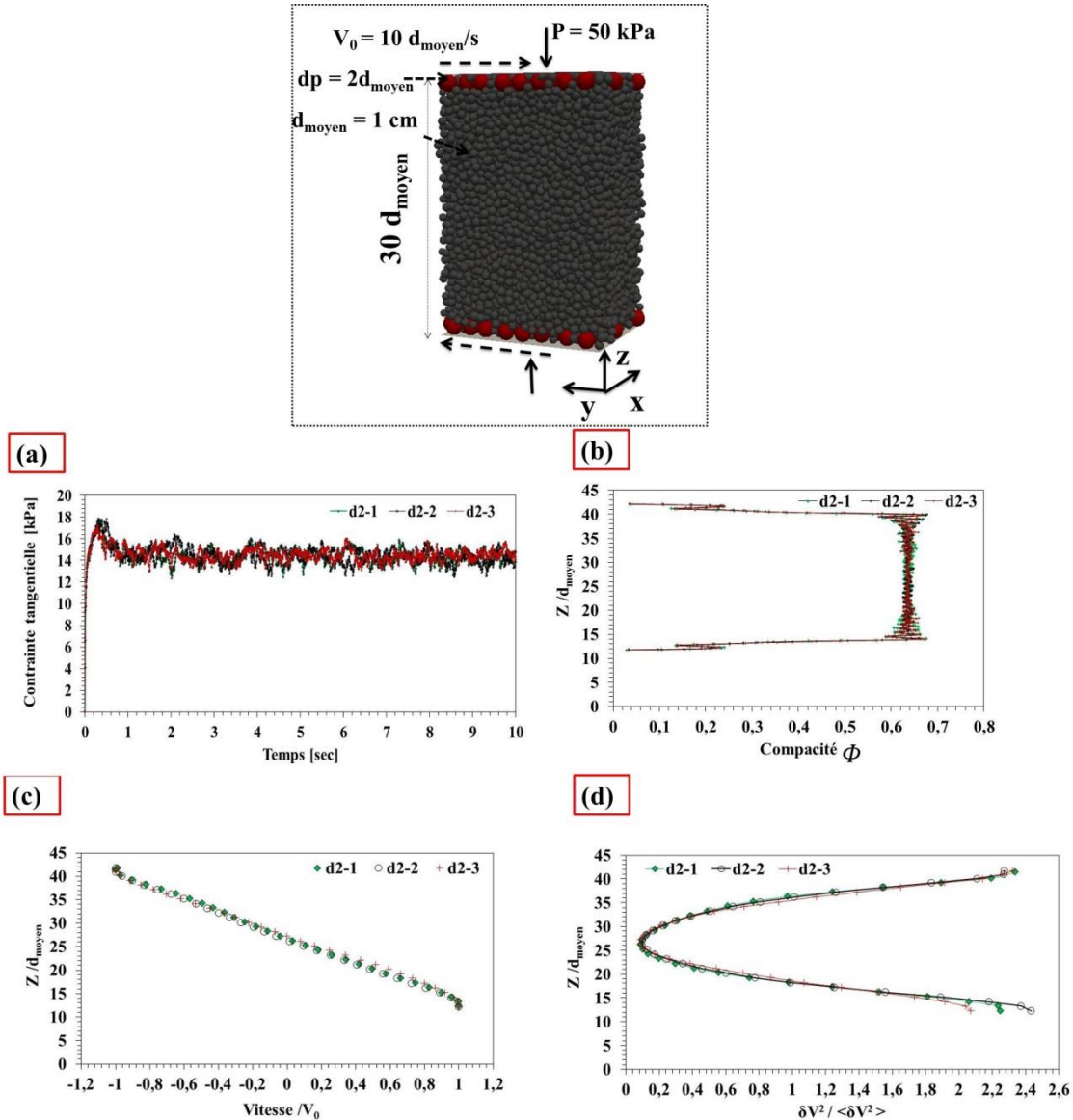


Figure IV-10 – Etude de la reproductibilité (rugosité $dp = 2d_{moyen}$) : (a) Evolution de la contrainte tangentielle ; (b) Profil de compacité ; (c) Profil de vitesse et (d) Fluctuations de vitesses.

L'étude de la reproductibilité consiste à faire varier l'état initial du milieu granulaire, c'est-à-dire les positions initiales des grains lors de leur génération entre deux parois rugueuses. L'étude de la reproductibilité permet également de montrer si l'état stationnaire dépend de l'état initial. La pression normale P est de 50 kPa, la vitesse de déplacement V_0 est de 10 d_{moyen}/s et la rugosité de la paroi est du premier type (aléatoire). La rugosité est formée de grains de diamètre $d_p = 2 d_{\text{moyen}}$. La **Figure IV-10-a** présente l'évolution de la contrainte tangentielle pour trois états initiaux différents notés d2-1, d2-2 et d2-3.

Pour chaque état initial, la valeur maximale correspondant au pic dans le régime transitoire, la valeur moyenne et les fluctuations (rapport entre l'écart type et la moyenne des valeurs de la contrainte tangentielle) dans le régime stationnaire sont présentées dans le **Tableau IV-3**. La comparaison entre les trois états initiaux montre que les différentes valeurs observées sont reproductibles, ce qui signifie que la contrainte tangentielle ne dépend pas de l'état initial.

Etat initial	Contrainte tangentielle maximale (pic) [kPa]	Contrainte tangentielle moyenne [kPa]	Fluctuations (phase stationnaire) [%]
d2-1	17,9	14,3	4,46
d2-2	17,8	14,3	4,65
d2-3	17,2	14,4	3,44

Tableau IV-3 – Contraintes tangentielles maximale et moyenne et fluctuations de la contrainte tangentielle dans le régime stationnaire pour les trois états initiaux étudiés.

La **Figure IV-10-b** présente le profil de compacité pour les trois états initiaux : d2-1, d2-2 et d2-3. Sur le profil de compacité, deux effets de paroi sont identifiés. Le premier effet correspond à la pénétration des grains du milieu dans les creux formés par les grains collés sur le plan. Cet effet se traduit par un pic sur le profil de compacité de l'ordre de 0,2. Cette valeur correspond donc à la fraction volumique des grains piégés entre les aspérités de la rugosité. Le deuxième effet de paroi correspond à l'arrangement des grains près de la paroi. En effet, les grains collés sur le plan de la paroi rugueuse imposent un arrangement aux grains près de la paroi sur une épaisseur d'environ cinq fois le diamètre moyen de grains. Toutefois, les fluctuations de compacité dans les cinq premières couches sont légères parce que les grains sont collés aléatoirement sur le plan sans un arrangement particulier. Plus loin de la paroi, dans la région centrale, la compacité se stabilise autour d'une valeur moyenne $\langle \Phi \rangle = 0,635$. La compacité moyenne et les fluctuations de la compacité dans la région centrale par rapport à celles près de la paroi pour les trois états initiaux sont présentées dans le **Tableau IV-4**. Les fluctuations de la compacité présentées dans le **Tableau IV-4** correspondent au rapport entre l'écart type de la compacité dans la région centrale et l'écart type de la compacité dans la région proche de la paroi. La comparaison entre les trois états initiaux montre que, quel que soit l'état initial, la compacité $\langle \Phi \rangle$ est d'environ 0,635 et les fluctuations près de la paroi sont trois fois plus importantes que celles dans la région centrale.

Configuration	Compacité moyenne $\langle \Phi \rangle$	Fluctuations dans la région centrale/ fluctuations près de la paroi [%]
d2-1	0,636	32
d2-2	0,637	25
d2-3	0,636	29

Tableau IV-4 – Compacité moyenne et rapport entre les fluctuations de compacité dans la zone près de la paroi et la zone centrale de la cellule pour les trois états initiaux étudiés (rugosité $d_p = 2d_{\text{moyen}}$).

La **Figure IV-10-c** présente le profil de vitesse pour les systèmes d2-1, d2-2 et d2-3. En abscisse, les vitesses moyennes de grains sont normalisées par la vitesse de déplacement des parois rugueuses (V_0). Nous remarquons que pour les trois états initiaux, le milieu granulaire est uniformément cisailé. De même, dans la première couche près de la paroi, les grains piégés dans les aspérités se déplacent à la même vitesse que celle de la paroi. Le profil de vitesse est donc reproductible.

La **Figure IV-10-d** présente les fluctuations de vitesses δV^2 pour les trois états initiaux d2-1, d2-2 et d2-3. En abscisse, les fluctuations de vitesse sont normalisées par leur moyenne $\langle \delta V^2 \rangle$. Pour les trois états initiaux, le milieu est plus agité près de la paroi par rapport au centre. En d'autres termes, lorsqu'on s'éloigne de la paroi la dispersion de vitesses suivant la direction de cisaillement diminue. Une légère variation entre les trois courbes est observée près de la paroi inférieure, mais globalement les trois courbes se superposent. Nous concluons que la simulation numérique est reproductible.

De façon similaire, trois états initiaux notés d0,5-1, d0,5-2 et d0,5-3 ont été aussi étudiés mais cette fois ci pour une rugosité de paroi formée par des grains de diamètre égal à la moitié du diamètre moyen du milieu ($d_p = 0,5 d_{\text{moyen}}$). Cette rugosité est notée d0,5. Les autres paramètres sont les mêmes que ceux utilisés pour l'étude de la reproductibilité pour d_p égale à $2d_{\text{moyen}}$ (d2).

La **Figure IV-11-c** présente les profils de vitesse pour les états initiaux d0,5-1, d0,5-2 et d0,5-3. Le profil de vitesse obtenu est en forme de L. Une bande de cisaillement d'épaisseur d'environ trois d_{moyen} se forme près d'une des deux parois et le reste du milieu se déplace avec un mouvement collectif (sous forme de bloc). Dans la zone bloquée, les fluctuations de vitesses sont naturellement plus petites, et même quasi nulles [**Figure IV-11-d**]. La comparaison entre les trois états initiaux de la **Figure IV-11-c** montre que la localisation de la bande de cisaillement est non reproductible (elle se forme indifféremment près de la paroi supérieure ou de la paroi inférieure) mais reproductible du point de vue des grandeurs et des phénomènes étudiés (forme en L). La comparaison avec les résultats précédents (rugosité d2), où le milieu était uniformément cisailé montre qu'une rugosité d0,5 ($d_p = 0,5 d_{\text{moyen}}$), n'est pas suffisante pour cisailier uniformément le milieu. En d'autres termes, les grains du milieu ne s'accrochent pas dans la profondeur des creux formés par les grains de la paroi.

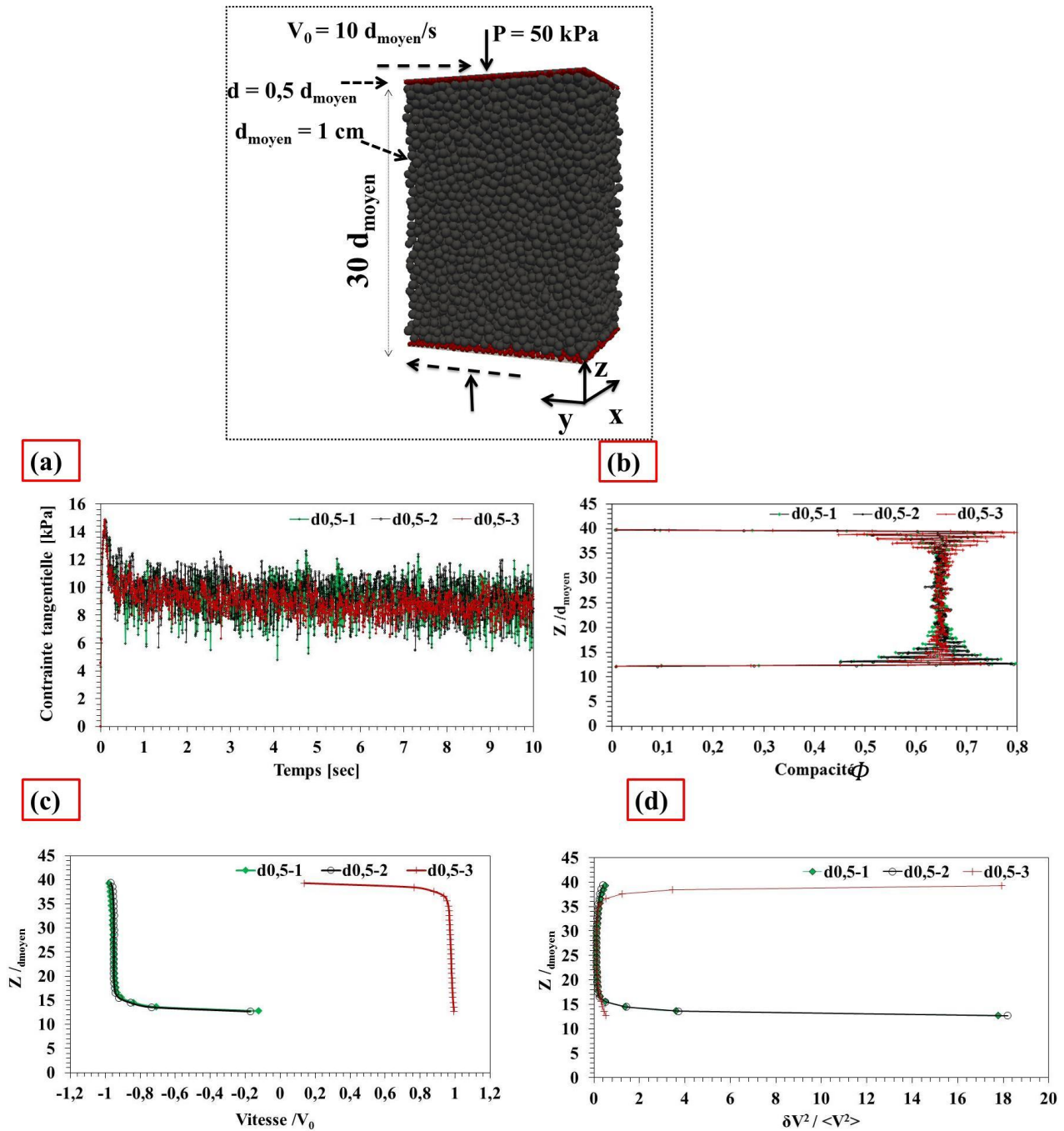


Figure IV-11 – Etude de la reproductibilité (rugosité $d_p = 0,5 d_{moyen}$) : (a) Evolution de la contrainte tangentielle ; (b) Profil de compacité ; (c) Profil de vitesse et (d) Fluctuations de vitesses.

La **Figure IV-11-b** présente le profil de compacité pour les trois états initiaux d0,5-1, d0,5-2 et d0,5-3. Le premier pic observé sur un profil de compacité pour une rugosité d_2 et qui correspondait à la fraction volumique des grains piégés entre les grains collés sur le plan n'est

pas observé sur le profil de compacité pour une rugosité $d_{0,5}$. Ce qui signifie que pour une rugosité $d_{0,5}$, la profondeur des creux formés des grains de la paroi est faible pour que les grains du milieu puissent venir s'y loger. La compacité moyenne et les fluctuations de la compacité dans la région centrale par rapport à celles près de chaque paroi pour une rugosité $d_{0,5}$ sont présentées dans le **Tableau IV-5**. A partir des valeurs présentées dans le **Tableau IV-5**, nous pouvons déduire que la compacité moyenne ne dépend pas de l'état initial du système.

Etat initial	Compacité moyenne $\langle \Phi \rangle$	Fluctuations dans la région centrale/ fluctuations près de la paroi [%]
d0,5-1	0,648	14
d0,5-2	0,648	14
d0,5-3	0,649	12

Tableau IV-5 – Compacité moyenne et rapport entre les fluctuations de compacité dans la zone près de la paroi et la zone centrale de la cellule pour les trois états initiaux étudiés (rugosité $d_p = 0,5d_{moyen}$).

La comparaison entre les fluctuations de la compacité près de la paroi pour une rugosité $d_{0,5}$ et une rugosité d_2 [**Figure IV-10-b** et **Figure IV-11-b**] , montre que les fluctuations de la compacité sont plus importantes pour une rugosité faible. Ces fluctuations sont respectivement d'environ 7 et 3 fois plus élevées que les fluctuations dans la région centrale pour une rugosité de diamètre égale à $0,5 d_{moyen}$ et $2 d_{moyen}$. Ce qui signifie que les grains près de la paroi ont un meilleur arrangement pour une rugosité de $d_{0,5}$ que pour une rugosité de d_2 . Ce résultat est attendu. En effet, lorsqu'on réduit le diamètre d_p , la paroi rugueuse devient plus proche d'une surface plane qui favorise la structuration des grains. En d'autres termes les grains s'arrangent mieux sur une surface plane que sur une surface rugueuse et plus les couches sont organisées, plus que les fluctuations sur le profil de compacité deviennent élevées.

De plus, la comparaison entre le **Tableau IV-4** et le **Tableau IV-5** montre que la compacité moyenne est plus élevée (d'environ 0,648) pour une rugosité faible ($d_{0,5}$) que la compacité moyenne pour une rugosité d_2 (d'environ 0,635). En effet, lorsque le système est uniformément cisailé (rugosité d_2), un déplacement relatif entre les couches des grains aura lieu. Ce système devient plus dilatant et donc moins compact. Tandis que, pour une rugosité faible une partie du système est cisailée et l'autre se déplace en bloc. Dans un mouvement collectif, le déplacement relatif entre les grains est nul. Les grains sont dans ce cas dans un état d'empilement, donc plus compacts.

La **Figure IV-11-a** présente l'évolution de la contrainte tangentielle pour les systèmes $d_{0,5-1}$, $d_{0,5-2}$ et $d_{0,5-3}$. Les valeurs maximales correspondant au pic, les valeurs moyennes et les pourcentages de variation de la contrainte tangentielle (rapport entre l'écart type et la moyenne) dans le régime stationnaire sont présentés dans le **Tableau IV-6**. La comparaison entre les trois états initiaux montre que la contrainte tangentielle ne dépend pas de l'état initial.

Etat initial	Contrainte tangentielle maximale (pic) [kPa]	Contrainte tangentielle moyenne [kPa]	Fluctuations [%]
d0,5-1	13,9	9,1	14,0
d0,5-2	14,9	9,3	13,1
d0,5-3	14,8	8,7	8,92

Tableau IV-6 – Contraintes tangentielles maximale et moyenne et les fluctuations de la contrainte tangentielle dans le régime stationnaire pour les trois états initiaux étudiés.

Par ailleurs, nous remarquons que les contraintes tangentielles maximales et moyennes sont plus faibles par comparaison avec celles obtenues pour une rugosité plus importante (d_p deux fois plus grandes que d_{moyen}). Une étude plus approfondie de l'influence de la rugosité sur le frottement et l'état de cisaillement sera présentée par la suite. Pour les deux rugosités choisies, nous discutons ici seulement la différence au niveau des fluctuations de la contrainte tangentielle dans le régime transitoire. Pour les mêmes conditions de simulations, les fluctuations de la contrainte tangentielle dans le régime transitoire deviennent plus importantes lorsqu'on diminue la rugosité. Pour un diamètre d_p égal à la moitié de d_{moyen} , les fluctuations sont environ trois fois plus importantes que celles pour une rugosité formée de grains de diamètre d_p égal à $2d_{moyen}$.

Pour étudier un régime bruité, il faut tout d'abord identifier le type de signaux. Les auteurs [159] identifient trois types de signaux (périodiques, aléatoires et étagés) [Figure IV-12]. Dans un régime périodique les signaux ressemblent aux signaux de stick-slip réguliers. Un phénomène stick-slip est décrit par une alternance entre des états statiques et dynamiques du système [160]. Tandis que dans un régime aléatoire, les signaux sont très irréguliers et les fluctuations sont dispersées.

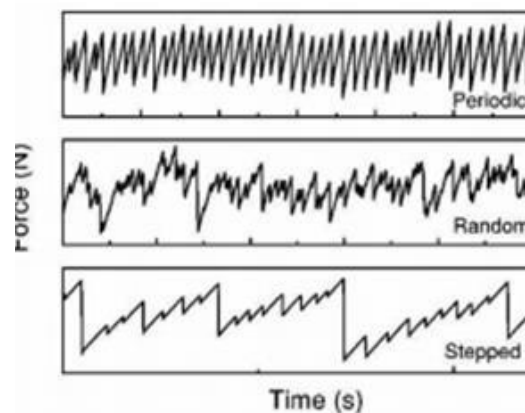


Figure IV-12 – Graphiques de trois types des régimes observés par Albert et al [159].

La Figure IV-13 présente un zoom de la contrainte tangentielle dans le régime stationnaire pour les deux rugosités étudiées. La Figure IV-13 montre que pour les deux rugosités, le régime ressemble à un régime aléatoire. Mais, l'amplitude des fluctuations est plus

élevée pour une rugosité plus faible. Les fluctuations de la force tangentielle pourraient être expliquées par le nombre représentatif des grains cisailés. En effet, lorsque le milieu est entièrement cisailé (dp/d_{moyen} égal à 2), la totalité des grains (N_g égale à 10000) sont cisailés, ce qui constitue un système statistiquement représentatif. Tandis que, pour une rugosité formée de grains de diamètre égal à la moitié de d_{moyen} , le nombre de grains cisailés est dix fois plus faible (1000 grains) par rapport à une rugosité d_2 , ce qui doit naturellement se traduire, d'un point de vue statistique, par des fluctuations plus importantes.

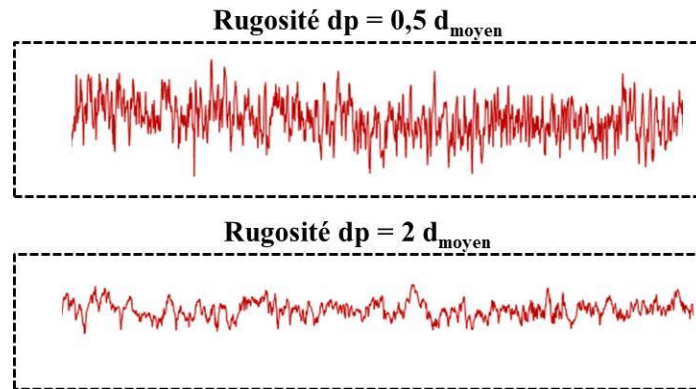


Figure IV-13 – Zoom de la variation de la contrainte tangentielle pour deux rugosités formées respectivement par des grains de diamètre égal à $0,5 d_{\text{moyen}}$ et $2 d_{\text{moyen}}$.

L'étude réalisée sur la reproductibilité de deux systèmes à géométrie à l'interface différente montre que l'état initial n'influe pas sur les informations obtenues dans le régime stationnaire. Ce qui signifie que nos simulations sont reproductibles. La comparaison entre une rugosité de $0,5d_{\text{moyen}}$ et une rugosité de $2d_{\text{moyen}}$ montre que, les fluctuations de la contrainte tangentielle dans le régime transitoire, les fluctuations de vitesses et les oscillations de la compacité près de la paroi sont plus importantes pour une rugosité plus faible.

IV.5 Influence des conditions à l'interface : Rugosité aléatoire et ordonnée

Nous rappelons que les conditions à l'interface milieu granulaire-paroi rugueuse sont la pression normale P , la vitesse V_0 imposée aux parois supérieure et inférieure et la rugosité des parois mobiles. Les grandeurs observables sont la contrainte tangentielle (frottement du milieu contre la paroi rugueuse), le profil de vitesse (suivant la direction de cisaillement), la compacité et la microstructure de l'interface. Nous rappelons également que le système simulé est constitué de 10000 grains légèrement polydispersés (10%) et leur diamètre moyen (d_{moyen}) est égal à 1 cm. Les grains sont répartis dans une boîte de hauteur $H = 30d_{\text{moyen}}$, de longueur $L = 20d_{\text{moyen}}$ et de profondeur $l=15d_{\text{moyen}}$. La paroi rugueuse est modélisée en collant des grains de diamètre dp . Le milieu granulaire est cisailé en déplaçant les parois horizontales avec une vitesse V_0 (10 et 100

d_{moyen}/s). Durant le cisaillement la pression normale est contrôlée. Trois pressions sont étudiées : 50, 100 et 200 kPa. Des conditions aux limites périodiques sont appliquées dans les directions perpendiculaires aux parois horizontales.

Dans la première partie de cette section, la rugosité de la paroi est modélisée par une génération aléatoire avec l'algorithme RSA des grains sur un plan horizontal [Figure IV-2]. L'objectif de cette partie est d'étudier l'influence d'une rugosité non ordonnée et plus proche de la réalité sur le cisaillement du système à l'interface dans la phase stationnaire. Dans la deuxième partie, la rugosité de la paroi est modélisée par des paquets de grains en forme de créneaux [Figure IV-2]. Les dimensions des créneaux et l'espacement séparant deux créneaux successifs sont les mêmes que les rugosités R1, R2 et R3 présentées dans les chapitres 2 et 3. L'objectif de cette seconde partie est d'étudier l'influence de la rugosité utilisée dans l'étude expérimentale sur les grandeurs mesurables mais en conditions périodiques.

IV.5.1 Rugosité aléatoire

Les grains collés sur la paroi sont disposés à une distance égale à leur rayon au-dessus (en-dessous) du plan inférieur (supérieur). En plus du rapport entre d_p et d_{moyen} , nous avons fait varier la concentration (ou nombre de grains) collés sur la paroi.

La rugosité de la paroi est désignée par dn où n est le rapport d_p/d_{moyen} . Par exemple une rugosité de $d0,5$ signifie que d_p/d_{moyen} est égal à 0,5. Six rugosités sont étudiées : $d0,5$; $d0,75$; $d1$; $d1,25$; $d1,5$ et $d2$. Pour chaque rugosité, nous avons fait varier également la concentration des grains désignée par C_p x%. Une concentration C_p 100% correspond au nombre maximal de grains générés par RSA en 2D (compacité de 0,547). A partir de ce nombre maximal, il est possible de déterminer le nombre de grains correspondant à une concentration ou compacité plus faible. Quatre concentrations sont étudiées : 25%, 50%, 75% et 100%. Le **Tableau IV-7** présente pour chaque rugosité le nombre de grains équivalent à chaque concentration.

Nombre de grains / paroi	$d0,5$	$d0,75$	$d1$	$d1,25$	$d1,5$	$d2$
C_p 25%	210	93	53	34	24	14
C_p 50%	419	185	106	67	47	27
C_p 75 %	628	277	159	101	70	41
C_p 100%	837	369	211	134	93	54

Tableau IV-7 – Nombre de grains équivalent à chaque concentration de la rugosité dn .

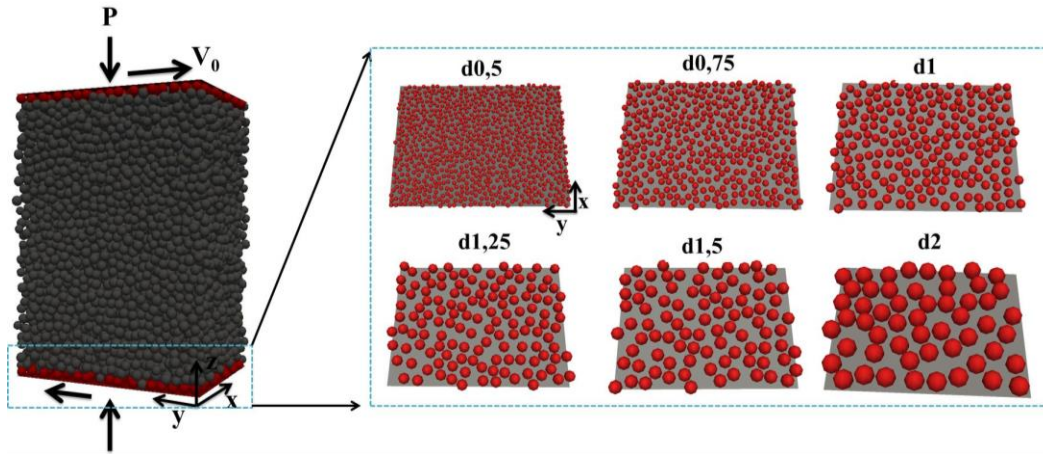


Figure IV-14 – Différentes rugosités étudiées pour une concentration de grains de Cp 100%.

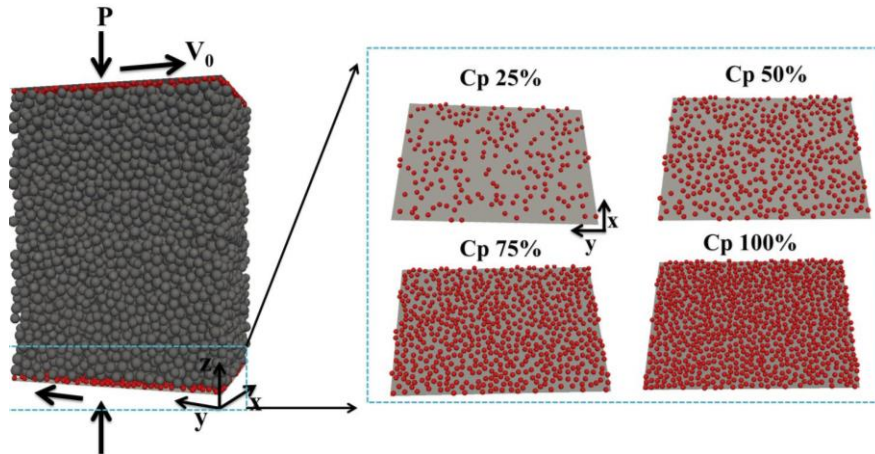


Figure IV-15 – Différentes concentrations pour une rugosité d0,5.

La **Figure IV-14** présente des schémas correspondants aux différents diamètres de rugosité pour une concentration de Cp 100%. La **Figure IV-15** présente des schémas correspondants aux différentes concentrations pour une rugosité d0,5.

Tout d'abord, nous allons étudier l'influence du diamètre des grains de la rugosité pour une concentration $C_p=100\%$ sur la contrainte tangentielle et le profil de vitesse. Ensuite, nous étudions l'influence de la concentration Cp pour les différents diamètres des grains de la rugosité. Nous finissons cette section par une étude sur les rugosités R1, R2 et R3 en conditions périodiques.

IV.5.1.1 Influence du diamètre des grains de la rugosité

La **Figure IV-16** présente la variation de la contrainte tangentielle en fonction de la contrainte normale (P) pour les deux vitesses de cisaillement (V_0) étudiées (10 et 100 d_{moyen}/s).

Chaque graphe correspond à une rugosité d_n donnée et à une concentration des grains de $C_p = 100\%$. Pour les différentes rugosités étudiées, les résultats obtenus montrent que la contrainte tangentielle est proportionnelle à la pression normale. La relation linéaire entre la contrainte tangentielle et la contrainte normale permet d'étudier l'influence de la vitesse et de la rugosité sur le coefficient de frottement macroscopique entre le milieu et la paroi. Nous constatons que la vitesse n'influe pas sur le coefficient de frottement, sauf pour une rugosité de $d_{0,5}$ pour laquelle une légère diminution du coefficient de frottement de 0,02 (soit une baisse d'environ 12%) a été observée. En revanche, le coefficient de frottement augmente avec la rugosité, de 0,14 pour $d_{0,5}$ jusqu'à une valeur limite d'environ 0,27 à partir d'une rugosité de d_1 .

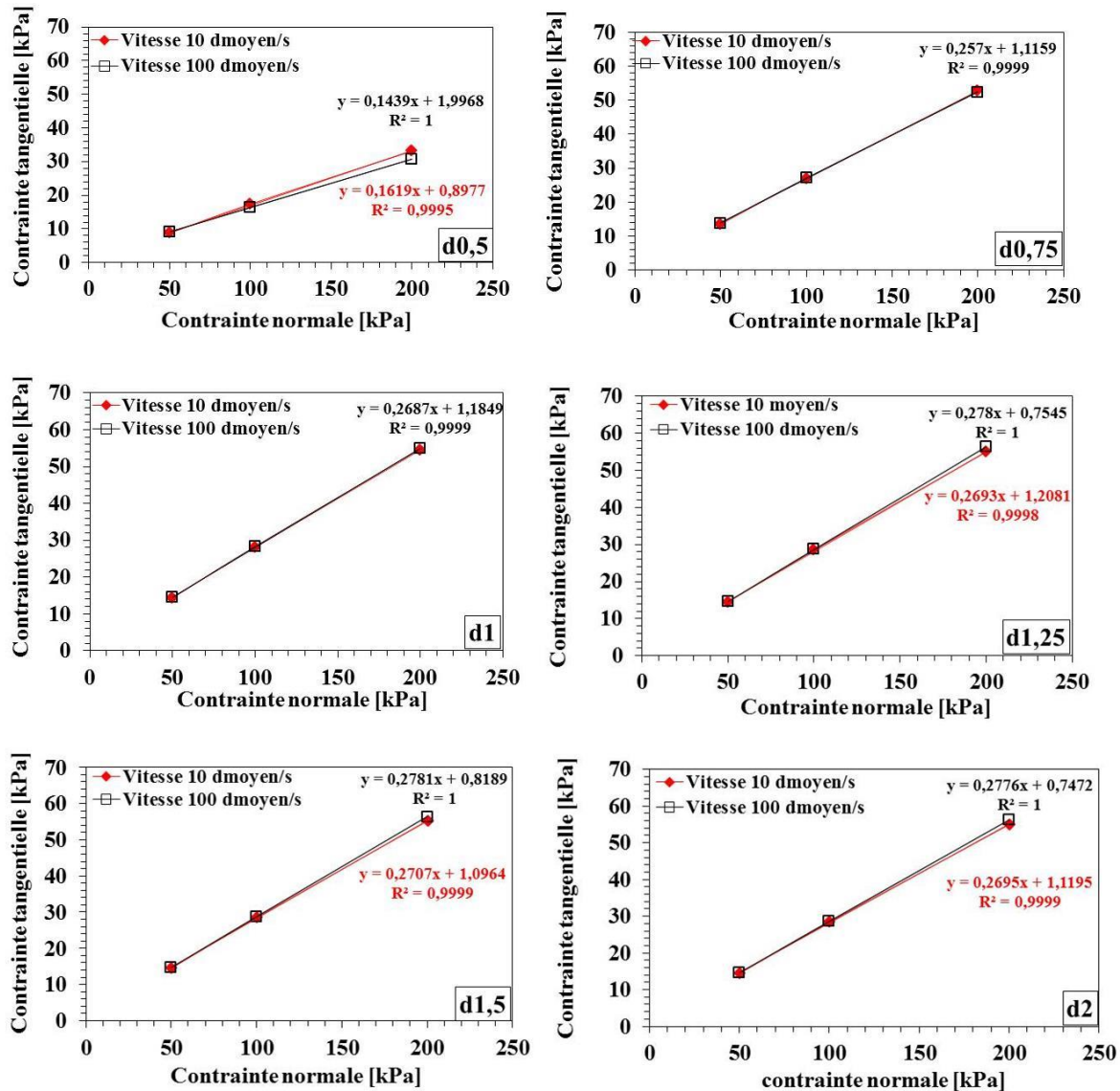


Figure IV-16 – Variation de la contrainte tangentielle en fonction de la contrainte normale pour différentes vitesses de cisaillement et différentes rugosités ($C_p 100\%$).

La **Figure IV-17** présente la variation de la contrainte tangentielle en fonction de la rugosité d_n . La concentration des grains de la paroi est $C_p = 100\%$. La vitesse de cisaillement est de $10 d_{moyen}/s$ [**Figure IV-17-a**] et de $100 d_{moyen}/s$ [**Figure IV-17-b**]. Afin d'étudier l'influence de la vitesse et de la rugosité de la paroi sur l'état de cisaillement du milieu, nous avons ajouté au niveau de chaque point de mesure l'allure du profil de vitesse.

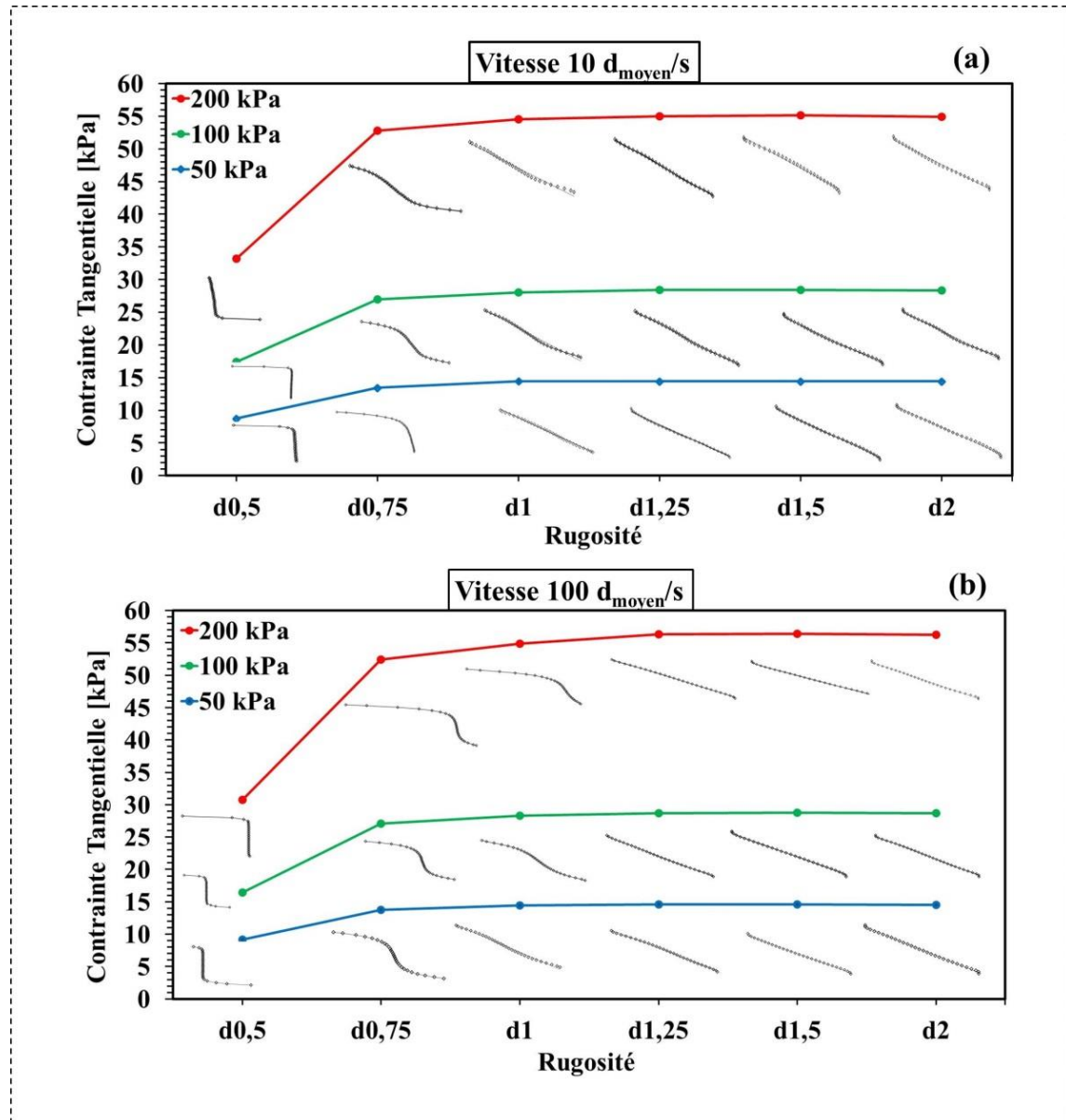


Figure IV-17 – Variation de la contrainte tangentielle en fonction de la rugosité d_n ($C_p = 100\%$) pour des vitesses de cisaillement de $10 d_{moyen}/s$ (a) et $100 d_{moyen}/s$ (b). Les traits correspondent au profil de vitesse.

Pour une rugosité inférieure à d1, la contrainte tangentielle augmente avec la rugosité. A partir d'une rugosité de d1, la contrainte tangentielle devient constante. La variation de la contrainte tangentielle en fonction de la rugosité peut être expliquée par l'allure du profil de vitesse qui traduit le glissement du milieu granulaire sur la paroi rugueuse. En effet pour une rugosité de d0,5, le profil de vitesse est en forme de « L ». Une bande de cisaillement se forme près d'une des deux interfaces. Plus loin de cette bande, le milieu se déplace par un mouvement collectif en « bloc ». Lorsqu'on augmente la rugosité (d0,75), le profil de vitesse prend une forme de « S » puis il passe à une forme linéaire pour une rugosité plus élevée (à partir de d1). Afin d'expliquer la variation de la contrainte tangentielle, la vitesse de glissement relative (V_g) entre le milieu granulaire et la paroi rugueuse a été calculée pour les différentes conditions à l'interface :

$$V_g = 2|V_0| - [V_{\max} - V_{\min}] \quad [\text{Eq. IV-6}]$$

$V_{\max}$ et $V_{\min}$ sont respectivement les vitesses maximale et minimale sur le profil de vitesse. V_0 est la vitesse de déplacement de la paroi.

Le **Tableau IV-8** montre la variation de la vitesse de glissement pour les différentes conditions à l'interface. Nous constatons que lorsque la rugosité de la paroi augmente, le glissement du milieu sur la paroi rugueuse devient plus faible et naturellement la force de frottement du milieu contre la paroi rugueuse devient plus importante. Pour des rugosités inférieures à environ d1, la vitesse de glissement augmente significativement, ce qui traduit la formation d'une bande de cisaillement localisée près de la paroi. Une fois que le milieu est entièrement cisailé, la rugosité n'a plus d'influence sur la contrainte tangentielle parce que la vitesse de glissement relative devient faible (environ 0,01) et il n'y a plus de bande de cisaillement localisée près de l'interface.

V_g	I (Eq. IV-5)	d0,5	d0,75	d1	d1,25	d1,5	d2
P 50 kPa - Vit 10 d_{moyen}/s	1,50 E-3	11,45	1,55	0,05	0,02	0,01	-0,02
P 100 kPa - Vit 10 d_{moyen}/s	1,05 E-3	5,40	2,11	0,06	0,00	0,04	0,02
P 200 kPa - Vit 10 d_{moyen}/s	7,5 E-4	12,09	1,22	0,09	0,04	-0,01	-0,01
P 50 kPa - Vit 100 d_{moyen}/s	1,50 E-2	91,71	24,02	0,13	-0,01	0,04	0,01
P 100 kPa - Vit 100 d_{moyen}/s	1,05 E-2	97,81	27,31	0,26	0,12	0,01	-0,01
P 200 kPa - Vit 100 d_{moyen}/s	7,5 E-3	101,54	3,80	2,08	0,36	-0,02	0,02

Tableau IV-8 – Vitesse de glissement relative dans les différentes conditions à l'interface.

Sur les profils de vitesse présentant une bande de cisaillement (forme en L ou en S), nous avons déterminé l'épaisseur de la bande de cisaillement N_c en comptant le nombre de couches cisailées [Figure IV-18].

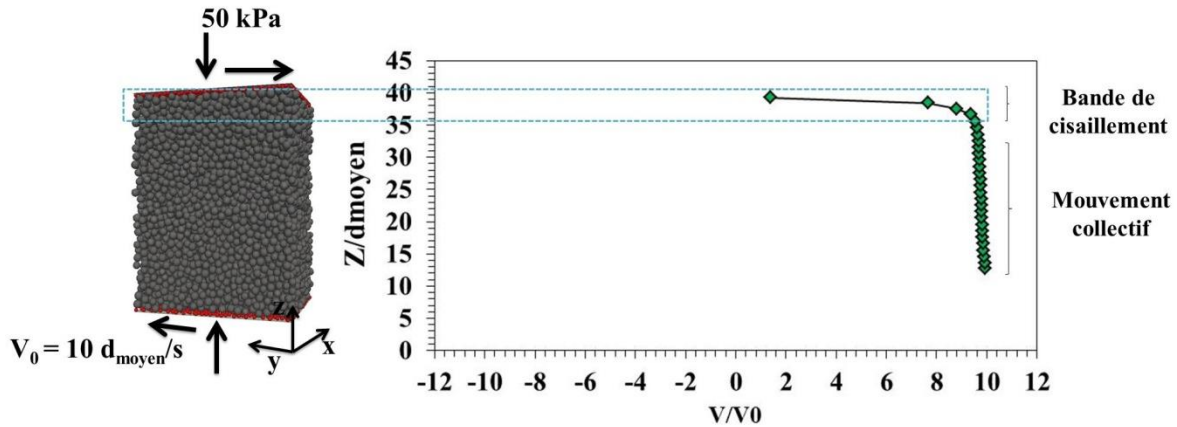


Figure IV-18 – Calcul de l'épaisseur de la bande de cisaillement.

Le **Tableau IV-9** montre que pour les rugosités d0,5 et d0,75, la pression normale et la vitesse de déplacement de la paroi rugueuse n'influent pas autant que la rugosité sur l'épaisseur de la bande de cisaillement. En effet, l'épaisseur de la couche cisailée est plus élevée pour une rugosité d0,75 que pour une rugosité d0,5. Lorsqu'on augmente la rugosité, on cisaille plus le milieu et la force tangentielle augmente. Une fois que le milieu est entièrement cisailé, aucune force supplémentaire n'est nécessaire pour le cisaillement et la contrainte tangentielle reste donc constante.

Nc/d _{moyen}	P = 50 kPa	50 kPa	100 kPa	100 kPa	200 kPa	200 kPa
	V ₀ = 10 d _{moyen} /s	100 d _{moyen} /s	10 d _{moyen} /s	100 d _{moyen} /s	10 d _{moyen} /s	100 d _{moyen} /s
d0,5	4	5	4	4	3	3
d0,75	8	7	6	7	4	7
d1	0	0	0	0	0	7

Tableau IV-9 - Epaisseur de la bande de cisaillement Nc (Nombre de couches d'épaisseur d_{moyen}) pour différentes rugosités dn (d0,5, d0,75 et d1), pressions normales P (50, 100 et 200 kPa) et vitesses de déplacement de la paroi rugueuse V₀ (10 et 100 d_{moyen}/s).

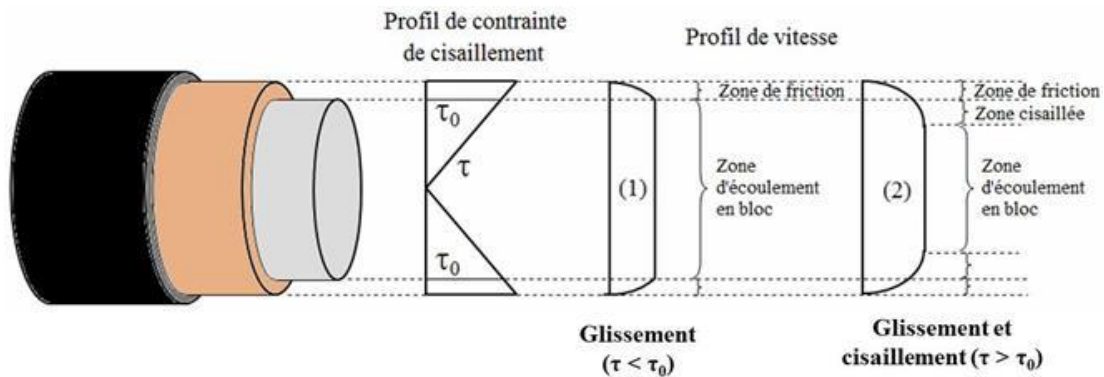


Figure IV-19 – Ecoulement du béton dans un tuyau [4, 3].

Dans le chapitre 1, les résultats de Kaplan [4] concernant le cisaillement du béton dans les tuyaux de pompe ont été rappelés. Dans la partie centrale du tuyau, le béton se déplace en bloc. Près de l'interface, il est cisailé dans une zone peu épaisse correspondant à la couche limite. Le profil de vitesse est donc formé de deux zones : une zone cisailée et une zone d'écoulement en bloc. L'analogie entre l'écoulement du béton dans un tuyau et le cisaillement d'un milieu granulaire sur une paroi rugueuse suggère que la couche cisailée « couche limite » se forme à l'interface pour une rugosité formée de grains de diamètre inférieur au diamètre moyen des grains constituant le milieu, c'est-à-dire, pour une profondeur des aspérités inférieure à la taille moyenne des grains de ciment. De plus, l'épaisseur de cette couche devient plus élevée lorsque la rugosité de la paroi augmente. Il est important toutefois de noter que les résultats sont obtenus sur un milieu granulaire sec, la présence du fluide interstitiel (eau dans la couche limite) a sans doute une influence sur les grandeurs mesurées.

L'étude de l'influence de la rugosité sur les grandeurs mesurables a montré que :

- Pour une rugosité donnée, la contrainte tangentielle entre le milieu granulaire et la paroi est indépendante de la vitesse de déplacement de la paroi.
- La contrainte tangentielle est proportionnelle à la pression normale.
- La vitesse de déplacement de la paroi et la pression normale n'ont pas une influence notable sur l'état de cisaillement du milieu (profil de vitesse), sauf pour la rugosité d_1 à pression et vitesse élevées (200 kPa et 100 cm/s).
- Il existe une rugosité critique (comprise entre d_1 et $d_{1,25}$) à partir de laquelle la contrainte tangentielle devient indépendante de la rugosité de la paroi et le milieu reste entièrement cisailé.
- Pour une rugosité inférieure à la rugosité critique, la contrainte tangentielle augmente avec l'augmentation de la rugosité. De même, une bande de cisaillement se forme près de l'interface.
- La rugosité affecte la vitesse de glissement relative entre le milieu et la paroi. La variation de la contrainte tangentielle est strictement liée à la vitesse de glissement relative entre le milieu et la paroi et à l'épaisseur de la couche cisailée.
- L'analogie entre l'écoulement du béton dans le tuyau et la formation de la bande de cisaillement par cisaillement d'un milieu granulaire montre que la couche limite pourrait être caractérisée (sa présence, son épaisseur) à partir de la bande cisailée formée pour une rugosité de diamètre d_p inférieur à d_{moyen} .

IV.5.1.2 Influence de la concentration des grains de la paroi

La **Figure IV-20** présente la variation de la contrainte tangentielle en fonction de la concentration des grains de la paroi pour différentes rugosités d_n . La vitesse de cisaillement est de $10 d_{\text{moyen}}/s$. Pour une rugosité supérieure ou égale à 0,75, la concentration des grains collés sur la paroi n'a pas une influence notable sur la contrainte tangentielle.

La **Figure IV-20-a** montre que pour une rugosité d0,5, lorsque la concentration des grains collés sur la paroi diminue, la contrainte tangentielle augmente. De plus, avec la diminution de la contrainte tangentielle, le profil de vitesse passe d'un profil linéaire à un profil en forme de S puis en un profil en forme de L.

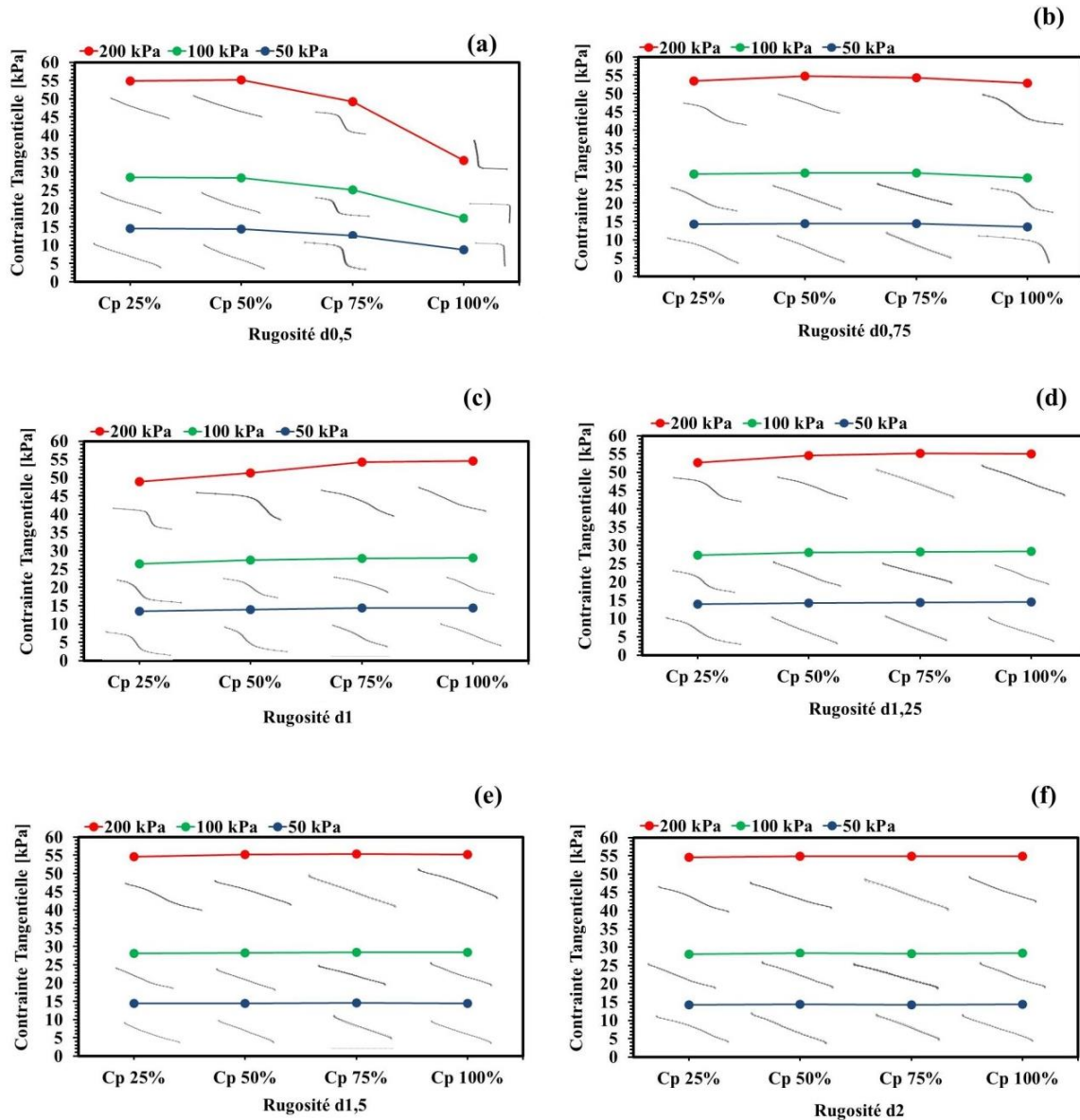


Figure IV-20 – Variation de la contrainte tangentielle en fonction de la concentration des grains (Cp) pour différentes rugosités dn (vitesse de cisaillement de 10 d_{moyen}/s).

Dans le cas d'une rugosité d0,5, la diminution de la concentration des grains de la rugosité se traduit probablement par une augmentation de la profondeur de pénétration des grains du milieu granulaire dans la rugosité. En effet, en réduisant la concentration, les grains de la

rugosité s'espacent les uns des autres ce qui permet aux grains du milieu de s'insérer dans des creux plus profonds. Pour vérifier cette hypothèse, nous présentons dans le **Tableau IV-10**, au début et à la fin de la simulation, les distances de pénétration maximale des grains du milieu dans les creux formés par les grains de la paroi. Ce calcul a été fait pour une rugosité $d_{0,5}$ et pour différentes concentrations des grains sur la paroi.

	t_0	$t_{10 \text{ sec}}$
	Pénétration max/ d_{moyen}	Pénétration max / d_{moyen}
Cp 25%	0,559	0,554
Cp 50%	0,544	0,555
Cp 75%	0,509	0,555
Cp 100%	0,282	0,210

Tableau IV-10 – Distances maximale de pénétration des grains dans les creux formés par des grains de la paroi ($d_{0,5}$).

Le **Tableau IV-10** montre très clairement une augmentation importante de la profondeur de pénétration des grains du milieu dans la rugosité lorsque la concentration passe de 100 à 75%. Une légère augmentation est également observée pour une réduction supplémentaire de la concentration à 50%. En dessous de cette concentration, la pénétration des grains du milieu dans la rugosité reste constante car les grains sont au contact du plan. Par ailleurs, la profondeur de pénétration varie peu avec l'application du cisaillement puisque les valeurs obtenues en début et en fin de simulation sont proches. Ainsi, pour une concentration $C_p = 100\%$, les grains du milieu ($d_{\text{moyen}} = 1 \text{ cm}$) en contact avec la paroi rugueuse franchissent une profondeur maximale (0,282 d_{moyen}) nettement inférieure au diamètre des grains de la rugosité (0,5 d_{moyen}). La profondeur des creux de la rugosité semble dans ce cas insuffisante pour que le milieu soit complètement cisailé.

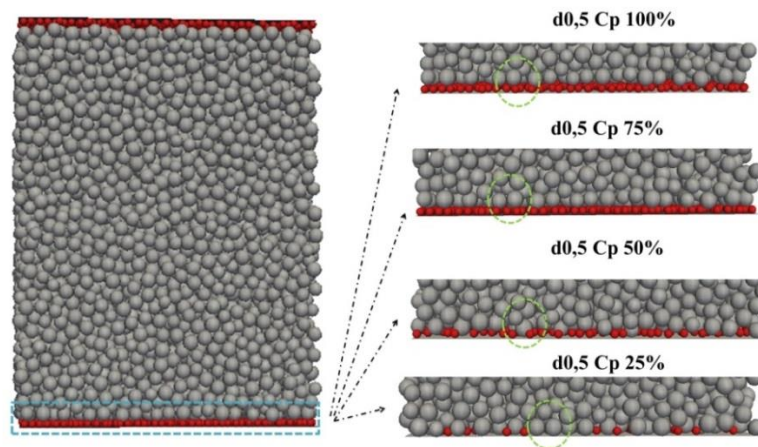


Figure IV-21 – Disposition des grains sur une surface rugueuse pour différentes concentrations.

Lorsque la concentration devient plus faible, la profondeur de pénétration devient plus élevée (entre $0,509 d_{\text{moyen}}$ et $0,559 d_{\text{moyen}}$). Pour se déplacer, les grains du milieu doivent donc dépasser une profondeur égale au diamètre des grains de la rugosité ($0,5 d_{\text{moyen}}$). Cette profondeur semble suffisante pour que le milieu devienne entièrement cisailé. La **Figure IV-21** montre la disposition des grains sur une surface de rugosité $d_{0,5}$ pour les quatre concentrations étudiées.

Par analogie avec l'écoulement du béton, il semblerait que le paramètre prépondérant dans la formation de la couche limite soit la profondeur de pénétration des grains dans les aspérités.

IV.5.2 Rugosité en crêneaux

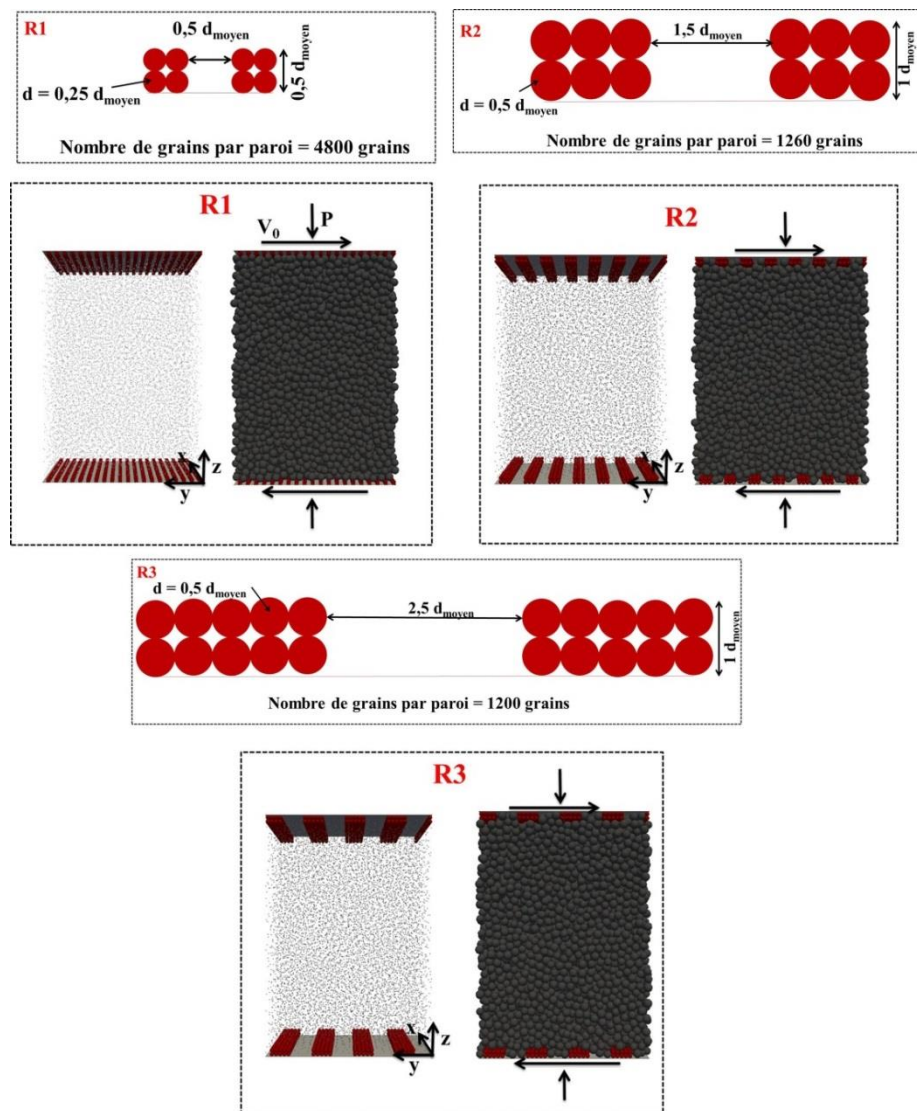


Figure IV-22 – Schémas des systèmes simulés. Rugosités en crêneaux : R1, R2 et R3.

La **Figure IV-22** présente les schémas des systèmes simulés. Les paramètres du système sont les mêmes que ceux utilisés pour l'étude sur une rugosité aléatoire. Au-dessus de chaque schéma de la **Figure IV-22**, une description de la rugosité de la paroi est détaillée en fonction de d_{moyen} ($d_{moyen} = 1,0$ cm). La rugosité R1 est la rugosité la plus faible et la rugosité R3 est la plus élevée.

La contrainte tangentielle présentée dans la **Figure IV-23** est le rapport entre la moyenne des forces de frottement entre le milieu et les deux parois rugueuses et la surface du plan inférieur ou supérieur ($15d_{moyen} \times 20d_{moyen}$). Pour les trois rugosités (R1, R2 et R3), la contrainte tangentielle augmente avec l'augmentation de la pression normale (P), ce qui est attendu, puisque la contrainte tangentielle entre deux corps secs en mouvement l'un par rapport à l'autre est proportionnelle à la pression normale appliquée. De plus, nous remarquons que la contrainte tangentielle diminue légèrement avec l'augmentation de la vitesse de déplacement de la paroi rugueuse V_0 . En outre, pour une vitesse V_0 de 10 d_{moyen}/s , la contrainte tangentielle diminue avec l'augmentation de la rugosité, tandis que pour une vitesse V_0 de 100 d_{moyen}/s et une pression normale inférieure ou égale à 100 kPa, la rugosité n'affecte pas la contrainte tangentielle.

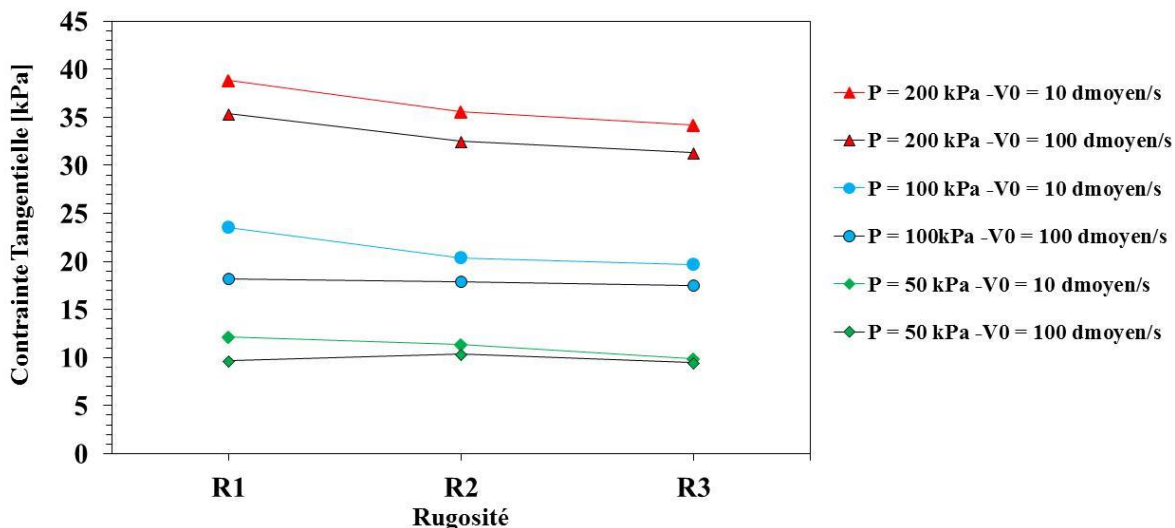


Figure IV-23 – Variation de la contrainte tangentielle en fonction des rugosités : R1, R2 et R3 pour différents niveaux de confinement et vitesses de cisaillement.

Pour mieux comprendre l'influence des conditions à l'interface sur la contrainte tangentielle, une étude sur la microstructure de l'interface milieu granulaire – paroi rugueuse a été réalisée. Près de la paroi, les grains s'organisent en forme de lits. L'arrangement des grains se traduit sur le profil de vitesse par une bande de cisaillement. Sur tous les profils de vitesses, une bande de cisaillement a été identifiée et plus loin de cette bande, le milieu se déplace en mouvement collectif « bloc » [**Figure IV-24**]. Les autres profils de vitesses sont présentés en Annexe 3.

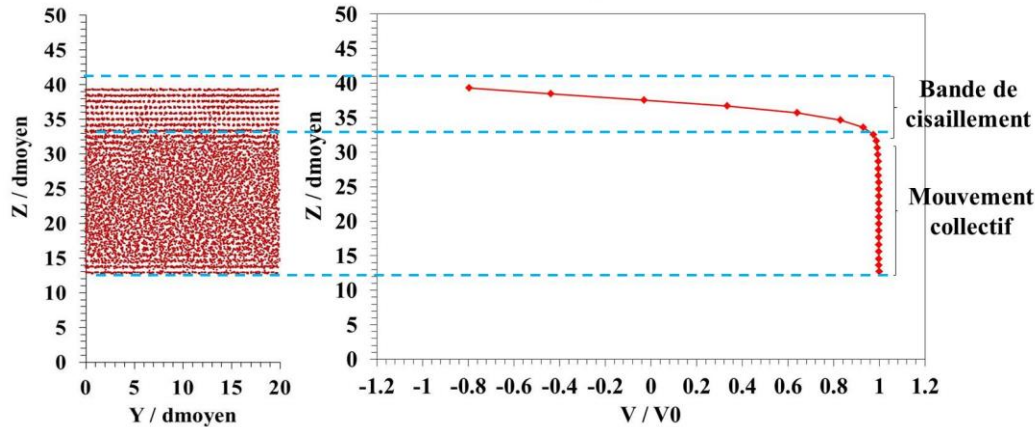


Figure IV-24 – Formation d'une bande de cisaillement et d'un bloc pour R1, $P = 50$ kPa et $V_0 = 100$ d_{moyen}/s. Figure de gauche : grains représentés par leurs centres après 10 secondes de cisaillement ; Figure de droite : profil de vitesse.

Le **Tableau IV-11** montre que lorsque la vitesse augmente (100 d_{moyen}/s), l'épaisseur N_c devient plus élevée. Tandis que, l'augmentation de la pression P semble moins affecter cette épaisseur. De plus, dans le cas R1, l'épaisseur de la bande de cisaillement est plus élevée que celle dans les cas R2 et R3 ce qui pourrait expliquer l'augmentation de la contrainte tangentielle pour R1.

Nc/d _{moyen}	P = 50 kPa	50 kPa	100 kPa	100 kPa	200 kPa	200 kPa
	V ₀ = 10 d _{moyen} /s	100 d _{moyen} /s	10 d _{moyen} /s	100 d _{moyen} /s	10 d _{moyen} /s	100 d _{moyen} /s
R1	5	7	5	6	4	6
R2	4	6	3	4	2	4
R3	3	5	3	4	2	3

Tableau IV-11 – Epaisseur de la bande de cisaillement N_c (Nombre de couches d'épaisseur d_{moyen}) pour différentes rugosités, pressions normales P et vitesses de déplacement de la paroi rugueuse V_0 .

Contrairement à la rugosité aléatoire, avec R1, R2 et R3 une cristallisation importante est observée dans la bande de cisaillement de tous les systèmes. Une polydispersité du milieu de 10% ne semble pas suffisante pour empêcher la cristallisation ce qui rend très difficile l'interprétation des résultats. De même, la comparaison avec les résultats de la rugosité aléatoire est difficile parce que la structure cristalline dans le cas d'une rugosité en créneaux a sans doute un effet non négligeable sur les résultats.

IV.6 Etude sur l'histoire du confinement

Après l'étude de l'influence des conditions à l'interface sur les informations données par le système cisailé dans la phase stationnaire, nous avons voulu étudier l'influence de la méthode

de préparation sur les grandeurs mesurables dans la phase stationnaire. En effet, la méthode de confinement utilisée pourrait modifier l'arrangement des grains du milieu granulaire le long des deux parois rugueuses et ainsi changer le comportement à l'interface. Pour cette raison, une étude de l'influence de l'histoire de confinement sur l'état de cisaillement du milieu a été réalisée. Deux méthodes ont été étudiées [Figure IV-25] :

- La première méthode consiste à appliquer la pression désirée sur un empilement initialement lâche (après la phase de génération de grains). Le contrôle de la vitesse de déplacement des parois rugueuses est présenté dans la **Figure IV-4**.
- La deuxième méthode consiste à appliquer tout d'abord la pression maximale désirée sur un empilement lâche. Ensuite, l'application d'une pression normale plus faible se fait en partant du système confiné à pression maximale. Le contrôle de la vitesse de déplacement des parois rugueuses durant l'application de la pression maximale ou durant la diminution de la pression normale se fait de la même manière que ce qui a été présenté dans la **Figure IV-4**.

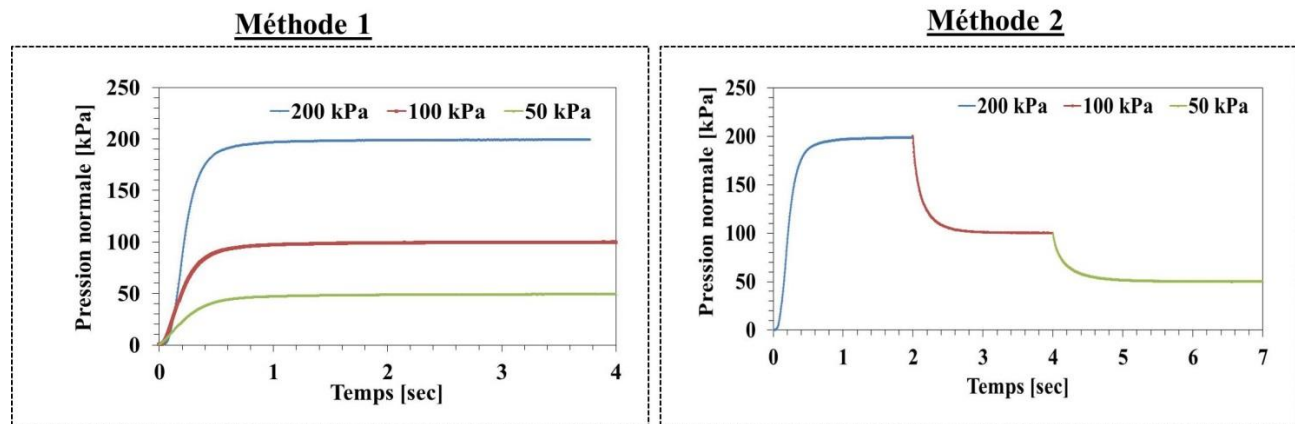


Figure IV-25 – Deux méthodes de confinement étudiées.

Le **Tableau IV-12** présente les paramètres du système étudié. La pression normale appliquée pendant le cisaillement est de 50 kPa. Mais pour la deuxième méthode, pour atteindre une pression de 50 kPa, le milieu est tout d'abord confiné à 200 kPa, ensuite à 100 kPa pour arriver enfin à une pression de 50 kPa. Le milieu granulaire est légèrement polydisperse (10%) de diamètre moyen 1 cm.

Dimensions [x ; y ; z d _{moyen}]	Rugosité	P [kPa]	V ₀ [d _{moyen} /s]	Ng
[15 ; 20 ; 30]	premier type (d2), Cp 100%	50	10	10000

Tableau IV-12 - Paramètres utilisés pour l'étude sur la méthode de confinement.

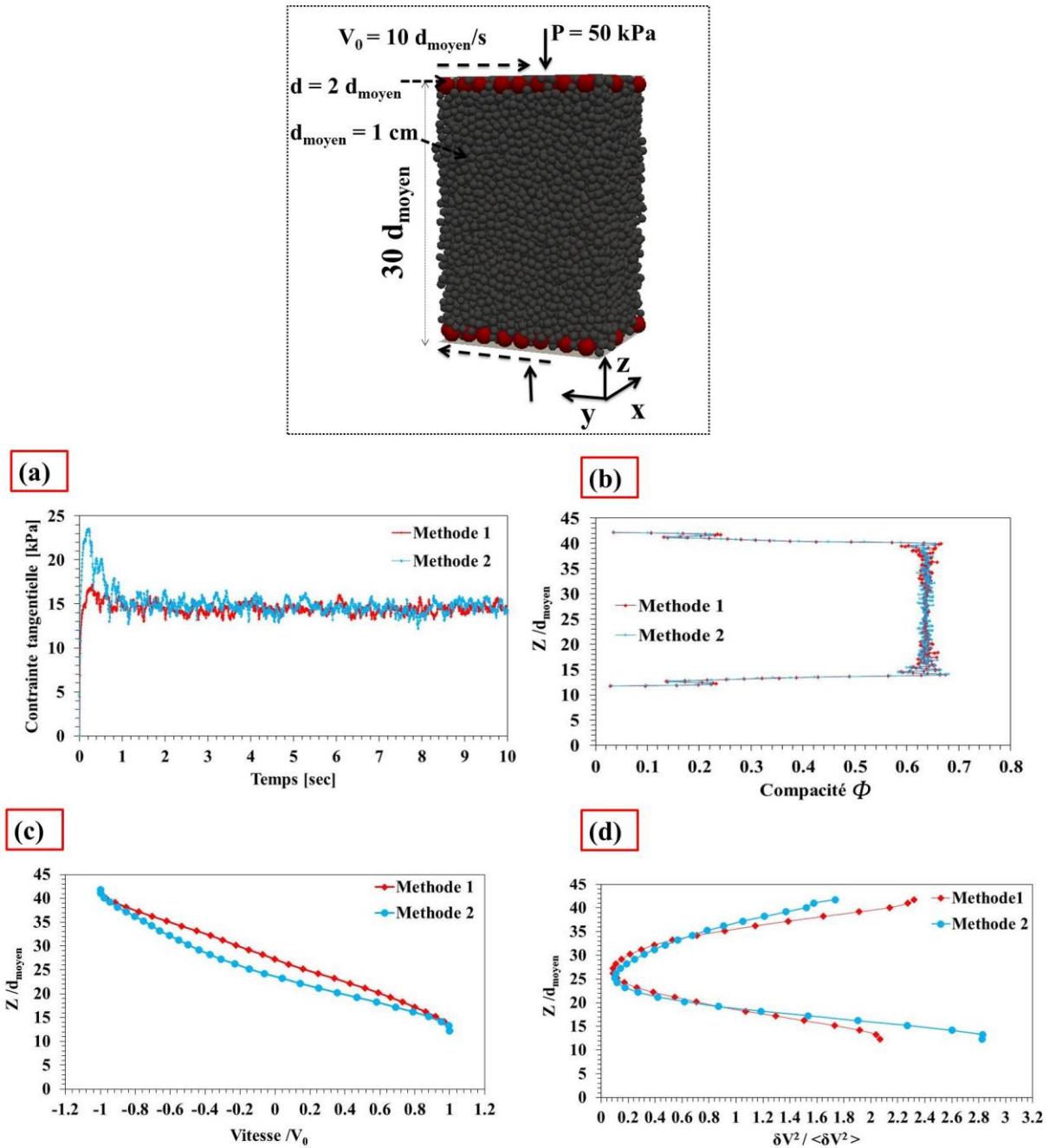


Figure IV-26 – Etude sur la méthode de confinement (rugosité $d = 2 d_{\text{moyen}}$) : (a) Evolution de la contrainte tangentielle ; (b) Profil de compacité ; (c) Profil de vitesse et (d) Fluctuations de vitesses.

La **Figure IV-26-a** présente l'évolution de la contrainte tangentielle. Dans le régime transitoire, la valeur maximale de la contrainte tangentielle dépend de la manière dont nous confinons le milieu. La contrainte tangentielle maximale est de 17 kPa avec la première méthode et de 23,5 kPa avec la deuxième méthode, tandis que dans le régime stationnaire, la même valeur

moyenne de la contrainte tangentielle (14,5 kPa) est observée avec les deux méthodes. De plus, les fluctuations par rapport à la moyenne sont de 3,5% (première méthode) et de 4,5% (deuxième méthode), c'est-à-dire que, dans le régime stationnaire, la contrainte tangentielle ne dépend plus de la méthode de confinement.

La **Figure IV-26-b** présente les profils de compacité pour les deux méthodes de confinement. Pour les deux profils, des fluctuations importantes sont observées sur une épaisseur d'environ 5 fois le diamètre moyen. Ensuite, en s'éloignant de la paroi le profil est moins bruité. La valeur moyenne de la compacité est la même pour les deux méthodes de confinement et elle est de 0,63.

En ce qui concerne les profils de vitesse [**Figure IV-26-c**], près de la paroi (couche d'épaisseur de $2 d_{\text{moyen}}$), les grains du milieu sont accrochés par la rugosité. Ils ont donc une vitesse égale à la vitesse de déplacement de la paroi. Loin de la paroi, une légère variation de la courbure est observée entre les deux profils, tandis que, les fluctuations de vitesses par rapport à la moyenne entre la paroi et le centre restent presque les mêmes pour les deux méthodes [**Figure IV-26-d**].

L'influence de la méthode de confinement a été aussi étudiée pour le même système mais avec une rugosité $d_{0,5}$. Les mêmes observations que celles présentées pour une rugosité d_2 peuvent être faites pour une rugosité de $0,5 d_{\text{moyen}}$.

Ainsi, la méthode de confinement affecte le comportement transitoire du milieu granulaire cisailé mais pas l'état stationnaire. La méthode de confinement influence l'état de compacité des grains le long de la paroi rugueuse dans l'état initial. Après 1 seconde de cisaillement, le milieu granulaire a été suffisamment "remanié" pour qu'il ne subsiste aucune trace de l'histoire du confinement.

IV.7 Etude sur la polydispersité du milieu

Dans cette section nous allons étudier l'influence de la composition du milieu sur la contrainte tangentielle. La rugosité de la paroi est aléatoire (d_1). La concentration des grains est $C_p = 100\%$ (211 grains sont collés sur chaque plan). Nous avons fait varier la polydispersité du milieu granulaire entre 10% et 50%, les grains du milieu ont un diamètre moyen (d_{moyen}) égal à 1cm. La pression normale exercée sur le milieu est de 200 kPa et la vitesse de cisaillement est de $100 d_{\text{moyen}} / \text{s}$. La **Figure IV-27** présente les schémas des systèmes étudiés.

Le **Tableau IV-13** présente la variation de la contrainte tangentielle en fonction de la polydispersité du milieu granulaire. Nous constatons que la contrainte tangentielle augmente très légèrement avec la polydispersité du milieu : augmentation de la contrainte tangentielle d'environ 0,5% pour une augmentation de la polydispersité de 10%. Ce résultat ne nous permet pas de conclure que la composition du milieu n'influe pas sur la force tangentielle. En effet, quel

que soit la polydispersité du milieu étudié, le rapport entre le diamètre des grains de la rugosité et le diamètre moyen des grains du milieu est égale à 1. Des études sur des empilements polydispersés et pour des rapports entre le diamètre des grains de la rugosité et le diamètre moyen des grains du milieu plus ou moins importants devraient être réalisées.

Polydispersité	10%	20%	30%	40%	50%
Contrainte tangentielle [kPa]	54,85	55,16	55,95	56,59	56,43

Tableau IV-13 – Variation de la contrainte tangentielle en fonction de la polydispersité du milieu.

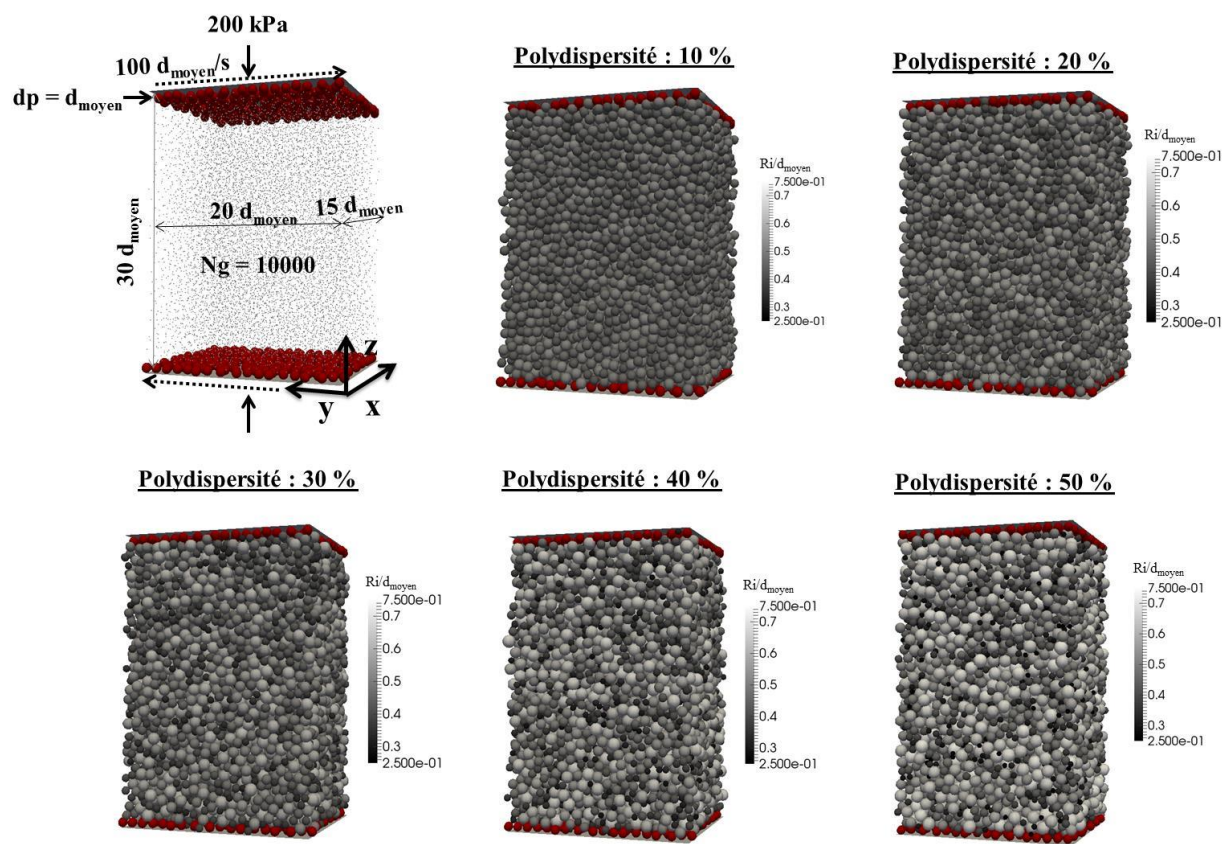


Figure IV-27 – Schémas des systèmes étudiés.

IV.8 Conclusion

Au début de ce chapitre, nous avons décrit le système simulé. Son principe consiste à cisailier, à vitesse imposée, un milieu granulaire légèrement polydispersé (10%) placé entre deux parois rugueuses. Les sollicitations (pression, vitesse et gravité) appliquées au système sont symétriques.

L'étude de la reproductibilité des deux systèmes pour lesquels la géométrie de l'interface est différente (d0,5 et d2) a montré que nos simulations sont reproductibles. En parallèle de l'étude de la reproductibilité, une étude sur le comportement global des deux systèmes à géométrie à l'interface différente a été réalisée. Cette dernière étude a montré qu'une rugosité d0,5 n'est pas suffisante pour cisailer uniformément le milieu. De même, dans le cas d'une rugosité d0,5, les grains s'arrangent mieux près de la paroi ce qui se traduit par des fluctuations importantes sur le profil de compacité. L'augmentation de la compacité moyenne pour une rugosité d0,5 par rapport à la compacité moyenne d'une rugosité d2 a été expliquée par le déplacement relatif entre les grains. De plus, dans le cas d'une rugosité d0,5, les fluctuations de la contrainte tangentielle dans le régime stationnaire sont trois fois plus importantes que celles dans le cas de la rugosité d2. L'explication de la différence entre les fluctuations de la contrainte tangentielle a été faite selon le nombre représentatif des grains cisailés : 1000 grains pour d0,5 et 10000 grains pour d2.

Afin d'étudier l'influence des conditions de l'interface (pression, vitesse, rugosité) sur les grandeurs mesurables, une étude a été réalisée en variant les conditions à l'interface. Deux types de rugosités ont été étudiés. Le premier type est une rugosité aléatoire, pour laquelle nous avons fait varier indépendamment le diamètre des grains collés sur la paroi et leur concentration.

- L'influence du diamètre des grains de la rugosité a montré que :

- Pour une rugosité donnée, la contrainte tangentielle entre le milieu granulaire et la paroi est indépendante de la vitesse de déplacement de la paroi.
- La contrainte tangentielle est proportionnelle à la pression normale.
- La vitesse de déplacement de la paroi et la pression normale n'ont pas une influence notable sur l'état de cisaillement du milieu (profil de vitesse), sauf pour la rugosité d1 à pression et vitesse élevées (200 kPa et 100 cm/s).
- Il existe une rugosité critique (comprise entre d1 et d,25) à partir de laquelle la contrainte tangentielle devient indépendante de la rugosité de la paroi et le milieu reste entièrement cisailé.
- Pour une rugosité inférieure à la rugosité critique, la contrainte tangentielle augmente avec l'augmentation de la rugosité. De même, le cisaillement est localisé près de l'interface.
- La rugosité affecte la vitesse de glissement relative entre le milieu et la paroi. La variation de la contrainte tangentielle est strictement liée à la vitesse de glissement relative entre le milieu et la paroi et à l'épaisseur de la couche cisailée.

- L'analogie entre l'écoulement du béton dans un tuyau et la formation de la bande de cisaillement par cisaillement d'un milieu granulaire montre que la couche limite pourrait être caractérisée (sa présence, son épaisseur) à partir de la bande cisailée formée pour une rugosité de diamètre d_p inférieur à d_{moyen} .

En variant la concentration des grains collés sur la paroi, nous avons montré qu'une profondeur des creux de la rugosité supérieure ou égale à la moitié de d_{moyen} est suffisante pour cisailier uniformément le milieu granulaire. Ainsi, il semblerait que le paramètre prépondérant dans la formation de la couche limite soit la profondeur de pénétration des grains dans les aspérités.

Contrairement à une rugosité aléatoire, dans le cas d'une rugosité en créneaux, une cristallisation importante du milieu a été observée près de la paroi, ce qui rend l'interprétation des résultats difficile.

Après l'étude de l'influence des conditions à l'interface sur les informations données par le système cisailé dans la phase stationnaire, nous avons voulu étudier l'influence de la méthode de préparation sur les grandeurs mesurables dans la phase stationnaire. Cette étude a montré que la méthode de préparation d'un système confiné affecte le comportement transitoire du milieu mais pas son comportement stationnaire. Après 1 seconde de cisaillement, le milieu granulaire a été suffisamment "remanié" pour qu'il ne subsiste aucune trace de l'histoire du confinement.

En plus de l'influence de la méthode de préparation du système, nous avons voulu étudier l'influence de la polydispersité du milieu sur la contrainte tangentielle. Les simulations pour une rugosité d_1 pour lesquelles nous avons varié la polydispersité du milieu (10% à 50%) ont montré que la polydispersité du milieu n'a pas d'influence sur la contrainte de frottement du milieu granulaire contre la paroi rugueuse.

CHAPITRE V

***Interface béton-paroi : étude préliminaire par
approches expérimentale et numérique***

V.1 Introduction

Plusieurs études expérimentales réalisées sur l'interface béton frais-paroi ont montré que le frottement à l'interface est étroitement lié à la composition de la couche limite qui dépend de la rugosité mais aussi de la composition du béton [3, 8, 44, 161]. Nous avons montré dans le chapitre 4 que l'état de cisaillement d'un milieu granulaire est étroitement lié aux caractéristiques de la paroi. Il est donc aussi important d'étudier l'influence de la composition du milieu sur la formation de la couche limite. Cependant, les caractéristiques de la couche limite restent mal définies. De nombreuses interrogations persistent sur son épaisseur, sur les dimensions des grains qui la composent, etc. Ainsi, la méthodologie d'extraction et d'analyse granulométrique de la couche limite varie d'une étude à l'autre.

Dans ce chapitre, nous présentons les résultats d'une étude préliminaire réalisée pour tenter d'extraire puis de caractériser la couche limite formée au cours d'un essai tribologique. Des protocoles d'extraction et d'analyse granulométrique d'une couche formée près de l'interface béton frais-paroi au cours d'un essai au tribomètre plan-plan sont présentés. En plus des essais expérimentaux, une simulation numérique du cisaillement d'un empilement bidisperse en conditions périodiques est menée. L'objectif de l'étude numérique est de présenter une simulation préliminaire qui pourrait par la suite permettre d'apporter des réponses sur la caractérisation de la couche limite à partir de sa composition et des caractéristiques de la paroi.

Après avoir présenté l'essai tribologique et la composition du béton fabriqué, les caractéristiques des plaques utilisées pour l'étude expérimentale sont présentées. Ensuite, nous présentons le protocole d'extraction de la couche près de la paroi et le protocole de son analyse granulométrique qui nous permet d'étudier l'influence des caractéristiques de la paroi sur l'analyse granulométrique de la couche extraite. Nous finissons ce chapitre par une simulation numérique du cisaillement d'un empilement bidisperse sur une paroi rugueuse.

V.2 Essai expérimental

V.2.1 Description de l'essai expérimental

Les essais expérimentaux ont été réalisés sur le tribomètre plan-plan [Figure V-1] développé par Vanhove [45] (voir chapitre 1 paragraphe I .2.2.2). Le béton frais est introduit dans des porte-échantillons de 120 mm de diamètre à travers une trappe. Afin d'éviter tout départ du béton, un système d'étanchéité est monté sur les porte-échantillons, en contact avec la plaque. Avant chaque essai, le frottement du système d'étanchéité contre la plaque, appelé force parasite F_{par} , est mesuré à l'aide d'un capteur de force. Les échantillons de béton sont mis sous pression grâce à des vérins. Une fois la pression désirée atteinte, une plaque glisse à vitesse contrôlée entre les deux porte-échantillons. Durant l'essai, la pression exercée sur le béton est contrôlée et

la force de frottement de l'ensemble (béton + système d'étanchéité) contre la plaque est mesurée (F_{mes}). En considérant que la force de frottement est la même pour les deux porte-échantillons, la force de frottement béton/plaque, notée F , est calculée à partir de la force parasite (F_{par}) et de la force mesurée par le capteur durant l'essai (F_{mes}).

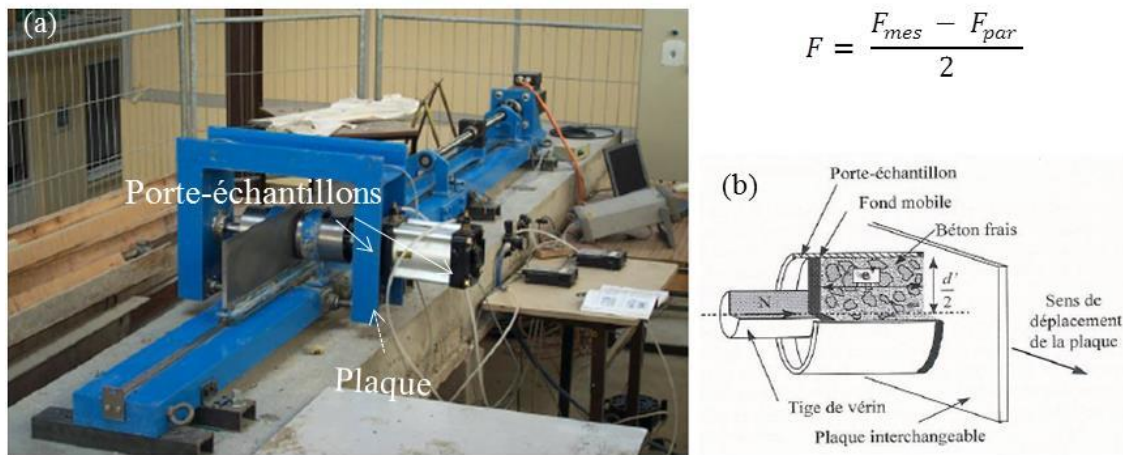


Figure V-1 - Tribomètre plan-plan (a) et détail d'un porte-échantillon (b) [5].

Pour les essais présentés dans ce chapitre, la pression normale retenue est de 90 kPa, ce qui correspond à la pression exercée par le béton sur un coffrage d'environ 3,5 m de hauteur. La vitesse de déplacement de la plaque est de 1,67 mm/sec, cette vitesse est équivalente à la vitesse moyenne de la mise en œuvre du béton dans des coffrages standard de 2 à 6 m de hauteur. La distance de déplacement de la plaque est d'environ 5 cm, ce qui correspond à une durée d'essai d'environ 30 secondes. Cette distance est suffisante pour atteindre une phase stationnaire dans laquelle une force tangentielle (de frottement) moyenne est calculée. Par la suite, les valeurs de la force tangentielle présentées sont celles calculées dans la phase stationnaire.

V.2.2 Béton frais

V.2.2.1 Composition du béton

La composition du béton utilisé dans cette étude correspond à un béton ordinaire couramment utilisé sur chantier [Tableau V-1]. Afin de faciliter sa mise en place dans les porte-échantillons, une consistance de classe S3 (béton très plastique) est visée. Le béton fabriqué possède 30% de pâte (ciment + filler calcaire) en volume. La Figure V-2 présente les courbes granulométriques des composants du béton utilisé. Les analyses granulométriques du ciment et du filler calcaire présentées dans la Figure V-2 ont été réalisées par le groupe CEMEX. Le Tableau V-2 présente quelques caractéristiques physiques des granulats. Les caractéristiques physiques et mécaniques et la composition chimique du ciment et du filler calcaire sont données dans l'Annexe 4.

Béton : volume de pâte 30%	
Ciment CEM I 52.5 CP2 (Kg/m ³)	248
Filler calcaire (Kg/m ³)	83
Sable de l'Oise 0/4 (Kg/m ³)	815
Gravillon concassé 4/8 (Kg/m ³)	279
Gravillon concassé 8/12.5 (Kg/m ³)	756
Eau efficace (l)	189
Rapport (E/L)	0.57

Tableau V-1 – Composition du béton

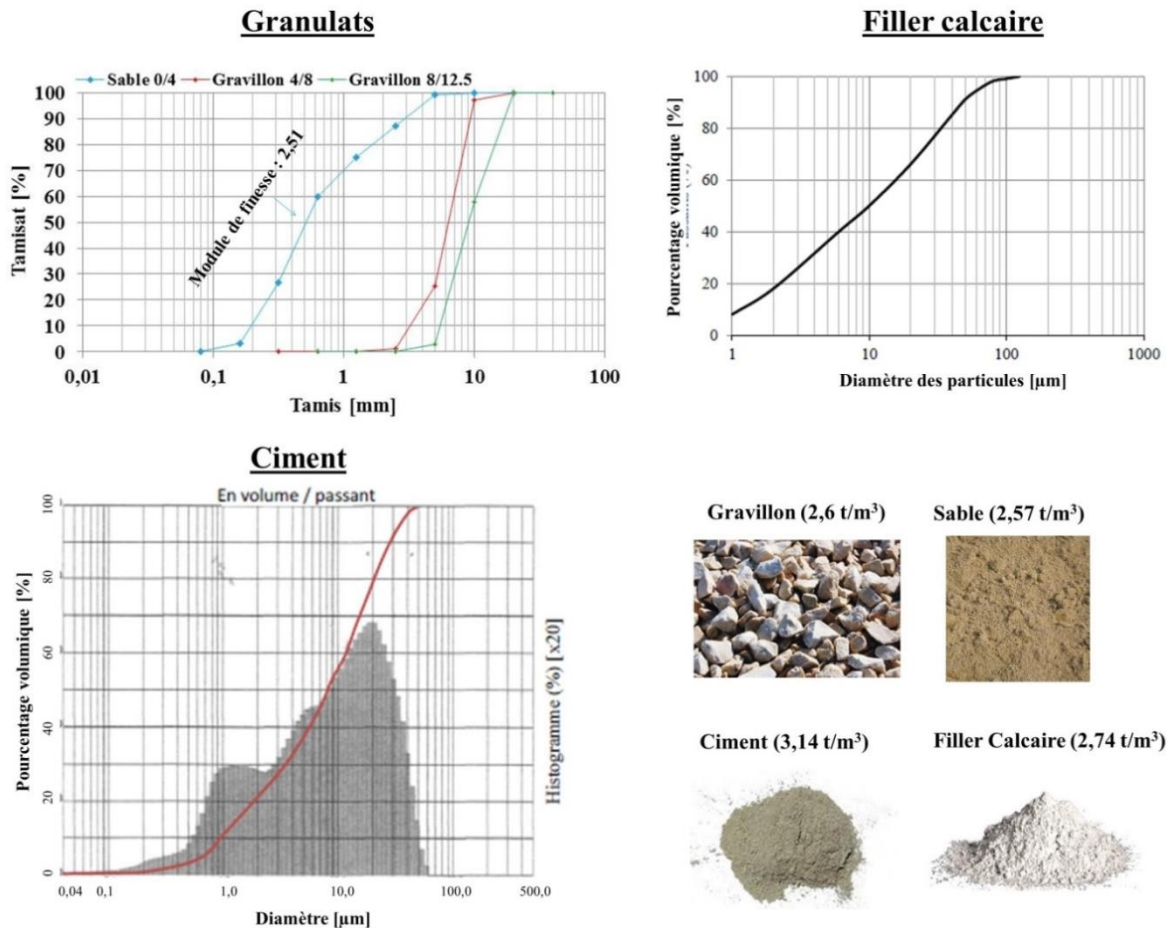


Figure V-2 - Courbes granulométriques des composants.

Granulats	Sable	Gravillon 4/8	Gravillon 8/12,5
Masse volumique apparente (t/ m ³)	1,49	1,42	1,45
Masse volumique absolue (t/ m ³)	2,57	2,72	2,6
Coefficient d'absorption	0,8	-	-
ES (%)	97,38	-	-

Tableau V-2 – Caractéristiques des granulats.

V.2.2.2 Malaxage

Afin d'assurer l'homogénéité du béton, pour chaque essai, une gâchée de 20 litres a été préparée en mélangeant les composants dans un malaxeur de type DIEM DZ120V. Le malaxage a été réalisé selon la séquence indiquée dans la **Figure V-3** [NF P 18-404] :

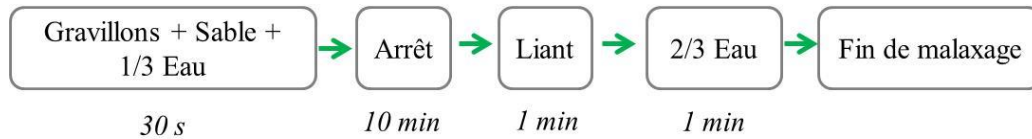


Figure V-3 - Protocole de malaxage.

V.2.2.3 Affaissement

Avant de réaliser un essai tribologique, il est nécessaire de s'assurer que l'ouvrabilité du béton est conforme à la prescription. Après le malaxage et avant de commencer l'essai expérimental, l'affaissement du béton fabriqué a été systématiquement mesuré selon la norme NF P 18-451. Les mesures ont montré que l'affaissement des bétons fabriqués variait entre 10,5 et 13 cm, la consistance du béton fabriqué est donc conforme à la consistance visée [**Figure V-4**].

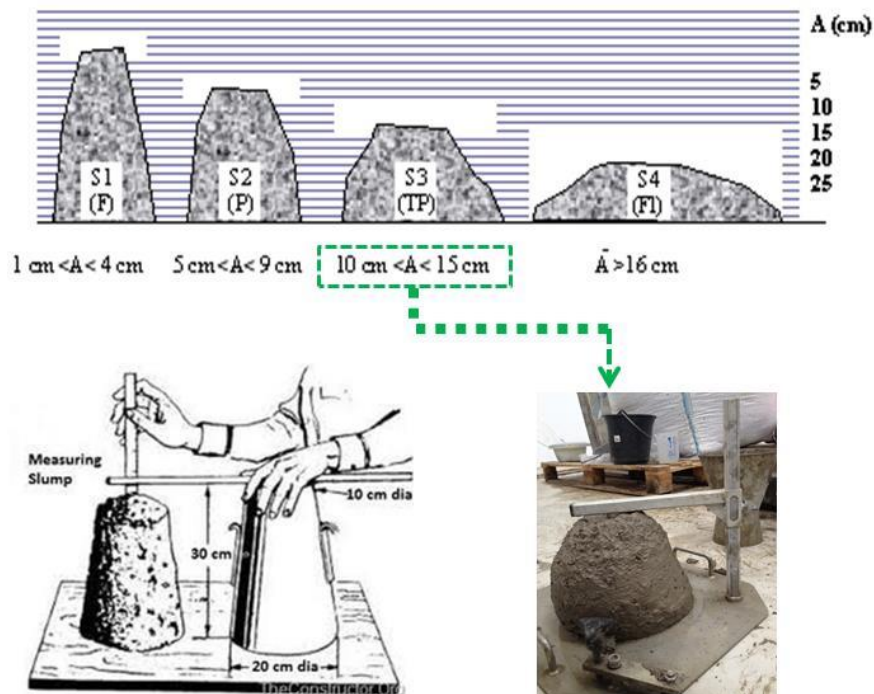


Figure V-4 - Classe de consistance mesurée au cône d'Abrams [NF P 18–305].

V.2.3 Caractéristiques des plaques

Les essais expérimentaux ont été réalisés sur des plaques découpées dans des parois de coffrage en acier. Les plaques sont usagées suite aux essais tribologiques réalisés par des études antérieures. La plaque mesure 105 cm de longueur et 18 cm de largeur. Trois plaques notées respectivement plaque 1, plaque 2 et plaque 3 ont été utilisées. La rugosité de chaque plaque a été mesurée avant de commencer un essai.

V.2.3.1 Rugosité

De nombreux paramètres peuvent être mesurés pour décrire la rugosité d'une surface [ISO 12085]. Le paramètre de la rugosité fréquemment utilisé est l'indice R_a [Figure V-5]. Il s'agit de l'écart moyen, ou de la moyenne arithmétique, par rapport à la ligne moyenne des distances entre pics et creux successifs. Ce paramètre "moyen" permet de donner une indication générale résumant les autres paramètres de rugosité d'une surface donnée. Un second paramètre, noté R_t , est la rugosité totale [Figure V-5]. Elle correspond à la dénivelée entre le pic et le creux maximaux observés sur la longueur analysée. Les deux paramètres R_a et R_t sont pris en compte dans cette étude. En effet, la distance séparant le plus haut pic et le plus bas creux représentée sur un profil permet de déduire la capacité des grains de se loger dans une aspérité.

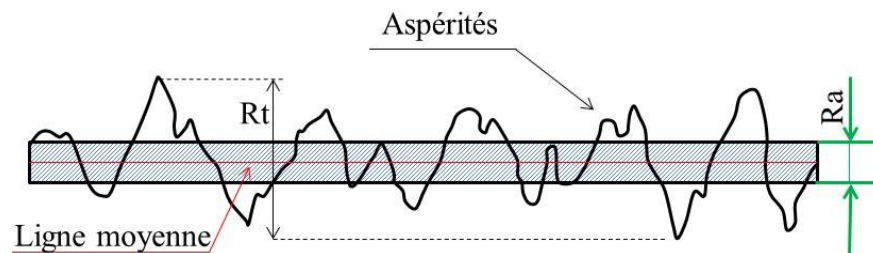


Figure V-5 - Représentation schématique d'un profil de rugosité.

La mesure de la rugosité a été réalisée à l'aide d'un rugosimètre portable avec affichage graphique TR200 de la société Time Group Inc [Figure V-6]. C'est un appareil compact permettant la mesure avec une haute précision des caractéristiques de la rugosité. Le TR-200 est basé sur un capteur inductif avec une pointe en diamant, le micro-capteur se déplace sur une course de 0.25 à 17.5 mm sur la surface du matériau testé. Un profil de rugosité est affiché directement sur le rugosimètre ce qui permet d'avoir un aperçu rapide de la mesure réalisée. La Figure V-6 présente les spécifications de cet appareil.

Rugosimètre TR200



Normes	Conforme à ISO/DIN/JIS/ANSI (menu sélectionnable)
Unités	mm, inch
Résolution affichage:	0,001µm / 0,04 µinch
Ecran	LCD matrice 128 x 64 point avec rétroéclairage
Dimensions LCD	écran 50 mm x 30 mm
Fonction d'affichage	Indicateur de la position du capteur, indicateur de niveau de charge, affichage paramètres et profil, impression directe, ajustement luminosité, extinction après 5 minutes avec mémorisation, étalonnage avec logiciel
transfert de données	RS-232: direct vers l'imprimante TA-220 ou le PC
Plage de mesure	Ra, Rq : 0,005 - 16µm Rz, Ry, Rp, Rt, R3z : 0,02 - 160µm, RSm, RS : 2 - 4000µm Tp : 1-100% (% Ry)
Longueur de mesure	0,25mm / 0,8mm / 2,5mm
Evaluation longueur	1~5 cut-off
Longueur de tracé Lt	(1~5 cut off) + 2 cut-off
Filtre digital	RC, PC-RC, GAUSS, D-P
Capteur	modèle standard TS-100, Inductif pointe diamant de 5µm de rayon
Trous à partir du diamètre	6,0 mm, profondeur 15 mm (TS-100)
Dimension	141mm x 56mm x 48mm
Poids	480 g

Figure V-6 - Fiche technique du rugosimètre TR200.

V.2.3.2 Mesure de la rugosité de la plaque

Afin d'avoir plusieurs points de mesure de la rugosité, la zone de plaque sur laquelle l'essai s'effectue est quadrillée par une série de lignes horizontales et verticales formant une grille. La distance séparant deux lignes verticales est de 3 cm. Les lignes horizontales sont tracées symétriquement par rapport à l'axe du porte-échantillon. Les points de rencontre des lignes verticales et horizontales constituent l'ensemble des points de mesure. Ensuite, les paramètres Ra et Rt sont mesurés pour chaque point dans la direction de cisaillement. La **Figure V-7** illustre la méthodologie suivie pour la détermination des points de mesure. Pour chaque plaque, un ensemble de 25 mesures est effectué pour obtenir des valeurs moyennes des paramètres Ra et Rt.

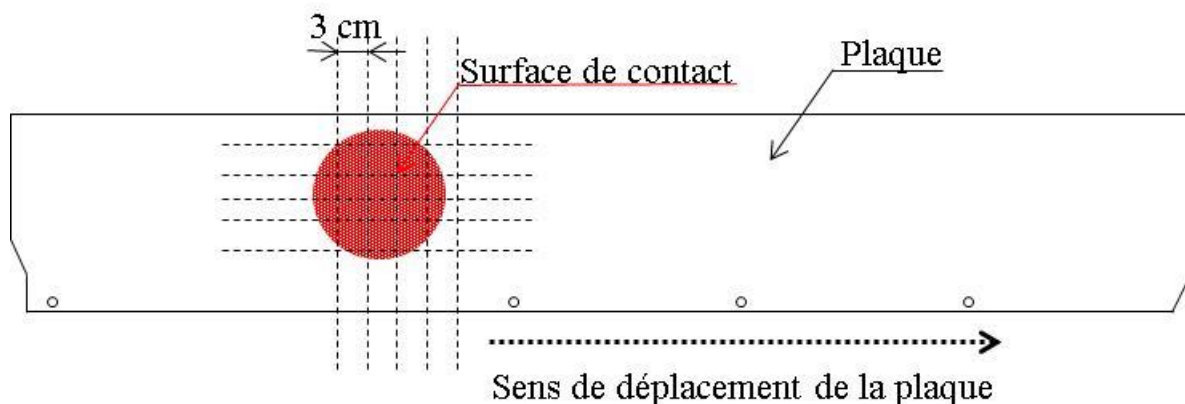


Figure V-7 - Détermination des points de mesure.

La **Figure V-8** présente les paramètres Ra et Rt correspondant respectivement aux plaques 1, 2 et 3. Les valeurs moyennes de Ra et Rt de chaque plaque sont présentées dans le **Tableau V-3**. Les plaques 1 et 2 doivent nous permettre d'étudier l'influence de la rugosité de la paroi sur la distribution granulométrique de la couche près de la paroi. Tandis que les plaques 1 et 3 devraient nous permettre d'étudier la reproductibilité de la mesure pour la même rugosité moyenne.

Paramètres de la rugosité	Ra [μm]	Rt [μm]
Plaque 1	$1,0 \pm 0,16$	$9,0 \pm 2,27$
Plaque 2	$0,6 \pm 0,23$	$6,0 \pm 3,89$
Plaque 3	$1,0 \pm 0,3$	$8,5 \pm 2,31$

Tableau V-3 - Paramètres de la rugosité Ra et Rt des plaques 1, 2 et 3.

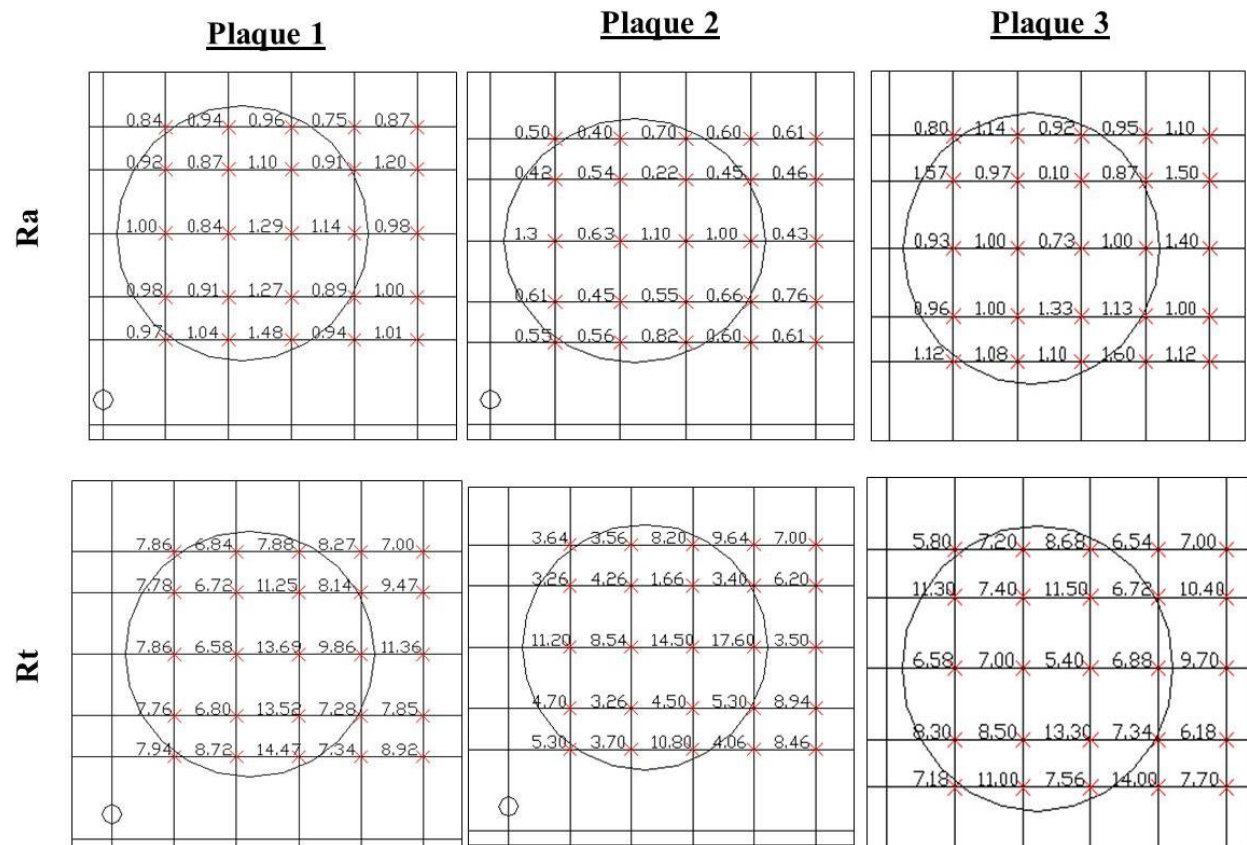


Figure V-8 - Rugosités (Ra et Rt) en μm des plaques 1, 2 et 3.

V.3 Etude sur la couche à l'interface béton frais-paroi

L'étude de la composition de la couche limite est étroitement liée à la méthodologie utilisée pour son extraction. De nombreux auteurs ont cherché à caractériser sa composition [3, 8]. Toutefois, cette caractérisation est délicate car on ne connaît pas précisément l'épaisseur qu'il

faut prélever. D'autre part, l'extraction d'une couche de fine épaisseur à la surface d'une plaque est délicate. Dans cette étude, nous avons décidé de prélever la couche de matériau frais qui restait adhérente à la paroi métallique après réalisation de l'essai tribologique. Il faut préciser ici que le matériau récupéré n'est pas constitué exclusivement de la couche limite mais qu'il contient probablement aussi une partie du béton qui n'est pas affecté par la rugosité. Ce protocole d'extraction est assez proche de celui utilisé par Ngo [3].

V.3.1 Protocole d'extraction de la pâte proche de l'interface

La procédure d'extraction de la pâte proche de l'interface est délicate. Cette étape doit être faite avec précautions. Après un essai tribologique, les deux porte-échantillons sont retirés perpendiculairement à la plaque (sans mouvement de torsion ou frottant contre la plaque). Un film plastique est glissé sous la plaque pour éviter toute perte de matière. La récupération de l'ensemble de la pâte collée sur la plaque [Figure V-9] et de la pâte qui s'est écoulée sur le film plastique se fait en rinçant les surfaces à l'éthanol. L'éthanol permet la conservation de la suspension (pâte) en stoppant son hydratation. La suspension constituée de la pâte et de l'éthanol est versée dans un récipient.



Figure V-9 - Pâte collée sur la plaque.

V.3.2 Tamisage de la pâte

D'après kaplan, Vanhove et Bouharoun [4, 5, 8] la couche limite est constituée d'eau et de fines (ciment et additions). Dans cette étude les fines sont des grains de diamètre inférieur à 80 μm . Afin de séparer les particules fines des particules grossières un tamisage de la pâte extraite par l'essai expérimental a été fait avec un tamis de 80 μm .

Tout d'abord, la pâte est versée sur le tamis. Ensuite, la séparation des fines a été faite en rinçant le tamis avec de l'éthanol. Les passants [Figure V-10-b] sont conservés dans un flacon fermé et les particules grossières (refus) [Figure V-10-a] sont placées dans l'étuve ($T=104\text{ }^{\circ}\text{C}$, 24 h) pour réaliser après le séchage un tamisage à sec.

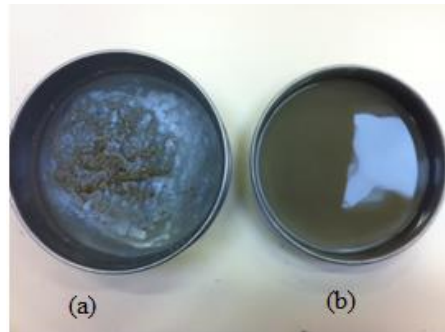


Figure V-10 - (a) Particules grossières et (b) Passants à 80 μm .

V.3.3 Filtration

La pâte extraite de l'essai expérimental est composée de fines, d'éthanol (utilisé pour le rinçage de la plaque) et d'eau. Afin d'éliminer la quantité d'eau restante et donc de stopper complètement l'hydratation du ciment, une filtration sous vide de la suspension de particules fines a été réalisée directement après le tamisage [Figure V-11-a].

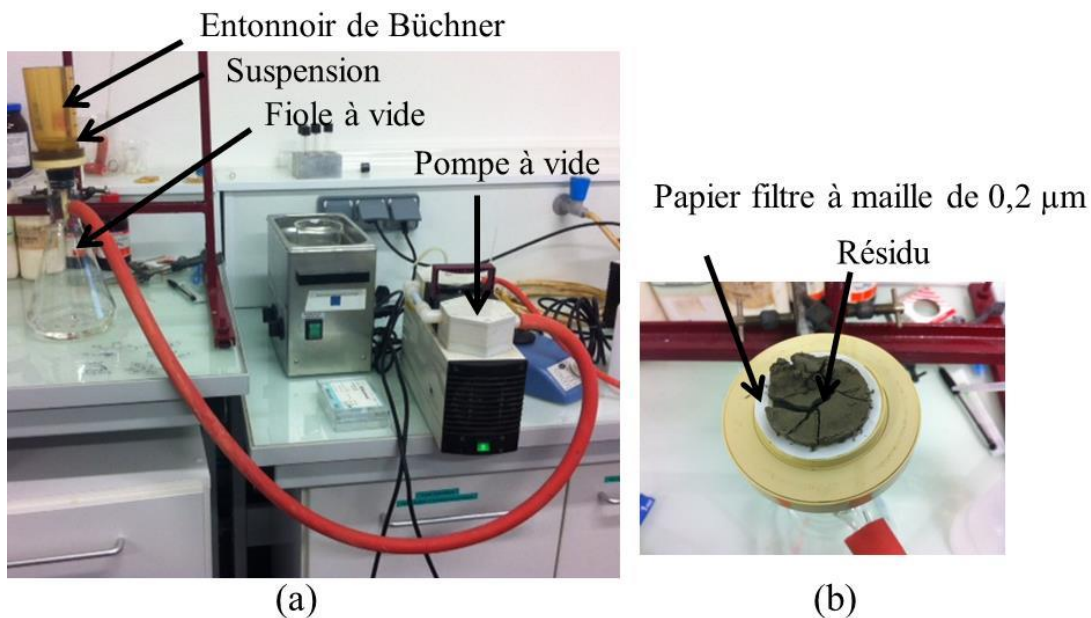


Figure V-11 - (a) Système de filtration et (b) Résidu récupéré.

Le système de filtration est constitué d'un entonnoir de Büchner placé sur une fiole à vide. La fiole est reliée à une pompe vide. Un papier filtre de maille 0,2 μm est posé au fond de l'entonnoir (maille de diamètre faible pour éviter la perte des particules) [Figure V-11-b]. La

suspension est versée sur le papier filtre et rincée à plusieurs reprises avec de l'éthanol, sous l'effet de la dépression, le solide est séparé du liquide. A la fin de la filtration, le résidu filtré [Figure V-11-b] est récupéré à l'aide d'une spatule, placé dans un flacon et à nouveau recouvert d'éthanol pour conservation jusqu'à réalisation des mesures au granulomètre laser.

V.3.4 Analyse granulométrique

Les courbes granulométriques du résidu récupéré par filtration sont déterminées sur un granulomètre à diffraction LASER type LS 13-320 de la société BECKMAN-COULTER. Tandis que pour les particules grossières des tamisages à sec ont été réalisés.

V.3.4.1 Granulomètre laser LS 13 320

Le granulomètre est équipé d'un module ULM2 (Universal Liquid Module 2) automatisé, conçu pour fonctionner en milieu aqueux ou avec des solvants organiques. Ce module a une capacité de 125 ml, est équipé d'une pompe centrifuge permettant l'analyse de particules de densité élevée et d'une sonde ultra-sons de 20 kHz à puissance réglable pour optimiser la désagrégation des matériaux cohésifs. Dans notre étude, les analyses granulométriques ont été faites en milieu aqueux.

Le principe de la mesure de taille est basé sur la diffraction de la lumière. Chaque particule est illuminée par un rayon laser, et selon la quantité de lumière déviée la taille des particules est déterminée. Cet appareil permet de mesurer, en une seule analyse, la distribution des particules de taille comprise entre 17 nm et 2000 μm dans une suspension. Les résultats sont calculés en % volumique, et exprimés en μm .

V.3.4.2 Procédure expérimentale

Généralement, l'analyse granulométrique avec le granulomètre laser LS 13 320 [Figure V-12-a] en phase liquide est réalisée en présence de défloculant chimique (hexamétophosphate de sodium par exemple) afin d'éviter la formation d'agglomérats de fines particules. Mais nous allons voir par la suite que cette solution n'est pas adéquate avec la suspension de ciment utilisée dans notre travail. Le bécher contenant les particules à analyser est ensuite placé sur un agitateur magnétique. A l'aide d'une pipette, une quantité de la suspension en agitation est prélevée [Figure V-12-b] pour l'introduire dans la cellule du granulomètre laser [Figure V-12-c]. La quantité à introduire dans la cellule est déterminée à partir d'un indice d'obscurité. Un indice d'obscurité d'environ 8% signifie que la suspension placée dans la cellule est suffisante pour effectuer la mesure.

Une fois la suspension introduite dans la cellule du granulomètre, trois mesures successives pour le même échantillon sont réalisées. Pour chaque mesure, une courbe représentant la variation du volume différentiel (%) en fonction du diamètre des particules (μm)

est obtenue. Les trois courbes qui correspondent aux trois mesures permettent de valider la reproductibilité de l'analyse et d'éviter toute erreur provenant de l'instrumentation. La reproductibilité de l'analyse a été vérifiée pour chaque mesure présentée dans ce chapitre.

De plus, le granulomètre est équipé d'un système à « ultrasons » permettant une défloculation mécanique pendant l'essai. Durant la mesure, il est possible d'activer le fonctionnement des ultrasons afin de disperser les particules et d'éviter la formation des agglomérats.

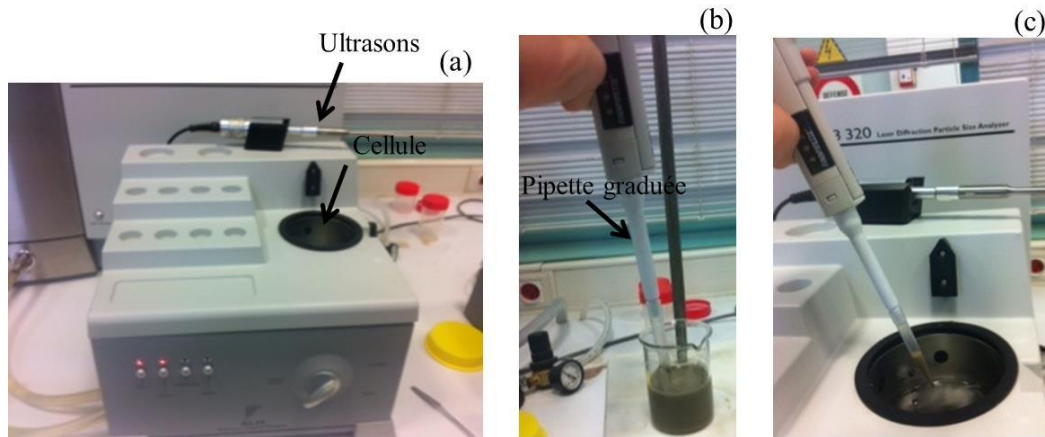


Figure V-12 - (a) Granulomètre laser LS 13 320 ; (b) Prélèvement de suspension et (c) Introduction de la suspension dans la cellule.

V.3.5 Conditions de mesure granulométrique

Les conditions de mesure granulométrique (solution d'agitation et utilisation des ultrasons) ont été déterminées à partir des mesures réalisées sur une poudre de ciment sèche.

V.3.5.1 Défloculation mécanique : Ultrasons

La **Figure V-13** présente la distribution granulométrique des grains de ciment avec et sans l'utilisation des ultrasons. Les grains de ciment sont mélangés dans une solution d'héxamétaphosphate de sodium avant leur introduction dans la cellule du granulomètre.

La courbe de mesure sans ultrasons présente deux pics. Le pic le plus haut correspond à un diamètre de 25 μm et le deuxième pic à un diamètre de 100 μm . Avec l'utilisation des ultrasons, un troisième pic qui correspond à un diamètre de grains de 350 μm s'ajoute par rapport à la courbe obtenue sans l'utilisation des ultrasons.

La **Figure V-2** montre que le ciment utilisé dans cette étude est une poudre fine constituée de grains de diamètre inférieur à 50 μm . Ce qui signifie que tout grain de diamètre supérieur à 50 μm est un agglomérat. De même, sur la **Figure V-2** le diamètre des grains de

ciment correspondant au volume différentiel le plus élevé (environ 3,5 %) est d'environ de 20 μm . La comparaison des courbes granulométriques de la **Figure V-13** avec la courbe présentée dans la **Figure V-2** montre que le premier pic (diamètre de 25 μm) correspond aux grains de ciment mais les autres pics (de 100 μm et de 350 μm) sont dus à la présence d'agglomérats. De plus, avec l'utilisation des ultrasons, le diamètre des agglomérats devient plus important (350 μm). Ce résultat n'a pas pu être expliqué, puisque l'héxamétaphosphate de sodium et les ultrasons devraient au contraire réduire le pourcentage volumique des agglomérats.

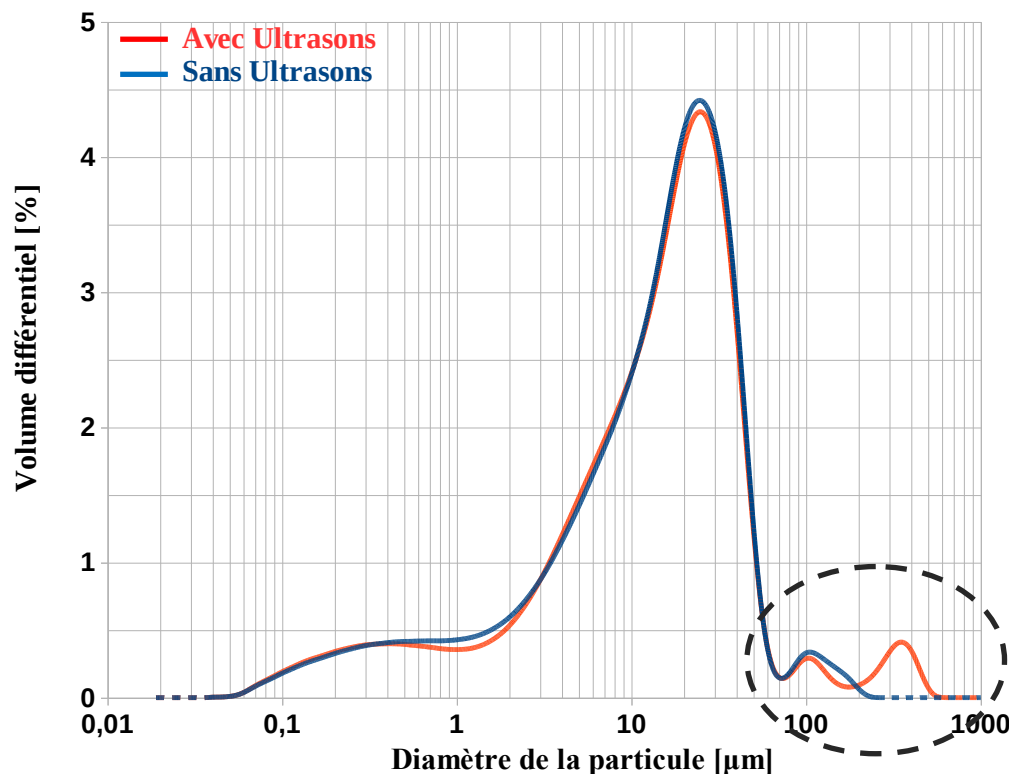


Figure V-13 - Distribution granulométrique des grains de ciment avec et sans ultrasons.

V.3.5.2 Défloculation chimique : Héxamétaphosphate de sodium

En plus des mesures réalisées sur la défloculation mécanique, des mesures en mélangeant les grains de ciment dans deux solutions d'agitation différentes ont été réalisées. Les deux solutions d'agitation sont: l'héxamétaphosphate de sodium dans l'eau et l'éthanol. Les analyses granulométriques ont été faites sans l'utilisation des ultrasons. La **Figure V-14** présente la distribution granulométrique des grains de ciment pour les deux solutions d'agitation utilisées.

Deux pics se forment sur chaque courbe granulométrique. Le premier pic (diamètre de 25 μm) correspond aux grains de ciment. Tandis que, le deuxième pic (diamètre de 100 μm) représente des agglomérats. La courbe de la mesure dans l'héxamétaphosphate de sodium présente plus de grains de diamètre compris entre 0,1 et 10 μm . Tandis que la courbe

correspondant à la mesure dans l'éthanol est plus riche en grains de diamètre supérieur à 10 μm . Globalement, la différence observée entre les deux courbes granulométriques n'est pas notable. Suite à ces deux mesures, la solution retenue pour l'analyse granulométrique de la pâte récupérée sur la plaque est l'éthanol. Ce dernier permet en effet de prolonger la durée d'agitation sans risque de provoquer l'hydratation des grains de ciment. De plus, nous avons observé, lors de l'agitation de la pâte dans la solution d'héxamétaphosphate de sodium, la formation d'un dépôt solide sur les parois du bécher. Afin de ne pas perturber l'analyse granulométrique du résidu de la pâte récupérée à l'issue de l'essai tribologique, les mesures sont réalisées en agitant la pâte dans l'éthanol et sans utilisation des ultrasons.

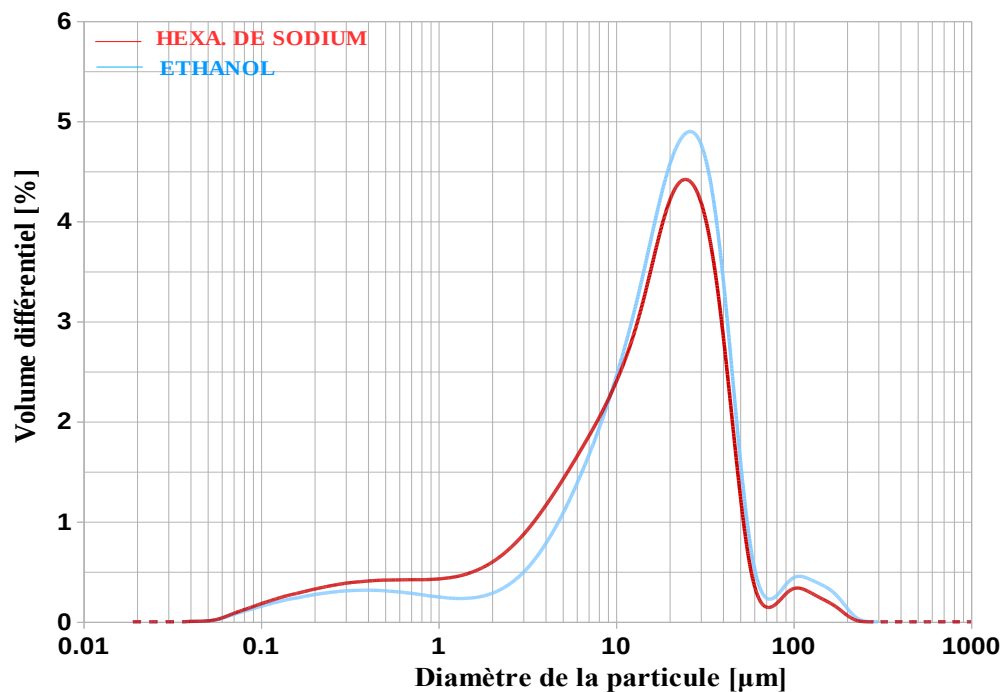


Figure V-14 - Distribution granulométrique des grains de ciment pour deux solutions d'agitation.

V.3.6 Analyse granulométrique de la pâte proche de l'interface béton frais-paroi

V.3.6.1 Etude sur le temps d'agitation

Nous avons vu précédemment que la mesure granulométrique du ciment mettait en évidence la formation d'agglomérats de particules. Pour chaque échantillon de pâte récupéré sur les trois plaques, nous avons donc réalisé des analyses granulométriques pour différentes durées d'agitation afin de vérifier la stabilité dans le temps de la mesure. Nous rappelons que les mesures sont réalisées en agitant la pâte dans l'éthanol et sans utilisation des ultrasons.

La **Figure V-15** et la **Figure V-16** présentent respectivement les pourcentages volumiques différentiels des particules des pâtes extraites des plaques 1 ($R_a = 1 \mu\text{m}$ et $R_t = 9 \mu\text{m}$) et 3 ($R_a = 1 \mu\text{m}$ et $R_t = 8,5 \mu\text{m}$).

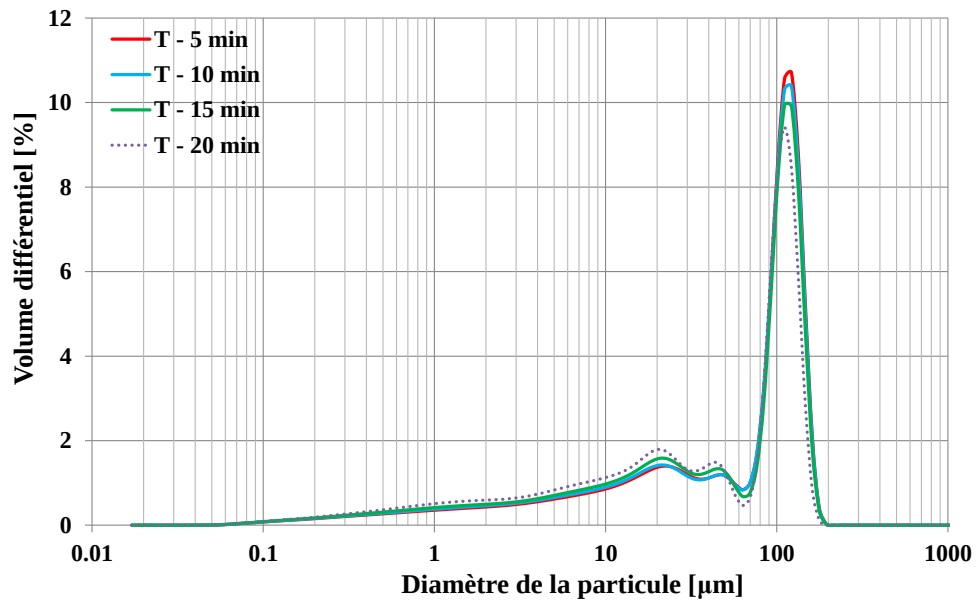


Figure V-15 - Analyse granulométrique de la pâte extraite de la plaque 1 pour différents temps d'agitation.

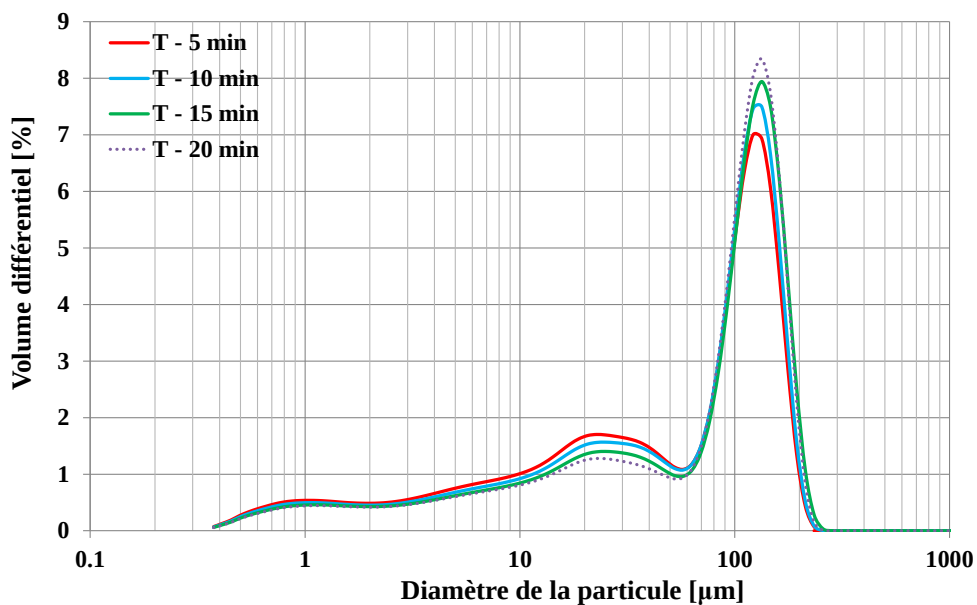


Figure V-16 - Analyse granulométrique de la pâte extraite de la plaque 3 pour différents temps d'agitation.

Les résultats obtenus montrent que pour les pâtes des plaques 1 et 3, le temps d'agitation n'affecte pas les analyses granulométriques. La reproductibilité des mesures en termes de temps d'agitation semble donc assurée.

La **Figure V-17** présente les pourcentages volumiques différentiels des particules des pâtes extraites des plaques 1 et 3 de même rugosité R_a ($1\ \mu\text{m}$). La pâte de la plaque 3 ne présente pas des grains de diamètre inférieur à $0,35\ \mu\text{m}$. Pour les grains ayant un diamètre compris entre $0,35$ et $80\ \mu\text{m}$, une distribution granulométrique proche est observée pour les deux pâtes. Tandis que, le volume différentiel des agglomérats de diamètre de $100\ \mu\text{m}$ est plus élevé ($10,2\ \%$) pour la pâte de la plaque 1 que celui de la pâte de la plaque 3 ($7,5\ \%$). La différence observée entre les deux courbes n'est pas notable, les deux mesures semblent donc reproductibles. La présence des agglomérats montre qu'il est important de réaliser une étude sur la formation des agglomérats avant d'étudier l'analyse granulométrique de la couche limite. En effet, les agglomérats sont formés des fines [133]. Pour étudier l'influence de la rugosité sur l'enrichissement en fines près de la paroi, il faut éliminer les agglomérats.

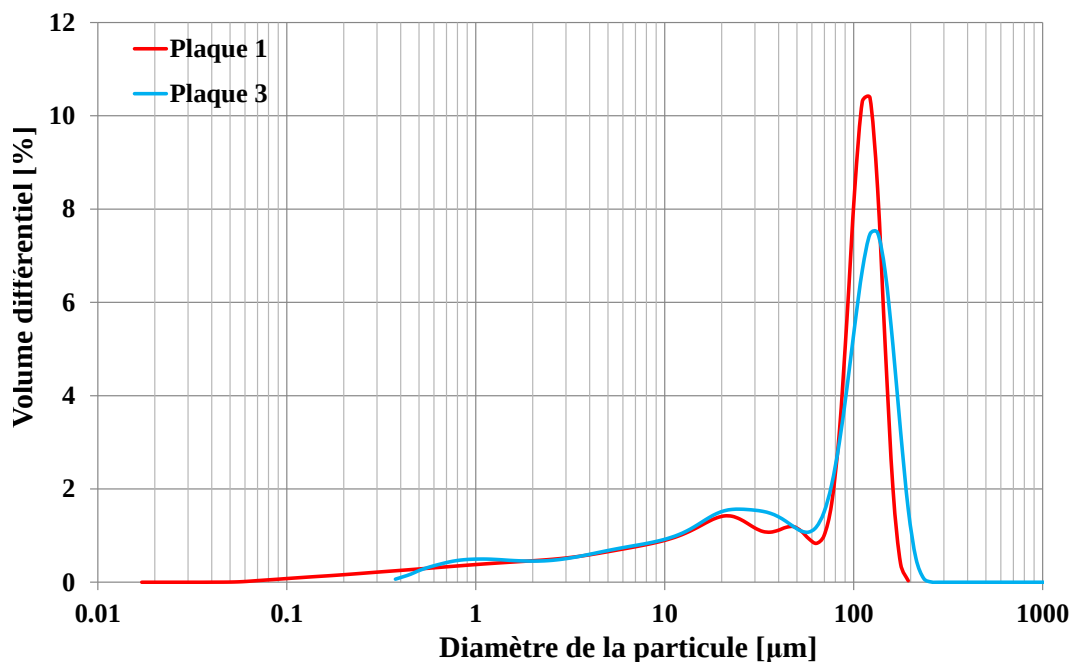


Figure V-17 - Analyses granulométriques des pâtes extraites des plaques 1 et 3 pour un temps d'agitation de 10 minutes.

La **Figure V-18** présente les pourcentages volumiques différentiels des particules de la pâte extraite de la plaque 2 ($R_a = 0,6\ \mu\text{m}$ et $R_t = 6\ \mu\text{m}$) pour différents temps d'agitation. Contrairement aux mesures des pâtes extraites des plaques 1 et 3, le temps d'agitation a une influence notable sur l'analyse granulométrique de la pâte extraite de la plaque 2. Ce qui signifie que la reproductibilité des mesures en termes de temps d'agitation n'est pas assurée et les

analyses réalisées ne permettent pas une bonne détermination de la distribution granulaire. À l'issue de la variation notable entre les courbes des analyses granulométrique de la pâte extraite de la plaque 2, l'influence de la rugosité sur l'analyse granulométrique de la pâte extraite ne peut pas être étudiée.

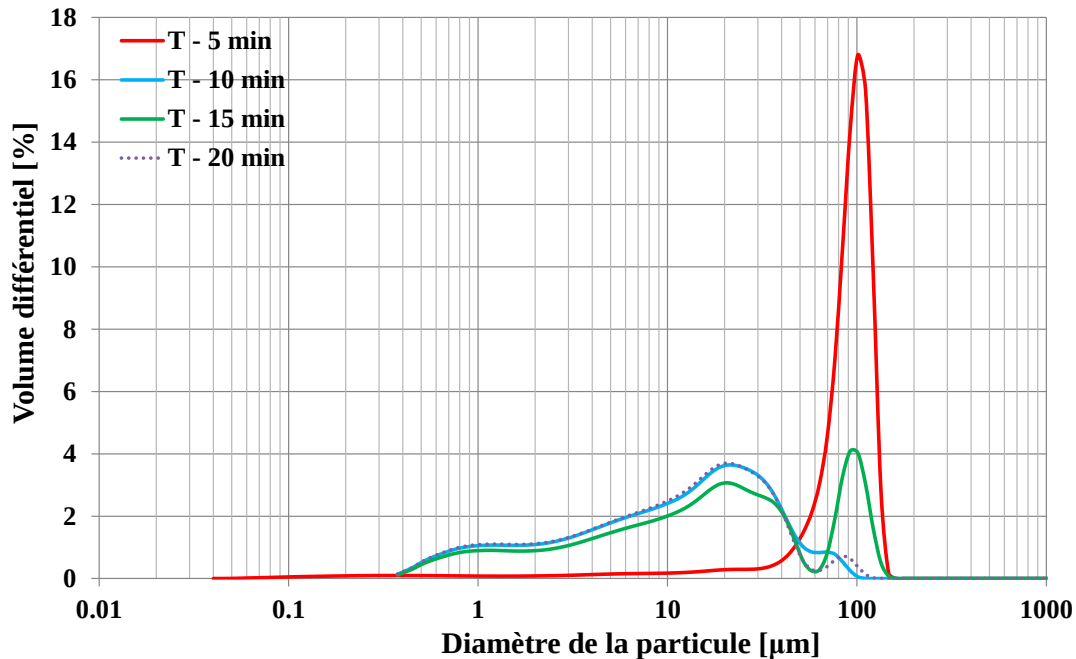


Figure V-18 - Analyse granulométrique de la pâte extraite de la plaque 2 pour différents temps d'agitation.

V.4 Cisaillement d'une suspension bidisperse

En plus de la difficulté d'extraction de la couche limite, il est difficile expérimentalement de décrire les phénomènes présents à l'interface béton frais-paroi (enrichissement en fines, mouvements des grains près de la paroi, etc.). Afin de montrer que la modélisation numérique aux éléments discrets peut apporter des réponses aux questions liées à la couche limite, une simulation numérique du cisaillement d'une suspension bidisperse sur une paroi rugueuse a été menée.

La simulation numérique a été réalisée en conditions périodiques sur un système bidisperse généré par RSA (sans sédimentation) et en supprimant la gravité pour reproduire « approximativement » le principe d'une suspension. Le volume de petites sphères occupe 30% du volume solide total, ce qui permet d'obtenir un système à compacité maximale. Le rapport entre le diamètre des grandes sphères (20 mm) et celui des petites (5 mm) est de 4. Le nombre total de sphères est d'environ 9000. Il est important de noter que la simulation a été réalisée sans cohésion entre les sphères.

La paroi rugueuse est modélisée par des rangées de sphères de diamètre 5 mm collées sur les plans inférieur et supérieur. La distance séparant deux rangées est 14 mm. La paroi inférieure se déplace avec une vitesse de 50 mm/s alors que la paroi supérieure reste fixe. La **Figure V-19** présente l'état du système initial et après un cisaillement de 6 secondes. Les courbes de la **Figure V-19** présentent la variation du rapport C de la compacité de petites sphères sur la compacité totale dans le milieu en fonction de la hauteur.

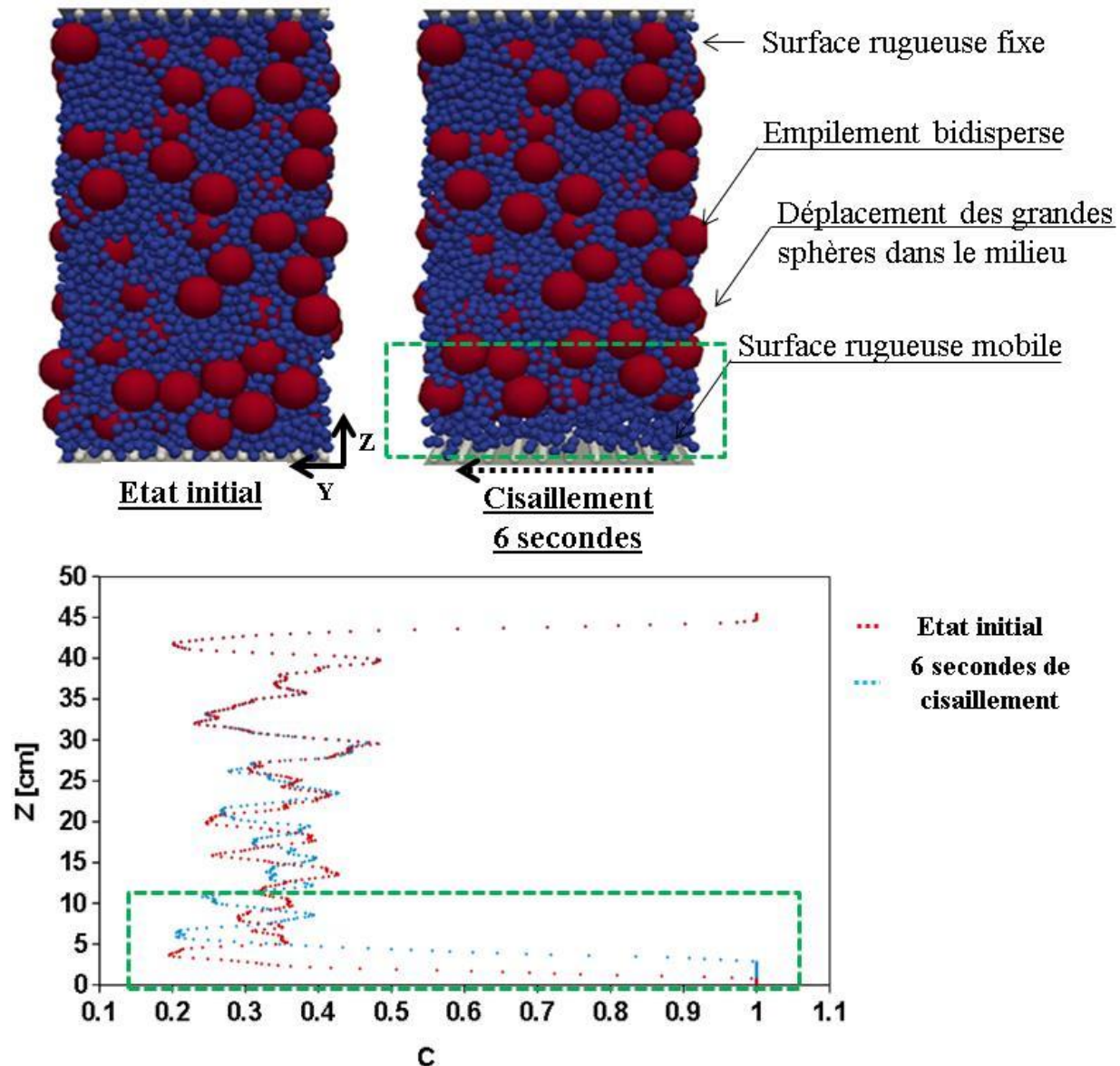


Figure V-19 - Concentration en petites sphères aux états initial et cisailé près de l'interface.

A l'état initial et au niveau des deux plans supérieur et inférieur, une augmentation importante du rapport C est observée. Ce rapport tend vers 1 à proximité des parois, ce qui signifie que l'on ne trouve que des petits grains le long des deux parois rugueuses. Ceci provient de l'effet de paroi des grosses particules qui est plus prononcé que celui des petites. En effet, près de la paroi les petites sphères remplissent les vides qui ne peuvent pas être remplis par les grandes sphères. Suite au cisaillement de l'empilement, les grandes sphères s'éloignent de la paroi et les petites se dirigent vers l'interface pour remplir les vides laissés par les grandes sphères, ce qui aboutit à un enrichissement en petites sphères à l'interface et une augmentation de la compacité de ces dernières (l'épaisseur de la zone dans laquelle le rapport C est proche de 1 passe de 0,1 cm avant cisaillement à 2,5 cm après 6 secondes de cisaillement). Cette variation de compacité n'est observée que près du plan inférieur parce qu'un temps de cisaillement de 6 secondes n'est pas suffisant pour que le cisaillement des sphères se propage jusqu'au plan supérieur. Ce résultat est encourageant et il montre que la réalisation des simulations pour différentes rugosités et composition de l'empilement pourrait expliquer les mécanismes de formation de la couche limite et la caractériser par la migration des sphères près de l'interface. En particulier, il montre qu'il existe, indépendamment de l'effet de paroi initial, une concentration en petites sphères le long de la paroi rugueuse au cours du cisaillement. Ainsi, la couche limite doit sa formation non pas seulement à l'existence initiale d'un effet de paroi géométrique, mais aussi à l'existence du cisaillement localisé qui tend à faire migrer les petites particules vers l'interface mobile.

V.5 Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre un protocole expérimental d'extraction de la couche près de l'interface. Nous avons également présenté un protocole pour son analyse granulométrique.

Contrairement à ce qui était attendu, les analyses granulométriques réalisées sur la poudre de ciment montrent qu'avec l'utilisation des ultrasons, le pourcentage volumique des agglomérats devient plus important. L'utilisation de l'héxamétaphosphate de sodium pour disperser les grains de ciment s'est également révélée décevante et un protocole d'analyse sans héxamétaphosphate et sans ultrasons a été retenu dans cette étude préliminaire.

En plus de la solution d'agitation et de l'utilisation des ultrasons, le temps d'agitation de la pâte à analyser peut affecter les résultats de l'analyse granulométrique. La reproductibilité de l'analyse en termes de temps d'agitation n'a pas pu être garantie ce qui nous empêche de conclure positivement de l'influence de la rugosité sur la composition de la couche limite. Il paraît donc indispensable d'améliorer le protocole proposé afin de disposer d'une méthode d'analyse permettant une détermination reproductible de la granulométrie et une élimination des agglomérats.

De nombreuses questions restent également posées sur le mode de prélèvement de la couche limite. Les essais réalisés sur le tribomètre plan-plan ont montré que le matériau récupéré à l'issue de la mesure tribologique n'était sans doute pas composé exclusivement de la couche limite. Il semble donc difficile de mettre en évidence une éventuelle modification de la composition de la couche limite en analysant un matériau dans lequel la proportion de la couche limite est inconnue. Les simulations réalisées au chapitre précédent peuvent de ce point de vue apporter quelques renseignements intéressants. Nous avons en effet montré que l'épaisseur de la couche cisailée était de l'ordre de 10 fois le diamètre moyen des particules du milieu cisailé. Il semblerait donc préférable de prélever une épaisseur de matériau de quelques centaines de microns. Des essais réalisés sur une pâte de ciment pure permettraient sans doute, dans un premier temps, de simplifier l'analyse granulométrique (absence de mélange de particules fines) et de récupérer une épaisseur plus fine de matériau. De plus, l'utilisation de plaques de rugosité rectifiée par usinage (plus significativement différente) semble préférable pour mettre en évidence une éventuelle influence de la rugosité sur la composition de la couche limite.

Suite à la simulation numérique du cisaillement d'une suspension de sphères bidisperses par une paroi rugueuse, un enrichissement en petites sphères a été observé près de l'interface, indépendamment de la présence de l'effet de paroi initial.

Les études expérimentales et numériques présentées dans ce chapitre ouvrent des nouvelles perspectives sur des études qui peuvent être réalisées par la suite sur la caractérisation et la compréhension des mécanismes de formation de la couche limite.

Conclusion générale et perspectives

En génie civil, la tribologie revêt une importance particulière. Dans le cas du béton frais, de nombreux auteurs ont montré le rôle déterminant du frottement béton frais-paroi sur la pompabilité du béton, sa poussée contre les coffrages et l'aspect des parements [4, 5, 9]. En effet, un frottement important entre les grains du béton et la paroi du tuyau peut faire obstacle à l'avancement du béton dans le tuyau ce qui aboutit à la formation de bouchons [3]. Au contraire, un frottement important entre le béton et le coffrage permet de réduire la pression exercée par le béton sur le coffrage [5, 8]. De plus, au moment du démoulage, le frottement entre les parois du coffrage et le béton peut rendre les produits de décoffrage impuissants à empêcher les arrachements dus à l'accrochage du béton sur la paroi. Afin de mieux comprendre les mécanismes impliqués dans le frottement béton frais-paroi, des tribomètres ont été conçus puis développés [3, 5]. Les essais tribologiques réalisés ont permis de mettre en évidence l'existence d'une couche, appelée couche limite, près de la paroi [3, 5, 8]. La plupart des auteurs s'accordent sur le fait que le frottement à l'interface béton-paroi dépend essentiellement des propriétés rhéologiques de cette couche, de sa composition et de la rugosité de la paroi [3, 5, 8]. Cependant, malgré les progrès réalisés dans la conception des appareils permettant d'étudier la couche limite, sa caractérisation (épaisseur, composition, mécanismes de formation, etc.) présente toujours des nombreuses difficultés.

Cette étude avait pour objectif de comprendre les phénomènes se produisant à l'interface à l'échelle des grains. L'étude a été réalisée sur un système simplifié permettant d'étudier l'influence des conditions à l'interface (pression, vitesse et rugosité) sur le comportement d'un milieu granulaire près d'une paroi rugueuse et sur son frottement contre la paroi. Le principe de ce système consiste à cisailer un milieu granulaire confiné par déplacement horizontal à vitesse imposée d'une paroi rugueuse. L'étude est basée sur deux approches : une approche expérimentale et une approche numérique.

Dans le chapitre bibliographique, nous avons présenté une synthèse des études réalisées sur la couche limite. Certains auteurs ont tenté de déterminer sa composition et son épaisseur [3, 8] tandis que d'autres ont été intéressés à expliquer les phénomènes macroscopiques en proposant des modèles phénoménologiques [44]. Les difficultés rencontrées (extraction, analyse, etc.) lors de la caractérisation de la couche limite ont été également présentées. En plus des travaux expérimentaux menés sur la couche limite, nous avons recensé les principales études expérimentales et numériques réalisées pour étudier l'interface milieu granulaire-paroi rugueuse. Nous avons fini le chapitre 1 par la description des principes de la méthode aux éléments discrets utilisée pour nos simulations. La synthèse des études expérimentales et numériques a révélé la nécessité de modéliser l'interface béton frais-paroi.

Les essais expérimentaux sur des empilements relatifs à cette étude sont rapportés dans le chapitre 2. Le dispositif expérimental conçu consiste à déplacer des baguettes crénelées sous un empilement monodisperse constitué de billes de verre. Le milieu est confiné en ajoutant des

masses sur l'empilement. Afin de contrôler la vitesse de déplacement de la baguette et de mesurer la force de frottement exercée par les billes sur la baguette (force tangentielle), l'ensemble du dispositif est monté sur un tribomètre plan-plan. L'étude de l'influence de la rugosité est réalisée en faisant varier la hauteur des créneaux et la distance séparant deux créneaux successifs. Trois baguettes de rugosité croissante, notées R1, R2 et R3, sont utilisées.

L'ensemble des résultats expérimentaux obtenus avec le tribomètre montre tout d'abord que la force tangentielle augmente linéairement avec la force normale. En revanche, la vitesse de déplacement n'influe ni sur la force tangentielle, ni sur le nombre de billes sortantes. L'observation des mécanismes près des baguettes montre ensuite que le franchissement de quelques gros obstacles (sortir d'un creux de profondeur de $0,2d_{\text{bille}}$) nécessite une force plus importante que de multiples franchissements d'obstacles réduits (cas des baguettes R1 et R2). L'étude de l'influence de la force normale sur le profil de cisaillement montre qu'une force normale limitée (inférieure à 175 N) n'a pas d'influence remarquable sur les profils de cisaillement. De plus, L'épaisseur de la bande de billes cisailée dépend de la rugosité de la baguette. Elle est d'environ quatre couches de billes pour une rugosité importante (R3) alors qu'elle est inférieure à trois couches de billes pour la rugosité la plus faible (R1). Comme les essais expérimentaux réalisés sur le béton frais par Vanhove [5], les essais réalisés sur des empilements monodisperses ont montré que la rugosité a une influence sur le comportement du milieu près de l'interface.

Le dispositif utilisé expérimentalement est ensuite modélisé au moyen d'un code numérique basé sur la Méthode des Eléments Discrets. Les principes du code numérique et les données nécessaires à son application sont présentés dans le chapitre 3. La modélisation du dispositif permet d'étudier l'influence des différents paramètres qui peuvent intervenir dans les résultats et de montrer par comparaison avec les résultats expérimentaux que le code développé est capable de modéliser un essai de cisaillement.

La rugosité de la baguette est modélisée en collant des grains monodisperses sur un plan. L'étude paramétrique montre que les coefficients de frottement (grain/grain et grain/paroi) ont une influence assez limitée sur la force tangentielle et le profil de cisaillement. De plus, le frottement entre les grains du milieu et les parois latérales est négligeable devant le frottement entre les grains du milieu et la paroi rugueuse.

La comparaison entre les essais expérimentaux et la modélisation numérique est généralement satisfaisante surtout au niveau du profil de cisaillement et du nombre de grains sortants. La comparaison de la force tangentielle est délicate du fait des incertitudes expérimentales (précision des mesures), de la modélisation des créneaux de la baguette par des paquets de grains, du contrôle de la pression normale appliquée sur l'empilement et du jeu de paramètres d'entrée utilisés (non fixés à partir d'essais sur les billes).

Toutefois, les essais expérimentaux réalisés et la modélisation du dispositif montrent que ce dernier présente des limites rendant difficile l'étude approfondie de l'influence des conditions de l'interface sur le comportement du milieu cisailé. La limitation expérimentale est due aux effets de bords latéraux, aux blocages de billes, etc... De plus, la modélisation montre que les mouvements des grains sont largement affectés par les parois latérales. L'effet des bords se traduit par la formation d'un tourbillon au centre de l'empilement. L'interface milieu granulaire-paroi rugueuse doit donc être étudiée en conditions périodiques (en l'absence des parois latérales) ou dans une boîte de taille largement plus grande que la taille des grains. La limitation expérimentale et les différents avantages de la modélisation numérique nous ont amenés à étudier, via la modélisation numérique, l'interface milieu granulaire-paroi rugueuse par cisaillement d'un milieu semi-infini (conditions périodiques). Cette étude fait l'objet du chapitre 4.

Le système simulé consiste à cisailier, à vitesse imposée, un milieu granulaire légèrement polydisperse (10%), placé entre deux parois rugueuses. Les sollicitations (pression, vitesse et gravité) appliquées au système sont symétriques.

La variation du diamètre des grains collés sur la paroi montre que :

- La contrainte tangentielle est indépendante de la vitesse de déplacement de la paroi. Elle varie en revanche linéairement avec la pression normale. Toutefois, ces deux paramètres n'ont pas une influence notable sur l'état de cisaillement du milieu (profil de vitesse).
- Il existe une rugosité critique (comprise entre d_1 et d_{25}) à partir de laquelle la contrainte tangentielle devient indépendante de la rugosité de la paroi et le milieu reste entièrement cisailé.
- Pour une rugosité inférieure à la rugosité critique, la contrainte tangentielle augmente avec l'augmentation de la rugosité. De plus, une bande de cisaillement se forme près de l'interface.
- La variation de la contrainte tangentielle est strictement liée à la vitesse de glissement relative entre le milieu et la paroi et à l'épaisseur de la couche cisailée.

L'analogie entre l'écoulement du béton dans un tuyau et la formation de la bande de cisaillement par cisaillement d'un milieu granulaire suggère que la couche limite pourrait être caractérisée (sa présence, son épaisseur) à partir de la bande cisailée formée pour une rugosité de diamètre d_p inférieur à d_{moyen} .

La variation de la concentration des grains collés sur la paroi montre que:

- La formation de la couche limite semble être plus liée à la profondeur de pénétration des grains dans les aspérités qu'à la concentration surfacique des aspérités sur la paroi rugueuse.

- Une profondeur des creux de la rugosité supérieure ou égale à la moitié de d_{moyen} semble suffisante pour cisailer uniformément le milieu granulaire.

L'interprétation des résultats obtenus sur la rugosité en créneaux présente des difficultés liées à la cristallisation importante du milieu observée près de la paroi.

Après l'étude numérique de l'interface milieu granulaire-paroi rugueuse, l'influence de la rugosité de la paroi sur la composition d'une pâte de béton frais extraite près de l'interface est étudiée. Des protocoles d'extraction et d'analyse granulométrique sont proposés. Toutefois, la récupération de la couche de béton frais à la surface de la paroi rugueuse et le protocole d'analyse granulométrique employés ne permettent pas d'obtenir des résultats suffisamment reproductibles pour pouvoir conclure sur l'effet de la rugosité sur la composition de la couche limite.

Suite à la simulation numérique du cisaillement d'une suspension de sphères bidisperses par une paroi rugueuse, un enrichissement en petites sphères est observé près de l'interface, indépendamment de la présence de l'effet de paroi initial. Ce résultat est encourageant et montre que la réalisation de simulations pour différentes rugosités et différentes compositions de l'empilement pourrait expliquer les mécanismes de formation de la couche limite et la caractériser par la migration des sphères près de l'interface.

Perspectives

L'étude réalisée sur des milieux monodisperses a permis de mettre en évidence l'influence de la rugosité et des conditions de cisaillement sur la formation d'une couche cisailée à l'interface. Ce travail doit maintenant être poursuivi sur des empilements polydisperses à étendue granulaire limitée afin d'étudier la migration des particules près de l'interface. Ceci permettrait d'apporter plus de réponses sur l'épaisseur de la couche limite et sur les mécanismes de sa formation. De plus, une telle étude permettrait de mettre en évidence la différence entre l'effet de paroi purement géométrique (observable à l'issue de la phase de confinement) et la formation d'une couche riche en fines consécutive au cisaillement.

Dans le cadre de ce travail, des essais préliminaires ont été réalisés sur l'influence de la rugosité sur l'analyse granulométrique de la couche extraite près de la paroi. Ces essais présentés dans le chapitre 5 ont mis en évidence les difficultés rencontrées aussi bien sur l'extraction d'une couche de faible épaisseur que sur l'analyse granulométrique de ses constituants. En se basant sur l'étude réalisée sur des empilements secs, il semblerait préférable d'extraire une couche de matériau d'épaisseur de quelques centaines de microns. Compte tenu de la complexité de la couche limite et du protocole d'extraction, il serait intéressant, dans un premier temps, de réaliser des études sur un matériau plus simple (pâte de ciment) et avec des plaques de rugosité contrôlée. L'utilisation de pâte pure permettrait sans doute de simplifier l'analyse granulométrique et de récupérer une épaisseur plus fine de matériau.

Il serait préférable de représenter la rugosité modélisée par un profil dans lequel les paramètres de rugosité (R_a , R_t , etc.) pourraient être identifiés. Ceci permettrait de modéliser une rugosité plus proche de la réalité.

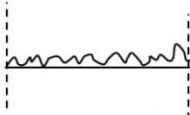
Enfin, à plus long terme, il serait utile de poursuivre le travail numérique en tenant compte de la présence du fluide interstitiel. Les mécanismes observés dans le cas des empilements doivent en effet être confirmés sur des suspensions concentrées. Cette étude nécessiterait la prise en compte d'un couplage simplifié fluide-grains, de manière à pouvoir simuler un nombre suffisant de particules.

Problématique : Influence des caractéristiques du béton frais et des conditions à l'interface (rugosité, pression de contact et vitesse de cisaillement) sur la formation de la couche limite.



Système tribologique complexe

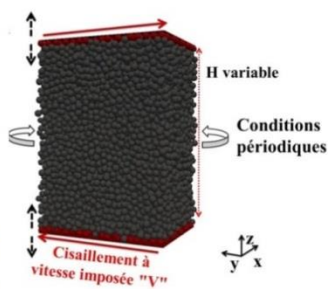
Aspérités irrégulières



Couche limite : eau + fines



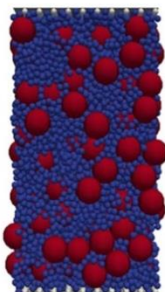
Système simplifié



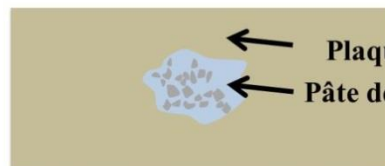
Perspectives

A court terme

Composition du milieu



Récupération de la couche sur un matériau plus facile à étudier type pâte de ciment



A long terme

- Modélisation et description d'une rugosité plus réaliste (R_t , R_a , etc..)
- Modélisation d'une suspension avec un couplage fluide-grain

Références

- [1] J. M. Georges, " Frottement, usure et lubrification : La tribologie ou science des surfaces ". Eyrolles, 2003.
- [2] F. Chapdelaine, " Étude fondamentale et pratique sur le pompage du béton ". Thèse de Doctorat, Université Laval, 2007.
- [3] T. T. Ngo, " Influence de la composition des bétons sur les paramètres de pompage et validation d'un modèle de prévision de la constante visqueuse ". Thèse de Doctorat, Université de Cergy-Pontoise, 2009.
- [4] D. Kaplan, " Pompage des bétons ". Thèse de Doctorat, École Nationale des ponts et Chaussées, 2000.
- [5] Y. Vanhove, " Contribution à l'étude du frottement d'un béton autoplaçant contre une surface métallique - Application aux poussées contre les coffrages". Thèse de Doctorat, Université d'Artois, 2001.
- [6] R. Schjödtt, " Calculation of pressure of concrete on forms ". *Proceedings, American Society of Civil Engineering*, vol. 81, pp. 1-16, 1955.
- [7] S. Rodin, " Pressure of concrete on formwork ". *Proceedings, Institution of Civil Engineers, London*, vol. 1, pp. 709-746, 1952.
- [8] S. Bouharoun, " Comportement tribologique des huiles de décoffrage à l'interface béton/coffrage - Influence de la formulation du béton ". Thèse de Doctorat, Université d'Artois, 2011.
- [9] L. Libessart, " Influence de la composition des agents de démoulage à l'interface coffrage/béton - Impact sur l'esthétique des parements en béton ". Thèse de Doctorat, Université d'Artois, 2006.
- [10] L. Bocquet, " Approche physique du frottement ". *597ème conférence de l'Université de tous les savoirs*, Paris, 2005.
- [11] P. Alart, " Mécanique – Génie des matériaux – Acoustique ". Rapport de Conjoncture, 2004.
- [12] M. Godet, " The third body approach, A mechanical view of wear ". *Wear*, vol. 100, pp. 437-452, 1984.
- [13] O. Combarieu, " Estimation du frottement latéral sol-pieu à partir du pressiomètre et des

- caractéristiques de cisaillement ". Bulletin des laboratoires des Ponts et Chaussées, Rouen, 1999.
- [14] A. Hassan, " Etude expérimentale et numérique du comportement local et global d'une interface sol granulaire-structure ". Thèse de Doctorat, Université Joseph Fourier, Grenoble, 1995.
 - [15] S. d. t. d. r. e. Autoroutes, Ouvrages de soutènement MUR 73, 1993.
 - [16] C. Djelal, " Designing and perfecting a tribometer for the study of friction of a concentrated clay-water mixture against a metallic surface ". *Materials and Structures*, vol. 34, pp. 51-58, 2001.
 - [17] A. Perrot, Y. Mélinge, D. Rangeard, F. Micaelli, P. Estellé et C. Lanos, " Utilisation d'une extrudeuse a piston pour étudier le comportement rhéologique et tribologique d'un matériau à fort seuil de cisaillement à faible taux de cisaillement ". *XXXème Rencontres AUGC-IBPSA*, Chambéry, 2012.
 - [18] Y. Mélinge, V. H. Hoang, D. Rangeard, A. Perrot and C. Lanos, " Study of tribological behaviour of fresh mortar against a rigid plane wall ". *European Journal of Environmental and Civil Engineering* , vol. 17, pp. 419-429, 2013.
 - [19] F. Aouadja, " Comportement des mélanges eau-argile concentrés vis à vis du procédé d'extrusion ". Thèse de Doctorat, I.N.S.A Rennes, 1988.
 - [20] O. Pouliquen, Y. Forterre and S. Le Dizes, " Slow dense granular flows as a self induced ". *Advances in Complex Systems*, pp. 441-450, 2001.
 - [21] O. Pouliquen and R. Gutfraind, " Stress fluctuations and shear zones in quasistatic granular chute flows ". *Physical Review E* 53, 552, 1996.
 - [22] D. Hirshfeld and D.C. Rapaport, " Granular flow from a silo: Discrete-particle simulations in three dimensions ". *The European Physical Journal E*, vol. 4, pp. 193-199, 2001.
 - [23] N. E. Abriak et R. Gourves, " Ecoulement d'un matériau granulaire à travers un orifice : effet de paroi ". *Rev. Franç. Géotech. n° 61*, pp. 47-61, 1992.
 - [24] D. Kaplan, F. De Larrard and T. Sedran, " Design of Concrete Pumping Circuit ". *Materials Journal*, vol. 102, pp. 110-117, 2005.
 - [25] P. Bartos, " Fresh Concrete : Properties and Tests ". *Elsevier*, 1992.
 - [26] P. F. G. Banfill, " Rheology of Fresh Cement and Concrete ". *Spon*, 1991.
 - [27] C. Ferraris, F. De Larrard and N. Martys, " Fresh concrete rheology: recent developments ". *Materials Science of Concrete VI*, pp. 215-241, 2001.

- [28] D. Feys, G. De Schutter and R. Verhoeven, " Parameters influencing pressure during pumping of self-compacting concrete ". *Materials and Structures*, pp. 533-555, 2013.
- [29] M. Jolin, F. Chapdelaine, F. Gagnon and D. Beaupré, " Pumping Concrete: A Fundamental and Practical Approach ". *ASCE American Society of Civil Engineers*, Whistler, british Columbia, Canada, 2006.
- [30] D. Kaplan, F. De Larrard and T. Sedran, " Avoidance of blockages in concrete pumping process ". *ACI Materials Journal*, pp. 183-189, 2005.
- [31] B. Chouinard, " Étude des relations entre la rhéologie du béton et sa pompabilité ". Mémoire de maîtrise, Université Laval, 1998.
- [32] A. N. Ede, " The resistance of concrete pumped through pipelines ". *Magazine of Concrete research*, vol. 9, pp. 129-140, 1957.
- [33] P. Bigot. <http://fr.scribd.com/doc/234695292/Chap-4-Dynamique-Fluides-Visqueux>.
- [34] A. N. Alekseev, " On the calculation of resistance in Pipe of Concrete Pumps ". *Mekhanizatia Stroitel'sta (Moscow)*, vol. 9, pp. 8-13, 1952.
- [35] J. Best and R. Lane, " Testing for Optimum Pumpability of Concrete ". *Concrete International*, vol. 2, 1960.
- [36] R. Weber, " The transport of concrete by pipeline ". *Cement and Concrete Association Library Translation No. 129, Cement and Concrete Association*, 1963.
- [37] M. Morinaga, " Pumpability of concrete and pumping pressure in pipelines ". *Proceeding RILEM, Seminar on Fresh Concrete : Important Properties and their Measurement, Leeds*, vol. 7, pp. 1-39, 1973.
- [38] R. D. Browne and P. B. Bamforthe, " Tests to Establish Concrete Pumpability ". *ACI Journal*, vol. 74, pp. 193-207, 1977.
- [39] N. Bleschik, " Les propriétés mécaniques et la rhéologie des bétons ". *Minsk*, 1977.
- [40] Y. Tanigawa, H. Mori, K. Tsutsui and Y. Kurokawa, " Constitutive law and yield conditions of fresh concrete ". *Transaction of the Japan Concrete Institute*, vol. 9, pp. 47-54, 1987.
- [41] H. Fujiwara and S. Nagataki, " Study on self-compactibility of high-fluidity concrete ". *Procedings of the first international RILEM Symposium*, pp. 167-174, 1999.
- [42] T. Proske, " Formwork Pressure Asserted by Self-Compacting Concrete "[in German]. Thèse de Doctorat, Université technique de Darmstadt, 2007.

- [43] S. H. Kwon, Q. T. Phung, H. Y. Park, J. H. Kim and S. P. Shah, " Experimental Study on Effect of Wall Friction on Formwork Pressure of Self-Consolidating Concrete ". *6th International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete, Montreal, Canada*, pp. 773-782, 2010.
- [44] C. Djelal, Y. Vanhove and A. Magnin, " Tribological behaviour of self compacting concrete ". *Cement and Concrete research*, vol. 34, pp. 821-828, 2004.
- [45] Y. Vanhove, C. Djelal and A. Magnin, " Device for studying fresh concrete friction ". *Cement Concrete and Aggregates*, vol. 26, pp. 35-41, 2004.
- [46] G. H. Tattersall and P. F. G. Banfill, "The Rheology of Fresh Concrete ". *Pitman, London*, 1983.
- [47] T.T. Ngo, E.H. Kadri, R. Bennacer and F. Cussigh, " Use of tribometer to estimate interface friction and concrete boundary layer composition during the fluid concrete pumping ". *Construction and Building Materials*, vol. 24, pp. 1253-1261, 2010.
- [48] S. Bouharoun and N. Leklou , " Effect of cement grains on the tribological behavior of fresh concrete ". *15th International Conference on Experimental Mechanics*, 2012.
- [49] C. Djelal, " Analyse du phénomène de frottement des mélanges eau-argile concentrés contre des surfaces métalliques ". Thèse de Doctorat, INSA de Rennes, 1991.
- [50] C. Beaumel, " Extrusion des pâtes d'argiles ".Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble, 1998.
- [51] " La mesure de rugosité ? Quelques normes...et plusieurs dizaines de paramètres ". *Mesures Mécaniques* 758, 2003.
- [52] G. Schwendenmann, " Compréhension des phénomènes intervenant lors de la mise en place des bétons dans les coffrages. Développement de techniques nucléaires ". Thèse de Doctorat, Université d'Artois, 2003.
- [53] G. Schwendenmann, " Study of self consolidating concretes stability during their placement ". *Construction and Building Materials*, vol. 35, pp. 101-108, 2012.
- [54] GdR-MiDi, " On dense granular flows ". *Euro. Phys. J. E*, vol. 14, pp. 341-365, 2004.
- [55] P. Jop, Y. Forterre and O. Pouliquen, " A rheology for dense granular flows ". *Nature*, vol. 441, pp. 727-730, 2006.
- [56] F. Chevoir et J. Roux, " Colloque physique et mécanique des matériaux granulaires ". *Laboratoire Central des Ponts et Chaussées.*, 2000.
- [57] J. Rajchenbach, " Granular flows ". *Advances in Physics*, vol. 49, pp. 229-256, 2000.

- [58] H. J. Hermann, J. P. Hovi and S. Luding, " Physics of Dry Granular Media. ". Kluwer Academic Publishers, 1998.
- [59] S. L. Silbert, G. S. Grest, S. J. Plimpton and D. Levine, " Boundary effects and self-organisation in dense granular flows ". *Phys. of Fluids*, vol. 14, 2002.
- [60] R. Delannay, M. Louge, P. Richard, N. Taberlet and A. Valance, " Towards a theoretical picture of dense granular flows down inclines ". *Nature materials*, vol. 6, pp. 99-108, 2007.
- [61] Y. C. Zhou, B. H. Xu, A. B. Yu and P. Zulli, " An experimental and numerical study of the angle of repose of coarse spheres ". *Powder Tech*, vol. 4125, pp. 45-54, 2002.
- [62] N. Taberlet, " Ecoulements gravitaires de matériaux granulaires ". Thèse de Doctorat, Université de Rennes I, 2005.
- [63] J. F. Métayer, " Stabilité et propriétés rhéologiques d'empilements granulaires confinés ". Thèse de Doctorat, Université de Rennes I, 2008.
- [64] C. Mankoc, A. Janda, R. Arévalo, J. M. Pastor, I. Zuriguel, A. Garcimartin and D. Maza, " The flow rate of granular materials through an orifice ". *Granular Matter*, pp. 407-414, 2007.
- [65] A. Janda, R. Harich, I. Zuriguel, D. Maza, P. Cixous and A. Garcimartin , " Flow-rate fluctuations in the outpouring of grains from a two-dimensional silo ". *Physical Review E*, vol. 79, 2009.
- [66] S.T. Thoroddsen and A.Q. Shen, " Granular jets ". *Physics of Fluids*, vol. 13, 2001.
- [67] G. Prado, " Propriétés de jets granulaires denses et mesure d'une tension de surface granulaire ". Université Bordeaux I, 2012.
- [68] F. Chevoir, M. Prochnow, P. Moucheron, F. Da Cruz, F. Bertrand, J. P. Guilbaut, P. Coussot and J. N. Roux, " Dense granular flows in a vertical chute ". *Powders & Grains*, pp. 399-402, 2001.
- [69] E. Azanza, F. Chevoir and P. Moucheron., " Experimental study of collisional granular flows down an inclined plane ". *Fluid Mech*, pp. 199-227, 1999.
- [70] O. Pouliquen and F. Chevoir, " Dense flows of dry granular materials ". *C. R.Physique*, pp. 163-175, 2002.
- [71] O. Pouliquen, " Scaling laws in granular flows down a rough inclined plane ". *Phys.Fluids*, vol. 11, pp. 542-548, 1999.
- [72] A. Daerr and S. Douady, " Two types of avalanche behavior in granular media ". *Nature*,

- vol. 399, pp. 241-243, 1999.
- [73] M. Pronchow, " Ecoulements denses de grains secs ". Thèse de Doctorat, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 2002.
 - [74] C. Goujon, N. Thomas and B. Dalloz-Dubrujeaud, " Monodisperse Dry Granular Flows on Inclined Planes : Role of Roughness ". *Eur. Phys. J. E*, vol. 11, pp. 147-157, 2003.
 - [75] C. Goujon, " Ecoulements granulaires bidisperses sur plans inclinés rugueux ". Thèse de Doctorat, Ecole Polytechnique Universitaire de Marseille, 2004.
 - [76] G. Koval Junior, " Comportement d'interface des matériaux granulaires ". Thèse de Doctorat, Ecole Nationale Des Ponts et Chaussées, 2008.
 - [77] G. Koval, J. N. Roux, A. Corfdir and F. Chevoir, " Annular shear of cohesionless granular materials: From the inertial to quasistatic regime ". *Physical Review E*, vol. 79, 2009.
 - [78] P. Moucheron, F. Bertrand, G. Koval, L.Tocquer, S. Rodts, J. N. Roux, A. Corfdir and F. Chevoir, " MRI investigation of granular interface rheology using a new cylinder shear apparatus ". *Magnetic Resonance Imaging*, vol. 28, pp. 910-918, 2010.
 - [79] G. Koval, F. Chevoir, J. N. Roux, J. Sulem and A. Corfdir, " Interface roughness effect on slow cyclic annular shear of granular materials ". *Granular Matter*, vol. 13, pp. 525-540, 2011.
 - [80] F. Da Cruz, " Ecoulement de grains secs : Frottement et blocage ". Thèse de Doctorat, Ecole Nationale de Ponts et Chaussées, 2004.
 - [81] F. Schlosser et A. Guilloux, " Le frottement dans le renforcement des sols ". *Revue française de géotechnique* n°16, 1981.
 - [82] Y. Yoshimi and T. Kishida, " Friction Between Sand and Metal Surface ". *Proceedings, 10th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 1981.
 - [83] M. Uesugi and H. kishida, " Influential factors of friction between steel and dry sands ". *Soils and Foundations*, vol. 26, pp. 33-46, 1986.
 - [84] R. D. Hryciw and M. Irsyam, " Behavior of Sand Particles Around Rigid Ribbed inclusions During Shear ". *Soils and Foundations*, vol. 33, pp. 1-13, 1993.
 - [85] J. E. Dove and J. B. Jarrett, " Behavior of Dilative Sand Interface in a Geotribology Framework ". *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, vol. 128, pp. 25-37, 2002.
 - [86] A. Zervos, P. Papanastasiou and I. Vardoulakis , " A finite element displacement formulation for gradient elastoplasticity ". *International Journal for Numerical Methods in*

Engineering, vol. 50, pp. 1369-1388, 2001.

- [87] P. Unterreiner, I. Vardoulakis, M. Boulon and J. Sulem, " Essential features of a Cosserat continuum in interfacial localisation ". *Proceeding of Third International Workshop on Localization and Bifurcation Theory for Soils and Rocks*, Balkema, Rotterdam, 1994.
- [88] C. S. Chang and L. Ma, " Elastic material constants for isotropic granular solids with particle rotation ". *Int. J. Solids Structures*, vol. 29, pp. 1001-1018, 1992.
- [89] J. Tejchman, " Numerical simulation of filling in silos with a polar hypoplastic constitutive model ". *Powder Technology*, pp. 227-239, 1998.
- [90] O. C. Zienkiewicz, R. L. Taylor and J. Z. Zhu, " The Finite Element Method-Its Basis and Fundamentals ". *Butterworth-Heinemann, Sixth Edition*, 2005.
- [91] P. Ciarlet, " The finite element method for elliptic problems ". Series "Studies in Mathematics and its Applications", North-Holland, Amsterdam, 1978.
- [92] J. Jirousek et F. Frey, " Méthodes des éléments finis - Analyse des structures et milieux continus-Traité de génie civil ". Presses Polytechniques et Universitaires Romandes (PPUR), 2009.
- [93] J. Debard et L. Yves, " Résistance des matériaux (RDM) : calcul des structures par la méthode des éléments finis ". Presses Institut Universitaire et Technologie du Mans (PIUTM), 2002.
- [94] E. Rey, " Caractérisation de sols hétérogènes par des méthodes géophysique ". Thèse de Doctorat, Université Joseph Fourier, Grenoble I, 2005.
- [95] C. O' Sullivan, " Particulate discrete element modelling : A geomechanics perspective ". Publisher : CRC press, 2011.
- [96] M. Jean, V. Acary and Y. Monerie, " Non Smooth Contact dynamics approach of cohesive materials ". *Philosophical Transactions : Mathematical, Physical Engineering Sciences, The Royal Society, London A359(1789)*, pp. 2497 - 2518, 2001.
- [97] J. Fortin and P. Coorevits, " Selecting contact particles in dynamics granular mechanics systems ". *Journal of Computational and Applied Mathematics*, vol. 168, pp. 207-213, 2004.
- [98] I. Sanni, E. Bellenger, J. Fortin and P. Coorevits, " A reliable algorithm to solve 3D frictional multi-contact problems : Application to granular media ". *Journal of Computational and Applied Mathematics*, vol. 234, pp. 1161-1171, 2010.
- [99] M. Jean, " The non-smooth contact dynamics method ". *Computer Methods in Applied*

Mechanics and Engineering, vol. 177, pp. 235-257, 1999.

- [100] J. J. Moreau, " Some numerical methods in multibody dynamics : Application to granular materials ". *Eur. J. of Mech, A. Solids*, vol. 13, pp. 93-114, 1994.
- [101] P. A. Cundall, " A computer model for simulating progressive large scale movements of blocky rock systems ". *Proceedings of the Symposium of the international Society of Rock Mechanics*, vol. 1, pp. 132-150, 1971.
- [102] P. A. Cundall and O. D. L. Strack, " A discrete numerical model for granular assemblies ". *Géotechnique*, vol. 29, pp. 47-65, 1979.
- [103] F. Y. Fraige and P.A. Langston, " Integration schemes and damping algorithms in distinct element models ". *Advanced Powder Technology*, vol. 15, pp. 227-245, 2004.
- [104] M. Liu, W. Cao and Z. Fan, " Convergence and stability of the semi-implicit Euler method for a linear stochastic differential delay equation ". *Journal of Computational and Applied Mathematics*, vol. 170, pp. 255-268, 2004.
- [105] H. C. J. Bruneel and I. De Rycke, " Quicktrace : a fast algorithm to detect contact ". *Int. J. Numer. Meth. Engng.*, vol. 54, pp. 299-316, 2002.
- [106] N. Chrisochoides and D. Nave, " Parallel delaunay mesh generation kernel ". *Int. J. Numer. Meth. Engng.*, vol. 58, pp. 161-176, 2003.
- [107] T. Pöschel and T. Schwager, " Computational Granular Dynamics ". *Springer, Berlin*, 2005.
- [108] B. Muth, M .K. Müller, P. Eberhard and S. Luding, " Collision Detection and Administration Methods for Many Particles with Different Sizes ". *Wills B. editor. Proceedings of MEI (minerals engineering international)*, pp. 1-18, 2007.
- [109] J. Schafer, S. Dippled and D. E. Wolf, " Force Schemes in Simulations of Granular Materials ". *J. Phys. I France*, vol. 6, pp. 5-20, 1996.
- [110] F. Radjai and F. Dubois, " Discrete-element Modeling of Granular Materials ". Editor : John Wiley & sons, 2011.
- [111] G. H. Ristow, " Simulating granular flow with molecular dynamics ". *J. Phys. I France*, vol. 2, pp. 649-662, 1992.
- [112] G. H. Ristow, " Dynamics of granular materials in a rotating drum ". *Europhys. Lett.*, vol. 34, pp. 263-268, 1996.
- [113] P. Pizette and S. Rémond, " Experimental and numerical studies of the effect of rolling friction for sandpile formation ". *WCCM XI-ECCM V*, Barcelona, 2014.

- [114] H. Hertz, " Über die Berührung fester elastische Körper ". *J. Reine und angewandte Mathematik*, vol. 92, pp. 156-171, 1882.
- [115] N.V. Brilliantov, F. Spahn, J.M. Hertzsch and T. Pöschel, " A model for collisions in granular gases". *Phys. review E*, vol. 53, pp. 5382-5392, 1996.
- [116] P.A. Langston, U. Tuzun and D.M. Heyes, " Discrete element simulation of granular flow in 2D and 3D hoppers: dependence of discharge rate and wall stress on particle interactions ". *Chem. Eng. Sci*, vol. 50, pp. 967-987, 1995.
- [117] R. D. Mindlin and H. Deresiewicz, " Elastic spheres in contact under varying oblique forces ". *Journal of Applied Mechanics*, vol. 20, pp. 327-344, 1953.
- [118] Y. C. Zhou, B. D. Wright, R.Y. Yang, B. H. Xu and A. B. Yu , " Rolling friction in the dynamic simulation of sandpile formation ". *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 1999.
- [119] F. P. Beer and E. R. Johnson, " Mechanics for engineers - statics and dynamics ". *MacGraw-Hill*, New York, 1976.
- [120] D. M. Nuruzzaman and M. A. Chowdhury, " Effect of Normal load and Sliding Velocity on Friction Coefficient of Aluminum Sliding Against Different Pin Materials ". *American Journal of Materials Science*, pp. 26-31, 2012.
- [121] W. Rasband, " imageJ ". *National Institutes of Health*, Bethesda MD, USA, imagej.nih.gov/ij/.
- [122] G. D. Scott and D. M. Kilgour, " The density of random close packing of spheres ". *BRIT. J. APPL. PHYS. (J. PHYS. D)*, vol. 2, 1969.
- [123] G. D. Scott, " Packing of spheres ". *Nature, Lond*, 188, pp. 908-9, 1960.
- [124] R. Rutgers, *Nature, Lond*, 193, pp. 465-6, 1962.
- [125] A. E. R. Westman and H. R. Hugill, " Packing of Particles ". *American Ceramic Society*, vol. 13, pp. 767-79, 1930.
- [126] D. Bideau and A. Hansen, " Disorder and granular media ". Elsevier, North-Holland, Amsterdam, 1993.
- [127] P. C. Mangelsdorf and E. L. Washington, *Nature, Lond*, 187, 930, 1960.
- [128] S. Yerazunis, S. W. Cornille and B. Wintner, *Nature, Lond*, 207, pp. 835-7, 1965.
- [129] O. Reynolds, " On the dilatancy of media composed of rigid particles in contact. With experimental illustrations ". *Philosophical Magazine*, vol. 20, pp. 469-481, 1885.

- [130] K. El Cheikh, P. Pizette, C. Djelal, S. Rémond et Y. Vanhove, " Etude du comportement à l'interface d'un milieu granulaire sur une paroi rugueuse ". *32èmes Rencontres de l'AUGC*, Polytech Orléans, 4-6 juin 2014.
- [131] K. El Cheikh, C. Djelal, Y. Vanhove, P. Pizette et S. Rémond, " Etude de l'interface béton/paroi : Modélisation à l'échelle des grains ". *Matériaux et Tribologie*, Laboratoire de Physique et Mécanique Textiles, ENSISA, Mulhouse, 26-28 mai 2014.
- [132] S. Rémond, " DEM simulation of small particles clogging in the packing of large beads ". *Physica A : Statistical Mechanics and its Applications*, vol. 389, pp. 4485-4496, 2010.
- [133] A. K. Manounou, " Modélisation discrète de la microstructure des agglomérats de particules fines en suspension ". Thèse de Doctorat, Ecole Mines de Douai, 2013.
- [134] A. K. Manounou and S. Rémond, " Discrete element modeling of the microstructure of fine particle agglomerates in sheared dilute suspension ". *Physica A*, vol. 412, pp. 66-83, 2014.
- [135] S. Rémond and P. Pizette, " A DEM hard-core soft-shell model for the simulation of concrete flow ". *Cement and Concrete research*, vol. 58, pp. 169-178, 2014.
- [136] P. Pizette, K. Wu, S. Rémond, F. Becquart et N. E. Abriak, " Modélisation par la méthodes des éléments discrets pour étudier le comportement mécanique des matériaux granulaires recyclés non liés ". *International Symposium on Environment, Catalysis and Process Engineering*, Villeneuve d'Ascq, 2013.
- [137] C. L. Martin, D. Bouvard and S. Shima, " Study of particle rearrangement during powder compaction by the discrete element method ". *J. Mech. Phys. Solids*, vol. 51, pp. 667-693, 2003.
- [138] ParaView. [En ligne] : <http://www.paraview.org>.
- [139] B. Widom, " Random Sequential Addition of Hard Spheres to a Volume ". *The Journal of Chemical Physics*, vol. 44, pp. 3888-3894, 1966.
- [140] E. L. Hinrichsen, J. Feder and T. Jossang, " Geometry of random sequential adsorption ". *Journal of Statistical Physics*, vol. 44, pp. 793-827, 1986.
- [141] R. Jullien and P. Meakin, " Random sequential adsorption with restructuring in two dimensions ". *Journal of Physics A, Mathematical and General*, vol. 25, pp. 189-194, 1992.
- [142] P. Meakin, I. Majid, S. Havlin et H. E. Stanley, " Topological properties of diffusion limited aggregation and cluster-cluster aggregation ". *J. Phys. A, Math.Gen.*, vol. 17, pp. 975-981, 1984.

- [143] W. M. Visscher et M. Bolsterli,, " Random packing of equal and unequal spheres in two and three dimensions ". *Nature*, vol. 239, pp. 504-507.
- [144] M. J. Powell, " Computer-simulated random packing of spheres ". *Powder Technology*, vol. 25, pp. 45-52, 1980.
- [145] C. Chen, L. G. M. ASCE and J. Zhang, " Modeling Permanent of Unbound Granular Materials under Repeated Loads ". *International journal of Géomechanics*, vol. 10, pp. 236-241, 2010.
- [146] C. Kröner, " Experimental and numerical description of rapid granular flows and some baseline constraints for simulating 3-dimensional granular flow dynamics ". Thèse de Doctorat. Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, Bonn, 2013.
- [147] T. Travers, M. Ammi, D. Bideau, A. Gervois , J. C. Messenger and J. P. Troadec, Groupe de Physique Cristalline, " Mechanical size effects in 2d granular media ". *J. Phys France* 49, pp. 939-948, 1988.
- [148] M. Babic, H.H. Shen, and H.T. Shen, " The stress tensor in granular shear flows of uniform, deformable discs at high solid concentrations ". *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 219, pp. 81-118, 1990.
- [149] E. Aharonov and D. Sparks, " Shear profiles and localization in simulations of granular materials ". *Phys. Rev. E*, vol. 65, 2002.
- [150] F. Chevoir, F. DA Cruz, P. G. Rognon et J-N. Roux, " Ecoulements granulaires denses ". *17ème Congrès Français de Mécanique*, Troyes, 2005.
- [151] E. Azéma et F. Radjai, " Structuration des écoulements granulaires ". *21ème Congrès Français de Mécanique*, Bordeaux, France, 2013.
- [152] P. Richard, " Etude de la géométrie de milieux granulaires modèles tridimensionnels par simulations numériques ". Thèse de Doctorat, Université de Rennes I, Rennes, 2000.
- [153] E. Azanza, " Ecoulements granulaires bidimensionnels sur plan incliné ". Thèse de Doctorat, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, 1998.
- [154] C. S. Campbell and C. E. Brennen., " Chute flows of granular material : some computer simulations ". *J. Appl. Mech.*, vol. 52, pp. 172-178, 1985.
- [155] F. G. Calvetti, G. Combe, and J. Lanier, " Experimental micromechanical analysis of a 2d granular material : relation between structure evolution and loading path ". *Mech. Cohes. Frict. Mat.*, vol. 2, pp. 121-163, 1997.

- [156] G. K. Junior, " Comportement d'interface des matériaux granulaires ". Thèse de Doctorat, École Nationale des Ponts et Chaussées, 2008.
- [157] H. P. Cao, " Modélisation par Elements Discrets rigides et/ou déformables des milieux granulaires et des troisièmes corps solides ". Thèse de Doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 2011.
- [158] E. Azéma, " Étude numérique des matériaux granulaires à grains polyédriques : rhéologie quasi-statique, dynamique vibratoire, application au procédé de bourrage du ballast ". Thèse de Doctorat, Université Montpellier 2, 2007.
- [159] I. Albert, P. Tegzes, R. Albert, J.G. Sample, A-L. Barabasi , B. Kahng and P. Schiffer, " Stick-slip fluctuations in granular drag ". *Phys. Rev. E*, vol. 64, p. 1307, 2001.
- [160] O. Pozo, " Etude de la réponse au cisaillement d'un milieu granulaire humide non-saturé ". Thèse de Doctorat, Université de Nice-Sophia Antipolis, 2006.
- [161] H. D. Le, " Etude de l'effet de la couche limite sur les profils de vitesse du béton pompé ". Thèse de Doctorat, Université Cergy-Pontoise, 2014.
- NF P 18-404 (décembre 1981) Bétons – Essais d'étude, de convenance et de contrôle – Confection et conservation des éprouvettes (Indice de classement : P18-404).
- NF P 18-451 Bétons- Essai d'affaissement au cône d'Abrams – slump test.
- NF P 18-305 (décembre 1994) Bétons – Béton prêt à l'emploi.
- ISO 12085:1996, International Organization for Standardization (ISO) NF EN ISO 12085, Spécifications géométriques des produits, Méthode du profil, Paramètres liés au motif, 1998.
- NF NFE 05-015, Etats de surface des produits, Prescriptions , 1986.

Annexe 1

Critères de la rugosité

La rugosité ou l'état de la surface est décrit par l'ensemble des irrégularités d'une surface de type micrographiques. Sur le profil de la surface, une coupe perpendiculaire à la surface traitée, les irrégularités apparaissent sous forme des aspérités « pics » et des cavités « creux » qui se répartissent également de part et d'autre d'une "ligne moyenne".

Dans les normes, la rugosité n'est définie qu'en deux dimensions. La micro-géométrie des surfaces est caractérisée par des paramètres normalisés [ISO 12085] [NF NFE 05-015].

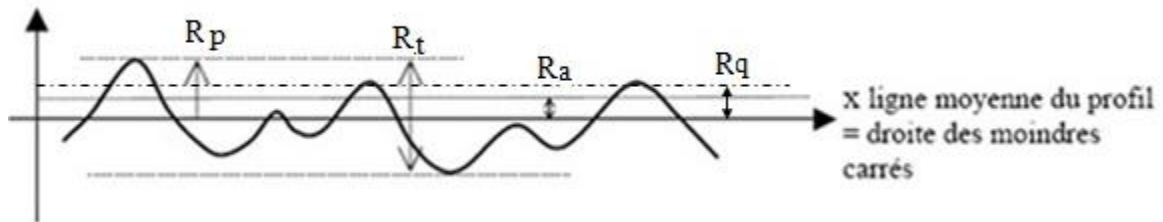


Figure V-20 - Paramètres géométriques de la norme 'ligne moyenne'.

Généralement, on distingue deux types de paramètres de rugosité [Figure V-20]:

- Les paramètres géométriques : Rt et Rp.
- Les paramètres statistiques : Ra et Rq.

Rt est la différence d'altitude entre le point le plus élevé et le point le plus bas du profil, Rp est l'altitude du point le plus élevé du profil par rapport à la ligne moyenne et Ra est la moyenne arithmétique de la valeur absolue des altitudes du profil par rapport à la ligne moyenne (équivalente à la rugosité absolue).

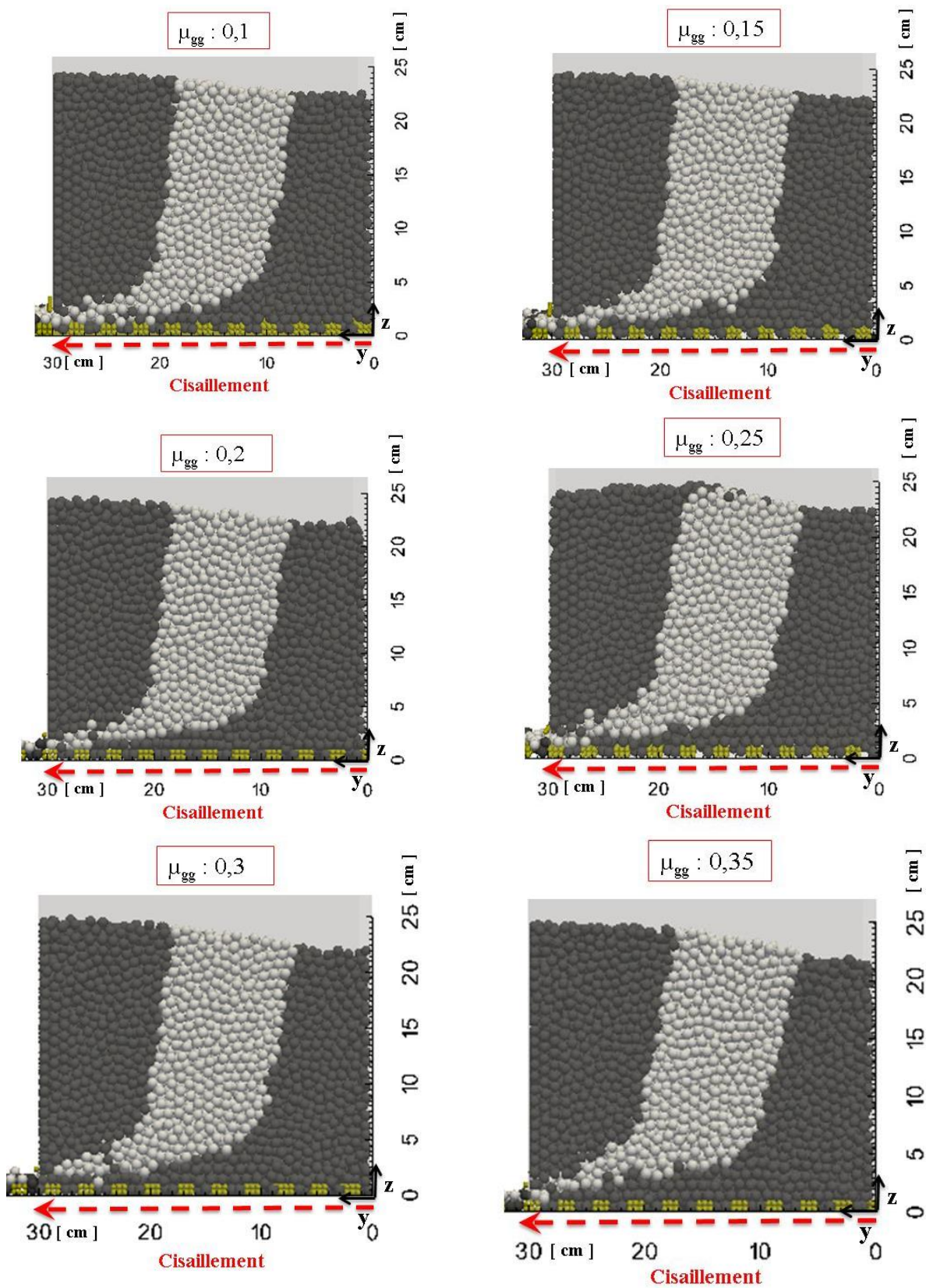
Ce dernier paramètre est représentatif de l'amplitude verticale de dispersion des altitudes autour de la ligne moyenne. Soit $y(x)$ l'altitude du point d'abscisse x et L la longueur explorée par le stylet, Ra est alors défini par :

$$R_a = \frac{1}{L} \int_0^L |y(x)| dx \quad R_q = \sqrt{\frac{1}{L} \int_0^L y^2(x) dx}$$

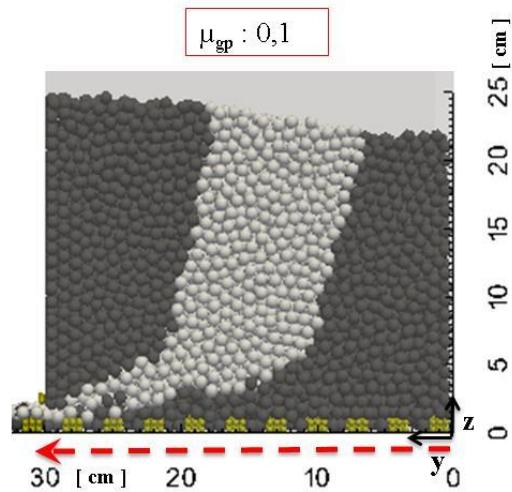
Où L est la longueur d'évaluation, $y(x)$ est la hauteur du profil évalué dans une position quelconque x et R_q la moyenne quadratique des altitudes du profil par rapport à la ligne moyenne.

Annexe 2

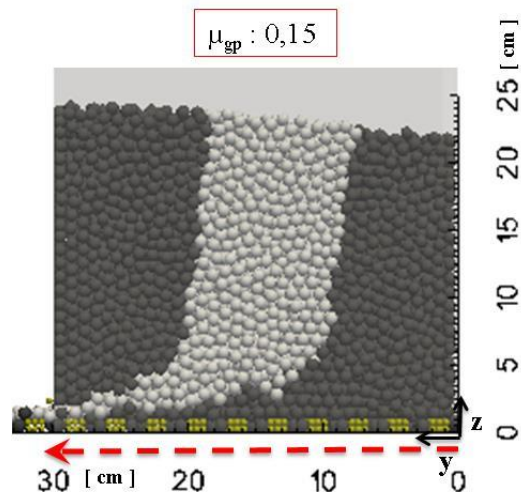
Profils de cisaillement : coefficient de frottement de glissement (μ_{gg})



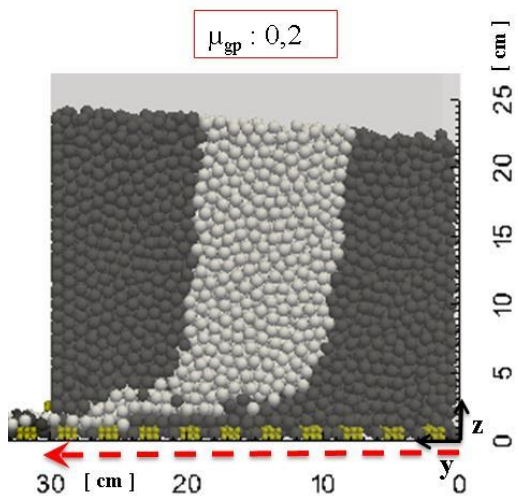
Profils de cisaillement : coefficient de frottement de glissement (μ_{gp})



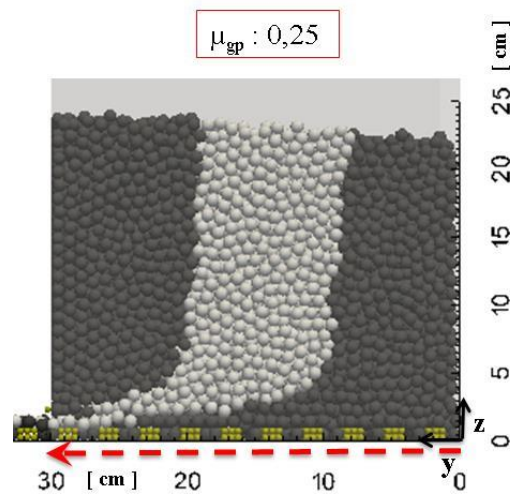
Cisaillement



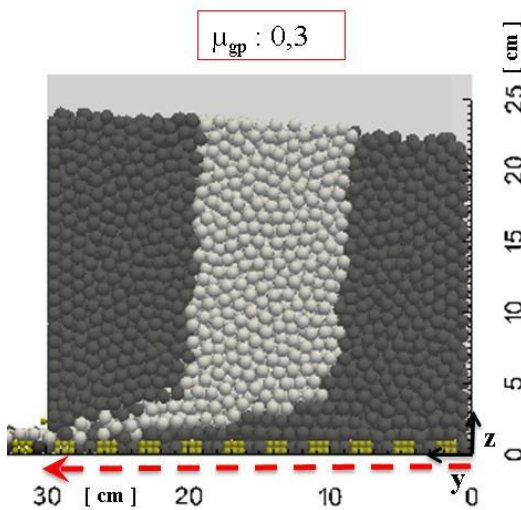
Cisaillement



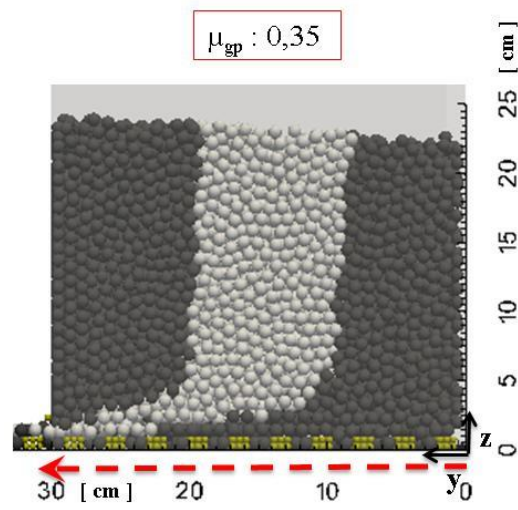
Cisaillement



Cisaillement

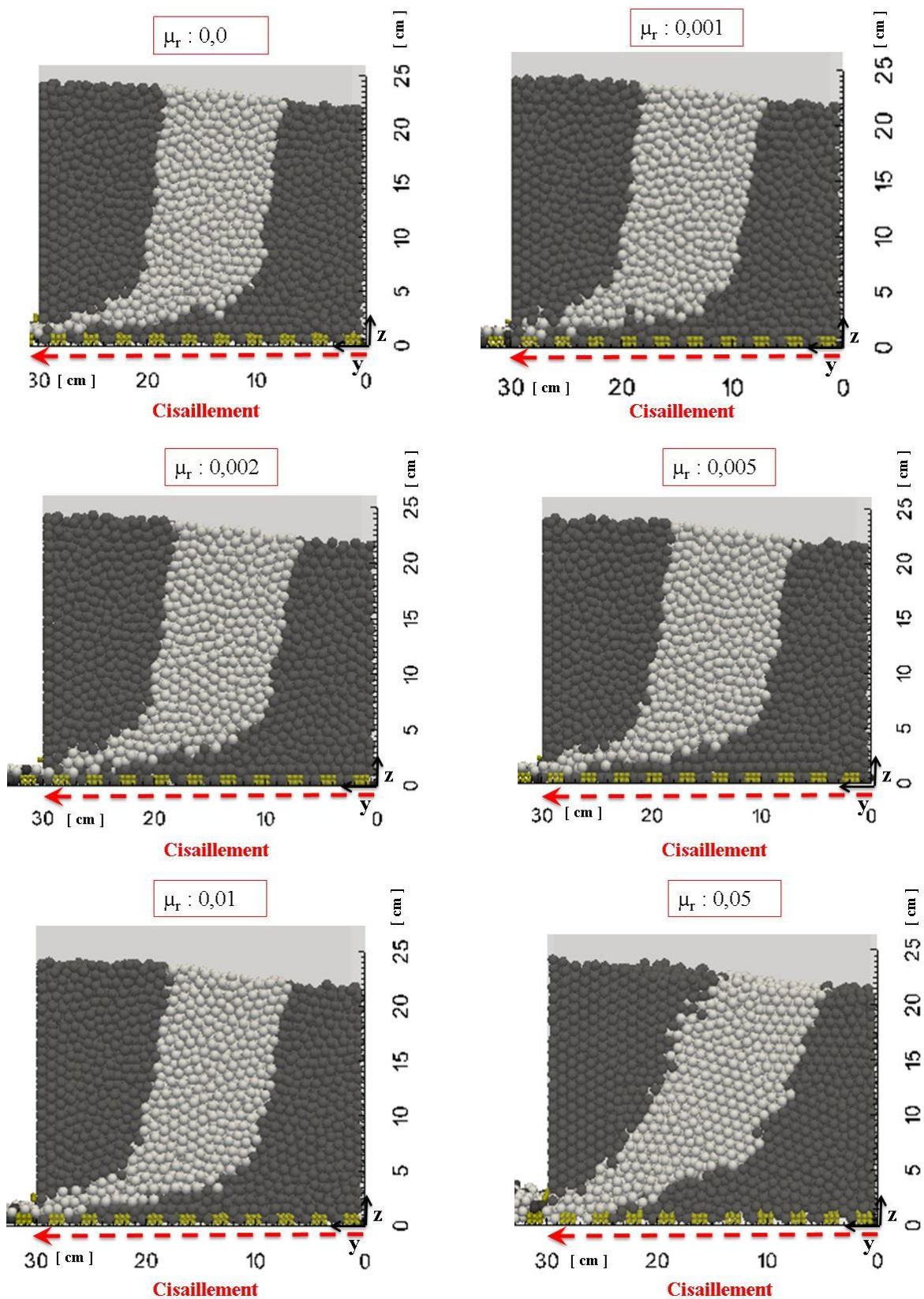


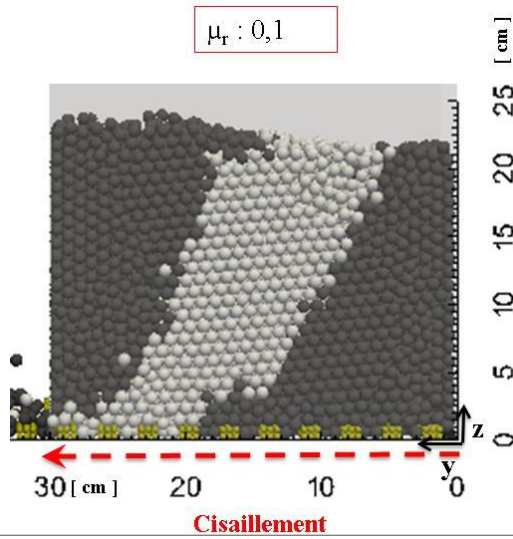
Cisaillement



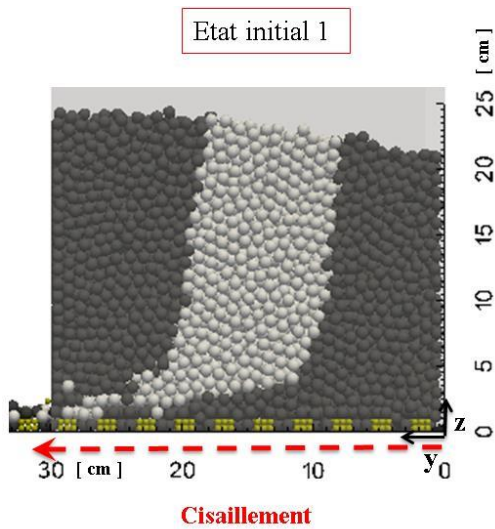
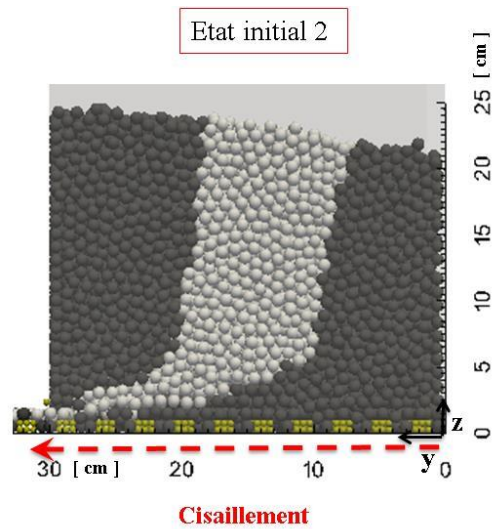
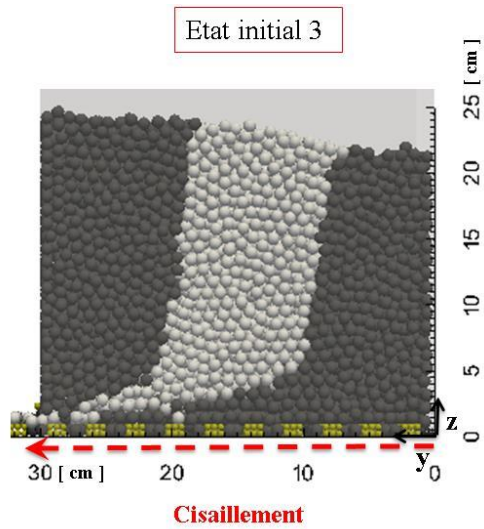
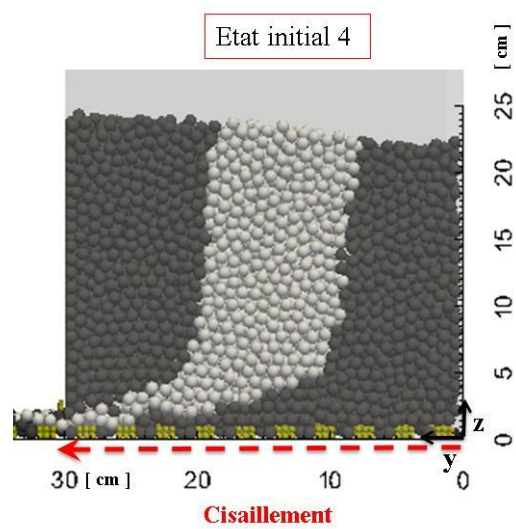
Cisaillement

Profils de cisaillement : coefficient de roulement (μ_r)

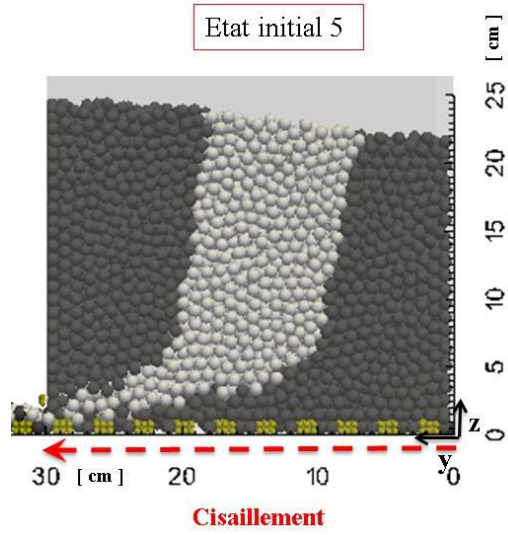




Profils de cisaillement : Etat initial différent



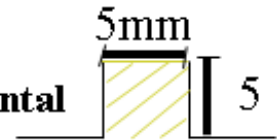
Etat initial 5



R1 Numérique

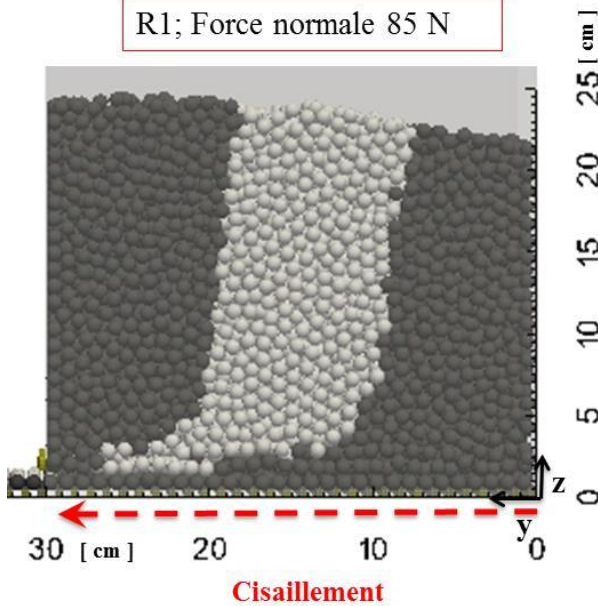


R1 Expérimental

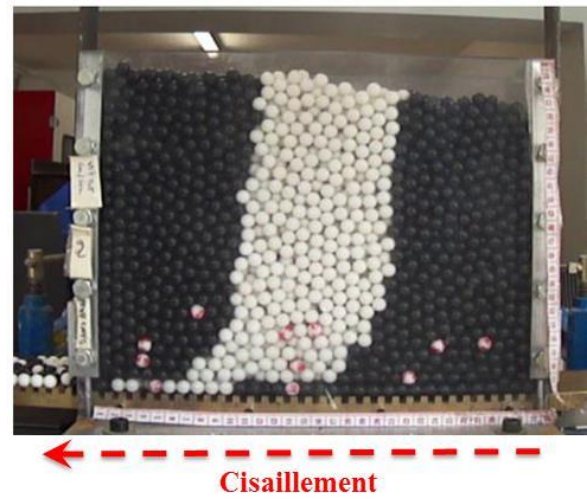


Coefficient de frottement de glissement $\mu = 0,15$
Coefficient de roulement $\mu_r = 0,002$

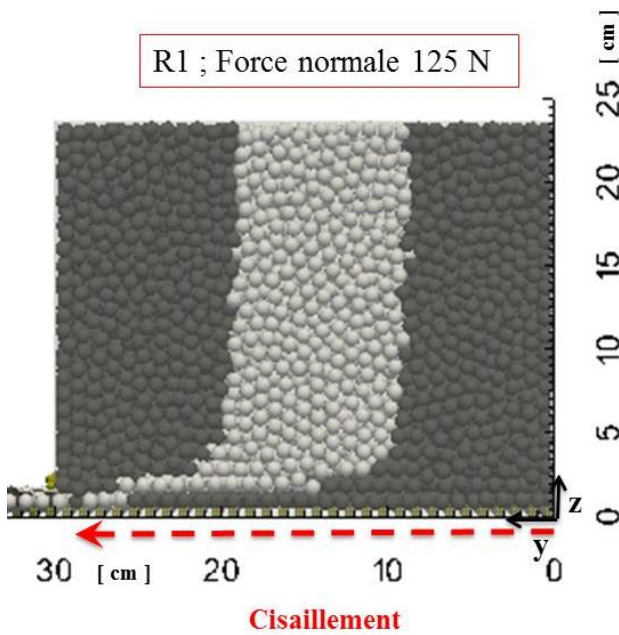
R1 ; Force normale 85 N



R1 ; Force normale 85 N



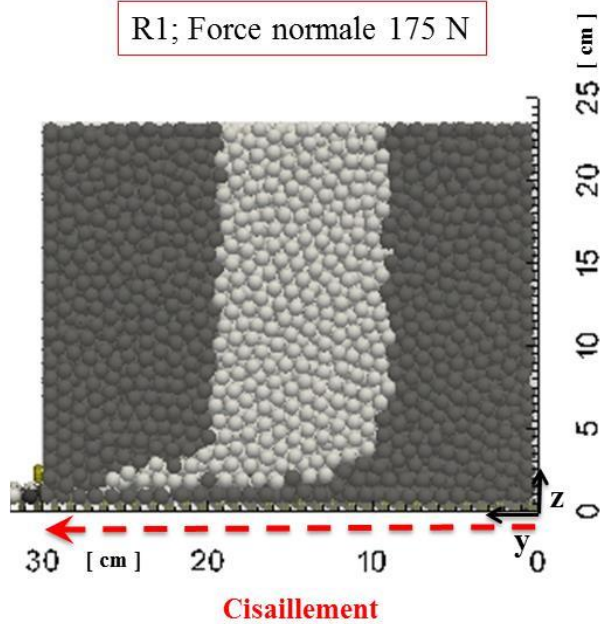
R1 ; Force normale 125 N



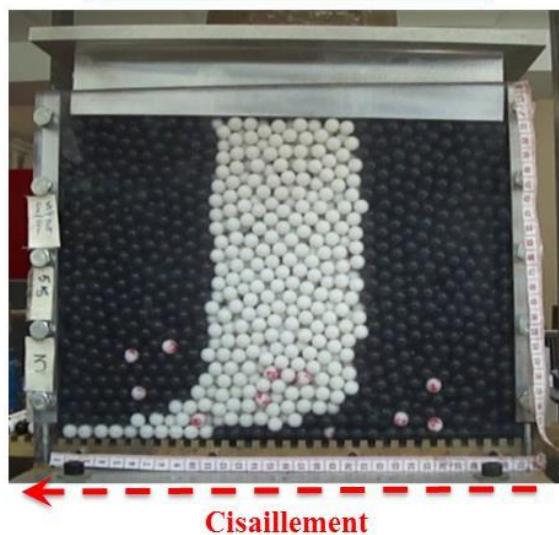
R1 ; Force normale 125 N



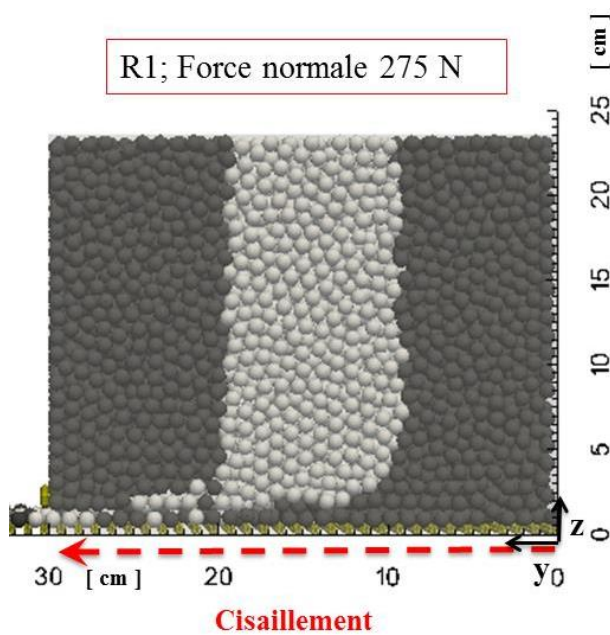
R1; Force normale 175 N



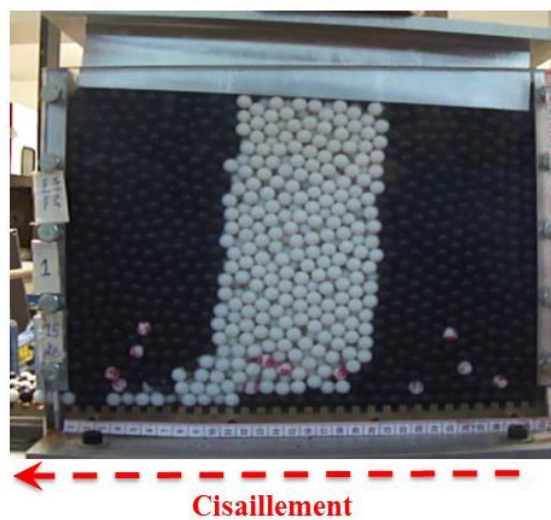
R1 ; Force normale 175 N

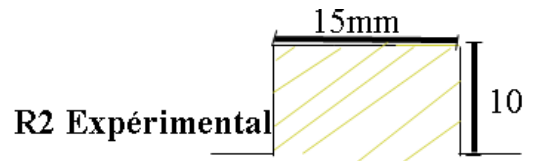


R1; Force normale 275 N

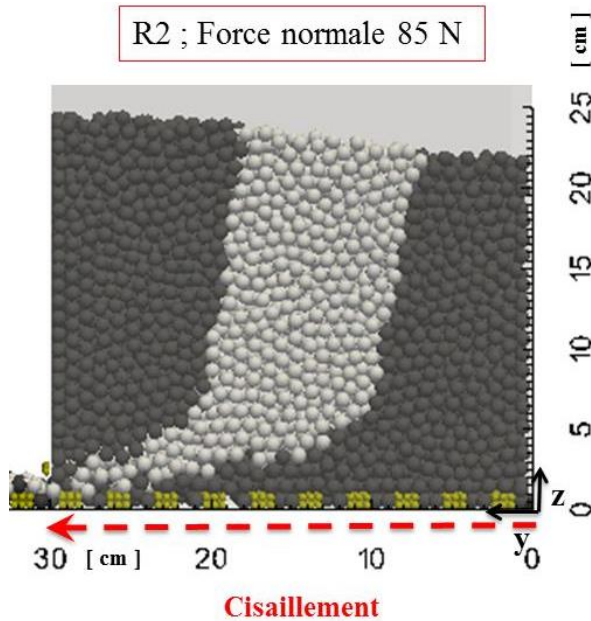
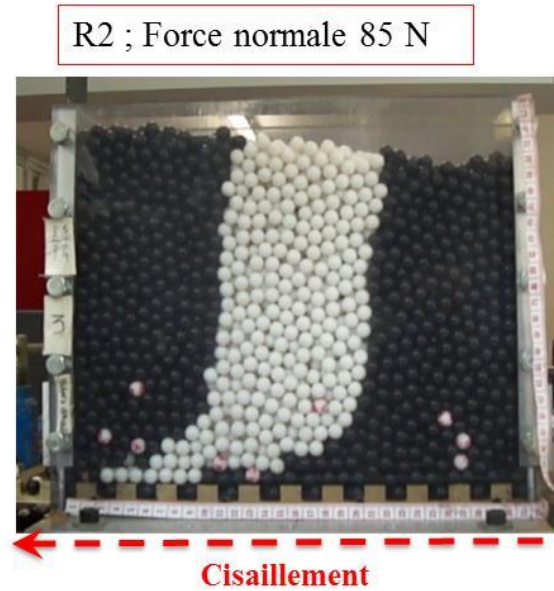
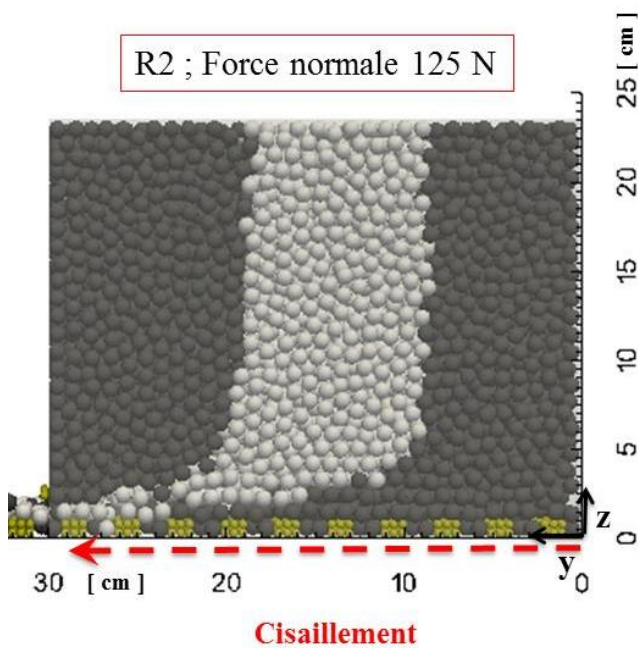
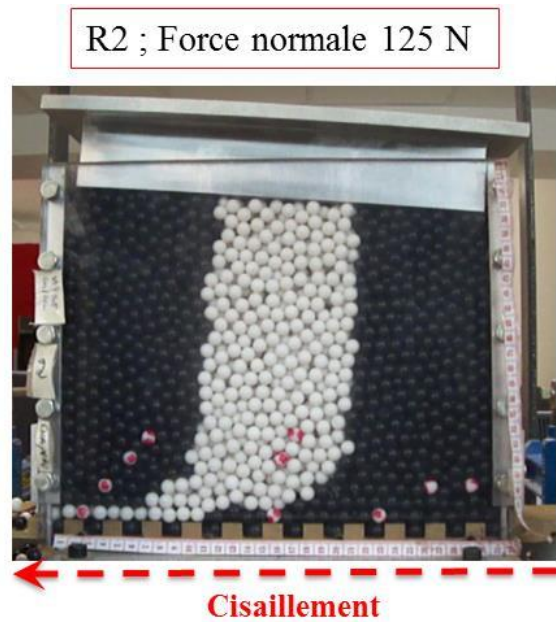


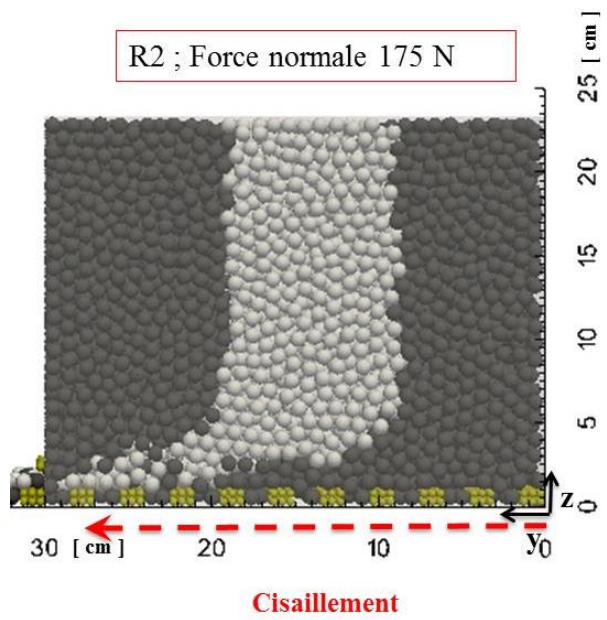
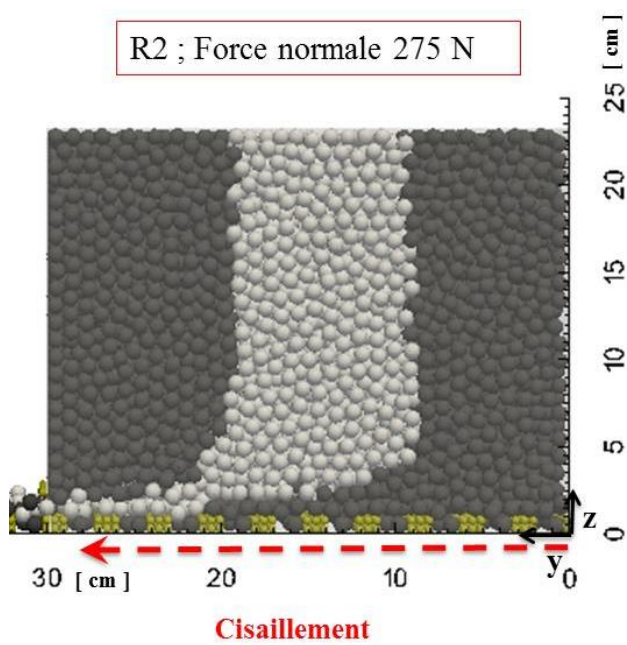
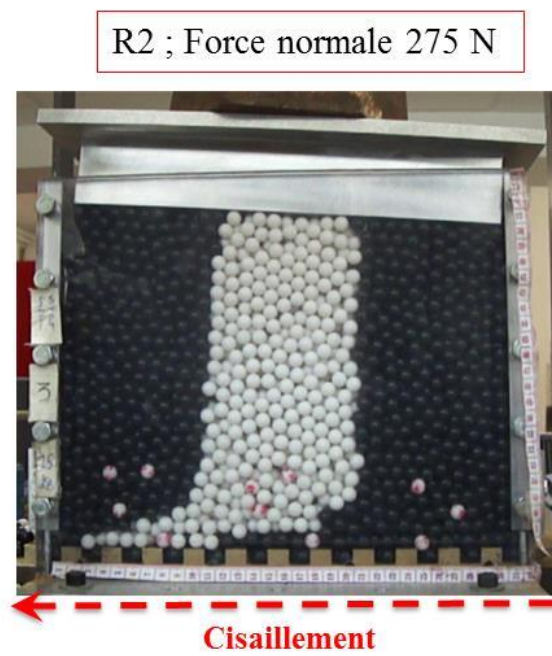
R1 ; Force normale 275 N





Coefficient de frottement de glissement $\mu = 0,15$
 Coefficient de roulement $\mu_r = 0,002$

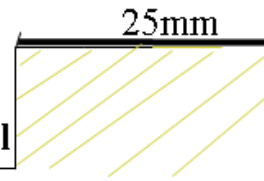




R3 Numérique

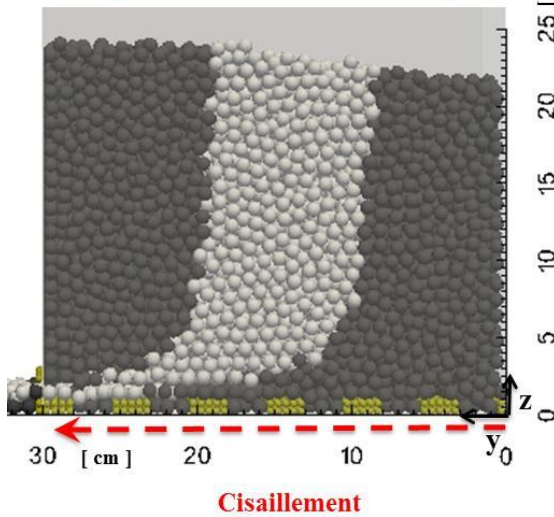


R3 Expérimental



Coefficient de frottement de glissement $\mu = 0,15$
Coefficient de roulement $\mu_r = 0,002$

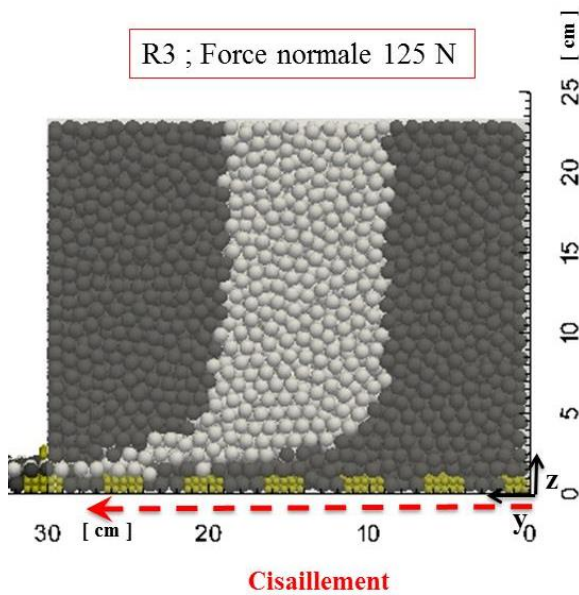
R3 ; Force normale 85 N



R3 ; Force normale 85 N

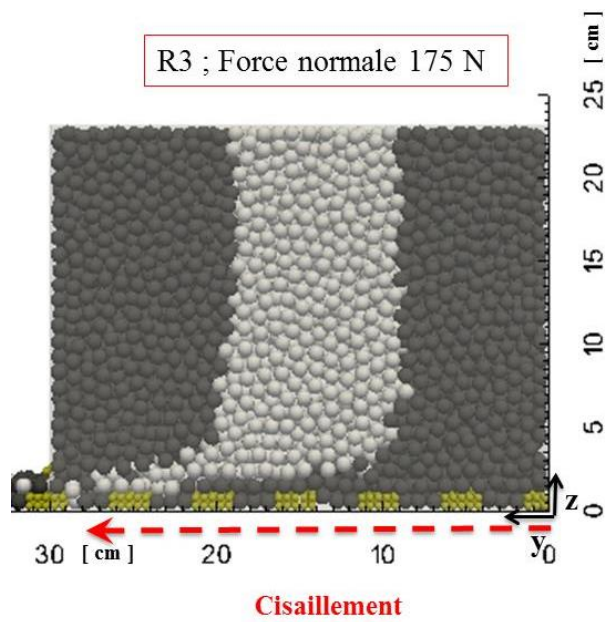
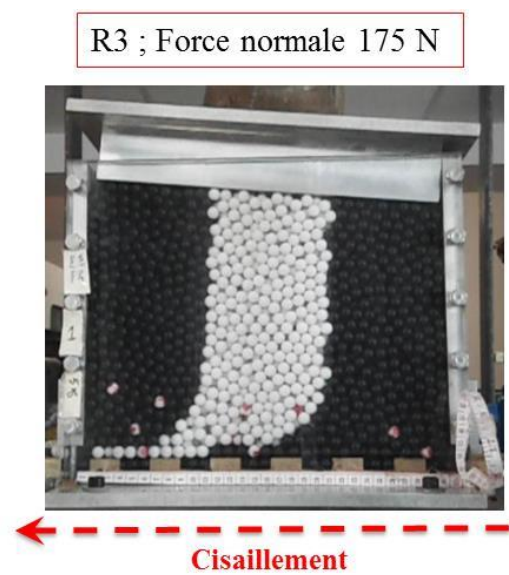
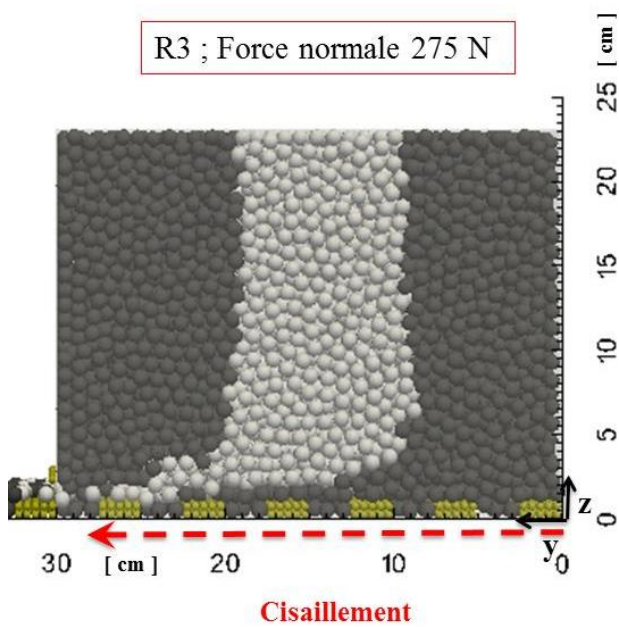
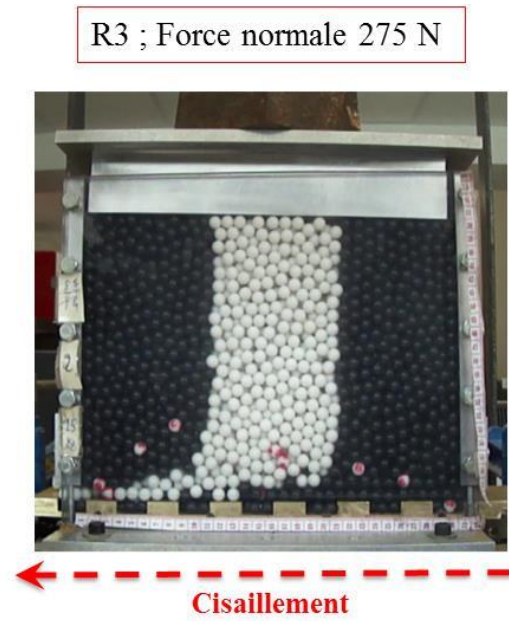


R3 ; Force normale 125 N



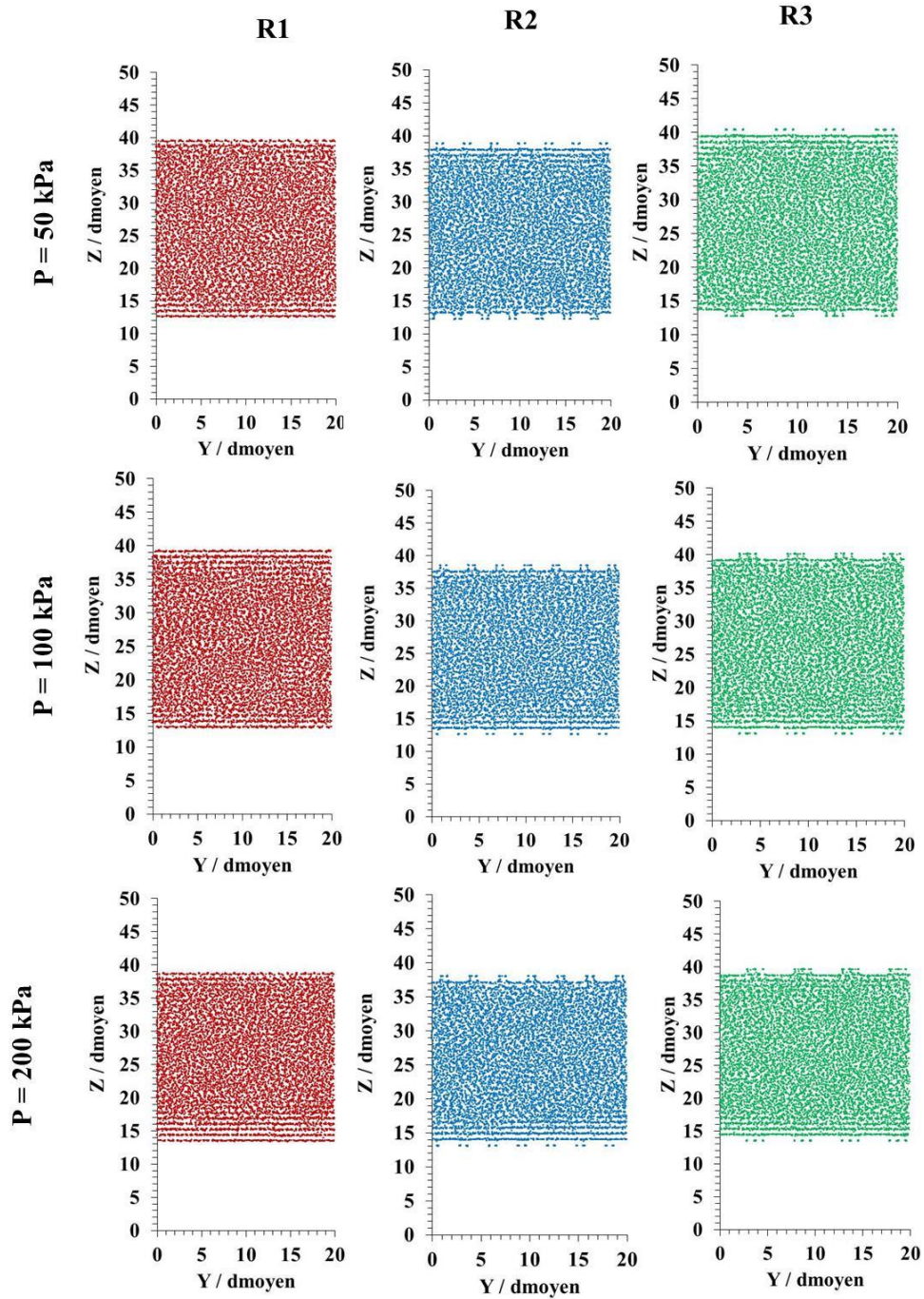
R3 ; Force normale 125 N



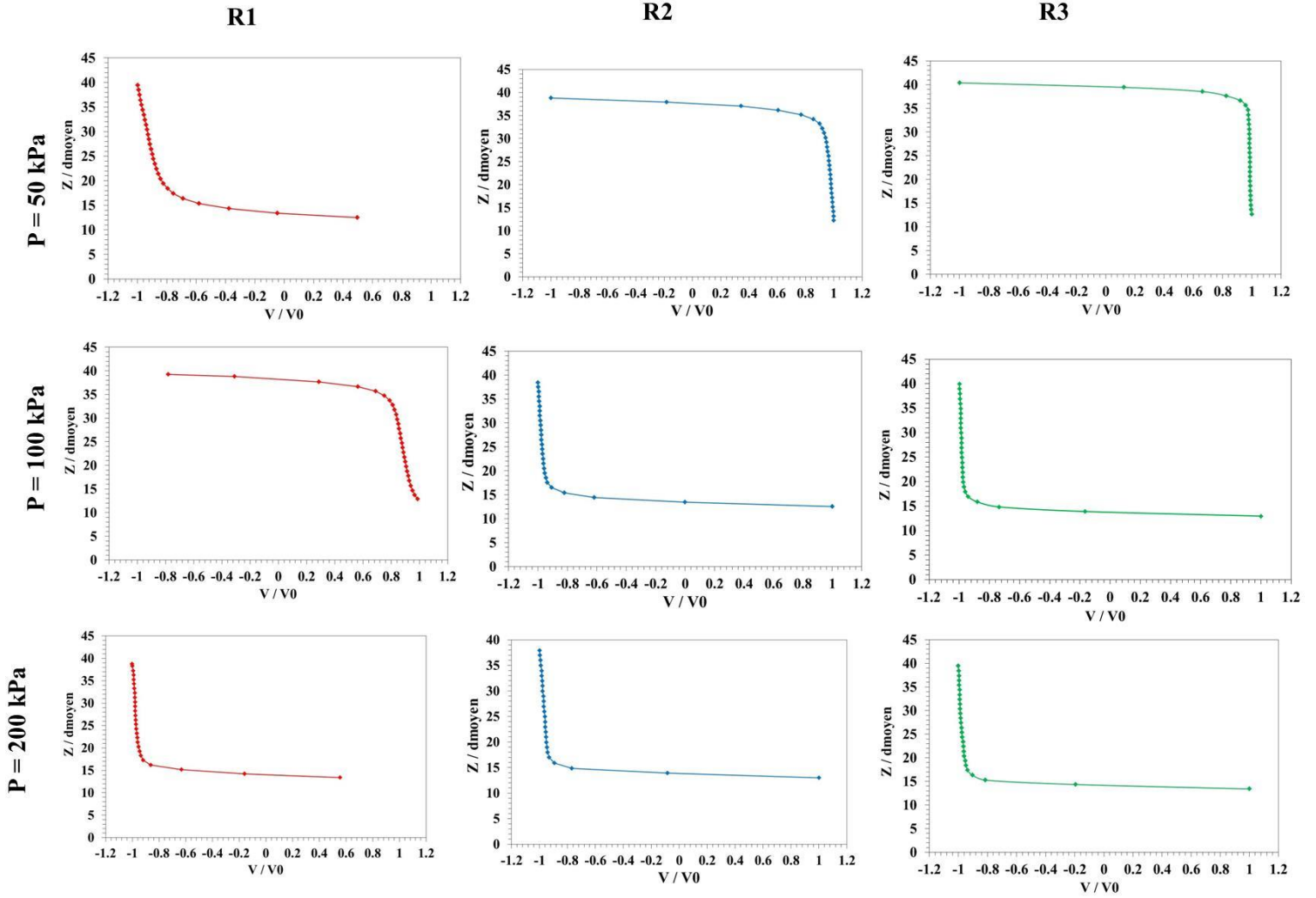


Annexe 3

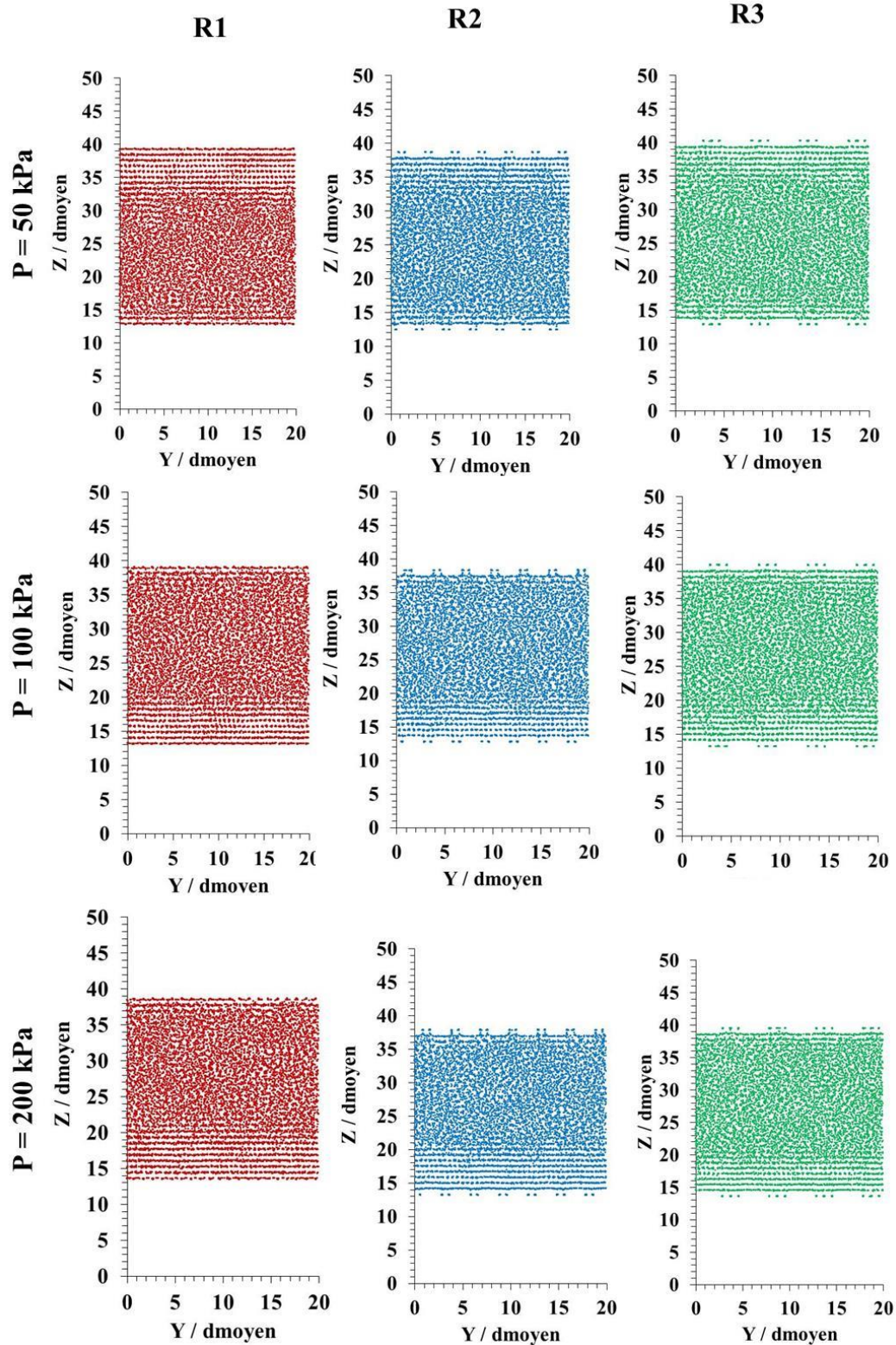
Rugosité en créneaux : grains représentés par leurs centres après 10 secondes de cisaillement – $V0 = 10 \text{ d}_{\text{moyen}}/\text{s}$.



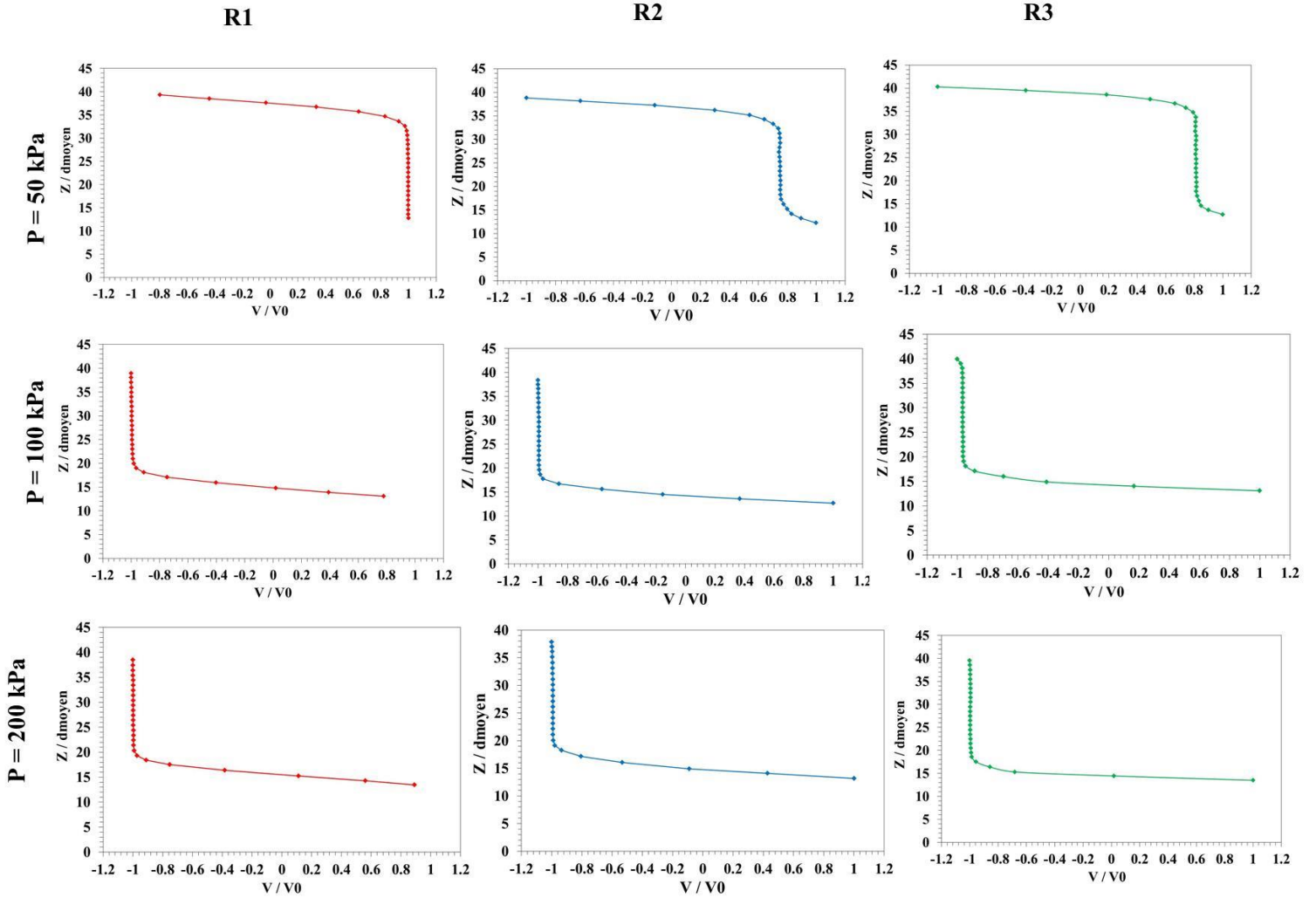
Rugosité en créneaux : Profils de vitesses moyennés dans le temps – $V_0 = 10 \text{ d}_{\text{moyen}}/\text{s}$.



**Rugosité en créneaux : grains représentés par leurs centres
après 10 secondes de cisaillement – $V0 = 100 \text{ d}_{\text{moyen}}/\text{s}$.**



Rugosité en créneaux : Profils de vitesses moyennés dans le temps – $V_0 = 100 \text{ d}_{\text{moyen}}/\text{s}$.



Annexe4

Ciment CEM I 52,5 N



CEM I 52,5 N CE CP2 NF

Domaines d'application

Les ciments CEM I 52,5 N CE CP2 NF sont principalement destinés aux travaux de Génie Civil ou d'ouvrages d'art.

Ces ciments s'adaptent parfaitement aux domaines suivants :

- Travaux en béton précontraint par pré ou post-tension non soumis à traitement thermique.
- Travaux en béton armé nécessitant des résistances finales élevées.
- **Béton prêt à l'emploi** : environnements - X0, XC, XD, XF1, XF2, XF3 - de la norme NF EN 206-1.



Barrage sur le Cher

Composition chimique du ciment (Valeurs moyennes en %)

Usines de production	clinker ≥ 95%			SO ₃	Classe CP2 5 ⁺⁺	Na ₂ O Equivalent Actif
	C _A	C _S	C ₂ S			
Airvault	7,3	67,2	8,8	3,5	0	1,11
Añorga	10,8	58,7	16,6	3,1	0,02	0,81
Beaucalre	8,9	68,5	11	3,5	0	0,39
Beffes	10,6	66,6	9,3	3,5	0	0,65
Bussac	8,2	74,8	3,7	3,4	0	0,21
Couvrot	10,9	65,5	13,4	3,5	0	0,80
Gargenville	7	68,6	10,5	2,8	0	0,52
Gaurain	8,5	69,9	8,3	3,3	0,02	0,70
Rombas	10,9	65,5	13,4	3,5	0,01	0,39
Villiers-au-Bois	8,4	66,9	10,7	2,8	0	0,59
Valeurs garanties NF EN 197-1 marquage CE et marque NF				≤ 4,5		
NF P 15-318 marque NF					< 0,2	

Caractéristiques physiques (valeurs moyennes)

Usines de production	Résistances mécaniques mortier CEN en MPa			Finesse		Eau pâte pure (%)	Début de prise
	1J	2J	28J	Blaine (cm ² /g)	Rétus (%) ≥ 40µm		
Airvault	27	38	60	4230	4,1	31,9	3h50
Añorga	27	37	59	4480	-	31,8	2h20
Beaucaire	20	33	67	3590	-	28,4	2h20
Beffes	22	37	66	3840	-	31,6	3h40
Bussac	27	40	57	4360	0,3	32,8	2h30
Couvrot	24	39	62	3840	6,1	30,2	3h10
Gargenville	25	37	66	4100	6	27,8	2h50
Gaurain	25	38	63	4060	-	28,2	3h20
Rombas	25	37	63	4730	1,1	30,2	2h20
Villiers-au-Bouin	18	32	61	3590	-	27,9	2h40
Valeurs garanties NF EN 197-1 marque CE et marque NF		≥ 18	≥ 50				≥ 1h00



Viaduc du Bec



Gare TGV - Vendôme



Centre aquatique - Tours

Caractéristiques complémentaires de la norme (valeurs moyennes)

Usines de production	Tainte L	Chaleur d'hydratation à 41 h en J/g	Maniabilité mortier E/C : 0,50 en secondes	Début de prise sur mortier		
				Température 5°C	Température 20°C	Température 30°C
Airvault	56,7	370	8,8	-	-	-
Añorga	61,7	367	-	-	-	-
Beaucaire	58,3	374	3,1	6h00	3h20	1h50
Beffes	58,9	379	4,7	11h00	3h30	2h45
Bussac	58,8	385	3,3	-	-	-
Couvrot	64,3	367	4,2	-	-	-
Gargenville	59,7	346	4,3	9h50	4h00	2h25
Gaurain	63,4	376	-	-	-	-
Rombas	59,4	321	5,1	-	-	-
Villiers-au-Bouin	63	354	-	7h20	3h15	2h15

Règles de l'art

- Eviter le sous-dosage en ciment qui altère la durabilité des bétons.
- Limiter le rapport E/C qui contribue à la diminution des résistances et à l'augmentation de la porosité.
- Vérifier la compatibilité entre le ciment et les adjuvants utilisés (rhéologie, résistances).
- Ajuster la vibration du béton à sa consistance pour obtenir une compacité maximale sans ségrégation.
- Prendre toutes les dispositions pour éviter une dessiccation précoce par temps chaud ou par vent desséchant en procédant à une cure adaptée (paillasse, eau pulvérisée, produit de cure, etc).

Ciments Calcia

Les Technodes - BP 01
78931 Guerville cedex
Tél : 01 34 77 78 00 - Fax : 01 34 77 79 06
www.ciments-calcia.fr - E-mail : info@ciments-calcia.fr

Fillers calcaires BETOCARB -MQ

Product information



Omya SAS
35 Quai André Citroën
F-75725 Paris Cedex 15
Tel +33 1 40 58 44 00
Fax +33 1 40 58 44 38
www.omya.com

Betocarb® - MQ

SITE: MARQUISE, France

DESCRIPTION DU PRODUIT: Addition calcaire pour bétons hydrauliques et filler pour bétons hydrauliques (EN 12620).

COMPOSITION TYPE DE LA ROCHE

CaCO ₃	97.5	%
Carbonates totaux	99.3	%
Chlorures	0.001	%
Sulfates	0.002	%
Soufre total	0.024	%
Matières organiques	0.03	%
Essai au bleu de méthylène	0.7	g/kg
Alcalins équivalents	0.04	%
Silice totale	0.4	%
Réactivité aux alcalins	NR	

CARACTERISTIQUES TYPES DU PRODUIT

Granulométrie		
- Particules < 2 mm	100	%
- Particules < 0.125 mm	99.9	%
- Particules < 0.083 mm	95	%
Surface spécifique Blaine	591	m ² /kg
Coefficient de variation de Blaine	8.1	%
Indice d'activité à 28 jours	0.79	
Taux d'humidité départ usine	0.2	%

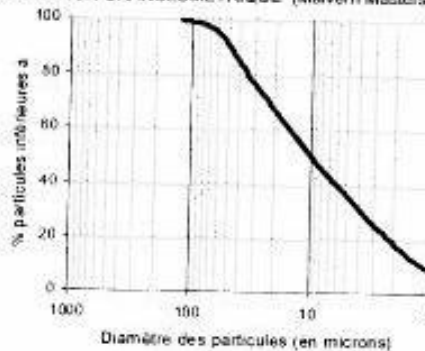
CARACTERISTIQUES GENERALES DU PRODUIT

Densité	2.7	g/ml
Densité apparente tassée	0,9 g/cm ³ tassée	1.3 g/ml

APPLICATIONS PRINCIPALES

Produits en béton
- Pavés
- Blocs
- Autres produits
Béton prêt à l'emploi
Eléments préfabriqués

REPARTITION GRANULOMETRIQUE (Malvern Mastersizer 2000)



CONDITIONNEMENT STANDARD

- VRAC
- SAC (papier) de 25 kg sur palette

Les informations contenues dans cette fiche technique ne concernent que le matériel spécifique mentionné et ne concernent pas l'utilisation conjointement avec tout autre matériel ou dans tout procédé. Les informations fournies dans le présent document ne reposent sur des données techniques qui, à la connaissance de Omya, sont fiables, toutes les Omya ne fournit aucune garantie de complétude ou d'exhaustivité de ces informations, et Omya n'assume aucune responsabilité résultant de leur utilisation ou vice versa de toutes réclamations, pertes ou dommages subis par une tierce partie. Toute personne recevant ces informations doit exercer son jugement propre en ce qui concerne leur utilisation appropriée et il incombe à l'utilisateur d'évaluer si le matériel mentionné (y compris en matière de sécurité) pour un usage particulier avant d'en faire usage.

édition: 12/06/2009
CORPS-PRODUIT: FIMQ
000017.00.1
version: 000