



HAL
open science

Etude du comportement des milieux granulaires vibrés horizontalement. Application au remplissage des fusibles.

Ahmed Raihane

► **To cite this version:**

Ahmed Raihane. Etude du comportement des milieux granulaires vibrés horizontalement. Application au remplissage des fusibles.. Génie des procédés. Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne, 2009. Français. NNT: . tel-00477484

HAL Id: tel-00477484

<https://theses.hal.science/tel-00477484>

Submitted on 29 Apr 2010

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

N° d'ordre : 529 GP

THÈSE

présentée par

Ahmed RAIHANE

pour obtenir le grade de
Docteur de l'École Nationale Supérieure des Mines de Saint-Étienne

Spécialité : Génie des Procédés

ETUDE DU COMPORTEMENT DES MILIEUX GRANULAIRES VIBRES HORIZONTALEMENT APPLICATION AU REMPLISSAGE DES FUSIBLES

soutenue à Saint-Étienne , le 19 juin 2009

Membres du jury

Président :	Olivier POULIQUEN	Directeur de Recherches CNRS, IUSTI, Marseille
Rapporteurs :	Pierre GUIGON	Professeur, UTC, Compiègne
	Pierre EVESQUE	Directeur de Recherches CNRS, ECP, Paris
Examineurs :	Jean-Charles PINOLI	Professeur, ENSMSE, Saint-Étienne
	Jean-Louis GELET	Ingénieur, FERRAZ-SHAWMUT, St Bonnet de Mure
Directeurs de thèse :	Olivier BONNEFOY	Maître-assistant, ENSMSE, Saint-Étienne
	Jean-Marc CHAIX	Directeur de Recherches CNRS, SIMAP, Grenoble
	Gérard THOMAS	Professeur, ENSMSE, Saint-Étienne

Spécialités doctorales :

SCIENCES ET GENIE DES MATERIAUX
 MECANIQUE ET INGENIERIE
 GENIE DES PROCEDES
 SCIENCES DE LA TERRE
 SCIENCES ET GENIE DE L'ENVIRONNEMENT
 MATHEMATIQUES APPLIQUEES
 INFORMATIQUE
 IMAGE, VISION, SIGNAL
 GENIE INDUSTRIEL
 MICROELECTRONIQUE

Responsables :

J. DRIVER Directeur de recherche – Centre SMS
 A. VAUTRIN Professeur – Centre SMS
 G. THOMAS Professeur – Centre SPIN
 B. GUY Maître de recherche – Centre SPIN
 J. BOURGOIS Professeur – Centre SITE
 E. TOUBOUL Ingénieur – Centre G2I
 O. BOISSIER Professeur – Centre G2I
 JC. PINOLI Professeur – Centre CIS
 P. BURLAT Professeur – Centre G2I
 Ph. COLLOT Professeur – Centre CMP

Enseignants-chercheurs et chercheurs autorisés à diriger des thèses de doctorat (titulaires d'un doctorat d'État ou d'une HDR)

AVRIL	Stéphane	MA	Mécanique & Ingénierie	CIS
BATTON-HUBERT	Mireille	MA	Sciences & Génie de l'Environnement	SITE
BENABEN	Patrick	PR 2	Sciences & Génie des Matériaux	CMP
BERNACHE-ASSOLANT	Didier	PR 0	Génie des Procédés	CIS
BIGOT	Jean-Pierre	MR	Génie des Procédés	SPIN
BILAL	Essaïd	DR	Sciences de la Terre	SPIN
BOISSIER	Olivier	PR 2	Informatique	G2I
BOUCHER	Xavier	MA	Génie Industriel	G2I
BOUDAREL	Marie-Reine	MA	Génie Industriel	DF
BOURGOIS	Jacques	PR 0	Sciences & Génie de l'Environnement	SITE
BRODHAG	Christian	MR	Sciences & Génie de l'Environnement	SITE
BURLAT	Patrick	PR 2	Génie industriel	G2I
COLLOT	Philippe	PR 1	Microélectronique	CMP
COURNIL	Michel	PR 0	Génie des Procédés	SPIN
DAUZERE-PERES	Stéphane	PR 1	Génie industriel	CMP
DARRIEULAT	Michel	ICM	Sciences & Génie des Matériaux	SMS
DECHOMETS	Roland	PR 1	Sciences & Génie de l'Environnement	SITE
DESRAYAUD	Christophe	MA	Mécanique & Ingénierie	SMS
DELAFOSSÉ	David	PR 1	Sciences & Génie des Matériaux	SMS
DOLGUI	Alexandre	PR 1	Génie Industriel	G2I
DRAPIER	Sylvain	PR 2	Mécanique & Ingénierie	SMS
DRIVER	Julian	DR	Sciences & Génie des Matériaux	SMS
FOREST	Bernard	PR 1	Sciences & Génie des Matériaux	CIS
FORMISYN	Pascal	PR 1	Sciences & Génie de l'Environnement	SITE
FORTUNIER	Roland	PR 1	Sciences & Génie des Matériaux	SMS
FRACZKIEWICZ	Anna	DR	Sciences & Génie des Matériaux	SMS
GARCIA	Daniel	CR	Génie des Procédés	SPIN
GIRARDOT	Jean-Jacques	MR	Informatique	G2I
GOEURIOT	Dominique	MR	Sciences & Génie des Matériaux	SMS
GOEURIOT	Patrice	MR	Sciences & Génie des Matériaux	SMS
GRAILLOT	Didier	DR	Sciences & Génie de l'Environnement	SITE
GROSSEAU	Philippe	MR	Génie des Procédés	SPIN
GRUY	Frédéric	MR	Génie des Procédés	SPIN
GUILHOT	Bernard	DR	Génie des Procédés	CIS
GUY	Bernard	MR	Sciences de la Terre	SPIN
GUYONNET	René	DR	Génie des Procédés	SPIN
HERRI	Jean-Michel	PR 2	Génie des Procédés	SPIN
KLÖCKER	Helmut	MR	Sciences & Génie des Matériaux	SMS
LAFOREST	Valérie	CR	Sciences & Génie de l'Environnement	SITE
LERICHE	Rodolphe	CR	Mécanique et Ingénierie	SMS
LI	Jean-Michel	EC (CCI MP)	Microélectronique	CMP
LONDICHE	Henry	MR	Sciences & Génie de l'Environnement	SITE
MOLIMARD	Jérôme	MA	Mécanique et Ingénierie	SMS
MONTHEILLET	Frank	DR 1 CNRS	Sciences & Génie des Matériaux	SMS
PERIER-CAMBY	Laurent	PR1	Génie des Procédés	SPIN
PIJOLAT	Christophe	PR 1	Génie des Procédés	SPIN
PIJOLAT	Michèle	PR 1	Génie des Procédés	SPIN
PINOLI	Jean-Charles	PR 1	Image, Vision, Signal	CIS
STOLARZ	Jacques	CR	Sciences & Génie des Matériaux	SMS
SZAFNICKI	Konrad	CR	Sciences & Génie de l'Environnement	SITE
THOMAS	Gérard	PR 0	Génie des Procédés	SPIN
VALDIVIESO	François	MA	Sciences & Génie des Matériaux	SMS
VAUTRIN	Alain	PR 0	Mécanique & Ingénierie	SMS
VIRICELLE	Jean-Paul	MR	Génie des procédés	SPIN
WOLSKI	Krzysztof	CR	Sciences & Génie des Matériaux	SMS
XIE	Xiaolan	PR 1	Génie industriel	CIS

Glossaire :

PR 0	Professeur classe exceptionnelle
PR 1	Professeur 1 ^{ère} catégorie
PR 2	Professeur 2 ^{ème} catégorie
MA(MDC)	Maître assistant
DR (DR1)	Directeur de recherche
Ing.	Ingénieur
MR(DR2)	Maître de recherche
CR	Chargé de recherche
EC	Enseignant-chercheur
ICM	Ingénieur en chef des mines

Centres :

SMS	Sciences des Matériaux et des Structures
SPIN	Sciences des Processus Industriels et Naturels
SITE	Sciences Information et Technologies pour l'Environnement
G2I	Génie Industriel et Informatique
CMP	Centre de Microélectronique de Provence
CIS	Centre Ingénierie et Santé



N° d'ordre : 529 GP

THÈSE

présentée par

Ahmed RAIHANE

pour obtenir le grade de
Docteur de l'École Nationale Supérieure des Mines de Saint-Étienne

Spécialité : Génie des Procédés

ETUDE DU COMPORTEMENT DES MILIEUX GRANULAIRES VIBRES HORIZONTALEMENT APPLICATION AU REMPLISSAGE DES FUSIBLES

soutenue à Saint-Étienne , le 19 juin 2009

Membres du jury

Président :	Olivier POULIQUEN	Directeur de Recherches CNRS, IUSTI, Marseille
Rapporteurs :	Pierre GUIGON	Professeur, UTC, Compiègne
	Pierre EVESQUE	Directeur de Recherches CNRS, ECP, Paris
Examineurs :	Jean-Charles PINOLI	Professeur, ENSMSE, Saint-Étienne
	Jean-Louis GELET	Ingénieur, FERRAZ-SHAWMUT, St Bonnet de Mure
Directeurs de thèse :	Olivier BONNEFOY	Maître-assistant, ENSMSE, Saint-Étienne
	Jean-Marc CHAIX	Directeur de Recherches CNRS, SIMAP, Grenoble
	Gérard THOMAS	Professeur, ENSMSE, Saint-Étienne

Remerciements

Pour commencer, je voudrai rendre grâce à notre seigneur Allah « El Hamdoulillah » de m'avoir donné la volonté et les moyens de réussir cette thèse.

Ensuite, un grand Merci à mes directeurs de thèse Gérard Thomas, Jean-Marc Chaix et Olivier Bonnefoy.

Olivier Bonnefoy : tout au long de ces trois années et quelques de thèse, j'ai trouvé en lui une personne accueillante, toujours disponible, curieuse et attentive à mes remarques et idées. Une réelle complicité est née entre nous « deux binômes de T.P », et a donné lieu à des idées ingénieuses aussi bien dans l'amélioration du dispositif expérimental, « le fameux aspirateur » pour en citer que lui, que dans l'exploitation des résultats. Olivier est une personne avec qui on a plaisir à travailler. J'espère que notre collaboration se poursuivra dans l'avenir surtout que je le considère comme un grand ami.

Gérard Thomas : je le remercie pour ses qualités scientifiques mais également humaines. J'ai beaucoup apprécié nos discussions théoriques et autres. Merci pour ses blagues. Merci pour ses corrections ultrarapides de ce manuscrit et son soutien très important au cours de cette phase de rédaction.

Jean-Marc Chaix : je le remercie pour sa sympathie et ses blagues aussi. J'ai appris auprès de lui rigueurs scientifique et linguistique. Je le remercie pour sa vision de partage équitable des tâches.

Je tiens à remercier Jean-Louis Gelet, qui représentait la société Ferraz-Shawmut, pour son accueil chaleureux et surtout pour sa curiosité scientifique qui a permis de laisser libre cours à mes recherches. Je le remercie également d'avoir voulu valoriser ce travail par un dépôt de brevet.

Je remercie Pierre Guigon et Pierre Evesque d'avoir bien voulu rapporter cette thèse et de l'intérêt qu'ils ont porté à mon travail. Je remercie également les autres membres de mon jury Olivier Pouliquen et Jean-Charles Pinoli pour leur disponibilité et la pertinence de leurs remarques.

Ce travail de thèse a nécessité plusieurs collaborations à différents niveaux. Je remercie l'équipe de l'atelier pour son apport technique et en particulier Albert Boyer, Monsieur boîtes comme il se plaisait lui-même à s'appeler. Je remercie Abdelkrim Belhaoua qui a conçu le logiciel Motion2D qui a amené un grand apport pour cette thèse.

Je remercie mes co-bureaux Séverine et Sébastien pour leur sympathie, leur soutien et de l'ambiance conviviale qui régnait dans le bureau. Bon courage à tous les deux pour la suite de leurs thèses.

Il ne faut surtout pas oublier de remercier le moteur de la recherche. J'ai nommé « le café ». Je remercie alors toutes les personnes avec qui j'ai passé des moments agréables à siroter mon café : Virginie, Jean-Christophe, Laetitia, Marie-Claude, Henri, Sébastien, Najih, Fatima, Hanane, Mélanie, Carole, Jérôme, Marthe, Laurent, Johan ... Un merci particulier à mon amie Yamina partenaire du café en plein air sous la neige.

Mon passage à Saint-Etienne a été très enrichissant. J'y ai fait des belles rencontres, des amis, des personnes qui m'ont rendu le quotidien agréable et qui m'ont soutenu tout au long de cette thèse. C'est pour cela que je remercie Stéphanie, Nadhem, Anouar et une pensée particulière à ma chère Manel.

Finalement, je voudrai dédier ce travail à mon père et ma mère, sans qui je ne serais pas où j'en suis aujourd'hui, et à toute ma famille : Jamil, Asma, Ayoub Je les remercie tous pour leur soutien infaillible.

Table des matières

Introduction.....	1
Chapitre I: Étude bibliographique.....	9
I.A. Paramètres d'étude.....	9
I.A.1. Paramètres matériaux.....	10
I.A.1.a. Grains et empilement.....	10
I.A.1.b. Récipients.....	12
I.A.2. Paramètres procédés.....	13
I.A.3. Observables.....	14
I.B. Vibrations verticales.....	15
I.B.1. Transition vers l'écoulement.....	15
I.B.2. Convection.....	15
I.B.3. Ségrégation.....	17
I.B.4. Compaction.....	18
I.C. Vibrations horizontales.....	20
I.C.1. Transition vers l'écoulement.....	20
I.C.2. Mouvements convectifs.....	23
I.C.3. Compaction.....	27
Chapitre II: Matériau, matériels et techniques expérimentales.....	29
II.A. Matériau granulaire.....	29
II.A.1. Nature chimique.....	29
II.A.2. Morphologie.....	31
II.A.3. Distribution granulométrique.....	32
II.A.4. Comportement mécanique.....	33
II.A.4.a. Etude de la coulabilité.....	33
II.A.4.b. Coefficients de friction grain/grain.....	37
II.A.4.c. Coefficients de friction grain/paroi.....	39
II.B. Banc de vibration.....	42
II.B.1. Description.....	42
II.B.1.a. Pot vibrant.....	42
II.B.1.b. Table vibrante.....	44

II.B.1.c. Récipient	46
II.B.2. Fonctionnement	47
II.B.2.a. Asservissement	47
II.B.2.b. Vibrations parasites	52
II.B.2.c. Détermination du domaine d'étude.....	53
II.C. Outils d'acquisition des données	56
II.C.1. Caméra CCD.....	57
II.C.2. Profilomètre optique	58
II.C.2.a. Description	59
II.C.2.b. Fonctionnement	62
II.D. Logiciel de calcul des champs de vitesses : MOTION2D	64
II.D.1. Description du logiciel MOTION2D.....	65
II.D.1.a. Méthode de Lucas-Kanade	65
II.D.1.b. Approche multi-échelle	66
II.D.1.c. Algorithme de MOTION2D	67
II.D.2. Validation du logiciel MOTION2D	69
II.D.2.a. Génération des images tests.....	70
II.D.2.b. Résultats et interprétations des analyses des images tests.....	70
Chapitre III: Etude expérimentale	75
III.A. Introduction	75
III.A.1. Choix des paramètres	75
III.A.1.a. Notations	75
III.A.1.b. Dimensions de l'empilement granulaire	76
III.A.2. Préparation des échantillons.....	77
III.A.2.a. Remplissage en vrac	78
III.A.2.b. Remplissage par pluviation	78
III.B. Etat dynamique sous vibrations.....	80
III.B.1. Étude phénoménologique en fonction de l'accélération et de la fréquence.....	80
III.B.1.a. Frémissement de surface	80
III.B.1.b. Transition vers l'écoulement	82
III.B.1.c. Fluidisation et mouvements convectifs	84
III.B.1.d. Influence de la fréquence	89
III.B.2. Régime transitoire	92
III.B.2.a. Protocole expérimental	94
III.B.2.b. Détermination du profil d'affaissement	95
III.B.2.c. Détermination du profil de compacité	98

III.B.3. Régime stationnaire	103
III.B.3.a. Etude de l'état fluidisé (stationnaire).....	104
III.B.3.b. Etude de la compacité globale dynamique	125
III.C. Etat relaxé	132
III.C.1. Evolution de la compacité globale avec l'accélération	132
III.C.2. Influence de la hauteur initiale sur la compacité globale	134
III.C.3. Influence de la compacité initiale sur la compacité globale.....	135
Chapitre IV: Interprétation	141
IV.A. Mouvements granulaires :	141
IV.A.1. Frémissement de surface :	141
IV.A.2. Couche fluidisée.....	144
IV.A.2.a. Interface solide-fluide	144
IV.A.2.b. Loi empirique $E_F=f(\Gamma)$	146
IV.B. Optimisation de la compacité globale	147
IV.B.1. Vibration répétée	147
IV.B.2. Irréversibilité-réversibilité :	150
IV.B.3. Protocole de remplissage proposé :	152
Conclusions.....	154
Annexe 1 : Mesure de la coulabilité	161
Annexe 2 : Profils d'affaissements.....	163
Annexe 3 : Profils de vitesses.....	166
Liste des publications	169
Bibliographie	171

Introduction

Contexte industriel

Les matériaux granulaires sont des milieux solides divisés constitués d'un grand nombre d'entités élémentaires macroscopiques. Typiquement, ils ont une taille suffisamment grande pour que leur énergie thermique soit négligeable comparée à leur énergie gravitationnelle. Ils ont cette fascinante propriété de se comporter tantôt comme des solides et tantôt comme des fluides : ils résistent au cisaillement jusqu'à un point, mais coulent sous l'effet d'un cisaillement assez fort. Malgré l'omniprésence de tels matériaux dans notre vie quotidienne, la physique des milieux granulaires est loin d'être comprise.

Récemment, beaucoup d'intérêt a été porté aux milieux granulaires vibrés. D'une part, ils présentent un intérêt scientifique marqué, car ils permettent de mettre en évidence des nouveaux phénomènes, et la vérification de différentes théories. D'autre part, les procédés vibratoires sont très utilisés en industrie, de diverses façons, et à pour différents objectifs. Certains cherchent à obtenir des mélanges les plus homogènes possibles, d'autres, au contraire, à trier les matériaux suivant leurs tailles, densités,... La société Ferraz-Shawmut, partenaire industriel de cette étude, utilise le procédé de vibrations pour le remplissage de leurs fusibles électriques par du sable en cherchant à améliorer la densification de ce dernier. Pour ce faire, le fusible est vibré soit horizontalement, soit verticalement, au moyen de chocs périodiques pour mieux assurer les fonctions principales d'un fusible.

1. Fonction coupure des fusibles

Un fusible placé dans une installation électrique a deux fonctions principalement :

- la fonction conduction : le fusible doit laisser passer le courant en opposant une résistance minimale.
- la fonction coupure : en cas de surintensité dans l'installation, le fusible doit ouvrir très rapidement le circuit pour éviter toute dégradation des autres composants.

1.1. Description d'un fusible industriel

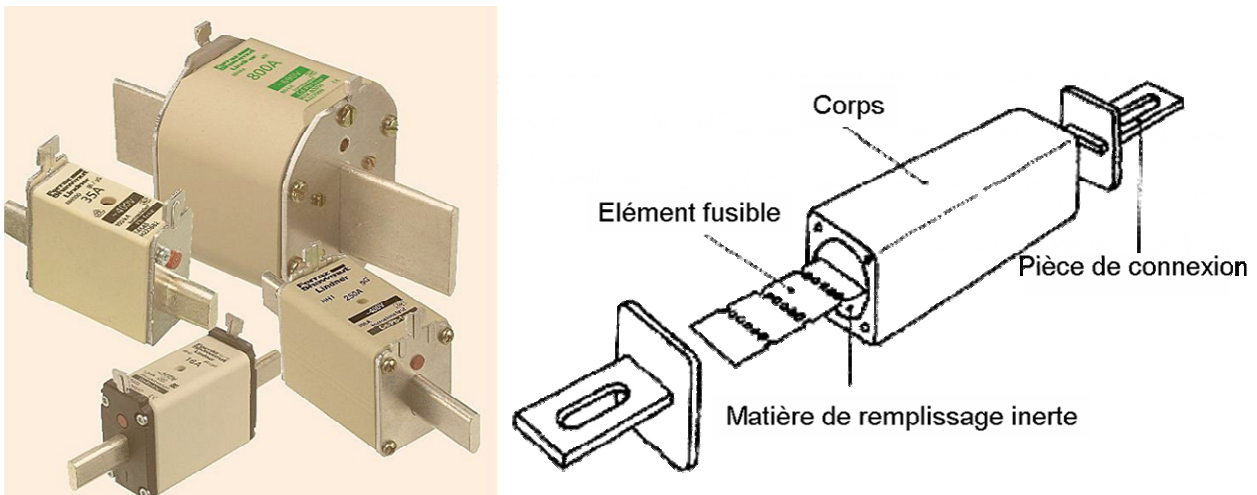


Figure.1. A gauche : photographies des fusibles fabriqués par Ferraz-Shawmut. A droite : schéma constitutif d'un fusible industriel.

Les fusibles industrialisés par FERRAZ-SHAWMUT sont constitués d'un corps en céramique dans le quel sont positionnés un ou plusieurs éléments fusibles en argent ou en cuivre, percés de rangées de sections réduites. Une matière de remplissage (sable) est introduite dans le corps puis aggloméré avec un liant "le silicate de sodium" afin de former un bloc compact et inerte autour des lames métalliques [Ferraz74]. Des plots de connexion situés aux extrémités des fusibles permettent la connexion à tout type d'installation électrique (voir figure.1).

1.2. Fonctionnement en coupure des fusibles

Lors de l'apparition d'un court-circuit dans l'installation électrique, le fusible passe d'une fonction conduction à une fonction coupure. Pour cela, il faut que sa résistance passe d'une valeur quasi-nulle à une valeur de plusieurs méga-ohms. La meilleure solution de résistance variable est l'arc électrique. La coupure se produit généralement en 2 étapes suite à l'échauffement des sections réduites dans les lames métalliques :

- Ignition de l'arc électrique (10-100 ns) lors de la fusion-sublimation du métal sur les sections réduites de l'élément fusible (voir figure.2). La température dans l'arc électrique peut atteindre plusieurs milliers de degrés.
- Extinction de l'arc (quelques ms) et coupure du circuit par dissipation de l'énergie électrique essentiellement sous forme de chaleur.

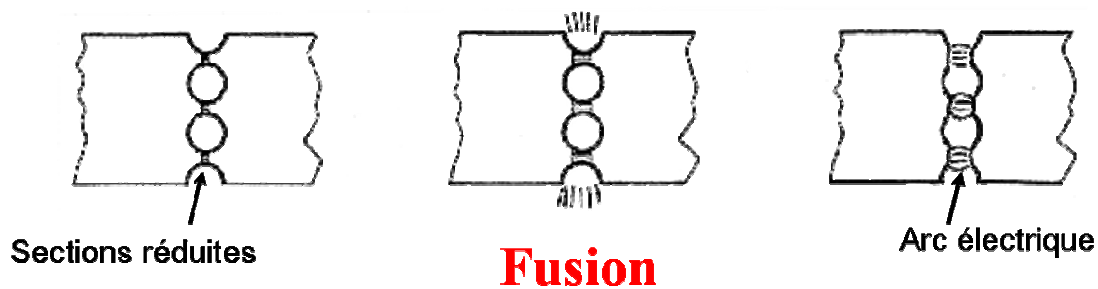


Figure.2 : Schéma de l'ignition de l'arc électrique en cas de surintensité.

Il faut noter qu'il est important de maîtriser la zone d'arc électrique pour arrêter le passage du courant le plus rapidement possible et pour réduire l'énergie électrique dissipée dans le fusible. En effet, un grand accroissement de l'arc engendrerait une surpression en un temps très court conduisant à l'explosion du fusible. La matière de remplissage joue un rôle important dans l'extinction et la maîtrise de l'arc électrique.

2. Matière de remplissage

La matière de remplissage interagit de diverses manières avec l'arc électrique et elle joue ainsi un rôle important à son extinction et donc au bon fonctionnement du fusible [Vivier00]. De ce fait, le choix de la matière de remplissage n'est pas arbitraire. En effet, celle-ci doit posséder un certain nombre de caractéristiques qu'elle devra conserver tout au long de la durée de vie du fusible, que ce soit en fonctionnement normal ou lors de l'apparition d'une surintensité de courant.

- Elle doit nécessairement être isolante même à haute température, et doit avoir une rigidité diélectrique élevée afin de limiter les zones conductrices aux seules lames métalliques.
- Elle doit pouvoir absorber l'énergie calorifique créée par l'arc électrique (de l'ordre de 10^5 à 10^6 Joules en 10^{-2} s). Ceci nécessite que la matière de remplissage ait une conductibilité thermique et une chaleur massique élevées de manière à absorber le plus d'énergie possible.
- Elle doit également avoir une porosité suffisante pour faciliter la diffusion et éventuellement la condensation des vapeurs métalliques créées lors de la fusion des lames d'élément fusible.
- Elle doit résister aux agressions extérieures (accélérations, chocs, ...) qui peuvent intervenir en fonction du type d'installation dans laquelle le fusible est placé.

Très peu de matériaux peuvent satisfaire ce cahier de charges ; par exemple il est exclu d'utiliser des matériaux organiques car ils deviennent conducteurs vers 200°C, température atteinte par les éléments fusibles en fonctionnement normal. Différentes études ont été menées sur divers matériaux mais il semble que le sable de silice soit le meilleur candidat :

- pour ses propriétés isolantes à basse comme à haute température.
- pour sa faculté d'absorption d'énergie lors de sa vitrification.
- pour son faible coût d'achat, paramètre primordial pour un industriel.

3. Procédé d'élaboration des fusibles

Le procédé industriel de fabrication des fusibles comprend deux grandes étapes. La première consiste à placer les éléments fusibles métalliques dans le corps en céramique qui est alors serti par deux bornes métalliques.

La deuxième étape consiste à former un bloc compact autour des lames métalliques en remplissant en premier lieu le corps par du sable et en deuxième lieu en agglomérant l'empilement à l'aide d'un liant minéral.

Six opérations sont actuellement nécessaires :

1. Remplissage du fusible avec le sable
2. Pré-tassement à l'aide de chocs périodiques de fréquence 50 Hz et d'accélération 2,5 g.
3. Tassement à l'aide de chocs périodiques de fréquence 50 Hz et d'accélération 5 g avec un apport continu en sable pour combler les vides.
4. Immersion des fusibles dans une solution aqueuse de silicate de sodium.
5. Soufflage afin d'éliminer le surplus de silicate.
6. Séchage avec un cycle thermique bien défini.

Les étapes de 1 à 3 sont réalisées grâce à une machine appelée « Ensableuse », illustrée sur la figure.4. Elle est composée d'un sinex (sorte de marteau) qui vient frapper une poutre sur laquelle sont fixées les boîtes fusibles vides. Le sable est acheminé dans les fusibles à l'aide de tuyaux reliés à un réservoir placé en hauteur. Le remplissage se fait à travers des orifices dans le couvercle prévus à cet effet. Notons que le remplissage des fusibles par du sable se fait en présence d'un couvercle.

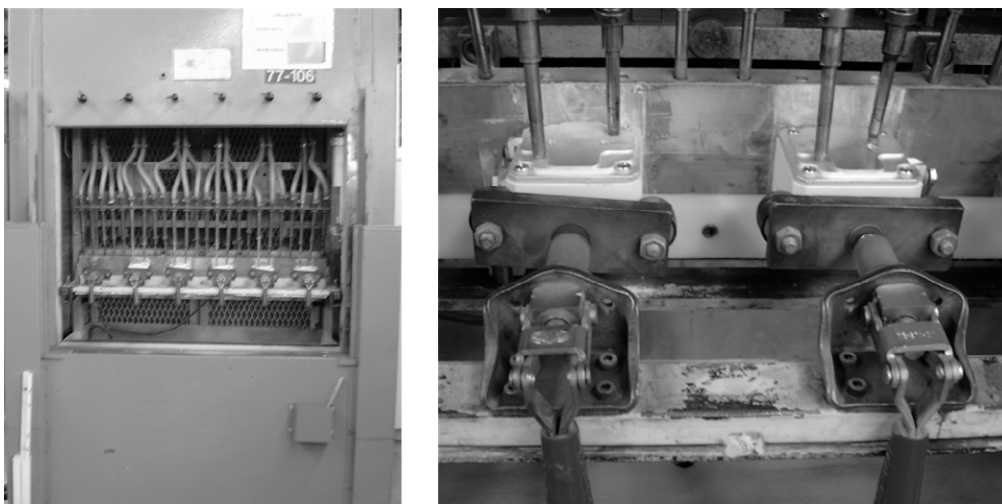


Figure.4 : Photographies de l'ensableuse utilisée pour le remplissage des fusibles par du sable.

La fréquence des chocs est fixée à 50 Hz et son amplitude est réglée grâce à un variateur électrique. L'analyse du signal vibratoire de la poutre montre un spectre fréquentiel complexe (voir figure.5) avec un pic principal à 50 Hz et des pics secondaires tous les 25 hertz. Nous remarquons également une composante non-nulle pour les hautes fréquences. Il serait alors difficile de reproduire ce signal vibratoire en laboratoire.

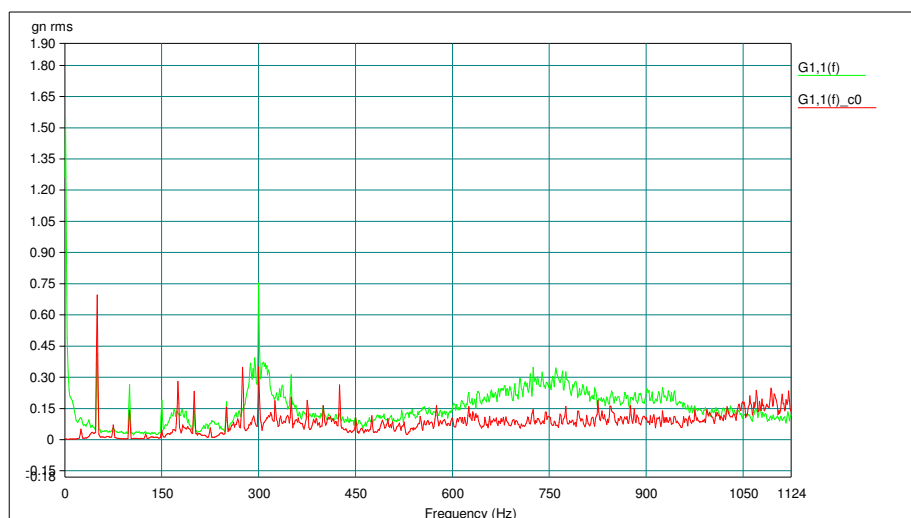


Figure.5 : Spectre fréquentiel du signal vibratoire enregistré sur la poutre.

4. Enjeux de l'étude

L'empilement granulaire joue un rôle fondamental au bon fonctionnement du fusible et à ces performances. Des caractéristiques locales et globales de l'empilement influencent fortement le comportement électrique du fusible.

- Les caractéristiques du sable conditionnent la quantité d'énergie absorbée par la fusion. La répartition des contacts grain-grain et grain-élément fusible joue sur les transferts thermiques et électriques dans le fusible, et sur les caractéristiques mécaniques du bloc. La distribution des tailles de pores du sable consolidé conditionne la perméabilité du milieu poreux dans lequel l'arc se répand. Compte tenu du caractère local de l'ignition de l'arc électrique, l'hétérogénéité des caractéristiques de l'empilement granulaire doit être soigneusement surveillée. Toute hétérogénéité peut conduire à une dispersion des propriétés électriques et à une variabilité importante des performances des produits, préjudiciable à leur fiabilité.
- Il n'est pas clairement établi comment la compacité moyenne de l'empilement influence les performances électriques du fusible. Cependant, des contrôles de qualité effectués en usine montrent d'une part que les fusibles présentant une compacité inférieure à 63 % voient leur capacité de rupture diminuer dramatiquement conduisant parfois à un dysfonctionnement, et d'autre part que les fusibles sont fiables à presque 100 % pour une compacité moyenne au delà de 67 %.

Il est donc important de relier les paramètres du procédé d'élaboration des fusibles aux caractéristiques locales et globales de l'empilement granulaire.

Objectifs et présentation du travail

Afin d'aider Ferraz-Shawmut dans la définition et l'optimisation du protocole opératoire de son procédé vibratoire pour le remplissage de ces fusibles par du sable et la densification de ce dernier, nous allons entreprendre une étude à caractère fondamental pour mieux comprendre les phénomènes intervenant lors de cette opération.

Ces travaux de thèse s'inscrivent dans la suite d'une collaboration du centre SPIN de l'Ecole nationale supérieure des mines de Saint-Étienne avec la société Ferraz-Shawmut depuis 2002. Une première thèse (Rouèche05) a été consacrée à l'étude de l'influence des vibrations verticales sur la rhéologie des milieux granulaires. Le présent travail sera

consacré à l'étude des milieux granulaires vibrés horizontalement. Il a été mené dans le cadre de collaborations multiples, à l'Ecole des mines de Saint-Étienne (centres SPIN et CIS, laboratoire LPMG UMR 5148) et à l'INP de Grenoble (Laboratoire SIMAP), avec l'aide de la Fédération CNRS FédéRAMS de la région Rhône-Alpes.

D'une manière similaire à celle menée pour comprendre l'effet des vibrations verticales, nous allons considérer des milieux granulaires modèles, proches de ceux utilisés dans l'industrie, soumis à des vibrations bien définies, sinusoïdales et horizontales.

Nous chercherons à étudier la phénoménologie liée à ces vibrations afin de déterminer et/ou quantifier les phénomènes qui d'une part peuvent introduire des hétérogénéités dans l'empilement et d'autre part peuvent contribuer à sa densification.

Nous envisagerons successivement l'état des systèmes granulaires initiaux après un mode de remplissage donné (qu'on pourra faire varier aussi), la modification de cet état après mise en vibration, en cherchant à examiner et si possible caractériser les éventuels états transitoires et stationnaires pendant les vibrations (régime dynamique) , ou encore après l'arrêt des vibrations (régime relaxé).

Il est également important d'étudier l'influence sur la densification du milieu granulaire de divers paramètres (liés aux matériaux et /ou au procédé) tels que : nature, forme et distribution de taille du sable, paramètres des vibrations (amplitude ou accélération, fréquence), dimensions des récipients, présence ou non d'un couvercle, ...

Après un premier chapitre consacré à l'étude de l'état de l'art sur les milieux granulaires vibrés, nous présenterons dans un second chapitre le dispositif expérimental mis au point pour l'obtention de vibrations purement horizontales. Les techniques d'acquisition des données et les outils dédiés à leur traitement seront également décrits.

Le troisième chapitre sera consacré à l'étude expérimentale. Nous nous intéresserons à l'empilement granulaire depuis son état initial jusqu'à son état relaxé (à l'arrêt des vibrations) en passant par le régime dynamique (sous vibrations). Une étude phénoménologique sera présentée suivie d'une étude quantitative des mouvements des grains et de l'état de densification de l'empilement. Finalement, un dernier chapitre regroupera nos différentes interprétations des phénomènes observés.

A partir de ces études de compréhension des phénomènes mis en jeu, il apparaît intéressant in fine de proposer à l'industriel un protocole de remplissage permettant l'obtention d'un empilement homogène de compacité moyenne supérieure à 67 %.

Chapitre I: Étude bibliographique

Les milieux granulaires présentent des aspects dynamiques aussi riches que fascinants en mimant les comportements des trois états de la matière : solide, liquide et gaz [Jaeger96]. Un récent intérêt a été porté sur les granulaires vibrés aussi bien pour des applications industrielles que pour des investigations théoriques. Cependant, la plupart de ces travaux traitent des vibrations verticales et il existe relativement peu d'études consacrées aux vibrations horizontales.

L'étude de l'état de l'art a révélé une grande diversité des matériaux utilisés, des excitations imposées et des sujets d'étude. Nous allons recenser dans une première partie les paramètres d'étude qui, à notre sens, pourraient influencer le comportement des milieux granulaires et fausser la comparaison de différentes études s'ils n'étaient pas pris en compte. Ensuite, nous présenterons brièvement les principaux phénomènes rencontrés au cours d'une expérience de vibration verticale. Et finalement, nous étudierons de façon détaillée le cas des vibrations horizontales.

I.A. Paramètres d'étude

Pour rendre compte des différents paramètres qui peuvent intervenir dans une étude d'un milieu granulaire soumis à des vibrations, nous avons choisi de classer ces paramètres suivant trois catégories. La première catégorie qu'on peut appeler "paramètres matériaux" regroupe toutes les caractéristiques du matériau granulaire et du récipient. La deuxième catégorie, les "paramètres procédés", concerne l'excitation mécanique et les conditions opératoires. La troisième catégorie concerne les "observables".

I.A.1. Paramètres matériaux

I.A.1.a. Grains et empilement

Les matériaux granulaires utilisés dans les expériences relatées dans la littérature sont très différents. Ces différences peuvent être dues à la morphologie, la taille, et la nature des grains (coefficient de friction, coefficient de restitution, masse volumique...) :

Morphologie des grains

Il existe plusieurs échelles pour estimer la forme et l'état de surface des grains. Nous nous contenterons de présenter les échelles introduites par Wadell [Wadell35] et utilisées et simplifiées par Powers sous forme de photos [Powers53] (voir figure II-2). La première échelle, « roundness », traduit le degré d'arrondi de la surface du grain. Elle s'exprime par le rapport du rayon de courbure moyen des arêtes par le rayon de la plus grande sphère inscrite. Nous pouvons distinguer plusieurs classes selon la valeur de ce rapport. Pour des rapports proches de 1, on parle de grains bien arrondis et pour des valeurs proches de zéro, on parle de grains très anguleux. La deuxième échelle définie est la sphéricité. Nous proposons ici la définition utilisée par Wadell :

$$\psi = 3 \sqrt{\frac{V_p}{V_{sc}}}$$

Où V_p est le volume de la particule et V_{sc} le volume de la sphère circonscrite qui peut être considérée comme la sphère ayant pour diamètre la plus grande dimension de la particule.

Une valeur de ψ proche de 1 indique une forte sphéricité et une valeur proche de zéro une faible sphéricité.

Taille des grains et distribution granulométrique

Un empilement granulaire peut être monodisperse (composé de grains ayant la même taille), ou polydisperse (grains répartis en taille selon une distribution granulométrique). Pour définir la taille des grains dans ce dernier cas, on a habituellement recours à une analyse statistique qui permet de définir plusieurs types de diamètres moyens. Les deux formes couramment utilisées sont le diamètre moyen pondéré en volume d_{43} ou en surface d_{32} .

Ils sont définis de la manière suivante :

$$d_{pq} = \frac{\sum_{i=1}^n n_i x_i^p}{\sum_{i=1}^n n_i x_i^q}$$

Où n_i et x_i correspondent respectivement au nombre de grains et au diamètre de la classe i .

Nature du matériau

La nature du matériau intervient à travers différents coefficients comme la masse volumique, le module d'Young, les coefficients de friction, de restitution.

Coefficient de friction

Pour un milieu granulaire, la friction est une notion fondamentale autant au niveau microscopique que macroscopique. A l'échelle des grains, la friction intervient au contact entre deux grains ou grain / paroi. Les forces de friction sont régies par les lois d'Amontons Coulomb qui sont des lois macroscopiques et empiriques établies à l'aide d'expériences de patin glissant sur un solide (voir figure I-1) [Pouliquen01]. On peut les résumer en trois points :

- Partant du repos il faut une force $|T_s| = \mu_s N$ pour mettre en mouvement le patin. μ_s est le coefficient de friction statique, N la force normale.
- Une fois en mouvement, la norme de la force de friction est égale à $|T_s| = \mu_d N$. μ_d est le coefficient de friction dynamique.
- μ_s et μ_d sont des constantes ne dépendant que de la nature des matériaux en contact, typiquement : $1 > \mu_s > \mu_d > 0.1$.

Sous l'influence des vibrations, les grains en contact peuvent glisser les uns par rapport aux autres (également au niveau des parois). Cette mise en mouvement est régie par ces lois. Pour un matériau granulaire donné (récipient donné), on peut faire varier les coefficients de friction en variant la rugosité des grains (des parois).

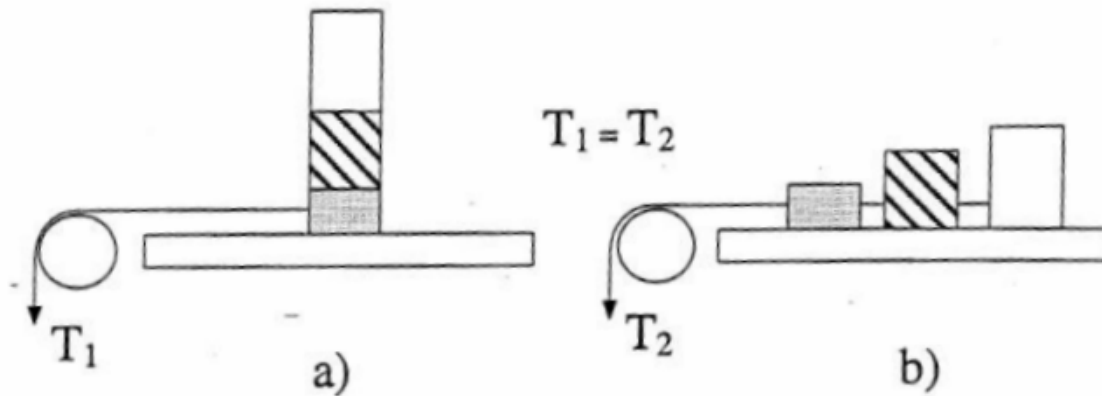


Figure I-1 : Expérience de De Vinci. La force nécessaire pour faire glisser les patins ne dépend pas de l'aire de contact.

Coefficient de restitution

Pour maintenir en mouvement un milieu granulaire, il faut lui fournir continûment de l'énergie car c'est un système très dissipatif, où les grains en mouvement sont en perpétuelles collisions inélastiques. A chaque collision entre deux grains, il y a dissipation partielle de l'énergie cinétique. Pour en rendre compte, certains ont introduit la notion de coefficient de restitution. Différentes définitions existent, nous allons en présenter deux :

i)- le rapport des énergies cinétiques après et avant choc

$$e = \frac{E_c^f}{E_c^i}$$

ii)- le rapport des vitesses relatives après et avant choc projetées sur la direction de $\Delta \mathbf{p}$; $\Delta \mathbf{p}$ étant défini par $\Delta \mathbf{p} = \Delta p \cdot \mathbf{u} = \mathbf{p}_{1f} - \mathbf{p}_{1i} = \mathbf{p}_{2f} - \mathbf{p}_{2i}$ (conservation de la quantité de mouvement), i pour l'état avant choc et f pour l'état après choc :

$$e = - \frac{(\vec{v}_{2f} - \vec{v}_{1f}) \cdot \vec{u}}{(\vec{v}_{2i} - \vec{v}_{1i}) \cdot \vec{u}}$$

I.A.1.b. Récipients

Les récipients utilisés pour contenir les matériaux granulaires peuvent posséder différentes géométries (parallélépipédiques, cylindriques ...) avec des arêtes vives ou arrondies. Le matériau composant le récipient peut influencer la dynamique des grains en intervenant soit par le coefficient de friction grain / paroi soit par le coefficient de

restitution grain / paroi. Dans le paragraphe précédent, nous avons expliqué comment définir le premier coefficient et comment on pourrait le modifier.

Quant au coefficient de restitution grain / paroi, il peut être calculé à l'aide d'une expérience de rebond du grain sur la paroi. Il est égal alors au rapport de la hauteur de chute par la hauteur maximale du premier rebond. Cependant cette définition du coefficient de restitution suite à un choc binaire, perd son sens dans le cas d'un écoulement dense de grains selon Rajchenbach [Rajchenbach04]. En effet, pour ce type d'empilement, les collisions ont un caractère multi contact et mettent en jeu une colonne de grains rebondissant sur une paroi. Le coefficient de restitution apparent décroît d'une manière exponentielle avec le nombre de grains [Falcon98].

Dimensions de l'empilement

Un empilement granulaire peut avoir une géométrie en deux ou trois dimensions (2D ou 3D). Dans une géométrie 2D, une dimension de l'empilement est égale au diamètre moyen des grains. Il peut s'agir alors d'un empilement sous forme d'un mur vertical ou d'un plan horizontal. Pour une géométrie 3D, il existe une différenciation selon la hauteur de l'empilement entre les lits minces et les lits denses. Cette différenciation se situe pour une hauteur de quelques diamètres moyens des grains.

I.A.2. Paramètres procédés

Il s'agit ici des paramètres qu'on fait subir au matériau granulaire. Nous pouvons les classer en deux types :

- Excitations mécaniques : pour mettre en mouvement un milieu granulaire, il faut continuellement lui apporter de l'énergie. Ceci peut être assuré au moyen de chocs périodiques de différentes formes ou des vibrations sinusoïdales latérales ou circulaires tout en faisant varier la fréquence et l'amplitude.
- Conditions opératoires : conditions de pression et d'humidité, gaz ambiant, présence ou non de la gravité ...

Un paramètre adimensionné est souvent introduit, il s'agit de l'accélération relative Γ . Elle est définie par le rapport de l'accélération maximale par l'accélération de la pesanteur g .

$$\Gamma = \frac{A(2\pi f)^2}{g}$$

où A et f sont respectivement l'amplitude et la fréquence des vibrations.

L'accélération relative Γ est souvent le paramètre de contrôle le plus pertinent dans l'étude des différents phénomènes mis en évidence pour les milieux vibrés.

I.A.3. Observables

Les chercheurs s'intéressent à différents phénomènes dans leurs études. Ils ne manquent pas d'ingéniosité pour les visualiser en utilisant différentes techniques d'imagerie des plus simples (grains colorés) au plus sophistiqués (IRM). En plus de la description qualitative, ils essayent de quantifier ces phénomènes à l'aide de grandeurs telles que la hauteur de l'empilement granulaire, la compacité locale et la compacité moyenne. D'autres grandeurs plus élaborées sont également définies, par exemple :

Profils de vitesse : Au moyen de caméra ultrarapide, les positions des grains sont traquées et avec un traitement d'images approprié à l'aide d'un logiciel de type PIV (Particle Imaging Velocity), on obtient des profils de champ de vitesses qui serviront à décrire le mouvement collectif et individuel des grains.

Température granulaire : Les mouvements aléatoires des grains rappellent le comportement des molécules dans un gaz. D'où, l'idée de définir une température granulaire pour quantifier le désordre. Une définition possible est la suivante [Kondic05] :

$$T_g \equiv \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left[\frac{m_i}{2} (\vec{v}_i - \langle \vec{v} \rangle)^2 + \chi m_i (d_p \omega - \langle d_p \omega \rangle)^2 + k_f n_c \sum \sum (x_{j,c} - \langle x_l \rangle)^2 \right]$$

χ , d_p , ω , k_f , n_c , $x_{j,c}$, x_l : facteur de forme, diamètre d'une particule ; Vitesse angulaire ; constante de force : nombre de collisions moyen par particule ; compression de la particule j pendant une collision c ; compression moyenne par collision.

Dans le terme de droite de l'équation, on a trois contributions pour la température granulaire : une contribution de translation (fluctuation de l'énergie cinétique), une contribution de rotation (moment cinétique) et une contribution élastique (déformations élastiques). La température granulaire est utilisée comme observable pour étudier des différents phénomènes et généralement, on se contente de la première contribution de translation.

I.B. Vibrations verticales

Il existe énormément d'études sur l'influence des vibrations verticales sur un lit granulaire. Plusieurs phénomènes ont été observés. Un intérêt particulier a été porté sur quatre de ces phénomènes : la transition vers l'écoulement ou « jamming transition », la convection, la ségrégation et la compaction.

Nous présenterons dans la suite d'une manière synthétisée les principaux résultats obtenus.

I.B.1. Transition vers l'écoulement

Un empilement granulaire soumis à des vibrations verticales de faibles accélérations se comporte comme un bloc solide. A partir d'une valeur seuil Γ_c , un mouvement de grains est observé qui s'accompagne par une perte de la forme plane de la surface libre. Même si la majorité des études s'accordent sur le fait que la valeur du seuil doit être supérieure à 1 g afin de vaincre les forces de gravitation [Evesque89 ; Hsiau98 ; Rouèche05], quelques études sont en désaccord et montrent qu'un mouvement de grains est possible pour des valeurs de l'accélération inférieures à 1 g [Pöschel00 ; Renard01].

I.B.2. Convection

Le premier à avoir observé des cellules de convection est Faraday [Faraday1831]. En effet, il a remarqué qu'en vibrant un lit de poudre, les particules se rejoignent au centre de la base, puis montaient à la surface, rejoignaient les parois par un mouvement d'avalanches et descendaient de chaque côté en suivant les parois. D'après lui, cela était dû aux mouvements de l'air environnant. Laroche *et al* et Pak *et al* [Laroche89 ; Pak95] confirment cette origine du mouvement convectif. Les premiers observent que sous vide ce mouvement disparaît. Les seconds montrent une dépendance de ce mouvement avec la pression du gaz interstitiel. Cette phénoménologie est remise en cause par Knight *et al* [Knight96] qui dans une étude expérimentale montre que le mouvement convectif n'est pas modifié quand on opère sous vide. Ils ont visualisé les mouvements des grains grâce à la technique d'imagerie à résonance magnétique (IRM) (voir figure I-2) et observent la même forme des cellules de convection dans différentes conditions de pression. L'explication de ces résultats contradictoires est peut être à chercher parmi les paramètres matériaux, notamment la taille des grains.

Le mouvement convectif apparaît à la suite de la transition vers l'écoulement et l'empilement adopte la forme d'un tas. Evesque *et al.* ont observé que la forme de la surface libre s'incline spontanément sur un côté du récipient et forme un angle α par rapport à l'horizontale inférieur à l'angle de talus de la poudre. Une seule cellule de convection est alors observée (figure I-3.a). Hsiau et Wassgren [Hsiau98 ; Wassgren97] observent plutôt la formation d'un dôme à la surface dû à deux cellules de convection symétriques et contrarotatives (figure I-3.b).

L'influence de la rugosité des parois a été étudiée par Hsiau [Hsiau02a]. Il a montré que la taille des cellules de convection et la vitesse des grains augmentent quand la rugosité augmente. Ce résultat peut laisser penser que la friction entre grains et parois et la friction inter grains jouent un rôle important dans les mécanismes conduisant à la convection.

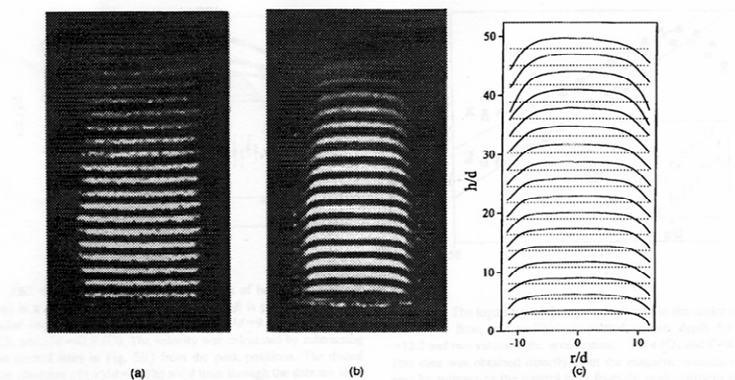


FIG. 5. (a) Magnetic resonance image of a 3 mm slice through the center of an unshaken acrylic cylinder ($R/d=12.7$) filled to a height of 52.5 mm with white poppy seeds ($d\sim 1$ mm). Bright areas in the image correspond to the peaks of the sinusoidally varying longitudinal spin polarization. The slight curvature in the horizontal "stripes" is a consequence of inhomogeneities in the local magnetic field. (b) Magnetic resonance image showing the deformation of this spin-tagging pattern after one tap with $\Gamma=6$. Because of the rapid decay of the spin-tagging pattern, 256 identical shakes are necessary to obtain a single image, and (b) is an average of 8 such images. (c) The peak positions of the spin-tagging stripes in (b). The dotted lines represent the unperturbed position of the stripes. Both the peak positions and the control lines have been corrected for erroneous curvature due to magnetic field inhomogeneities.

Figure I-2 : Expérience de Knight [Knight96] mettant en évidence des lignes de convection.

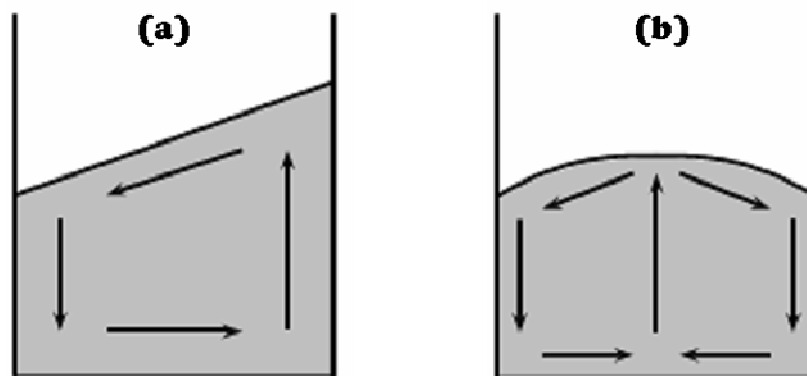


Figure I-3 : (a) Formation d'une pente (b) Formation d'un dôme.

I.B.3. Ségrégation

Secouez une boîte de céréales et vous verrez invariablement que les plus grands morceaux montent à la surface. C'est le « Brazil-Nut Effect », une forme sous laquelle la ségrégation peut se manifester (figure I-4). Plusieurs études ont traité ce phénomène [Khosropour97 ; Mobius01 ; Mobius04 ; Kudrolli04].

Les particules de grande taille dans un système granulaire vibré montent normalement à la surface. Cependant, elles peuvent aussi aller au fond ou montrer d'autres comportements, selon des variations subtiles dans les conditions physiques. La proportion de taille est un facteur dominant mais des propriétés spécifiques des particules comme la densité, l'inélasticité et la friction peuvent jouer un rôle important. On a montré aussi que la façon d'amener de l'énergie au système, les conditions aux limites et l'air interstitiel peuvent être des facteurs significatifs dans la détermination de distributions spatiales. La présence de la convection peut favoriser le mélange ou mener à la séparation de taille. Des techniques expérimentales incluant la visualisation directe et l'imagerie à résonance magnétique sont utilisées pour examiner ces propriétés. La dynamique moléculaire et des techniques de simulation du Monte-Carlo ont été développées pour explorer la ségrégation.

Emilie Rouèche a réalisé ses travaux de thèse sur les vibrations verticales des milieux granulaires. Les empilements vibrés sont ensuite analysés par tomographie aux rayons X. Aucune ségrégation n'est observée. La structure granulaire est la même entre le bas, le haut et le milieu de l'empilement. Ces travaux ont été réalisés sur des sables fournis par Ferraz-Shawmut que nous allons nous-mêmes utiliser pour notre étude. Sachant que les ségrégations s'observent plus fréquemment en mode de vibration verticale qu'en mode horizontal, nous considérerons que ce phénomène pourra être négligé en première approximation au cours de notre étude.



Figure I-4 : Les grosses noix montent à la surface quand on secoue un bocal de noix.

I.B.4. Compaction

La compaction d'un milieu granulaire soumis à des vibrations verticales a énormément fasciné les chercheurs d'une part pour son intérêt dans les applications industrielles et pour d'autre son intérêt scientifique car il présente une dynamique lente semblable à celle observée pour les verres.

Nous commençons par présenter le travail d'Emilie Rouèche [Rouèche05]. Les expériences réalisées concernent des vibrations verticales sinusoïdales. Elle a établi pour différents sables des cartographies en fréquence et en accélération pour la compacité de l'empilement pendant les vibrations et après relaxation (figure I-5.a).

Nous nous intéressons maintenant aux travaux de deux équipes de recherches qui ont mené des études expérimentales sur ce sujet en s'intéressant particulièrement à la dynamique lente de la compaction jusqu'à obtention d'un état stationnaire et qui proposent des lois différentes décrivant cette dynamique. Notons que les vibrations imposées au milieu sont sous forme de chocs verticaux espacés d'une durée suffisante pour permettre la relaxation du milieu. Dans ces expériences, le temps correspond au nombre de chocs.

La première équipe, celle de Chicago [Knight95], a conduit ses expériences dans des conditions opératoires permettant d'éviter l'apparition du mouvement convectif. Ils ont mesuré la compacité à l'aide de capacités électriques placées à différentes altitudes sur le récipient. Ils ont trouvé une loi logarithmique qui régit l'évolution de la compacité C de l'empilement en fonction du temps :

$$C = C_{\infty} - (C_{\infty} - C_0) \frac{1}{1 + B \ln(1 + t/\tau)}$$

Où C_{∞} et C_0 désignent respectivement la compacité de l'empilement aux temps infinis et au départ. τ est un temps caractéristique et B un paramètre sans dimensions. Ces quatre paramètres doivent être ajustés.

La deuxième équipe, celle de Rennes [Philippe02 ; Ribière05 ; Richard05], ont trouvé une autre loi, cette fois exponentielle, pour décrire la dynamique de la compaction. Ils ont mesuré la compacité de l'empilement grâce à une technique utilisant les rayons Gamma et ont opéré avec des conditions expérimentales permettant l'apparition de la convection. La loi qu'ils proposent est la suivante :

$$C = C_{\infty} - (C_{\infty} - C_0) \exp(-(t/\tau)^{\beta})$$

Ici, τ et β sont des paramètres ajustables, mais C_∞ et C_0 sont donnés par l'expérience.

Finalement, une autre étude réalisée par l'équipe de Chicago [Nowak97] montre que la réponse en compacité d'un empilement à des vibrations verticales en fonction de l'accélération présente deux branches : une irréversible et l'autre réversible. La branche irréversible est obtenue en augmentant l'accélération à partir de l'état initial. Elle montre l'obtention d'un maximum de compacité pour un Γ_{\max} . La branche réversible est obtenue en diminuant progressivement l'accélération à partir d'une valeur supérieure à Γ_{\max} . La compacité finale obtenue est alors supérieure à celle obtenue pour Γ_{\max} (figure I-5.b).

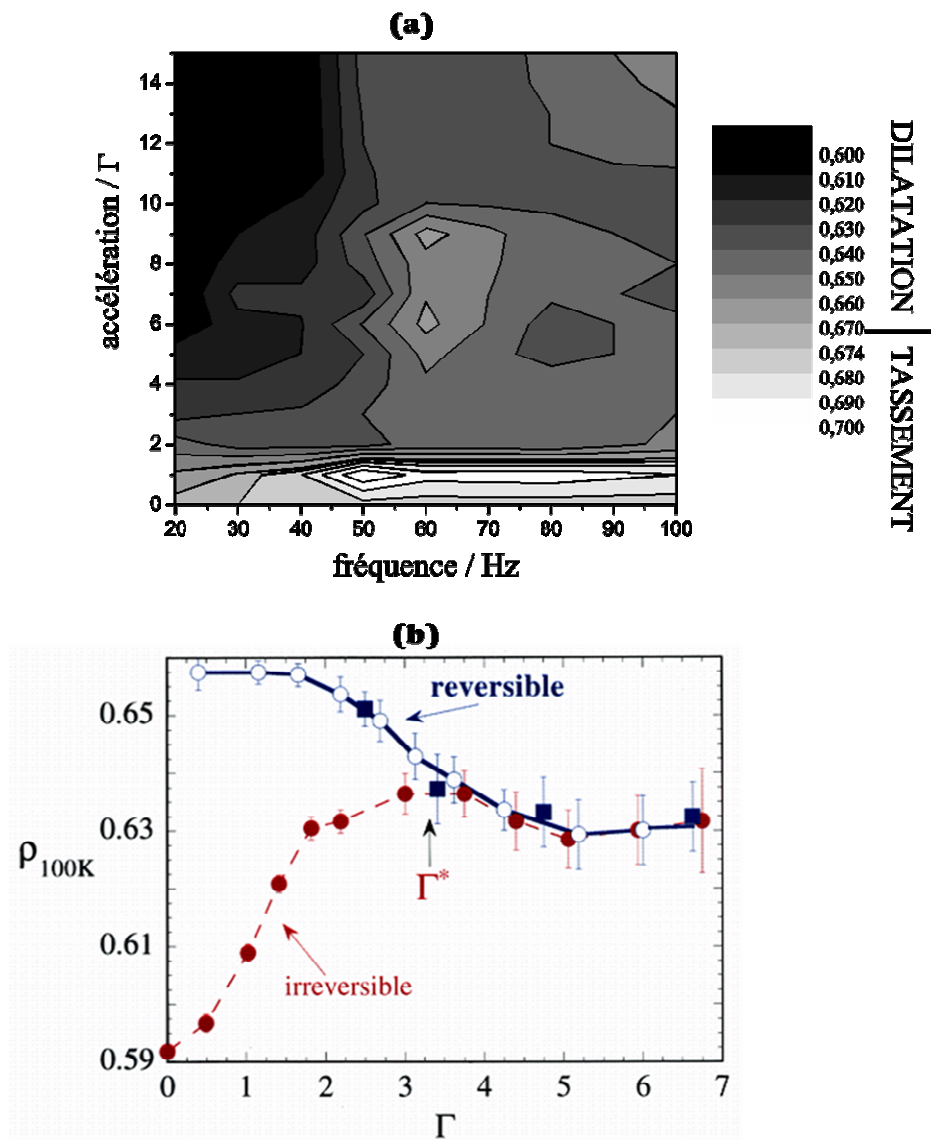


Figure I-5 – Vibrations verticales : (a) Cartographie de la compacité après relaxation [Rouèche05].
(b) Evolution de la compacité de l'empilement en fonction de Γ [Nowak97].

I.C. Vibrations horizontales

Comme nous l'avons mentionné précédemment, les études traitant des vibrations horizontales ne sont pas nombreuses. Deux phénomènes semblent le plus intéresser les chercheurs : la transition d'un comportement solide vers un comportement liquide et les mouvements convectifs. Nous avons recensé uniquement deux travaux qui s'intéressent à la compacité du milieu granulaire sous vibrations horizontales.

Nous présenterons ces différentes études en les différenciant selon la géométrie de l'empilement 2D ou 3D.

I.C.1. Transition vers l'écoulement

Sous faibles excitations, le milieu granulaire se comporte comme un solide compact. Les grains ont tous le même mouvement : ils suivent les vibrations imposées et donc sont immobiles dans le référentiel du récipient. Quand on augmente l'intensité des excitations, les grains commencent à être mobiles dans le référentiel du récipient et on observe alors des écoulements : le milieu granulaire se comporte comme un liquide. Ainsi, un milieu granulaire soumis à des vibrations subit une transition d'un comportement solide vers un comportement liquide appelée « transition vers l'écoulement » et parfois « transition vers la fluidisation ». Tennakoon *et al* [Tennakoon99] proposent une définition de cette première instabilité ; elle consiste en un mouvement de ballotement de la surface "sloshing" dans la direction des excitations et en un faible mouvement convectif dans les deux autres directions transversales.

Il faut remarquer, ici, que la fluidisation peut être obtenue sans qu'il y ait écoulement des grains. Huerta *et al* [Huerta05] ont montré que grâce à des vibrations horizontales à haute fréquence (à l'aide d'haut-parleurs), ils obtiennent un lit de grains présentant un comportement fluide dans le sens où un objet en immersion subit une force équivalente à la poussée d'Archimède.

Contrairement aux vibrations verticales, cette transition vers l'écoulement peut être observée pour des valeurs de Γ inférieures à 1.

En 2D

Ristow *et al* [Ristow97] ont étudié cette transition pour un lit mince en 2D expérimentalement et numériquement. Ils ont choisi comme observable la température

granulaire. Ils obtiennent une courbe universelle pour la température granulaire adimensionnée en fonction de l'accélération relative Γ (voir figure I-6).

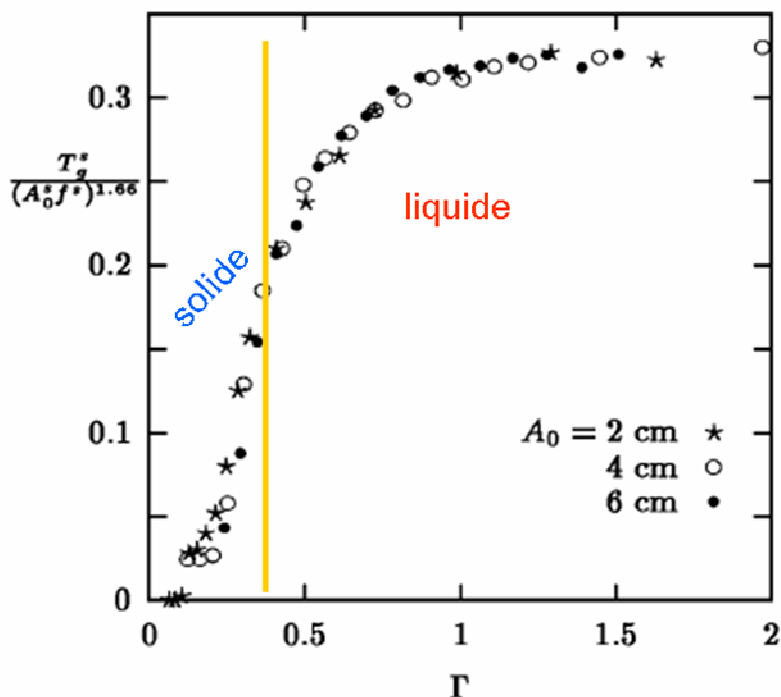


Figure I-6 : Simulations numériques : T_g adimensionnée en fonction de l'accélération relative Γ pour différentes amplitudes de vibrations A_0 [Ristow97]

En 3D

Deux équipes de recherche se sont intéressées à l'étude de la transition solide-liquide pour des empilements en géométrie 3D. La première, celle de Behringer [Tennakoon99 ; Metcalfe01] a traité le cas de lits denses. Par contre, Aumaître *et al* ont étudié le cas de lits granulaires minces [Aumaître07]. Ces différentes études sont menées à des faibles fréquences $f < 15$ Hz.

L'équipe de Behringer a caractérisé cette transition en observant l'évolution de l'épaisseur de la couche fluidisée avec Γ . En effet, ils observent qu'à la transition, le milieu granulaire se ségrège en 2 couches : une couche superficielle fluidisée d'épaisseur H et une couche inférieure en bloc solide (voir figure I-7). Cette ségrégation n'a pas été rapportée par Aumaître *et al* qui caractérisent la transition solide-liquide en mesurant la vitesse des grains à la surface libre de l'empilement (voir figure I-8.a).

Ces différentes études se rejoignent sur le fait que cette transition présente une hystérésis. En effet, pour un matériau donné, on obtient deux valeurs de Γ critiques : Γ_c dans le sens croissant et Γ_d dans le sens décroissant avec $\Gamma_c > \Gamma_d$ (voir figure I-7.a et

figure I- 8.a). L'équipe de Behringer explique ceci par le fait qu'en partant du repos on doit solliciter suffisamment le milieu pour lui permettre de se dilater et donc de s'écouler ; mais une fois que le milieu est fluidisé, il a besoin de moins d'énergie pour le rester. Cette interprétation est confirmée par le fait qu'en injectant de l'air par la base poreuse du récipient, on introduit une dilatation (moins de 2%) dans le milieu et la transition ne présente plus d'hystérésis. Cependant, aucune indication n'est donnée concernant la compacité du milieu.

Behringer *et al.* trouvent que cette transition ne dépend pas de la hauteur du lit tant qu'elle est supérieure à quinze fois le diamètre moyen des grains. Cette tendance est confirmée d'une certaine manière par Aumaître *et al.* qui trouvent que la valeur de Γ critique diminue avec la hauteur du lit dans une gamme de hauteurs variant entre un et quinze diamètres de grains.

Cependant, ces études sont en désaccord quant à l'influence de la fréquence. Pour les premiers, aucune tendance n'est observée en variant la fréquence. Par contre, les seconds trouvent que la valeur de Γ critique augmente avec la fréquence (figure I- 8.b).

Signalons enfin un dernier résultat trouvé par Behringer *et al.* La valeur de Γ critique augmente avec le coefficient de friction des grains et la boucle d'hystérésis devient plus large.

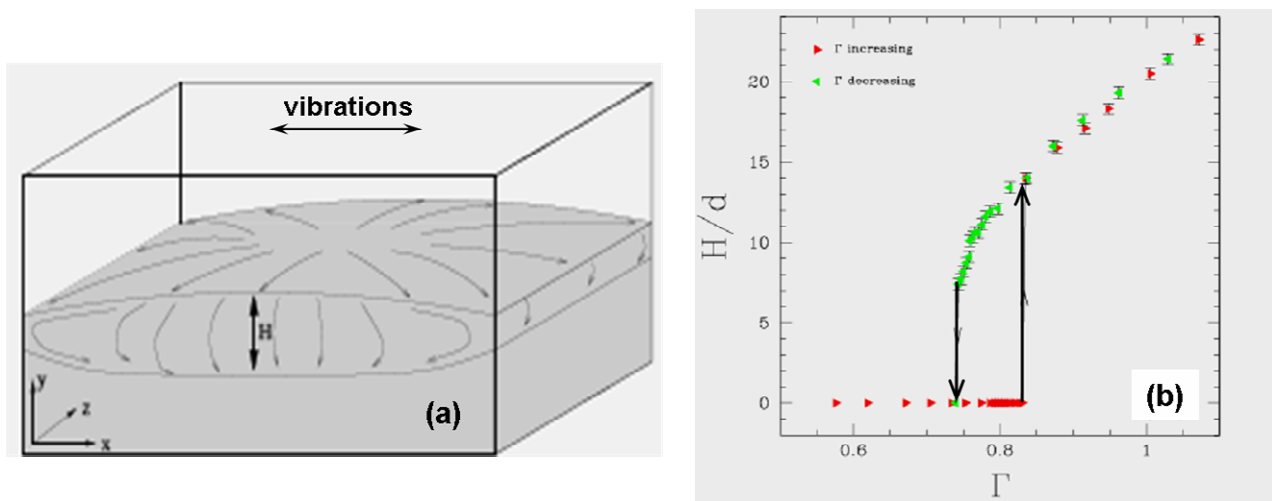


Figure I-7 : (a) Ségrégation de l'empilement en une couche supérieure fluidisée et une couche inférieure solide et schéma des lignes de convection.(b) Evolution de l'épaisseur H de la couche fluidisée avec l'accélération pour un sable lisse de diamètre d .

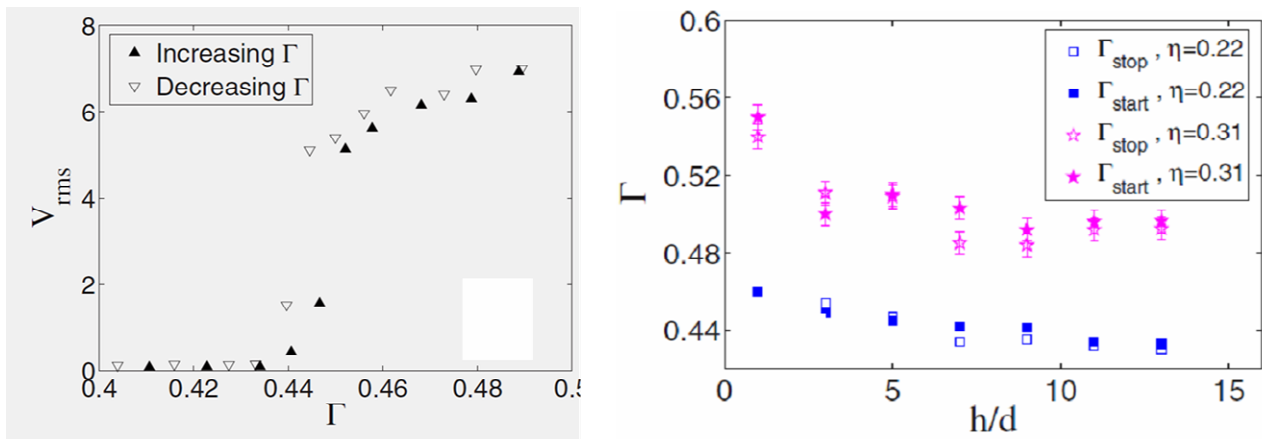


Figure I-8 : (a) Evolution de la vitesse des grains avec Γ montrant une transition avec une petite hystérésis. (b) Influence de la hauteur h du lit et de la fréquence adimensionnée η sur les valeurs critiques de Γ [Aumaitre07].

I.C.2. Mouvements convectifs

Plusieurs études expérimentales et numériques en 2D et 3D se sont intéressées aux mouvements convectifs. Elles montrent que comme pour les vibrations verticales, on observe des cellules de convection pour les vibrations horizontales. En effet, le lit granulaire se dilate et offre la possibilité aux grains de se mouvoir les uns par rapport aux autres. Cependant, le nombre et le sens de rotation des rouleaux de convection ne font pas l'unanimité.

En 2D

Les études expérimentales et les études numériques ne s'accordent pas sur le nombre des rouleaux de convection et leur sens de rotation. En effet, Hsiau *et al* [Hsiau02b] dans une étude expérimentale en 2D menée sur des disques de bronze montrent l'existence uniquement de deux rouleaux contrarotatifs avec un mouvement descendant sur les parois. Par contre, Saluena *et al* [Saluena00] *et* Liffman *et al* [Liffman97] montrent dans des études numériques la possibilité d'observer différentes formes et nombres de rouleaux de convection contrarotatifs selon les conditions opératoires.

Selon Liffman, pour une faible accélération $\Gamma=0,5$, on peut observer un seul rouleau de convection. Et pour des $\Gamma>1,2$, on obtient quatre rouleaux de convection en deux paires superposées. Les deux rouleaux supérieurs ont un mouvement descendant dans le centre de la boîte et les rouleaux inférieurs ascendant (voir figure I- 9). Le mouvement de ballotement en surface crée périodiquement des vides au niveau des parois. En effet, sur une paroi donnée, on a création d'un vide pendant un demi cycle de vibration

provoquant ainsi des avalanches de grains dans ce vide et disparition de ce dernier pendant l'autre demi cycle. Les grains piégés poussent leurs voisins vers le centre de la boîte. C'est le mécanisme qui alimente les rouleaux inférieurs. Ceci est confirmé par la relation de proportionnalité entre y_c (distance séparant le fond de la boîte et la base des rouleaux inférieurs) et y_s (la différence entre la hauteur du lit et la profondeur du vide créé).

Saluena *et al.* ont observé, dans une étude numérique, qu'en diminuant le coefficient d'amortissement paroi / grain, nous pouvons passer d'une configuration à deux rouleaux de convection avec un flux des grains ascendant au centre de la cellule et descendant aux parois à une configuration à deux rouleaux avec des flux opposés, et tout en passant par une configuration à quatre rouleaux identique à celle observée par Liffman.

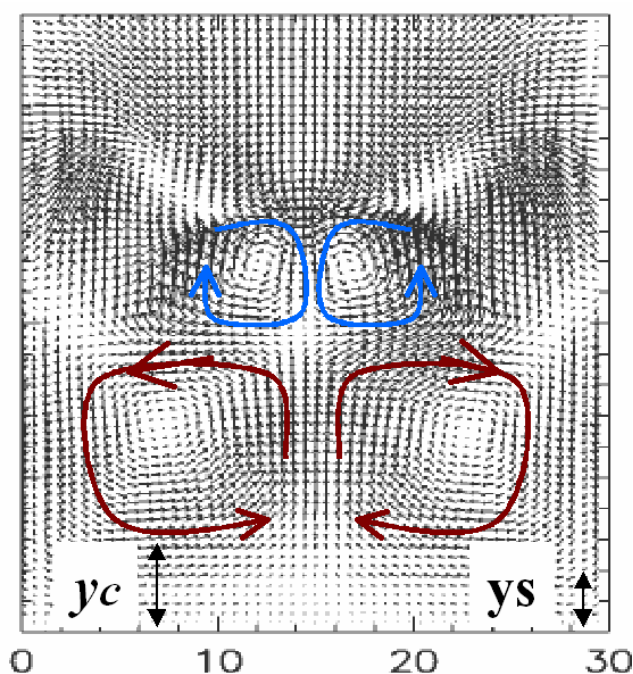


Figure I-9 : Vecteurs déplacements moyennés sur un cycle de vibration avec $\Gamma=2$ et l'amplitude $A=5d$ mettant en évidence quatre rouleaux de convection. [Liffman97]

En 3D

Pour une géométrie en 3D, nous avons recensé uniquement les travaux de Medved *et al.* [Medved99, Medved00, Medved02] et les travaux de l'équipe de Behringer présentés dans la partie I.C.1 qui se sont intéressés plus particulièrement à la transition solide-liquide tout en proposant des résultats (figure I-7.a) et des explications concernant les mouvements convectifs. Leurs observations expérimentales sont en accord avec celles de Medved. Nous nous contenterons alors de présenter les résultats de ce dernier.

Dans une première étude, Medved *et al*/[Medved99] se sont intéressés aux motifs formés par les mouvements convectifs. Ils observent que ces motifs dépendent de trois paramètres en plus des paramètres des vibrations (amplitude, accélération relative) :

La rugosité des parois, la largeur du récipient l et le rapport d'aspect $\eta = \frac{H}{L}$ avec H hauteur de remplissage et L longueur du récipient dans la direction des vibrations.

Selon ces paramètres, on peut obtenir deux cas de figures :

- 2 paires de rouleaux contrarotatifs superposées.
- 2 rouleaux contrarotatifs dans la couche liquéfiée.

Le premier cas est obtenu pour des parois rugueuses, un récipient étroit ou un rapport d'aspect η proche de 1. Il s'agit de deux rouleaux contrarotatifs superficiels avec un mouvement descendant au niveau de la paroi et deux rouleaux contrarotatifs inférieurs avec un mouvement ascendant au niveau de la paroi (voir figure I- 10.a). Ce qui est le contraire de ce qui était trouvé dans les études de Liffman et Saluena.

Le deuxième cas de figure est obtenu pour des parois lisses et des faibles hauteurs de remplissage. Il est similaire au mouvement convectif reporté dans d'autres études expérimentales. Il s'agit de deux rouleaux contrarotatifs qui occupent toute la couche fluidisée et ayant un mouvement descendant au niveau des parois (voir figure I- 10.b). En effet, Medved *et al* pensent que les vides créés au niveau des parois à cause des mouvements de ballottement de la surface sont uniquement localisés dans la couche fluidisée et alimentent donc ces rouleaux convectifs supérieurs. Si à partir de cette configuration, on augmente l'accélération relative Γ , \square tout le lit granulaire devient fluidisé et on observe alors une transition vers la configuration à 4 rouleaux. On obtient également cette transition en augmentant la hauteur de remplissage H .

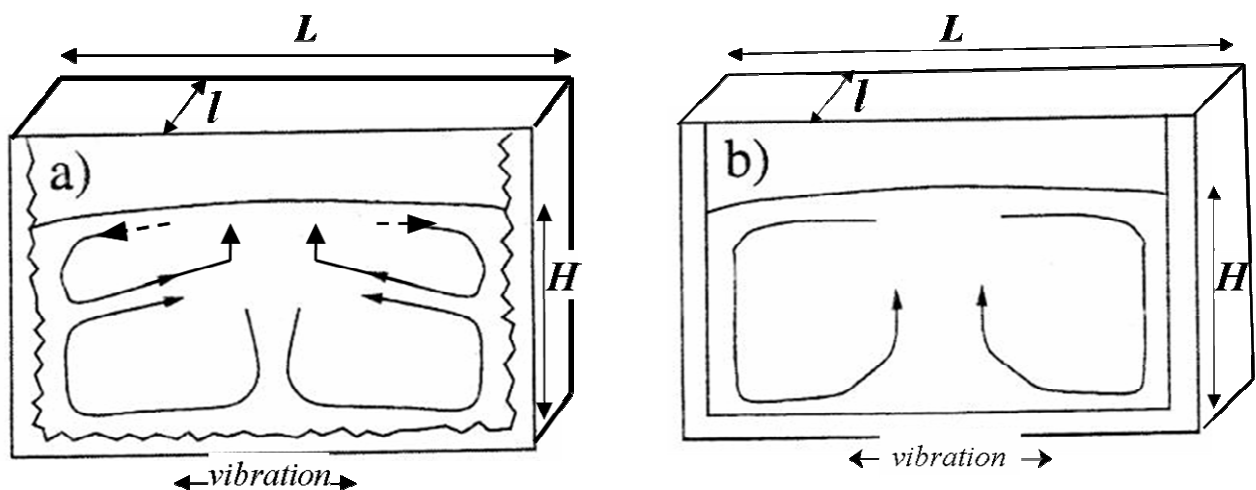


Figure I-10 : (a) 2 paires de rouleaux contrarotatifs de convection obtenus pour $L=200$ mm, $l=11$ mm, $h=62$ mm, $f=33$ Hz, $\Gamma=10$, parois rugueuses, $d=0.7$ mm (b) 2 rouleaux contrarotatifs de convection obtenus pour $L=200$ mm, $l=7$ mm, $h=40$ mm, $f=33$ Hz, $d=0.7$ mm, et parois lisses.

Dans les deux autres études, Medved *et al.* se sont placés dans les conditions expérimentales donnant une configuration à deux rouleaux de convection. Ils se sont intéressés aux différents modes de réponse de l'empilement aux vibrations horizontales. En effet, ils ont mesuré les vitesses des grains à la paroi latérale (parallèle aux vibrations) à différentes échelles de temps en comparaison avec la période des oscillations T :

- Aux temps lents de l'ordre de quelques T : réponse convective.
- Aux temps courts de l'ordre de $T/10$: cisaillement rapide.
- De l'ordre de T : réponse harmonique.

Pour chaque mode de réponse, ils ont défini une profondeur caractéristique D_c . Ils trouvent que ces différentes profondeurs sont égales à D^* . L'évolution de D^* avec l'accélération relative Γ est indépendante de la fréquence (voir figure I- 11.a).

Ils ont également mesuré la profondeur du gap qui se crée entre une paroi transverse et l'empilement. Ils trouvent que l'évolution de la profondeur du gap avec l'accélération présente la même forme que l'évolution de D^* (voir figure I- 11.b). A partir de ce résultat, ils concluent que le gap est le moteur des différentes réponses de l'empilement aux vibrations.

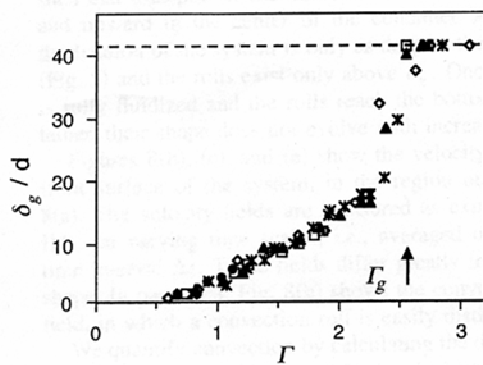


FIG. 4. The dependence of maximum gap depth δ_g on Γ . The data taken at 8 Hz (●), 15 Hz (□), 25 Hz (▲), 33 Hz (◇) and 50 Hz (*) overlap, indicating no frequency dependence. The gradual increase has an onset at $\Gamma \approx 0.5$. The sharp jump at Γ_g brings δ_g equal to the full filling height $h_0=41d$. The size of the symbols corresponds to the error bars of the measurement.

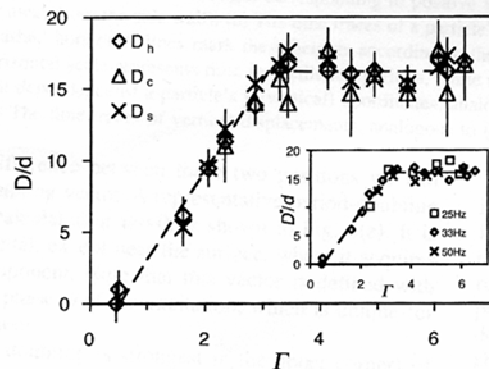


FIG. 10. The dependence of the characteristic depths D_c , D_h , and D_s on Γ . Note that, within the experimental accuracy, they all trace the same curve. The dashed line is a fit to the average of their values D^* , linear up to $\Gamma=3$, and constant thereafter. The inset shows the values of D^* for three different frequencies, 25, 33, and 50 Hz. There is no observable frequency dependence. The dashed line is the same as in the main figure, and is shown for reference.

Figure I-11 : Evolution du profondeur du gap δ (à gauche) et des différentes profondeurs caractéristiques (à droite) avec Γ [Medved02].

I.C.3. Compaction

Pouliquen et al [Pouliquen97] se sont intéressés à la compaction des milieux granulaires vibrés horizontalement d'une manière assez originale. En effet, en faisant varier la vitesse de remplissage de l'empilement et les conditions d'excitation, ils sont arrivés à obtenir un empilement en 3D monodisperse cristallisé permettant ainsi l'obtention d'une compacité moyenne atteignant 67 % et donc supérieure à la compacité maximale communément obtenue « random close packing » égale à 64 %.

Pour ce faire, le remplissage est réalisé à travers une matrice de bâtonnets répartis aléatoirement qui permet ainsi de répartir les grains d'une manière uniforme sur toute la surface de l'empilement. Ce mode de remplissage s'apparente à la pluviation. Le flux Q des grains versés est ainsi contrôlé. Le maximum de compacité est obtenue pour les faibles $Q \leq 3$ particules $\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ d'une manière indépendante de l'accélération relative pour $\Gamma > 0,5$. L'influence de l'accélération se fait ressentir pour des flux $Q > 3$ particules $\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ où un maximum de compacité est atteint pour une valeur particulière de Γ (figure I-12).

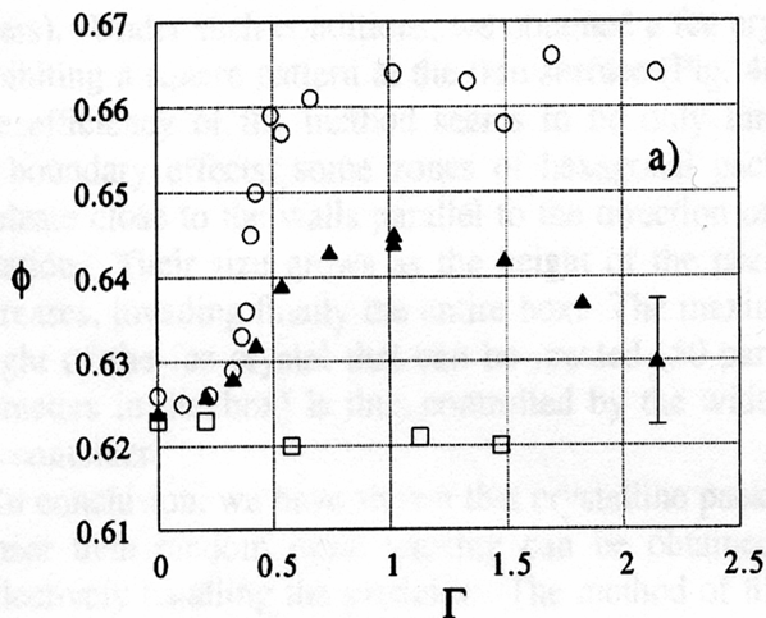


FIG. 3. (a) Final volume fraction as a function of the relative acceleration Γ for $A/d = 1.1$ and for different filling rates. \circ : $Q = 2.8$ (particle/s)/ cm^2 ; \blacktriangle : $Q = 60$; \square : $Q = 120$.

Figure I-12 : Evolution de la compacité relaxée de l'empilement en fonction de Γ pour différents flux de remplissage [Pouliquen97]. La vibration s'effectue en même temps que le remplissage du récipient.

La deuxième étude que nous avons recensée traitant de l'évolution de la compacité de l'empilement s'intéresse au cas des vibrations tridimensionnelles à partir de simulations numériques [An08]. Les principaux résultats rapportés s'intéressent à l'évolution de la compacité en fonction des paramètres de vibration (amplitude, fréquence et accélération) et des paramètres matériaux notamment les coefficients de glissement et roulement. Concernant les premiers paramètres, la compacité présente toujours un maximum ensuite diminue quand on augmente l'un de ces paramètres. Cependant, un seul paramètre n'est pas suffisant pour rendre compte de cette évolution. Pour les paramètres matériaux, la compacité de l'empilement diminue si on augmente un coefficient ou l'autre.

L'ensemble des résultats rencontrés montre la nécessité d'expériences plus systématiques et de modélisation complémentaire pour mieux comprendre les effets observés de différents paramètres donnés dans des cas assez particuliers.

Chapitre II: Matériau, matériels et techniques expérimentales

II.A. Matériau granulaire

Dans l'objectif de se rapprocher le plus possible du contexte industriel, nous faisons le choix de travailler avec du sable fourni par notre partenaire industriel, la société Ferraz Shawmut. Cette dernière utilise différents types de sable pour le remplissage de ses fusibles. Le choix du type de sable dépend des dimensions de la coque céramique. Un sable fin (respectivement gros) est utilisé pour le remplissage des fusibles de petites tailles (respectivement grandes tailles).

Afin de réduire le nombre de paramètres de l'étude, nous faisons le choix de travailler exclusivement avec un seul type de sable « le sable 2 ». L'utilisation d'un autre sable, « le sable 4 », est seulement faite à titre comparatif.

II.A.1. Nature chimique

Une analyse par diffraction des rayons X montre que les deux sables sont composés de quartz alpha cristallisant dans le système hexagonal compact (voir figure II-1). Une analyse de la composition chimique par spectrométrie de flamme [Rouèche05] montre que ces sables sont composés de plus de 98% de silice. La masse volumique des sables mesurée par pycnométrie Hélium est égale à $2,6521 \text{ g.cm}^{-3}$ à 25°C . Cette valeur est très proche de celle du quartz alpha $2,65 \text{ g.cm}^{-3}$ et indique l'absence de porosité interne.

Pour mieux visualiser les mouvements granulaires, nous avons eu recours à la coloration de quelques grains. Nous utilisons différentes colorations. La première est réalisée par une imprégnation à l'encre de chine (noire) suivi d'un séchage du mélange à 38°C . Pour obtenir d'autres couleurs, nous utilisons des colorants alimentaires concentrés. Après

imprégnation, le mélange est séché à l'étuve à 180°C pendant trois heures. L'utilisation des colorants alimentaires est recommandée pour limiter la manifestation d'effets électrostatiques.

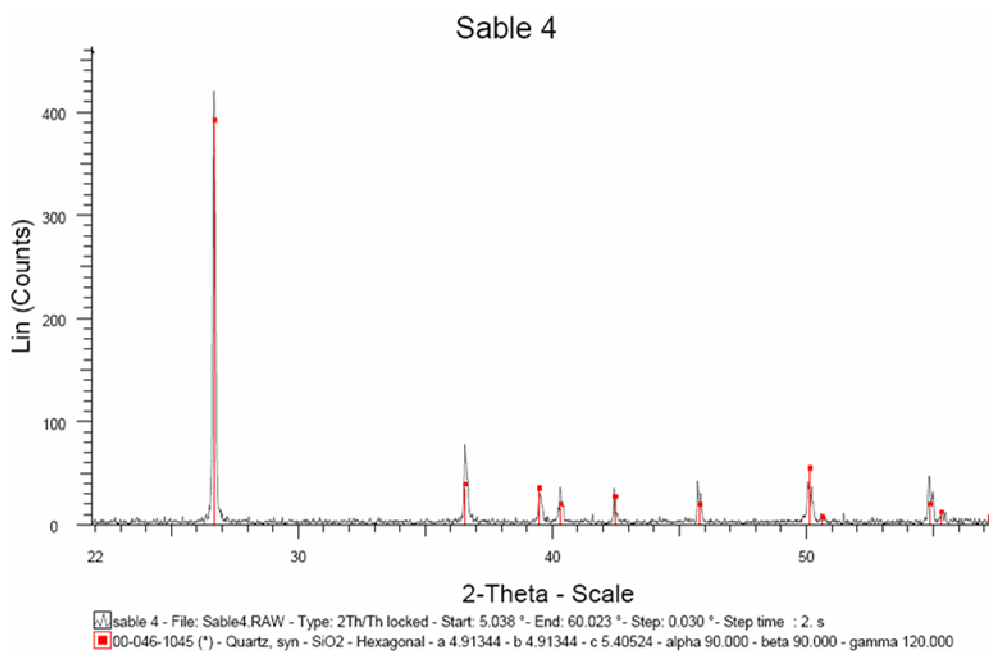
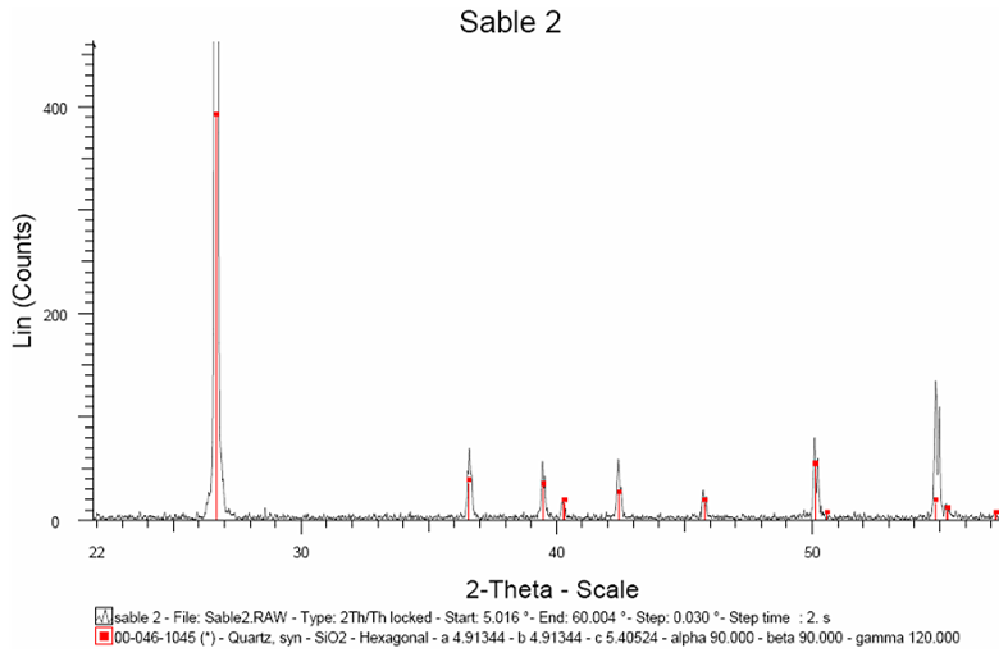


Figure II-1. Analyse par diffraction de rayons X des deux types de sables indiquant la variété de silice « quartz alpha ».

II.A.2. Morphologie

Le comportement des grains est fortement influencé par leurs formes. Il est donc important d'avoir des informations sur la morphologie de nos deux sables. Nous avons vu dans la partie bibliographique les différentes manières de quantifier la forme des grains (élongation, sphéricité, arrondi). Cependant, entreprendre de telles mesures est d'une part fastidieux et d'autre part non congru dans notre étude. Pour décrire nos sables, nous nous contenterons d'observations visuelles. Nous comparons nos sables en s'aidant de la classification de Powers [Powers53].

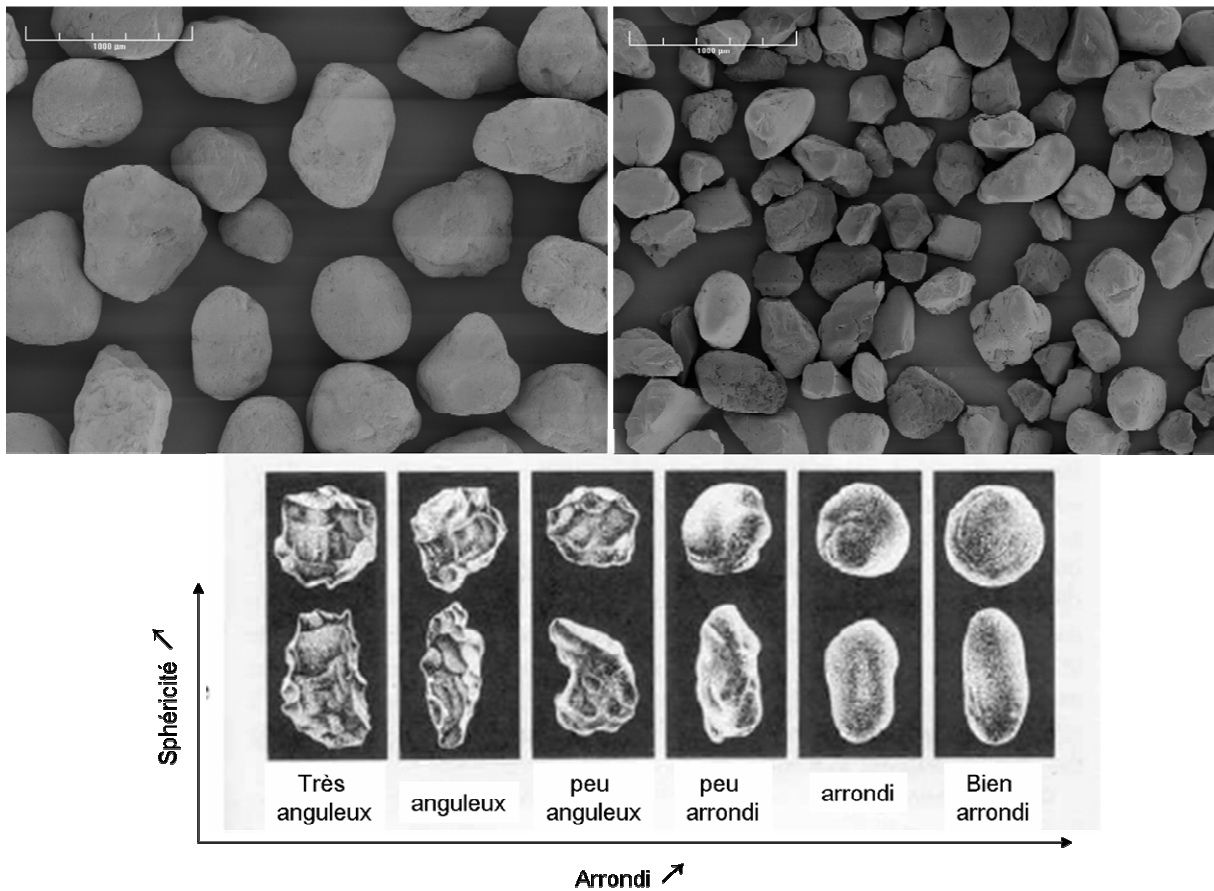


Figure II-2. Images MEB des deux sables : sable2 à gauche, sable4 à droite. En bas, l'échelle de classification de Powers en fonction de l'arrondi et la sphéricité [Powers53].

Nous voyons sur les images présentées par la figure 2 que le sable2 est plutôt peu arrondi et le sable4 est plutôt peu anguleux. La sphéricité des deux sables est comparable mais difficile à définir vu que les deux sables présentent un mélange de grains allongés et de grains compacts.

II.A.3. Distribution granulométrique

L'analyse granulométrique des sables est réalisée par granulométrie en utilisant le principe de diffraction d'un rayonnement laser avec le Mastersizer2000 de la société MALVERN. Il s'agit d'une analyse en voie sèche. Un échantillon de sable est déposé sur un tapis vibrant qui achemine et verse les grains par gravité devant la partie optique de l'appareil. Les grains, dans leur chute, coupent le faisceau laser qui est alors diffracté par les particules. Une série de photodiodes de détection sont disposées perpendiculairement à l'axe du faisceau laser incident. L'angle de diffraction varie en sens inverse par rapport à la taille du grain. La théorie de Fraunhofer permet le passage de la figure de diffraction à la distribution granulométrique pour une gamme de tailles de 2 à 2000 μm .

Au cours de cette étude, nous avons reçu trois lots de sable2 et un lot de sable4. Nous avons remarqué une évolution dans le temps de la distribution granulométrique du sable2 vers les petits diamètres. Le diamètre moyen d_{43} a diminué de 580 à 517 μm . Afin de faciliter la lecture de ce travail, nous nous contenterons de présenter les résultats concernant le 3^{ème} lot. L'étude quantitative est réalisée avec ce lot.

La figure II-3 présente les distributions granulométriques en volume des deux sables. Les différentes informations fournies par le Mastersizer2000 sont regroupées dans le tableau II-1. Le $d_n\%$ représente la taille en dessous de laquelle se trouve la fraction volumique $n\%$ des grains. Le diamètre médian $d_{50\%}$ diffère du diamètre moyen pondéré en volume d_{43} . Ce dernier paramètre sera utilisé dans notre étude comme le diamètre moyen des grains. Le span ou le coefficient de variation mesure la largeur de la distribution. Plus ce coefficient est grand plus la distribution est large et donc le matériau polydisperse. Il est défini par la formule suivante :

$$span = \frac{d_{90\%} - d_{10\%}}{d_{50\%}}$$

[μm]	$d_{10\%}$	$d_{50\%}$	$d_{90\%}$	d_{43}	span
Sable2	335	495	730	517	0,8
Sable4	260	377	547	393	0,76

Tableau II-1. Bilan des distributions granulométriques en volume des deux sables.

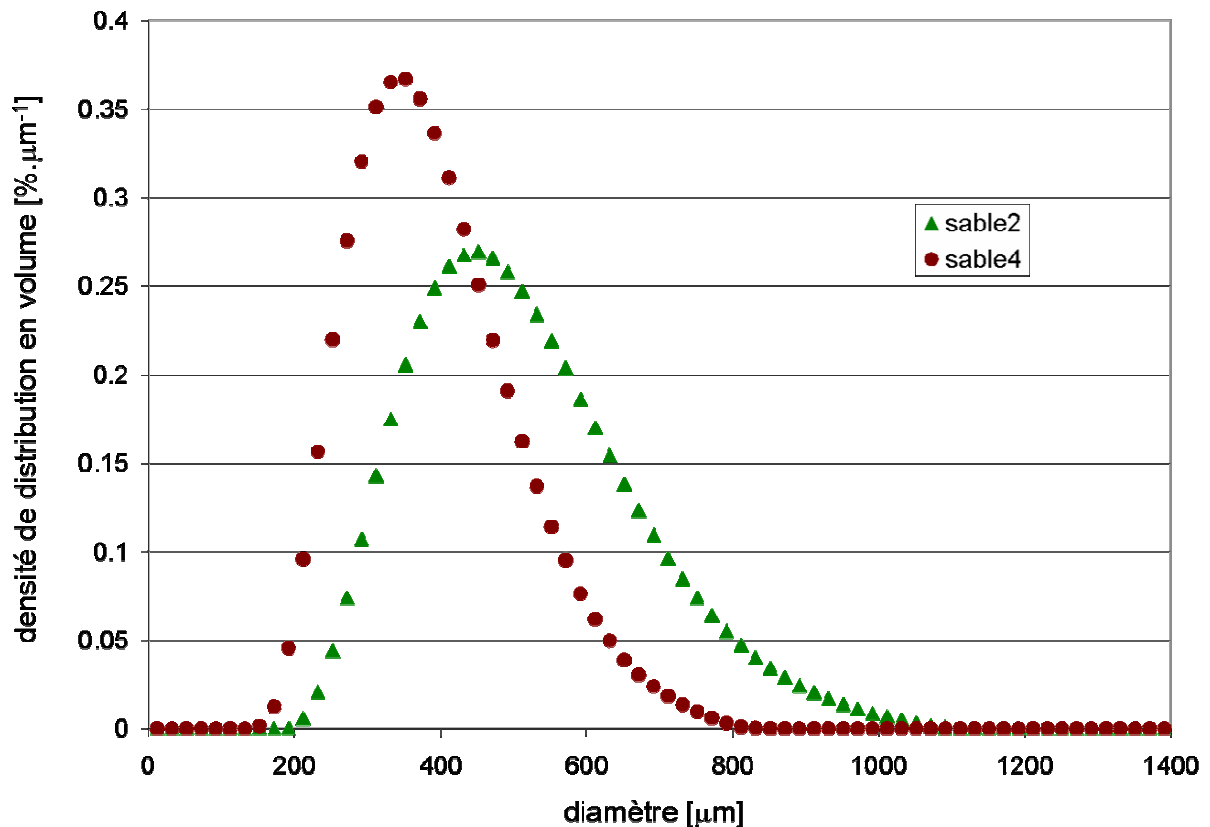


Figure II-3. Densité de distribution en volume de la taille des grains des deux sables mesurée avec le Mastersizer2000 en voie sèche.

II.A.4. Comportement mécanique

II.A.4.a. Etude de la coulabilité

Il est important dans une étude des mouvements des grains de s'intéresser de très près à leurs propriétés de coulabilité. Cette propriété est définie d'autant de manières qu'il existe de façons de faire couler une poudre. Il n'existe pas un critère unique qui peut rendre compte tout seul de cette propriété. C'est pour cela que nous avons réalisé plusieurs expériences.

- **Le Flodex**

Le Flodex et le Powder Tester d'Hosokawa (PTH) sont parmi les appareils sur le marché qui mesurent la coulabilité. Le PTH se base sur une série de huit mesures pour donner une évaluation de la coulabilité à la poudre. Nous ne possédons pas un tel appareil dans nos locaux. Cependant, ces mesures ont été réalisées dans un précédent travail sur les mêmes types de sables [Rouèche05] et montrent que les deux sables ont d'excellentes coulabilités (>90 pts) et qu'elles sont voisines.

Quant au Flodex, il permet de différencier les propriétés de coulabilité entre deux poudres. L'expérience consiste à faire couler gravitairement la poudre contenu dans un cylindre à travers un orifice situé en son fond et dont le diamètre est de plus en plus petit jusqu'à atteindre le blocage. Le temps d'écoulement et la masse écoulee peuvent être considérés aussi et c'est à partir de ces données que nous quantifions la coulabilité. Cette expérience a été réalisée pour nos deux sables et pour le sable2 coloré. Nous observons un blocage pour le sable2 naturel et coloré pour un diamètre de l'orifice égal à 2,5 mm. Pour le sable4, nous n'observons pas de blocage jusqu'au plus petit diamètre d'orifice 2 mm. Il est possible que cette différence soit due en partie à la gêne stérique car le sable2 est plus gros que le sable4. C'est pour cela que nous présentons dans le tableau II-2 les résultats correspondant à un diamètre d'orifice égal à 4 mm.

Sable	Masse du sable écoulé [g]	Temps [s]	Débit massique [g.s ⁻¹]
Sable2 (d ₄₃ =517 μm)	195	125	1,56
Sable2 coloré en rouge	193	114	1,69
Sable2 coloré en rose	193,5	117	1,65
Sable2 coloré en jaune	194,5	123	1,58
Sable2 coloré en noir	195	122	1,6
Sable4 (d ₄₃ =393 μm)	197,5	102	1,94

Tableau II-2. Résultats du test de coulabilité par le Flodex pour un diamètre d'orifice de 4mm.

L'écart type est inférieur à 0,03 g.s⁻¹.

Nous remarquons à partir des résultats présentés dans le tableau 2 que :

- La coloration des grains n'affecte pas la coulabilité du sable2.
- Le sable4 a une coulabilité supérieure à celle du sable2.

- **Indice de Carr et indice de Haussner**

L'indice de Carr et l'indice de Haussner sont deux indices équivalents qui permettent d'apprécier la compressibilité d'une poudre. Ils sont obtenus par un test de tassement qui consiste à mesurer la diminution de volume apparent de 100 g de poudre placés dans une éprouvette soumise à 500 chocs normalisés. Un faible tassement atteint rapidement caractérise une poudre « de bonne coulabilité ». Ce test est réalisé avec l'appareil

AUTOTAP de la société « Quantachrome Instruments ». Les résultats sont groupés dans le tableau 3. Les deux indices sont définis de la manière suivante :

$$\text{Rapport de Haussner} : H_r = \frac{\rho_{aérée}}{\rho_{tassée}}$$

$$\text{Indice de Carr} : I_{carr} = \frac{\rho_{aérée} - \rho_{tassée}}{\rho_{tassée}}$$

Où $\rho_{aérée}$ est la masse volumique apparente du lit aéré avant le premier choc. Ici, pour le sable il s'agit de la densité en vrac. $\rho_{tassée}$ est la masse volumique du lit tassé, en fin de l'expérience.

Sable	compacité vrac [%]	compacité tassée [%]	I_{carr}	H_r
Sable2	61,3	67	0,08	1,08
Sable4	57,8	63,7	0.09	1,09

Tableau II-3. Résultats du test de tassement pour les deux sables. La compacité est le rapport de la densité du solide par la densité apparente du lit. Si l'indice de Carr est inférieur à 0,15 alors la poudre a une excellente coulabilité et s'il est supérieur à 0,40 alors la poudre a une coulabilité exécrationnelle. Si le rapport de Haussner est inférieur à 1,25 alors la poudre est sableuse ou granuleuse et s'il est supérieur à 1,40 alors la poudre est cohésive.

Ce test de tassement montre que les deux sables ont une excellente coulabilité et qu'ils sont « sableux ».

- **Angle de talus**

La mesure de l'angle de talus ou angle de repos est une méthode simple mais avec une multitude de variantes qui ne conduisent pas aux mêmes valeurs. Par exemple, l'angle obtenu par versement à hauteur de cône fixe est inférieur à celui obtenu par glissement sur une pente. En absence d'outils adaptés, ces mesures sont délicates. Nous avons choisi alors de procéder de la manière suivante :

- On construit un mur de sable entre deux plaques de plexiglas fixes distantes de 5 mm. Le mur est soutenu par une paroi mobile.
- On écarte la paroi mobile : le mur de sable s'effondre pour former une pente.
- On mesure l'angle sur la moitié supérieure du tas.

Cette expérience est réalisée avec du sable séché à l'étuve (HR=18,5 %). La figure II-4 montre les deux tas obtenus avec le sable2 et le sable4.

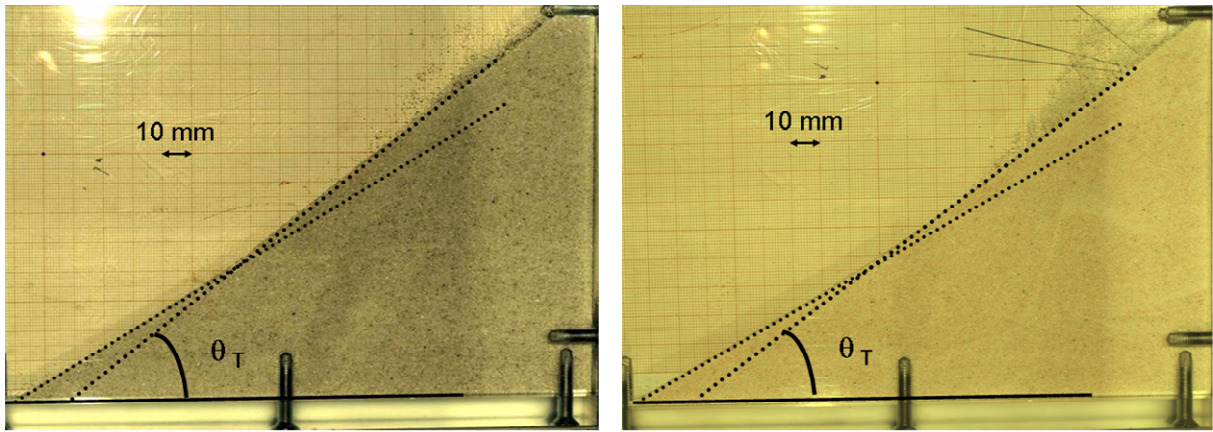


Figure II-4. Expérience de mesure de l'angle de talus. À gauche : sable2 ; à droite : sable4.

Nous obtenons les résultats suivants :

- Sable2 : angle de talus $\theta_T = 37^\circ$.
- Sable4 : angle de talus $\theta_T = 35,5^\circ$.

Ces valeurs sont à la limite de l'intervalle des poudres à excellente coulabilité et écoulement facile. Cependant, ce sont des valeurs qu'on trouve habituellement pour les sables. Ceci montre que la coulabilité ne peut pas être caractérisée par un seul critère.

• Indice de coulabilité

L'indice de coulabilité f_c permet de quantifier l'aptitude à l'écoulement d'une poudre. Il est obtenu à partir d'un essai de cisaillement d'une poudre. Il est égal au rapport de la contrainte de consolidation σ'_1 par la résistance à la compression σ_c . Cette dernière est égale au diamètre du cercle de Mohr passant par l'origine et tangent au lieu d'écoulement (voir figure II-5).

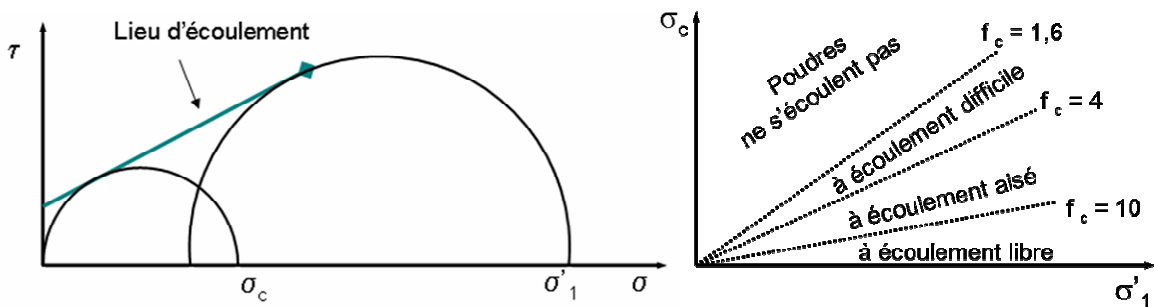


Figure II-5. Définition de l'indice de coulabilité à partir d'un lieu d'écoulement obtenu par un test de cisaillement. A droite : classification des poudres à partir de l'indice de coulabilité.

Ce test est réalisé sur nos deux sables grâce au rhéomètre à poudres FT4 de la société « Freeman Technology ». Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau II-4.

Sable	σ'_1 [kPa]	σ_c [kPa]	f_c
Sable2	15,9	0,83	19,2
Sable4	14,5	0,48	30,3

Tableau II-4. Indice de coulabilité des sables obtenus par le rhéomètre à poudres FT4.

Comme on s'y attendait, nous obtenons pour les deux sables des indices de coulabilité supérieurs à 10, avec une coulabilité meilleure pour le sable4.

II.A.4.b. Coefficients de friction grain/grain

Une caractéristique importante d'un lit granulaire est le coefficient de friction grain/grain qui régit les forces de contact entre les grains. Ce coefficient est également appelé coefficient de friction interne.

Pour mesurer ce coefficient, il suffit de réaliser une expérience de cisaillement de la poudre. Plusieurs dispositifs existent pour réaliser une telle expérience comme la cellule de cisaillement de Jenike ou la cellule de cisaillement annulaire de Schulze. Typiquement, l'expérience consiste à cisailer un lit de poudre qui subit une contrainte normale σ_N et déterminer la contrainte de cisaillement τ pour laquelle il y a écoulement. En variant la force normale, nous obtenons dans le plan (contrainte normale, contrainte tangentielle) une courbe « lieu d'écoulement ». En supposant que la loi de Coulomb s'applique au lit de poudre, nous pouvons assimiler cette courbe à une droite et écrire :

$$\tau = \mu \cdot \sigma_N + C$$

où μ est le coefficient de friction interne et C une contrainte de cohésion.

L'angle θ tel que $\theta = \arctan(\mu)$ est appelé l'angle de friction interne.

Cette expérience est réalisée avec le rhéomètre à poudres FT4 de la société « Freeman Technology ». Une cellule cylindrique remplie de sable subit une force normale imposée par un piston palmé. Un couple moteur est imposé au piston pour le mettre en rotation. Ainsi, pour chaque contrainte normale, on cherche la contrainte tangentielle minimale pour faire tourner le piston. Les courbes obtenues sont reportées dans la figure II-7. Le mode opératoire inclut une phase d'homogénéisation du milieu granulaire au préalable conformément à la préconisation du constructeur.

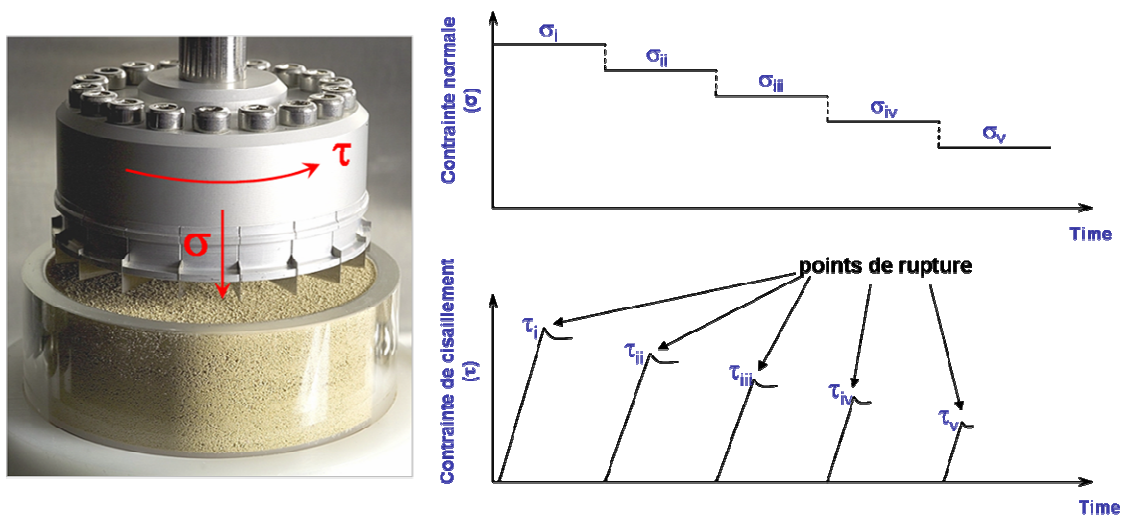


Figure II-6. Cellule de cisaillement du rhéomètre à poudres FT4. À droite : test de cisaillement.

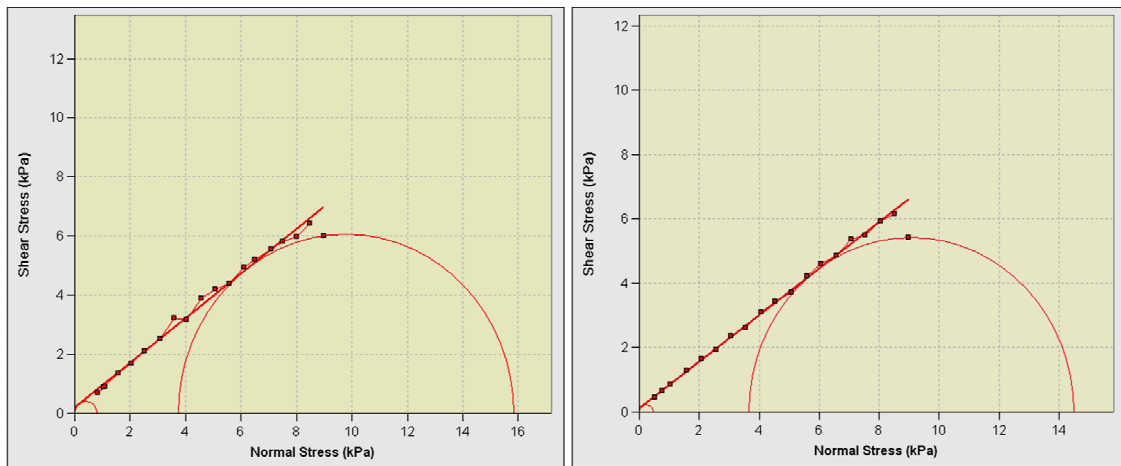


Figure II-7. Détermination du coefficient de friction interne par le rhéomètre à poudres FT4. À gauche : sable2 ; à droite : sable4.

A partir de ces courbes, le FT4 nous fournit plusieurs données regroupées dans le tableau suivant (tableau II-5) :

sable	θ_i	θ_i^*	θ_i^{SS}	$\mu_i = \tan(\theta_i)$	$\mu_i^* = \tan(\theta_i^*)$	$\mu_i^{SS} = \tan(\theta_i^{SS})$
Sable2	37°	38,2°	33,7°	0,75	0,79	0,67
Sable4	35,8°	36,6°	31,1°	0,72	0,74	0,60

Tableau II-5. Angles θ_i et coefficients de friction internes μ_i obtenus par un test de cisaillement avec le FT4. θ_i^* est l'angle de friction interne effectif. Il s'agit de la pente de la droite tangente au grand cercle de Mohr et passant par l'origine. θ_i^{SS} est l'angle de friction interne pour un écoulement permanent. Il s'agit de la pente de la droite passant par l'origine et le point de consolidation avant le cisaillement.

Il est intéressant de noter que les angles de friction internes θ_i sont pratiquement les mêmes que les angles de talus θ_T . Notons aussi que le coefficient de friction statique μ_i de mise en mouvement est supérieur à celui de friction dynamique μ_i^{SS} .

II.A.4.c. Coefficients de friction grain/paroi

Il est apparu d'après l'étude bibliographique que la friction entre les grains et les parois est un paramètre très important dans les expériences de vibration. A titre d'exemple, nous pouvons rapporter les travaux de Medved [Medved99] sur les vibrations horizontales d'un milieu granulaire. En effet, pour des parois lisses, il observe deux rouleaux de convection, et pour des parois rugueuses, il en observe quatre.

Dans notre étude, nous allons utiliser des parois lisses en Plexiglas. Cependant, il nous paraît insuffisant de se limiter à un critère qualitatif (lisse ou rugueux). C'est pour cela que nous proposerons ici une mesure du coefficient de friction entre nos deux sables et la paroi en Plexiglas.

Pour ce faire, nous utilisons le rhéomètre à poudres FT4 comme précédemment dans la détermination du coefficient de friction grain/grain en remplaçant le piston palmé par un disque en Plexiglas.

Nous réalisons cette expérience en utilisant un disque en Plexiglas neuf et un disque en plexiglas usé récupéré d'un récipient usagé. En effet, pendant les vibrations, les grains de sable abrasent rapidement la paroi du récipient. Cet effet se manifeste par la diminution de la transparence des parois.

Les graphiques sur la figure II-8 montrent les résultats obtenus pour nos deux sables. Nous constatons une diminution de la friction entre grains et paroi avec l'usure de la paroi. Cette diminution est observée pour les deux sables et elle est plus importante pour le sable2. Ce résultat peut poser un problème dans notre étude dans le sens où nous avons une évolution des caractéristiques de l'ensemble vibré au cours du temps. Cependant, cette évolution est très rapide dans le temps : après quelques minutes de vibration, la paroi se comporte comme une paroi « usée ».

Les coefficients de friction grains/paroi sont présentés dans le tableau II-6.

sable	Paroi neuve		Paroi usée	
	θ_p	$\mu_{ps} = \tan(\theta)$	θ_p	$\mu_{ps} = \tan(\theta)$
Sable2	19°	0.34	12°	0.21
Sable4	15,8°	0,28	12,7°	0,22

Tableau II-6. Angles θ_p et coefficients de friction sable/paroi μ_{ps} obtenus par le rhéomètre à poudres FT4.

La diminution du coefficient de friction μ_{ps} avec l'usure de la paroi est inattendue. Nous n'avons pas d'explication claire de ce phénomène. Plusieurs explications peuvent être avancées :

- Un dépôt de couche de silice (poussière de sable) sur la paroi qui peut jouer un rôle de « roulement » sur les parois et diminuer le frottement.
- Sous l'action abrasive des grains, une couche superficielle protectrice est enlevée de la paroi.
- La rugosité de la paroi est devenue supérieure et de ce fait l'adhérence des grains aux parois est diminuée.

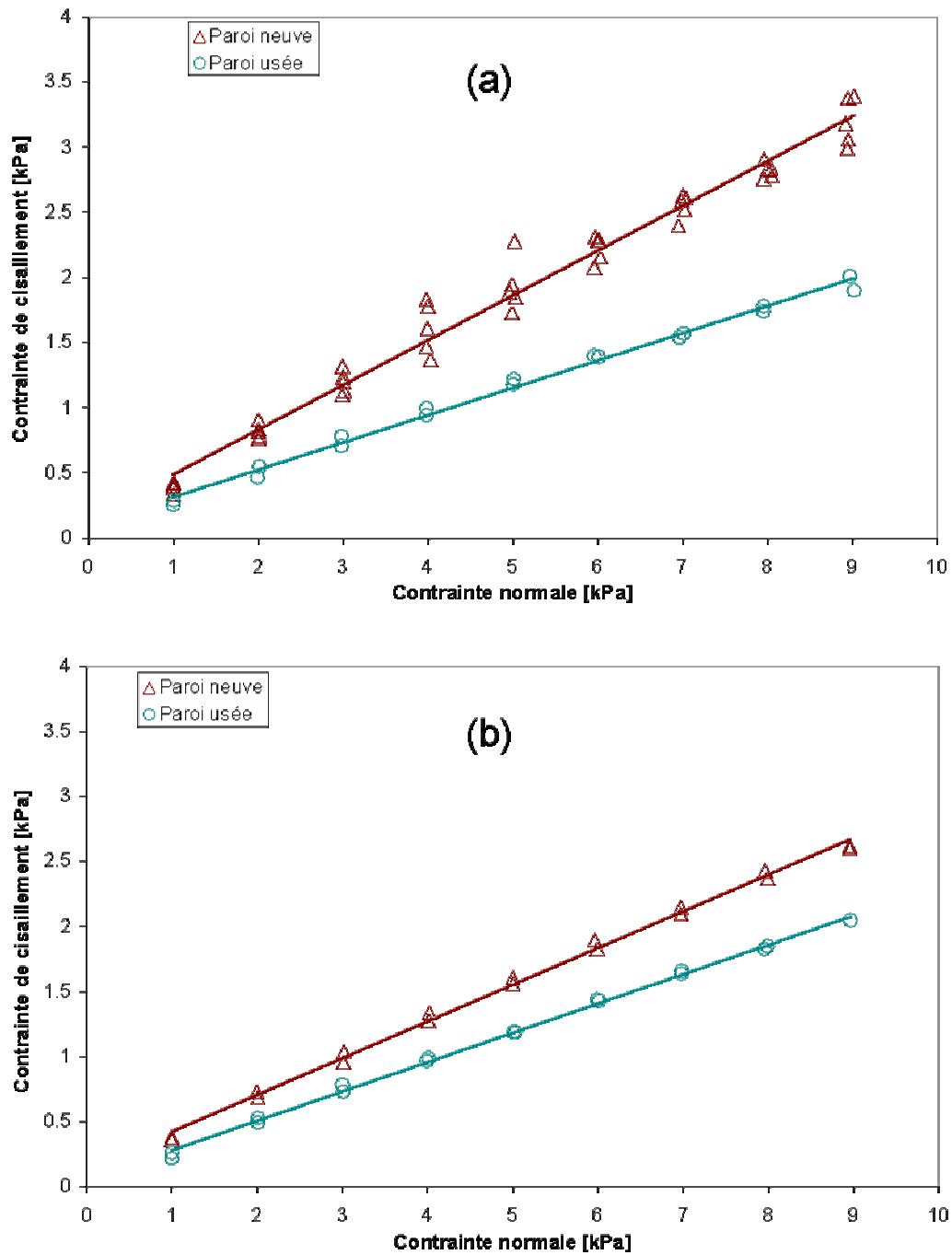


Figure II-8. Détermination du coefficient de friction paroi/sable avec le rhéomètre à poudres FT4. Le coefficient de friction est la pente de la droite reliant les différents points d'écoulement. (a) sable2-paroi ; (b) sable4-paroi.

II.B. Banc de vibration

Dans une première partie, nous nous consacrerons à la description des différents matériels composant le banc de vibration : pot vibrant, table vibrante et récipient (voir figure II-9). Le pot et la table sont solidement vissés à un support en marbre. En effet, quand il est en fonctionnement, le pot vibrant, notamment dans une configuration horizontale, est instable et transmet des vibrations parasites aux structures environnantes. Anciennement utilisé comme banc optique, ce support en marbre est plan et offre ainsi un parfait alignement entre le pot et la table. Son horizontalité est obtenue en ajustant la hauteur de ses trois pieds réglables.

Dans une deuxième partie, nous étudierons le fonctionnement de l'ensemble afin de déterminer le domaine d'étude accessible en fréquence et en accélération.

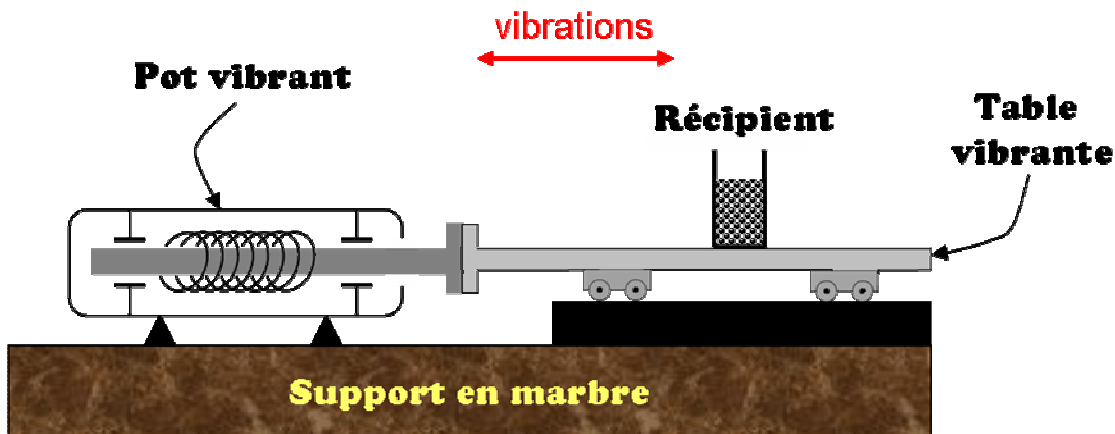


Figure II-9. Schéma simplifié du banc de vibration.

II.B.1. Description

II.B.1.a. Pot vibrant

Pour fournir des vibrations sinusoïdales, nous utilisons un pot vibrant électromagnétique. Le principe de fonctionnement d'un tel appareil est semblable à celui d'un haut-parleur. En effet, le pot est essentiellement composé d'une bobine mobile plongée dans le champ magnétique d'un (électro-)aimant fixe (voir figure II-10). Le mouvement vibratoire résulte de l'interaction entre un courant électrique, parcourant la bobine, et le champ magnétique. L'intensité de la force produite, dite force de Laplace, est proportionnelle à l'intensité du courant électrique dans la bobine, au champ magnétique et à la longueur du

conducteur placé dans ce champ. Ainsi, l'amplitude de la vibration du pot peut être contrôlée par l'intensité du courant électrique.

Pour cette étude, nous avons utilisé un pot vibrant de type S513 de la société TIRA associé à un amplificateur de puissance de type BAA120 de la même société. Afin de générer des vibrations de forme sinusoïdale, le pot est piloté par un générateur de signaux de type DSC4 de la société LING DYNAMIC SYSTEMS. L'accélération de la vibration générée par le pot est mesurée par un accéléromètre piézoélectrique, de type 4371V de la société BRUEL & KJAER, collé à la partie mobile du pot vibrant ou à la table vibrante (voir figure II-11). Il permet le contrôle de l'accélération vibrationnelle imposée par le générateur de signaux pour une fréquence donnée.

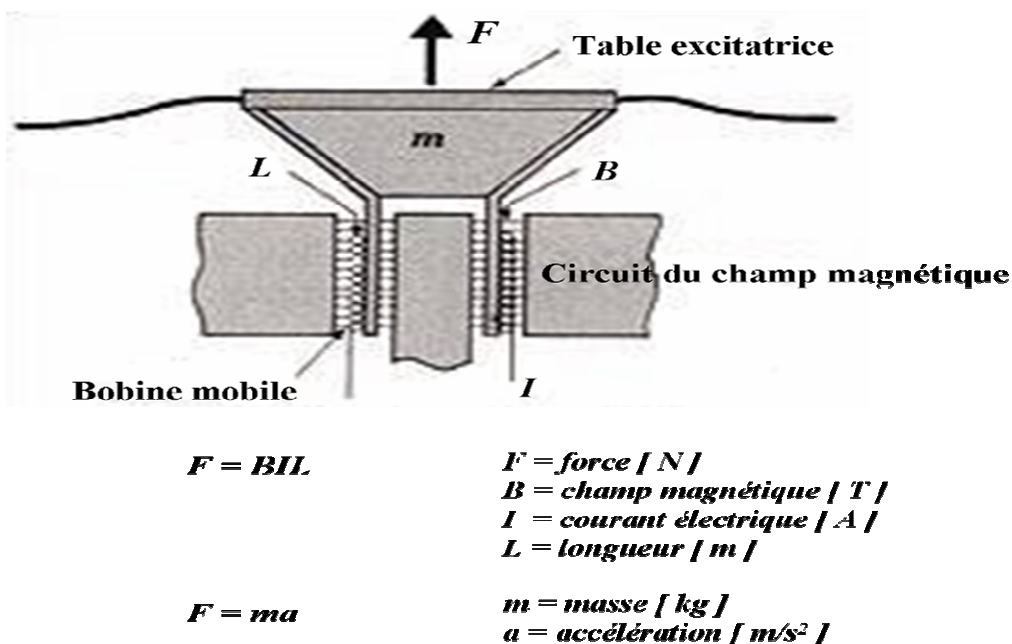


Figure II-10. Vue en coupe d'un pot vibrant électromagnétique (site internet de TIRA).

En mode sinusoïdal, le pot vibrant peut délivrer une force nominale maximale égale à 100 N dans une gamme de fréquence allant de 2 à 7000 Hz. Cette force est égale au produit de l'accélération par la masse de l'équipage mobile (masse de la partie mobile du pot, 200 grammes, plus la masse de l'objet vibré). Par exemple, pour une masse de 1 Kg, le pot vibrant est capable de délivrer une accélération de 10 g.

Cependant, un autre paramètre doit être pris en considération. Il s'agit de la charge maximale que peut supporter le pot pour ne pas détériorer le système de suspension qui soutient la bobine mobile. Cette charge est égale à 0,5 kg dans une configuration horizontale. Cette valeur est un facteur très limitant pour notre étude car nous nous intéressons à un milieu granulaire en trois dimensions avec des empilements de grandes

dimensions par rapport à la taille d'un grain. Nous obtenons alors une charge totale (masse du récipient + masse du sable + masse du porte échantillon) au-delà de la charge maximale. Dans ce cas, une expérience préliminaire a montré que les vibrations obtenues sont parasitées par une forte composante verticale. Il paraît alors nécessaire de concevoir un dispositif qui, d'une part, ne contraint pas le pot vibrant pour la charge, et d'autre part qui assure des vibrations purement horizontales. Il évite ainsi à la bobine un mouvement de porte à faux.

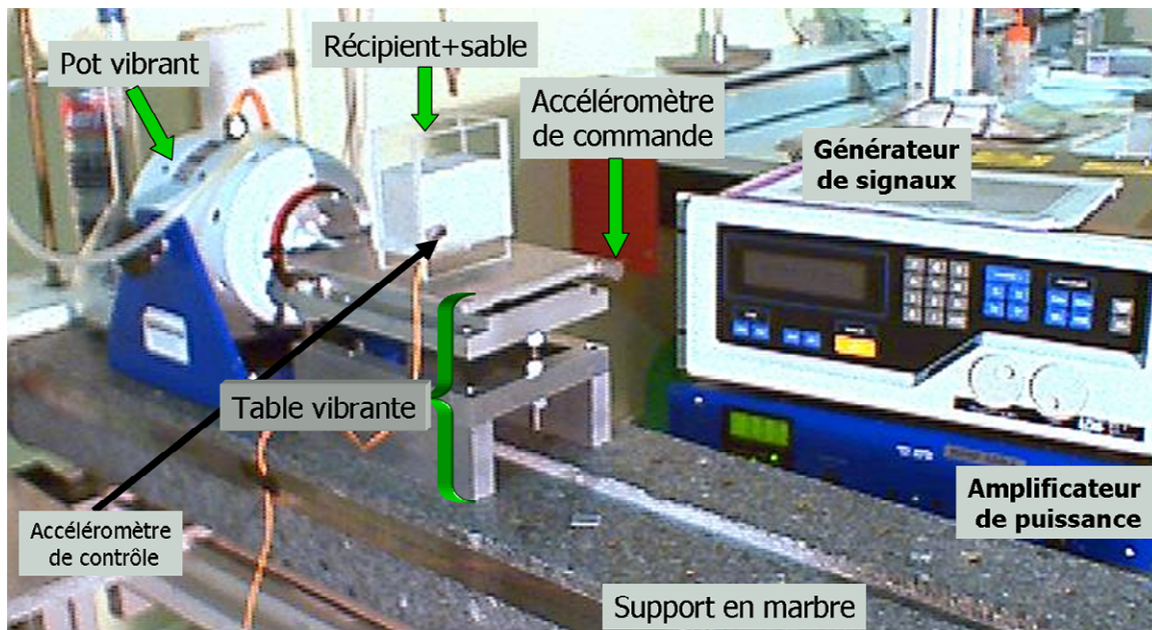


Figure II-11. Montage expérimental

II.B.1.b. Table vibrante

La table vibrante est un dispositif qui va nous affranchir du facteur limitant de la charge maximale que peut supporter le pot vibrant. En même temps, elle devra nous assurer l'obtention de vibrations purement horizontales. Dans la bibliographie, les groupes de chercheurs qui se sont intéressés aux vibrations horizontales ont utilisé des systèmes de guidage dans ce but [Tennakoon99 ; Metcalfe02]. Nous avons choisi pour cette étude d'utiliser un système chariot+rail emprunté au domaine de la mécanique de précision. La table vibrante que nous avons conçue est principalement composée de (voir figure II-12)

- Système de guidage linéaire composé de quatre ensembles « rail + chariot » de type EPF7M16+55LM de la société THK. Ils fonctionnent sur la base d'un roulement à billes miniatures (voir figure II-13) et ils ont une course maximale de ± 8 mm.

- Support fixe vissé au socle en marbre, réglable en hauteur et en planéité à l'aide de trois systèmes de vis et écrous. Il reçoit les rails sur lesquels vont coulisser les chariots portant le plateau mobile. Ce support est réglé en hauteur de façon que le plateau soit dans l'axe de vibration du pot vibrant.
- Plateau mobile : il s'agit d'une plaque rectangulaire en alliage métallique léger « DURAL » de 20x15 cm², sur laquelle le récipient va être fixé. Elle est montée sur les quatre chariots qui coulisseront sur les rails fixés sur le support.
- Bras de transmission : il s'agit de la pièce reliant le pot vibrant et le plateau mobile afin de transmettre les vibrations souhaitées. Au niveau du pot vibrant, elle a une forme de disque au milieu duquel sort une tige qui vient se visser au plateau mobile.

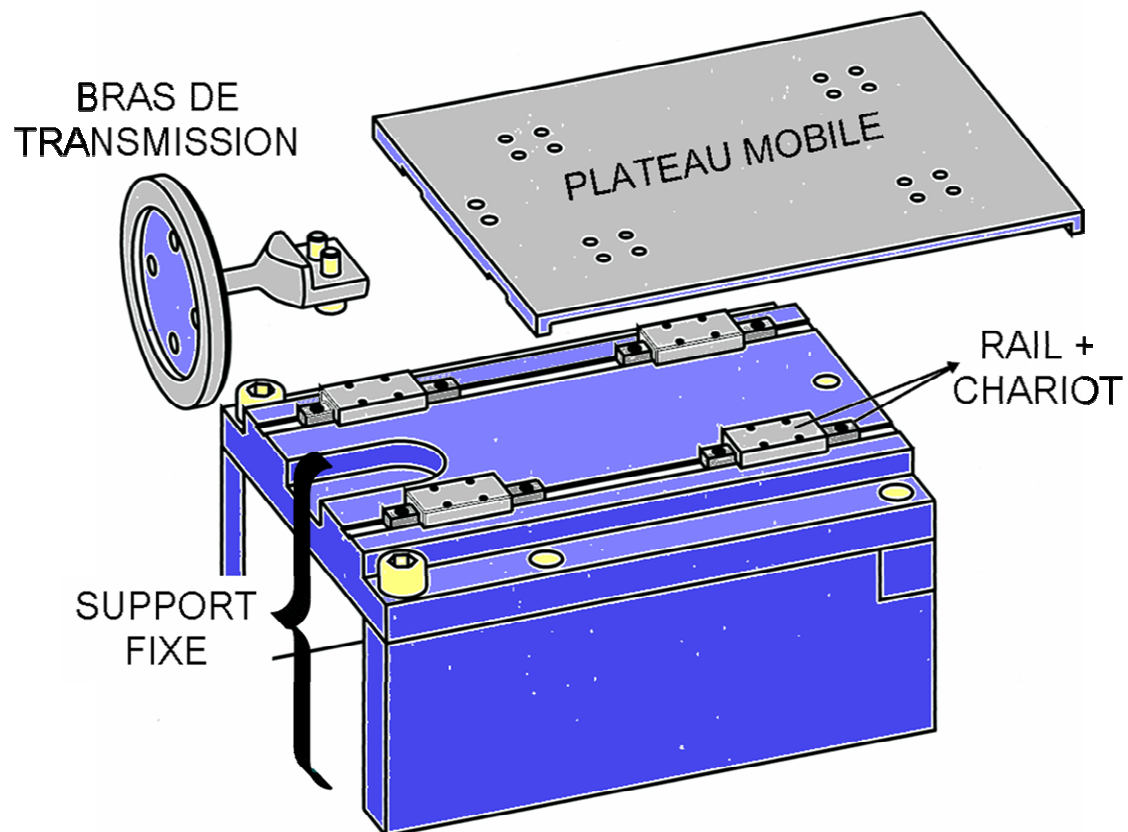


Figure II-12. Schéma de la table vibrante.

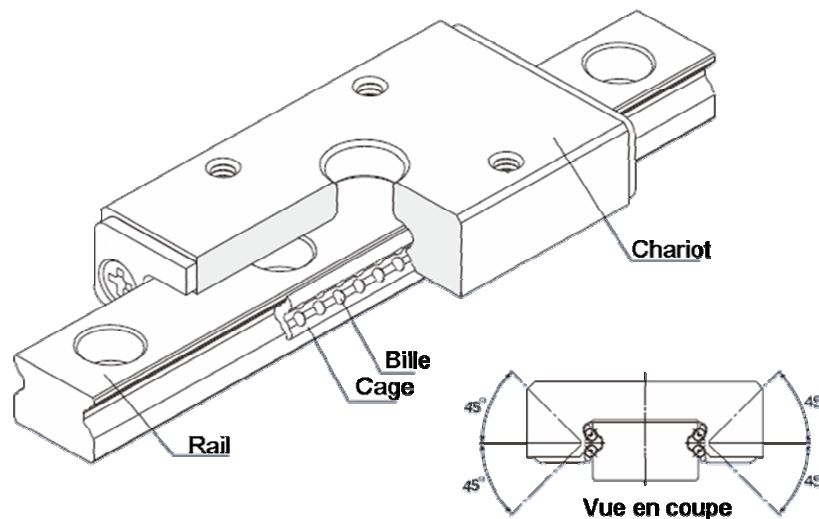


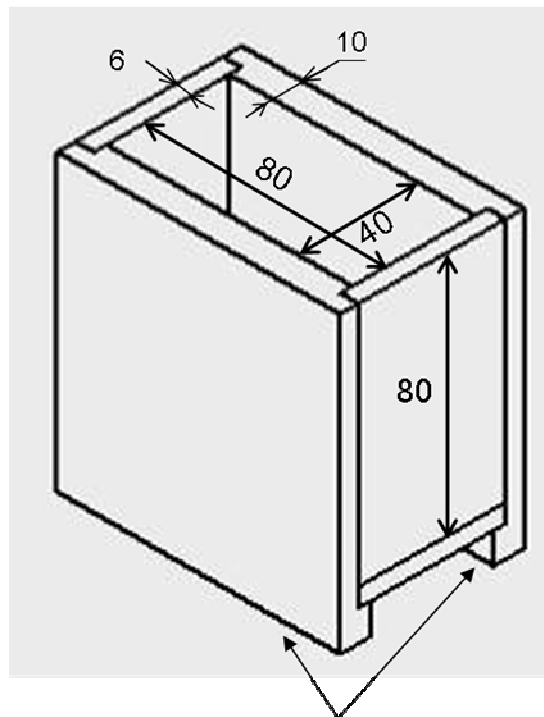
Figure II-13. Schéma du système de guidage linéaire « rail + chariot ».

II.B.1.c. Récipient

La géométrie, les dimensions et la nature du matériau composant le récipient peuvent être des paramètres d'étude dans une expérience de vibration. Dans un objectif de réduire les paramètres variables, nous avons fait le choix de fixer ceux-là. Nous utilisons des boîtes transparentes en plexiglas de forme parallélépipédique et de dimensions intérieures $L \times l \times h = 80 \times 40 \times 80 \text{ mm}^3$ (voir figure II-14).

Ces boîtes sont construites par un collage entre différentes plaques de plexiglas. Une attention particulière a été portée à la qualité d'assemblage de ces plaques afin d'assurer une géométrie reproductible entre les différentes expériences et une bonne transmission des vibrations au milieu granulaire. Nous avons opté pour la colle MS-GLUE de la marque SADER qui offre une adhérence comparable à celle d'une colle cyanoacrylate mais avec l'avantage d'être ajustable pendant trois minutes.

La fixation du récipient au plateau mobile est également une opération importante et délicate. Elle doit assurer la transmission des vibrations du plateau vers le récipient d'une part, et d'autre part offrir la possibilité de remplacer le récipient usé par un neuf. En effet, le récipient perd de sa qualité de transparence à cause de la friction des grains de sable aux parois. Une fixation à l'aide de vis a été écartée car elle n'offrait pas une qualité satisfaisante de transmission des vibrations. En revanche, une fixation par collage en utilisant la colle MS-GLUE a montré une meilleure performance. Le collage se fait au niveau des bords inférieurs des deux grandes parois (voir figure II-14). Cette méthode nous assure une forte adhérence du récipient au plateau mobile et un décollage plus facile.



Lieu du collage sur la table mobile

Figure II-14. Schéma du récipient utilisé. Les dimensions sont indiquées en millimètres.

II.B.2. Fonctionnement

Dans cette partie, nous allons tester le fonctionnement du banc de vibrations décrit précédemment. Dans cette optique, nous nous sommes procurés deux accéléromètres piézoélectriques miniatures (masse $m=0.65$ grammes) de type 4517 de la société BRUEL&KJAER. En les collants en différents endroits de la structure vibrée, ces accéléromètres nous permettent de réaliser une analyse modale et contrôler ainsi la nature des vibrations transmises (voir figure II-11).

II.B.2.a. Asservissement

II.B.2.a.1. Définitions : Boucle fermée-Boucle ouverte

Nous avons vu précédemment que le pot vibrant est piloté par le générateur de signaux pour délivrer des vibrations sinusoïdales. Pour une fréquence imposée, le contrôle de l'accélération peut se dérouler de deux manières (voir figure II-15) :

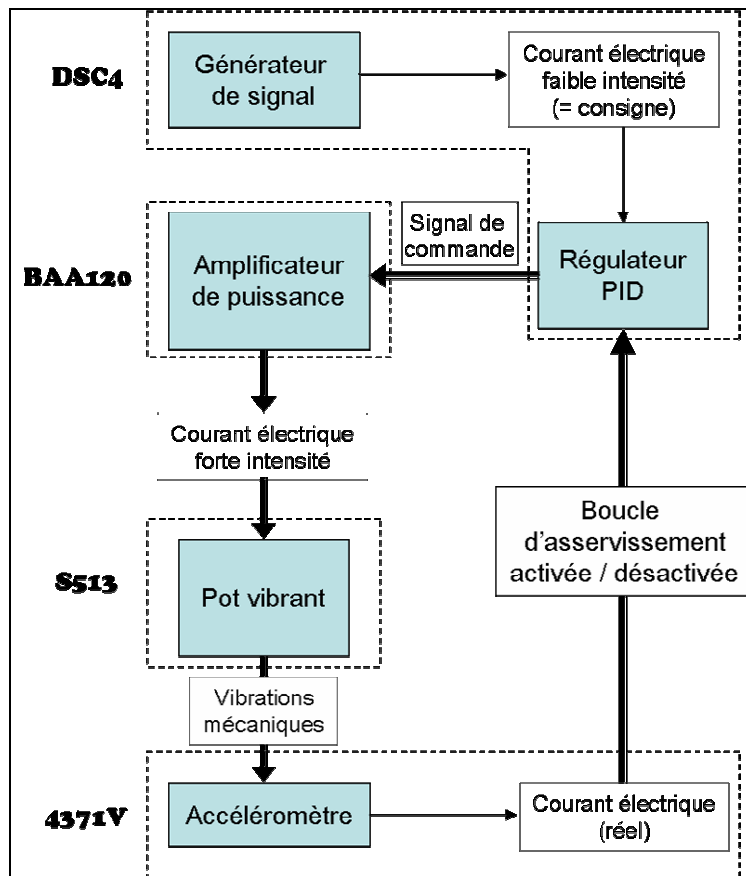


Figure II-15. Schéma du système de commande des vibrations

- Boucle fermée : dans cette configuration, l'opérateur fixe l'accélération relative Γ des vibrations. A tout moment le générateur de signaux asservit le signal vibratoire délivré pour corriger l'écart entre le signal mesuré et le signal de consigne. L'accéléromètre de commande collé sur la structure vibrée transmet au générateur de signaux la valeur de l'accélération réelle. Selon cette valeur, le signal envoyé à l'amplificateur de puissance est plus ou moins important. Le temps de réponse de l'asservissement est contrôlé par deux paramètres qui sont la vitesse de variation en fréquence du taux de compression, exprimé en dB/s/Hz, et le taux de compression limite en dB/s. Le premier est ramené à la fréquence et peut être considéré comme la correction maximale en dB que le système peut rattraper sur une période du signal. Le deuxième est la vitesse de compression maximale de la boucle d'asservissement [Manuel d'utilisation du LDS98].
- Boucle ouverte : dans cette configuration, l'opérateur fixe la puissance en décibels délivrée par le générateur de signaux. Aucun contrôle de l'accélération des vibrations n'est effectué. Néanmoins, une mesure de l'accélération est donnée par l'accéléromètre de commande.

En boucle fermée, l'opérateur fixe l'accélération et la fréquence des vibrations. Par contre, en boucle ouverte, seule la fréquence est fixée et l'accélération va dépendre de la puissance en dB imposée, de la masse de la structure vibrée et de la calibration du générateur des signaux. Il est alors important avant d'entreprendre une expérience en boucle ouverte de déterminer la correspondance entre la puissance imposée et l'accélération obtenue.

II.B.2.a.2. Vérification du bon fonctionnement

Pour nous assurer du bon fonctionnement du banc de vibration, nous contrôlons le signal vibratoire mesuré au niveau de la table vibrante à proximité de l'accéléromètre de commande. Avec un oscilloscope numérique, nous visualisons le signal mesuré par l'accéléromètre miniature. La tension efficace du signal nous donne la valeur de l'accélération efficace. Dans ce paragraphe, nous nous contenterons de présenter les résultats pour quelques couples de fréquences et d'accélérations. Nous nous intéresserons aux limites de fonctionnement plus tard dans cette partie. La figure II-16 montre des captures d'écran de l'oscilloscope pour 4 couples de fréquences et accélérations.

Pour tous ces couples, nous obtenons un signal sinusoïdal de très bonne qualité, avec une fréquence égale à la fréquence de consigne, et une erreur sur l'amplitude inférieure à 2%.

Nous pouvons conclure que notre dispositif expérimental permet d'obtenir des vibrations sinusoïdales sans distorsion appréciable par rapport aux vibrations souhaitées par l'opérateur.

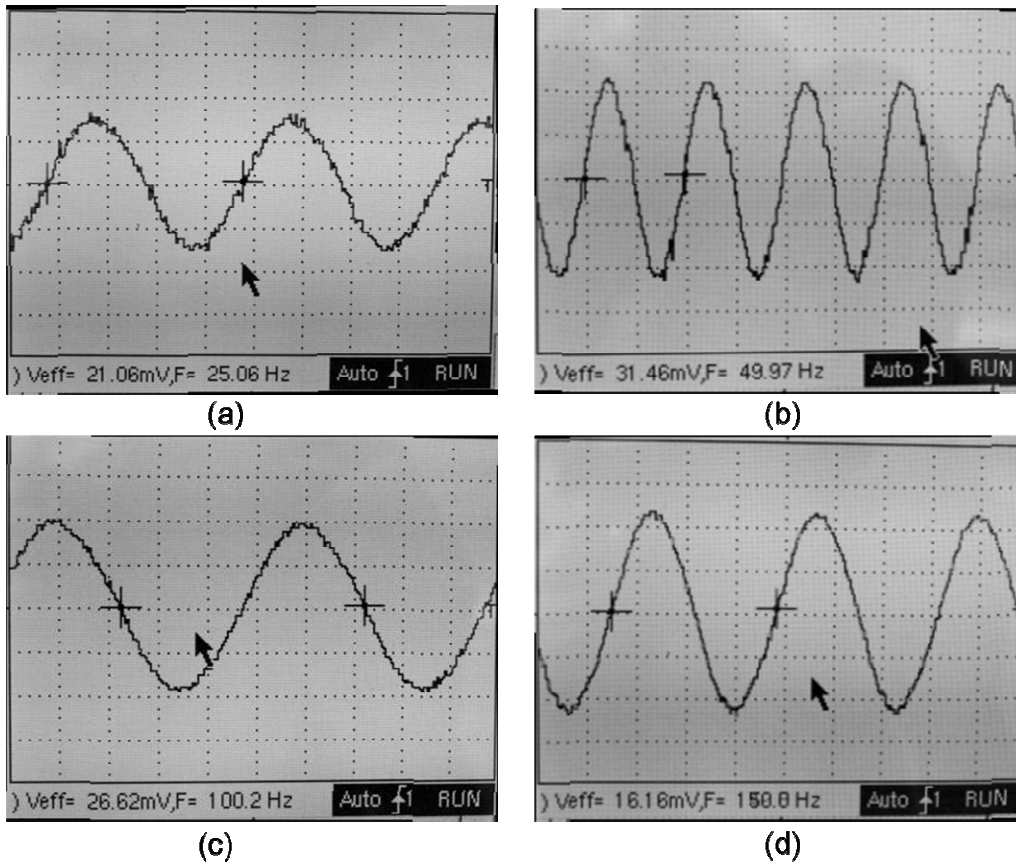


Figure II-16. Visualisations du signal mesuré par l'accéléromètre de contrôle. Sensibilité : 10,56 mV pour une accélération efficace de 1g. Les valeurs de la tension efficace et la fréquence du signal sont reportés. (a) $f=25\text{ Hz}$ et $\Gamma_{RMS}=2$; (b) $f=50\text{ Hz}$ et $\Gamma_{RMS}=3$; (c) $f=100\text{ Hz}$ et $\Gamma_{RMS}=2,5$; (d) $f=150\text{ Hz}$ et $\Gamma_{RMS}=1,5$. Pour cette dernière fréquence, nous remarquons une très légère distorsion du signal.

II.B.2.a.3. Comparaison boucle fermée – boucle ouverte

Dans le premier paragraphe, nous avons présenté deux manières de piloter le pot vibrant : boucle fermée et boucle ouverte. Nous allons comparer ici ces deux méthodes avec deux exemples : $f=50\text{ Hz}$ et $\Gamma_{RMS}=2$, $f=20\text{ Hz}$ et $\Gamma_{RMS}=4$. Concernant la boucle fermée, nous avons testé les quatre valeurs du taux de compression disponibles. Les graphiques présentés dans la figure II-17 montrent l'évolution en fonction du temps de l'accélération mesurée par l'accéléromètre de contrôle (collé à proximité immédiate de l'accéléromètre de commande) et de l'accélération imposée par le générateur de signaux.

Le tableau II-7 donne une comparaison entre le fonctionnement en boucle ouverte et celui en boucle fermée. Nous remarquons que la stabilité de la consigne ainsi que la stabilité de la réponse sont comparables pour les deux fonctionnements. Notons

également que le taux de compression a peu d'influence sur ces deux paramètres ce qui montre que l'élément vibré répond d'une manière homogène aux sollicitations.

La durée du régime transitoire en boucle ouverte est très courte (inférieure à 4 secondes). En boucle fermée, elle est inversement proportionnelle à la fréquence et au taux de compression. Elle peut varier de quelques secondes à plusieurs dizaines de secondes.

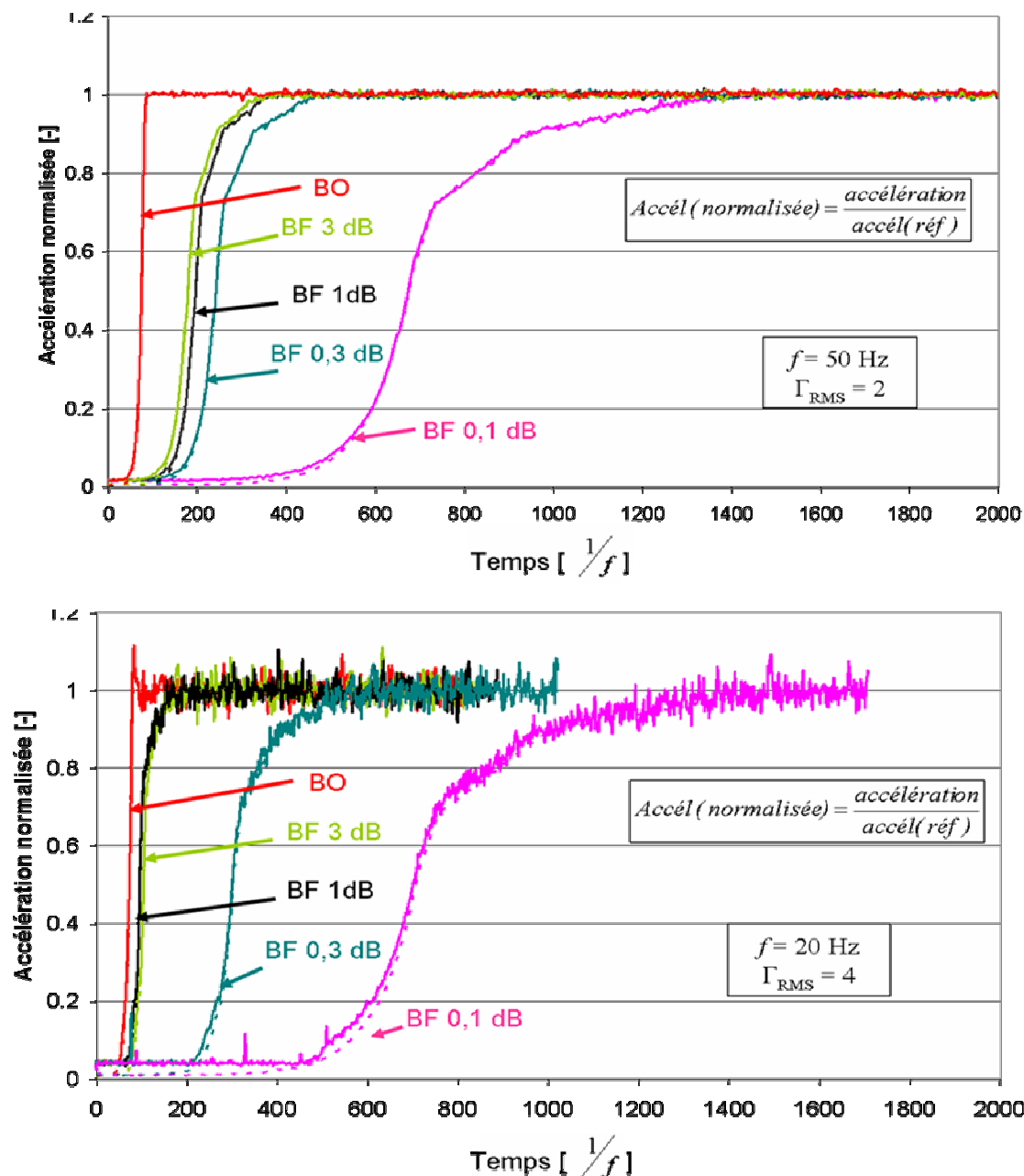


Figure II-17. Evolution en fonction du temps de l'amplitude du signal vibratoire normalisé en boucle fermée (BF) pour différents taux de compression (dB/s/Hz) et en boucle ouverte (BO). En ligne continue l'accélération de l'accéléromètre de contrôle et en ligne discontinue l'accélération du générateur de signaux.

Critère	Boucle ouverte	Boucle fermée
Stabilité de la consigne	$\pm 0,15 \%$	$\pm 0,6 \%$
Stabilité de la réponse	$< 3\%$	$< 3 \%$
Imposer une accélération	Complicé : fonction (puissance, calibration, masse)	Trivial : choisie par l'opérateur
Durée du régime transitoire	< 100 cycles de vibrations	Fonction (fréquence, taux de compression) Typiquement 200-1400 cycles

Tableau II-7. Comparaison entre les fonctionnements en boucle ouverte et boucle fermée d'après les graphiques présentés dans la figure II-17. La consigne correspond au signal délivré par le générateur de signaux et la réponse le signal mesuré par l'accéléromètre de contrôle.

En conclusion, le choix de travailler en boucle ouverte ou en boucle fermée est déterminé par un compromis entre la durée du régime transitoire et la facilité d'imposer une accélération donnée. En boucle fermée, il vaut mieux imposer un taux de compression supérieur ou égal à 0,3 dB/s/Hz pour réduire la durée du régime transitoire.

II.B.2.b. Vibrations parasites

Dans l'objectif de concevoir un dispositif expérimental qui délivre des vibrations purement horizontales, nous avons procédé à une quantification des vibrations parasites dans la direction verticale et dans la direction transverse à l'axe principal de vibration à l'aide des accéléromètres de contrôle.

Quand le pot vibrant et la table vibrante sont bien alignés, nous trouvons que les vibrations parasites dans la direction transverse sont indétectables : le signal mesuré par l'accéléromètre se confond avec le bruit de fond (0,03 g). Quant aux vibrations verticales, nous présentons dans le tableau II-8 les résultats obtenus pour deux fréquences 50 et 100 Hz pour différentes accélérations relatives efficaces.

Fréquence [Hz]		Γ_{RMS} [g]	0	1	2	3	4
		Γ_{RMS} verticale [g]	0,03	0,04	0,1	0,21	0,24
50			0,03	0,04	0,1	0,21	0,24
100			0,03	0,06	0,1	0,19	0,26

Tableau II-8. Accélération verticale parasite mesurée par un accéléromètre de contrôle (sensibilité 10,3 mV/g) pour différentes accélérations horizontales imposées. ($g=9,81 \text{ ms}^{-2}$)

Nous remarquons que l'amplitude des vibrations verticales parasites augmente avec l'accélération des vibrations horizontales imposées. Pour une accélération imposée Γ_{RMS} de 4 g, les vibrations parasites verticales ont une accélération Γ_{RMS} inférieure à 0,3 g, ce qui est sans effet notable sur la structure de l'empilement granulaire car la valeur de l'accélération seuil de mise en mouvement des grains en vibrations verticales est $\Gamma_{seuil}(RMS) \sim 0,85$ [Evesque89 ; Hsiau98 ; Rouèche05].

En conclusion, avec le dispositif expérimental conçu, nous sommes en mesure de produire des vibrations horizontales avec un niveau de vibrations parasites négligeable dans une gamme de fréquences et d'accélérations données.

II.B.2.c. Détermination du domaine d'étude

II.B.2.c.1. Domaine d'étude en accélération

Théoriquement, le domaine d'étude accessible en accélération est simplement limité par l'égalité « $F = m \times a$ » où F est la force développée par le pot vibrant ($F_{max} = 100 \text{ N}$), m la masse de la structure vibrée et a l'accélération. Pour une hauteur de sable de 60 mm, la masse totale de l'élément vibré est égale à 1,2 Kg ce qui nous donnerait une accélération maximale de 8,4 g en valeur crête.

Cependant, expérimentalement, deux autres facteurs limitant sont à considérer. Premièrement, il faut tenir compte des forces de frottements développées au niveau du système de guidage « chariot+rail ». Ces forces augmentent avec la fréquence car cet appareillage est plutôt destiné à un fonctionnement à des faibles fréquences. Deuxièmement, il faut considérer l'inertie de l'élément vibré. En effet, sur des temps très courts le pot vibrant doit freiner et accélérer cette masse. Pour les fortes accélérations, nous pouvons observer des distorsions dans le cycle de vibration altérant son caractère sinusoïdal.

En conclusion, nous avons un très bon fonctionnement du banc de vibration pour les accélérations inférieures à 7 g en valeur crête (5 g en valeur efficace).

II.B.2.c.2. Domaine d'étude en fréquence

Pour déterminer le domaine d'étude en fréquence, plusieurs facteurs sont à considérer :

- L'analyse fréquentielle des vibrations au niveau des ensableuses de FERRAZ-SHAWMUT montre une composante principale à 50 Hz et des harmoniques multiples de 25 Hz jusqu'à une fréquence de 450 Hz.
- Le système de guidage « chariot+rail » est plutôt adapté pour un fonctionnement en basse fréquence.
- Le pot vibrant est plutôt adapté pour un fonctionnement en haute fréquence.
- La structure en Plexiglas des récipients peut subir des déformations élastiques au cours des vibrations.

Nous devons faire un compromis entre ces différents critères. Un premier compromis entre les trois premiers critères consiste à restreindre le domaine d'étude en fréquence entre 20 et 300 Hz. Reste alors à vérifier le dernier critère dans cette gamme de fréquences. Pour cela, nous avons réalisé une série de mesures de l'accélération pour différents couples fréquence-accélération à différents endroits du récipient afin de s'assurer de la bonne transmission des vibrations.

La figure II-18 montre l'évolution de l'accélération mesurée sur le récipient à l'altitude z pour une accélération relative de consigne Γ_{RMS} égale à 3 et pour les fréquences 50, 100, 150 et 300 Hz. A partir de ce graphique, nous observons que :

- $\Gamma = \Gamma_{\text{consigne}}$ pour $z=0$ et $\Gamma > \Gamma_{\text{consigne}}$ pour $z > 0$.
- pour $f < 100$ Hz $\rightarrow \Gamma_{\text{max}} = 1,16 \Gamma_{\text{consigne}}$.
- pour $f = 300$ Hz $\rightarrow \Gamma_{\text{max}} = 1,46 \Gamma_{\text{consigne}}$.

D'autres mesures ont été effectuées pour deux autres accélérations 0,5 et 1,5 mais ne sont pas reportées ici en détail. Nous avons choisi de présenter l'évolution du rapport de la moyenne des accélérations mesurées à $z=56$ mm par l'accélération de consigne (voir figure II-19). Nous constatons que ce rapport reste proche de l'unité pour des fréquences inférieures ou égales à 100 Hz. Au-delà, ce rapport croît avec la fréquence pour atteindre 1,3 pour une fréquence de 300 Hz avec une grande disparité de l'accélération mesurée en fonction de l'altitude. Néanmoins, ce rapport reste acceptable pour des fréquences comprises entre 100 et 150 Hz.

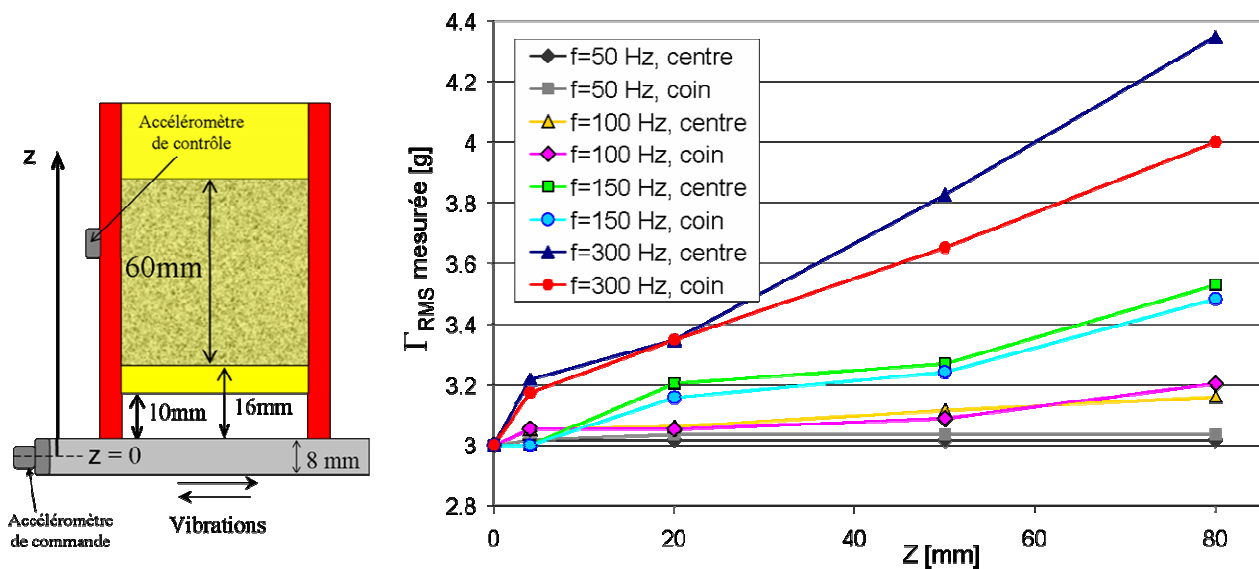


Figure II-18. Accélération mesurée pour une accélération de consigne égale à 3 g pour différentes fréquences et différentes altitudes. Les altitudes sont définies comme l'indique le schéma montrant le récipient collé sur le plateau mobile : le bas de l'empilement se situe à z=16 mm.

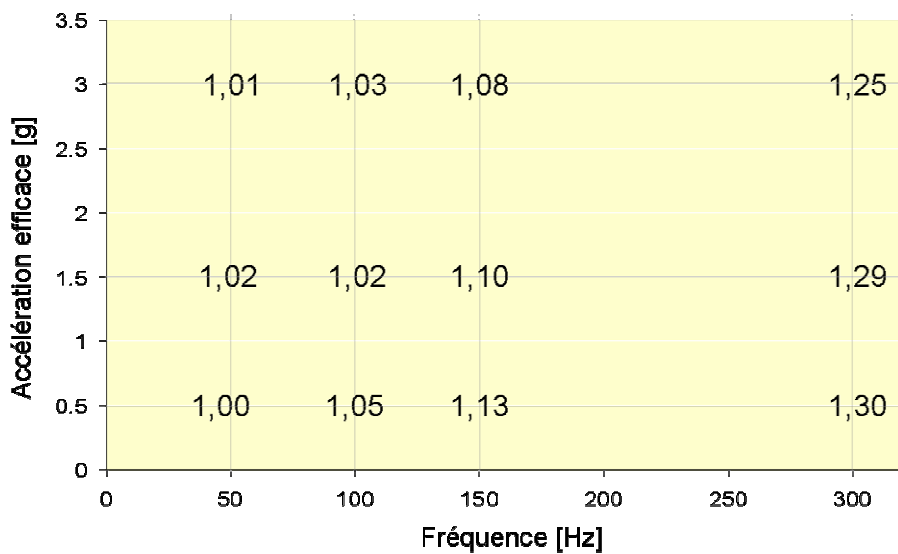


Figure II-19. Rapport de la moyenne des accélérations mesurées à z=56 mm par l'accélération de consigne pour différentes fréquences et accélérations de consigne.

En conclusion, il existe un gradient vertical d'accélération fonction de la fréquence et de l'accélération de consigne. Ce banc de vibration peut nous offrir un domaine d'étude en fréquence qui s'étend de 20 à 100 Hz, avec des variations maximales d'accélération par rapport à la consigne inférieures à 5%.

II.C. Outils d'acquisition des données

Dans notre étude expérimentale, nous nous intéressons d'une part à la description des mouvements des grains et d'autre part à la compacité de l'empilement pendant et après vibrations.

Grâce à la transparence des parois du récipient, nous pouvons observer les mouvements des grains. En plus des moyens usuels d'imagerie (appareil photo, vidéo), nous utilisons une caméra CCD ultra-rapide qui nous permet de suivre les mouvements des grains à une échelle de temps comparable à la période des vibrations. Le fonctionnement de la caméra sera détaillé dans la première partie. Par analyse des images obtenues, nous pourrions décrire quantitativement les mouvements granulaires. Nous aborderons dans la section II.4 le traitement de ces images.

Quant à la mesure de la compacité, il suffit de mesurer le volume apparent occupé par l'empilement. Connaissant la masse des grains et la masse volumique du sable, nous pouvons calculer par la suite la compacité. Une mesure visuelle de la hauteur du tas de sable et même plusieurs mesures à différents points ne nous offrent qu'une estimation grossière du volume occupé. En effet, plusieurs sources d'incertitudes sont à considérer. Tout d'abord, une mesure visuelle ne peut pas être précise en-deçà du quart de millimètre. En plus, il faut tenir compte du fait que le milieu granulaire est un milieu discret, les grains ne sont pas tous rigoureusement de la même taille, ni de la même forme. Donc, l'incertitude sur les valeurs est de l'ordre de la taille d'un grain soit 0,5 mm. Enfin, la surface libre d'un empilement vibré reste rarement plane et présente généralement des formes complexes ce qui rend l'estimation du volume très difficile. Tout ceci entraîne une incertitude sur la compacité supérieure à 3% en ce qui est inacceptable dans notre étude. Il nous est alors apparu nécessaire de trouver un outil offrant une plus grande précision. Nous avons opté pour une mesure du volume de l'empilement en utilisant un outil optique en s'inspirant des mesures d'état de surface. Cet outil que nous appelons Profilomètre optique est composé principalement d'un capteur optique de mesure dimensionnelle sans contact et d'une table XY permettant un balayage horizontal parallèlement à la surface à profiler. Nous décrivons ces différentes composantes dans la deuxième partie de cette section et nous expliquerons par la suite le protocole expérimental suivi que nous avons adapté pour déterminer la valeur de la compacité.

II.C.1. Caméra CCD

Dans l'objectif d'accéder à une description quantitative des mouvements des grains, nous avons besoin d'un outil de visualisation rapide afin de suivre avec précision les grains. A cet effet, nous utilisons une caméra CCD ultra-rapide de type CMOS CV-A33 de la société JAI. Cette caméra possède une résolution maximale de 494×660 pixels² obtenues pour des fréquences d'acquisition inférieures à la fréquence propre de la caméra qui est égale à 118,4 images/seconde. Au-delà de cette fréquence, la résolution diminue quand la fréquence augmente jusqu'à atteindre 3×660 pixels² pour la fréquence maximale 5400 images/seconde.

Pour synchroniser la prise d'images au mouvement du pot vibrant, la société R&D VISION nous a fourni un synchroniseur EG32. Le fonctionnement du système d'acquisition des images est schématisé dans la figure II-20. Le boîtier EG32 est relié au générateur de signaux DSC4 et permet ainsi de déclencher précisément la prise d'image dans le cycle de vibration du pot vibrant. Il nous permet également de forcer la caméra à travailler à des fréquences inférieures à sa fréquence propre, ce qui est intéressant dans notre étude dont le domaine d'étude en fréquence s'étend de 20 à 100 Hz.

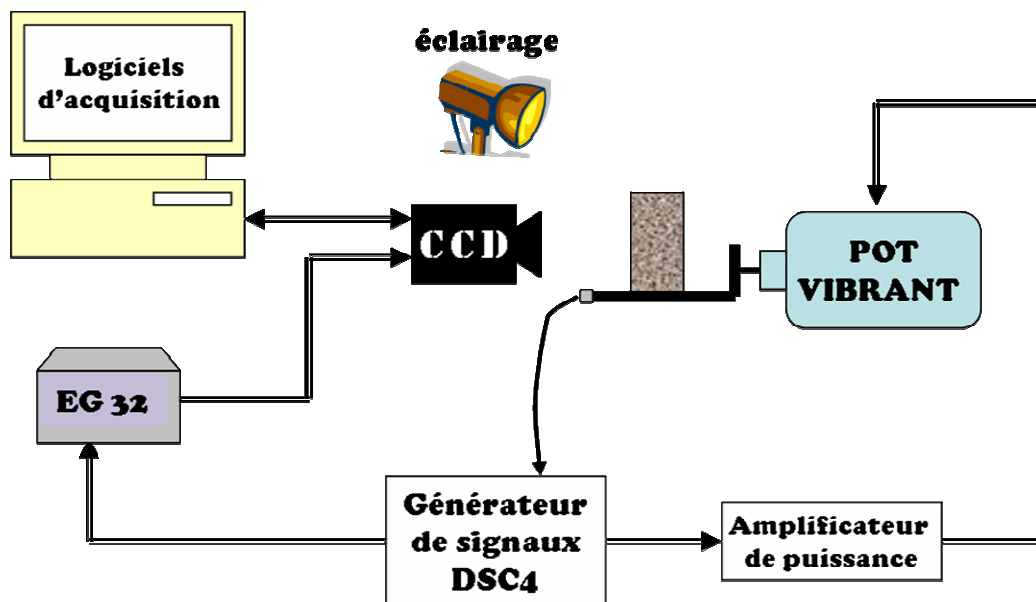


Figure II-20. Schéma du banc de vibration et du système d'acquisition des images par la caméra CCD.

L'ouverture de la caméra, la prise d'image et le déclenchement de la carte d'acquisition sont pilotés par le boîtier EG32. Son signal d'horloge est le signal de position de

l'échantillon. Ce système permet de générer des chronogrammes variés (voir figure II-21) afin de répondre à différents besoins de synchronisation.

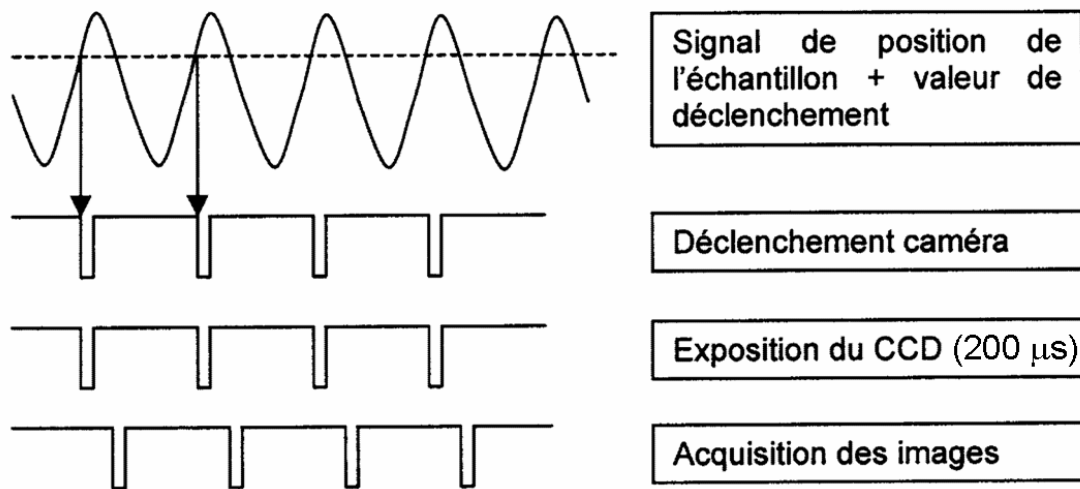


Figure II-21. Exemple de chronogramme de synchronisation de la caméra CCD.

II.C.2. Profilomètre optique

Le profilomètre optique est un dispositif expérimental qui sert à mesurer le profil de la surface libre de l'empilement granulaire. Ensuite, par intégration de ce profil, nous obtenons le volume apparent du tas de sable.

Il est composé principalement d'un capteur optique et d'une table XY qui assure un balayage horizontal au dessus de l'empilement granulaire. Le capteur optique est composé d'un coffret optoélectronique, d'une fibre optique et d'un crayon optique. La table XY est composée de deux systèmes « rail+chariot+moteur » croisés à 90°. Elle peut coulisser le long d'une colonne verticale à l'aide d'une manivelle et grâce à un système « chaîne+pignon ». Le crayon optique est solidaire de la table XY ; il y est suspendu au niveau du chariot du rail inférieur. (Voir figure II-22)

Nous décrirons en détail les différentes composantes du profilomètre optique dans une première partie. Ensuite, dans la deuxième partie, nous détaillerons le protocole expérimental utilisé pour mesurer le profil de la surface de l'empilement et le traitement de ces données pour obtenir une valeur de la compacité.

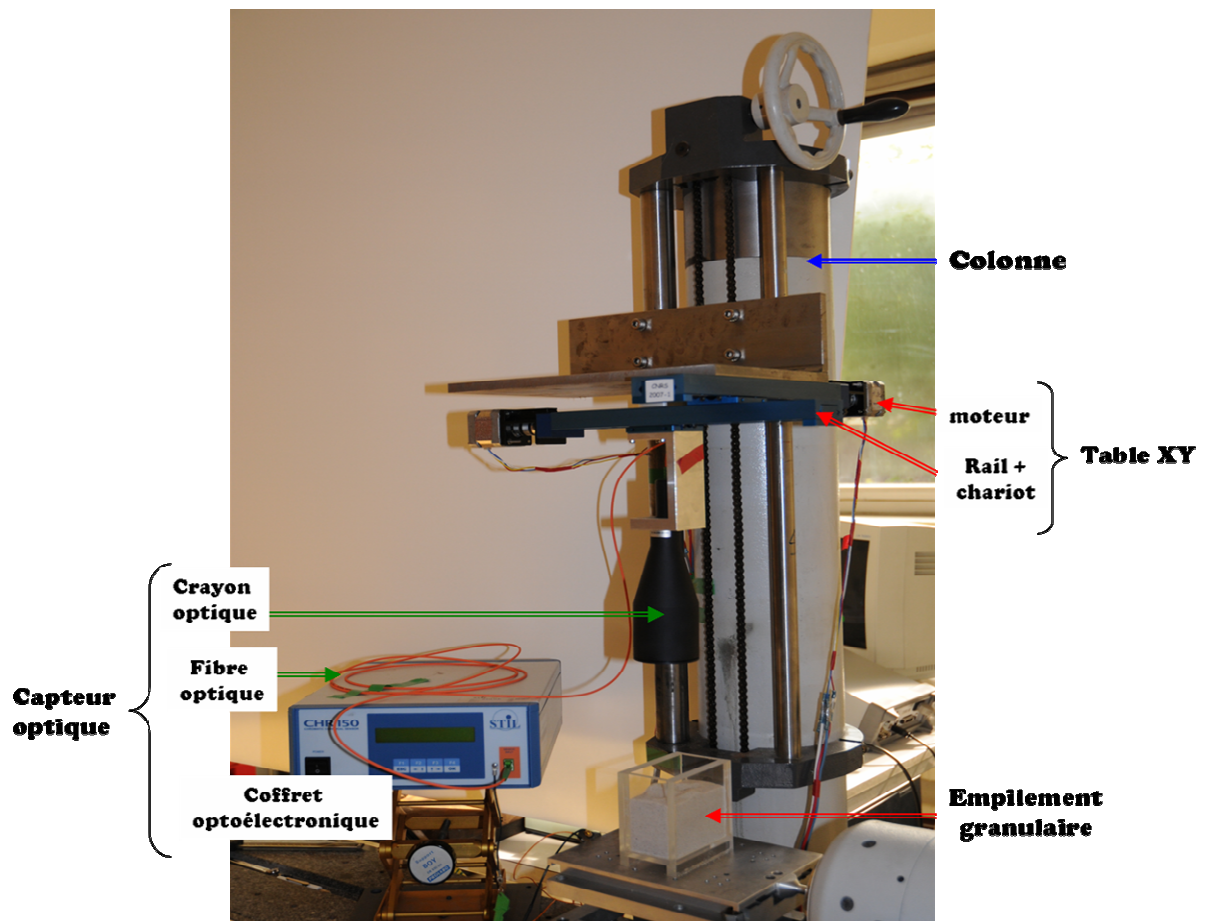


Figure II-22. Photo du dispositif expérimental composant le profilomètre optique. La table XY est composée de deux systèmes « chariot+rail+moteur ». Le rail inférieur est vissé au chariot du rail supérieur et le crayon optique est suspendu au chariot du rail inférieur. Ainsi, le crayon optique peut se déplacer dans un plan horizontal.

II.C.2.a. Description

II.C.2.a.1. Capteur optique

Le capteur optique est un outil de mesure dimensionnelle haute résolution sans contact. Il nous a été fourni par la société STIL. Il est composé des éléments suivants :

- Coffret optoélectronique (contrôleur) de type CHR150. Il comprend une source lumineuse Tungstène-Halogène qui produit le faisceau incident. Il analyse également le faisceau réfléchi afin de lui associer une altitude avec une cadence de mesure qui peut atteindre 1000 Hz.
- Fibre optique : assure la conduction du faisceau incident du coffret au crayon et du faisceau réfléchi du crayon vers le coffret.

- Crayon optique monobloc de type OP24000. Il s'agit d'un objectif chromatique relié au coffret optoélectronique par la fibre optique. Ses caractéristiques sont présentées dans le tableau II-9.

Plage de mesure nominale	24 mm
Distance de travail	222,3 mm
Résolution axiale	1,5 μm
Précision	3 μm

Tableau II-9. Caractéristiques du crayon optique OP24000

Le principe de mesure du capteur optique CHR est celui de la microscopie confocale à champ étendu grâce au codage spectral de ce champ [<http://www.stilsa.com>]. La microscopie confocale consiste en l'observation par un microscope conventionnel équipé d'un double filtrage spatial. Ceci permet d'imager uniquement un seul point du champ, lequel doit ensuite être scruté point par point par balayage (x, y). Le codage spectral du champ résulte du chromatisme axial des objectifs. Il est dû à la variation de l'indice de réfraction des verres utilisés avec la longueur d'onde. Ainsi, l'image d'une source blanche ponctuelle est un continuum d'images monochromatiques uniformément réparties le long de l'axe optique. En pratique, quand un objet est placé dans l'espace de mesure, la lumière est seulement focalisée au point M lieu d'intersection de cet objet et l'axe optique. Par application de la propriété de confocalité, seule la longueur d'onde λ_M sera transmise avec un maximum d'efficacité à travers le filtre spatial (voir figure II-23).

Il reste maintenant à attribuer à cette longueur d'onde l'altitude correspondante. Ce codage est réalisé par analyse spectrométrique dans le coffret optoélectronique. En effet, le signal est envoyé sur un réseau de diffraction qui a la propriété de diriger chaque longueur d'onde dans une direction différente. Il suffit alors de repérer le maximum d'intensité sur une barrette CCD pour en extraire l'altitude du point M. De ce principe de fonctionnement, découle trois propriétés essentielles du capteur CHR :

- Le principe d'imagerie confocale permet d'obtenir une excellente résolution spatiale et ce quel que soit l'éclairage ambiant.
- Le codage chromatique permet de travailler sur tout type de matériaux et de surfaces. Aucun traitement préalable de l'objet n'est nécessaire.
- Travailler avec une lumière blanche non cohérente évite les problèmes de Speckle observés avec une source laser.

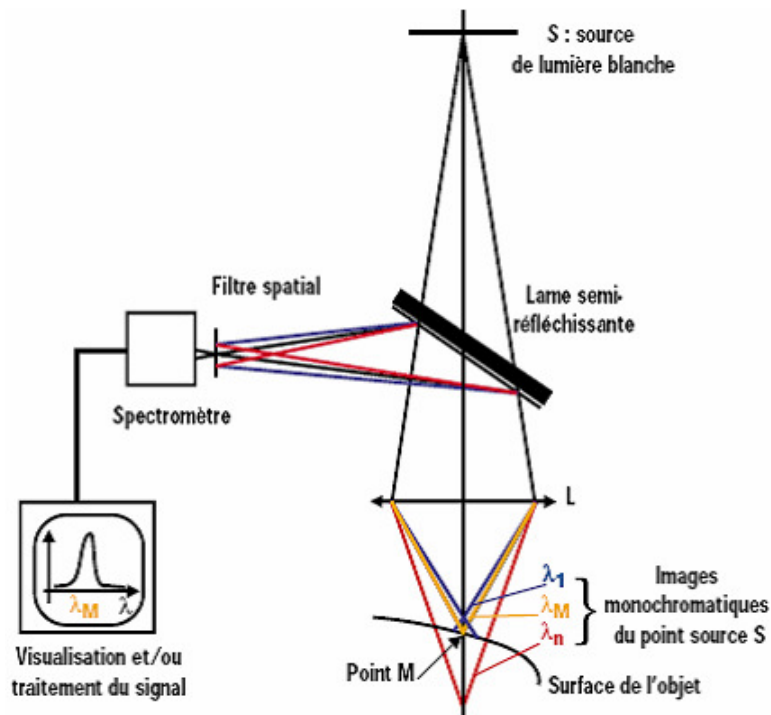


Figure II-23. Du principe de fonctionnement du capteur optique CHR se basant sur le principe de microscopie confocale à profondeur de champ étendue.

II.C.2.a.2. Table XY

La table XY est un dispositif expérimental qui permet un déplacement contrôlé du crayon dans un plan horizontal (XY). Ce dispositif nous a été fourni par la société ROSIER. Il est composé de :

- Deux tables de guidage linéaire de type MS25-LXB288 de la société DANAHER MOTION. Elles utilisent un entraînement par vis à bille au pas de 2 mm et d'une course totale de 199,5 mm. Elles sont composées principalement d'un chariot coulissant le long d'une vis sans fin (voir figure II-24). Montées à 90° l'une au-dessus de l'autre tel que le corps de la table inférieure soit fixé au chariot de la table supérieure. Le crayon optique fixé sur le chariot de la table inférieure peut explorer tout le plan horizontal (voir figure II-22).
- Deux moteurs pas à pas de type HY2001717 de la société PARKER. Ils servent à déplacer les deux chariots des deux tables de guidage linéaire. Ils ont une résolution qui peut atteindre 4000 pas par tour.
- Deux modules de puissance avec intelligence intégrée de type XL25i de la société PARKER. Ils fournissent la puissance électrique nécessaire au mouvement des moteurs. Reliés par une liaison série à l'ordinateur, ils transmettent aux moteurs

les commandes de l'opérateur qui peut définir un profil de déplacement en imposant l'accélération, la distance, la vitesse maximale et la décélération.

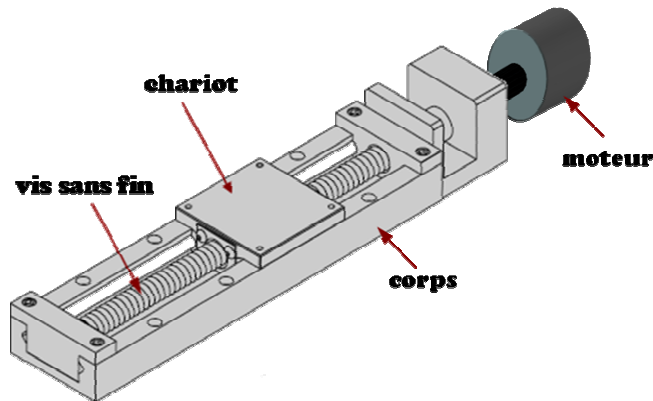


Figure II-24. Schéma d'une table de guidage linéaire utilisée pour le déplacement du crayon optique.

II.C.2.b. Fonctionnement

II.C.2.b.1. Acquisition des altitudes

Afin de commander simultanément le déplacement du crayon optique par la table XY et la lecture des mesures des altitudes, nous avons conçu un programme sous LABVIEW qui nous fournit un tableau EXCEL correspondant à une cartographie de la surface de l'empilement. La structure générale de ce programme est présentée dans la figure II-25.

Afin de réduire le temps de mesure, nous procédons par un balayage continu sur l'axe x au lieu d'un balayage pas à pas. Pour déterminer l'intervalle Δx qui sépare deux mesures successives de l'altitude, un essai préliminaire est réalisé pour chaque profil de mouvement du moteur correspondant. Comme le montre la figure II-25, nous choisissons ce profil de façon que le mouvement soit uniforme au-dessus de l'empilement et ainsi obtenir un Δx constant.

Pour la surface d'un empilement de dimensions $L_x \times L_y = 40 \times 80 \text{ mm}^2$ et pour des pas $\Delta y = 2 \text{ mm}$ et $\Delta x \sim 0,5 \text{ mm}$, la cartographie comporte 3200 points et nous obtenons un temps d'acquisition de douze minutes.

Notons qu'à cause de la faible réflectivité des grains de sable, nous sommes obligés de travailler avec une faible cadence de mesure (30 Hertz).

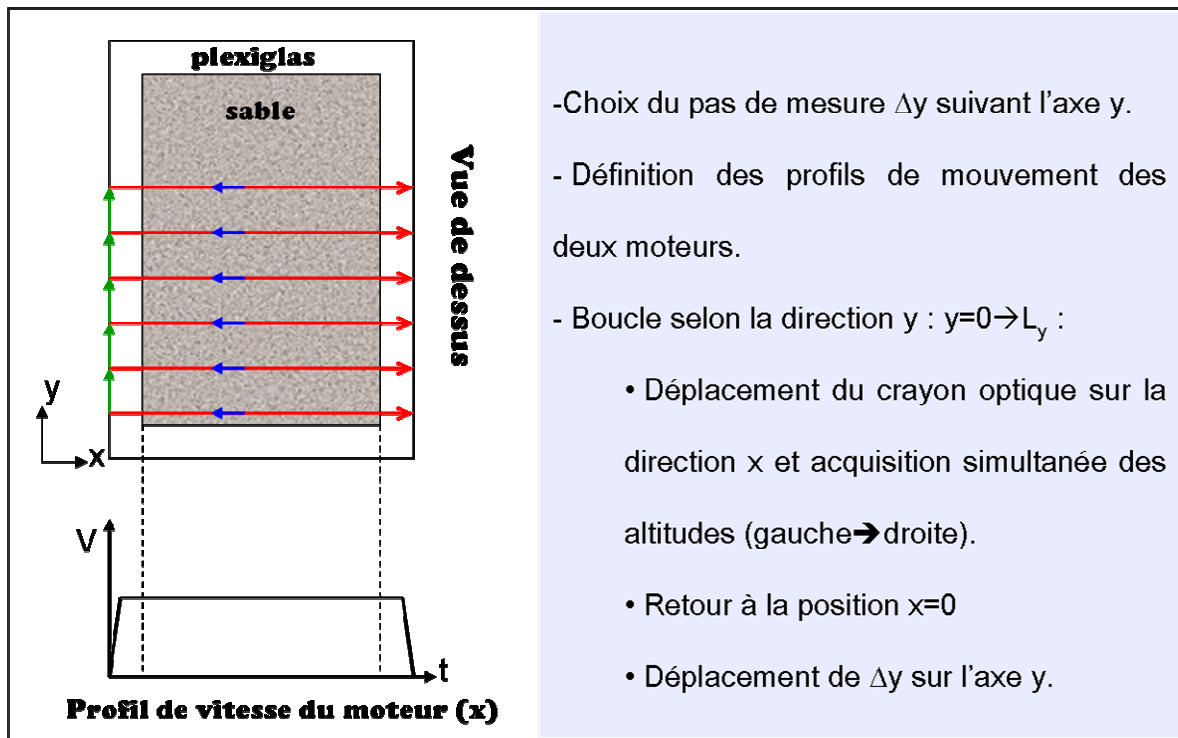


Figure II-25. Schéma de l'algorithme d'acquisition des altitudes par le crayon optique.

II.C.2.b.2. Calcul de la compacité

Le calcul de la compacité de l'empilement granulaire va se baser sur la cartographie des altitudes réalisée grâce au capteur optique. Cependant, un traitement préalable de ces données est nécessaire afin de remédier aux problèmes d'acquisition. Ces derniers sont dus à la faible réflectivité des grains de sable, au mouvement du crayon optique et aux mouvements des grains de sable. Ils se traduisent par des valeurs locales de l'altitude aberrantes.

Ce traitement est réalisé sous ImageJ™ grâce à un filtre « Moyenne » adapté à chaque situation : état initial, état sous vibrations, état après arrêt des vibrations. La figure II-26 montre un exemple de cartographie obtenue après traitement. Ensuite, par simple intégration, nous obtenons le volume apparent de l'empilement.

La compacité se calcule alors facilement en appliquant la formule suivante :

$$C = \frac{M}{\rho \cdot V}$$

Où M est la masse des grains, ρ la masse volumique et V le volume apparent de l'empilement.

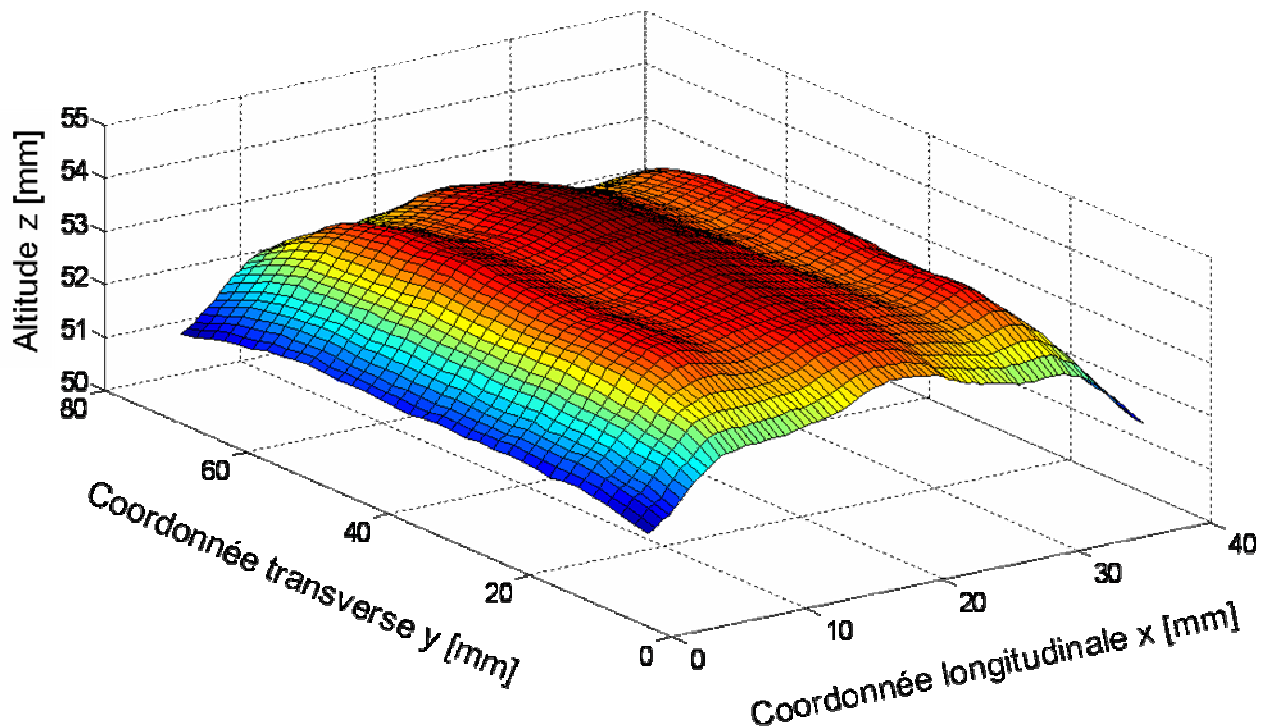


Figure II-26. Profil mesuré par le profilomètre optique de la surface libre d'un empilement après arrêt des vibrations. Il a été vibré à $\Gamma=3,8$ et $f=50$ Hz. La surface présente un motif « chameau ».

II.D. Logiciel de calcul des champs de vitesses : MOTION2D

Dans l'objectif de quantifier les mouvements granulaires, nous avons cherché à calculer les champs de vitesse des grains à partir des images capturées par la caméra CCD. Pour cela, nous avons proposé un stage pour le « Master2 Recherche en Image Vision Signal », en partenariat avec le centre CIS (Centre Imagerie Santé) de l'école des mines de Saint-Étienne, pour développer un logiciel de type PIV (Particle Image Velocimetry) qui nous permettrait de calculer les champs de vitesse des grains sur une large fenêtre spatiale. Cette tâche a été confiée à Abdelkrim Belhaoua [Belhaoua07].

La première partie de cette section sera consacrée à une brève description de ce logiciel baptisé « MOTION2D ». Dans la deuxième partie, nous allons détailler la démarche suivie pour la validation de ce logiciel et le choix des différents paramètres.

II.D.1. Description du logiciel MOTION2D

Le logiciel MOTION2D de type PIV utilise une approche multi-échelle et la méthode de Lucas-Kanade pour la détermination du flot optique. Le flot optique est un champ de déplacement visuel qui permet d'expliquer des variations dans une séquence d'images en termes de déplacements de points images. Il s'agit d'une matrice à quatre dimensions : les deux premières dimensions correspondent à la largeur et la hauteur de l'image, et les deux dernières dimensions correspondent à la direction du déplacement dans le plan.

Nous commencerons par une brève description de la méthode de Lucas-Kanade. Ensuite, nous nous intéresserons à l'approche multi-échelle. Et, pour finir, nous présenterons un schéma de l'algorithme utilisé par MOTION2D.

II.D.1.a. Méthode de Lucas-Kanade

La méthode de Lucas-Kanade se base sur deux hypothèses :

- 1^{ère} hypothèse : comme la plupart des méthodes différentielles, elle suppose la conservation de l'intensité. En effet, elle suppose que l'intensité I des objets ne varie pas d'une manière significative entre deux images successives aux temps t et $t+dt$. On écrit alors :

$$I(x, y, t) = I(x + dx, y + dy, t + dt) \quad (1)$$

où $\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}$ et $\begin{pmatrix} dx \\ dy \end{pmatrix}$ sont respectivement les vecteurs position et déplacement du pixel.

En combinant l'équation (1) avec le développement de Taylor au 1^{er} ordre de $I(x+dx, y+dy, t+dt)$, on trouve que la dérivée partielle de la fonction intensité le long du flot optique est nulle :

$$\begin{pmatrix} I_x & I_y \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v_x \\ v_y \end{pmatrix} + I_t = 0 \quad (2)$$

où I_x, I_y et I_t sont respectivement les dérivées partielles en espace et en temps de I

et $\begin{pmatrix} v_x \\ v_y \end{pmatrix}$ le vecteur vitesse en (x, y, t) .

Il s'agit ici d'un système à une seule équation et deux inconnues v_x et v_y : il ne peut pas être résolu.

- 2^{ème} hypothèse : pour lever l'indétermination de l'équation (2), la méthode suppose que la vitesse est localement constante sur un voisinage du pixel considéré. Pour

une fenêtre W de taille n pixels centrée sur le pixel (x, y) , la vitesse est considérée constante. En ordonnant les pixels de $1 \dots n$, on obtient ce système d'équations :

$$\begin{bmatrix} I_{x_1} & I_{y_1} \\ I_{x_2} & I_{y_2} \\ \vdots & \vdots \\ I_{x_n} & I_{y_n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} I_{t_1} \\ I_{t_2} \\ \vdots \\ I_{t_n} \end{bmatrix} = 0 \quad (3)$$

Ce système d'équations est surdéterminé et il est résolu en utilisant la méthode des moindres-carrés.

Notons que la taille de la fenêtre a une grande influence sur la détermination du flot optique :

- une petite fenêtre est meilleure pour l'exactitude de la détermination du flot optique car elle respecte les variations locales.
- une fenêtre large est meilleure pour la robustesse de cette détermination dans le cas des grands déplacements.

II.D.1.b. Approche multi-échelle

Nous venons de voir qu'il y a un compromis à faire pour le choix de la largeur de la fenêtre W . Afin d'éviter de faire ce compromis aux dépens de l'exactitude ou de la robustesse de la détermination du flot optique, une approche multi-échelle a été combinée avec la méthode de Lucas-Kanade. Elle consiste à appliquer l'algorithme de Lucas-kanade à différents niveaux de résolution successivement.

A cet effet, des représentations pyramidales des images initiales sont construites. Il s'agit de modéliser l'image à différentes résolutions, depuis l'image initiale (la plus forte résolution niveau de pyramide $P=0$) à une image très grossière (la plus basse résolution niveau de pyramide P). La figure II-27 montre un exemple de représentation pyramidale d'une image jusqu'à $P=5$. On commence alors par calculer le flot optique à la résolution la plus faible. Ensuite, ces mesures à échelle grossière sont raffinées progressivement à des échelles plus fines. Ceci permet de déterminer les grands déplacements à haut niveau de pyramide et les petits déplacements à faible niveau de pyramide.

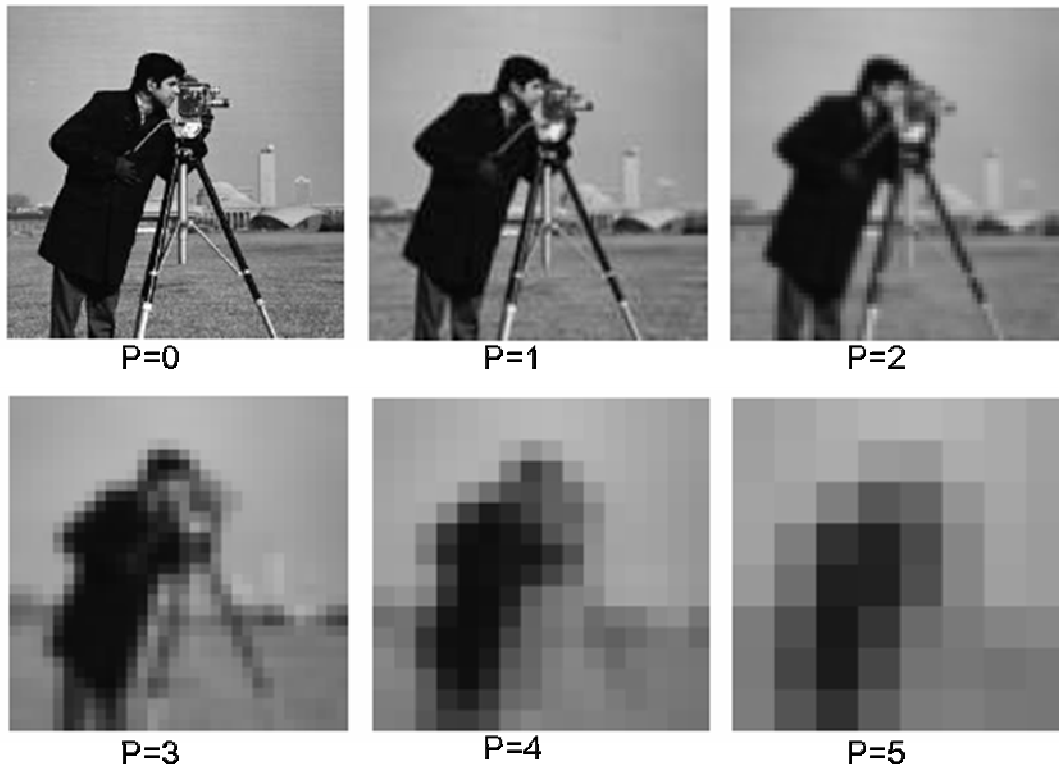


Figure II-27. Représentation pyramidale d'une image. Le niveau $P=0$ correspond à l'image initiale. La résolution de l'image est divisée par deux dans les deux sens quand on passe d'un niveau de pyramide P à $P+1$ (Belhaoua, 2007).

II.D.1.c. Algorithme de MOTION2D

Dans cette partie, il s'agit de présenter schématiquement la structure de l'algorithme utilisé par MOTION2D pour la détermination du champ de déplacement entre deux images A et B.

En entrée : images A et B.

En sortie : champ de déplacement entre les deux images.

⇧ Décomposition pyramidale en P+1 niveaux des deux images : $A_0=A, A_1 \dots A_P$ et $B_0=B, B_1 \dots B_P$.

⇧ Initialisation du flot optique : $v_{P+1}=0$.

⇧ Pour p de 0 à P :

○ Image A_p^+ : distorsion de l'image A_p par le flot optique du niveau $p+1$ propagé au niveau p : $A_p^+ = A_p + v_{p+1}^*$.

○ Boucle d'estimation du flot optique entre A_p^+ et B_p :

▪ Pour k de 1 à K :

$m_p^k \equiv$ Lucas-Kanade itératif. m_p^k est le flot optique au niveau p pour l'itération k .

▪ Fin

○ Flot optique au niveau p entre A_p^+ et B_p : m_p .

○ Flot optique au niveau p entre A_p et B_p : $v_p = v_{p+1}^* + m_p$.

⇧ Fin

Estimation du flot optique final entre les images A et B :

$$\Rightarrow v = v_0 = \sum_{p=0}^P m_p^*$$

m_p^* est le flot optique m_{p+1} propagé au niveau p : la taille de la matrice est doublée dans les deux sens de la largeur et la hauteur.

Le logiciel MOTION2D a été programmé sous MATLAB et compilé sous la forme d'un exécutable. Il suffit de charger les deux images, sélectionner la zone d'intérêt, le niveau de la pyramide P et la taille de la fenêtre W. La figure II-28 montre une illustration de l'exécutable MOTION2D.

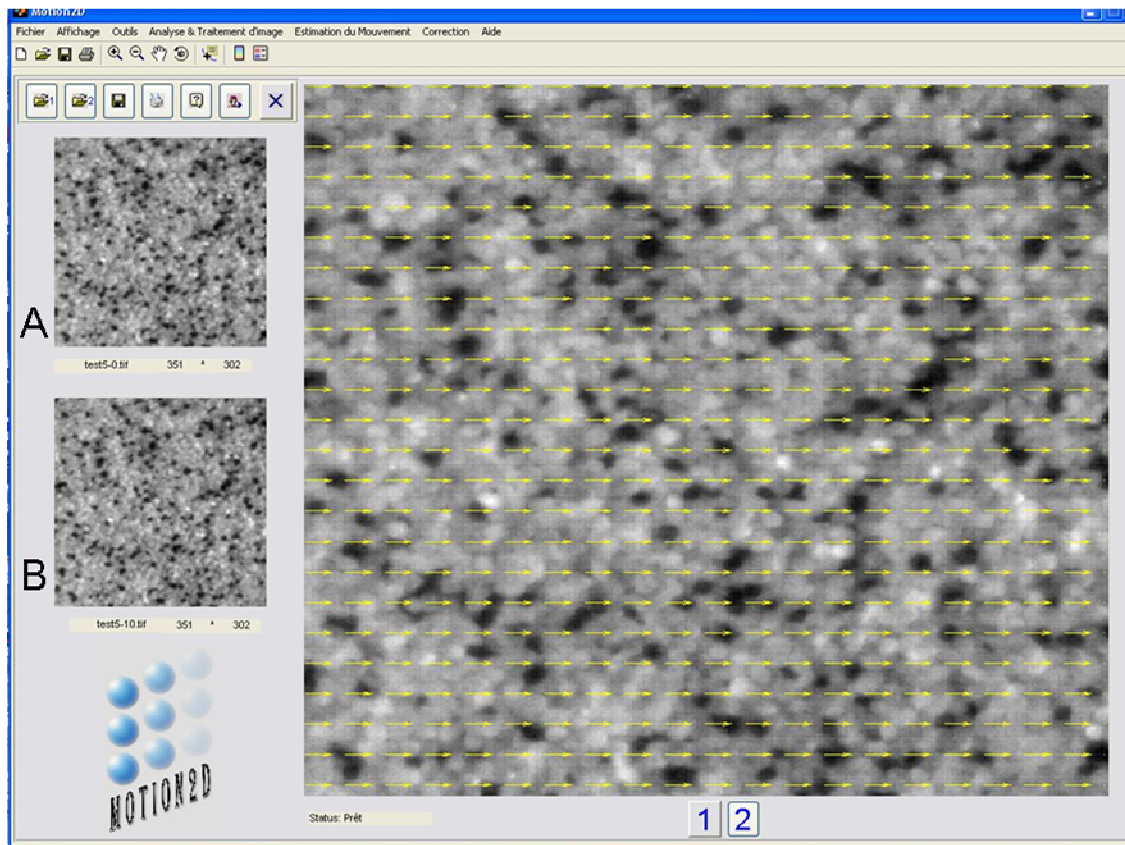


Figure II-28. Aperçu de l'interface graphique du logiciel MOTION2D : champ de déplacement calculé entre les images A et B. Ici, il s'agit d'un champ de déplacement uniforme pour l'ensemble des grains.

II.D.2. Validation du logiciel MOTION2D

Le logiciel MOTION2D a été validé sur des exemples numériques simples. Dans cette partie, nous cherchons à savoir dans quelle mesure et avec quel choix de paramètres ce logiciel est capable de déterminer le champ de déplacement dans nos expériences de vibrations. Rappelons qu'il y a deux paramètres à fixer : la taille de la fenêtre W et le niveau de pyramide P . Ces deux paramètres ont une influence directe sur le temps de calcul qui est un paramètre très important quand des analyses quantitatives sont entreprises.

Pour cela, plusieurs expériences sont réalisées afin de générer des images tests avec des champs de déplacement connus. Ces images sont par la suite analysées de diverses manières avec MOTION2D pour déterminer ces champs de déplacement. Les résultats de ces analyses sont interprétés afin de conclure sur la validation de MOTION2D.

II.D.2.a. Génération des images tests

Images A-B par « translation numérique (d'image) » : une image A de l'empilement granulaire est tradatée numériquement d'exactement δ pixels en utilisant le logiciel Aphelion pour obtenir l'image B.

Images C-D par « translation numérique par bandes (d'images) » : une image C de l'empilement granulaire est subdivisée en plusieurs bandes parallèles C_i . Chaque bande est tradatée parallèlement à elle-même d'exactement δ_i pixels pour obtenir l'image D (voir figure II-4). δ_i varie entre 3 et 10 pixels.

Images E-F par « translation physique (de sable) » : le matériau granulaire est déposé sur un plateau fixé sur le chariot d'une table de guidage linéaire (profilomètre optique). Le récipient est déplacé par une distance d mm grâce au moteur pas à pas. Les images de l'état initial et l'état final sont nommées respectivement E et F.

Images G-H par « rotation physique (de sable) » : le matériau granulaire est déposé dans un récipient cylindrique au centre duquel est clouée une punaise qui le fixe au plan horizontal (voir figure II-5). Une rotation d'un angle α autour de la punaise est accomplie. Les images de l'état initial et l'état final sont nommées respectivement G et H.

II.D.2.b. Résultats et interprétations des analyses des images tests

Images A-B : trois différentes paires d'images A-B sont générées correspondant à trois translations de un, cinq et dix pixels. Plusieurs analyses sont effectuées sur ces paires d'images en variant le niveau de pyramide de 0 à 4 et la taille de la fenêtre W de 3 à 25 pixels. Notons qu'ici le diamètre moyen d'un grain de sable d_{43} est égal à 8 pixels. Les résultats de ces analyses sont regroupés dans la figure II-29.

Ils montrent qu'il y a des conditions particulières pour qu'un déplacement de δ pixels soit bien estimé. En effet, pour des petites fenêtres ($W < 9$), les analyses doivent être réalisées en utilisant un haut niveau de pyramide. Par exemple, pour un déplacement de 10 pixels, on doit utiliser un niveau de pyramide $P=3$ pour une fenêtre de largeur $W=3$.

Concernant le temps de calcul, ce paramètre reste quasiment constant quand on augmente le niveau de pyramide pour des largeurs de fenêtre inférieures à 9 pixels et il croit très rapidement au-delà de cette valeur.

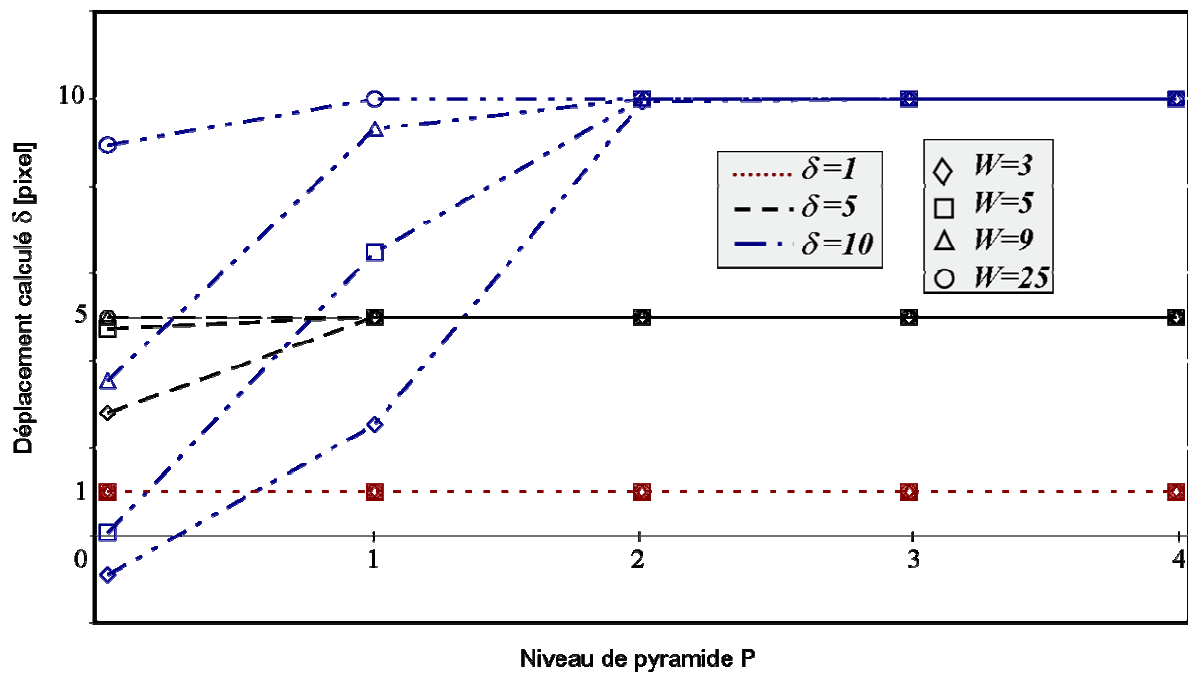


Figure II-29. Le déplacement calculé entre trois paires d'images A-B (translation numérique) en fonction du niveau de pyramide P pour différentes largeurs de fenêtre W.

Ces résultats nous donnent quelques indications quant aux choix à faire concernant le niveau de la pyramide et la taille de la fenêtre en tenant compte du temps de calcul mais aussi du déplacement maximum détectable. Il est donc important d'avoir une idée sur l'ordre de grandeur des déplacements que nous pourrions rencontrer dans nos expériences de vibrations. Des expériences, non reportées ici, montrent que cet ordre de grandeur est de quelques diamètres de grains. Nous faisons le choix alors de prendre une largeur de fenêtre égale à trois fois le diamètre moyen d'un grain d_{43} . Ce choix est un compromis entre le critère de déplacement maximum détectable (un diamètre de grain aurait suffi avec un haut niveau de pyramide) et le fait que nous cherchons à quantifier un mouvement collectif en s'affranchissant du caractère chaotique des mouvements individuels des grains. Notons que dans la bibliographie, Medved a fait également ce choix (Medved, 2002). Pour le niveau de pyramide $P=2$, les résultats obtenus sont satisfaisants pour toutes les tailles de fenêtres utilisées. Pour la suite, les analyses sont effectuées avec un niveau de pyramide $P=2$ et une fenêtre de largeur $W \sim 3 d_{43}$.

Images C-D : le champ de déplacement entre les images C et D est calculé en utilisant $P=2$ et $W \sim 3 d_{43}$. Le graphique dans la figure II-30 montre l'évolution du déplacement moyenné horizontalement (sur l'axe x) en fonction de la position verticale z dans l'image. Les différentes zones correspondant aux différentes valeurs de déplacement δ pixels

sont bien détectées et séparées. Cependant, il faut noter qu'il y a des effets de bord qui se font ressentir jusqu'à quatre tailles de grain.

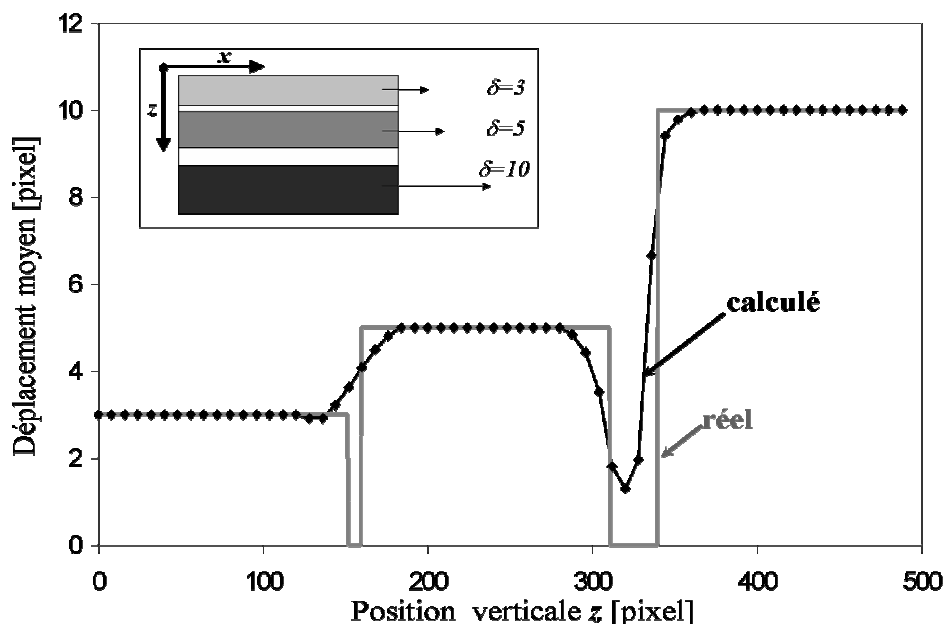


Figure II-30. Translation numérique différentielle « Images C-D » : le déplacement moyenné sur l'axe x en fonction de la position verticale z. Le protocole d'obtention de l'image D à partir de C est présenté dans l'encadré.

Images E-F : différentes translations sont effectuées allant de 0,1 mm à 1,5 mm. Les images résultantes sont analysées avec $P=2$ et $W \sim 3 d_{43}$. Le tableau II-10 regroupe les résultats obtenus. Le champ de déplacement calculé est moyenné sur toute l'image. On trouve une très bonne correspondance entre les valeurs réelles et les valeurs calculées.

Images G-H : La figure II-31 montre le résultat de l'analyse du test de rotation par MOTION2D. En s'éloignant du centre de rotation, centre de la punaise, le déplacement croît en suivant la loi $d = \alpha \times r$ // α : l'angle de rotation / r : le rayon. Ce résultat montre que le logiciel MOTION2D détecte bien les mouvements de rotation.

d [mm]	d [pixel]	$\delta_{\text{calculé}}$ [pixel]
0,1	0,82	$0,83 \pm 0,02$
0,3	2,46	$2,49 \pm 0,02$
0,4	3,28	$3,41 \pm 0,03$
0,5	4,1	$4,2 \pm 0,09$
0,8	6,56	$6,63 \pm 0,04$
1	8,2	$8,29 \pm 0,09$
1,5	12,3	$12,08 \pm 0,3$

Tableau II-10. Comparaison entre le déplacement réel et le déplacement calculé par MOTION2D.

Les valeurs reportées ici pour le déplacement calculé est une valeur moyenne sur toute l'image avec les écarts-types. L'analyse a été réalisé en utilisant un niveau de pyramide $P=2$ et une largeur de fenêtre $W=15\sim 3d_{43}$.

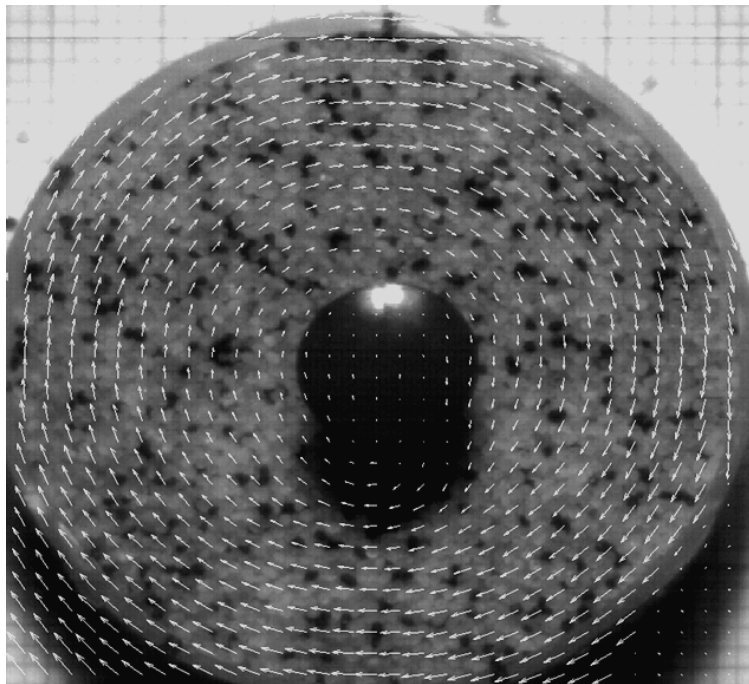


Figure II-31. Champ de déplacement calculé pour la paire d'images G-H issues du test de rotation.

Le cylindre rempli de sable a effectué une rotation d'un angle $\alpha=3.6^\circ$ autour de la punaise.

L'analyse est réalisée par MOTION2D avec $P=2$ et $W=15\sim 3d_{43}$.

Conclusion

Suite à une collaboration avec le centre CIS de l'école nationale supérieure des mines de Saint-Étienne , un logiciel de type PIV « MOTION2D » a été mis au point pour le calcul des champs de vitesse des grains dans nos expériences de vibration [Debayle08]. Après plusieurs processus de validation, nous utiliserons par la suite ce logiciel pour mesurer quantitativement les phénomènes observés. Les paramètres ajustables du logiciel sont fixés de la manière suivante : niveau de pyramide $P=2$ et largeur de fenêtre $W \sim 3-4 d_{43}$.

Chapitre III: Etude expérimentale

III.A. Introduction

III.A.1. Choix des paramètres

III.A.1.a. Notations

Afin de faciliter la lecture de ce travail, nous allons préciser dans ce paragraphe les notations que nous allons utiliser pour décrire l'étude expérimentale.

Dans la figure III-1, nous pouvons voir un schéma du banc de vibrations. L'axe des vibrations est noté x , l'axe transverse y et l'axe vertical z . Le pot vibrant délivre un mouvement sinusoïdal à la table vibrante suivant l'axe x :

$$x(t) = A \sin(2\pi f t)$$

où A et f sont respectivement l'amplitude et la fréquence des vibrations.

Nous définissons également l'accélération relative Γ par le rapport de l'accélération maximum et de l'accélération de la pesanteur g ($g=9,81 \text{ m.s}^{-2}$) :

$$\Gamma = \frac{A(2\pi f)^2}{g}$$

Nous faisons le choix ici de travailler avec la valeur crête de l'accélération conformément à l'usage dans la littérature même si les appareils de mesure sont conçus pour traiter des valeurs efficaces.

L'axe des vibrations x et l'axe transverse y sont respectivement baptisés l'axe sud-nord, et l'axe est-ouest. Les faces perpendiculaires à l'axe des vibrations sont alors appelées face Sud et face Nord et les faces parallèles à l'axe des vibrations face Est et face Ouest.

La dimension de la boîte parallèle à l'axe des vibrations est notée L_x . La dimension horizontale perpendiculaire à l'axe des vibrations est notée L_y .

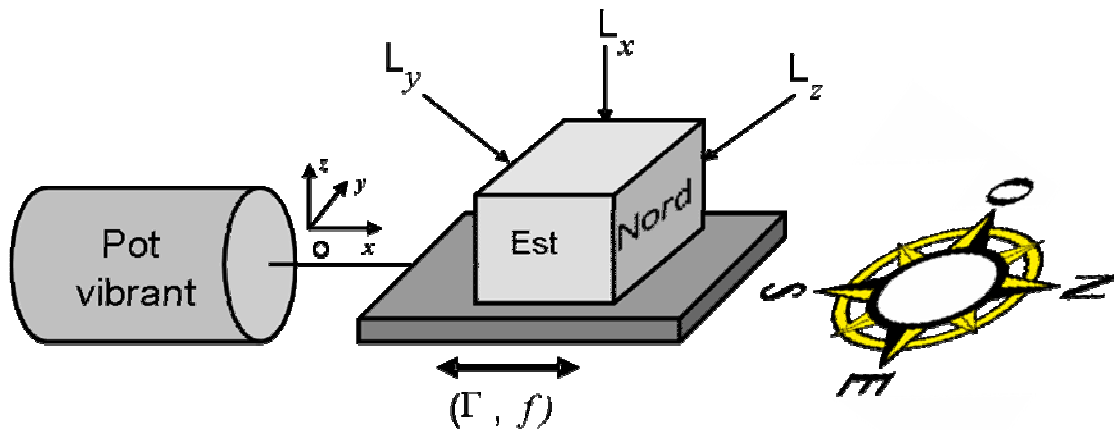


Figure III-1. Schéma du banc de vibrations. L'axe des vibrations, l'axe des x , correspond à l'axe Nord-Sud. L'axe des y est l'axe Est-Ouest.

III.A.1.b. Dimensions de l'empilement granulaire

Il ressort de l'étude bibliographique deux aspects qui semblent importants à mentionner ici pour guider notre choix concernant les dimensions de l'empilement granulaire :

- Une phénoménologie différente selon l'épaisseur du lit granulaire. En effet, il existe une différence de comportement entre un lit mince et un lit épais, la transition se situant à une épaisseur du lit d'une dizaine de diamètres de grains pour les matériaux non cohésifs. Des phénomènes comme les ondes de surface ou la formation de motifs à la surface de l'empilement concernent plutôt les couches minces de grains [Melo94 ; Metcalfe97]. Cependant des phénomènes tels que les mouvements convectifs [Knight96] ou la compaction [Richard05] sont rencontrés plutôt dans des empilements épais.
- La grande majorité des études traitant des vibrations horizontales, expérimentales ou numériques, sont réalisées pour des milieux granulaires bidimensionnels ou quasi- bidimensionnels (L_x très grand par rapport à L_y .) Il existe donc une lacune certaine quant à l'étude de milieux granulaires tridimensionnels.

Un des objectifs poursuivis dans cette étude est de se rapprocher de la réalité industrielle, ce qui nous pousse à étudier un milieu granulaire tridimensionnel. Ainsi, nous choisissons les dimensions suivantes pour l'empilement granulaire type (d correspond au d_{43} du sable2 soit $d=517 \mu\text{m}$) :

$$L_x = 40 \text{ mm} \sim 75 d / L_y = 80 \text{ mm} \sim 150 d / H = 60 \text{ mm} \sim 110 d.$$

Ainsi, une part de l'originalité de cette étude résulte dans le fait qu'on traite de vrais milieux tridimensionnels avec la dimension L_y supérieure à la dimension L_x .

III.A.2. Préparation des échantillons

Afin d'obtenir un état initial reproductible de l'empilement granulaire avant vibrations, nous avons cherché à définir un protocole opératoire fiable. Deux protocoles de préparation ont été utilisés : soit un remplissage en vrac, soit un remplissage par pluviation. Dans les deux cas, à la fin de cette opération de remplissage, nous procédons à un arasement de la surface libre de l'empilement pour la rendre plane mais aussi pour contrôler la hauteur totale du tas de sable. Ceci est réalisé grâce à un système d'aspiration. Le surplus des grains est aspiré à travers un tube mince relié à un aspirateur de table. Pour contrôler la hauteur du lit et rendre plus homogène l'aspiration, le tube passe à travers des cales en plexiglas reposant sur les bords du récipient. Ce qui permet de maintenir le tube à une hauteur fixe par rapport au fond du récipient (voir figure III-2). Un balayage de la surface libre de l'empilement permet d'obtenir finalement empilement plat d'une hauteur H bien contrôlée.

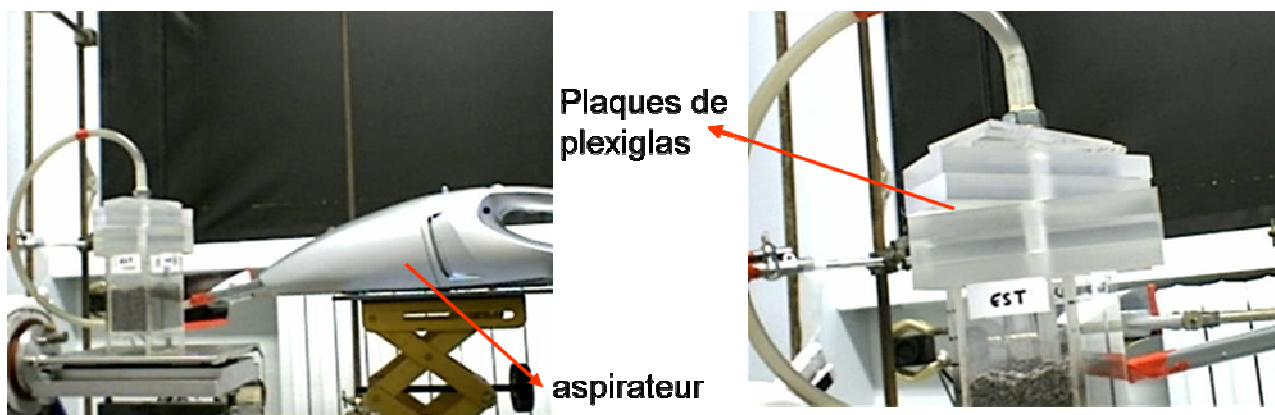


Figure III-2. Dispositif d'arasement de la surface libre par un système d'aspiration. Les grains de sable sont aspirés à l'aide d'un tube de diamètre intérieur égal à 4 mm relié à un aspirateur de table. Le tube passe à travers des plaques de plexiglas qui font office de cales et permettent ainsi de contrôler la hauteur de l'empilement granulaire.

Dans ce qui suit, nous présenterons les deux méthodes de remplissage pour l'obtention de l'état initial. Nous noterons C la compacité de l'empilement. Les valeurs numériques sont données pour le sable².

III.A.2.a. Remplissage en vrac

Cette première méthode consiste à verser en vrac les grains de sable dans le récipient à l'aide d'un entonnoir dont la sortie est maintenue approximativement à 30 mm du niveau supérieur de l'empilement. Pour répartir les grains uniformément sur toute la surface de l'empilement, nous imprimons à l'entonnoir un mouvement de va-et-vient en x et en y . Ce mouvement nous permet d'assurer une certaine homogénéité du tas de sable en termes de compacité locale.

En diminuant le diamètre d'embouchure de l'entonnoir, nous pouvons obtenir un débit de grains moins important. Un faible débit permet une répartition plus uniforme et plus homogène des grains dans les trois directions de l'espace. De cette manière, la construction de l'empilement est rendue plus reproductible, avec une compacité initiale plus importante, car les effets de voûte sont alors minimisés.

Dans le tableau III-1, nous présentons les résultats en termes de compacité moyenne de l'empilement granulaire de plusieurs expériences de remplissage en vrac réalisés avec trois différents diamètres d'entonnoir.

Diamètre de l'entonnoir [mm]	11	5	3
Compacité initiale [%]	60 ± 1	$61,5 \pm 0,3^*$	$64 \pm 0,2^*$

Tableau III-1. Compacité initiale obtenue par un remplissage en vrac avec différents diamètres d'entonnoir. L'étoile indique que les mesures sont réalisées avec le profilomètre optique. L'écart type se réduit quand le diamètre de l'entonnoir diminue.

Les résultats du tableau III-1 montrent qu'en diminuant le diamètre de l'entonnoir, nous obtenons une compacité initiale plus importante tout en réduisant l'écart type entre les mesures. Nous augmentons donc la reproductibilité du protocole.

III.A.2.b. Remplissage par pluviation

Cette méthode de remplissage, comme son nom l'indique, consiste à verser les grains dans le récipient sous forme de pluie. Au lieu de verser les grains depuis une source ponctuelle, fixe ou mobile, on verse les grains d'une manière quasiment individualisée de divers endroits uniformément répartis sur la surface du récipient. Ainsi, l'empilement est construit couche par couche.

Plusieurs études se sont intéressées à cette méthode de remplissage. Deux aspects sont essentiellement mis en évidence. En premier lieu, le tas obtenu présente une distribution de pression plus homogène qu'un tas obtenu par un versement d'un point unique [Vanel99 ; Geng01]. En second lieu, la compacité moyenne d'un empilement construit par pluviation est supérieure à celle d'un empilement construit à partir d'un point source [Landry03 ; Rouèche05].

Le protocole expérimental suivi pour réaliser ce type de remplissage consiste à verser le sable à travers un tamis placé à 120 mm du fond du récipient avec un mouvement de va et vient en x et en y . Le tamis utilisé a une maille de 2 mm. Il est utilisé ici pour répartir les grains et imposer un faible débit en chaque point. La hauteur de chute a très peu d'influence sur la compacité finale de l'empilement [Rouèche05]. C'est pour cela que nous n'élevons pas le tamis au cours du remplissage. Nous estimons que, lorsque la hauteur de chute varie de 120 à 60 mm entre le début et la fin du remplissage, l'histoire des grains n'est pas sensiblement affectée. A la fin du remplissage, nous utilisons le système d'aspiration pour rendre la surface libre plane et obtenir la hauteur d'empilement recherchée.

Pour une hauteur de 60 mm, la compacité de l'empilement ainsi construit est mesurée par le profilomètre optique. Elle est égale à 68 %.

En conclusion, le remplissage par pluviation permet d'obtenir un état initial homogène et très dense. C'est cet état que nous cherchons à obtenir. Malheureusement, ce protocole ne peut pas être mis en œuvre industriellement. En effet, la présence d'un couvercle rend incontournable l'utilisation du remplissage en vrac (par des trous dans le couvercle) et le recours aux vibrations pour densifier le sable. Nous décidons alors d'utiliser le protocole du « remplissage en vrac + entonnoir » pour construire nos états initiaux. Il nous assure tout de même une bonne homogénéité et une bonne reproductibilité de l'empilement initial.

III.B. Etat dynamique sous vibrations

III.B.1. Étude phénoménologique en fonction de l'accélération et de la fréquence

L'étude consiste à rechercher l'influence des paramètres du procédé (accélération relative, fréquence) sur le comportement du milieu granulaire. Une expérience type consiste à augmenter pas à pas l'accélération relative Γ en partant du repos à une fréquence fixée (typiquement $f = 50$ Hz) et à observer le comportement du milieu granulaire. Nous nous emploierons donc à décrire qualitativement les mouvements des grains en fonction de l'accélération dans les trois premiers paragraphes. Le dernier paragraphe présentera des éléments de l'influence de la fréquence sur les phénomènes observés.

Les valeurs numériques fournies correspondent à un empilement granulaire de sable² (sable arrondi $d_{43}=517$ μm) de hauteur initiale égale à 60 mm et de compacité initiale égale à 61 % ($\pm 1\%$).

III.B.1.a. Frémissement de surface

L'étude est conduite à fréquence constante $f = 50$ Hz. Pour une accélération Γ comprise entre 0 et 0,5, nous observons que l'empilement granulaire se comporte comme un bloc solide qui suit les mouvements des parois. Dans le référentiel du récipient, l'empilement paraît immobile. Aucun réarrangement de grains n'est observé à la surface libre ou au niveau des parois.

Pour des valeurs de Γ comprises entre 0,5 et 0,7, nous pouvons observer à la surface libre de l'empilement quelques grains qui oscillent autour de leurs positions d'équilibre et d'autres qui passent d'un « creux » à un autre. Ce mouvement de frémissement s'accroît en augmentant l'accélération mais finit par disparaître au bout de quelques secondes, voire quelques dizaines de secondes. Les frémissements ont conduit les grains à tomber dans des configurations plus stables dont ils ne peuvent plus sortir. Ce réarrangement granulaire ne concerne pas uniquement les grains à la surface. En effet, nous observons une légère diminution de la hauteur du lit et donc une densification de

l'empilement de l'ordre de $\sim 3\%$ pour $\Gamma=0,7$ (figure III-3). Ceci prouve que certains grains plus au cœur de l'empilement se sont également réarrangés localement.

Ce phénomène de réarrangement granulaire a été également relevé par S. Aumaître [Aumaitre07] qui a mesuré la vitesse des grains à la surface de l'empilement et vu que cette vitesse diminue au cours du temps jusqu'à s'annuler pour des valeurs d'accélération légèrement inférieures à l'accélération critique déterminant la transition vers un écoulement permanent à la surface libre de l'empilement.

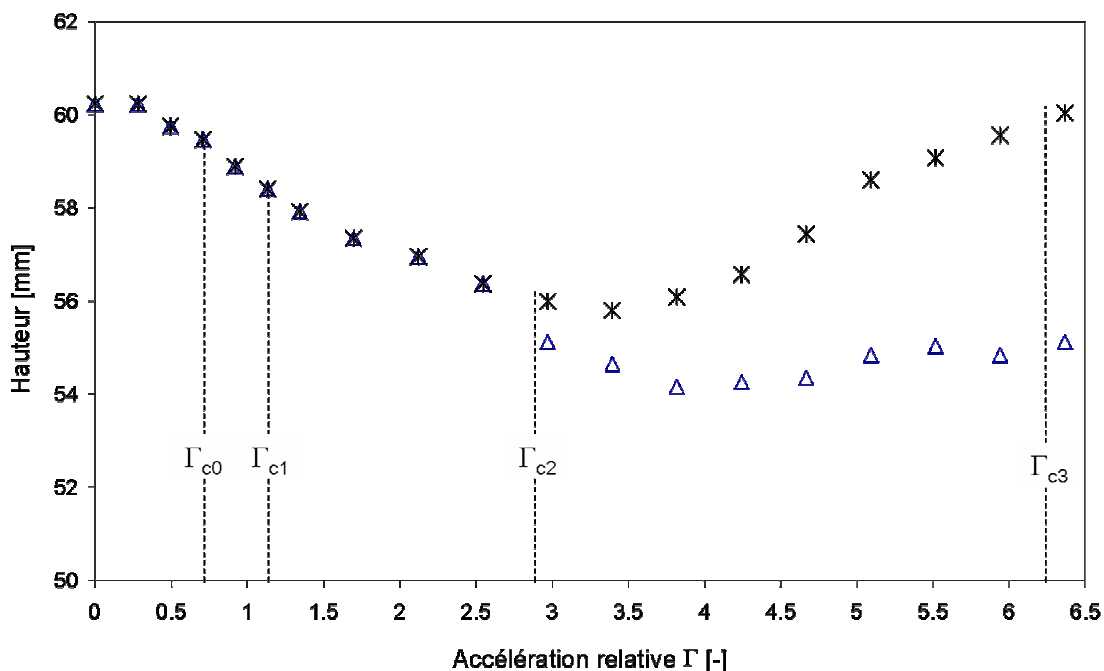


Figure III-3. Evolution de la hauteur totale de l'empilement (état initial : $H=60,2$ mm et $C\sim 61\%$) en fonction de l'accélération Γ . Triangles : hauteur mesurée au milieu de la face nord. Croix : hauteur mesurée au sommet de la surface libre.

A partir de la valeur seuil $\Gamma_{c0}\sim 0,7$, ce mouvement de frémissement devient persistant dans le temps. Il s'intensifie en augmentant l'accélération et reste localisé sur une ou deux couches de grains. Tout en restant à la surface, les grains se meuvent d'une manière désordonnée. Aucune direction privilégiée n'est détectée. Ce qui explique qu'en partant d'un motif en damiers de grains « blancs » et grains noirs, nous observons une interpénétration des deux couleurs (voir figure III- 4). L'analogie avec un phénomène diffusionnel apparaît réaliste.

Nous observons également que la surface de l'empilement devient parfaitement plane au passage de la valeur Γ_{c0} et que le milieu se densifie davantage en augmentant l'accélération.

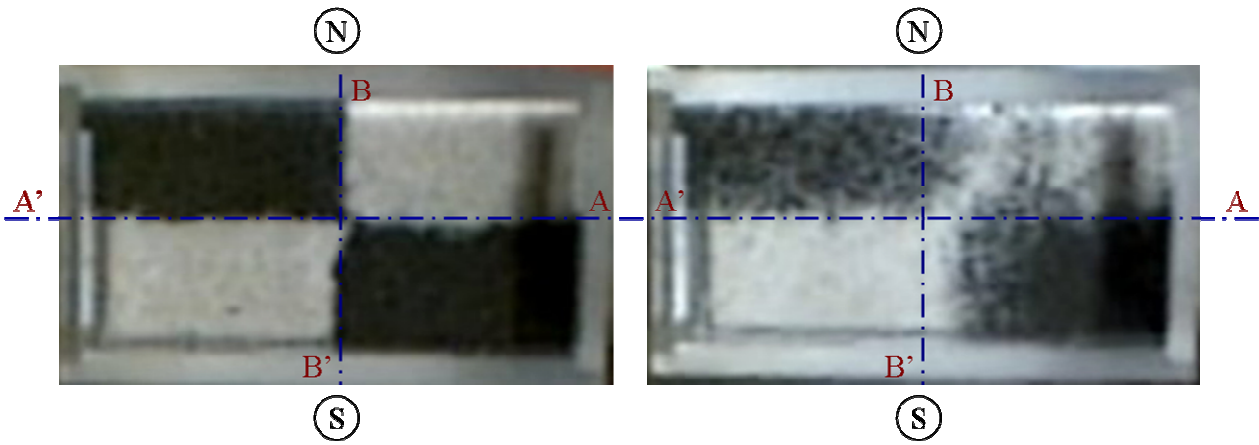


Figure III-4. Vues de dessus de la surface libre d'un empilement. A gauche, état initial constitué d'un motif en damiers de sable non colorié et sable colorié en noir. A droite, l'empilement a été vibré pendant 4 minutes à $\Gamma=0,85$ et $f=50$ Hz. Le frémissement des grains à la surface a provoqué une interpénétration des différents rectangles, entre les lignes de séparation AA' et BB'.

III.B.1.b. Transition vers l'écoulement

A partir de Γ_{c0} , nous observons un mouvement désordonné des grains à la surface de l'empilement. Ce mouvement erratique s'intensifie en augmentant l'accélération mais il s'ordonne également petit à petit. Les grains de part et d'autre d'une ligne AA' située au milieu de la surface se dirigent préférentiellement vers les parois nord et sud. Pour des valeurs suffisamment élevées d'accélération, tous les grains à la surface de l'empilement adoptent un mouvement collectif ordonné vers les parois nord et sud.

Dans notre expérience, il nous est difficile de déterminer avec précision la valeur de l'accélération critique Γ_{c1} pour laquelle apparaît la transition entre mouvement désordonné et mouvement ordonné des grains à la surface. En revanche nous pouvons corrélérer ces observations faites à la surface de l'empilement avec l'observation des mouvements des grains sur les faces nord et sud. Nous notons alors qu'à partir d'une accélération critique, un mouvement descendant des grains s'initie au niveau de ces parois. Malgré le caractère toujours progressif de la transition, nous estimons qu'elle a lieu pour $\Gamma_{c1} = 1,15 \pm 0,05$.

Au cours de cette transition, la forme de la surface libre subit un changement : elle devient légèrement concave (forme d'un dôme). Ceci est à mettre en relation avec le fait qu'on a un flux ascendant des grains au milieu de la surface et un flux descendant des grains aux parois.

L'empilement se divise alors en deux zones : un bloc inférieur avec un comportement solide et une couche superficielle, lieu d'écoulement des grains. Ces mouvements granulaires sont toujours accompagnés d'une diminution de la hauteur totale de l'empilement et donc d'une densification de ce dernier (figure III-3). Cette observation est en apparence contradiction avec le principe de dilatance de Reynolds qui stipule que, pour se mouvoir, l'empilement des grains doit se dilater. L'équipe de Behringer [Tennakoon99 ; Metcalfe02] utilise cet argument pour expliquer le phénomène d'hystérésis qu'elle observe pour cette transition. Selon ces auteurs, la valeur de l'accélération marquant la transition entre l'état de « repos » et l'état de convection dépend de l'histoire de l'empilement. En partant du repos, l'empilement doit se dilater d'abord pour que la convection débute. Par contre en partant d'un régime où l'écoulement est déjà établi, l'empilement n'a pas besoin d'autant d'énergie pour maintenir les mouvements granulaires. Ces auteurs ont noté que l'accélération marquant la transition « convection → repos » est plus faible que celle marquant la transition « repos → convection ». Dans notre expérience menée à des fréquences bien supérieures (50 Hz au lieu de 15 Hz), l'empilement initial n'est probablement pas assez dense pour observer une dilatation au cours de la transition. Concernant une éventuelle hystérésis, notre détermination de la valeur de l'accélération critique n'est pas suffisamment précise pour conclure sur ce point.

La valeur de Γ_{c1} que nous trouvons est supérieure à celles trouvées dans la littérature. En plus du travail de l'équipe de Behringer, nous pouvons nous référer aux travaux de S. Aumaitre [Aumaitre07] et M. Medved [Medved02]. Les valeurs rapportées dans ces études varient entre 0,45 et 0,93 alors que nous trouvons 1,15. Cette différence peut s'expliquer en combinant les différentes conclusions de ces études. En effet, deux dépendances sont observées pour la valeur de Γ_{c1} : la première avec la fréquence des vibrations [Aumaitre07] et la deuxième avec la friction inter-grains [Metcalfe02]. Dans les deux cas, Γ_{c1} augmente avec ces deux paramètres. En comparaison avec ces études, dans notre expérience, nous travaillons à une fréquence beaucoup plus élevée (50 Hz dans notre cas et 3-15 Hz dans les autres) et avec un coefficient de friction plus grand (sable dans notre cas et billes de verre ou grains de pavot dans les autres). Il paraît alors logique que nous trouvions une valeur plus grande.

III.B.1.c. Fluidisation et mouvements convectifs

A partir de $\Gamma_{c1} \sim 1,15$, un mouvement collectif des grains s'est initié à la surface de l'empilement. En augmentant l'accélération, ce mouvement se précise et mobilise un volume de grains de plus en plus important tout en restant localisé dans une couche supérieure. Nous avons toujours une couche inférieure apparaissant comme un bloc solide qui suit les mouvements du récipient.

Dans la couche supérieure, nous observons la naissance de deux rouleaux de convection contrarotatifs. Au milieu de la surface libre de l'empilement et suivant une ligne horizontale A'A parallèle aux faces nord et sud, les grains remontent à la surface. Ensuite, de part et d'autre cette ligne A'A, ils dévalent la pente en direction des parois nord et sud où ils entreprennent un mouvement de descente le long de ces parois. Ce mouvement est à relier à la création intermittente de vides entre l'empilement et les parois nord et sud, phénomène que nous avons observé. La descente des grains s'étend sur une certaine épaisseur puis s'interrompt quand les grains mobiles sont bloqués et se voient contraints de pénétrer dans le cœur de l'empilement. Sur les faces est et ouest, on observe des mouvements de rotation des grains (voir figure III-5).

Ces résultats sont en accord avec les résultats rapportés dans la littérature. Les rouleaux de convection sont observés dans des études expérimentales [Medved99 ; Hsiau01 ; Metcalfe02 ...] et numériques [Liffman97 ; Saluena00].

Comme nous n'avons pas accès à des observations directes pour expliquer ce qui se passe au cœur de l'empilement, nous avons imaginé des expériences qui nous permettraient de faire ces observations indirectement. Il s'agit essentiellement d'utiliser des grains colorés pour visualiser les trajectoires des grains.

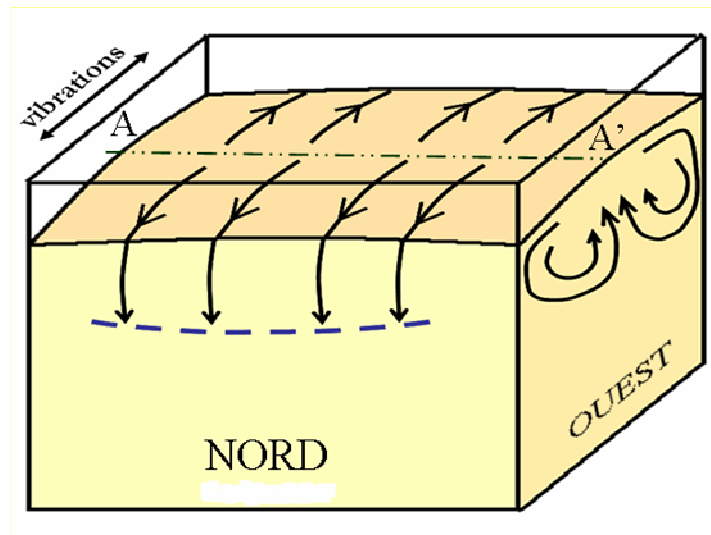


Figure III-5. Schéma des rouleaux de convection contrarotatifs observés dans la couche supérieure d'un empilement vibré horizontalement à une accélération supérieure à Γ_{c1} . Les flèches indiquent les trajectoires des grains. Les grains sur la face nord pénètrent dans le cœur de l'empilement au niveau de la ligne interrompue.

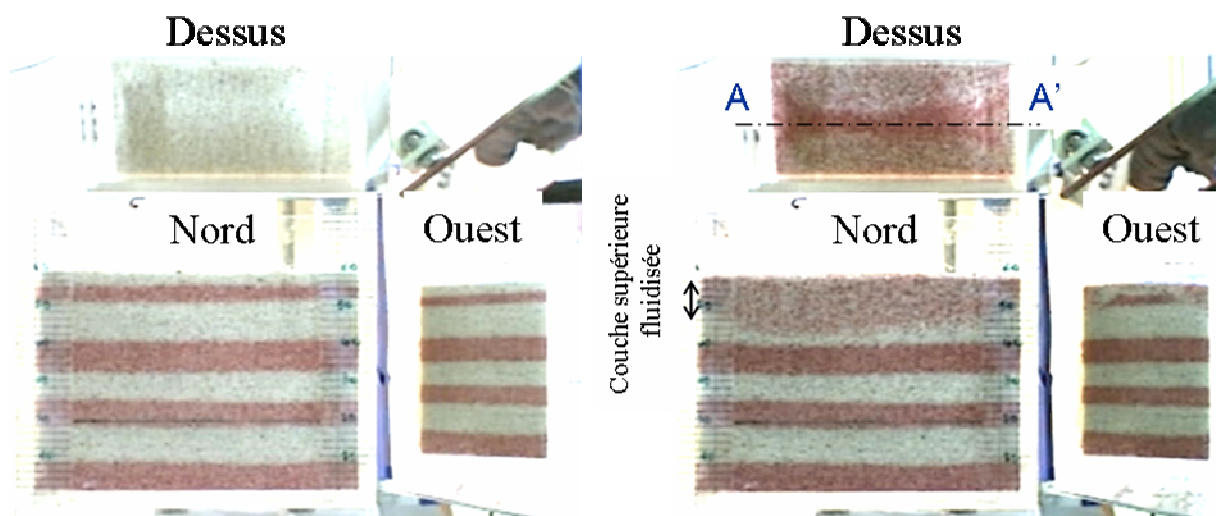


Figure III-6. Photographies offrant trois vues simultanées de l'empilement. A gauche : état initial composé d'une alternance de strates de grains blancs et grains colorés en rouges. A droite : état vibré à une accélération supérieure à Γ_{c1} . La vue de dessus de l'empilement vibré montre une concentration importante de grains colorés selon la ligne AA'. Ce qui indique une montée de la couche sous-jacente : L'expérience met en évidence le flux ascendant des grains du cœur de l'empilement vers la surface libre.

La figure III-6 présente une expérience de ce type. L'empilement initial est formé de strates de sable blanc alternées avec des strates de sable coloré en rouge. Après des vibrations à une accélération supérieure à Γ_{c1} , nous observons une montée massive des

grains rouges sur une ligne Est-Ouest au milieu de la surface libre, ce qui confirme qu'il y a un flux ascendant des grains du cœur de l'empilement vers la surface libre. L'existence de ce flux peut s'expliquer de la manière suivante :

- Sur les faces nord et sud, le mouvement de descente des grains s'interrompt à la frontière entre la couche supérieure fluidisée et la couche inférieure à comportement solide. Au niveau de cette ligne, les grains piégés sont poussés par la paroi et contraints de pénétrer dans le cœur de l'empilement.
- Un mouvement de proche en proche s'amorce alors, poussant les grains de la paroi vers le centre de l'empilement.
- Les grains au cœur de l'empilement se trouvent contraints dans la partie centrale par deux forces opposées liées à deux flux horizontaux de sens opposé. La capacité du milieu granulaire à réorienter les contraintes explique le passage d'une contrainte horizontale à une contrainte verticale comme le montre la figure III-7.a. Cependant, l'existence d'un fond (dans notre cas : fond du récipient + grains avec un comportement solide) bloque tout mouvement du grain #1 (figure III-7.b). Par contre, la résultante verticale des forces s'exerçant sur le grain #2 peut être non nulle et permet alors au grain #2 de s'éloigner du fond et remonter vers la surface.

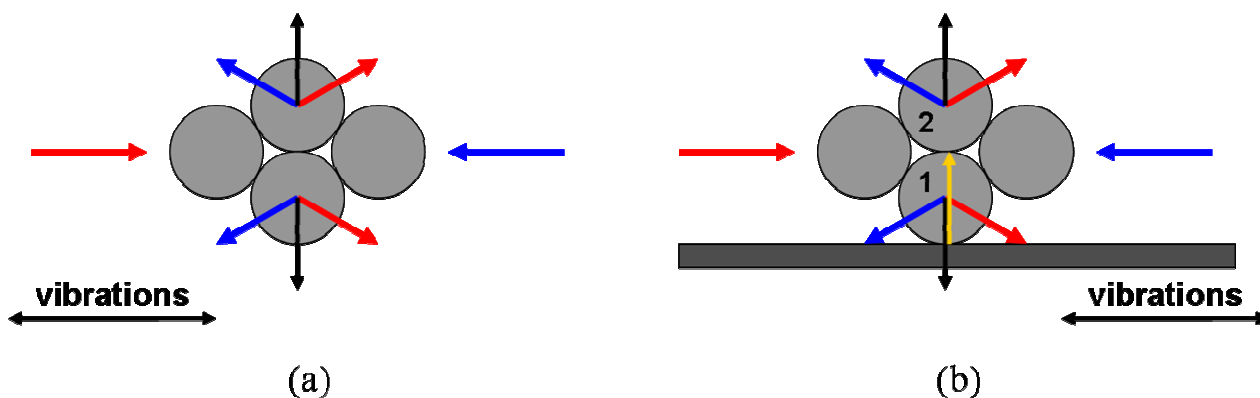


Figure III-7. (a) réorientation des contraintes dans un milieu granulaire. (b) effet du fond bloquant le grain #1. Le grain #2 est libre de se déplacer.

En augmentant l'accélération, l'épaisseur de la couche supérieure fluidisée augmente aux dépens du bloc solide inférieur. La vitesse des rouleaux de convection augmente également. Nous observons toujours une diminution de la hauteur totale de l'empilement ce qui signifie que ce dernier subit encore une densification. La surface libre forme un dôme peu marqué (figure III-8-a et figure III-9).

A partir de $\Gamma_{c2} \sim 2,8$, on commence à observer deux dômes supplémentaires parallèlement aux parois nord et sud. En augmentant Γ , ces deux dômes s'éloignent des parois et se rapprochent l'un de l'autre (figure III-8-b et figure III-9). A titre d'exemple, pour $\Gamma=3,6$, les dômes se sont éloignés de 8 mm des parois. Nous appelons cette forme de la surface « motif chameau ».

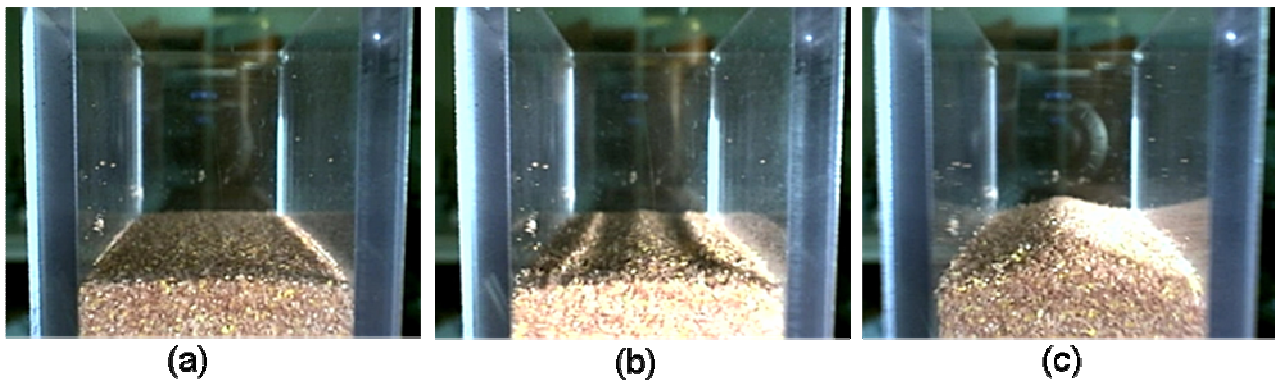


Figure III-8. Vue de la surface libre de l'empilement depuis la face Est. (a) $\Gamma=1,4$: dôme peu marqué (b) $\Gamma=3,5$: deux dômes supplémentaires parallèles aux parois nord et sud (c) $\Gamma=6,2$: bosse centrale unique.

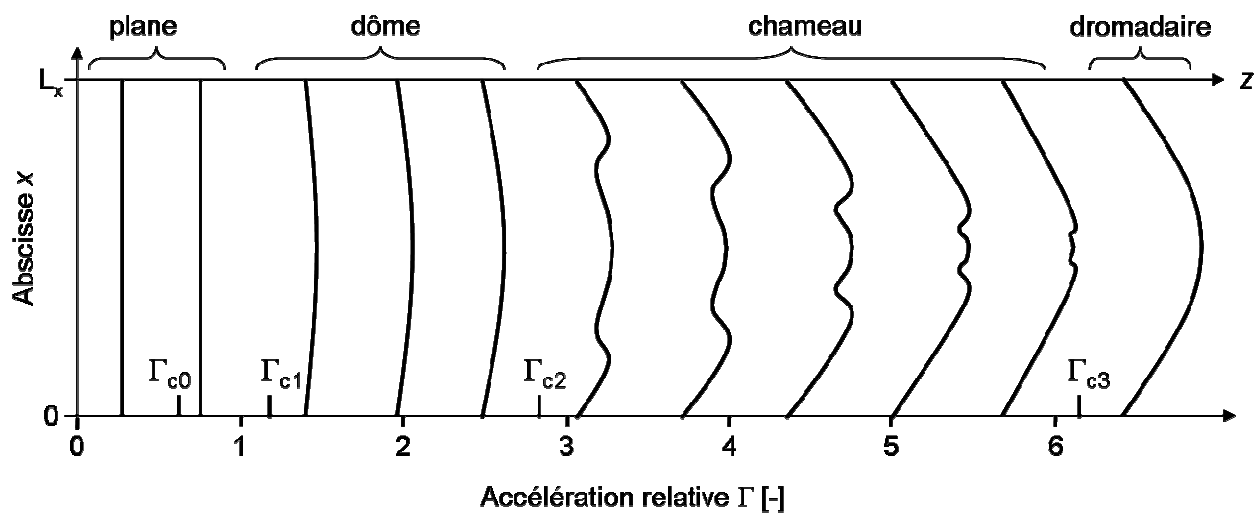


Figure III-9. Evolution en fonction de Γ de la forme de la surface libre de l'empilement vue depuis la face Est.

Pour tenter d'expliquer la formation d'un tel motif à la surface de l'empilement, nous commençons par rapporter l'observation expérimentale suivante : à l'apparition des dômes périphériques, nous remarquons une augmentation importante de la vitesse des grains à proximité des parois nord et sud, aussi bien à la surface libre qu'au niveau des

faces nord et sud (figure III-10). Nous pouvons penser alors que chaque rouleau de convection est composé de deux vortex : un à proximité de la paroi et de la surface et l'autre plus en profondeur. Les bosses correspondraient alors à une remontée relativement rapide des grains à la surface libre de l'empilement.

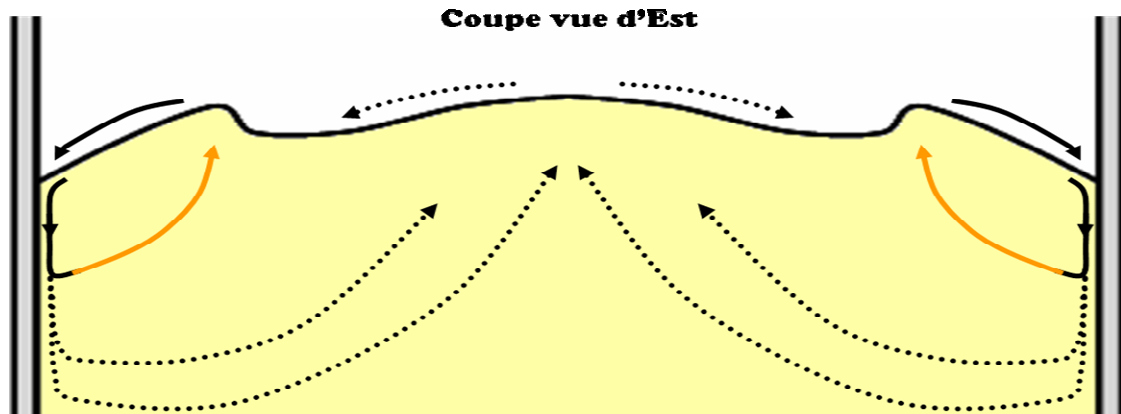


Figure III-10. Schéma des mouvements granulaires vus selon une coupe face Est. En continue : déplacements rapides des grains. En pointillé : des déplacements plus lents. En noir : trajectoires observées expérimentalement. En orange : trajectoires hypothétiques.

La diminution de la hauteur totale de l'empilement s'arrête vers $\Gamma \sim 3,6$ (figure-III). Nous observons désormais une dilatation de l'empilement en augmentant l'accélération.

Vers $\Gamma \sim 4$, une autre perturbation se manifeste cette fois sur les faces nord et sud. En effet, au milieu de ces faces nous observons du haut vers le bas (figure III-11-a) :

- Un mouvement descendant des grains correspondant aux deux rouleaux de convection dans la couche supérieure fluidisée.
- Un mouvement lent et ascendant des grains.
- Un mouvement lent et descendant des grains.
- Une zone inférieure sans mouvement apparent correspondant au bloc solide.

Nous pensons que cette perturbation est due aux effets de bords engendrés par la présence des faces Est et Ouest. En effet, sur les faces Nord et Sud, nous constatons une différence de comportement entre la zone centrale et les zones périphériques proches des faces Est et Ouest. Sur les bords, les grains descendent avec des vitesses plus importantes leur permettant de descendre plus profondément que les grains de la zone centrale. Se trouvant ensuite bloqués par le bloc solide, ils repoussent les autres grains vers le haut.

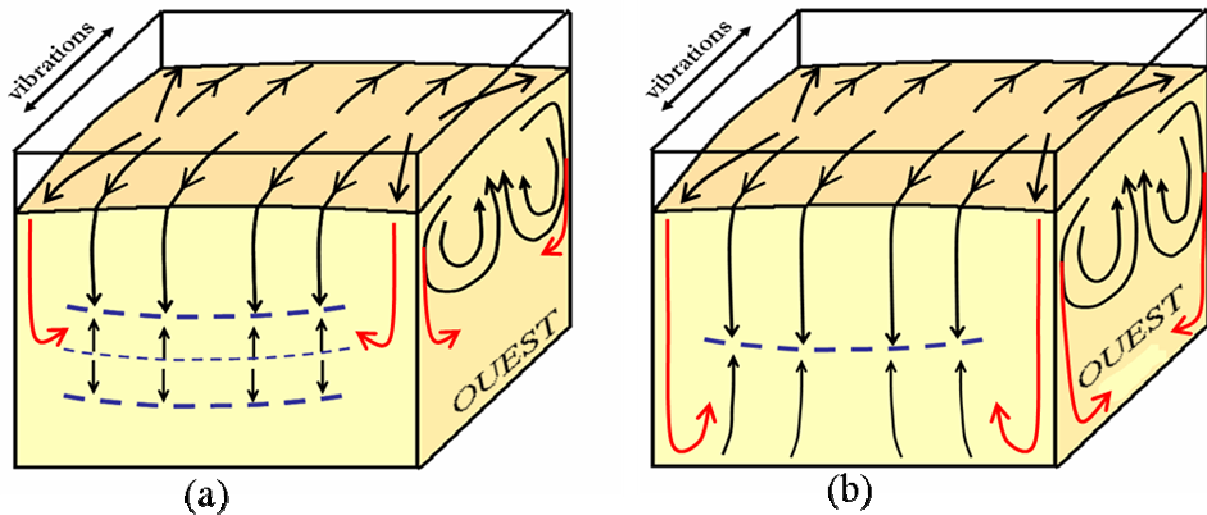


Figure III-11. Schéma des mouvements granulaires (a) pour $4 < \Gamma < 6$. (b) $\Gamma > 6$.

Cette différence de comportement des grains entre la zone centrale et les zones périphériques s'accroît en augmentant l'accélération jusqu'à obtenir pour $\Gamma > 6$ un mouvement ascendant sur la partie inférieure des faces nord et sud. Vu des parois, tout l'empilement est en mouvement. Il n'y a désormais plus de zones où les grains ont un comportement solide. Sur la face nord, on observe alors trois zones (figure III-11.b) :

- Une partie centrale supérieure avec un rapide flux descendant des grains qui correspond aux deux rouleaux de convection.
- Une partie centrale inférieure avec un lent flux ascendant.
- Deux parties périphériques avec un flux très rapide de grains vers le bas.

Pour les fortes accélérations, la forme de la surface libre présente une unique bosse centrale. En effet, les deux dômes périphériques se sont rapprochés au fur et à mesure que l'accélération augmentait et se sont confondus avec le dôme central pour $\Gamma_{c3} \sim 6,2$ (figure III-8-c et figure III-9).

III.B.1.d. Influence de la fréquence

Dans ce paragraphe, nous nous intéressons à l'influence de la fréquence des vibrations sur les phénomènes que nous venons de décrire précédemment. En particulier, nous étudierons l'évolution des accélérations critiques en fonction de la fréquence. À partir de l'étude phénoménologique, nous avons défini quatre accélérations critiques :

- Γ_{c0} : frémissement de surface.

- Γ_{c1} : transition vers l'écoulement et obtention de deux rouleaux de convection contrarotatifs dans une couche supérieure de l'empilement.
- Γ_{c2} : apparition du motif « chameau » à la surface libre de l'empilement. Deux dômes périphériques supplémentaires sont observés.
- Γ_{c3} : les dômes périphériques se rejoignent au milieu de la surface libre et se fusionnent avec le dôme central. Nous obtenons un motif « dromadaire ».

Sur le graphique de la figure III-12, nous avons tracé les courbes $\Gamma_{c(i)}$ en fonction de la fréquence f sur l'intervalle [20 Hz, 100 Hz].

Le frémissement de surface est un phénomène que nous observons sur tout l'intervalle de fréquences explorées. L'accélération critique Γ_{c0} est autour de la valeur 0,7 et semble diminuer légèrement avec la fréquence. Il est important de rapporter ici le résultat d'une expérience menée à une fréquence $f=300$ Hz pour laquelle nous n'avons pas observé de frémissement de surface. Ceci est certainement à relier à la faible amplitude et à la courte période des vibrations.

La valeur de Γ_{c1} augmente avec la fréquence. Ce résultat confirme les observations de S. Aumaître [Aumaitre07] mais dans des gammes de fréquences différentes : il observe un accroissement de l'accélération de 0,08 quand la fréquence augmente de 3,3 à 5 Hz, alors que dans nos expériences, Γ_{c1} passe de 1,13 à 1,2 quand la fréquence passe de 50 à 100 Hz.

Remarquons que si on baisse la fréquence et que Γ_{c1} continue à diminuer, alors Γ_{c0} et Γ_{c1} se confondront probablement. L'équipe de Behringer [Tennakoon99 ; Metcalfe02], dans son étude de la transition vers l'écoulement parle de grains « sliders » (glisseurs) à la surface libre de l'empilement annonçant cette transition. C'est peut être là que se trouve l'origine du frémissement.

Ainsi, sur toute la gamme de fréquences [20 Hz, 100 Hz], nous observons une transition vers l'écoulement et l'apparition de deux rouleaux de convection contrarotatifs dans la partie supérieure de l'empilement pour des accélérations au-delà de Γ_{c1} . La forme de la surface reste plane pour les fréquences inférieures à 35 Hz et présente un léger dôme au-delà. Nous remarquons l'apparition de motifs différents entre ces deux intervalles de fréquence. En effet, pour les fréquences inférieures à 35 Hz, la surface présente une forme de ménisque provoqué par un mouvement de ballotement de la couche supérieure fluidisée. Au-delà de 35 Hz, on observe le motif chameau avec les deux dômes périphériques qui se rapprochent en augmentant l'accélération et finissent par se

rejoindre au milieu de la surface pour former le motif « dromadaire ». Pour les fréquences inférieures à 28 Hz, les deux bosses restent localisées sur les parois Nord et Sud et pour les fortes accélérations nous obtenons un empilement très agité à la surface sans obtenir un motif de type dromadaire. Entre 28 et 35 Hz, ce dernier motif est vaguement obtenu avec une très forte agitation des grains.

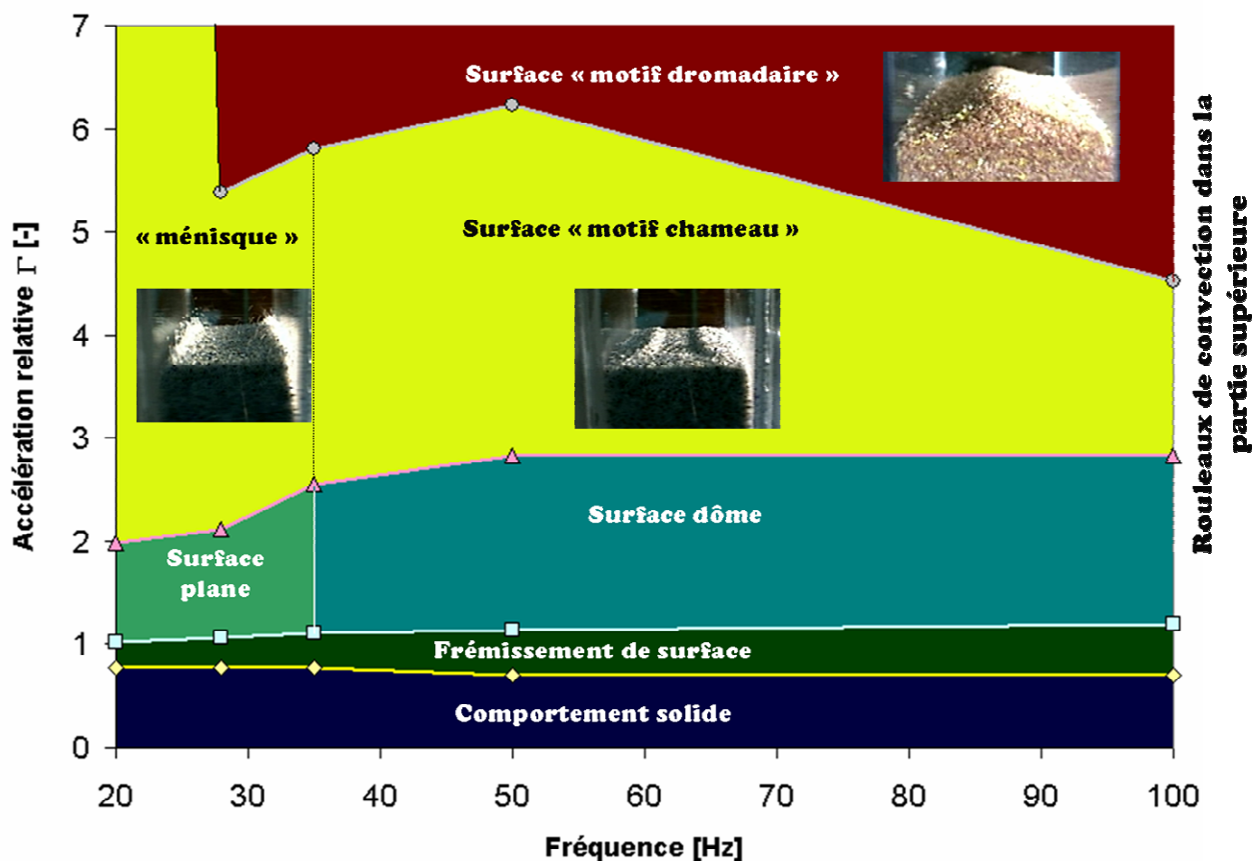


Figure III-12. Phénoménologie en fonction de la fréquence et de l'accélération. Losanges : frémissement de surface Γ_{c0} . Carrés : transition vers l'écoulement Γ_{c1} . Triangles : apparition de motifs à la surface libre Γ_{c2} . Cercles : motif dromadaire à la surface libre Γ_{c3} .

III.B.2. Régime transitoire

Lorsqu'un empilement granulaire initialement au repos est soumis à des vibrations horizontales avec une accélération Γ supérieure à Γ_{c0} , sa hauteur totale diminue plus ou moins rapidement selon le mode de montée en puissance du pot vibrant (boucle ouverte ou boucle fermée cf. II.B.2.a). Ensuite, elle se stabilise autour d'une certaine valeur. Ce constat montre l'existence d'un régime transitoire pendant lequel la hauteur de l'empilement évolue rapidement suivi d'un régime stationnaire avec des faibles fluctuations de la hauteur (figure III-13).

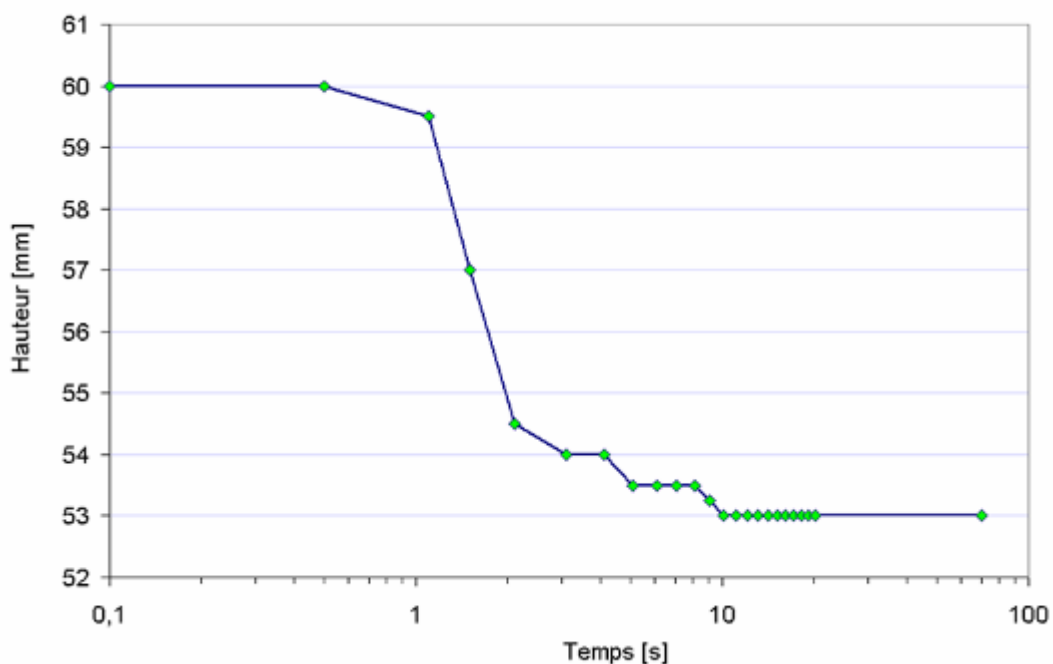


Figure III-13. Evolution en fonction du temps de la hauteur totale vue sur la face nord d'un empilement vibré à 50 Hz et $\Gamma=4,4$ avec un fonctionnement en boucle ouverte du pot vibrant. Les mesures sont réalisées à partir d'un enregistrement vidéo. Elles montrent que la hauteur diminue pendant les premières secondes puis se stabilise à partir de $t=10$ s.

Cette conclusion est corroborée par une expérience préliminaire de mesure de la vitesse des grains en fonction du temps. Le protocole expérimental suivi consiste à filmer le mouvement descendant des grains au milieu de la face nord dans une fenêtre d'observation située à une altitude de 40 mm. Ensuite, avec le logiciel imageJ, nous déterminons le déplacement des grains et en déduisons la vitesse. Cette analyse est semi-quantitative. La forme de la courbe $v(t)$ est importante à nos yeux car elle est

révélatrice du caractère transitoire du phénomène de densification et de l'obtention d'un régime stationnaire (figure III-14).

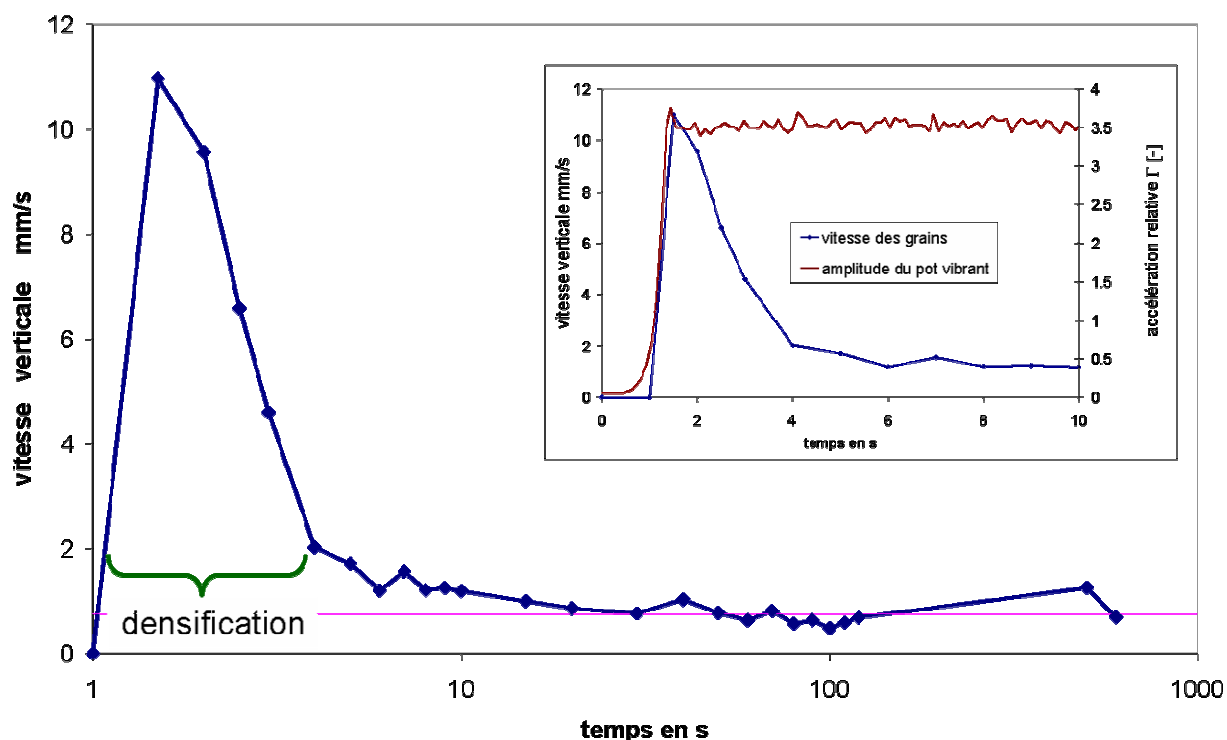


Figure III-14. Evolution en fonction du temps de la vitesse de chute des grains à la face nord pour un empilement vibré à 50 Hz et $\Gamma=3,5$. La fenêtre d'observation est située à une hauteur de 40 mm et la hauteur initiale de l'empilement est 57 mm. Les vitesses sont mesurées manuellement avec le logiciel ImageJ. L'insert montre l'évolution de l'amplitude du pot vibrant. Le pic de vitesse correspond à une densification de l'empilement. La vitesse se stabilise autour d'une valeur moyenne à partir de $t= 10s$.

Une dernière observation expérimentale est à signaler. Il s'agit d'une expérience de vibration d'un empilement constitué de strates de sable de différentes couleurs. La mise en vibration d'un tel empilement engendre un affaissement comme on a pu le remarquer précédemment. Cependant, pour certaines valeurs de l'accélération, cet affaissement n'est pas homogène sur toute la profondeur du lit. En effet, nous observons que les strates supérieures subissent un affaissement plus important que les strates inférieures (figure III-15). Ainsi, la densification n'est pas homogène dans l'empilement granulaire.

Il est important alors de mesurer l'affaissement de l'empilement en fonction de l'altitude z pendant le régime transitoire c'est-à-dire le taux local de densification. On définira l'affaissement comme la valeur absolue de la variation ΔH de la hauteur locale de l'empilement à la paroi Nord (Sud).

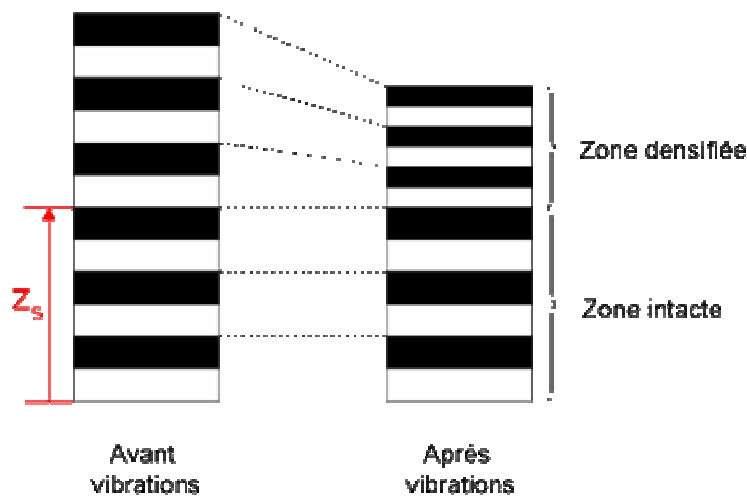


Figure III-15. Schéma d'une expérience de vibration d'un empilement constitué de strates de sable de différentes couleurs. Pour des faibles valeurs d'accélération (< 1.5), nous observons une zone supérieure densifiée et une zone inférieure quasi intacte ($z < z_s$). La zone « intacte » peut être modifiée en augmentant l'accélération.

III.B.2.a. Protocole expérimental

Le protocole expérimental consiste à filmer la face Nord de la boîte pendant le régime transitoire pour différentes accélérations. Ensuite, nous analysons ces films avec le logiciel MOTION2D afin de déterminer les cartographies d'affaissement en fonction de l'accélération. Pour mener cette tâche correctement, le logiciel doit impérativement reconnaître les grains d'une image à une autre. Il s'est avéré alors que la transition vers l'écoulement constitue le principal facteur limitant cette reconnaissance. D'une part, les mouvements convectifs font disparaître certains grains de la paroi Nord vers le cœur de l'empilement. D'autre part, les mouvements parasites des grains par rapport au flux de convection modifient fortement les motifs granulaires non seulement dans la zone fluidisée mais aussi en-deçà de cette zone (mouvements diffusifs) sur une épaisseur de quelques grains pour les faibles accélérations à des dizaines de grains pour les moyennes accélérations.

Dans la partie « description phénoménologique », nous avons vu qu'à partir d'une accélération relative $\Gamma \sim 4$ des mouvements de grains s'initient dans la zone inférieure en dessous de la zone convective. Il est donc impossible de déterminer l'affaissement pendant le régime transitoire de cette zone pour des accélérations supérieures à 4. Nous limiterons alors notre courante investigation à une gamme d'accélérations inférieures à cette valeur.

Nous allons opérer en boucle ouverte pour réduire le temps passé à des accélérations intermédiaires, et obtenir ainsi directement une courbe plus représentative de la réponse du système pour l'accélération choisie. Cette réponse est la somme de deux contributions : mouvements de tassement (ce qui nous intéresse ici) et mouvements d'écoulement (mouvements convectifs, individuels et diffusifs des grains). En effet, dès que l'accélération imposée par le pot dépasse l'accélération critique de la transition vers la fluidisation Γ_{c1} , les mouvements d'écoulement s'initient au sein de l'empilement provoquant la détérioration des motifs granulaires. Une expérience de vibrations en boucle ouverte permet à cette réponse d'être principalement composée de la première contribution.

Concernant l'analyse des images, nous avons choisi de travailler avec un haut niveau de pyramide $P=3$ et une large fenêtre d'analyse $W \sim 7 d_{43}$. Nous espérons ainsi que MOTION2D reconnaisse les motifs granulaires à grande échelle et faible résolution. Les résultats obtenus avec ces valeurs de paramètres sont meilleurs que ceux obtenus avec les valeurs habituelles : $P=2$ et $W \sim 3 d_{43}$.

Précisons les différents paramètres finalement utilisés pour ces expériences :

- Empilement : sable2, $L_x \times L_y \times H_i = 40 \times 80 \times 60 \text{ mm}^3$, compacité initiale $\sim 61 \%$.
- Fréquence des vibrations = 50 Hz.
- Asservissement : boucle ouverte.

III.B.2.b. Détermination du profil d'affaissement

La figure III-13 montre un exemple d'évolution de la hauteur totale d'un empilement. Nous observons que la diminution de cette hauteur se fait progressivement sur une durée de dix secondes, et que le plus grand de cet affaissement a lieu pendant les trois premières secondes. Nous faisons le choix de mesurer l'affaissement progressivement à des temps intermédiaires entre zéro et dix secondes. En effet, si on calculait directement la différence entre l'image correspondant à l'état initial et l'image correspondant à $t=10 \text{ s}$, le logiciel MOTION2D rencontrerait des grandes difficultés à reconnaître les motifs granulaires d'une image à l'autre et les résultats seraient aberrants. Nous calculons alors les affaissements entre les instants suivants : entre 0 et 2 secondes, 2 et 3 secondes, 4 et 6 secondes, 6 et 8 secondes et 8 et 10 secondes.

A partir d'une cartographie d'affaissement obtenue par MOTION2D, nous moyennons toutes les valeurs pour une altitude z donnée. Ainsi nous obtenons un profil d'affaissement en fonction de l'altitude z .

La figure III-16 montre les profils d'affaissements obtenus pour une accélération $\Gamma=2,1$. Nous observons que cet affaissement n'est pas homogène sur toute la hauteur de l'empilement. Ce qui est en accord avec nos observations visuelles. La partie grisée correspond à la zone convective observée sur la face nord (valeur obtenue à partir des résultats de la partie III.B.3). Nous avons un certain doute sur les valeurs d'affaissement calculées dans cette zone surtout pour des plus fortes accélérations. Nous ne prendrons pas alors en considération les résultats obtenus dans cette zone. D'autres accélérations ont été explorées. Les profils correspondant sont présentés en annexe (voir annexe.2).

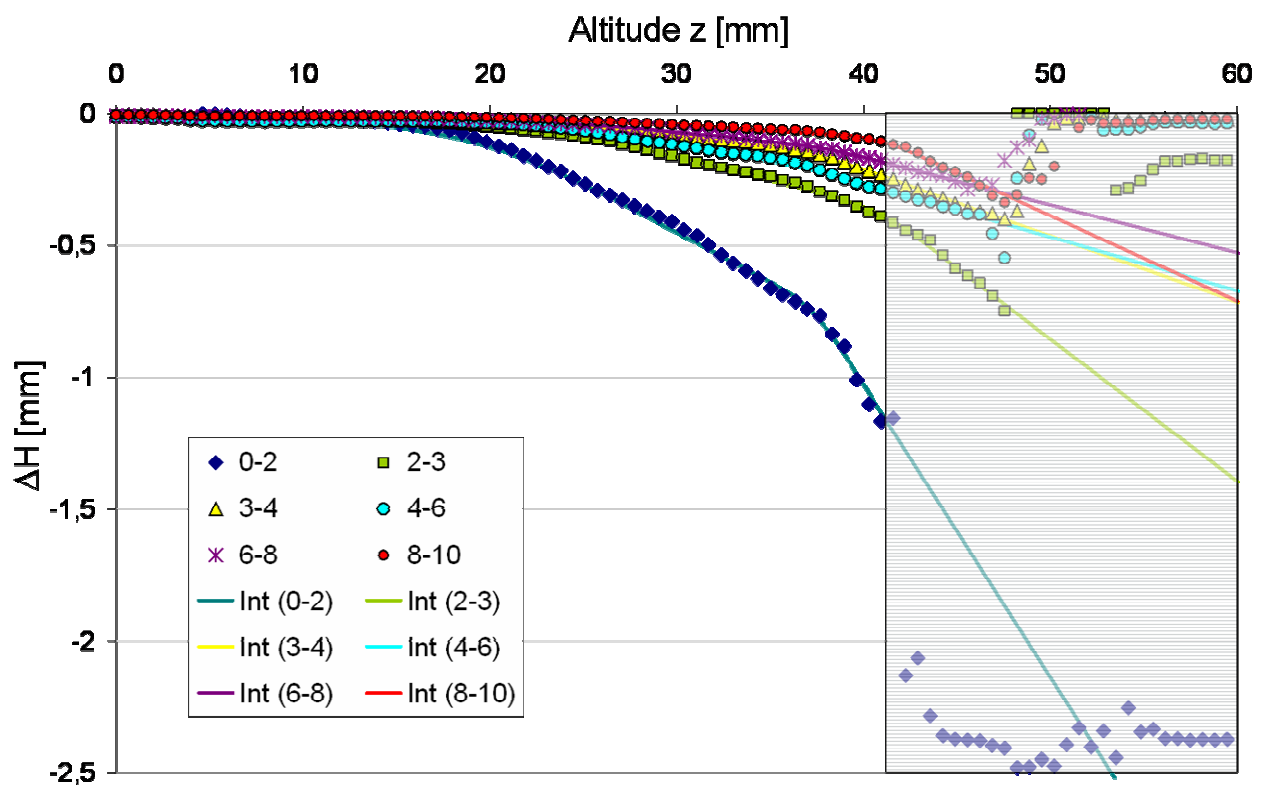


Figure III-16. Profils d'affaissements (non cumulés) en fonction de l'altitude z pour un empilement vibré à une fréquence de 50 Hz et une accélération $\Gamma=2,1$, de $H_i=60$ mm et $C_i\sim 61\%$. Les affaissements sont calculés entre les différents temps en secondes sur une durée cumulée de 10 secondes à partir de l'état initial. Les lignes continues sont des interpolations valables dans la zone inférieure solide.

Maintenant, suivons la trajectoire d'une couche fine de particules située à l'altitude z_0 à $t_0=0$:

$$\begin{aligned}
& - \text{à } t = t_1 : z_1 = z_0 + f_1(t_0, t_1, z_0) \\
& - \text{à } t = t_2 : z_2 = z_1 + f_2(t_1, t_2, z_1) \\
& \vdots \\
& - \text{à } t = t_n : z_n = z_{n-1} + f_n(t_{n-1}, t_n, z_{n-1})
\end{aligned}
\tag{III-1}$$

En interpolant les différentes fonctions f_i à partir des valeurs discrètes, nous obtenons une suite réursive permettant de calculer à l'instant t_n l'altitude z_n d'une particule se trouvant initialement à l'altitude z_0 . La différence entre z_n et z_0 est l'affaissement constaté à l'altitude z_0 au bout d'une durée t_n .

Comme nous l'avons remarqué précédemment, la majeure contribution à l'affaissement est obtenue entre zéro et trois secondes. Nous nous sommes limités alors à déterminer cette suite réursive pour t_n égal à 3 secondes. La forme des profils d'affaissements n'est pas modifiée par cette restriction. Nous présentons sur la figure III-17 les résultats d'affaissements obtenus au bout de cette durée pour différentes accélérations.

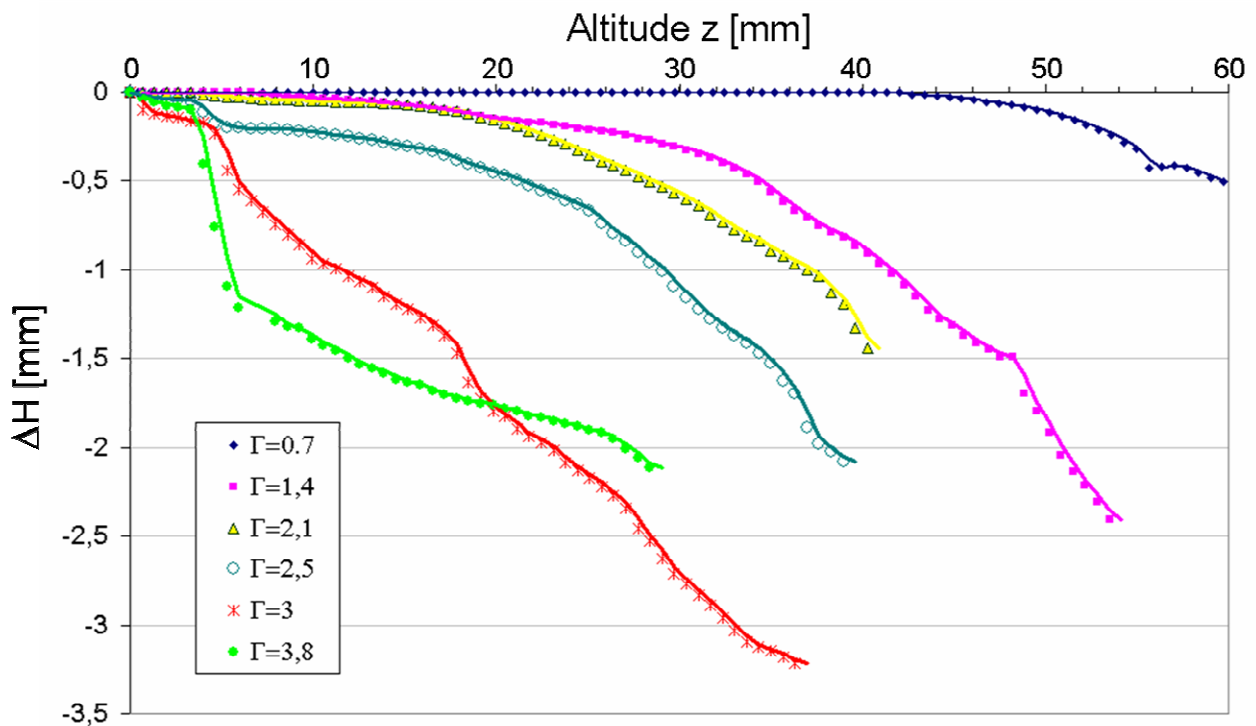


Figure III-17. Profils d'affaissements en fonction de l'altitude pour différents empilements vibrés à 50 Hz et à différentes accélérations relatives obtenus au bout de trois secondes de vibration.

Nous avons arrêté ces différents profils d'affaissements à la limite des zones fluidisées (valeurs obtenues à partir des résultats de la partie III.B.3) pour ne pas perturber la lecture du graphique. Plusieurs observations sont à noter :

- Pour une accélération donnée, la densification n'est pas homogène dans toute la partie solide inférieure. En effet, un affaissement homogène correspondrait à une droite sur la figure III-17. Au contraire, nous constatons différentes zones avec différentes pentes indiquant des taux de densification différents. Pour $\Gamma=0,7$, il existe une zone intacte qui garde la valeur de la compacité initiale de l'empilement. En augmentant l'accélération, l'épaisseur de cette zone se rétrécit rapidement et se réduit à quelques diamètres de grains. A titre d'exemple, elle passe de 42 mm, pour $\Gamma=0,7$, à moins de 7 mm pour $\Gamma=1,4$. En effet, Il existe un effet de bord du fond du récipient qui se manifeste par un comportement d'une couche de fond différent de celui du bloc pour toutes les accélérations explorées.
- Dans l'intervalle d'accélération relatives Γ entre 0,7 et 3, quand nous augmentons l'accélération, nous observons que l'empilement se densifie davantage. La densification a lieu de façon répartie sur la hauteur. En effet, nous n'observons pas un front de densification dépendant de Γ qui séparerait une zone intacte d'une zone densifiée. Il s'agit plutôt d'un gradient de densification qui s'intensifie en augmentant l'accélération.
- Nous observons une évolution de la concavité du profil d'affaissement en augmentant l'accélération. En effet, pour des accélérations relatives inférieures à 3, les profils ont leur concavité vers le bas. La densification est plus importante pour les couches supérieures. Pour $\Gamma=3$, nous obtenons un profil quasi-linéaire indiquant une densification homogène. Et pour $\Gamma=3,8$, le profil a sa concavité vers le haut et la densification devient plus importante dans les couches inférieures.

III.B.2.c. Détermination du profil de compacité

L'objectif dans ce paragraphe est d'interpréter les résultats d'affaissements présentés précédemment en termes de profil de compacité. Ceci permettrait de caractériser la zone inférieure de l'empilement à la fin du régime transitoire. Cette zone adopte un comportement solide pendant les vibrations pour la gamme d'accélérations que nous explorons.

Pour ce faire, nous supposons que les affaissements observés et mesurés à la paroi Nord sont représentatifs de ce qui se passe au cœur de l'empilement. Nous pouvons alors appliquer la conservation de la masse à une tranche de sable située entre l'altitude z_0 et z_0' à l'état initial et qui se trouve entre l'altitude z_n et z_n' à l'instant t_n (voir figure III-18). La masse du sable dans cette tranche peut s'écrire de deux manières :

$$\rho \times S \times C(z_0, z'_0) \times (z_0 - z'_0) = \rho \times S \times C(z_n, z'_n) \times (z_n - z'_n) \quad (\text{III} - 2)$$

où $C(z, z')$ est la compacité de la tranche située entre z et z' .

Nous supposons que l'empilement est homogène à l'état initial. Donc, $C(z_0, z'_0) = C_0$ avec C_0 la compacité moyenne de l'empilement initial.

A partir des différents profils d'affaissements, nous pouvons calculer $z_n = g(z_0; t_n)$ en utilisant l'équation III-1. Nous obtenons :

$$z_n = g(z_0, t_n) = z_0 + \sum_{i=0}^{n-1} f_i(t_i; t_{i+1}; z_i) \quad (\text{III} - 3)$$

L'équation III-2 devient alors :

$$C_0 \times dz = C(z_n) \times \left(\frac{\partial g}{\partial z} \right)_{z_0} \times dz \quad (\text{III} - 4)$$

Soit :

$$C(z_n) = \frac{C_0}{\left(\frac{\partial g}{\partial z} \right)_{z_0, t_n}} \quad (\text{III} - 5)$$

Pour pouvoir calculer correctement la fonction g et sa dérivée, nous devons trouver une forme analytique pour cette fonction. Pour ce faire, chaque profil d'affaissement est interpolé par une fonction affine par morceaux composée de trois segments et rendue dérivable aux points d'interconnexion. Cette opération est réalisée avec Matlab®. Sur la figure III-16, nous avons tracé en ligne continue le résultat de cette interpolation pour l'accélération $\Gamma=2,1$. Nous arrivons à bien représenter les résultats expérimentaux dans notre zone d'intérêt : la partie inférieure de l'empilement à comportement solide.

A partir de ces différentes interpolations, nous calculons les différents profils de compacité à différents instants t_i et pour six accélérations relatives comprises entre 0,7 et 3,8. Les résultats obtenus sont présentés dans la figure III-19. Les parties grisées correspondent aux zones fluidisées pour les différentes accélérations explorées et donc ne doivent pas être considérées.

Au cours de nos travaux, la compacité moyenne maximale que nous avons mesurée est légèrement supérieure à 68 %. Cependant, dans les travaux de thèse d'E. Rouèche, [Rouèche05], il a été rapporté des compacités égales à 72 % avec le même sable que nous utilisons. Il est possible alors que localement nous puissions obtenir des compacités supérieures à 68 %.

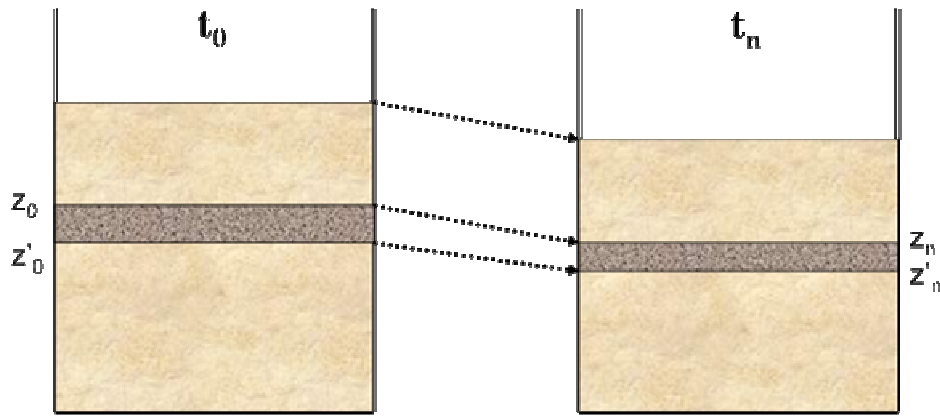


Figure III-18. Schéma de deux vues de l'empilement granulaire à travers la paroi Nord entre l'instant initial t_0 et l'instant t_n expliquant la conservation de la masse de la tranche grisée.

Pour $\Gamma=3,8$, les profils de compacité obtenus présentent un pic de densification au voisinage du fond de la boîte et une zone de dilatation, à partir de $t=4$ s, en-dessous de la couche fluidisée. Les valeurs de compacité obtenues pour ce pic de densification et l'existence de cette zone de dilatation apparaissent physiquement aberrantes. Nous obtenons des valeurs de compacité atteignant 95 % ce qui est au-delà de la limite physique acceptable pour un sable avec un diamètre moyen $d_{43}=517 \mu\text{m}$ et un span de 0,8. En effet, comme le montre la figure II-3, la distribution granulométrique du sable ne montre pas la présence de particules fines et très fines ($2 \mu\text{m} - 150 \mu\text{m}$). Quant à la dilatation, les profils d'affaissement ne présentent pas de valeurs positives et donc nous ne devrions pas observer ce phénomène. Ceci montre d'une part les limites de notre méthode d'interpolation, et d'autre part les limites de notre hypothèse que les mesures effectuées à la paroi sont représentatives de ce qui se passe au cœur de l'empilement.

Pour les valeurs d'accélération entre 0,7 et 3, les profils de compacité obtenus confirment nos observations du paragraphe précédent. Partant d'un profil initialement plat ($C_i=61 \%$), nous obtenons des profils de compacité présentant différentes zones avec différents gradients de compacité. En effet, nous observons des zones avec un gradient nul, d'autres avec un faible gradient et fort gradient. Nous observons également qu'à une altitude z donnée, la compacité locale augmente avec l'accélération jusqu'à ce que la fluidisation atteigne ce point.

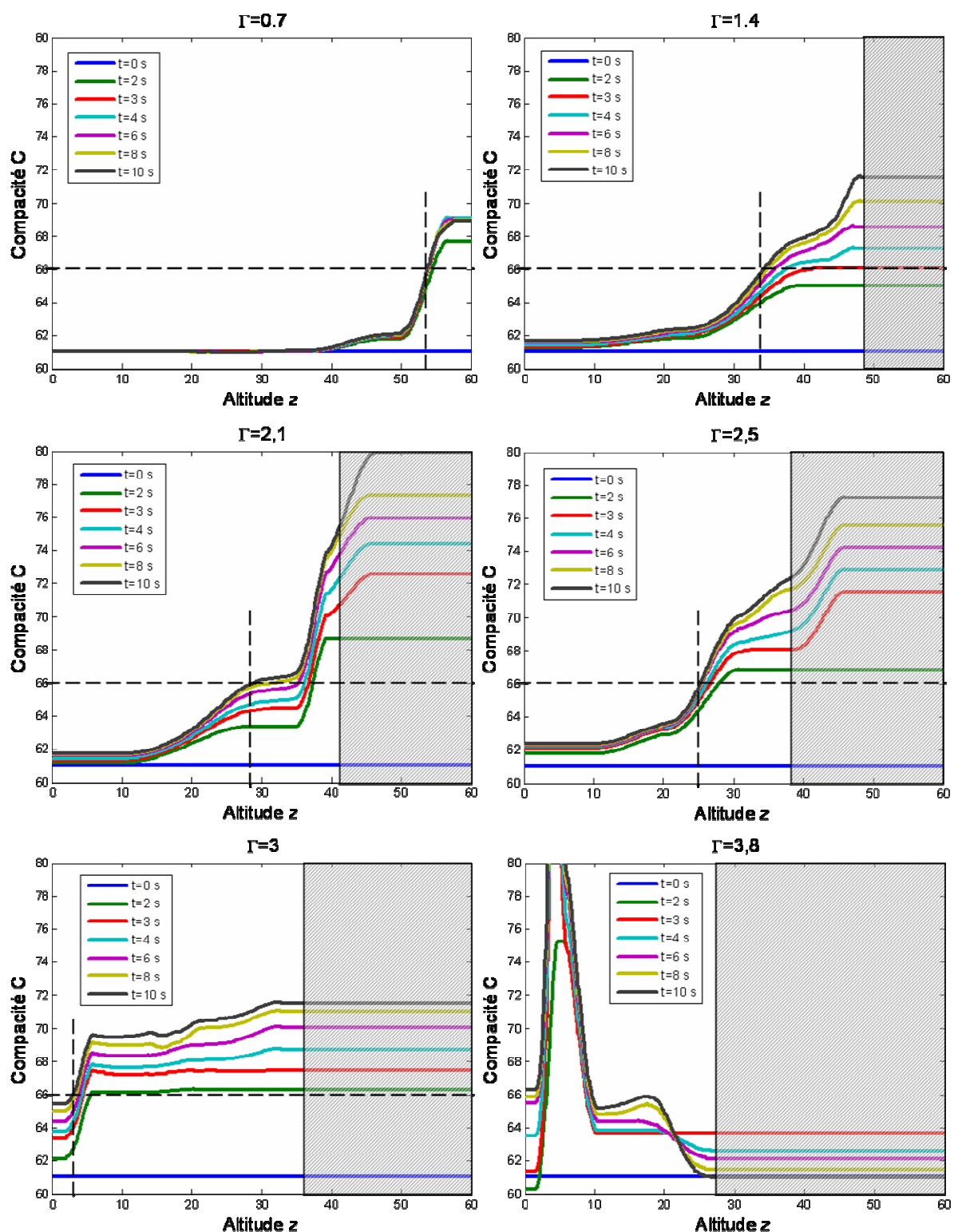


Figure III-19. Evolution temporelle du profil vertical de compacité, pour différentes accélérations, durant le régime transitoire pour un empilement de hauteur initiale égale à 60 mm et vibré à une fréquence de 50 Hz. Les parties grisées correspondent à la zone supérieure convective et donc les valeurs y sont incertaines.

Il n'est pas très exact de parler d'une propagation d'un front de densification vers le fond de l'empilement compte-tenu du caractère progressif de ce phénomène. Cependant, en

augmentant l'accélération, nous observons l'extension d'une zone très dense qui se déplace vers le fond. Afin de visualiser ce propos, nous avons cherché pour chaque accélération l'altitude au dessus de laquelle nous obtenons une compacité supérieure à 66 %. Les résultats obtenus sont représentés sur la figure III-20. Nous observons que cette frontière se déplace vers le fond du récipient comme le montrent les flèches sur la courbe.

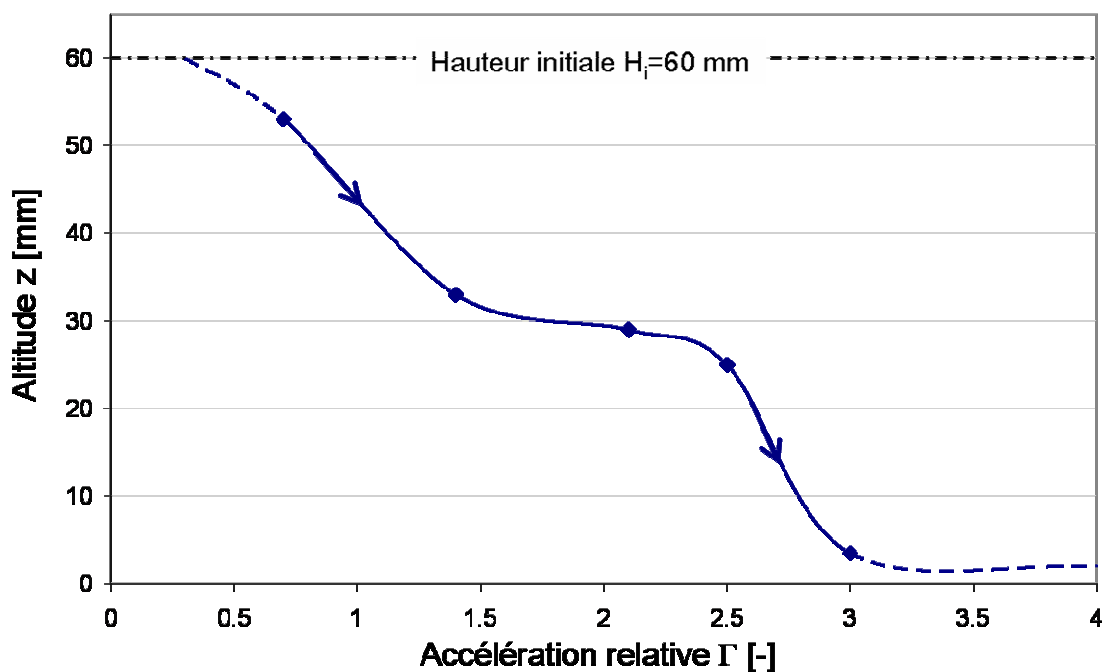


Figure III-20. Évolution en fonction de l'accélération de l'altitude au-dessus de laquelle la compacité est supérieure à 66 %.

En conclusion, quand un empilement initialement homogène en compacité est soumis à des vibrations horizontales, il subit pendant le régime transitoire une densification non homogène en altitude. Pour une altitude z donnée, le taux de densification augmente avec l'accélération tant que la fluidisation n'a pas atteint cette altitude. Pour des accélérations augmentant de 0,7 à 3 g, il existe un front de densification qui se déplace avec l'accélération vers le fond du récipient.

III.B.3. Régime stationnaire

Nous avons décrit dans l'étude phénoménologique le comportement d'un empilement granulaire soumis à des vibrations horizontales. Dans cette partie, nous allons quantifier deux aspects de ce comportement en fonction de l'accélération. En premier lieu, il s'agit de quantifier la fluidisation de l'empilement. En effet, nous avons observé l'apparition et l'expansion de deux rouleaux de convection contrarotatifs dans la partie supérieure de l'empilement. En deuxième lieu, nous avons constaté que la hauteur totale de l'empilement et que la forme de la surface libre évoluent en fonction de l'accélération. Ce qui implique un changement du volume apparent de l'empilement avec Γ , et une évolution en fonction de Γ de la compacité globale de l'empilement pendant les vibrations.

Pour étudier cette influence, nous nous placerons dans cette partie en régime stationnaire, pour mener ces études quantitatives. Sur la figure III-13, nous avons observé l'évolution au cours du temps de la hauteur totale de l'empilement. Nous constatons que cette hauteur se stabilise après une durée Δt . En se plaçant alors à des temps supérieurs à Δt , nous pouvons affirmer que *la hauteur totale de l'empilement a atteint une valeur stationnaire*. La figure III-14 nous permet de faire cette même conclusion concernant *les vitesses des grains* sur la face Nord. Ainsi avec deux critères différents, nous avons pu établir l'existence d'un régime stationnaire dans nos expériences de vibrations.

Maintenant, il reste à déterminer la durée Δt à attendre pour atteindre le régime stationnaire. Pour traiter cette question, commençons par rappeler un nombre de résultats et d'observations :

- Cette durée est égale à dix secondes pour les deux expériences rapportées dans ces deux figures. Il s'agit d'expériences réalisées en boucle ouverte avec une fréquence de 50 Hz et des accélérations supérieures à Γ_{c1} . Dans le paragraphe II-B-2-a, nous avons vu que la durée nécessaire pour atteindre l'accélération de consigne en boucle ouverte est égale à deux secondes. Donc, le milieu granulaire met entre huit et dix secondes dans ces expériences pour atteindre un régime stationnaire une fois que l'accélération de consigne est atteinte.
- Le paragraphe II-B-2-a a montré qu'en boucle fermée la durée nécessaire pour obtenir l'accélération de consigne varie de quelques secondes à quelques

dizaines de secondes. Cette durée augmente quand le taux de compression (dB/s) et la fréquence diminuent.

- L'étude phénoménologique, en particulier le paragraphe III-B-1-a, montre que pour des accélérations inférieures à Γ_{c1} , les mouvements observés à la surface libre peuvent disparaître au bout de quelques dizaines de secondes.

Compte tenu de ces remarques, la durée Δt nécessaire pour obtenir un régime stationnaire dépend des conditions opératoires (fréquence, accélération, conditions de régulation). Nous avons choisi alors une durée de trois minutes qui apparaît suffisante pour s'assurer de l'obtention du régime stationnaire pour les différentes conditions d'expériences éventuelles.

III.B.3.a. Etude de l'état fluidisé (stationnaire)

III.B.3.a.1. Définition de l'épaisseur fluidisée

Un empilement est dans un état fluidisé lorsque le matériau granulaire dans une partie ou dans la totalité de cet empilement se comporte comme un fluide. Dans nos expériences, ce comportement est associé essentiellement aux mouvements convectifs constituant les deux rouleaux de convection contrarotatifs. Nous appellerons épaisseur fluidisée la hauteur des rouleaux de convection et nous utiliserons ce paramètre pour caractériser l'état fluidisé de l'empilement. Pour les accélérations inférieures à l'accélération critique Γ_{c1} de fluidisation, ce paramètre est nul par définition.

Nous avons recensé dans la littérature deux méthodes de mesure de cette épaisseur. Les deux sont réalisées sur les faces Est-Ouest. L'équipe de Behringer [Tennakoon99 ; Metcalfe02] a mesuré manuellement cette épaisseur au milieu de la face Ouest. La deuxième méthode, utilisée par Medved *et al* [Medved00], consiste en la détermination, sur un bord de la face Ouest, du profil vertical de la vitesse des grains. Ensuite, le gradient de la composante sur l'axe des x de ce profil fournit une mesure caractéristique du mouvement convectif.

Pour notre part, nous trouvons qu'il est plus facile et plus immédiat de mesurer l'épaisseur fluidisée sur les faces Nord-Sud (figure III-21). En effet, la frontière entre la zone basse ayant un comportement solide et la zone haute avec un comportement fluide est plus visible sur la face Nord que sur la face Ouest. Il s'agit de la ligne la plus basse où les grains disparaissent de la paroi Nord pour pénétrer au cœur de l'empilement. Pour déterminer cette frontière avec précision, nous avons mesuré le champ de vitesses des

grains $v(z,y)$ sur la face Nord dans une zone d'analyse centrale loin de l'influence des bords. La composante verticale de la vitesse v_z nous permet de distinguer des zones ayant des comportements différents.

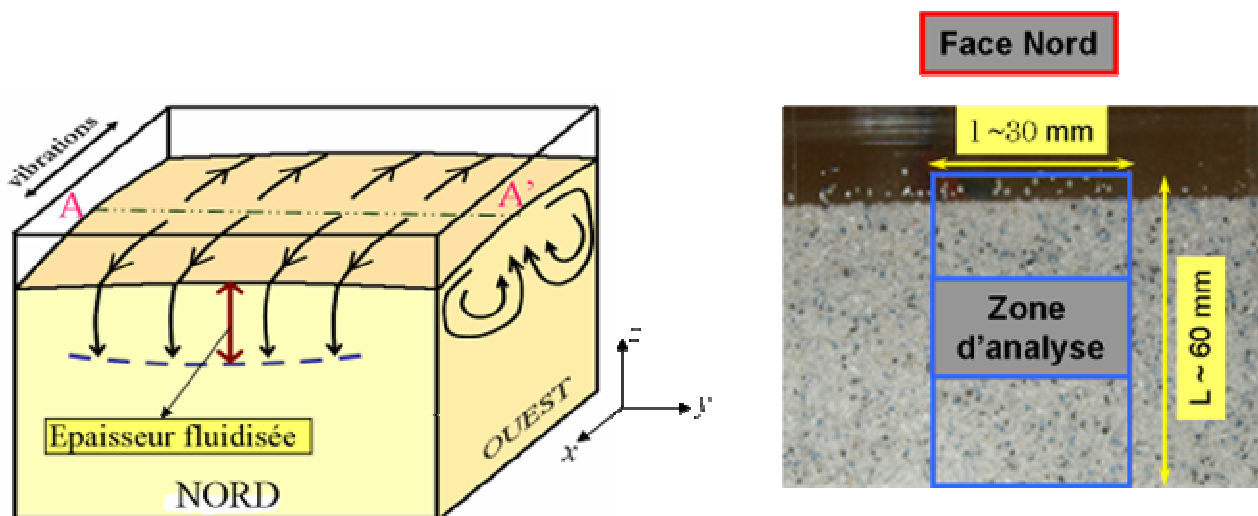


Figure III-21. A gauche : définition de l'épaisseur fluidisée à partir de la face Nord. A droite : zone d'analyse sur la face Nord.

III.B.3.a.2. Méthode de mesure de l'épaisseur fluidisée

i). Conditions expérimentales

Un empilement de dimensions $L_x \times L_y \times H_i = 40 \times 80 \times 60 \text{ mm}^3$ et de compacité initiale C_i est soumis à des vibrations horizontales et sinusoïdales de fréquence fixée et d'accélération croissante par paliers d'environ 0,3 g de zéro à 6,3 g. A chaque palier, nous attendons trois minutes pour s'assurer de l'établissement du régime stationnaire. Ensuite, nous faisons un film de la face Nord avec la caméra CCD avec une fréquence d'acquisition d'une image par période de vibrations (20 ms pour $f=50 \text{ Hz}$).

ii). Méthode de calcul du profil de vitesse

Pour déterminer le champ des vitesses des grains sur la face Nord, nous analysons avec le logiciel MOTION2D (*cf.* II.D) les séries d'images acquises par la caméra CCD.

Pour chaque accélération, un nombre I de paires d'images séparées d'une durée τ_N sont analysées par MOTION2D en utilisant un niveau de pyramide $P=2$ et une fenêtre d'analyse $W \sim 3d_{43}$. Chaque paire d'images analysée nous fournit une cartographie des déplacements $\delta(y,z)$ avec une résolution égale à un diamètre moyen des grains. Ensuite,

pour chaque cartographie, nous moyennons les composantes verticales de ces déplacements à z constant sur toutes les valeurs de y pour obtenir un déplacement vertical en fonction de z uniquement $\Delta(z) = \text{Moyenne}(\delta_z(y,z), y)$. Enfin, nous calculons la moyenne des $\Delta(z)$ sur les différentes cartographies. La vitesse est simplement obtenue par la division de $\tilde{\Delta}(z)$ par τ_N (voir figure III-22).

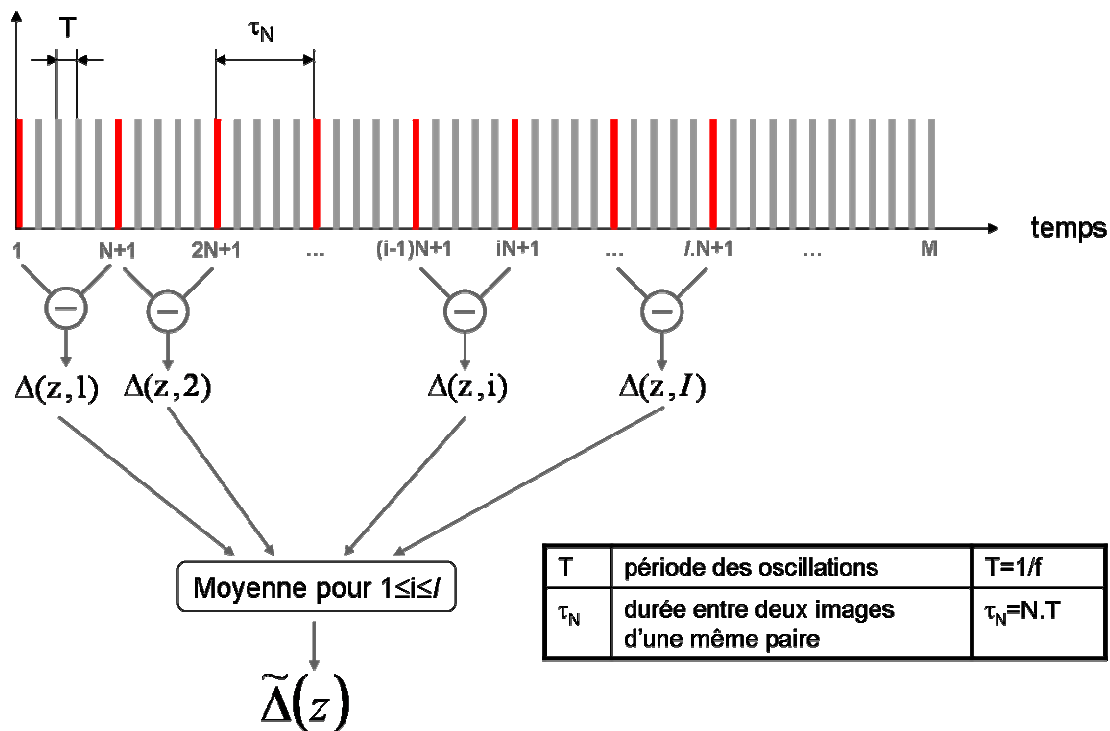


Figure III-22. Protocole d'analyse des images pour le calcul du profil de vitesses. La vitesse est égale à $\tilde{\Delta}(z)$ divisé par τ_N .

Le choix des deux paramètres I et τ_N est très important pour aboutir à des résultats pertinents. Nous faisons le choix de travailler avec $N=1$ et $I=30$. Ce choix tient compte des contraintes suivantes :

- Pour les fortes accélérations : les deux images constituant la paire d'images à analyser doivent être suffisamment proches dans le temps pour que les déplacements des grains soient correctement détectés par le logiciel MOTION2D. La durée τ_N doit être suffisamment courte pour qu'on puisse retrouver les mêmes grains sur les deux images à comparer.
- Pour les faibles accélérations : une faible valeur de τ_N amplifie le niveau du bruit de mesure par rapport au signal efficace car nous sommes dans le domaine des faibles déplacements. Pour réduire ce phénomène, il faut augmenter le nombre I

de paires d'images analysées. Grâce à l'automatisation de l'outil MOTION2D, nous avons pu analyser trente images pour chaque accélération.

Notons tout de même que pour analyser trente paires d'images, il nous faut une journée de calcul. Pour réduire ce temps de calcul, une analyse avec les valeurs suivantes $N=10$ et $I=10$ est envisageable pour des accélérations inférieures à 3 g. Les profils de vitesse seront légèrement aplatis sans que cela entraîne une modification notable des résultats.

Par convention, on associe au mouvement descendant des grains des valeurs de vitesse positives ($v(z) = -\frac{\tilde{\Delta}(z)}{\tau_N}$: vitesse de chute des grains)

iii). Exploitation du profil de vitesse : calcul de l'épaisseur fluidisée et de l'épaisseur perturbée

Dans l'étude phénoménologique, nous avons observé que le comportement des grains sur la face Nord variait en fonction de l'accélération. Dans ce paragraphe, pour chaque type de comportement, nous lui associerons un type de profil de vitesse. Pour définir l'épaisseur fluidisée à partir du profil de vitesse, nous faisons le choix d'introduire une vitesse critique de fluidisation v_c . Les zones avec des vitesses supérieures au seuil sont dites fluidisées ; les zones avec des vitesses inférieures seront considérées comme non fluidisées. Nous avons fait ce choix d'introduire une vitesse critique au lieu de passer par le calcul du gradient de vitesse pour deux raisons essentielles. La première c'est que ce critère est universel et ne dépend pas des conditions opératoires. La deuxième c'est que pour calculer proprement le gradient, il faudrait trouver une fonction analytique pour le profil de vitesse, tâche qui est très difficile.

La figure III-23 montre les types de profil de vitesse obtenu pour les différents types de comportement sur la face Nord ($L_x=40$ mm ; $L_y=80$ mm ; $H_f \sim 60$ mm ; $f=50$ Hz) :

- $\Gamma_{c1} < \Gamma < 4$: nous pouvons distinguer deux zones F et S : zone F du large pic correspondant aux rouleaux de convection et une zone S correspondant à la partie inférieure de l'empilement ayant un comportement solide ($v \approx 0$).
- $4 < \Gamma < 6$: en plus du large pic correspondant aux rouleaux convectifs, et la zone S correspondant à la zone solide inférieure, nous observons une zone intermédiaire P avec des faibles vitesses. L'épaisseur fluidisée E_F correspond toujours à l'épaisseur des rouleaux. Elle est calculée en considérant uniquement la largeur du pic. Nous définissons un nouveau paramètre E_p qui est l'épaisseur

perturbée pour rendre compte des mouvements lents des grains dans la partie inférieure de l'empilement. En partant de l'altitude zéro, E_p correspond à la distance entre le premier point d'intersection du profil de vitesse avec la vitesse critique (figure III-23.b), et le haut de l'empilement.

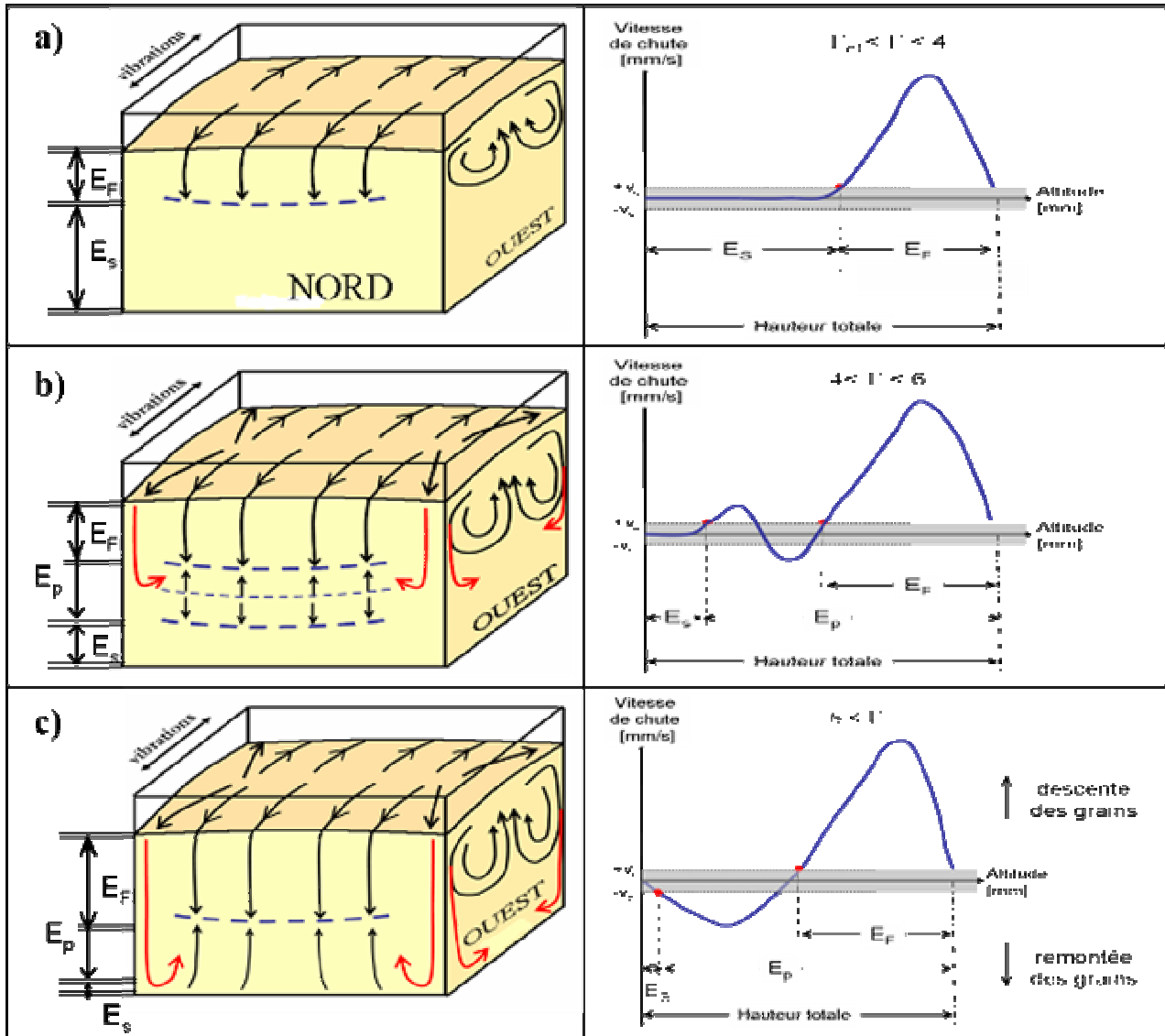


Figure III-23. Schémas des mouvements granulaires associés aux profils de vitesse de chute $v(z)$ correspondants. E_F : épaisseur fluidisée, E_S : épaisseur solide, E_p : épaisseur perturbée.

a) pour $\Gamma_{c1} < \Gamma < 4$. b) pour $4 < \Gamma < 6$. c) pour $\Gamma > 6$

- $\Gamma > 6$: nous observons une zone supérieure avec des fortes vitesses, correspondant à l'épaisseur fluidisée, et une zone inférieure avec des faibles vitesses. L'épaisseur perturbée correspond quasiment à toute la hauteur de l'empilement (figure III-23.c).

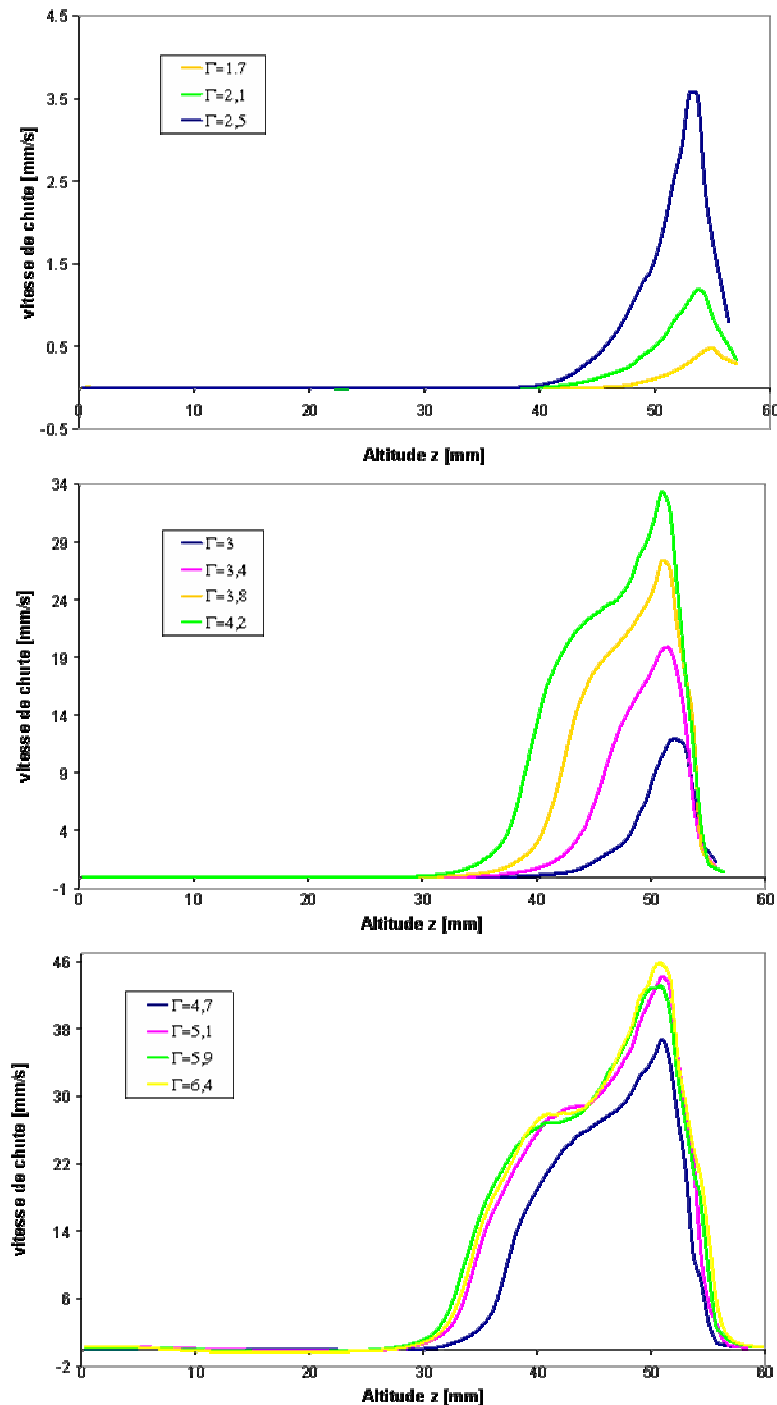


Figure III-24. Différents profils de vitesse pour différentes accélérations obtenus pour $f=50$ Hz, $H_i=60,5$ mm, $L_x=40$ mm, $L_y=80$ mm et $C_i=60,5\%$.

La figure III-24 montre à titre d'exemple les profils de vitesse obtenus pour un empilement granulaire de hauteur initiale $H_i \sim 60$ mm et $C_i \sim 60,5\%$. Nous pouvons faire plusieurs remarques sur ces profils.

Premièrement, nous allons commenter la chute de la vitesse à proximité de la surface libre de l'empilement. L'explication de ce phénomène est liée aux mouvements des grains sur la surface libre de l'empilement. En effet, la surface après la transition vers la

fluidisation adopte une forme concave et elle peut être vue (en projection) à partir de la face Nord. Les mouvements des grains y sont principalement horizontaux ce qui expliquerait la baisse de la composante verticale de la vitesse. De plus, les grains, dévalant la surface libre, viennent heurter la paroi Nord et voient alors leur mouvement stoppé avant d'entreprendre un mouvement descendant.

Deuxièmement, nous pouvons observer l'augmentation des vitesses de chute des grains et l'élargissement du pic avec l'accélération relative Γ . Il semble que nous atteignons une saturation à partir de $\Gamma=5,1$. Nous n'avons pas d'explication à cette tendance à ce niveau de l'étude. Enfin, nous constatons une évolution de la forme du pic avec l'apparition d'un épaulement à partir de $\Gamma=3,4$. Nous pensons que ce phénomène est en relation avec l'existence des deux dômes périphériques à la surface libre. En effet, dans l'étude phénoménologique, nous avons évoqué le fait que l'apparition de ces dômes s'accompagnait d'une discontinuité du gradient de vitesse dans la zone fluidisée. Nous observons une augmentation importante de la vitesse en haut de cette zone que nous pouvons associer à l'apparition d'un nouveau vortex (ou vortex secondaire).

iv). Estimation des incertitudes sur la vitesse et l'épaisseur fluidisée

Pour notre méthode de détermination de l'épaisseur fluidisée, nous recensons dans ce paragraphe les différentes sources d'erreurs éventuelles et nous essayons d'estimer ces erreurs, liées à ces sources.

- Une dérive lente des caractéristiques du système peut être provoquée par le vieillissement de la boîte et/ou du matériau granulaire.
- Le bruit lié à la chaîne d'acquisition des images (caméra CCD, éclairage, ...) entraîne une erreur sur la vitesse calculée par MOTION2D (figure III-25-a).
- La nature chaotique des mouvements granulaires aux temps courts entraîne une variabilité des profils de vitesses (figure III-25-b).

Concernant le premier point, nous n'avons pas observé de telle dérive dans les temps impartis à nos expériences de vibrations. Nous ne prendrons donc pas en compte aucune incertitude liée à cette source d'erreur.

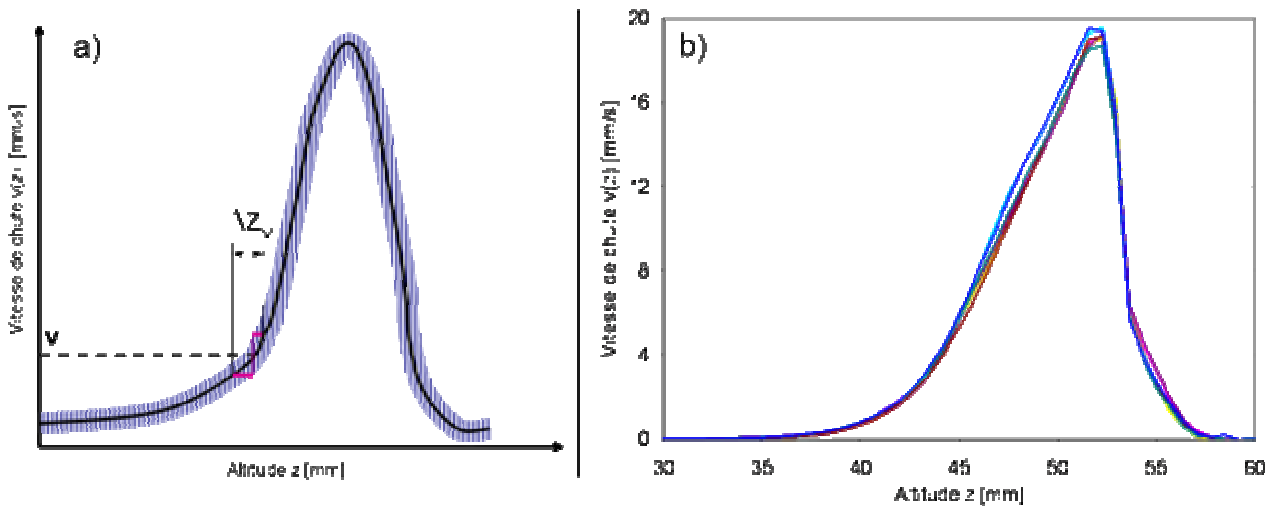


Figure III-25. a) Profil de vitesse montrant la manifestation des fluctuations Δz_v pour une vitesse donnée calculée par MOTION2D, dues à la chaîne d'acquisition des images b) Différents profils de vitesse obtenus pour les mêmes conditions expérimentales à des temps successifs montrant ainsi le caractère chaotique des mouvements granulaires.

Pour estimer l'erreur sur la vitesse provenant des défauts de la chaîne d'acquisition des images, nous avons besoin de nous placer dans des conditions de vitesse parfaitement connues et où les fluctuations liées au caractère chaotique du milieu granulaire soient inexistantes. Seul le dispositif au repos satisfait une telle condition. La vitesse des grains est alors nulle. A partir d'un film de la face Nord à une accélération nulle, nous analysons les images avec MOTION2D. Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau ci-dessous. Ils montrent que pour un dispositif immobile, la chaîne d'acquisition des images engendre un déplacement fictif qui augmente avec la durée séparant les deux images analysées mais qui reste très faible. Pour déterminer l'erreur sur la vitesse, il faut diviser ce déplacement par la durée τ_N et par le facteur d'échelle. Cette erreur dépend ainsi de la fréquence de vibrations, du nombre de périodes séparant deux images d'une même paire et du facteur d'échelle.

Pour la suite du calcul des incertitudes, nous considérons que l'erreur sur la vitesse ε_v est égale à $0,015 \text{ mm.s}^{-1}$.

Pour déterminer l'incertitude ΔE_F sur la mesure de l'épaisseur fluidisée due à l'erreur sur la vitesse et au caractère chaotique des mouvements granulaires, il faut additionner ces sources d'erreur comme le suggère la figure III-26. Pour rendre compte du caractère chaotique des mouvements granulaires, nous construisons les profils de vitesse correspondants à plusieurs séries de paires d'images issues d'une même expérience. Chaque profil de vitesse présente une fluctuation qui correspond à deux fois l'erreur sur

la vitesse. Pour une vitesse critique de fluidisation v_c donnée, nous obtenons une valeur maximale et une valeur minimale pour l'épaisseur fluidisée. ΔE_F est estimée alors à la moitié de l'intervalle qui sépare ces deux extrema.

Nombre de paires d'images I	10	30
Nombre de périodes séparant deux images N	10	1
Déplacement maximum [pixel]	0,007	0,003
Erreur maximale sur la vitesse ε_v [mm.s ⁻¹]	0,0035	0,015

Tableau III-2. Résultats de l'analyse de l'enregistrement du dispositif au repos par MOTION2D conduisant au calcul d'erreur sur la vitesse pour une fréquence de 50 Hz et une échelle de 10 :1.

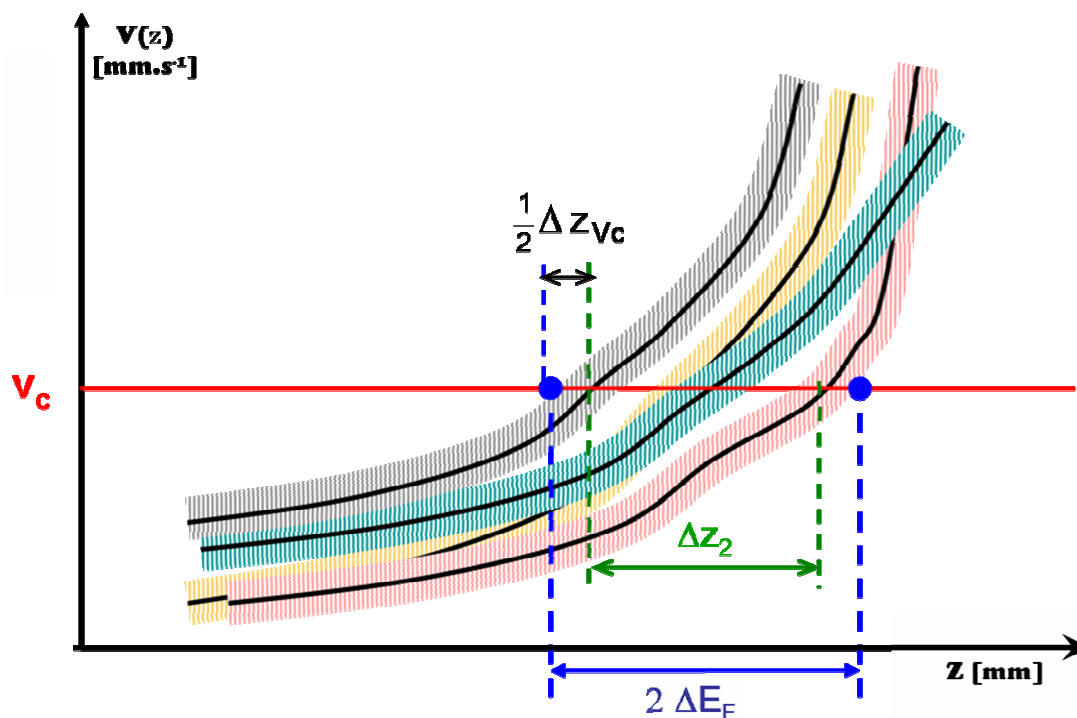


Figure III-26. L'incertitude ΔE_F sur la détermination de l'épaisseur fluidisée due à l'incertitude Δz_{vc} sur la position à une vitesse v_c donnée (fluctuation sur une courbe) et au caractère chaotique des mouvements granulaires Δz_2 (différentes courbes) : $2\Delta E_F = \Delta z_{vc} + \Delta z_2$.

Le tableau III-3 regroupe les résultats d'une telle analyse réalisée pour une fréquence de vibration de 50 Hz et une accélération relative $\Gamma=3,4$ pour deux valeurs de vitesse critiques v_c .

		E_F (min) [mm]	E_F (max) [mm]	E_F (moy) [mm]	ΔE_F [mm]
V_c [mm.s ⁻¹]	0,06	20,4	24,1	22,2	1,85
	0,18	18,2	20	19,1	0,9

Tableau III-3. Détermination de l'incertitude ΔE_F sur le calcul de l'épaisseur fluidisée pour une expérience avec une fréquence de 50 Hz et $\Gamma=3,4$ pour deux valeurs de vitesse critique v_c .

Nous allons considérer que les valeurs d'incertitude calculées ici dans des cas particuliers peuvent être généralisées aux différentes conditions expérimentales explorées dans la suite de l'étude.

v). Sensibilité de E_F à la vitesse critique de fluidisation v_c

Dans ce qui précède, nous venons de voir que, pour définir l'épaisseur fluidisée, nous avons besoin d'introduire une vitesse critique de fluidisation v_c . Le choix de la valeur critique v_c est arbitraire mais cette vitesse doit être tout de même supérieure à l'erreur de vitesse $\varepsilon_v=0,015$ mm.s⁻¹. Nous allons examiner dans ce paragraphe l'influence de v_c sur l'épaisseur fluidisée à partir d'une expérience de vibrations réalisée sur un empilement granulaire de hauteur initiale $H_i \sim 60$ mm et de compacité initiale $C_i \sim 60,5\%$ à une fréquence de 50 Hz.

Nous commençons par nous intéresser aux profils de vitesse obtenus pour des accélérations proches de la transition vers la fluidisation Γ_{c1} . La figure III-27 montre de tels profils. Nous pouvons distinguer clairement pour $\Gamma \geq 1,35$ un signal supérieur au niveau de bruit ε_v dans une partie supérieure de l'empilement traduisant l'apparition du régime convectif. Pour des accélérations plus faibles, le signal se confond avec le bruit de mesure même si on arrive à apercevoir un pic de vitesse au sommet de l'empilement pour $\Gamma = 1,15$. Il apparaît alors que la transition vers la fluidisation déterminée par cette méthode va dépendre de la vitesse critique choisie. Nous pouvons noter également les très faibles valeurs de vitesses mesurées au voisinage de cette transition.

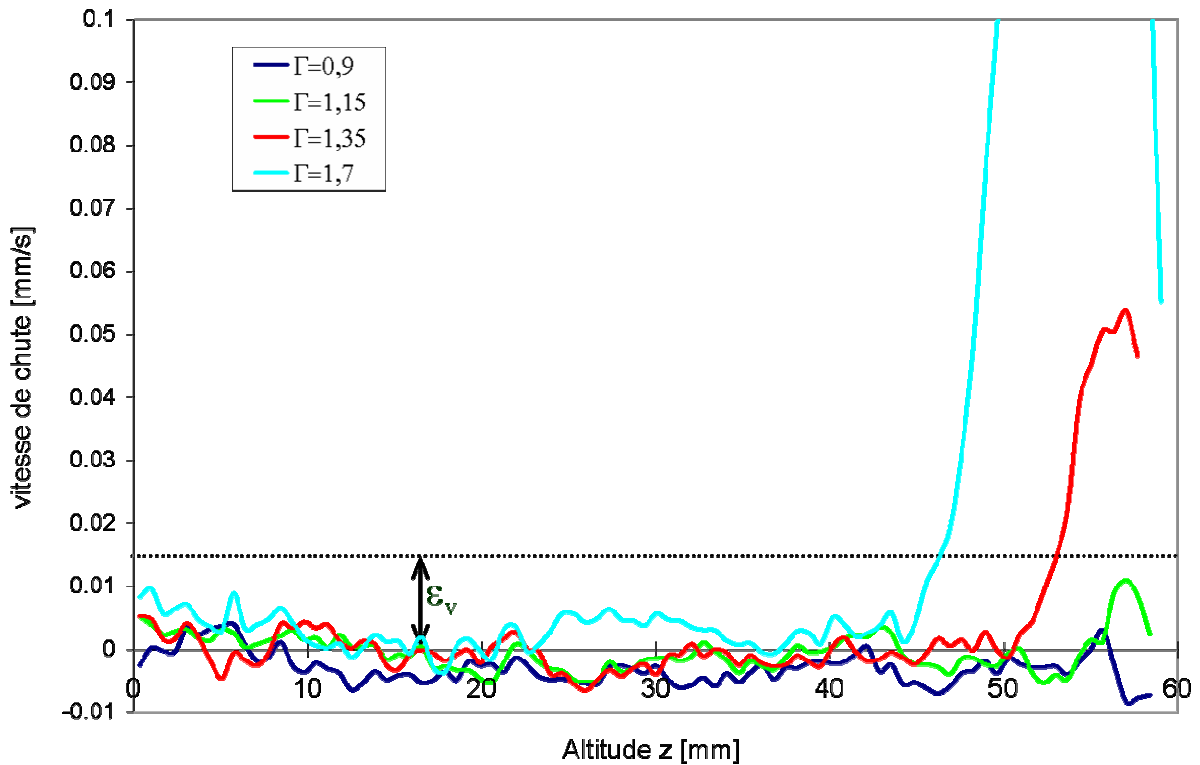


Figure III-27. Profils de vitesse de chute des grains à la face Nord obtenus pour une expérience de vibration à 50 Hz sur un empilement granulaire de $H_1 \sim 60$ mm et $C_1 \sim 60,5$ %. Profils obtenus suite à une analyse par MOTION2D avec $N=1$ et $I=30$.

Intéressons-nous maintenant à l'influence de l'accélération relative Γ sur l'épaisseur fluidisée E_F . Le graphique sur la figure III-25 montre l'évolution de E_F en fonction de Γ pour trois valeurs de vitesse critique. Comme on vient de l'expliquer précédemment nous observons que le seuil de fluidisation dépend de la valeur de la vitesse critique. Les courbes $E_F=f(\Gamma)$ sont ordonnées par ordre décroissant selon la vitesse critique. Ce résultat est également logique compte-tenu de la méthode de détermination de l'épaisseur fluidisée. La droite $v=v_c$ avec une valeur plus faible de la vitesse critique interceptera plus bas le profil de vitesse en partant du fond, ce qui donnera une valeur plus grande pour l'épaisseur fluidisée. Cette influence est beaucoup moins importante pour les fortes valeurs de Γ ($\Gamma > 5$) : les différentes courbes $E_F=f(\Gamma)$ se rapprochent alors fortement.

Notons que la forme de la courbe $E_F=f(\Gamma)$ est indépendante de la valeur de la vitesse critique. En effet, nous pouvons distinguer pour les différentes valeurs de la vitesse critique trois zones de comportements différents :

- Zone 1 : $E_F = 0$ avant la transition vers la fluidisation.

- Zone 2 : E_F augmente avec Γ : apparition et expansion des rouleaux de convection.
- Zone 3 : E_F semble tendre vers un palier. Notons que la preuve d'existence de ce palier ne peut être assurée car le pot vibrant arrivait en limite de capacité.

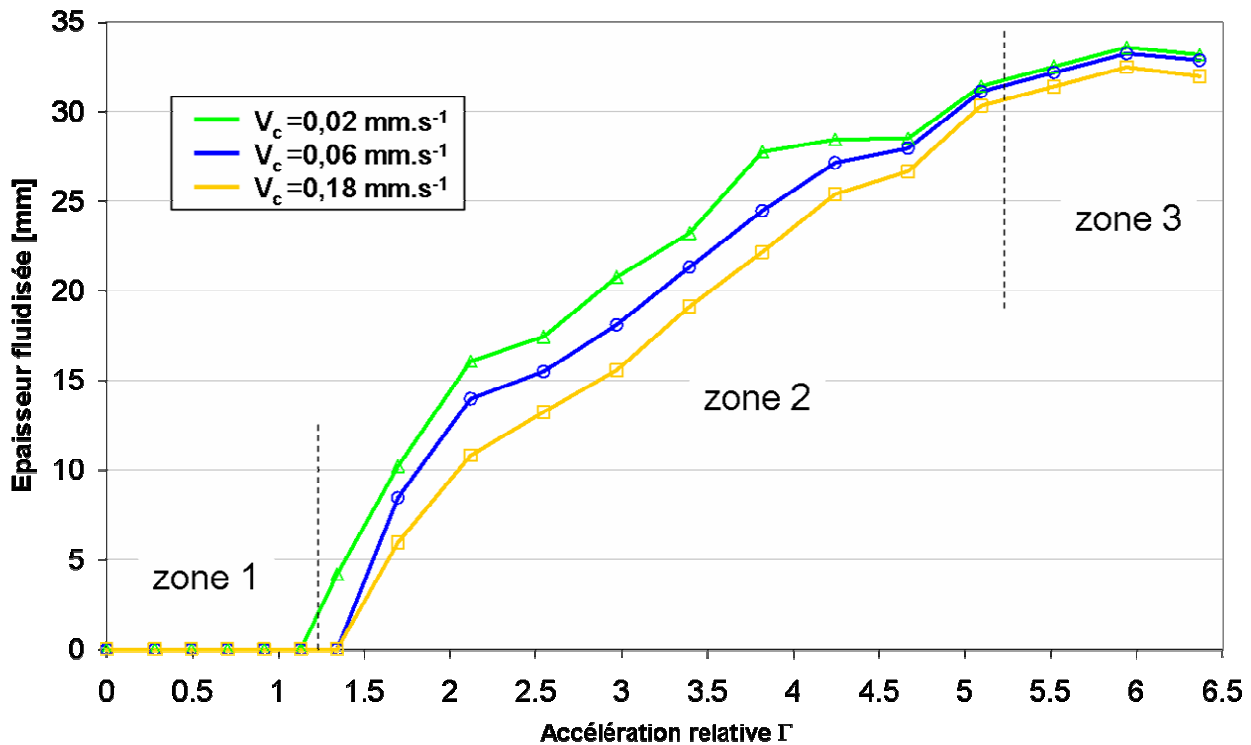


Figure III-28. Évolution de l'épaisseur fluidisée avec Γ pour trois valeurs de vitesse critique v_c . Résultats obtenus à partir d'une expérience de vibrations à 50 Hz sur un empilement $H_i \sim 60$ mm et $C_i \sim 60,5$ %.

III.B.3.a.3. Résultats expérimentaux : influence de divers paramètres sur l'épaisseur fluidisée E_F

i). Influence de la compacité initiale C_i

Pour étudier l'influence de la compacité initiale de l'empilement sur l'évolution de l'épaisseur fluidisée avec Γ , nous comparons l'état de fluidisation d'un empilement rempli en vrac de compacité initiale $C_i \sim 60,5$ % avec celui d'un empilement rempli par pluviation de compacité initiale $C_i \sim 66,5$ % ($H_i = 60$ mm, $L_x = 40$ mm, $L_y = 80$ mm, $f = 50$ Hz).

La figure III-29 présente l'évolution de l'épaisseur fluidisée E_F avec Γ pour ces deux empilements pour la vitesse critique $v_c = 0,18$ mm.s $^{-1}$. Nous constatons tout d'abord que le seuil de fluidisation ne dépend pas de la compacité initiale. Ce résultat est vérifié aussi pour les deux autres valeurs de vitesse critique v_c (0,02 et 0,06 mm.s $^{-1}$). Nous observons

également que les deux courbes sont très proches pour la majorité des valeurs de Γ explorées. Notons tout de même que l'ordre des deux courbes s'inversent pour $\Gamma=3,4$. En effet, pour les valeurs de Γ inférieures à 3,4, la courbe correspondant à l'empilement pluvie est au-dessus de celle de l'empilement en vrac et vice versa.

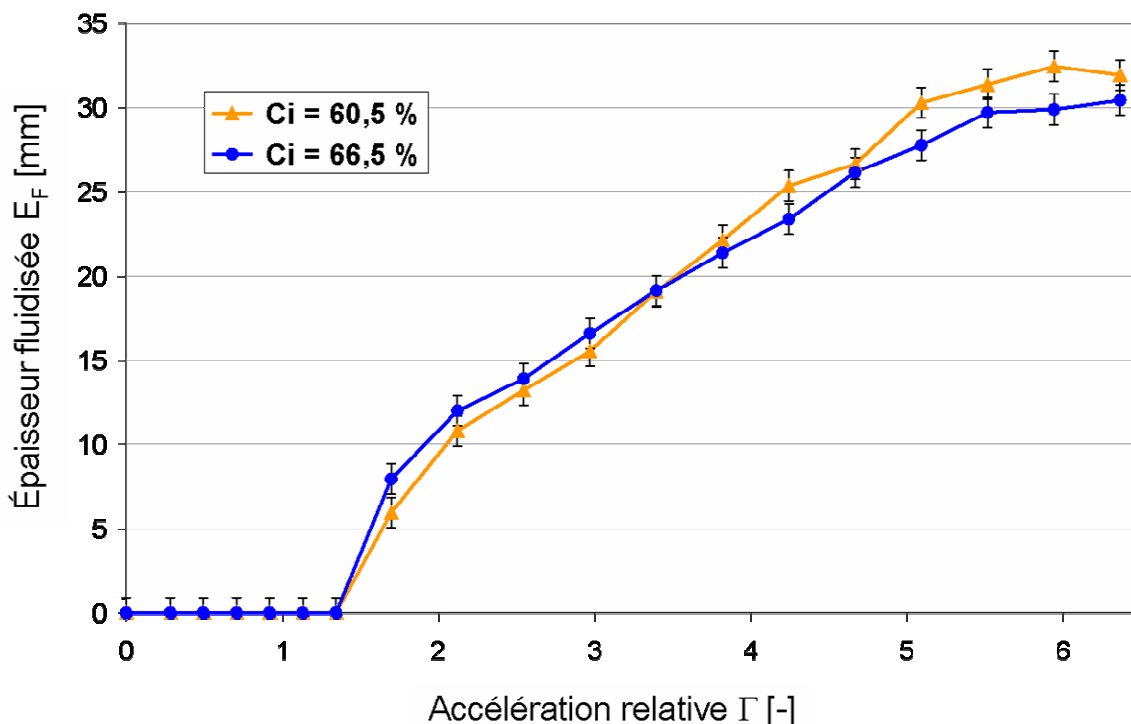


Figure III-29. Influence de la compacité initiale de l'empilement sur l'évolution de l'épaisseur fluidisée : $E_F = f(\Gamma)$ (vitesse critique $v_c=0,18 \text{ mm.s}^{-1}$).

Il apparaît donc, d'après cette expérience, que la compacité initiale de l'empilement a très peu d'influence sur la fluidisation de l'empilement granulaire.

Ce résultat semble surprenant car la compacité joue un rôle important dans le comportement mécanique d'un milieu granulaire. Pour tenter d'expliquer ce résultat, il convient de s'intéresser à ce qui se passe en régime transitoire. En effet, dans le paragraphe III.B.2, nous avons montré que pour un empilement initialement peu dense, un phénomène de tassement est observé. Ce phénomène n'est pas homogène dans toute la hauteur de l'empilement et dépend de l'accélération. Pour les faibles accélérations, il conduit principalement à une forte densification de la partie supérieure de l'empilement. La compacité locale de cette partie atteint de fortes valeurs comparables, à celles d'un empilement pluvie. En augmentant l'accélération, un front de densification se déplace vers le fond de l'empilement. La figure III-30 montre l'évolution à la fois de la hauteur totale de l'empilement et de la zone fluidisée et elle reprend les

résultats du III.B.2 concernant le front de densification. Les résultats du III.B.2 concernent un empilement de compacité initiale $C_i \sim 61\%$ et donc sont transposables dans notre étude actuelle à l'empilement rempli en vrac. Nous pouvons observer que la frontière entre la zone fluidisée et la zone solide se retrouve toujours dans une zone de forte compacité ($>66\%$).

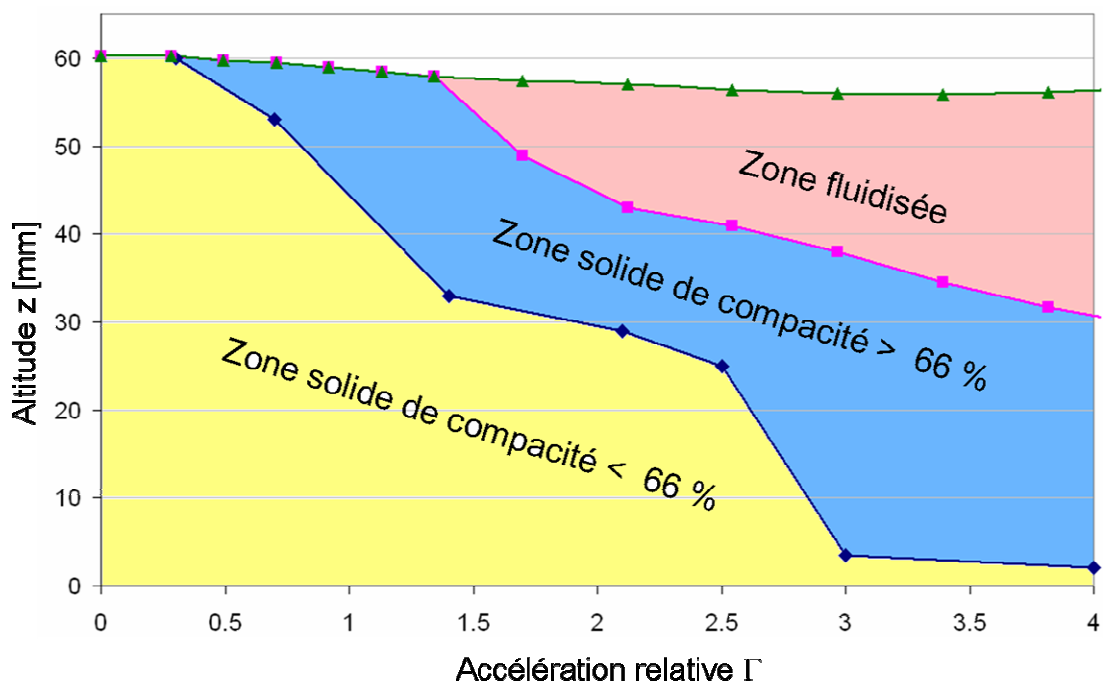


Figure III-30. Evolutions de la hauteur totale (triangles), la zone fluidisée (carrées) et du front de densification (losanges) avec l'accélération relative Γ pour un empilement rempli en vrac.

Maintenant, il convient de s'interroger sur la manière dont la compacité va intervenir dans les mécanismes de la fluidisation et en particulier dans l'expansion de la zone fluidisée. En d'autres termes, si nous augmentons l'accélération d'une quantité $d\Gamma$, l'épaisseur fluidisée augmente d'une quantité dE_F qui dépendra éventuellement de la compacité de l'empilement. A notre avis, seule la compacité locale le long de la surface frontière (zone séparant la zone fluidisée de la zone solide) pourrait influencer cette quantité.

La figure III-28 montre l'évolution de la hauteur dynamique des deux empilements avec Γ . Nous pouvons apprécier la différence entre les tassements des deux empilements pour les faibles accélérations ($\Gamma \leq 1,35$). La compacité de l'empilement rempli en vrac subit localement des modifications comme le suggère la figure III-30. Par contre, nous pouvons supposer que la compacité de l'empilement pluvié se modifie très peu. Pour ces accélérations, nous avons alors deux empilements qui ont leurs parties supérieures

possédant la même compacité près du seuil de la fluidisation. Ainsi, ils se comportent de la même manière et nous n'observons pas de différence de la valeur seuil de fluidisation. Pour une accélération Γ entre 1,4 et 3,4, le tassement de l'empilement de $C_i=60,5\%$ se poursuit alors que la hauteur de l'empilement de $C_i=66,5\%$ évolue très peu. Ainsi, la compacité locale de la zone frontière est la même dans les deux empilements. Et donc, encore une fois, nous n'observons pas de différence sur l'épaisseur fluidisée entre les deux empilements.

Pour des accélérations supérieures à 3,4, nous pouvons observer sur la figure III-28 que les deux empilements se dilatent quasiment de la même manière et de ce fait auraient des compacités voisines. Ainsi, l'épaisseur fluidisée est la même pour les deux empilements.

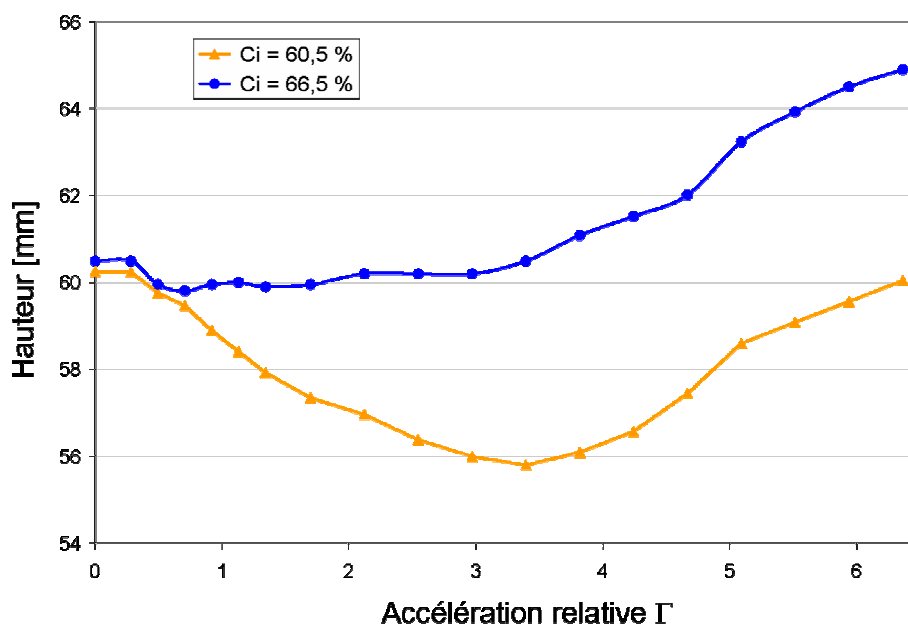


Figure III-31. Influence de l'histoire de l'empilement sur sa hauteur totale pendant les vibrations en fonction de Γ (pluvié : $C_i=66,5\%$; vrac : $C_i=60,5\%$).

En conclusion, la compacité initiale de l'empilement a très peu d'influence sur l'épaisseur fluidisée E_F . Cela ne veut pas dire que la compacité n'intervient pas sur les mécanismes de fluidisation, mais, plutôt, que nous ne pouvons empêcher les effets densifiant des vibrations. Dans la suite de cette étude paramétrique sur E_F , nous n'attacherons pas beaucoup d'importance à la détermination exacte de la compacité initiale des différents empilements. La mise en mouvement du milieu granulaire efface la mémoire de la texture initiale du lit.

ii). Influence de la hauteur initiale

Nous nous intéressons dans ce paragraphe à l'influence de la hauteur initiale de l'empilement sur l'épaisseur fluidisée E_F . Pour cela, nous avons mesuré l'épaisseur fluidisée pour des empilements de hauteurs initiales différentes et de compacités initiales $C_i \sim 60\%$ vibrés à la fréquence $f=50$ Hz dans la boîte parallélépipédique $L_x \times L_y = 40 \times 80$ mm². La hauteur initiale prend quatre valeurs différentes entre 20 et 60 mm.

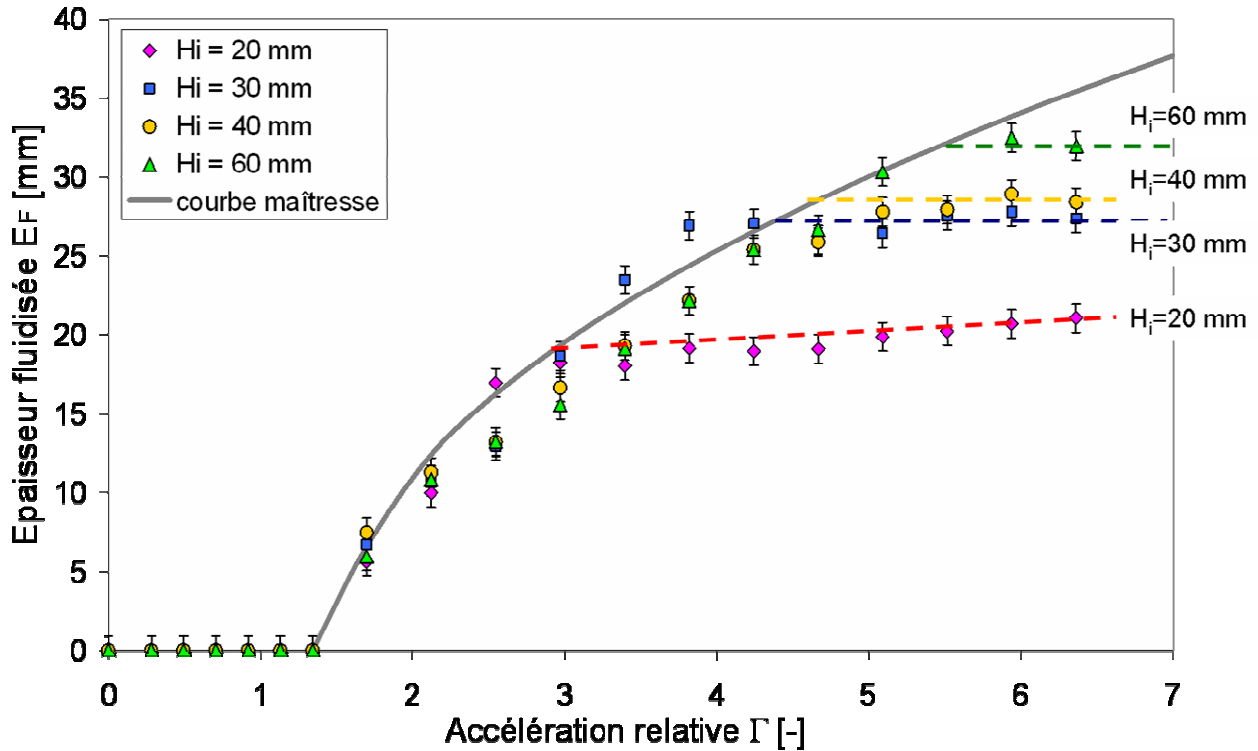


Figure III-32. Variation de l'épaisseur fluidisée E_F en fonction de Γ . E_F est calculée pour une vitesse critique $v_c=0,18$ mm.s⁻¹ pour différents empilements de hauteur initiale H_i variable, mais de même compacité initiale $C_i \sim 60\%$ vibrés à une fréquence de 50 Hz.

Le premier résultat important à signaler est que nous obtenons des rouleaux de convection contrarotatifs pour toutes ces hauteurs explorées. La figure III-32 présente les différentes courbes $E_F(\Gamma)$ obtenus pour une vitesse critique $v_c=0,18$ mm.s⁻¹. Nous pouvons constater que le seuil de fluidisation semble insensible à la variation de la hauteur initiale de l'empilement. Les différentes courbes $E_F(\Gamma)$ semblent suivre une même courbe maîtresse jusqu'à une certaine valeur d'accélération où elles s'écartent de cette courbe pour tendre vers une asymptote horizontale de valeur croissante avec H_i .

Pour $H_i=20$ mm, quasiment tout l'empilement est fluidisé à partir de $\Gamma=3,4$. Pour les valeurs de $\Gamma>3,4$, E_F se rapproche d'un palier, mais augmente légèrement par effet de dilatance due aux mouvements de plus en plus violents des grains.

Pour $H_i=30$ mm, un effet du fond se fait sentir à partir de $\Gamma =3,8$ où E_F atteint une valeur limite $E_F(H_i=30)=27$ mm. Quelques couches de grains au fond restent immobiles au début. Ensuite un lent mouvement ascendant s'amorce quand $\Gamma>3,8$, empêchant ainsi les rouleaux de convection d'atteindre le fond de la boîte.

Pour $H_i=40$ mm et $H_i=60$ mm, l'effet du fond se fait sentir pour des accélérations plus fortes et la valeur limite de E_F augmente légèrement. Elle atteint respectivement 28 et 32 mm pour $H_i=40$ et 60 mm.

En conclusion, l'épaisseur fluidisée E_F ne dépend pas de la hauteur initiale de l'empilement H_i tant que E_F reste petit. Ensuite, l'épaisseur fluidisée semble atteindre une valeur limite qui dépend de H_i . L'existence de cette valeur limite est directement liée à l'existence d'un fond (effet de bord). Pour les faibles hauteurs ($H_i \leq 30$ mm), seules quelques couches de grains s'opposent à la fluidisation. Pour les hauteurs plus élevées, une large zone inférieure est perturbée et un lent mouvement ascendant est initié en son sein.

iii). Influence du sens de variation de Γ

Augmentons progressivement l'accélération relative jusqu'à une certaine valeur, puis diminuons la vers zéro : nous observons que l'évolution de la hauteur totale de l'empilement dépend du sens de variation de l'accélération. Il s'agit d'un phénomène d'hystérésis comme le montre la figure III-33.

L'épaisseur fluidisée présente-t-elle aussi un tel phénomène ?

Pour y répondre, nous avons utilisé le même protocole expérimental de la détermination d' E_F pour une expérience où nous avons augmenté progressivement l'accélération jusqu'à 6,3 g ensuite nous l'avons diminué jusqu'à zéro. Les résultats sont présentés sur la figure III-34.

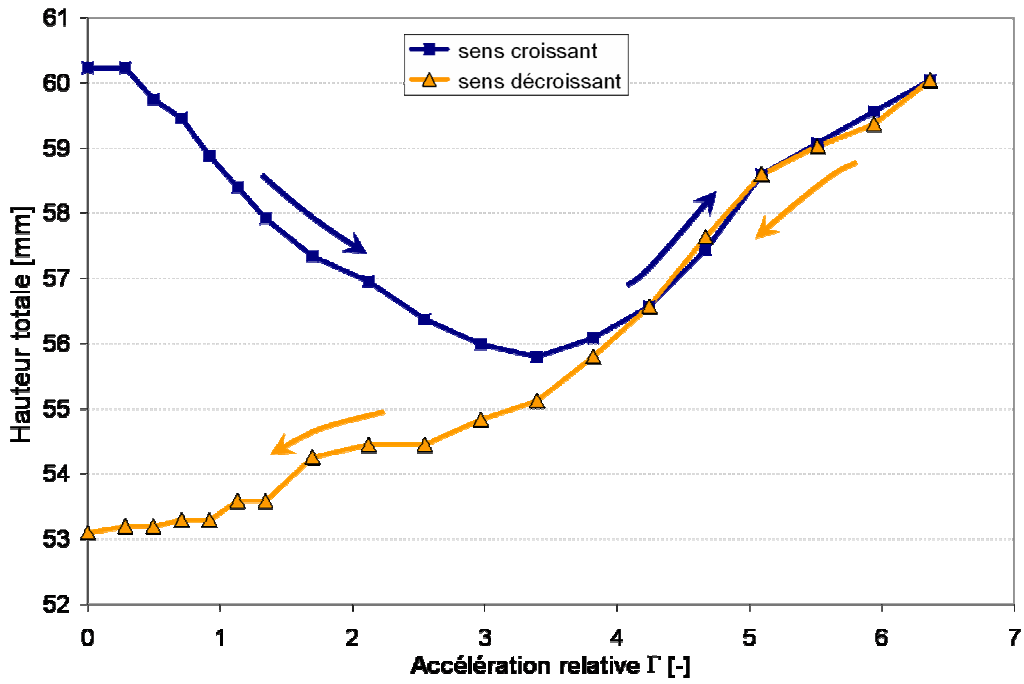


Figure III-33. Évolution de la hauteur totale d'un empilement pendant les vibrations ($f=50$ Hz, $L_x \times L_y = 40 \times 80$ mm²).

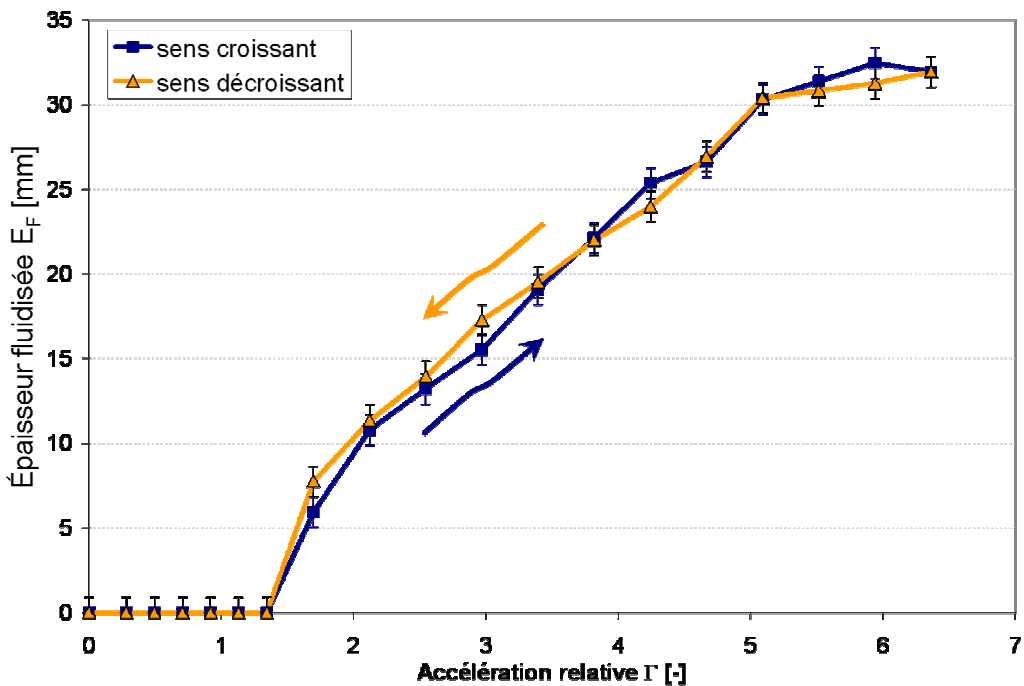


Figure III-34. Évolution de l'épaisseur fluidisée en fonction de Γ pour un empilement ($H_i \sim 60$ mm, $C_i \sim 60,5$ %, $L_x \times L_y = 40 \times 80$ mm²) vibré à $f=50$ Hz. Carrés : Γ croissants. Triangles : Γ décroissants.

Les deux courbes de l'épaisseur fluidisée en fonction de Γ se chevauchent. Nous obtenons quasiment les mêmes valeurs de E_F dans un sens ou dans l'autre. Ceci montre

que l'épaisseur fluidisée ne présente pas un phénomène d'hystérésis. L'épaisseur fluidisée n'est donc pas influencée par l'histoire de l'empilement.

Notons que ce résultat est en accord avec les résultats des deux paragraphes précédents. En effet, nous avons conclu que l'épaisseur fluidisée E_F n'est pas influencée par la compacité initiale de l'empilement et ne dépend pas de la hauteur initiale de l'empilement tant que celle-ci reste largement supérieure à E_F . Or, comme le montre la figure III-33, pour des valeurs de Γ inférieures à 3,4, la hauteur totale de l'empilement est différente selon qu'on atteint une accélération Γ par valeurs inférieures ou par valeurs supérieures. Il va d'ainsi pour la compacité de l'empilement. Malgré ces différences, nous obtenons la même valeur de l'épaisseur fluidisée.

iv). Influence de la fréquence des vibrations

Pour étudier l'influence de la fréquence des vibrations sur l'épaisseur fluidisée, nous comparons les courbes $E_F(\Gamma)$ obtenus pour deux empilements, ayant les mêmes hauteurs et compacités initiales vibrés respectivement à 50 et 85 Hz. La hauteur initiale est $H_i=60$ mm et la compacité initiale est $C_i \sim 60 \pm 0,5$ %.

Sur la figure III-35, nous avons représenté l'évolution de E_F avec Γ pour ces deux empilements en utilisant une valeur de vitesse critique $v_c=0,18$ mm.s⁻¹

Nous avons vu dans l'étude phénoménologique (III.B.1) que le seuil de fluidisation augmente légèrement avec la fréquence des vibrations. Nous retrouvons cette tendance en comparant les deux courbes $E_F(\Gamma)$. En effet, pour les valeurs d'accélérations au voisinage du seuil de fluidisation, l'épaisseur fluidisée pour l'empilement vibré à 85 Hz est inférieure à celle pour l'empilement vibré à 50 Hz. Nous pouvons nous poser la question si c'est l'amplitude des vibrations qui détermine le seuil de fluidisation. Au vue de ces résultats et d'autres observations (étude phénoménologique), nous pouvons affirmer que l'amplitude influence la valeur du seuil de fluidisation. Mais, nous n'avons pas plus d'éléments pour déterminer la dépendance du seuil avec l'amplitude.

En augmentant l'accélération, l'influence de la fréquence des vibrations semble s'estomper et les deux courbes se rejoignent. En tenant compte des incertitudes, E_F tend vers la même valeur limite pour les deux fréquences.

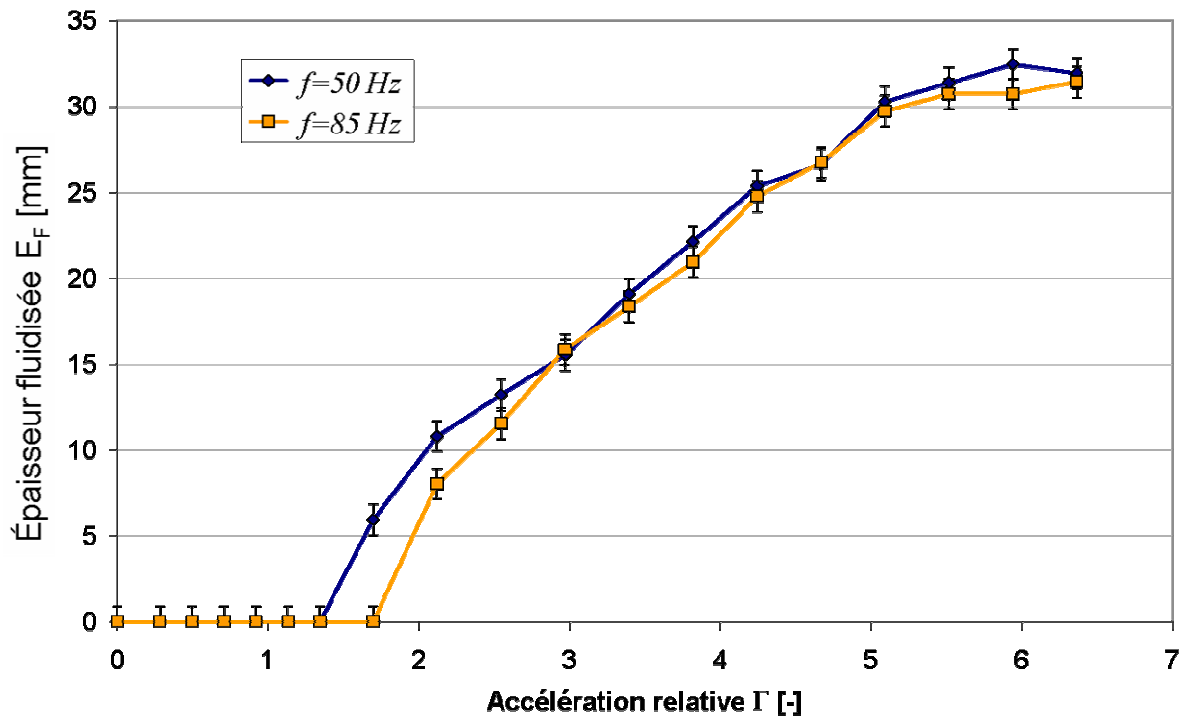


Figure III-35. Évolution de l'épaisseur fluidisée E_F avec Γ calculée avec une vitesse critique $v_c=0,18 \text{ mm.s}^{-1}$ pour deux empilements vibrés respectivement à 50 et 85 Hz ayant une hauteur initiale $H_i=60 \text{ mm}$ et une compacité initiale $C_i \sim 60 \%$.

v). Influence du matériau granulaire

Nous comparons dans ce paragraphe le comportement du sable2 et du sable4 en termes d'épaisseur fluidisée.

Pour cela, deux empilements sont réalisés avec la méthode « remplissage en vrac » chacun avec un type de sable, et sont vibrés à $f=50 \text{ Hz}$. La figure III-36 présente les deux courbes $E_F(\Gamma)$ obtenues en utilisant une vitesse critique $v_c=0,18 \text{ mm.s}^{-1}$. Avant d'interpréter ces résultats, rappelons les plus importantes caractéristiques des deux sables. Elles sont résumées dans le tableau III-4.

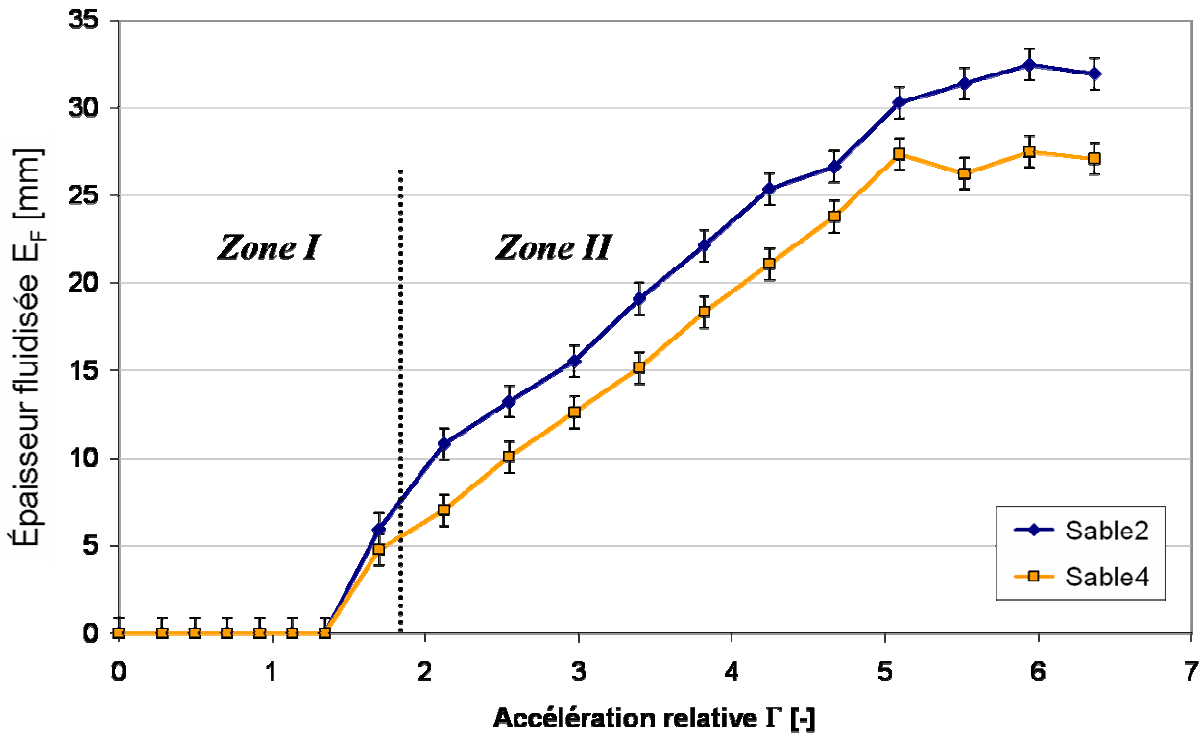


Figure III-36. Courbes $E_F(\Gamma)$ obtenues pour une vitesse critique $v_c=0,18 \text{ mm.s}^{-1}$ pour deux empilements composés respectivement du sable2 et sable4, vibrés à 50 Hz et de $H_i=60 \text{ mm}$.

Propriétés	$\mu_{\text{ grain/grain}}$	$\mu_{\text{ grain/paroi}}$	span	$d_{43} [\mu\text{m}]$	$C_i [\%]$	morphologie
Sable2	0,75	0,21	0,8	517	60,5	arrondi
Sable4	0,72	0,22	0,76	393	56	Peu anguleux

Tableau III-4. Comparaison de différentes caractéristiques des deux sables : le coefficient de friction « grain / grain », le coefficient de friction « grain / paroi usée », le diamètre moyen, la compacité initiale et la morphologie des grains.

Nous pouvons distinguer sur ce graphique deux zones de comportements différents :

- Zone I pour $\Gamma \leq 1,8$: les valeurs de E_F pour les deux sables sont très proches. Le seuil de fluidisation n'est pas modifié en changeant de matériau granulaire entre le sable2 et le sable4.
- Zone II pour $\Gamma \geq 1,8$: les valeurs de E_F pour le sable2 sont supérieures d'au moins 3 mm par rapport à celles pour le sable4. La valeur de E_{F2} limite pour le sable2 est autour de 32 mm, par contre, elle est de 27 mm pour le sable4 (E_{F4}).

D'après le tableau III-4, le sable2 et le sable4 se différencient principalement par leur taille, leur morphologie et la compacité initiale obtenue après remplissage en vrac. Nous avons vu dans le premier paragraphe que la variation de la compacité initiale a très peu

d'influence sur l'épaisseur fluidisée. La différence de comportement entre les deux sables est donc due à une différence de taille ou/et une différence de forme. Nous manquons d'éléments tangibles pour évaluer l'influence de ces deux paramètres.

Nous pouvons remarquer que les rapports d'échelle entre les diamètres moyens et les valeurs limites de l'épaisseur fluidisée sont peu différents :

$$\frac{E_{F2}}{E_{F4}} = 1,19 \quad / \quad \frac{d_2}{d_4} = 1,32$$

Ceci peut suggérer que l'épaisseur fluidisée est reliée à la taille des grains avec un rapport de proportionnalité. D'autres expériences sont nécessaires pour affirmer ou infirmer cette hypothèse : évolution de l'épaisseur fluidisée avec le diamètre des grains pour des grains ayant la même morphologie.

En conclusion, le matériau granulaire présente au moins un paramètre qui peut influencer l'état de fluidisation d'un empilement : la taille et/ou la morphologie des grains.

III.B.3.b. Etude de la compacité globale dynamique

Dans cette partie, nous nous consacrerons à la mesure de la compacité globale de l'empilement granulaire sous vibrations pendant le régime stationnaire. Pour ce faire, nous utilisons le profilomètre optique qui permet de déterminer la forme de la surface libre de l'empilement (sable2, $L_x \times L_y = 40 \times 80 \text{ mm}^2$, $f = 50 \text{ Hz}$) et ainsi calculer sa compacité (*cf. II.D.4*).

III.B.3.b.1. Évolution de la compacité globale avec l'accélération

Pour chaque accélération choisie entre 0 et 6,5 g, le protocole expérimental suivi consiste à mesurer la compacité avant et pendant les vibrations (l'état relaxé à l'arrêt des vibrations sera étudié en III-C). Les empilements ont été préparés par un remplissage en vrac à l'aide d'un entonnoir pour obtenir, après arasement de la surface, une hauteur initiale H_i égale à 60 mm et une compacité initiale C_i de $61,5 \pm 0,5 \%$.

Les résultats obtenus sont présentés sur la figure III-37.

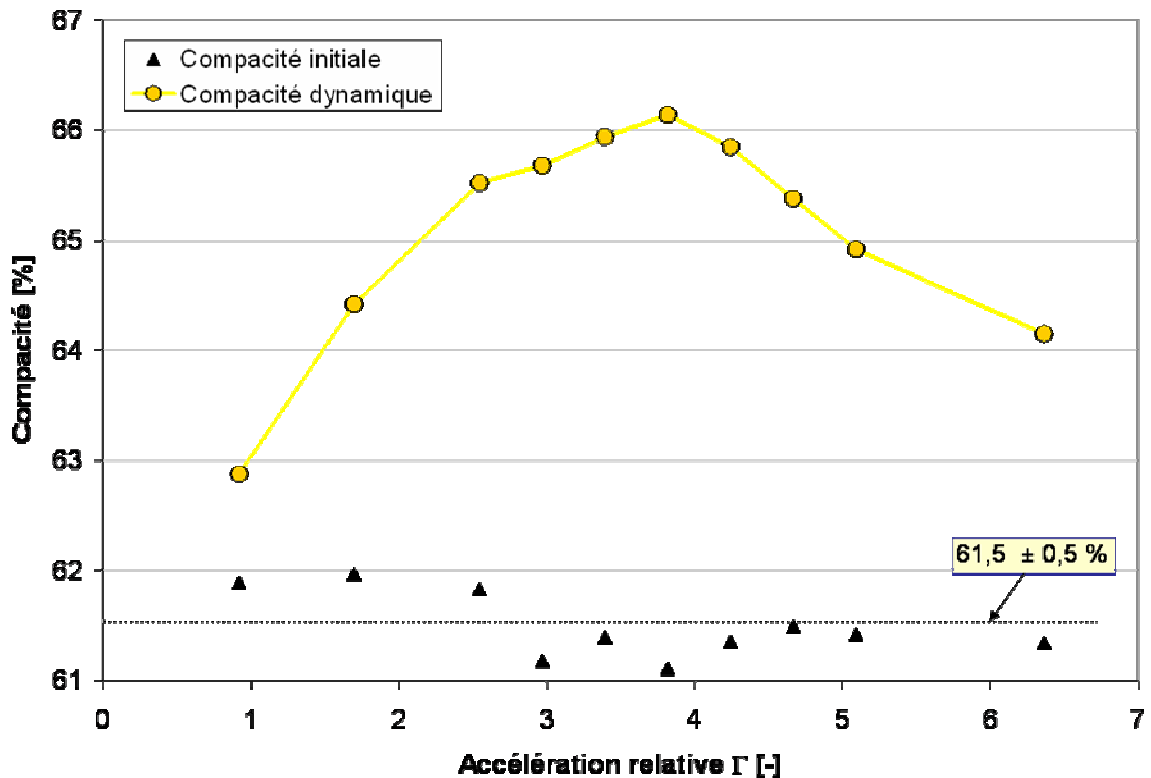


Figure III-37. Évolution de la compacité globale en régime dynamique (sous vibrations) en fonction de Γ pour un empilement de hauteur initiale $H_i=60$ mm et une fréquence de vibrations $f=50$ Hz. Les valeurs de compacité ont été déduites de mesures de hauteur d'empilement $h(x,y)$ réalisées avec le profilomètre optique.

Sur toute la gamme d'accélération explorée, nous pouvons observer une densification par rapport à l'état initial ($C_i \sim 61,5$ %). Le taux de densification augmente avec l'accélération jusqu'à atteindre un maximum de compacité égal à 66,2 % pour $\Gamma=3,8$, et diminue ensuite pour les fortes accélérations.

Pour tenter d'expliquer l'existence de ce maximum, nous rappelons les résultats présentés dans les parties III.B.2 et III.B.3.a :

- En régime transitoire, l'empilement granulaire subit un affaissement qui traduit une densification. L'intensité de cette dernière n'est pas homogène dans l'empilement. Toutefois, à une altitude donnée, elle est d'autant plus importante que l'accélération est élevée. Nous observons également la propagation vers le fond de l'empilement d'un front densification dépendant de Γ (figure III-20). La densification de la partie inférieure de l'empilement est altérée pour les accélérations Γ supérieures à 4 à cause des différents mouvements qui s'y déroulent (voir figure III-23).

- En régime stationnaire, deux rouleaux de convection contrarotatifs sont observés dans la partie supérieure de l'empilement. En augmentant l'accélération, l'épaisseur fluidisée augmente (voir figure III-28) et la vitesse des grains également (voir figure III-24). Pour un empilement de hauteur initiale égale à 20 mm (annexe.3), cette même tendance s'accompagne en plus d'une dilatation de l'empilement à partir d'une accélération égale à 3,4 g quand tout l'empilement est fluidisé (figure III-32).

Deux tendances contradictoires se manifestent : un phénomène de réarrangement granulaire qui tend à densifier l'empilement, et un phénomène de fluidisation tendant à le dilater. Le premier phénomène est prépondérant pour les faibles accélérations et le deuxième pour les fortes accélérations. Ainsi, en se compensant, ces deux tendances conduisent à un maximum de compacité pour $\Gamma \sim 3,8$.

Notons également que les résultats de la partie III-B-2 concernant la densification de l'empilement pendant le régime transitoire présageaient un maximum de compacité pour une accélération comprise entre 3 et 3,8 g. Ce qui est cohérent avec le résultat obtenu pour cette expérience.

III.B.3.b.2. Influence de la hauteur initiale sur la compacité globale

Dans ce paragraphe, nous comparons l'évolution de la compacité globale en régime dynamique d'un empilement de hauteur initiale $H_i \sim 60$ mm avec celle concernant un empilement de hauteur initiale $H_i \sim 30$ mm. Les résultats expérimentaux sont présentés sur la figure III-38.

A partir de ce graphique, plusieurs observations peuvent être faites :

- Pour tous ces essais, la compacité initiale est égale à $C_i = 61,5 \pm 0,5$ %. Donc, pour toutes les valeurs d'accélération explorées, nous observons une densification par rapport à l'état initial.
- Les courbes $C(\Gamma)$ pour ces deux hauteurs initiales présentent la même forme : la compacité augmente avec l'accélération pour atteindre un maximum puis diminue quand on continue à augmenter l'accélération.
- L'accélération pour laquelle nous obtenons le maximum de compacité diminue quand la hauteur initiale de l'empilement diminue. Elle passe de 3,8 à 2,5 quand la hauteur initiale diminue de 60 à 30 mm.

- Pour $\Gamma < 3,2$, la courbe $C(\Gamma, H_i=30)$ est au dessus de la courbe $C(\Gamma, H_i=60)$ et pour $\Gamma > 3,2$ c'est l'inverse.

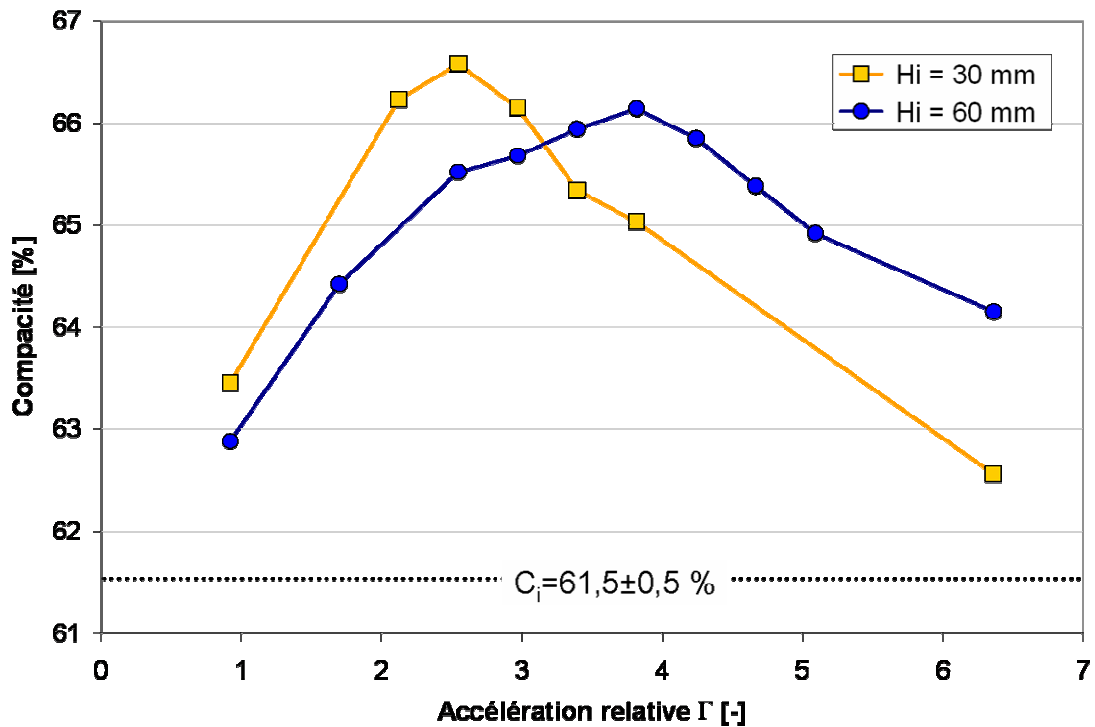


Figure III-38. Évolution de la compacité globale de l'empilement en régime dynamique ($f=50$ Hz) en fonction de l'accélération relative Γ pour $H_i=30$ et 60 mm.

Pour expliquer les deux derniers points, commençons tout d'abord par noter que les phénomènes de densification et de fluidisation, mentionnés dans le paragraphe précédent, ont lieu pour n'importe quelle hauteur initiale. Ceci est cohérent avec le fait que nous obtenons la même forme de courbe $C(\Gamma)$ pour ces deux hauteurs : l'existence d'un maximum. Il est dû à une compensation de ces phénomènes. Il y a moins de matière à densifier ou à fluidiser pour $H_i=30$ mm que pour $H_i=60$ mm. Il est alors aisé d'imaginer que les effets densifiant et dilatant se compensent à une accélération plus faible pour $H_i=30$ mm que pour $H_i=60$ mm.

Pour expliquer la position relative des deux courbes, rappelons que nous avons montré que l'évolution de l'épaisseur fluidisée avec l'accélération ne dépend pas de la hauteur initiale de l'empilement. Pour une accélération donnée, le rapport $k_\Gamma = \frac{E_F}{H_\Gamma} \approx \frac{E_F}{H_i}$ est alors plus grand pour l'empilement de hauteur initiale égale à 30 mm. A titre d'exemple, à $\Gamma=4,2$, ce rapport vaut $0,9$ pour $H_i=30$ mm et ne vaut que $0,45$ pour $H_i=60$ mm. Donc, l'effet dilatant de la fluidisation est plus important aux fortes accélérations pour $H_i=30$ mm que pour $H_i=60$ mm. Ce qui explique que la courbe $C(\Gamma, H_i=30)$ est en dessous de la

courbe C (Γ , $H_i=60$) pour $\Gamma > 3,2$. Maintenant, faisons l'hypothèse que l'évolution du front de densification avec l'accélération est indépendante de la hauteur de l'empilement. Cette hypothèse est cohérente avec le fait que la densification observée en régime transitoire est un phénomène qui se propage à partir de la surface vers le bas de l'empilement. Nous obtenons alors, pour une accélération $\Gamma < 3,2$, une densification relative beaucoup plus importante pour un empilement de $H_i=30$ mm. En effet, le front de densification dans l'empilement de $H_i=30$ mm se trouve à une altitude beaucoup plus basse que celle dans un empilement de $H_i=60$ mm. A titre d'exemple, pour $\Gamma=2,1$, le front de densification se trouve à une altitude $z \sim 0$ mm pour $H_i=30$ mm alors qu'il ne se trouve qu'à $z=29$ mm pour $H_i=60$ mm. Ces résultats expliquent pourquoi la compacité C (Γ , $H_i=30$) se trouve au-dessus de la courbe C (Γ , $H_i=60$) pour $\Gamma < 3,2$.

En conclusion, la forme de la courbe C(Γ) n'est pas altérée par la variation de la hauteur initiale de l'empilement. Cependant, l'accélération pour laquelle nous obtenons le maximum de compacité diminue quand la hauteur initiale diminue.

III.B.3.b.3. Influence de la compacité initiale sur la compacité globale

Nous étudions, dans ce paragraphe, l'influence de la compacité initiale de l'empilement sur sa compacité globale en régime dynamique. Pour ce faire, nous avons suivi le protocole expérimental suivant :

Nous avons choisi quatre valeurs d'accélération : 0,9 ; 1,7 ; 3,8 et 6,4.

Pour ces différentes accélérations, nous avons réalisé plusieurs expériences de vibration, $f=50$ Hz, en utilisant des empilements granulaires de hauteur initiale $H_i=60$ mm mais ayant des compacités initiales C_i différentes. Nous avons essayé d'explorer la gamme de compacité C_i entre 60 et 68 %. Cette dernière valeur de compacité correspond à un empilement construit par pluviation. Pour chaque expérience, nous mesurons la compacité initiale C_i , la compacité dynamique C_v (pendant les vibrations) et la compacité relaxée C_r après arrêt des vibrations (C_r sera étudiée en III.C).

Pour chacune de ces valeurs d'accélération, nous avons tracé la courbe compacité dynamique en fonction de la compacité initiale.

A partir de ces courbes, par interpolation, nous traçons l'évolution de la compacité dynamique avec l'accélération pour différentes valeurs de compacités initiales.

Nous avons représenté sur la figure III-39 l'évolution de la compacité dynamique en fonction de l'accélération pour cinq valeurs de compacité initiale soit 60,5 %, 62,5 %, 64,5 %, 66,5 % et 68 %.

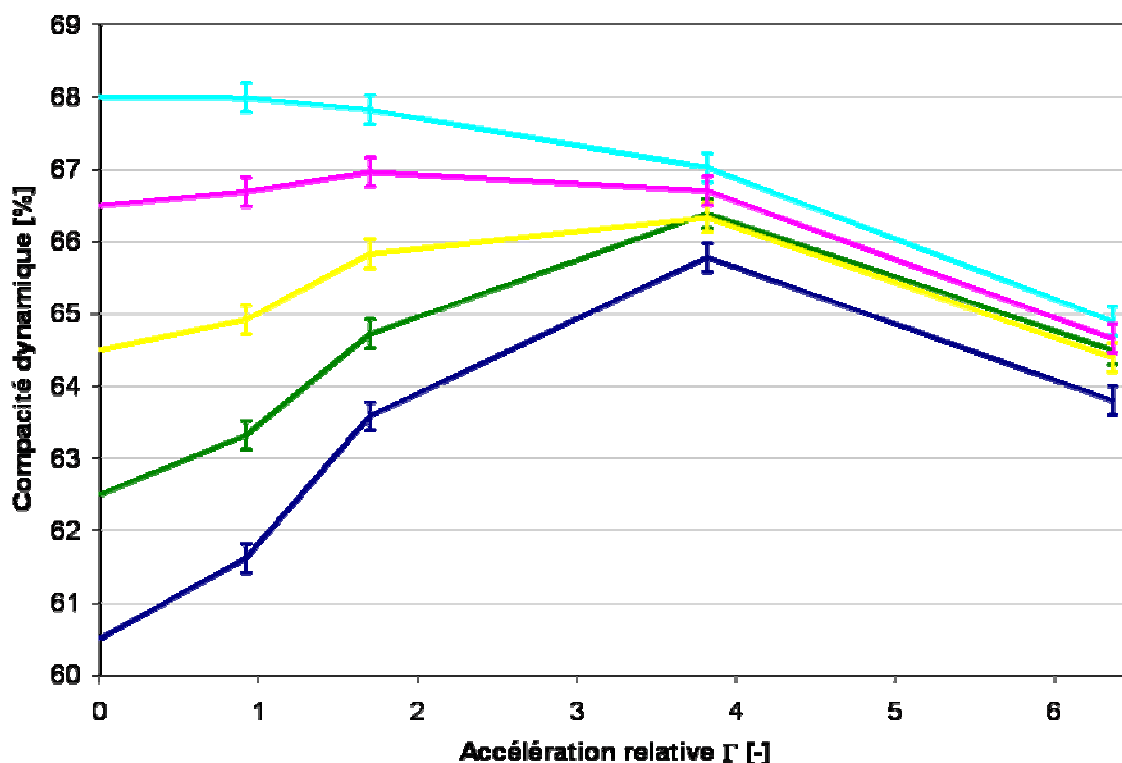


Figure III-39. Influence de la compacité initiale sur l'évolution de la compacité dynamique C_v avec l'accélération relative Γ . La compacité initiale est l'ordonnée à l'origine.

Empilement de $H_i \times L_x \times L_y = 60 \times 40 \times 80 \text{ mm}^3$ vibré à $f=50 \text{ Hz}$.

Nous remarquons que pour les faibles accélérations ($\Gamma < 3$), la compacité dynamique augmente avec la compacité initiale de l'empilement. Pour comprendre ce résultat, il faut considérer les résultats de la partie III.B.2 concernant la densification au cours du régime transitoire. En effet, les profils de compacité locale montre, pour les accélérations $\Gamma < 3$, qu'il y a une zone inférieure qui se densifie peu ou quasiment pas. L'épaisseur de cette zone se réduit en augmentant l'accélération ce qui explique le rapprochement des différentes courbes.

L'influence de la compacité initiale s'estompe pour les fortes accélérations. L'empilement perd petit à petit son histoire à cause des dilatations de forte intensité dans sa partie supérieure et de faible intensité dans sa partie inférieure. Les différentes courbes sont très proches.

L'étude réalisée dans la partie III.B.2 concernant le profil de compacité obtenu à la fin du régime transitoire montre qu'on peut partager l'empilement en trois zones : une zone

supérieure fluidisée, une zone inférieure avec une compacité voisine de la compacité initiale et une zone intermédiaire avec une compacité forte ($C > 66\%$). Notons que les zones inférieure et intermédiaire composent la partie de l'empilement à comportement solide. Maintenant, imaginons que nous partons d'un empilement initialement très dense. A la fin du régime transitoire, l'empilement est composé d'une zone supérieure fluidisée et d'une zone inférieure très dense. L'augmentation de l'accélération à partir d'une certaine valeur ($< 3,8$) ne fera qu'augmenter l'épaisseur de la zone fluidisée aux dépens de la zone très dense. Pour un empilement initialement très dense, nous prévoyons que le maximum de compacité est obtenu pour les faibles valeurs de l'accélération. Cette prédiction est confirmée dans cette expérience. En effet, nous remarquons que l'accélération pour laquelle nous obtenons le maximum de compacité en régime dynamique se déplace vers les faibles valeurs quand la compacité initiale augmente fortement.

Le maximum de compacité observé au cours de ces expériences est légèrement supérieur à 68% . Pour des valeurs de compacité initiale moyennes, le maximum est toujours obtenu pour $\Gamma = 3,8$.

III.C. Etat relaxé

Dans cette partie, nous nous intéressons à l'empilement granulaire à l'état relaxé après arrêt des vibrations. Pour les différentes conditions opératoires testées, nous caractérisons l'empilement obtenu en termes de compacité globale. Pour toutes les expériences réalisées ici, nous avons un empilement granulaire composé par du sable² et vibré à une fréquence $f=50$ Hz et de dimensions $L_x \times L_y = 40 \times 80$ mm².

III.C.1. Evolution de la compacité globale avec l'accélération

Comme dans le paragraphe III.B.3.b.1, le protocole expérimental consiste à mesurer la compacité initiale, la compacité dynamique (traitée dans le paragraphe III.B.3.b.1) et la compacité relaxée pour différentes valeurs d'accélération entre 0 et 6,4 g.

Les empilements ont été préparés par un remplissage en vrac à l'aide d'un entonnoir pour obtenir, après arasement de la surface, une hauteur initiale H_i égale à 60 mm et une compacité initiale C_i de $61,5 \pm 0,5$ %.

Les résultats sont présentés dans la figure III-40. Nous avons superposé les résultats obtenus en régime dynamique et ceux obtenus à l'état relaxé.

Pour toutes les valeurs d'accélération testées, nous observons une densification à l'état relaxé r par rapport à l'état initial i ($61,5 \pm 0,5$ %) mais aussi à l'état vibré v . En effet, l'arrêt des vibrations provoque une densification supplémentaire. Cette dernière conserve la forme de la courbe $C(\Gamma)$ obtenue au cours des vibrations. En effet, la densification augmente avec l'accélération jusqu'à atteindre un maximum de compacité $C \sim 67,2$ % pour $\Gamma = 3,8$ ensuite elle diminue. Notons que nous obtenons le maximum de compacité en régime dynamique et à l'état relaxé pour la même valeur d'accélération (Le lieu du maximum est conservé). La relaxation conserve également la forme de la surface libre avec tout de même un léger aplanissement. La forme de la surface libre présente alors les mêmes motifs décrits dans l'étude phénoménologique III.B.1. Ce résultat est important par rapport à l'application industrielle. Le remplissage des boîtes fusibles doit être complet jusqu'à dans les coins supérieurs. Une forme de dôme de la surface libre pourrait nuire à cet objectif.

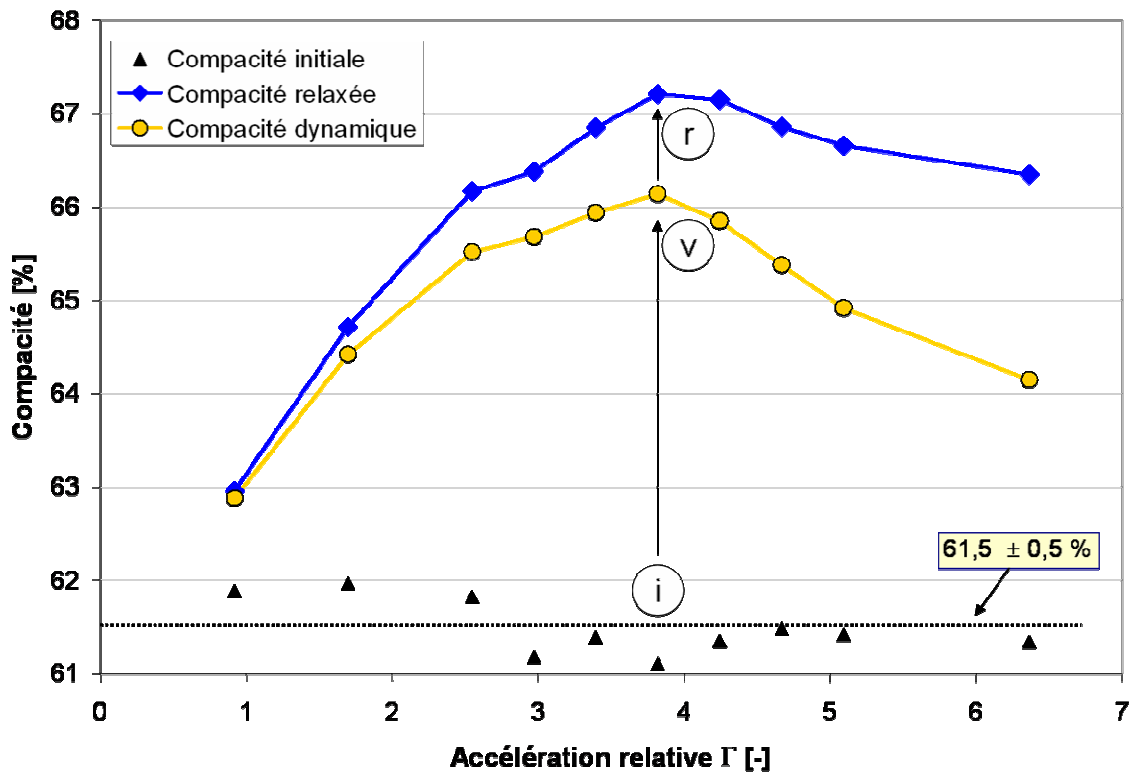


Figure III-40. Evolution avec Γ des compacités dynamique et relaxée pour un empilement de $H_1=60$ mm ($f=50$ Hz). La densification s'opère à partir de l'état initial i vers l'état vibré v, puis vers l'état relaxé r.

Pour une gamme d'accélération $1,15 < \Gamma < 4$, l'empilement granulaire est composé d'une zone inférieure solide qui est immobile dans le référentiel du récipient, et d'une zone supérieure fluidisée qui se dilate d'autant plus que l'accélération augmente. A l'arrêt des vibrations, la zone inférieure reste inchangée contrairement à la zone fluidisée qui s'est compactée. Nous pensons alors que le gain de compacité à l'arrêt des vibrations (égal à la différence entre la compacité relaxée et la compacité dynamique) est dû principalement aux réarrangements granulaires dans la couche fluidisée.

Pour les accélérations $\Gamma > 4$, nous observons des mouvements lents de grains dans une partie ou la totalité de la zone inférieure de l'empilement. Le gain de compacité à l'arrêt des vibrations est dû aux réarrangements des grains de la couche supérieure fluidisée et de la couche inférieure perturbée.

Notons que nous observons un gain de compacité entre le régime dynamique et l'état relaxé pour $\Gamma=0,9$, égale à 0,08 %, alors qu'en régime dynamique tout l'empilement semble immobile sauf un mouvement de frémissement de quelques grains à la surface libre de l'empilement. Il est possible que ce gain ne soit qu'un bruit de mesure mais nous pouvons avancer une explication si ce n'est le cas. En effet, pendant le régime

dynamique, à cause du mouvement alternatif des parois, l'empilement granulaire est soumis à une force latérale (cisaillement) qui tend à le dilater. A l'arrêt des vibrations, cette force s'annule permettant ainsi à l'empilement de se relaxer et diminuer son volume apparent.

III.C.2. Influence de la hauteur initiale sur la compacité globale

Nous comparons dans ce paragraphe les compacités relaxées obtenues pour un empilement de $H_i=60$ mm et celles obtenues pour un empilement de $H_i=30$ mm. Sur la figure III-41, nous pouvons observer l'évolution de cette compacité avec l'accélération pour ces deux hauteurs initiales.

Comme nous l'avons constaté pour $H_i=60$ mm, la relaxation conserve la forme de la courbe $C(\Gamma)$ pour $H_i=30$ mm. Le maximum de compacité est toujours obtenu pour $\Gamma=2,5$.

La relaxation conserve également la position relative des deux courbes $C(\Gamma)$ pour ces deux hauteurs initiales. Cependant, l'écart entre les deux courbes a augmenté pour les faibles accélérations et s'est réduit pour les fortes accélérations. Ceci est en accord avec notre conclusion du paragraphe précédent énonçant que le gain de compacité entre l'état relaxé et l'état dynamique provient principalement de la compaction de la couche fluidisée.

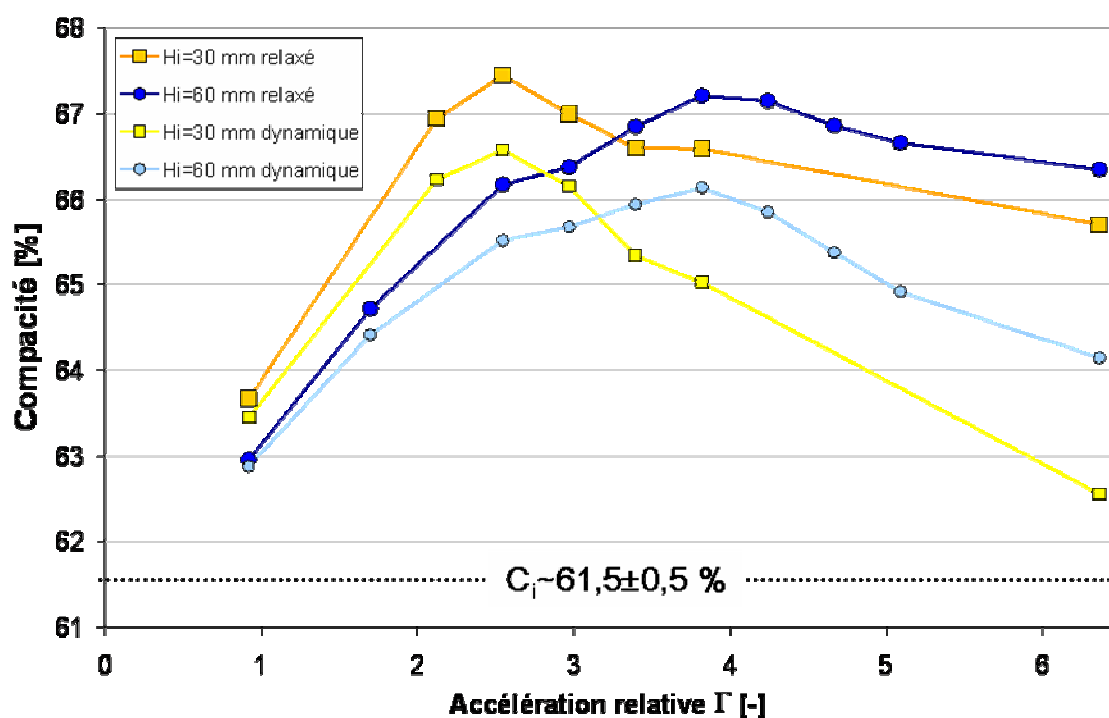


Figure III-41. Compacités initiales C_i , relaxées C_r et dynamiques C_v en fonction de Γ pour $H_i=60$ mm et $H_i=30$ mm ($f=50$ Hz).

III.C.3. Influence de la compacité initiale sur la compacité globale

Nous étudions dans ce paragraphe l'influence de la compacité initiale de l'empilement sur sa compacité relaxée. Pour ce faire, nous avons suivi le même protocole expérimental du paragraphe III.B.3.b.3. Les résultats présentés dans la figure III-42 sont obtenus par interpolation de résultats expérimentaux.

Nous avons tracé l'évolution de la compacité relaxée en fonction de l'accélération pour cinq compacités initiales.

Les faibles accélérations n'altèrent pas les empilements très compacts. Ainsi, pour ces valeurs d'accélérations, la compacité relaxée dépend fortement de la compacité initiale de l'empilement. Par contre, les fortes accélérations font « oublier » l'état initial. Nous observons les mêmes tendances qu'en régime dynamique.

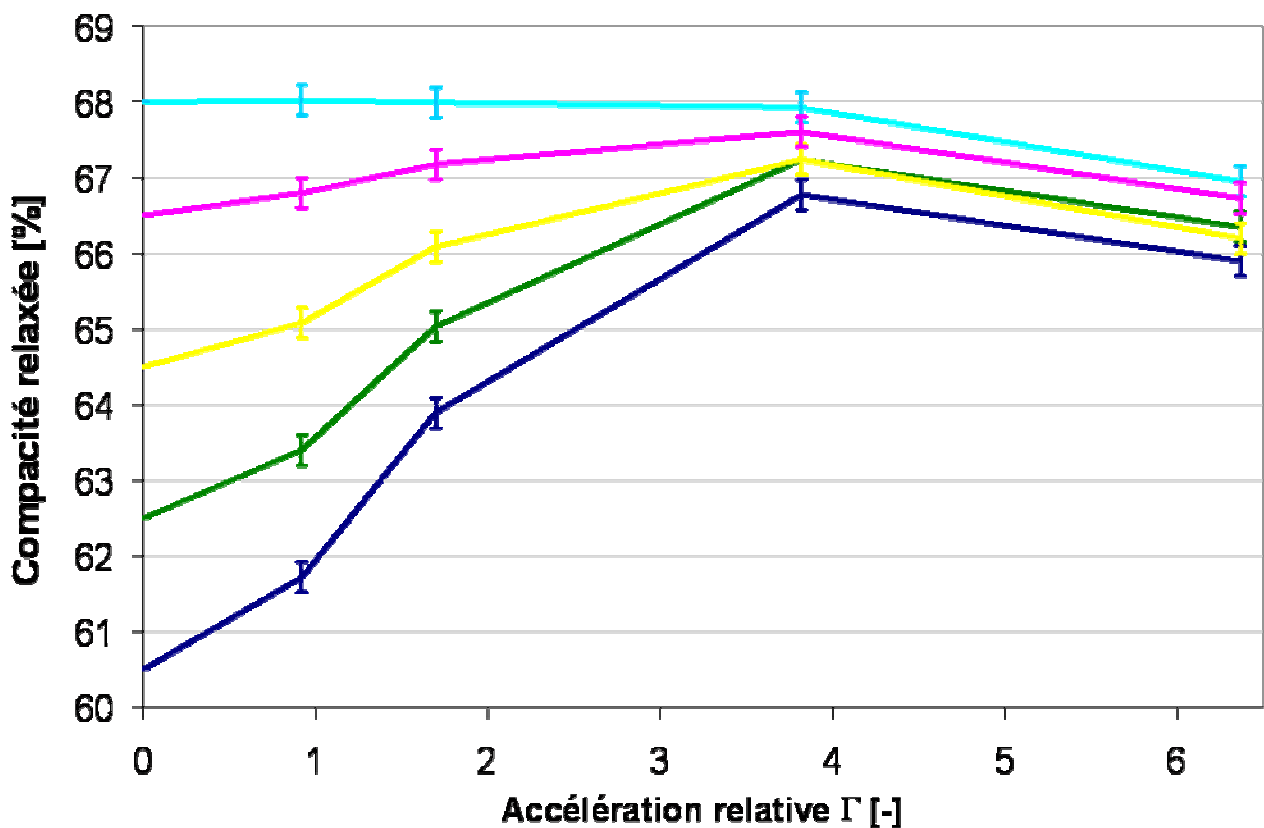


Figure III-42. Influence de la compacité initiale sur l'évolution de la compacité relaxée avec l'accélération relative Γ pour un empilement de $H_i \times L_x \times L_y = 60 \times 40 \times 80 \text{ mm}^3$ vibré à $f = 50 \text{ Hz}$.

La compacité initiale est donnée par l'ordonnée à l'origine.

CONCLUSION :

Cette étude expérimentale a révélé la richesse et la complexité des comportements d'un empilement granulaire soumis à des vibrations horizontales. Pour les faibles accélérations, l'empilement se comporte comme un bloc solide immobile dans le référentiel du récipient. A partir d'une accélération critique Γ_{c1} ($\Gamma_{c1} \approx 1,15$ pour $f=50$ Hz), la partie supérieure de l'empilement adopte un comportement fluide avec l'apparition de deux rouleaux de convection : un flux descendant des grains au niveau des parois Nord et Sud et un flux ascendant au cœur de l'empilement qui a été mis en évidence grâce à une expérience utilisant des grains colorés. L'augmentation de l'accélération par la suite provoque une expansion de cette zone à comportement fluide et finit par perturber la couche inférieure de l'empilement pour les fortes accélérations où nous observons un flux ascendant des grains sur les faces Nord et Sud.

Pour résumer ces comportements, nous pouvons les présenter selon trois observables : la forme de la surface libre, les mouvements granulaires et la compacité moyenne de l'empilement. Notons que la variation de l'un de ces observables n'est pas indépendante des variations des deux autres.

Un empilement, initialement plat, soumis à des vibrations horizontales avec une amplitude croissante voit la forme de sa surface libre se modifier. En effet, pour une accélération relative critique Γ_{c1} ($\Gamma_{c1} \approx 1,15$ pour $f=50$ Hz), la surface adopte une forme d'un léger dôme. A Γ_{c2} ($\Gamma_{c2} \approx 2,8$ pour $f=50$ Hz), en plus du dôme central, deux bosses parallèles apparaissent au niveau des parois Nord et Sud « motif chameau ». En augmentant l'accélération, ces bosses s'éloignent des parois en se rapprochant au centre. Pour Γ_{c3} ($\Gamma_{c3} \approx 6,2$ pour $f=50$ Hz), les deux bosses fusionnent avec le dôme central « motif dromadaire ».

Nous avons observé qu'un empilement soumis à des vibrations horizontales atteint un régime stationnaire après avoir exploré différents états transitoires au cours desquels il subit un tassement. Grâce à l'outil « MOTION2D », nous avons mesuré ce tassement pour des accélérations $\Gamma < 3,8$. Par un traitement judicieux de ces résultats, nous obtenons les profils verticaux de la compacité locale (vue par la paroi Nord) à la fin du régime transitoire. Ils montrent qu'un empilement initialement homogène en compacité est soumis à des vibrations horizontales, il subit pendant le régime transitoire une densification non homogène en altitude. Pour une altitude z donnée, le taux de densification augmente avec l'accélération tant que la fluidisation n'a pas atteint cette

altitude. Pour des accélérations augmentant de 0,7 à 3 g, il existe un front de densification qui se déplace avec l'accélération vers le fond de l'empilement.

Au cours du régime stationnaire, nous nous sommes attachés à quantifier l'évolution de l'épaisseur des rouleaux (épaisseur fluidisée E_F) et de la compacité globale de l'empilement avec Γ .

Nous avons déterminé l'épaisseur fluidisée E_F en mesurant avec « MOTION2D » les profils des vitesses de chute des grains sur la paroi Nord et en définissant une vitesse critique de fluidisation v_c . La courbe $E_F=f(\Gamma)$ montre trois zones de comportement en fonction de Γ :

- Zone 1 : $E_F = 0$ avant la transition vers la fluidisation.
- Zone 2 : E_F augmente avec Γ : apparition et expansion des rouleaux de convection.
- Zone 3 : E_F semble tendre vers un palier. Notons que la preuve d'existence de ce palier ne peut être assurée car le pot vibrant arrivait en limite de capacité.

Une étude paramétrique sur $E_F=f(\Gamma)$ s'en est suivie. Elle montre que :

- $E_F=f(\Gamma)$ ne dépend pas de la compacité initiale de l'empilement parce que ce dernier a subi une densification au cours du régime transitoire qui a rendu la partie concernée par la fluidisation très dense ($C > 66\%$).
- Les courbes $E_F=f(\Gamma)$ pour différentes hauteurs initiales coïncident sur une même courbe tant que le palier n'est pas atteint.
- $E_F=f(\Gamma)$ ne dépend pas du sens de variation de Γ .
- En augmentant la fréquence des vibrations, E_F diminue pour les faibles et moyennes accélérations.
- $E_F=f(\Gamma)$ dépend de la nature du matériau granulaire.

Nous nous sommes intéressés ensuite à la variation de la compacité globale vibrée et relaxée de l'empilement avec Γ . Les mêmes tendances sont observées pour les deux. La relaxation entraîne tout simplement une densification supplémentaire qui augmente avec l'accélération.

En augmentant l'accélération, la compacité augmente pour atteindre un maximum à Γ_{max} ensuite diminue. La valeur du Γ_{max} diminue en diminuant la hauteur initiale de l'empilement. La valeur des compacités est fortement corrélée à la compacité initiale pour

les faibles accélérations. Par contre les fortes accélérations font oublier l'état initial de l'empilement.

Chapitre IV: Interprétation

Ce chapitre s'articule principalement en deux parties. La première partie s'intéresse à la compréhension des différents mouvements granulaires évoqués dans l'étude expérimentale. La deuxième partie sera consacrée à la compacité de l'empilement : l'interprétation des résultats obtenus sera proposée, avec deux expériences supplémentaires pour tester cette interprétation. Un protocole de remplissage des boîtes pour les fusibles sera ensuite établi pour finaliser l'étude.

IV.A. Mouvements granulaires

L'objectif de cette partie est de donner quelques voies de réflexion pour la compréhension des mouvements granulaires décrits et/ou mesurés dans l'étude expérimentale. Dans un premier temps, nous nous intéresserons aux mouvements de frémissement à la surface libre de l'empilement. Et dans un deuxième temps, nous étudierons les mouvements convectifs et notamment les deux rouleaux de convection.

IV.A.1. Frémissement de surface :

Dans l'étude phénoménologique (III.B.1), nous avons observé que quand un empilement granulaire, initialement au repos, est soumis à des vibrations horizontales avec une accélération relative $\Gamma > \Gamma_{c0}$, un mouvement de frémissement persistant est observé à sa surface libre. Il s'agit d'un mouvement désordonné des grains sur une monocouche ou entre deux couches superficielles. Pour le sable², la valeur de Γ_{c0} vaut 0,71 pour une fréquence $f=50$ Hz et semble augmenter légèrement en diminuant la fréquence (0,77 pour $f=20$ Hz).

Nous souhaitons proposer un modèle physique simple pour prédire la valeur de Γ_{c0} pour différents matériaux granulaires. Mais la dépendance éventuelle en fonction de la fréquence ne sera pas prise en compte par ce modèle.

Commençons par noter deux observations.

Premièrement, en dessous de la couche superficielle, l'empilement se comporte comme un bloc solide et il est immobile dans le référentiel de la boîte. Deuxièmement, la forme de la surface libre de l'empilement est plane.

Nous proposons alors le modèle suivant concernant une bille posée sur un support plan oscillant (voir figure IV-1). Le contact entre la bille et le plan est rigide. Le coefficient de friction entre la bille et le support est supposé égal au coefficient de friction inter-grain μ_i . Nous chercherons à déterminer la valeur seuil de l'accélération du support pour laquelle la bille se met en mouvement par rapport au support : il s'agit d'un problème classique de type « stick-slip », collé - glissé.

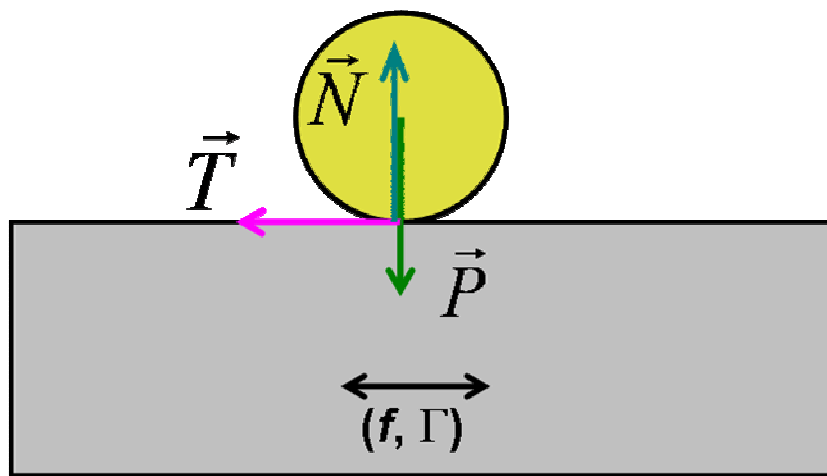


Figure IV-1. Modèle physique pour le frémissement de grains. La partie grisée symbolise soit un fond de boîte pour une expérience d'une bille unique dans une boîte, soit le milieu granulaire représenté dans une approche de type milieu continu.

Nos observations visuelles à la surface libre de l'empilement révèlent que les grains ont tendance à glisser sur la surface plutôt que rouler. De plus, les grains de sable n'ont pas une forme vraiment sphérique. Nous considérons alors le problème avec une hypothèse de glissement sans roulement, avec une loi de Coulomb.

Les équations qui régissent notre problème sont les suivantes :

- Dans le référentiel galiléen du laboratoire \mathcal{R} , le principe fondamental de la dynamique s'écrit : $m \cdot \vec{\ddot{x}} = \vec{P} + \vec{R}$ (IV-1) où $\vec{\ddot{x}}$ est l'accélération de la bille dans \mathcal{R} , P le poids de la bille et R la réaction du support, comprenant une composante normale N et l'autre tangentielle T .

- Si on note X la position du support dans le référentiel du laboratoire et x_s la position de la bille dans le référentiel du support, l'équation IV-1 devient alors :

$$m \cdot \ddot{x}_s = \vec{P} + \vec{R} - m \cdot \ddot{X} \quad (\text{IV-2}).$$
- La projection de l'équation IV-2 sur l'axe vertical donne : $N = m \cdot g$ (IV-3). Sur l'axe horizontal, on obtient : $m \cdot \ddot{x}_s = T - m \cdot \ddot{X}$ (IV-4).
- La condition du non-glissement s'écrit : $\|T\| < \mu_i \|N\|$. En utilisant les équations IV-3 et IV-4, nous obtenons la condition suivante en introduisant le coefficient de friction inter-grains : $|\ddot{X}| < \mu_i \cdot g$ (IV-5).
- La position du support est donnée par la relation $X(t) = A \sin(2\pi f t)$
 où A et f sont respectivement l'amplitude et la fréquence des vibrations.
- La bille se déplacera alors par rapport au support si à un instant t du cycle nous avons $|\Gamma \cdot \sin(2\pi f t)| > \mu_i$ (IV-6). Γ étant l'accélération relative du support.

D'après ce modèle, la valeur de Γ_{c0} doit être égale au coefficient de friction inter-grains. Pour vérifier ce résultat, nous avons réalisé plusieurs expériences de vibration avec trois différents matériaux granulaires. Les résultats sont regroupés dans le tableau IV-1.

Matériau granulaire	Coefficient de friction inter-grain μ_i	Valeur expérimentale de Γ_{c0}
Sable2	0,74	0,7
Sable4	0,72	0,7
Billes de verre	0,54	0,5

Tableau IV-1. Comparaison des coefficients de friction inter-grains avec Γ_{c0} pour différents matériaux granulaires.

Le tableau IV-1 montre que les valeurs de Γ_{c0} obtenus sont très proches des valeurs du coefficient de friction inter-grain pour les trois matériaux granulaires testés. Ceci montre la validité du modèle que nous proposons pour expliquer le frémissement à la surface libre de l'empilement vibré. Les valeurs de Γ_{c0} sont légèrement inférieures aux valeurs de μ_i . Ceci peut être lié au fait que le frémissement ne concerne pas uniquement les grains de la monocouche superficielle mais il est également observé pour les grains de la couche sous-jacente.

IV.A.2. Couche fluidisée

IV.A.2.a. Interface solide-fluide

Quand un empilement granulaire est vibré horizontalement à une accélération supérieure à une valeur critique Γ_{c1} , il se comporte comme un fluide dans sa partie supérieure avec l'apparition de deux rouleaux de convection contrarotatifs. Quant à sa partie inférieure, elle se comporte comme un bloc solide. Ce résultat confirme les observations rapportées dans la littérature.

Cependant, on trouve peu d'indications concernant la forme de l'interface qui sépare la couche fluidisée de la couche bloquée. Les indications qui existent sont contredites par nos expériences. En effet, l'équipe de Behringer a observé que, vue par les parois Est/Ouest, la couche fluidisée avait une concavité tournée vers le haut dans sa partie inférieure (figure I-7.a). Par contre, nous observons une concavité tournée vers le bas comme le montre la figure III-6. La vue ouest montre que la strate colorée est perturbée uniquement sur les bords et pas au centre. Nous avons réalisé une autre expérience en considérant des dimensions de l'empilement se rapprochant de celles de Behringer *et al.* En effet, le récipient qu'ils ont utilisé a une longueur $L_x=121$ mm et une largeur $L_y=19$ mm. L'expérience que nous présentons ici est pour un récipient de longueur $L_x=80$ mm et de largeur $L_y=40$ mm. Les résultats sont présentés sur la figure IV-2.

Le déplacement des bandes latérales composées de grains noirs montrent que les grains se déplacent des bords vers le centre de la face Ouest en suivant préférentiellement une trajectoire vers le haut. Encore une fois, ceci indique que l'interface entre la zone fluidisée et la zone solide a une concavité tournée vers le bas.

Pour s'affranchir des influences éventuelles des parois Est/Ouest sur la forme de l'interface, une expérience supplémentaire a été réalisée pour observer cette interface au cœur de l'empilement loin des parois. En effet, un empilement composé d'un motif en damiers, de dimensions $L_x \times L_y = 40 \times 80$ mm², a été vibré à une fréquence de 50 Hz et une accélération $\Gamma=2,8$ ensuite relaxé par un arrêt instantané des vibrations. Pour observer le cœur de l'empilement, nous faisons des arasements successifs de la surface libre en utilisant une technique d'aspirations (cf. III-A.2). Nous avons ainsi accès à une observation directe du cœur de l'empilement à différentes altitudes. Les résultats obtenus sont présentés dans la figure IV-3.

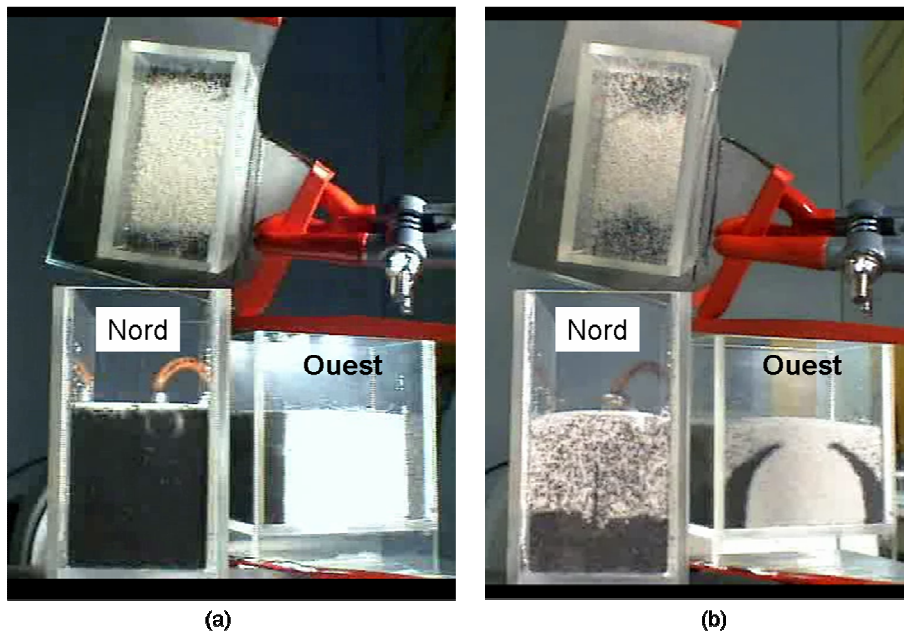


Figure IV-2 : Photographies offrant trois vues simultanées de l'empilement. A gauche : état initial composé de deux bandes verticales de grains noirs et une partie centrale de grains non-colorés. A droite : état vibré à une accélération $\Gamma \sim 2$. La face ouest montre les lignes de courant du mouvement convectif. L'expérience a été réalisée à une fréquence de 50 Hz.

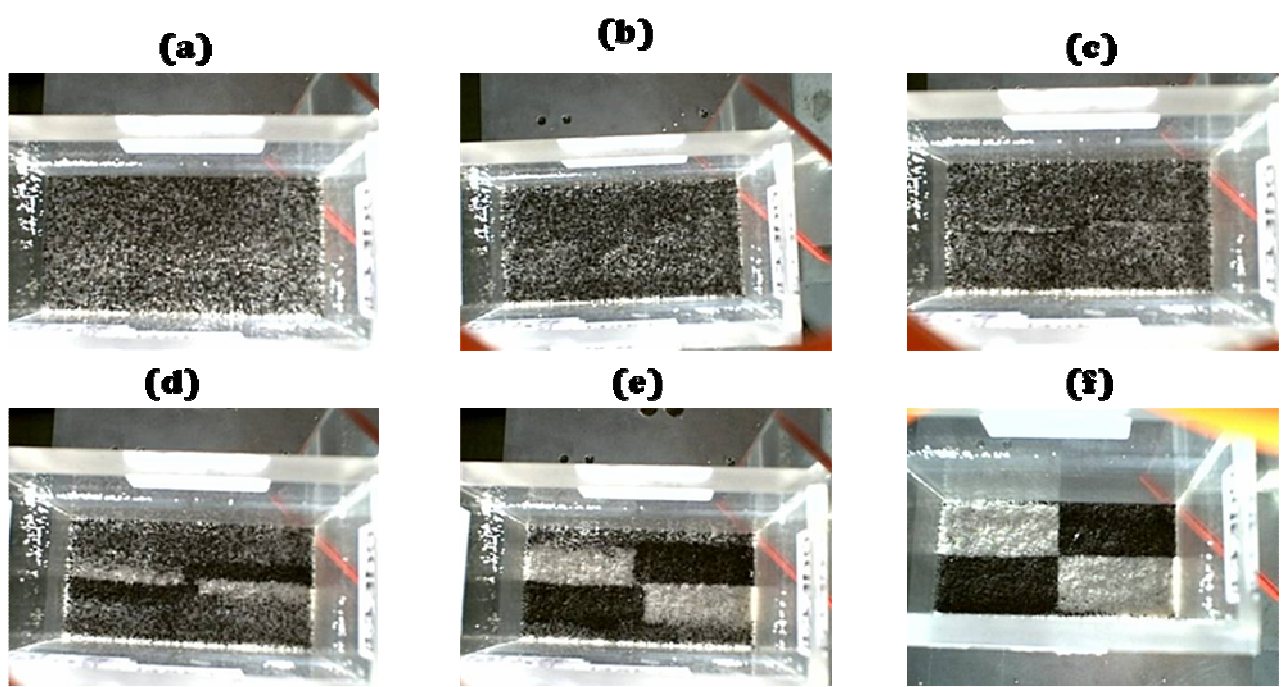


Figure IV-3 : Vues de dessus d'un empilement, vibré à 50 Hz et $\Gamma = 2,8$, à différentes profondeurs p de la surface obtenues après arasement successifs de la couche supérieure. (a) $p=0$ mm (b) $p=6$ mm (c) $p=12$ mm (d) $p=16$ mm (e) $p=19$ mm (f) $p=26$ mm où nous retrouvons le motif d'avant vibrations.

La figure IV-3 montre qu'après vibrations il y a eu un mélange des grains noirs et des grains non-coloriés d'une manière non-uniforme sur la dimension x de l'empilement. En effet, à une profondeur $p=16$ mm de la surface libre de l'empilement, nous retrouvons le motif en damiers uniquement sur une bande centrale. La largeur de cette bande augmente avec la profondeur. La perte du motif en damiers reflète les mouvements convectifs dans la couche fluidisée. Par contre, quand le motif est conservé nous pouvons conclure que la zone en question avait un comportement solide au cours des vibrations. Cette expérience montre que l'interface solide-fluide a une forme de dôme (concavité tournée vers le bas).

Nos résultats contredisent donc ceux de Behringer *et al.*. Il est possible que cela soit dû à des gammes de fréquence différentes (7-15 Hz pour Behringer, 50 Hz pour nous).

IV.A.2.b. Loi empirique $E_F=f(\Gamma)$

Dans la partie III.B.3.a.3, nous avons étudié l'influence de quelques paramètres sur l'épaisseur fluidisée. Nous avons montré que cette dernière est indépendante de la compacité initiale C_i de l'empilement. Elle est également indépendante d'une certaine manière de la hauteur initiale H_i tant que le palier n'est pas atteint.

La figure III-32 montre l'évolution de E_F en fonction de Γ pour différentes hauteurs initiales de l'empilement. Nous pouvons voir que les différentes données expérimentales peuvent être interpolées par une courbe maîtresse.

Nous trouvons qu'à partir d'une valeur minimum Γ^* , l'évolution de E_F avec Γ peut être décrite par la loi suivante :

$$E_F = \kappa \cdot \sqrt{(\Gamma - \Gamma^*)}$$

Où κ et Γ^* sont des paramètres ajustables. κ est une distance caractéristique.

Pour notre expérience, pour une vitesse critique de fluidisation $v_c=0,18$ mm.s⁻¹, nous trouvons $\kappa=16$ mm et $\Gamma^*=1,5$.

En plus de v_c , Γ^* et κ peuvent dépendre de différents paramètres : nature du matériau granulaire, coefficient de friction grain / paroi, fréquence des vibrations et longueur L_x de l'empilement.

Nous avons vu dans l'étude phénoménologique (*cf.* III.B.1) que le seuil de fluidisation augmente avec la fréquence des vibrations, nous pouvons supposer alors Γ^* suit cette même tendance. Dans le paragraphe sur l'influence de la fréquence sur l'évolution de E_F avec Γ (*cf.* III.B.3), nous avons vu que la courbe $E_F=f(\Gamma)$ pour $f=85$ Hz est en dessous de

celle pour $f=50$ Hz au début et qu'elle finit par la rattraper pour les fortes valeurs de Γ . Ce résultat nous laisse penser que κ augmente avec la fréquence des vibrations.

Quant à l'influence de la dimension L_x de l'empilement, nous pensons que Γ^* ne dépend pas de ce paramètre. Par contre, nous pensons qu'il existe une relation de proportionnalité entre κ et L_x . Cette supposition est motivée par nos observations expérimentales : quand nous avons utilisé des empilements ayant une dimension $L_x=80$ mm, la zone fluidisée occupe toute la hauteur de l'empilement ($H\sim 45$ mm) pour $\Gamma\sim 4,5$ alors que pour $L_x=40$ mm, E_F ne vaut que ~ 26 mm. Des résultats obtenus récemment [Nadler09] confirment cette tendance. En effet, une mesure de l'épaisseur fluidisée a été réalisée, à $f=50$ Hz et $\Gamma=3$, pour trois dimensions L_x de l'empilement (40, 80 et 160 mm). Une augmentation de E_F avec L_x est clairement observée.

Finalement, nous pouvons discuter de la valeur du palier atteint par E_F . En fait, au cours de nos expériences, nous observons que la valeur du palier augmente avec la hauteur initiale de l'empilement. Pour $H_i=20$ mm, tout l'empilement est fluidisé à partir de $\Gamma=3,4$, donc la valeur du palier est dictée ici par la hauteur de l'empilement. Pour H_i égale respectivement à 30, 40 et 60 mm, nous obtenons respectivement ces valeurs 27, 28 et 32 mm. La question que nous nous posons est la suivante qu'en est-il de la valeur du palier, si on continue à augmenter la hauteur initiale de l'empilement ?

Nous n'avons pas suffisamment d'éléments pour répondre à cette question. Mais nous pensons que la valeur du palier ne sera pas sensiblement modifiée en augmentant H_i .

IV.B. Optimisation de la compacité globale

Un des objectifs de ces travaux est d'optimiser le remplissage des boîtes pour fusibles et ceci en réalisant un empilement granulaire le plus dense possible. Dans ce qui suit, nous avons testé deux protocoles expérimentaux.

IV.B.1. Vibration répétée

Dans l'étude expérimentale, nous avons constaté qu'une vibration horizontale provoque une densification de l'empilement granulaire pour toute une gamme d'accélération allant de 0,3 g à 6,3 g. L'étude de l'influence de la compacité initiale C_i sur la compacité relaxée C_r a montré que plus C_i augmente, et plus C_r augmente. Se basant sur ces deux

conclusions, nous avons pensé réaliser un protocole expérimental, appelé P1, consistant à répéter une expérience de « vibrations (Γ , f) + relaxation » n fois à la suite (voir figure IV-2-a). En effet, partant d'un empilement initialement peu dense, la première expérience le rendrait plus dense, la deuxième encore plus et ainsi de suite (voir le principe figure IV-2-b).

Nous avons testé ce protocole expérimental pour deux valeurs d'accéléérations relatives Γ (1,7 et 3,8) à une fréquence $f=50$ Hz. Les résultats obtenus sont présentés sur la figure IV-3.

Pour $\Gamma=1,7$, nous observons une légère augmentation de la compacité relaxée au fil des expériences mais elle reste dans la limite des erreurs de mesure. Dans tous les cas, cette augmentation reste très inférieure à ce que nous espérons comme l'expliquait la figure IV-2-b. En effet, entre la première et la deuxième expérience, nous gagnons 0,17 % en compacité et 0,09 % entre la deuxième et la troisième expérience. Si nous considérons qu'il s'agit bien d'un gain de compacité, il serait quasi-impossible d'atteindre une compacité supérieure à 67 % dans un temps raisonnable.

Pour $\Gamma=3,8$, la valeur de la compacité relaxée reste inchangée pour les différentes expériences.

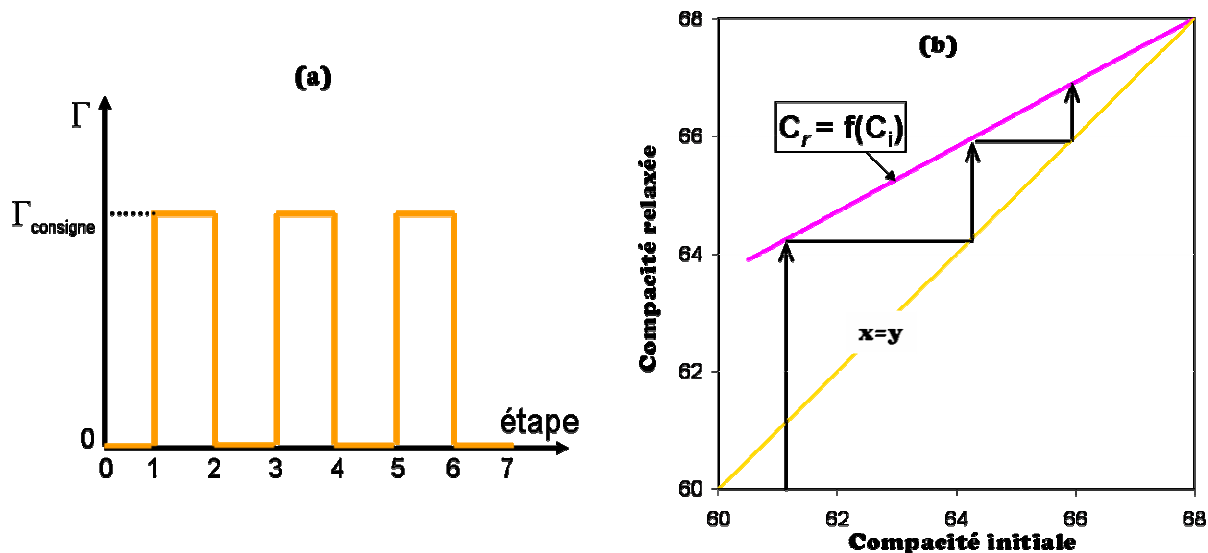


Figure IV-2 : Principe du gain de compacité relaxé espéré en adoptant un protocole P1 identique (« vibration à Γ puis relaxation ») n fois de suite .

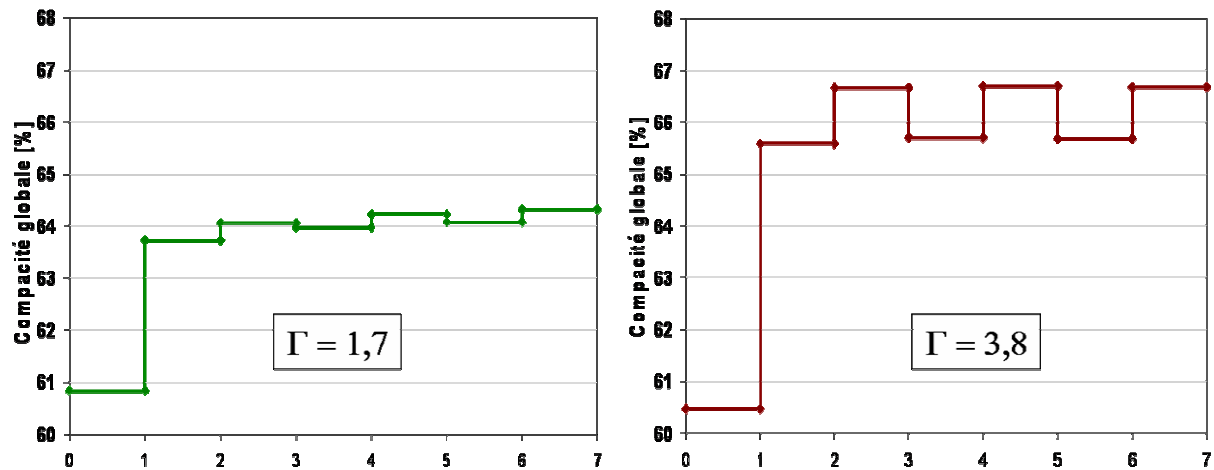


Figure IV-3 : Résultats expérimentaux obtenus montrant que le protocole P1 n'est pas satisfaisant.

Ces deux résultats montrent l'incapacité de ce protocole expérimental à optimiser la compacité relaxée de l'empilement. Pour expliquer l'échec de ce protocole, il faut s'intéresser à l'homogénéité de l'empilement en termes de compacité. En effet, l'augmentation de la compacité relaxée avec la compacité initiale, tendance observée dans l'étude expérimentale, concernait des empilements granulaires qui, à l'état initial, étaient homogènes en compacité. Ceci n'est plus le cas ici après la première expérience de « vibration+relaxation ». L'étude expérimentale a révélé que les vibrations horizontales sont une source d'hétérogénéité et cela selon plusieurs points de vue. Au cours du régime transitoire, l'empilement subit une densification hétérogène en fonction de la hauteur. Ensuite, différentes zones apparaissent en régime dynamique (stationnaire) : zone inférieure solide immobile dans le référentiel du récipient, avec deux parties différenciées, et une zone supérieure fluidisée.

Les vibrations engendrent dans la partie « solide » supérieure de l'empilement des réarrangements locaux entre les grains tendant à densifier fortement le système. L'arrêt des vibrations ne changera pas la compacité moyenne initiale dans la partie solide inférieure, et gardera la compacité meilleure obtenue dans la partie solide supérieure lors des vibrations.

L'arrêt des vibrations engendre une relaxation des grains de la zone fluidisée d'une manière à priori aléatoire, avec des blocages intergrains, effets de voûte générant une compacité moyenne.

Ainsi l'empilement alors obtenu après la première relaxation présente une hétérogénéité en termes de compacité. En effet, nous pouvons dire qu'il est composé grossièrement de trois zones : une zone inférieure peu dense, une zone intermédiaire très dense ($C > 66\%$,

voir III.B.1) et une zone supérieure qui correspond à la zone fluidisée avant relaxation. Les frontières entre ces trois zones dépendent de l'accélération des vibrations. Vibrer alors de nouveau l'empilement à la même accélération ne déplacera pas sensiblement ces frontières et de ce fait un gain de compacité ne sera pas observé.

IV.B.2. Irréversibilité-réversibilité

Dans l'étude bibliographique, nous avons rapporté les travaux de Nowak et ses collaborateurs [Nowak97] concernant la réponse d'un empilement granulaire à des vibrations verticales en termes de compacité. En effet, l'évolution de la compacité avec l'accélération présente deux branches : irréversible et réversible selon l'histoire de l'empilement. La branche irréversible est obtenue pour un empilement initialement peu dense en augmentant tout simplement l'accélération à partir de zéro. La compacité augmente avec l'accélération jusqu'à atteindre un maximum pour une valeur d'accélération relative Γ_{\max} ; ensuite elle diminue. La branche réversible est obtenue en diminuant l'accélération à partir d'une valeur supérieure à Γ_{\max} jusqu'à une valeur proche de zéro. La compacité augmente alors en diminuant l'accélération (voir figure I-5.b). On atteint des valeurs de compacité pour les faibles accélérations supérieures à celle obtenue pour Γ_{\max} . Si on recommence de nouveau ce cycle de variation de l'accélération (montée+descente), la compacité de l'empilement évolue en suivant cette branche réversible. Pour une accélération donnée, on a alors une seule valeur de compacité.

Se basant sur ces résultats, nous avons eu l'idée de transposer ce protocole expérimental à notre cas d'étude en vibrations horizontales.

Un empilement granulaire composé de sable², de dimensions $L_x \times L_y \times H_i = 40 \times 80 \times 60 \text{ mm}^3$ et de compacité initiale $C_i = 60,7 \%$, a été soumis à des vibrations horizontales de fréquence $f = 50 \text{ Hz}$ et d'accélération relative croissante jusqu'à dépassement de Γ_{\max} qui est égal à 3,8 dans notre cas. Ensuite, l'accélération a été baissée progressivement jusqu'à zéro avant de recommencer un cycle de montée et descente. Nous avons mesuré la compacité de l'empilement pour différentes accélérations à différents moments de l'expérience. Les résultats sont présentés sur la figure IV-4.

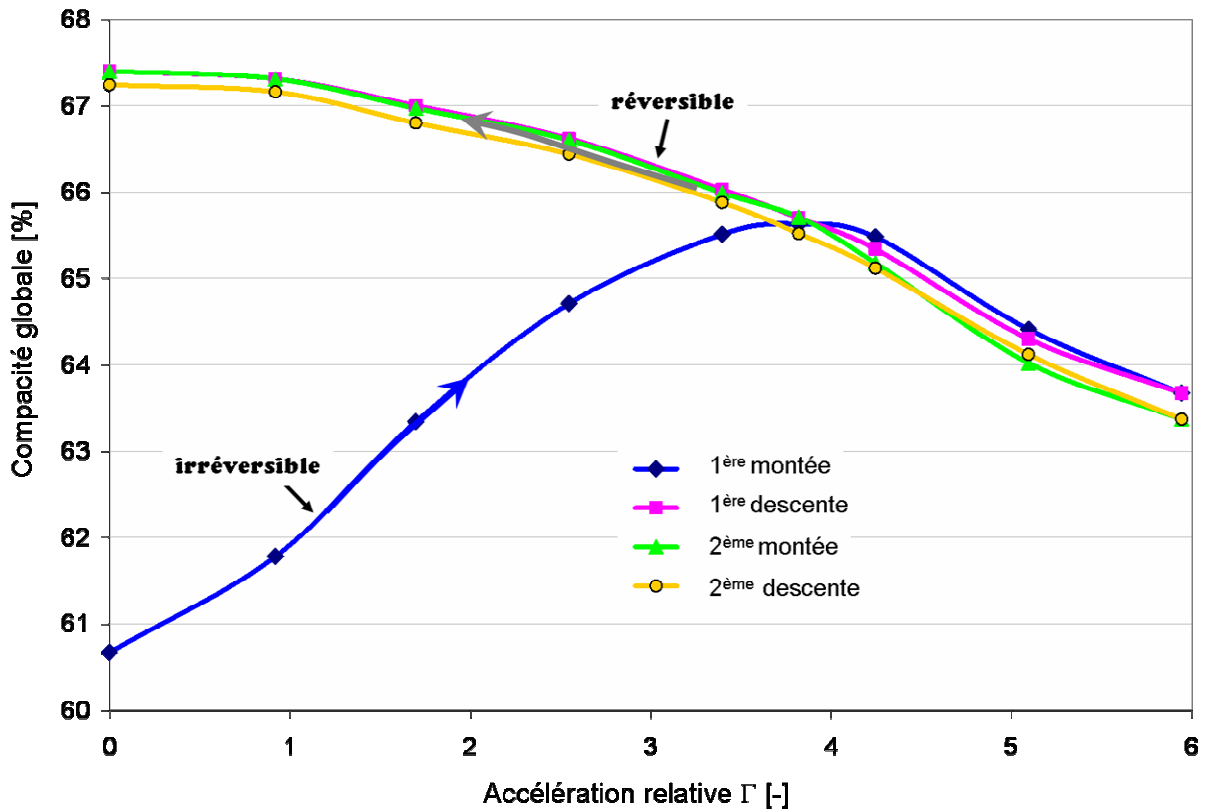


Figure IV-4. Evolution de la compacité de l'empilement au cours d'un cycle de croissance et décroissance de l'accélération. Empilement composé de sable₂, de dimensions $L_x \times L_y \times H_i = 40 \times 80 \times 60 \text{ mm}^3$ vibré à 50 Hz.

Nous retrouvons la même tendance observée par Nowak *et al.* pour les vibrations verticales. En effet, la réponse de l'empilement granulaire à des sollicitations horizontales en termes de compacité comporte deux branches : une irréversible et l'autre réversible.

La branche réversible permet d'optimiser le taux de densification. Nous obtenons une compacité finale $C_r = 67,4 \%$. Si nous avons arrêté les vibrations à $\Gamma_{\max} = 3,8$, alors d'après les résultats du III.C.3 nous aurions obtenu une compacité égale à $C_r = 66,8 \%$. Cette méthode a permis donc de réaliser un gain en compacité de $0,6 \%$. A notre avis, ce gain est dû à une relaxation plus lente des grains. L'arrêt instantané des vibrations engendre une relaxation des grains de la couche supérieure fluidisée d'une manière aléatoire. Cependant, une lente décroissance de l'accélération permet une relaxation des grains plus régulière, couche par couche. Ce qui réduit la formation des voûtes et des lacunes. Nous pensons que l'homogénéité de la partie supérieure de l'empilement est rendue meilleure avec cette méthode.

Notons finalement que la surface libre de l'empilement à la fin de l'expérience (à la fin de la décroissance de l'accélération) a une forme quasiment plane. Ce résultat est très

important pour l'application industrielle. En effet, il assure un remplissage des boîtes fusibles par du sable très régulier et partout, y compris dans les coins de la boîte. Un arrêt instantané des vibrations à partir de Γ_{\max} fige la surface libre dans une forme non plane (pour $\Gamma_{\max} = 3,8$: motif « chameau » voir figure II-26) avec des creux au niveau des 4 coins supérieurs de la boîte. De telles imperfections semblent préjudiciables pour le fonctionnement futur du fusible.

En conclusion, cette méthode permet l'optimisation de la compacité globale de l'empilement en utilisant un procédé vibratoire. Elle est composée principalement de deux étapes : vibration du milieu granulaire à une accélération supérieure à Γ_{\max} ensuite une relaxation lente de l'empilement vibré.

IV.B.3. Protocole de remplissage proposé

Dans ce paragraphe, nous souhaitons proposer un protocole expérimental pour le remplissage des boîtes fusibles en essayant de respecter les deux critères mentionnés à la fin de l'introduction : obtenir un empilement de compacité supérieure à 67 % (pour le sable2) et le plus homogène possible.

Nous venons de voir dans le paragraphe précédent un protocole expérimental permettant d'optimiser la compacité globale d'un empilement de dimensions $L_x \times L_y \times H_i = 40 \times 80 \times 60 \text{ mm}^3$. Cependant, nous avons certains doutes concernant l'homogénéité de l'empilement. La relaxation lente de l'empilement assure une bonne homogénéité de l'empilement dans sa partie supérieure, celle qui était fluidisée au cours des vibrations. La partie inférieure de l'empilement a subi une densification qui, comme nous l'avons montré dans la partie III.B.1, est hétérogène en hauteur.

Se basant sur ces différentes connaissances acquises au cours de ces travaux, nous pensons qu'un protocole P2 de remplissage en plusieurs temps avec des cycles de vibrations d'accélération croissante ensuite décroissante permettrait de répondre aux objectifs souhaités de la meilleure manière.

Pour vérifier cette supposition, nous avons réalisé une expérience avec ce protocole pour obtenir un empilement final d'une hauteur de 60 mm. Le remplissage a été réalisé en trois temps, à chaque fois une couche de 22 mm d'épaisseur a été rajoutée. Entre chaque remplissage, l'empilement a été vibré à une accélération relative $\Gamma = 4,2$. L'épaisseur fluidisée à cette accélération est autour de 21 mm ce qui permet de mettre

en vibration toute la couche rajoutée sans trop perturber la couche initiale. Ensuite, l'accélération est baissée lentement jusqu'à zéro. Avec le profilomètre optique, nous mesurons la compacité de l'empilement à chaque étape. Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau IV-2.

remplissage	C_i [%]	C_v ($\Gamma=4,2$) [%]	C_r [%]
1 ^{er}	60,5	64,4	68,1
2 ^{ème}	64,6	65,6	68,3
3 ^{ème}	66	66,3	68,2

Tableau IV-2. Evolution de la compacité globale de l'empilement au cours des différentes étapes du protocole P2. C_i, C_v et C_r correspondent respectivement aux compacités initiale, vibrée et relaxée.

Nous observons qu'à la fin de chaque étape nous avons un empilement de compacité relaxée supérieure à 68 %. Les différentes valeurs de compacité relaxée sont assez proches. Ceci assure une homogénéité de l'empilement à cette échelle.

En conclusion, un remplissage en plusieurs temps associé à une relaxation très lente de l'empilement apparaît comme le protocole expérimental permettant l'obtention d'un empilement très dense et bien homogène avec en prime une surface libre plane.

La valeur finale obtenue apparaît comme une valeur limite très difficile à dépasser, sans avoir recours à des moyens lourds comme un pressage en matrice, qu'on ne pourrait mettre en œuvre dans un procédé pour fabriquer des fusibles.

Conclusions

Ces travaux de thèse se sont inscrits dans le cadre d'un partenariat entre les centres SPIN et CIS de l'Ecole des Mines de Saint-Étienne, et l'Institut Polytechnique de Grenoble avec un industriel, Ferraz-Shawmut, leader mondial dans le domaine de fabrication des fusibles à haut pouvoir de coupure pour la protection des installations électriques industrielles. Deux laboratoires UMR CNRS de la région Rhône-Alpes appartenant à la Fédération CNRS Fédérans (Fédération Rhône-Alpes de Matériaux et Propriétés de Structure) ont collaboré pour ce travail : le LPMG (Laboratoire des Procédés en Milieu Granulaire, UMR 5148, ENSMSE-CNRS) et le Laboratoire SIMAP (Science et Ingénierie des Matériaux et Procédés - Grenoble INP-CNRS).

L'industriel utilise un procédé vibratoire pour le remplissage des boîtes fusibles (coque en céramique avec des lames métalliques placées en son centre) par du sable et la densification de ce dernier. Ce procédé utilise essentiellement des chocs périodiques horizontaux à une fréquence de 50 Hz dans le but d'obtenir un empilement granulaire le plus homogène et le plus dense possible. Pour un sable arrondi de diamètre moyen $d_{43}=517 \mu\text{m}$, la compacité moyenne recherchée est au moins égale à 67 %. Ce procédé vibratoire a été mis au point d'une manière empirique, sans en connaître de façon approfondie la phénoménologie. Il est donc difficile de trouver les conditions opératoires qui optimiseront notamment les caractéristiques de l'empilement granulaire, la durée du procédé et le coût économique.

Prenant comme point de départ cette problématique industrielle, nous avons essayé, dans une démarche scientifique, d'apporter des éléments de réponse en menant une étude expérimentale tout en développant des outils de caractérisation et de quantification des phénomènes observés, et en avançant des interprétations à ces observations .

Pour mener cette étude expérimentale, nous avons considéré des empilements granulaires modèles, sans les éléments fusibles métalliques et sans couvercle, soumis à des vibrations horizontales et sinusoïdales bien définies. Ces empilements granulaires modèles sont suffisamment proches de ceux utilisés par l'industriel pour rendre les résultats de nos recherches transposables. Les matériaux granulaires utilisés sont des sables de silice fournis par l'industriel, de forme arrondie, et de distribution

granulométrie étroite : le diamètre des grains (300 µm ou 500 µm environ suivant les sables utilisés) est suffisant pour éviter toute agglomération, même en atmosphère humide. Les empilements étudiés n'ont été soumis qu'aux forces de pesanteur et aux forces générées par le pot vibrant.

La première tâche de ce travail a été la mise au point d'un dispositif expérimental permettant l'obtention de vibrations horizontales bien contrôlées. Ce dispositif est composé d'un pot vibrant électromagnétique relié à une table vibrante guidée dans son mouvement par un système « rail+chariot » relevant de la mécanique de précision. Le matériau granulaire est contenu dans un récipient en plexiglas® à parois transparentes collé sur la table vibrante. Grâce à des accéléromètres de contrôle, nous avons pu définir un domaine d'étude en fréquence [20 - 100 Hz] et en accélération [0 - 7 g] nous assurant des conditions fiables. En particulier, nous avons obtenu :

- une bonne correspondance qualitative et quantitative entre les vibrations de consigne et les vibrations obtenues,
- un niveau négligeable de vibrations parasites dans les directions transverse et verticale,
- une bonne transmission des vibrations au récipient grâce à un protocole de collage bien défini. La variation maximale de l'accélération enregistrée par rapport à la consigne est inférieure à 5 %.

Les vibrations imposées sont de forme sinusoïdale :

$$x(t) = A \sin(2\pi f t)$$

où A et f sont respectivement l'amplitude et la fréquence des vibrations.

On définit l'accélération relative Γ (sans dimension) par :

$$\Gamma = \frac{A(2\pi f)^2}{g}$$

avec g l'accélération de la pesanteur.

Les parois latérales transverses et parallèles à la direction des vibrations sont appelées respectivement parois Nord/Sud et parois Est/Ouest.

Une première étude phénoménologique réalisée sur un empilement granulaire composé du sable2 (500 µm de diamètre) et de dimensions $L_x \times L_y \times H_i = 40 \times 80 \times 60 \text{ mm}^3$ a mis en évidence plusieurs phénomènes qui modifient l'homogénéité de l'empilement et sa

compacité moyenne. Une expérience type consiste à augmenter progressivement l'accélération à partir de zéro, pour une fréquence fixée $f=50$ Hz. Nous avons observé différents comportements selon la valeur de l'accélération :

- $\Gamma < 0,5$: l'empilement se comporte comme un bloc solide. Il est immobile dans le référentiel du récipient.
- $0,5 < \Gamma < \Gamma_{c1} \approx 1,15$: à la surface libre de l'empilement, un mouvement désordonné évanescent de quelques grains est observé à partir de $\Gamma=0,5$. Il s'accompagne par une légère diminution de la hauteur de l'empilement. Il devient persistant dans le temps à partir de $\Gamma_{c0}=0,7$ et s'accroît en augmentant l'accélération.
- $\Gamma_{c1} < \Gamma < \Gamma_{c2} \approx 2,8$: une transition d'un mouvement désordonné vers un mouvement ordonné des grains est observée à la surface libre. Elle s'accompagne de l'apparition de deux rouleaux de convection contrarotatifs dans la partie supérieure de l'empilement tandis que la partie inférieure demeure immobile dans le référentiel de la boîte. Le mouvement convectif est composé d'un flux descendant des grains aux niveaux des parois Nord/Sud et un flux ascendant au milieu de l'empilement, parallèlement aux faces Nord/Sud. La surface libre de l'empilement adopte la forme d'un dôme.
- $\Gamma_{c2} < \Gamma < 4$: à Γ_{c2} , on constate l'apparition de deux dômes supplémentaires parallèles aux parois Nord/Sud. Nous avons appelé ce motif « chameau ». Vu de la paroi Nord, l'empilement est toujours composé d'une couche supérieure fluidisée et d'une couche inférieure à comportement solide.
- $4 < \Gamma$: vu de la paroi Nord, l'empilement est composé de trois zones. Une couche supérieure fluidisée, une couche inférieure à comportement solide et une zone intermédiaire perturbée avec un lent mouvement granulaire. En augmentant l'accélération, la perturbation prend de l'ampleur et, pour $\Gamma > 6$, affecte toute la partie inférieure de l'empilement, avec un lent flux ascendant des grains. Nous avons également remarqué que les deux dômes parallèles périphériques se rapprochent l'un de l'autre en augmentant l'accélération et finissent par fusionner en un unique dôme central pour $\Gamma_{c3} \approx 6,2$.

A partir de cette étude phénoménologique, nous avons voulu caractériser l'empilement granulaire en quantifiant deux observables. Premièrement, l'épaisseur des rouleaux de convection en mesurant les vitesses de chute des grains à la paroi Nord. Deuxièmement, la compacité moyenne de l'empilement. Pour réaliser cette caractérisation, nous avons mis en point deux méthodes expérimentales.

Pour mesurer la vitesse des grains à la paroi à partir d'images obtenues avec une caméra CCD ultra-rapide, nous avons mis en point un logiciel de type PIV en collaboration avec le centre CIS, et dans le cadre du laboratoire CNRS LPMG. Ce logiciel a été validé et paramétré à notre cas d'étude pour pouvoir être utilisé dans la mesure des champs de déplacement des grains.

Pour mesurer la compacité moyenne de l'empilement aux différents stades de l'expérience (état initial, état vibré et état relaxé), nous avons mis en point une technique de profilométrie optique, pilotée par le logiciel Labview, afin de déterminer la forme exacte de la surface libre. Ensuite, par simple intégration, nous obtenons la compacité avec une très bonne précision (<0,5%).

Des observations préliminaires ont montré que, lorsqu'un empilement granulaire est soumis à des vibrations horizontales, il atteint un régime stationnaire au bout d'un laps de temps (de l'ordre de quelques secondes) qui dépend de la vitesse de montée en puissance du pot vibrant. Nous avons remarqué qu'au cours de ce régime transitoire, l'empilement subit une densification.

Nous avons réalisé des mesures de champs de déplacement des grains à la paroi Nord au cours du régime transitoire pour différentes accélérations (fréquence $f=50$ Hz). Nous avons observé qu'en partant d'un empilement initialement homogène en compacité, une première source d'hétérogénéité est introduite dans l'empilement par une densification non homogène en altitude. Pour une altitude z donnée, le taux de densification local dans l'empilement augmente avec l'accélération tant que la fluidisation n'a pas atteint cette altitude. Pour des accélérations augmentant de 0,7 à 3 g, il existe un front de densification qui se déplace avec l'accélération vers le fond du récipient.

Nous nous sommes intéressés par la suite à la détermination de l'épaisseur fluidisée E_F au cours du régime stationnaire. Pour cela, nous avons introduit la notion de vitesse critique de fluidisation qui permet à partir d'un profil vertical de vitesse de distinguer la zone fluidisée des autres zones. Nous avons déterminé l'évolution de cette épaisseur avec l'accélération des vibrations. Nous avons observé alors trois comportements :

- Zone 1 : $E_F = 0$ avant la transition vers la fluidisation.
- Zone 2 : E_F augmente avec Γ : apparition et expansion des rouleaux de convection.
- Zone 3 : E_F semble tendre vers un palier.

Nous avons examiné également l'influence de divers paramètres sur l'évolution de l'épaisseur fluidisée avec l'accélération : la compacité initiale de l'empilement, la hauteur initiale de l'empilement et le sens de variation de l'accélération (pas d'hystérésis observé). Nous avons montré que cette évolution ne dépend pas de ces paramètres. Cependant, si on augmente la fréquence des vibrations, alors le seuil de fluidisation augmente et l'épaisseur fluidisée diminue pour les accélérations faibles et moyennes. Le milieu granulaire présente plusieurs paramètres qui peuvent éventuellement influencer l'évolution de l'épaisseur fluidisée avec Γ : nature du matériau, taille et/ou morphologie des grains.

Une part importante de l'étude concerne la compacité moyenne de l'empilement. Nous avons mesuré son évolution avec l'accélération (fréquence $f=50$ Hz) pendant le régime stationnaire (sous vibrations) et après arrêt des vibrations. Dans les deux cas, nous avons trouvé que la compacité augmente avec l'accélération pour atteindre un maximum avant de diminuer ensuite. La valeur de l'accélération qui maximise la compacité, Γ_{\max} , est conservée au cours de la relaxation. Elle est égale à 3,8 pour un empilement de hauteur initiale $H_i=60$ mm et diminue à 2,5 pour $H_i=30$ mm. Elle n'est pas affectée par la valeur de la compacité initiale tant que cette dernière reste inférieure à 66,5 %. Au-delà, elle se déplace vers les faibles valeurs d'accélération. L'influence de la compacité initiale de l'empilement est très importante pour les faibles accélérations. Elle devient sans importance pour les fortes accélérations pour lesquelles l'histoire de l'empilement est effacée, car alors le brassage des grains s'étend à tout l'empilement.

Finalement, dans un dernier chapitre « Interprétation », nous avons proposé un modèle simple de bille sur un support oscillant pour prédire la valeur de Γ_{c0} (l'apparition du frémissement). Ce modèle prédit une valeur de Γ_{c0} égale au coefficient de friction inter-grain, ce qui est confirmé par des expériences supplémentaires.

Ensuite, nous avons proposé une loi empirique pour prédire l'évolution de l'épaisseur des rouleaux de convection avec Γ au-delà d'une valeur minimum Γ^* :

$$E_F = \kappa \cdot \sqrt{(\Gamma - \Gamma^*)}$$

Une dernière partie a été consacrée à l'optimisation de la compacité globale de l'empilement à l'état relaxé. Nous avons montré qu'une relaxation lente de l'empilement, après qu'il a subi une vibration à une accélération Γ supérieure à Γ_{\max} , est la meilleure

façon d'optimiser la compacité. Nous avons conclu en proposant à l'industriel un protocole expérimental de remplissage en plusieurs étapes, avec des cycles de variation de l'accélération bien définis. Nous avons appliqué ce protocole et nous obtenons effectivement une compacité supérieure à 68 %, la plus forte que nous ayons pu obtenir avec le procédé de vibration utilisé.

Cette étude ouvre plusieurs perspectives pour des recherches futures. En effet, grâce à la mise au point d'un dispositif expérimental, une étude paramétrique pourrait être poursuivie pour approfondir notre compréhension de l'influence de la fréquence et des paramètres matériaux sur l'épaisseur fluidisée et sur la compacité de l'empilement. L'influence des dimensions de l'empilement devrait également être étudiée afin de déterminer des lois d'échelle éventuelles, ou observer de nouveaux phénomènes.

Enfin, une modélisation numérique apparaît comme extrêmement intéressante pour une meilleure compréhension des mécanismes mis en jeu pendant les différentes étapes d'une expérience de vibration. L'utilisation de simulations par des logiciels comme PFC3D devrait apporter des ouvertures et des compléments très utiles pour préciser les champs de vitesse, de compacité, de contraintes dans le milieu granulaire, avant pendant ou après la sollicitation mécanique.

Annexe 1 : Mesure de la coulabilité

Deux appareils de mesure de la coulabilité existent. Le premier est le testeur de poudres Hosokawa illustré sur la figure V-1. C'est un appareil permettant d'évaluer les paramètres d'écoulement et de déferlement d'une poudre. L'évaluation de l'écoulement d'une poudre nécessite l'utilisation de 4 paramètres qui influent sur le phénomène. Ces facteurs sont l'angle de repos, l'angle de spatule, la compressibilité, la cohésion ou l'uniformité. Le déferlement est la tendance d'une poudre à s'écouler par plaques. L'évaluation de ce paramètre nécessite 3 mesures sur l'angle de chute, la dispersibilité et l'angle de différence. A chaque mesure correspond une note qui est reportée dans la fiche de mesure (figure V-2).

Le second est le Flodex appareil beaucoup plus simple d'utilisation (figure V-1.b). il s'agit de verser la poudre dans le cylindre. Le fond du cylindre est un disque avec un trou en son milieu de rayon r . Au début, le trou est fermé grâce à une trappe basculante. Ensuite, il est ouvert et on observe si la poudre coule par le trou ou non. Si le test est positif, on diminue le rayon du trou en utilisant d'autres disques jusqu'à obtenir un blocage de l'écoulement. Si le test est négatif, on augmente le trou jusqu'à obtention de l'écoulement. Il donne un indice relatif de coulabilité d'une poudre. L'indice de coulabilité est le diamètre du plus petit trou pour lequel il y a écoulement.

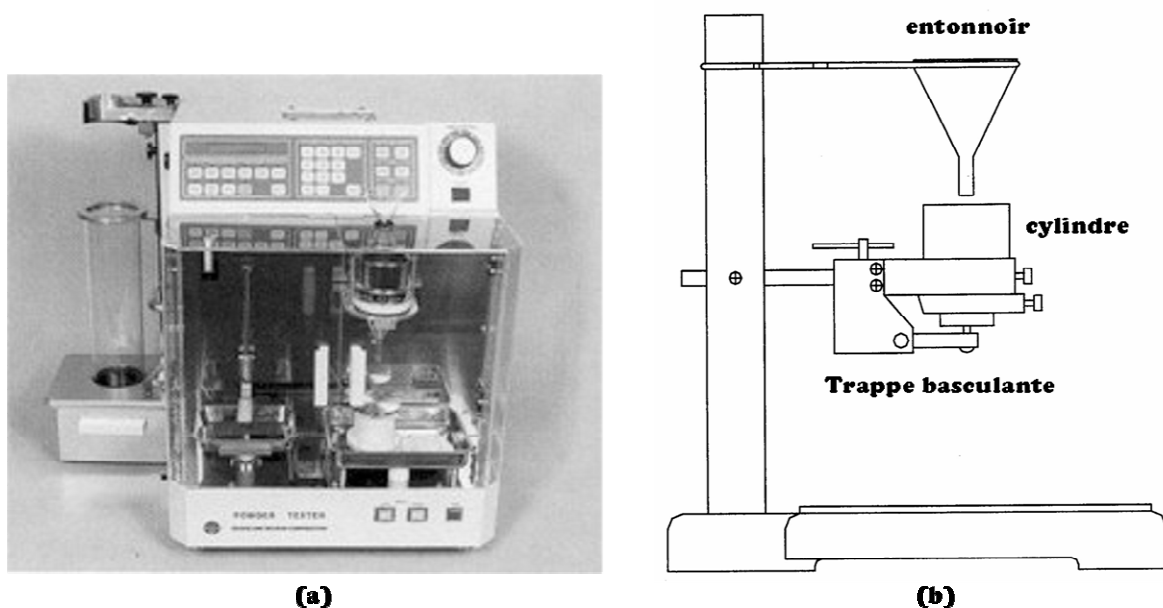


Figure V-1 : (a) Testeur de poudres Hosokawa (b) Flodex.

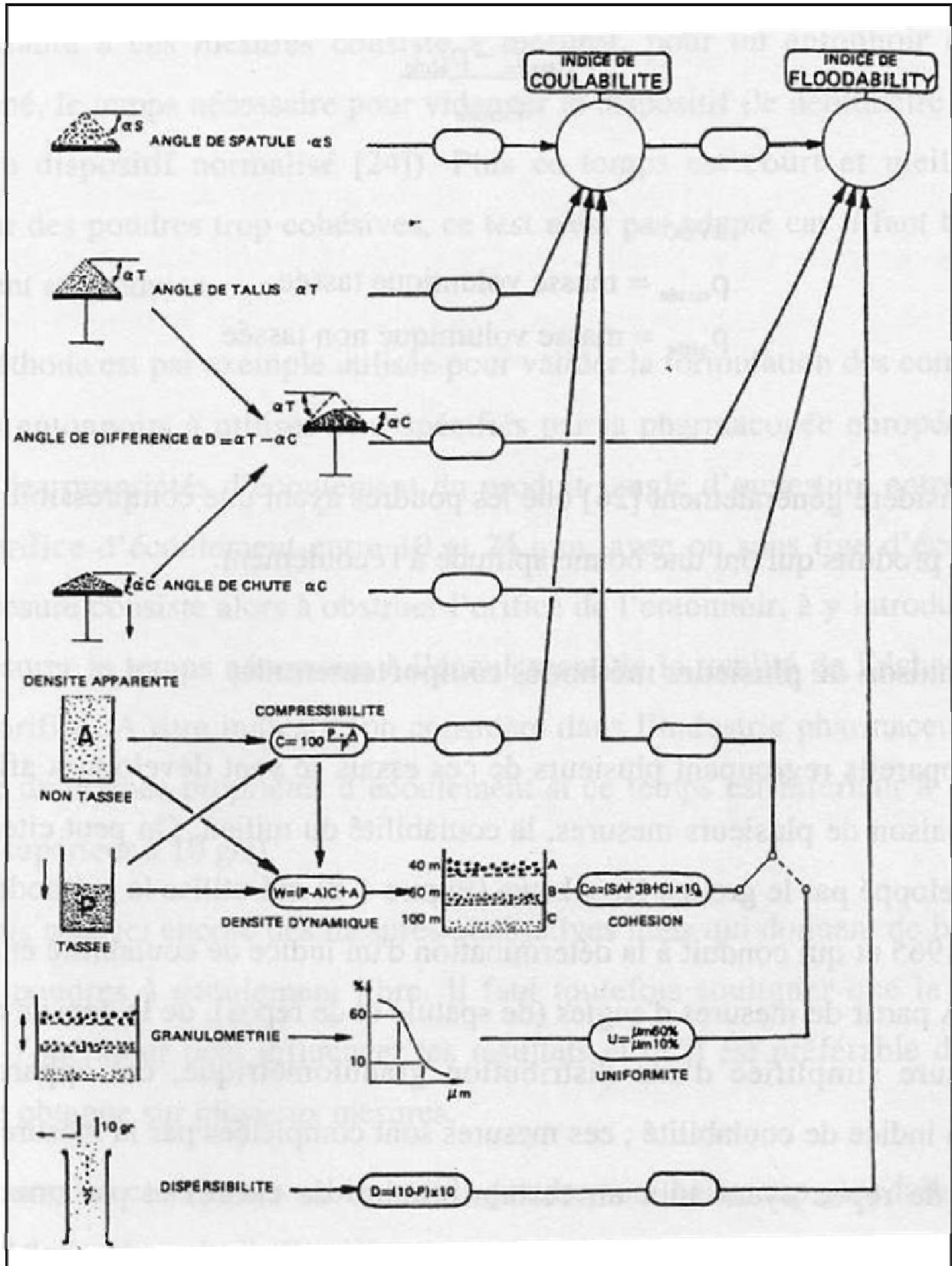


Figure V-2 : Principe de mesure du testeur de poudres Hosokawa

Annexe 2 : Profils d'affaissements

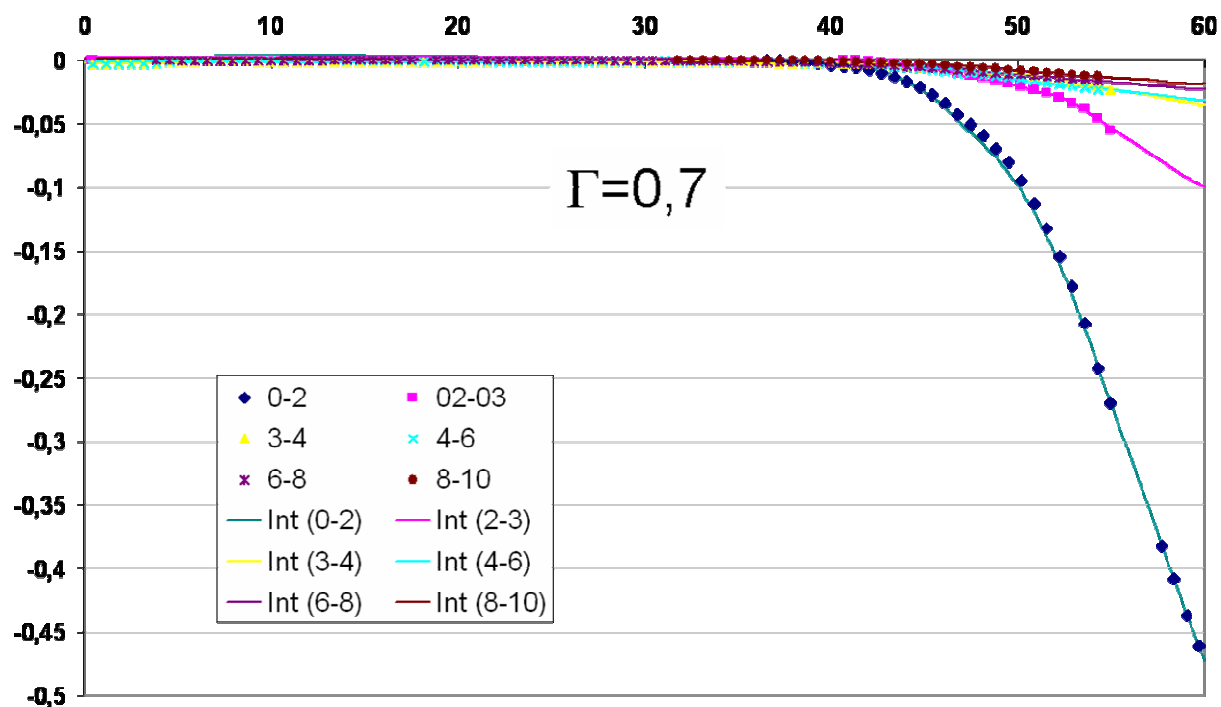


Figure V-5 : Profils d'affaissements pour $\Gamma=0,7$.

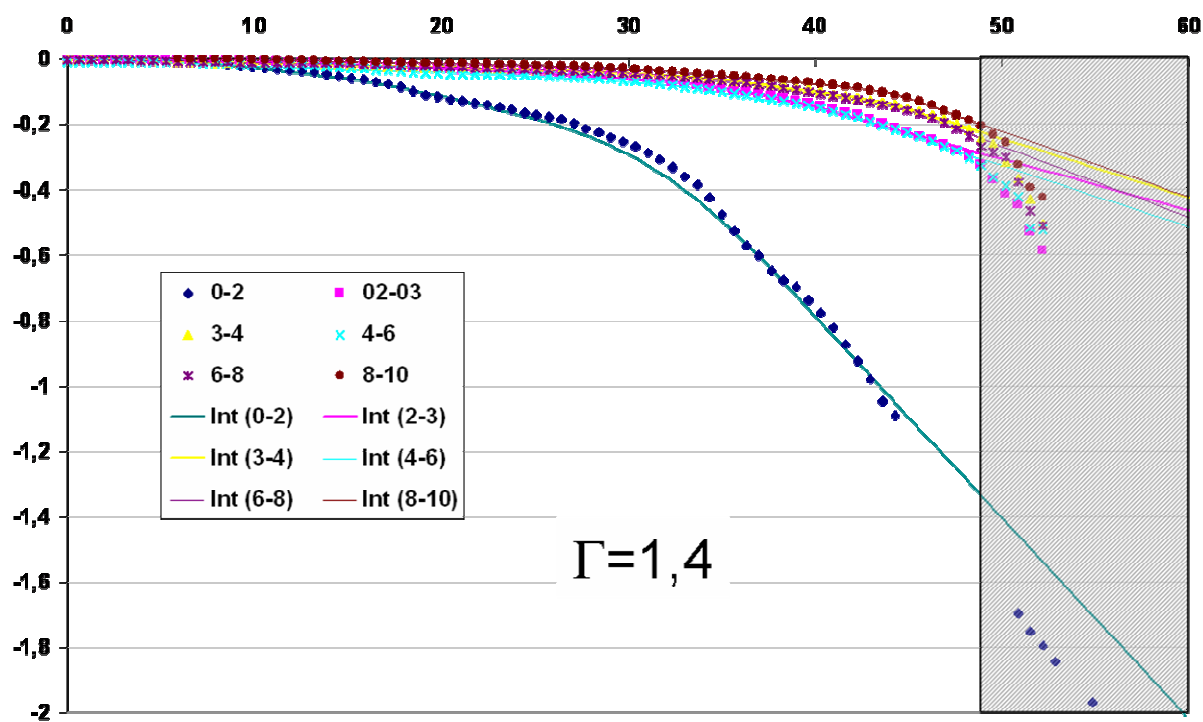


Figure V-6 : Profils d'affaissements pour $\Gamma=1,4$.

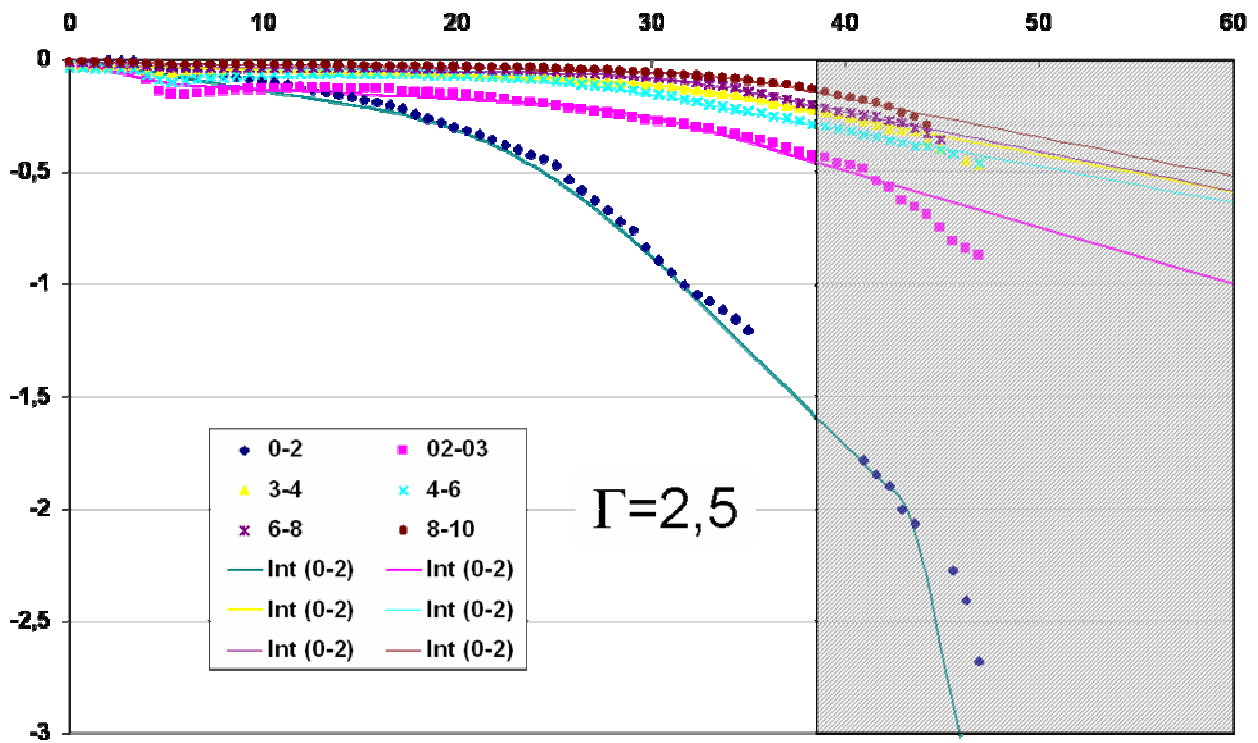


Figure V-7 : Profils d'affaissements pour $\Gamma=2,5$.

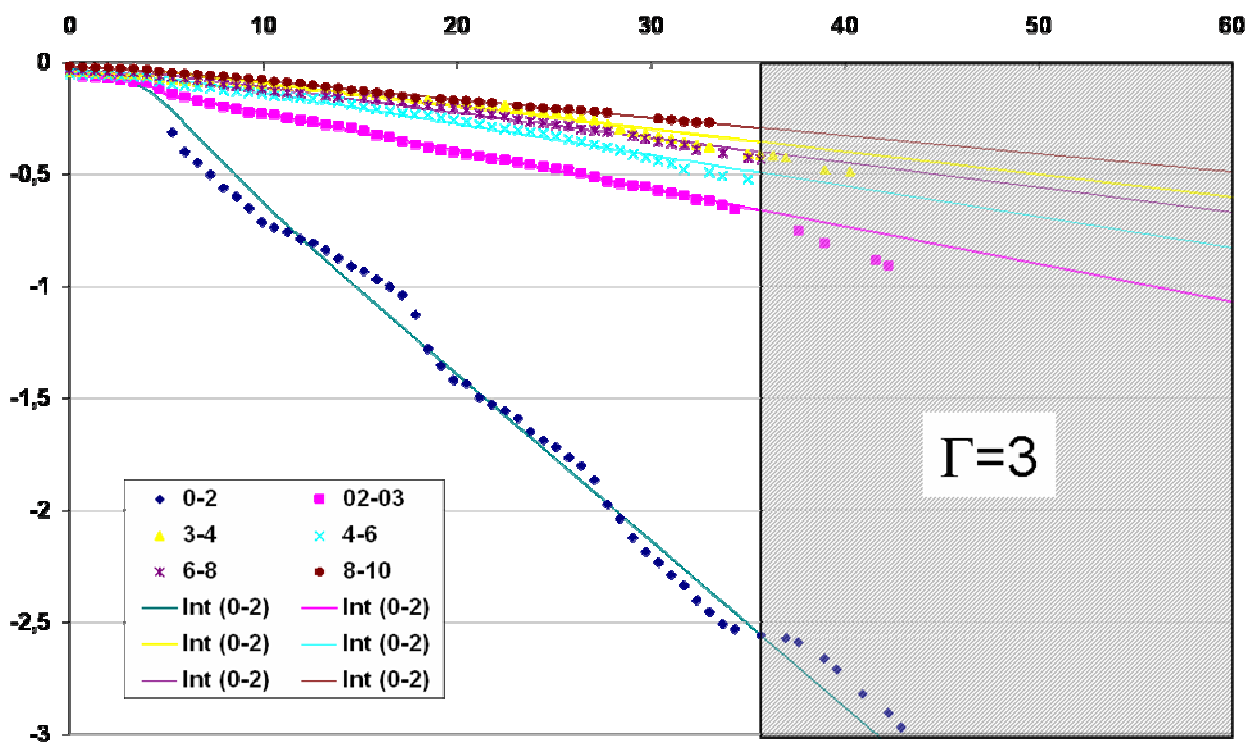


Figure V-8 : Profils d'affaissements pour $\Gamma=3$.

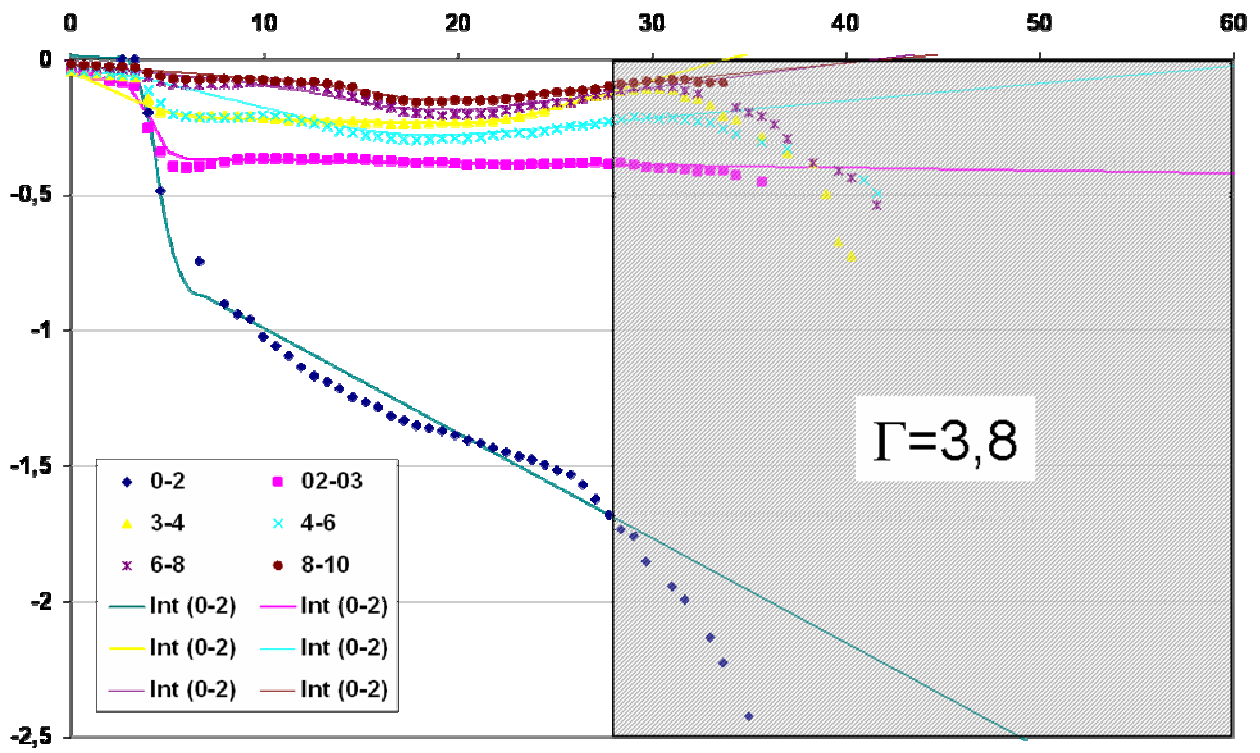


Figure V-9 : Profils d'affaissements pour $\Gamma=3,8$.

Annexe 3 : Profils de vitesses

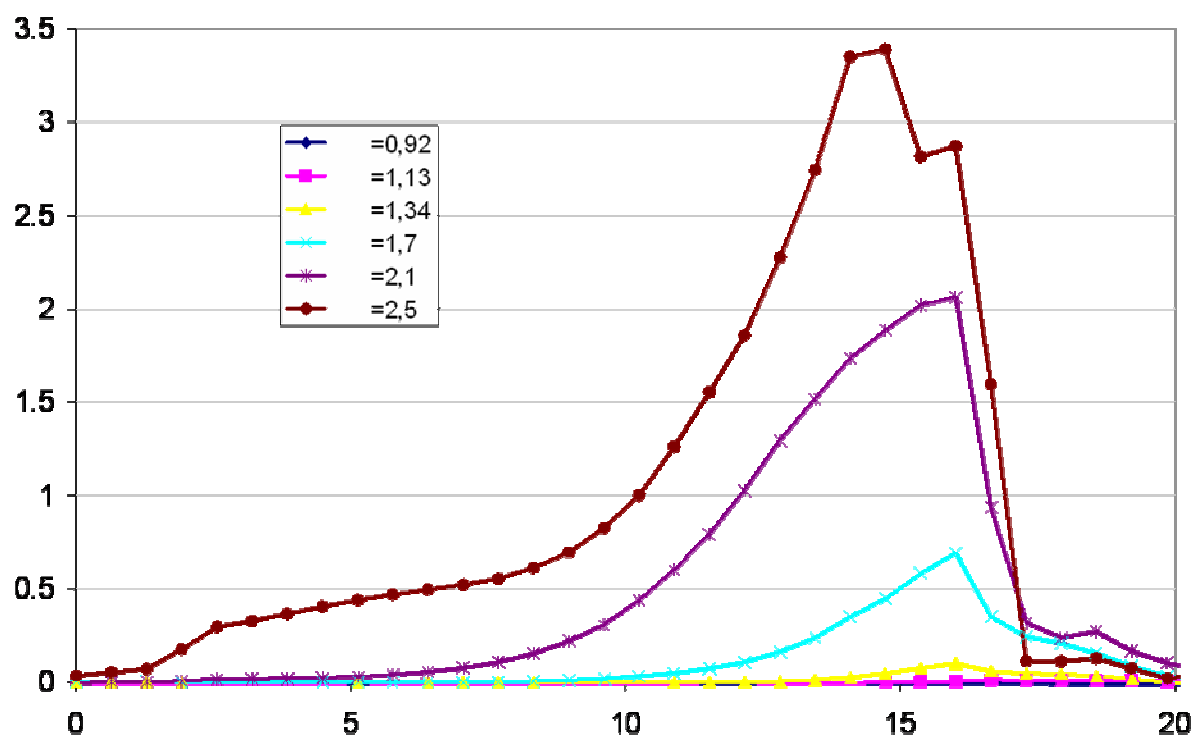


Figure V-10 : $L_x \times L_y \times H_i = 40 \times 80 \times 20$ mm³, $f=50$ Hz.

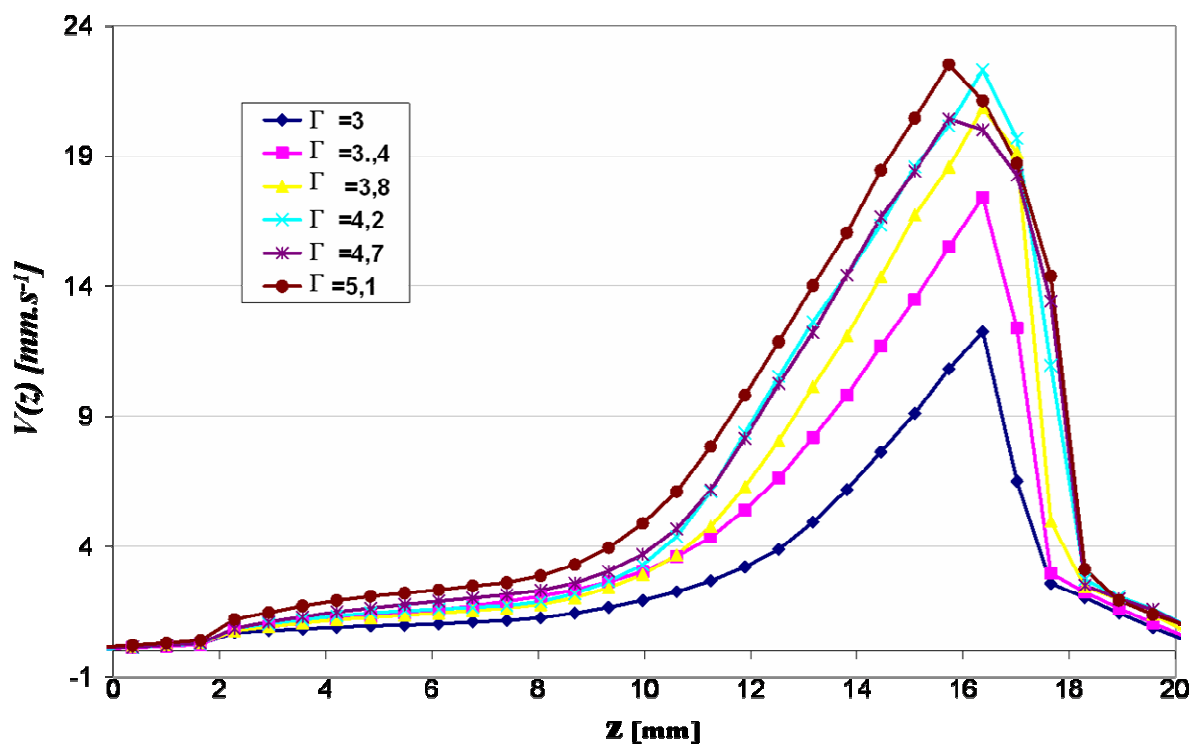


Figure V-11 : $L_x \times L_y \times H_i = 40 \times 80 \times 20$ mm³, $f=50$ Hz.

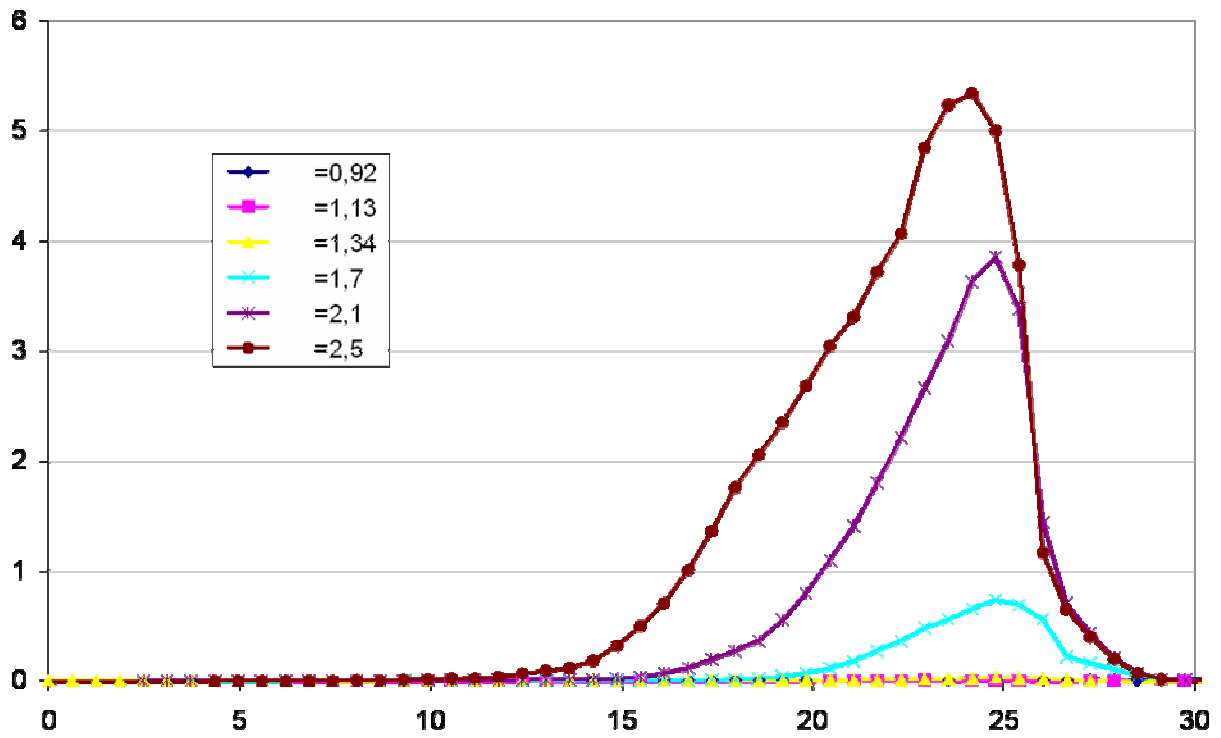


Figure V-12 : $L_x \times L_y \times H_i = 40 \times 80 \times 30 \text{ mm}^3$, $f = 50 \text{ Hz}$.

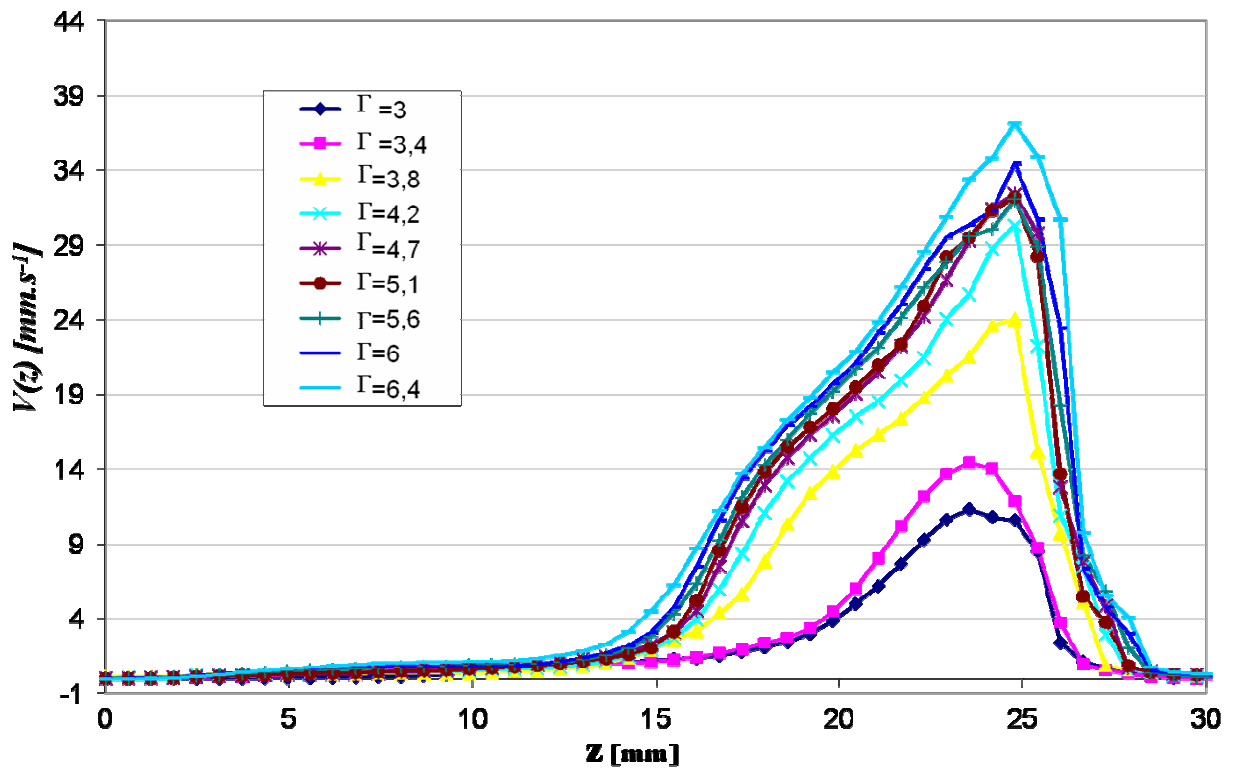


Figure V-13 : $L_x \times L_y \times H_i = 40 \times 80 \times 30 \text{ mm}^3$, $f = 50 \text{ Hz}$.

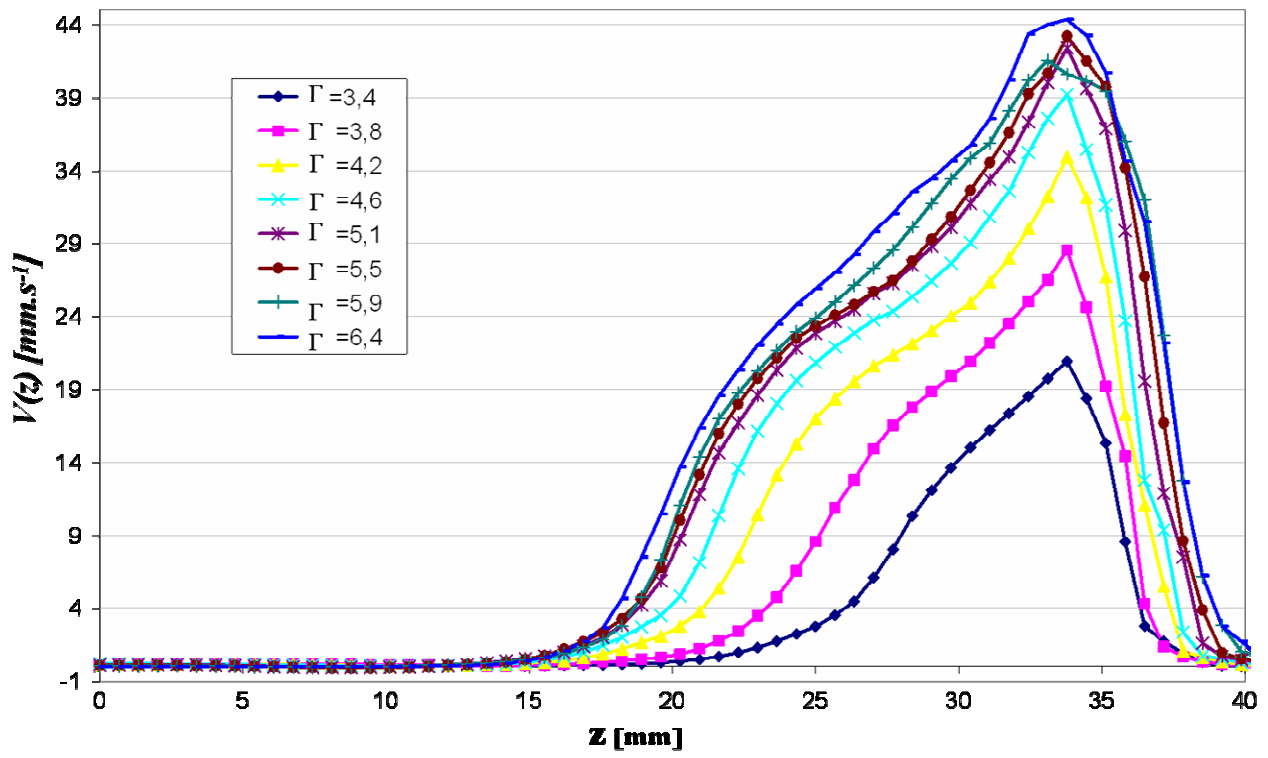


Figure V-14 : $L_x \times L_y \times H_i = 40 \times 80 \times 40 \text{ mm}^3$, $f = 50 \text{ Hz}$.

Liste des publications

- Revues (ACLI) :**
1. **A. Raihane**, O. Bonnefoy, J-L. Gelet, J-M. Chaix and G. Thomas, Experimental study of a 3D dry granular medium submitted to horizontal shaking, *Powder Technology*, Volume 190, Issues 1-2, 5 March 2009, Pages 252-257.
 2. J. Debayle, **A. Raihane**, A. Belhaoua, O. Bonnefoy, G. Thomas, J-M. Chaix and J-C. Pinoli, Velocity field computation in vibrated granular media using an optical flow based multiscale image analysis method, *Image Anal Stereol*, (accepté)

Liste des communications

- Conférences**
3. **A. Raihane**, O. Bonnefoy, J-L. Gelet, J-M. Chaix et G. Thomas, Etude expérimentale des mouvements d'un milieu granulaire 3D vibré horizontalement, *Actes du congrès Science et Technologie des Poudres & Poudres et Matériaux Frittés (STP2007)*, Ecole des Mines d'Albi, 23 – 25 mai 2007, CD-ROM, 7 pages (présentation orale)
 4. **A. Raihane**, O. Bonnefoy, J-L. Gelet, J-M. Chaix et G. Thomas, Procédé de compaction de sable par vibrations horizontales, *Actes du 11^{ème} Congrès de la Société Française de Génie des Procédés (SFGP2007)* Saint-Étienne 9-11 Octobre 2007, Récents Progrès en Génie des Procédés – Numéro 96 – 2007 ISBN 2-910239-70-5, Ed. SFGP, Paris, France (poster).
 5. **A. Raihane**, O. Bonnefoy, J-L. Gelet, J-M. Chaix et G. Thomas, Compaction by horizontally vibrated 3D granular materials. Application to sand filling and Compaction in electrical fuses, *Proceedings of the 8th International Conference on Electrical Fuses and their Applications (ICEFA2007)*, September 10-12, 2007, Clermont-Ferrand, France, ISBN 978-2-84516-363-8 (présentation orale).
 6. **A. Raihane**, O. Bonnefoy, J-L. Gelet, J-M. Chaix et G. Thomas, Densification of a 3D granular bed by horizontal vibrations, *Proceedings of the XVth International Congress on Rheology (ICR2008)* August 3-8, 2008, Monterey, California, USA. AIP conference proceedings, volume 1027, 932-934, 2008 (présentation orale).
 7. **A. Raihane**, O. Bonnefoy, , J-L. Gelet, J-M. Chaix et G. Thomas. Convective flow in a horizontally vibrated 3D granular packing, *Powders&Grains* 2009, July 13-17, 2009, Colorado, USA. (accepté).

8. S. Nadler, O. Bonnefoy, **A. Raihane**, J-L. Gelet, J-M. Chaix et G. Thomas. Numerical simulation of granular media under horizontal vibration. Powders&Grains 2009, July 13-17, 2009, Colorado, USA. (accepté).

9. J-M. Chaix, **A. Raihane**, O. Bonnefoy, J-L. Gelet, et G. Thomas.

Analyse de la densification d'un sable vibré à partir de mesures de déplacements en surface et aux parois, STPMF2009 (accepté pour présentation orale).

10. O. Bonnefoy, S. Nadler, **A. Raihane**, J-L. Gelet, J-M. Chaix et G. Thomas.

Modelling the dependence of process parameters on the densification of granular media under horizontal vibrations, SFGP2009 (accepté)

Conférences

11. **A. Raihane**, O. Bonnefoy, J-L. Gelet, J-M. Chaix et G. Thomas,

sans actes :

Etude expérimentale d'un milieu granulaire soumis à des vibrations horizontales, GdR MiDi Carry le Rouet, 29-31 Mai, 2007.

12. J-M. Chaix, **A. Raihane**, O. Bonnefoy, J-L. Gelet, et G. Thomas, Approche par simulation numérique des mouvements d'un milieu granulaire 3D vibré horizontalement, GdR MiDi Carry le Rouet, 29-31 Mai, 2007.

Bibliographie

- [An08]** : X. Z. An *et al.* *Effect of vibration condition and inter-particle frictions on the packing of uniform spheres.* Powder Technology, 188, 102-109, 2008.
- [Aumaître07]** : S. Aumaître *et al.* *Comparing flow thresholds and dynamics for oscillating and inclined granular layers.* Phys. Rev. E, 75, 061307, 2007.
- [Belhaoua07]** : A. Belhaoua. *Analyse et Modélisation Dynamique d'images de structures granulaires soumises à des vibrations.* Master2 Image, Vision, Signal, Université Jean Monet Saint-Étienne , 2007.
- [Debayle08]** : J. Debayle *et al.* *Velocity field computation in vibrated granular media using an optical flow based multiscale image analysis method.* Image Anal Stereol, 28, 35-43, 2009.
- [Evesque89]** : P; Evesque and J. Rajchenbach. *Instability in a sand heap.* Phys. Rev. Lett. 62, 44-46, 1989.
- [Falcon98]** : E. Falcon, C. Laroche, S. Fauve and C. Coste. *Collision of 1-D column of beads with a wall.* Eur. Phys. J. B, 5, 111-131, 1998.
- [Faraday1831]** : M. Faraday. *On a peculiar class of acoustical figures and on certain forms assumed by groups of particles upon vibrating elastic surfaces.* Philosophical Transactions of the Royal society of London, 52, 299-340, 1831.
- [Ferraz74]** : Ferraz-Shawmut. *Notice technique t72 protistor.* Technical report ,1974.
- [Geng01]** : J. F. Geng *et al.* *Memory in two-dimensional heap experiments.* Phys. Rev. E, 64(6), 060301, 2001.
- [Hsiau98]** : S. S. Hsiau and S. J. Pan. *Motion state transitions in a vibrated granular bed.* Powder Technology, 96(3), 219-226, 1998.
- [Hsiau02a]** : S. S. Hsiau, P. C. Wang, and C. H. Tai. *Convection cells and segregation in a vibrated granular bed.* Aiche Journal, 48(7), 1430-1438, 2002.
- [Hsiau02b]** : S. S. Hsiau, M. Y. Ou, and C. H. Tai, *The flow behavior of granular material due to horizontal shaking.* Advanced Powder Technology, 13(2), 167-180. 2002.

- [Huerta05]** : Huerta, D.A., *et al.*, *Archimedes' principle in fluidized granular systems*. Phys. Rev. E, 72(3), 2005.
- [Jaeger96]** : H. M. Jaeger, S. R. Nagel and R. P. Behringer. *Granular solids, liquids and gases*. Rev. Mod. Phys. 68, 1259-1273, 1996.
- [Khosropour97]** : R. Khosropour *et al.* *Convection and size segregation in a Couette flow of granular material*. Phys. Rev. E, 56(4), 1361–1367, 1997.
- [Knight95]** : J. B. Knight *et al.* *density relaxation in a vibrated granular material*. Phys. Rev. E, 51(5), 3957 – 3963, 1995.
- [Knight96]** : J. B. Knight *et al.* *Experimental study of granular convection*. Phys. Rev. E, 54, 5726 – 5738, 1996.
- [Kondic05]** : L. Kondic and R. P. Behringer. *Elastic energy, fluctuations and temperature for granular materials*. Powders & Grains, 397-400, 2005.
- [Kudrolli04]** : A. Kudrolli. *Size separation in vibrated granular matter*. Rep. Prog. Phys. 67, 209-247, 2004.
- [Landry03]** : J. W. Landry *et al.* *Confined granular packings: structure, stress and forces*. Phys. Rev. E, 67(4), 041303, 2003.
- [Laroche89]** : C. Laroche, S. Douady and S. Fauve. *Convective flow of granular masses under vertical vibrations*. Journal de Physique, 50(7), 699-706, 1989.
- [Liffman97]** : K. Liffman, G. Metcalfe, and P. Cleary. *Granular convection and transport due to horizontal shaking*. Phys. Rev. Lett, 79(23), 4574-4576. 1997.
- [Medved99]** : M. Medved *et al.* *Convection in horizontally vibrated granular material*. Chaos, 9(3), 691-696. 1999.
- [Medved00]** : M. Medved, H. M. Jaeger and S. R. Nagel. *Modes of response in horizontally vibrated granular matter*. Europhys. Lett, 52, 66-72, 2000.
- [Medved02]** : M. Medved. *Connections between response modes in a horizontally driven granular material*. Phys. Rev. E, 65, 021305, 2002.
- [Melo94]** : F. Melo, P. Umbanhowar and H. L. Swinney. *Transition to parametric wave patterns in a vertically oscillated granular layers*. Phys. Rev. Lett, 72(1), 172-175, 1994.
- [Metcalfe97]** : T. Metcalfe, J. B. Knight and H. M. Jaeger. *Surface patterns in shallow beds of vibrated granular material*. Physica A, 236, 202-210, 1997.
- [Metcalfe02]** : Metcalfe, G., *et al.*, *Granular friction, Coulomb failure, and the fluid-solid transition for horizontally shaken granular materials*. Phys. Rev. E, 65(3), 2002.
- [Mobius01]** : M. E. Mobius *et al.* *Brazil-nut effect- Size separation of granular particles*. Nature, 414(6861), 270, 2001.

- [Möbius04]** : M. E. Möbius et al. *Intruders in the Dust: Air-Driven Granular Size Separation*. Phys. Rev. Lett. 93, 198001, 2004.
- [Nowak97]** : E. R. Nowak *et al.* *Reversibility and irreversibility in the packing of vibrated granular material*. Powder Technology, 94, 79-83, 1997.
- [Nadler09]** : S. Nadler. Thèse en cours au centre Spin de l'ENSM-SE.
- [Pak95]** : H. K. Pak, E. Van Doorn, and R. P. Behringer. *Effects of Ambient Gases on Granular Materials under Vertical Vibration*. Phys. Rev. Lett. 74, 4643 – 4646, 1995.
- [Philippe02]** : P. Philippe. *Etude théorique et expérimentale de la densification des milieux granulaires*. Thèse de doctorat, université de Rennes, 2002.
- [Pöschel00]** : T. Pöschel, T. Schwarger and C. Saluena. *Onset of fluidization in vertically shaken granular material*. Phys. Rev. E ,62, 1361–1367, 2000
- [Pouliquen97]** : O. Pouliquen, M. Nicolas and P. D. Weidman. *Crystallization on non-brownian spheres under horizontal shaking*. Phys. Rev. Lett, 79(19), 3640-3643, 1997.
- [Pouliquen01]** : O. Pouliquen. *Les milieux granulaires entre fluide et solide*. Cours à l'ENSTA, 2001.
- [Powers53]** : M. C. Powers. *A new roundness scale for sedimentary particles*. Journal of sedimentary petrology, 23(2), 117-119, 1953.
- [Rajchenbach04]** : J. Rajchenbach. *Ecoulements denses de grains sous gravité*. Rhéologie, 7, 22-27, 2005.
- [Renard02]** : S. Renard *et al.* *Vertically shaken column of spheres. Onset of fluidization*. Eur. Phys. J. E, 4, 233-239, 2001.
- [Ribièrè05]** : P. Ribièrè *et al.* *Experimental compaction of anisotropic granular media*. Eur. Phys. J. E, 16, 415-420, 2005.
- [Richard05]** : P. Richard *et al.* *Slow relaxation and compaction of granular systems*. Nature materials, 4, 121-128, 2005.
- [Ristow97]** : G. H. Ristow, G. Strassburger, and I. Rehberg, *Phase diagram and scaling of granular materials under horizontal vibrations*. Phys. Rev. Lett, 79(5), 833-836, 1997.
- [Rouèche05]** : E. Rouèche. *Influence des paramètres de vibrations sur la rhéologie d'un milieu granulaire : application au remplissage des fusibles*. Thèse de doctorat, ENSM-SE, 2005.
- [Saluena00]** : C. Saluena and T. Poschel. *Convection in horizontally shaken granular material*. Eur. Phys. J. E, 1(1), 55-59. 2000.

[Tennakoon99] : S. G. K. Tennakoon, L. Kondic, and R. P. Behringer. *Onset of flow in a horizontally vibrated granular bed: Convection by horizontal shearing*. Europhysics Letters, 45(4), 470-475. 1999.

[Vanel99] : L. Vanet *et al.* *Memories in sand: experimental tests of construction history on stress distributions under sandpiles*. Phys. Rev. E, 60(5), 5040-5043, 1999.

[Vivier00] : G. Vivier. *Relations entre la microstructure des blocs agglomérés et les propriétés électriques des fusibles*. Thèse de doctorat, INSA Lyon, 2000.

[Wadell35] : H. Wadell. *Volume, Shape and Roundness of Quartz Particles*. Journal of Geology **43**: 250–280, 1935.

[Wassgren97] : C. R. Wassgren. *Vibration of granular materials*. PhD thesis, California institute of Technology, 1997.

N° d'ordre : 529 GP

Ahmed RAIHANE

BEHAVIOR OF HORIZONTALLY VIBRATED GRANULAR MEDIA APPLICATION TO FUSES MANUFACTURING

Speciality: GENUIS OF PROCESSES

Keywords: 3D granular media, horizontal vibrations, convection, densification

Abstract:

This manuscript reports the results of an experimental study aiming to understand the convective patterns and compaction phenomenon in horizontally vibrated granular media. The granular material is a dry sand representative of non-cohesive granular media.

The conducted work has evidenced that, when a granular matter is submitted to horizontal vibrations with a fixed frequency and an increasing acceleration, it splits into an upper fluid-like zone and a bottom solid-like zone when the acceleration threshold of fluidization is reached. Two counter-rotated convection rolls, with thickness increasing with acceleration, are observed in the upper zone.

A quantitative study, undertaken principally at a frequency of 50 Hz, was based on PIV technique in order to measure the grain displacement field at the container walls, and an optical profilometer technique to measure the mean packing density.

The measurement of the grain displacement field allowed us to determine the convective rolls thickness " E_F " evolution with the relative acceleration Γ . The influence of different parameters was investigated. We found that the curve $E_F = f(\Gamma)$ is independent from initial packing density and height, and does not present any hysteresis.

Concerning the packing density, we found that it increases with the acceleration, reaches a maximum and decreases afterward. The existence of this maximum is explained by the compensation of two contrary tendencies. In fact, a heterogeneous settling was observed during a transient regime and measured. It tends to compact the granular packing. On the contrary, the grains convective motion tends to dilate it.

Finally, an experimental protocol was proposed to maximize the compacity and homogeneity of a granular packing. It has been the object of a patent registration by the industrial partner of this study.

N° d'ordre : 529 GP

Ahmed RAIHANE

ETUDE DU COMPORTEMENT DES MILIEUX GRANULAIRES VIBRÉS
HORIZONTALEMENT. APPLICATION AU REMPLISSAGE DES FUSIBLES

Spécialité: Génie des Procédés

Mots clefs : milieu granulaire 3D, vibrations horizontales, convection, densification

Résumé :

Ce manuscrit de thèse présente les résultats d'une étude à caractère expérimental pour comprendre les mouvements convectifs et les phénomènes de densification dans les milieux granulaires en 3D vibrés horizontalement. Le milieu granulaire est un sable sec représentatif des milieux granulaires non cohésifs.

Les travaux réalisés ont mis en évidence le fait que, quand un empilement granulaire est soumis à des vibrations horizontales à une fréquence fixe et une accélération croissante, il se ségrège en une couche supérieure à comportement fluide, lieu de deux rouleaux de convection contrarotatifs, et un bloc inférieur à comportement solide, à partir d'une accélération seuil définissant une transition vers la fluidisation.

Une étude quantitative, menée principalement à une fréquence de 50 Hz, s'est basée sur une technique de type PIV pour mesurer le champ de déplacements des grains aux parois et une technique de profilométrie optique pour mesurer la compacité globale de l'empilement

La mesure du champ de déplacements des grains a permis de déterminer l'évolution de l'épaisseur des rouleaux de convection, E_F , avec l'accélération relative, Γ . L'influence de différents paramètres a été étudiée. La courbe $E_F = f(\Gamma)$ est indépendante de la compacité initiale, de la hauteur initiale, dans une certaine mesure, et ne présente pas d'hystérésis.

Quant à la compacité globale dynamique de l'empilement, elle augmente avec l'accélération, passe par un maximum et diminue par la suite. L'obtention de ce maximum est due à la compensation de deux tendances contraires. En effet, un affaissement, hétérogène en hauteur, a été observé et mesuré au cours d'un régime transitoire. Ce phénomène tend à densifier l'empilement. Au contraire, les mouvements convectifs, de plus en plus rapides, des grains pendant le régime stationnaire tendent à dilater l'empilement.

In Fine, un protocole expérimental visant à optimiser la compacité et l'homogénéité d'un empilement granulaire a été proposé au partenaire industriel de cette étude (Ferraz-Shawmut). Il fait l'objet d'un dépôt de brevet.