

Archimède dans un granulaire fluidisé

Auteur : François, Anthony

Promoteur(s) : Lumay, Geoffroy

Faculté : Faculté des Sciences

Diplôme : Master en sciences physiques, à finalité approfondie

Année académique : 2019-2020

URI/URL : <http://hdl.handle.net/2268.2/9381>

Avertissement à l'attention des usagers :

Tous les documents placés en accès ouvert sur le site le site MatheO sont protégés par le droit d'auteur. Conformément aux principes énoncés par la "Budapest Open Access Initiative"(BOAI, 2002), l'utilisateur du site peut lire, télécharger, copier, transmettre, imprimer, chercher ou faire un lien vers le texte intégral de ces documents, les disséquer pour les indexer, s'en servir de données pour un logiciel, ou s'en servir à toute autre fin légale (ou prévue par la réglementation relative au droit d'auteur). Toute utilisation du document à des fins commerciales est strictement interdite.

Par ailleurs, l'utilisateur s'engage à respecter les droits moraux de l'auteur, principalement le droit à l'intégrité de l'oeuvre et le droit de paternité et ce dans toute utilisation que l'utilisateur entreprend. Ainsi, à titre d'exemple, lorsqu'il reproduira un document par extrait ou dans son intégralité, l'utilisateur citera de manière complète les sources telles que mentionnées ci-dessus. Toute utilisation non explicitement autorisée ci-avant (telle que par exemple, la modification du document ou son résumé) nécessite l'autorisation préalable et expresse des auteurs ou de leurs ayants droit.

Archimède dans un granulaire fluidisé

Mémoire



Auteur : A. François (ID étudiant : S20130985)

Superviseur : Prof. G. Lumay

Département de Physique

Faculté des Sciences

Université de Liège

10 juin 2020

Table des matières

1	Introduction	5
2	État de l'art	7
2.1	La poussée d'Archimède	7
2.2	Fluidisation d'un granulaire	8
2.3	Simulations numériques	10
2.3.1	Pression et vitesse	11
2.3.2	Viscosité et Cohésion	11
2.3.3	Classification de Geldart	12
2.4	Cadre du mémoire	13
3	Dispositifs expérimentaux	15
3.1	Introduction	15
3.2	Les tours de fluidisation	16
3.2.1	Prototype 3D	16
3.2.2	Nouvelle conception	17
3.2.3	Prototype 2D	19
3.2.4	Modèle 2D amélioré	20
3.2.5	Modèle 3D amélioré	21
3.3	Instrumentation dans les tours	22
3.3.1	Mesure de densité	22
3.3.2	Mesures de débit et de pression	23
3.3.3	Mesures de la poussée	24
3.3.4	Prise et analyse d'images	25
4	Résultats expérimentaux	27
4.1	Expériences types	27
4.2	Traitement des données	29
4.3	Influence de la masse	29
4.4	Influence de la profondeur	30
4.4.1	Premières mesures	30

4.4.2	Hypothèse	32
4.4.3	Influence des surfaces	33
4.4.4	Observations directes	34
4.5	Influence du volume	39
4.5.1	Premières mesures	39
4.5.2	Immersion partielle	43
4.6	Influence de l'orientation	46
4.6.1	Influence de la profondeur	46
5	Dispositif numérique	49
5.1	Méthode des éléments discrets (DEM)	49
5.1.1	Description	49
5.1.2	Algorithme Leapfrog	49
5.1.3	Forces de contact	52
5.1.4	Forces de friction	53
5.1.5	Cavité	54
5.1.6	Granulaire	54
5.1.7	Intrus	55
5.1.8	Air	56
5.1.9	Paramétrage	58
6	Résultats numériques	59
6.1	Aperçu	59
6.2	Mesure de la Poussée	61
6.3	Analyse de densité	62
6.4	Champs des vitesses (PIV)	62
6.5	Influence de la taille de l'intrus	63
6.5.1	Déroulement d'une simulation	63
6.5.2	Profils de poussée	64
6.5.3	Distribution des mesures de la poussée	65
6.5.4	Poussée moyenne en fonction de la taille de l'intrus	65
6.5.5	Analyse de la densité	66
6.5.6	Analyse du champ des vitesses	69
6.5.7	Conclusion de l'influence de la taille	72
6.6	Influence de la profondeur	72
6.6.1	Déroulement d'une simulation	72
6.6.2	Profils de poussée	73
6.6.3	Distribution des mesures de la poussée	73
6.6.4	Poussée moyenne en fonction de la position de l'intrus	74
6.6.5	Analyse de la densité	76

6.6.6	Analyse du champ des vitesses	80
6.6.7	Conclusion de l'influence de la profondeur	80
7	Conclusions	83
7.1	Conclusions expérimentales	83
7.2	Conclusions numériques	84
7.3	Perspectives	84

Table des figures

2.1	Représentation schématique de l'origine de la poussée d'Archimède dans un liquide. La force verticale résulte d'une différence de pressions hydrostatiques.	8
2.2	Différents comportements granulaires observables en fonction du type de fluide utilisé et de la vitesse de celui-ci.	8
2.3	Représentation graphique de la classification de Geldart (différence entre la masse volumique des particules et du gaz en fonction du diamètre des particules).	13
3.1	Schéma de base de la tour de fluidisation.	16
3.2	L'injecteur d'air est le collage de tuyaux illustré. Uniquement les tuyaux gris sont percés. Les trous sont disposés de telle sorte que l'air est injecté vers le bas. Cela pour éviter qu'ils ne se remplissent de sable.	16
3.3	Schéma décrivant le nouveau design proposé.	18
3.4	Il est nécessaire de régler l'horizontalité de la cuve pour obtenir une fluidisation homogène. Dans une cuve mal réglée, la fluidisation ne sera que partielle.	19
3.5	Le prototype de la cuve 2D en fonctionnement. On observe déjà la formation de bulles d'air dans le lit fluidisé.	19
3.6	La tour 2D montée et en attente de collage. À côté, la tour prototype permet de juger de la différence de taille entre ces deux modèles.	20
3.7	La tour 2D est similaire à la tour prototype. Un travail important a été réalisé pour faciliter les manipulations. Ici illustré, la porte étanche permettant d'introduire un intrus à une position fixe dans la cuve.	21
3.8	Les supports et plaques de séparations construits spécialement pour la tour 3D améliorée.	22
3.9	Schéma représentant la variation de hauteur de la couche de granulaire lorsque de l'air est injecté dans la cuve.	23

3.10	Débitmètre "2540I acrylic flowmeter 100-700 LPM of air".	23
3.11	Schéma de la situation expérimentale. La poussée est la différence entre les poids mesurés hors et dans la cuve.	24
3.12	Capteur de force numérique monté sur un rail (A) permettant de le déplacer. L'intrus se fixe à l'attache (B) à l'aide d'une tige rigide ou d'un câble.	24
4.1	Graphes des mesures de la poussée obtenue en plongeant des volumes de tailles variables. En rouge, la droite théorique que l'on obtiendrait avec Archimède dans un liquide ayant la même masse volumique que le sable fluidisé. Les barres d'erreurs sont absentes car impossibles à évaluer avec le matériel à disposition.	28
4.2	Illustration de la mesure effectuée sur le dynamomètre. Lorsque la pyramide à sa pointe vers le bas, ce dernier indique que le poids effectif est plus faible que lorsque la pyramide à sa pointe vers le haut.	28
4.3	Poussée moyenne en fonction de la masse d'un intrus de volume constant plongé dans le lit fluidisé.	30
4.4	Poussée moyenne en fonction de la position verticale (hauteur) d'un intrus plongé dans le lit fluidisé.	31
4.5	Le calcul de la poussée tient compte de la différence entre le poids de l'objet et son poids effectif dans le lit fluidisé. Mais il ne tient pas compte de l'ajout du poids d'une colonne de sable qui s'appuierait sur l'intrus. Puisque selon la situation, la géométrie de cette colonne pourrait varier, elle pourrait induire une variation de la poussée apparente.	32
4.6	Poussée en fonction de la hauteur pour les trois objets. Les données représentées en rouge sont celles illustrées dans la figure 4.4. . . .	33
4.7	Timelapse permettant d'illustrer la dynamique du lit fluidisé dans la tour 2D prototype en l'absence d'intrus. La fluidisation est homogène.	36
4.8	Timelapse permettant d'illustrer la dynamique du lit fluidisé dans la tour 2D prototype en présence d'un intrus. La fluidisation n'est pas homogène. Les bulles d'air qui entrent en contact avec l'objet sont déviés et ne reviennent pas au-dessus de celui-ci.	37

4.9	Images construites à partir de l'addition de 85 images successives provenant des vidéos illustrées dans les figures 4.7 et 4.8. L'image de gauche illustre que la fluidisation est homogène en l'absence d'objet. La densité moyenne apparaît constante dans la cuve. Par contre, l'image de droite met clairement en évidence la présence d'une zone plus dense qui surplombe l'objet.	38
4.10	La série B est composée de 6 objets ayant une section horizontale commune.	40
4.11	Poussée moyenne s'appliquant sur les objets des séries A, B et C (de haut en bas).	42
4.12	Les objets A, B et C utilisés pour les expériences d'immersions partielles.	44
4.13	Poussée moyenne s'appliquant sur les objets A, B et C en fonction du volume qui est immergé dans la cuve.	45
4.14	Poussée en fonction de la position verticale (hauteur) et de l'orientation de la pyramide "basse".	46
4.15	Poussée en fonction de la position verticale (hauteur) et de l'orientation de la pyramide "haute".	47
5.1	Représentation schématique du fonctionnement de l'algorithme Leapfrog. À gauche, la vitesse est mise à jour au milieu d'un pas de temps. À droite, la position est mise à jour au milieu d'un pas de temps.	50
5.2	La vitesse est mise à jour au milieu du pas de temps. La position de l'objet à la fin de ce dernier est évaluée à l'aide de cette nouvelle vitesse.	50
5.3	La position est mise à jour au milieu du pas de temps. Le mouvement est réévalué à partir de cette nouvelle position.	51
5.4	Représentation schématique de la superposition (δ) à l'origine de la force entre deux éléments i et j . cette force est dirigée selon la normale, l'axe qui passe par les centres des deux particules.	53
6.1	Quatre instantanés provenant d'une simulation avec un intrus dont le rayon est $18 R_{max}$. Le granulaire (noir) est bousculé par les particules d'air (blanche). Ces dernières sont déviées par l'intrus (bleu).	60
6.2	Superposition de 200 images successives de l'animation du lit fluidisé numérique dans lequel est plongé un intrus dont le rayon est 15 fois R_{max}	61

6.3	Profil de poussée pour un objet dont le rayon est 15 fois supérieur à R_{max}	64
6.4	Distributions des mesures de la poussée pour un intrus dont le rayon est 15 R_{max} . Une fonction Gaussienne dont les paramètres sont la valeur moyenne et l'écart type des mesures est représentée par-dessus la distribution.	65
6.5	Valeurs moyennes de la poussée s'appliquant sur les différents intrus plongés dans la cuve numérique. Bien que ce graphe représente une situation en 2 dimensions, il y a de nombreuses ressemblances avec les graphes représentant la situation expérimentale (3D) (section 4.5).	66
6.6	Superposition de 200 images successives des animations pour les objets 10, 15 et 20 R_{max} . Ces trois animations sont celles présentées dans la vidéo liée au premier QR code au début du chapitre 6. . .	67
6.7	Superposition de 200 images successives des animations liées au QR code. Ces images illustrent la densité de grains dans chaque cases à l'aide du code couleur qui se trouve juste en dessous d'elles. (En abscisse et ordonnée les coordonnées dans la cuve.)	68
6.8	Distribution des vitesses du granulaire dans la cuve. Au-dessus des intrus, il est possible de distinguer une colonne où la vitesse est préférentiellement dirigée vers le bas. Autour de celle-ci, la vitesse est dirigée vers le haut.	70
6.9	Schéma de la dynamique du granulaire observée dans le dispositif numérique.	71
6.10	Profil de poussée pour un intrus placé à une hauteur de 1.85 cm et dont le rayon est 15 R_{max}	73
6.11	Distributions des mesures de la poussée pour un intrus ($R = 15 R_{max}$) placé à une hauteur de 1.85 cm au-dessus du fond de la cuve. Une fonction Gaussienne dont les paramètres sont la valeur moyenne et l'écart type des mesures est représentée par-dessus la distribution.	74
6.12	Poussée moyenne s'appliquant sur l'intrus plongé à différentes hauteurs dans la cuve numérique.	75
6.13	Poussée moyenne s'appliquant sur l'intrus plongé à différentes hauteurs dans la cuve numérique. Cette figure contient le jeu de données présenté dans la figure 6.12 ainsi que les mesures pour l'objet à des hauteurs intermédiaires.	76

6.14	Superposition de 200 images successives des animations pour l'intrus $15 R_{max}$ plongé à trois hauteurs différentes dans la cuve (1.25, 1.85 et 2.45 cm). Ces trois animations sont celles présentées dans la vidéo liée au QR code inclus dans la figure.	78
6.15	Superposition de 200 images successives des animations liées au QR code. Ces images illustrent la densité moyenne de grains dans chaque cases à l'aide du code couleur visible sous les images. (En abscisse et ordonnée les coordonnées dans la cuve.)	79
6.16	Distribution des vitesses du granulaire dans la cuve. Au-dessus de l'intrus placé à des hauteurs différentes, il est possible de distinguer la colonne où la vitesse est préférentiellement dirigée vers le bas. Autour de celle-ci, la vitesse est dirigée vers le haut.	80

Remerciements

La réalisation de ce mémoire n'aurait pas été possible sans les conseils et l'aide de nombreuses personnes.

Un remerciement tout particulier s'adresse aux membres du GRASP qui de près ou de loin ont encadré le travail effectué. Les explications techniques, les conseils pratiques et la participation aux réflexions lors des différentes étapes clés ont permis la réalisation de ce mémoire.

Il faut également souligner l'aide très importante apportée par les membres de l'atelier de physique ayant permis la construction des expériences. Sans cette aide, la conception des dispositifs aurait très certainement été plus longue et sujet à bien plus de problèmes.

Il est également essentiel de citer l'aide très importante apportée par les personnes ayant encadré plus directement ce mémoire. En particulier, les professeurs G. Lumay, S. Dorbolo et E. Opsomer.

Finalement, un remerciement global s'adresse à toutes les autres personnes ayant soutenu de n'importe quelle manière que ce soit, la réalisation de ce travail.

Merci à vous tous.

Avant propos

Dès le début de l'année académique 2019 - 2020, l'objectif du mémoire a été fixé. Il s'agissait alors de tenter d'aller plus loin, de confirmer certains phénomènes observés et de tester certaines hypothèses avancées précédemment

De septembre 2019 à mars 2020, le développement de la manipulation était alors au centre de la démarche. Beaucoup de travail, de réflexion et de tests ont permis la construction de trois dispositifs distincts ayant chacun des rôles différents à remplir.

La description de l'évolution de la manipulation tient un rôle important dans les pages qui suivent. Cela représente une partie importante du travail fourni. Mais l'actualité, en particulier la fermeture de l'université, aura conduit à un changement radical du but de ce mémoire.

Mi-mars 2020, le nouvel objectif est de parvenir à simuler numériquement ce qui avait été réalisé. Le but de ce mémoire est donc de proposer un modèle numérique permettant d'approcher au maximum les résultats obtenus.

Chapitre 1

Introduction

Un lit fluidisé est un système qui modifie l'aspect d'un matériau granulaire à l'aide d'un flux de liquide ou plus souvent de gaz. Le passage du fluide au travers du granulaire bouscule les éléments de celui-ci. La dynamique qui apparaît est alors similaire à celle d'un liquide. De nombreuses études décrivent la dynamique des lits fluidisés à l'aide d'expériences et/ou de simulations numériques comme énoncé dans le chapitre 2. Mais peu d'entre elles s'attardent sur la présence d'un intrus dans le granulaire.

Ce mémoire étudie en particulier l'existence d'une poussée qui paraît, à première vue, ressembler à la poussée d'Archimède dans un liquide. En effet, dans tout liquide, un objet subit une force verticale dirigée vers le haut. Cela signifie qu'un objet suffisamment léger immergé dans un liquide remonte à la surface. Ce comportement est également observable dans un lit fluidisé. Cela suggère la présence d'une poussée. L'objectif de ce mémoire est de caractériser cette dernière pour la comparer à la poussée d'Archimède. De comprendre son comportement et de proposer et vérifier des hypothèses à son sujet.

La première moitié de ce document est liée à l'étude expérimentale de cette poussée. Les chapitres 3 et 4 décrivent respectivement l'évolution de l'expérience et les résultats obtenus. Cette partie s'attarde sur la compréhension du phénomène et la méthode utilisée pour l'étudier. La seconde moitié du document s'oriente vers une représentation numérique de la problématique en cherchant à reproduire les comportements observés dans les chapitres précédents. Pour y parvenir un modèle différent de ceux rencontrés dans la littérature liée aux lits fluidisés est proposé. Le chapitre 5 décrit ce modèle tandis que le chapitre 6 le confronte à l'expérience.

Chapitre 2

État de l'art

Les lits fluidisés sont des systèmes qui sont étudiés expérimentalement et numériquement depuis des années. Dans certains articles scientifiques traitants de la présence d'intrus dans ces lits, il est possible d'apercevoir une note ou une remarque concernant l'existence d'une force qui semble se comporter d'une manière suffisamment proche de la poussée d'Archimède pour qu'on la nomme comme telle.

La dynamique d'un lit fluidisé ne correspond pas à la situation d'un liquide au repos. Il n'est donc pas si facile de lier la force qui apparaît sur un intrus plongé dans le premier avec la poussée d'Archimède que l'on connaît si bien. Pourtant, aucune étude n'aborde encore ce sujet.

2.1 La poussée d'Archimède

Parfaitement connue aujourd'hui, la poussée d'Archimède est l'une des premières forces rencontrées lors de l'apprentissage de la physique. Un volume plongé dans un liquide subit une force verticale vers le haut. Cette force dépend de la masse volumique du fluide (ρ), de la constante gravitationnelle ($g = 9.81 \text{ m/s}^2$) et du volume (V) de l'objet :

$$F = \rho g V$$

Cette force a pour origine la différence des pressions hydrostatiques qui se distribuent sur les surfaces de l'objet.

Horizontalement, aucune force ne s'applique sur ce dernier car les contraintes s'opposent. Mais verticalement, il subit une force puisque la pression hydrostatique dépend de la profondeur.

$$P_1 = \rho g h_1$$

$$P_2 = \rho g h_2$$

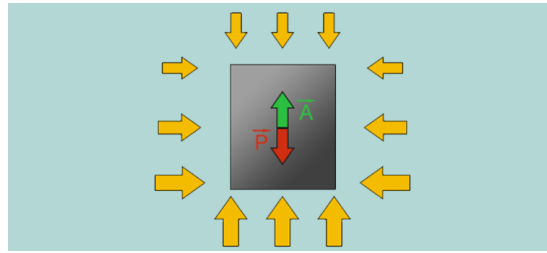


FIGURE 2.1 – Représentation schématique de l'origine de la poussée d'Archimède dans un liquide. La force verticale résulte d'une différence de pressions hydrostatiques.

2.2 Fluidisation d'un granulaire

Un phénomène moins connu hors du cadre des sciences et de l'industrie est la fluidisation d'un matériau granulaire. D'un premier abord, ce phénomène est surprenant. Il permet, dans des conditions très particulières, de modifier l'aspect et la dynamique d'un granulaire pour "qu'il se comporte comme un fluide". Dans ces conditions, le granulaire prend alors le nom de lit fluidisé.

Ce comportement apparaît lorsqu'une couche de matériaux granulaires plus ou moins épaisse est traversée par un fluide. En fonction du type et de la vitesse de ce fluide, il est possible d'observer plusieurs comportements différents (figure 2.2 [1]).

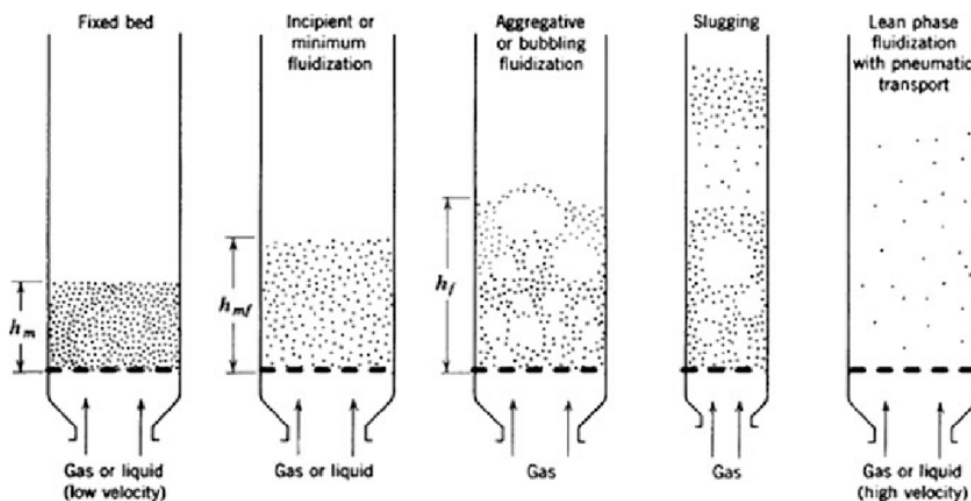


FIGURE 2.2 – Différents comportements granulaires observables en fonction du type de fluide utilisé et de la vitesse de celui-ci.

Comme illustré dans la figure 2.2, si la vitesse du fluide est trop faible, on garde un granulaire assez compact. Dans ce cas, si un objet est lancé dans celui-ci, on observe le même comportement que lorsqu'il n'y a pas d'air injecté. C'est-à-dire que l'impact de l'objet dans le granulaire fait apparaître un cratère et celui-ci ne s'enfoncé pas [2].

Par contre, si la vitesse du fluide est trop importante, on ne dit plus que le granulaire est fluidisé. Il s'agit de transport pneumatique du granulaire. Cette application est très utilisée dans les industries pour permettre le transport de poudres et de grains [3].

Entre ces vitesses "limites", on obtient un lit de granulaire fluidisé. Le matériau semble se comporter comme un fluide. Il est possible d'observer des objets lourds couler et des objets légers remonter à la surface et s'y maintenir.



L'observation de ce comportement est à l'origine du cheminement à suivre tout au long de ce mémoire.

Selon la vitesse du fluide, il est également possible d'observer la formation ou non de bulles d'air comme illustrées dans la figure 2.2. Selon l'article "la fluidisation gazeuse" [4], on distingue quatre régimes différents.

- L'expansion homogène :

Lorsque la vitesse du fluide est encore suffisamment faible, la surface du granulaire reste parfaitement définie, les particules bougent très peu. Mais cette surface est plus haute que lorsque le granulaire n'est pas fluidisé (cf. la cuve 2 dans la figure 2.2).

- La fluidisation bouillonnante :

Si le fluide utilisé est un gaz (ex : air). Des bulles de ce gaz apparaissent et remontent jusqu'à la surface. Celle-ci est moins bien définie à cause de l'apparition de ces bulles. Mais elle reste suffisamment stable pour être distinguée. (cf. la cuve 3 dans la figure 2.2).

- Le régime de pistonage :

Ces mêmes bulles de gaz atteignent une taille de l'ordre de la largeur de la cuve. Un front de grains se forme alors au-dessus d'une de ces bulles. Ce front se désagrège et retombe pour ensuite être emporté par la bulle suivante (similaire au

mouvement d'un piston). Ce soulèvement du front est un phénomène régulier (cf. la cuve 4 dans la figure 2.2).

- Le régime turbulent :

Le lit se décompose en petits éléments très mobiles. La surface du fluide n'est plus définie. Ce régime est la transition entre les deux dernières cuves illustrées dans la figure 2.2.

Pour contrôler l'aspect du lit fluidisé, il faut tenir compte de nombreux paramètres. Selon l'article "New description of fluidization regimes" [5], il est possible d'introduire un critère de transition entre les différents régimes. Celui-ci dépend entre autres de la vitesse du fluide, de la taille de la cuve, de la hauteur de la couche de granulaire ainsi que de la taille des grains. Pour exprimer ce critère, les auteurs se basent sur les différences de pressions mesurées dans la cuve et utilisent donc des m/s car ils lient la vitesse du fluide aux différences de pressions. Mais puisque ce critère dépend de nombreux paramètres, en particulier la géométrie de la cuve, il n'existe pas un critère universel applicable sur chaque expériences. Chaque cuve "possède son propre critère".

2.3 Simulations numériques

Un grand nombre d'articles discutent de manipulations expérimentales. Mais, souvent associé à ces articles, on retrouve un chapitre ou un autre article décrivant un modèle permettant de simuler l'expérience discutée à l'aide d'un modèle numérique.

Dans la littérature existante, deux modèles de simulation sont généralement utilisés pour représenter un lit fluidisé.

Si l'objectif est de simuler au mieux le fluide, le modèle de Boltzmann sur réseau (Lattice Boltzmann) semble être privilégié. Il permet de simuler en détail le comportement d'un fluide complexe. Il est ensuite possible d'étudier le comportement de particules dans ce fluide. Mais pour que le modèle fonctionne, les particules sont placées sur un réseau régulier. Elles sont donc uniquement capables de se déplacer sur le quadrillage de ce dernier. Lorsque deux particules se rencontrent à un noeud, il y a simulation d'une collision [6].

Par contre, si l'étude du granulaire et de sa dynamique est le but recherché, alors on retrouve, en général, le modèle des éléments discrets (DEM). Celui-ci

permet de gérer un grand nombre de particules et leurs interactions.

Le plus souvent, ce modèle traite les interactions en simulant la présence de ressorts entre chaque paires de particules. Si deux éléments se superposent, alors le ressort se comprime. Dès lors, les deux particules se repoussent avec une force égale mais de sens opposé.

La représentation du fluide dans ce type de simulation, selon l'intégralité des sources consultées, laisse apparaître une méthode similaire. Pour obtenir un lit fluidisé, une force est générée sur chaque grains présent dans la cuve. Selon l'ouvrage consulté, il est possible d'obtenir des informations concernant les divers paramètres manipulés. Mais de manière générale, le mouvement du fluide est définis à l'aide d'une vitesse qui est liée à une différence de pression. L'action des forces qui s'applique sur chaque éléments du granulaire vise à simuler l'action d'un fluide particulier sur ceux-ci.

2.3.1 Pression et vitesse

Expérimentalement, l'étude de l'aspect du lit fluidisé est toujours liée à la vitesse du fluide et/ou à la différence de pression qui apparaît entre le dessous et le dessus de la couche de granulaire.

Selon l'article "LDV measurements of an air-solid two-phase flow in a vertical pipe" [7], la pression dans un tuyau rempli de particules de taille régulière est maximale à proximité de l'arrivée d'air, et elle diminue lorsque le flux se déplace vers l'aval. Le gradient de pression entre ces régions est à l'origine du mouvement du fluide dans la cuve.

Ce même article suggère que la vitesse du fluide se stabilise rapidement pour devenir constante. Indication que le gradient de pression dans le lit fluidisé est linéaire comme décrit dans l'article "Technique de fluidisation" [8].

2.3.2 Viscosité et Cohésion

Souvent au centre des discussions des différentes sources qu'il est possible de consulter, les paramètres de viscosité et de cohésion jouent un rôle important dans la dynamique du granulaire. Le comportement de ce dernier au passage du fluide régit l'aspect du lit. Selon la viscosité du fluide ou selon les forces de cohésion qui sont présentes entre les particules, il est possible de faciliter ou non la fluidisation.

La cohésion entre deux particules peut être due à plusieurs facteurs. L'humidité présente entre les différentes particules peut permettre l'apparition de ponts capillaires ayant une influence importante sur la dynamique du granulaire [9]. L'effet du flux d'air permet également la charge par effet triboélectrique du granulaire [10].

L'étude numérique de ces différents facteurs est souvent effectuée en considérant des grains "wet" ou "dry". Ces termes permettent de séparer les situations avec ou sans force(s) de cohésion (respectivement). Dans le cas "wet", les différentes sources de cohésions sont souvent regroupé en une unique force.

2.3.3 Classification de Geldart

Dans la littérature ainsi que dans ce mémoire, le choix des paramètres définissant le granulaire n'est pas laissé au hasard. Souvent choisis en fonction des caractéristiques du granulaire utilisé expérimentalement, les valeurs associées aux différents paramètres peuvent permettre de prédire / expliquer l'apparition ou non de certains phénomènes.

La classification de Geldart décrit la fluidisabilité des poudres et particules selon plusieurs critères. L'article "la fluidisation gazeuse" [4] reprend une description claire et concise de cette classification.

Les poudres et particules peuvent être décomposées en quatre groupes résumés ci-dessous et dans la figure 2.3.

- A) Poudres fines (20 - 150 μm) et légères ($< 1\,500\text{ kg/m}^3$). La vitesse de bullage est inférieure à la vitesse de fluidisation.
Tendance légère au "renardage". Cela signifie que des canaux préférentiels se forment dans le granulaire. Le fluide traverse alors le lit en suivant ces canaux.
- B) Particules ayant une taille entre 80 - 800 μm et de masse volumique entre 1 500 et 4 000 kg/m^3). Les bulles apparaissent dès la fluidisation.
- C) Poudres très fines ($< 30\ \mu\text{m}$) et très cohésives. Elles sont difficiles à fluidiser à cause de leur forte tendance à "renarder".
- D) Particules de taille importante ($> 800\ \mu\text{m}$). Il s'agit de matériaux fluidisables mais nécessitant parfois l'utilisation de techniques particulières.

La figure 2.3 [11] représente les différents groupes de cette classification. La séparation entre les groupes A et C n'est pas clairement définie car un matériau peut passer d'une classification à l'autre selon certaines caractéristiques environnementales telles que l'humidité.

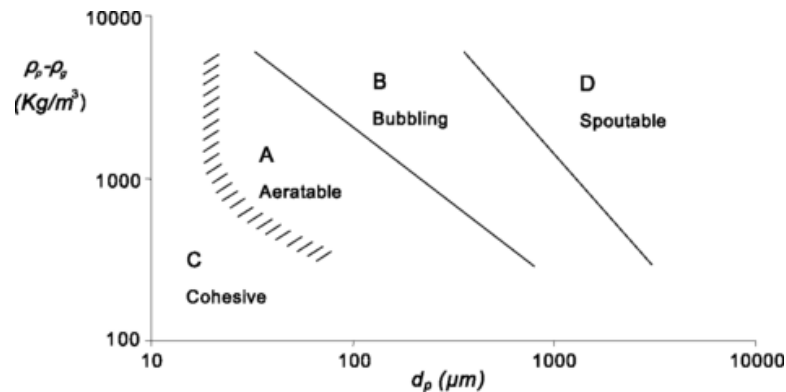


FIGURE 2.3 – Représentation graphique de la classification de Geldart (différence entre la masse volumique des particules et du gaz en fonction du diamètre des particules).

2.4 Cadre du mémoire

Même si certains articles discutent de la présence d'un intrus dans un lit fluidisé, aucun ne semble s'attarder sur la force verticale dirigée vers le haut que celui-ci subit. Rapidement associée à la poussée d'Archimède dans quelques rares cas, aucune description du phénomène ne permet d'expliquer comment celle-ci intervient dans un lit fluidisé.

L'objectif de ce mémoire en deux temps est, d'abord, d'étudier expérimentalement comment cette poussée intervient et de chercher à comprendre le phénomène à l'origine de celle-ci. Et ensuite de chercher à simuler la situation à l'aide d'un modèle numérique.

L'étude expérimentale amènera à l'élaboration et au test d'une hypothèse particulière permettant de comprendre en partie le phénomène. Cette hypothèse explique que les comportements observés dans la suite de ce mémoire (chapitre 4) sont, entre autres, liés à une fluidisation inhomogène du granulaire autour de l'intrus dans le lit fluidisé.

Le modèle développé pour simuler le comportement réel est basé sur cette hy-

pothèse. Contrairement aux modèles décrits précédemment¹, le modèle proposé cherche à permettre l'apparition d'une fluidisation inhomogène induite par la présence d'un intrus. La dynamique du granulaire tenant un rôle central, la méthode des éléments discrets (DEM) associée à l'algorithme "Half-Step Leapfrog" [12] a été retenue.

Contrairement aux autres simulations, ce modèle cherche à exploiter l'aisance que possède celui-ci pour calculer les contacts entre les grains en représentant le fluide à l'aide de petites particules². Celles-ci sont poussées à remonter au travers du granulaire représenté par des grains de tailles plus importantes. Les contacts entre les divers éléments sont à l'origine de la dynamique de fluidisation numérique.

La dynamique de ces "particules d'air" étant influencée par les divers contacts, ce modèle permet d'obtenir un lit dont la fluidisation n'est pas homogène au voisinage d'un intrus.

1. Dans ces modèles, chaque grains est soumis à une force permettant de simuler l'effet du passage du fluide. Ils permettent donc de faire apparaître une fluidisation homogène.

2. Puisque ces particules jouent le rôle du fluide, nous les nommerons "particules d'air" dans la suite. Bien que la modélisation de l'air à l'aide de particules ne soit pas réaliste.

Chapitre 3

Dispositifs expérimentaux

3.1 Introduction

Une large partie du travail expérimental mené est le développement de plusieurs dispositifs. Les limitations des premières manipulations, les résultats obtenus ainsi que les hypothèses proposées (cf chapitre 4) ont motivé le développement de montages plus élaborés. Ce chapitre se concentre sur la description de l'évolution de ces dispositifs.

Au nombre de quatre, les montages sont assez similaires et ils peuvent se diviser en deux éléments améliorés en parallèle.

- **La tour de fluidisation** : Il s'agit d'une cavité étanche sans couvercle (cuve). Le flux d'air injecté en-dessous de cette dernière est contraint de s'échapper en traversant le granulaire qu'elle contient. Le lit fluidisé est obtenu de cette manière.
- **Les instruments** : L'ensemble des éléments permettant de suivre les paramètres et d'effectuer les mesures désirées dans la cuve.

Les quatre tours peuvent également être séparées en deux catégories.

- **Dispositifs 3D** : Ces montages correspondent à des cuves de section carrée. Assez imposantes, elles permettent d'introduire des intrus de grandes tailles. L'ensemble des mesures présentées graphiquement dans le chapitre 4 ont été effectuées à l'aide des "cuves 3D".

Ces mesures sont à l'origine de l'hypothèse de fluidisation inhomogène (énoncé dans la section 2.4) ayant motivée la construction des dispositifs 2D.

- **Dispositifs 2D** : Il s'agit de montage dont l'épaisseur est réduite au maximum. Le but étant de permettre d'effectuer des observations directes de la dynamique du granulaire dans le voisinage d'un intrus. Ces dispositifs, surnommé 2D à cause de leur épaisseur, sont appelés "cellules d'Hele Shaw" dans la littérature.

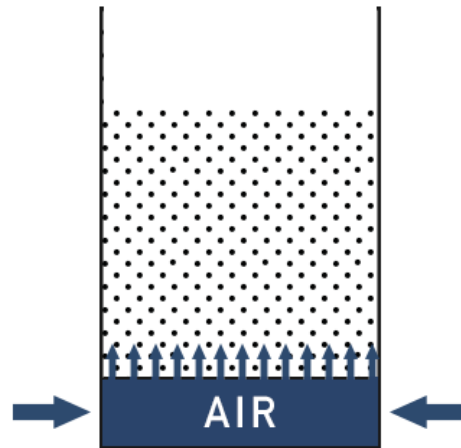


FIGURE 3.1 – Schéma de base de la tour de fluidisation.

3.2 Les tours de fluidisation

3.2.1 Prototype 3D

Le premier modèle de tour est un cube de 30 cm de côté dans lequel de l'air comprimé est injecté à l'aide du système de tuyaux illustré ci-dessous (figure 3.2).



FIGURE 3.2 – L'injecteur d'air est le collage de tuyaux illustré. Uniquement les tuyaux gris sont percés. Les trous sont disposés de telle sorte que l'air est injecté vers le bas. Cela pour éviter qu'ils ne se remplissent de sable.

L'injection de l'air dans la cuve s'effectue à l'aide du système de tuyaux illustré

dans la figure 3.2. Le collage présenté ne permet d'injecter l'air qu'à partir des tuyaux gris (percés). Les trous disposés vers le bas évitent le remplissage de l'injecteur par le granulaire lorsque le dispositif est au repos.

Le granulaire utilisé est du sable fin. Selon la classification de Geldart (section 2.3.3), celui-ci correspond à un granulaire du groupe B. Expérimentalement, cela se confirme dans les observations puisque le régime bouillonnant (cf section 2.2) apparaît directement.

La configuration de cette tour permet la collecte de nombreux résultats. Mais deux limitations majeures restreignent son utilité.

- 1) Sa faible hauteur ne permet que de travailler sur des profondeurs d'environ 15 centimètres.
- 2) La géométrie de l'injecteur permet une fluidisation homogène du centre de la cuve. Mais l'absence de tuyaux percés sur les bords laisse apparaître un contour moins fluidisé.

La combinaison de ces limitations ne permet pas de travailler avec des intrus de tailles importantes. Pour y remédier et en tenant compte de l'hypothèse proposé à la suite de l'analyse des résultats, de nouvelles tours sont imaginées¹.

3.2.2 Nouvelle conception

Pour améliorer la conception du dispositif actuel, un nouveau design est proposé. Celui-ci, en trois étages², a été d'abord testé et amélioré à l'aide d'un prototype en deux dimensions (décrit dans la section 3.2.3). Ensuite il a été appliqué aux tours 2D et 3D améliorées.

Le montage de ces nouvelles tours s'effectue en trois étages séparés par des plaques semi-perméables (l'air passe mais pas le granulaire). Ces étages sont nommés (de haut en bas)³.

- **Cuve** : étage contenant le granulaire.
- **Intermédiaire** : étage de transition dans lequel le flux d'air est "stabilisé".
- **Injecteur** : étage relié à une ou plusieurs arrivée(s) d'air.

1. Les tours proposées sont les tours 2D et 3D améliorées (respectivement sections 3.2.4 et 3.2.5). Mais avant d'entamer la construction de ces montages, un prototype de cuve 2D (section 3.2.3) est construit pour tester le design.

2. D'où le surnom de tour.

3. Dans l'article "Discrete particle simulation of two-dimensional fluidized bed" [13] se trouve une cuve très similaire au prototype proposé. Il s'agit d'une ressemblance fortuite. L'article en question traitant de la simulation numérique de lit fluidisé, il n'a été consulté qu'après le développement des cuves décrites dans ce document.

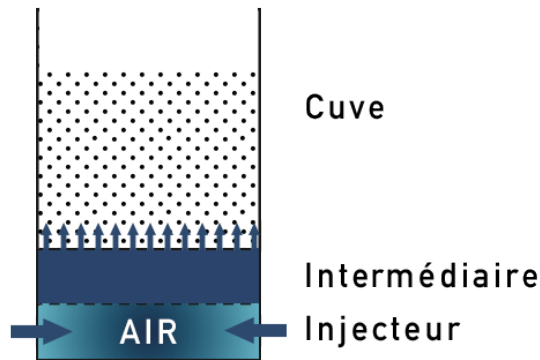


FIGURE 3.3 – Schéma décrivant le nouveau design proposé.

Étage intermédiaire

Dans le design original (sans l'étage intermédiaire), la géométrie de l'étage injecteur laissait craindre l'apparition d'un gradient de pression horizontal. Celui-ci aurait pu avoir des conséquences néfastes sur le bon déroulement de l'expérience. C'est pourquoi, le premier prototype a directement été doté d'un étage intermédiaire ayant pour rôle de créer une poche d'air dans laquelle la pression se répartit de manière homogène sous la cuve.

Le prototype de la tour 2D (section 3.2.3) a été conçu de manière à pouvoir démonter la cuve et changer le contenu de cet étage. À la suite de différents tests, il a été observé un comportement plus efficace avec un étage intermédiaire vide.

Horizontalité

Lors des différents essais effectués sur le prototype 2D, un autre paramètre a été mis en évidence. La fluidisation du granulaire présent dans la cuve dépend de l'horizontalité de celle-ci.

Lorsque l'étage intermédiaire est incliné, l'air fluidise de manière préférentielle le côté le plus élevé de la cuve. Cette dynamique est représentée dans la figure 3.4

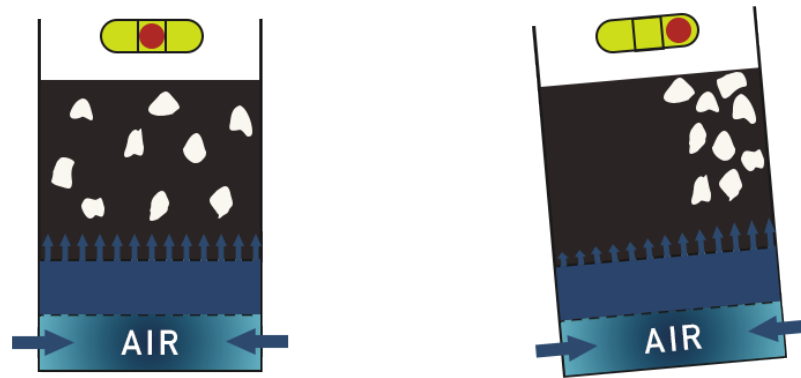


FIGURE 3.4 – Il est nécessaire de régler l’horizontalité de la cuve pour obtenir une fluidisation homogène. Dans une cuve mal réglée, la fluidisation ne sera que partielle.

3.2.3 Prototype 2D

Le prototype 2D est un montage de taille modeste utilisé pour vérifier

- 1) le design proposé (section 3.2.2),
- 2) la faisabilité des expériences proposées en 2D.

Ses dimensions (choisies arbitrairement) sont

- 30 centimètres de haut,
- 20 centimètres de large,
- 1.5 centimètre d’épaisseur.

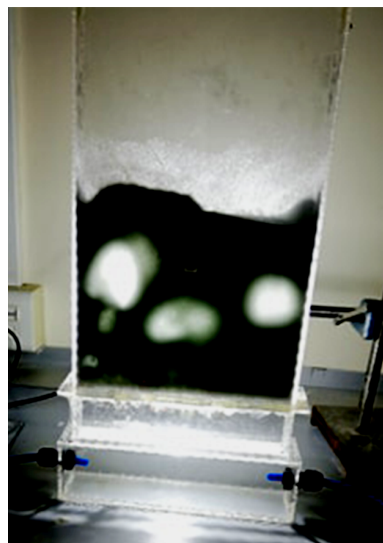


FIGURE 3.5 – Le prototype de la cuve 2D en fonctionnement. On observe déjà la formation de bulles d’air dans le lit fluidisé.

3.2.4 Modèle 2D amélioré

Les tests menés à l'aide du prototype de la tour 2D ont permis de mettre en évidence plusieurs défauts. Une fois corrigé, le modèle amélioré de la tour a été construit.

Beaucoup plus grande que le prototype, elle possède une cuve de

- 60 centimètres de haut,
- 28 centimètres de large,
- 1 centimètre d'épaisseur.

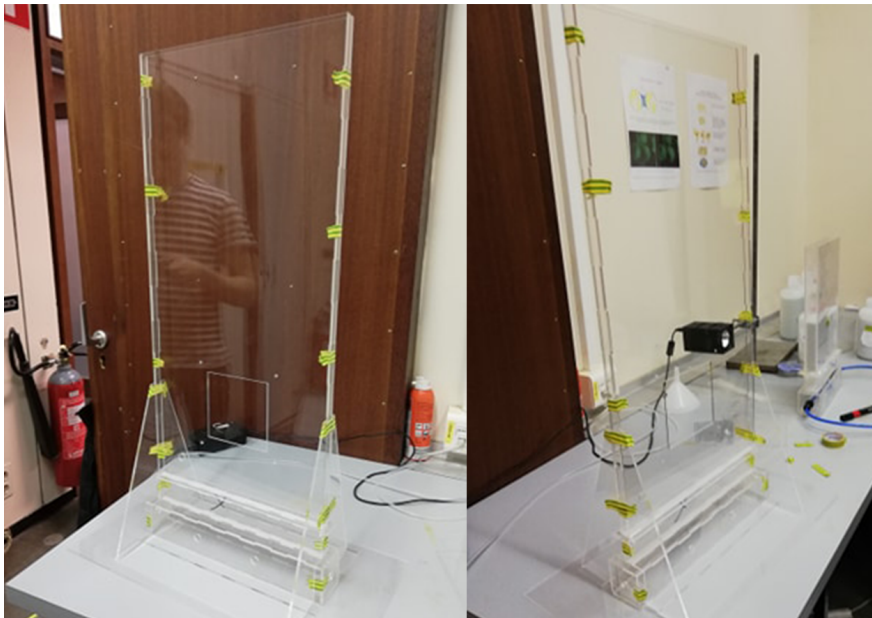


FIGURE 3.6 – La tour 2D montée et en attente de collage. À côté, la tour prototype permet de juger de la différence de taille entre ces deux modèles.

Les différences les plus notables par rapport au prototype sont

- 1) Les dimensions de la cuve ont toutes été augmentées sauf l'épaisseur qui a été réduite à 1 centimètre (il était plus simple de construire des intrus de cette épaisseur). Les dimensions des étages inférieurs ont été modifiés pour permettre le placement de la cuve par-dessus.
- 2) Le nombre d'arrivées passe de deux à six.
- 3) L'ajout et la modification des modules qu'il manque ou qu'il n'est pas simple de manipuler sur le prototype. Un travail important a été fait pour faciliter les opérations avec ce modèle (trou de vidange du granulaire, porte étanche permettant la fixation d'intrus, etc...).

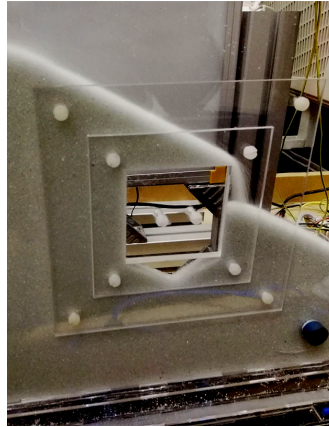


FIGURE 3.7 – La tour 2D est similaire à la tour prototype. Un travail important a été réalisé pour faciliter les manipulations. Ici illustré, la porte étanche permettant d’introduire un intrus à une position fixe dans la cuve.

3.2.5 Modèle 3D amélioré

En parallèle de la tour 2D améliorée, la nouvelle tour 3D est montée. Celle-ci possède une cuve dont les dimensions sont exactement les mêmes que celles décrites dans la section 3.2.4 à l’exception de l’épaisseur qui est égale à la largeur (28 centimètres).

L’augmentation de l’épaisseur a eu trois conséquences :

- 1) Le passage à 12 arrivées d’air qui sont disposées sur les côtés de l’injecteur.
- 2) le renforcement des étages inférieurs. Cette cuve plus haute est censée permettre de générer un lit fluidisé composé d’une couche de plusieurs dizaines de kilogrammes de granulaire. Sans aménagement particulier, les étages inférieurs ne pourraient pas soutenir un tel poids.
- 3) La nécessité de changer la conception des plaques de séparation. Pour les tours précédentes, ces dernières sont construites à l’aide de plaques de plexiglas percées par un laser. Pour le montage de la tour 3D améliorée, cette méthode de construction est techniquement impossible. Les plaques se déforment lors de la phase de perçage.

Pour supporter la masse du granulaire qui sera placée dans la cuve, les étages inférieurs ont été munis de supports illustrés dans la figure 3.8. Les tests ont révélé que ceux-ci sont capables de supporter au moins une masse de 75 kilogrammes. Dans cette même figure, il est possible d’observer la présence de nombreux trous dans les éléments qui compose les supports. Ceux-ci permettent la répartition homogène de l’air dans les étages inférieurs.

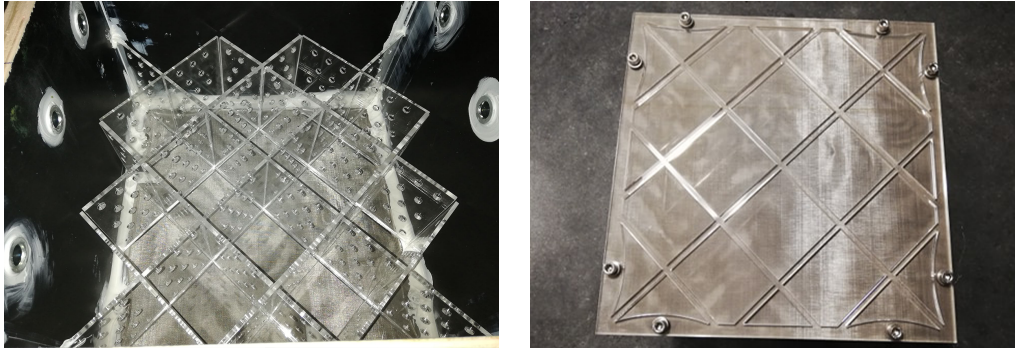


FIGURE 3.8 – Les supports et plaques de séparations construits spécialement pour la tour 3D améliorée.

Pour séparer les différents étages, un treillis métallique⁴ est maintenu entre deux plaques de plexiglas boulonnées. Pour assurer l'étanchéité du montage, les plaques sont entourées d'une épaisse couche de silicone lors du montage de la tour. L'air est donc forcé de passer au travers du treillis.

3.3 Instrumentation dans les tours

3.3.1 Mesure de densité

Pour mesurer la densité moyenne du granulaire, il suffit de se référer à la hauteur que celui-ci atteint dans la cuve. En connaissant sa masse ainsi que les dimensions de la cuve, il est possible d'obtenir cette mesure.

Au repos, la densité du granulaire peut être mesurée à l'aide de cette méthode. Mais généralement, la densité est une valeur qu'il est possible de retrouver dans les références du granulaire utilisé.

Lorsque le lit est fluidisé, la mesure peut être plus complexe. Dans le cadre de ce mémoire, les granulaires utilisés font tous partie du groupe B dans la classification de Geldart. Cela signifie que la fluidisation est forcément bouillonnante et donc que la surface du lit est instable. Mais il est toujours possible de la discerner. Pour obtenir la mesure de la densité, il suffit alors de mesurer la hauteur de la couche de granulaire.

4. MOPHY Tissu de treillis métallique (120 Mesh) 304 Wire Mesh.

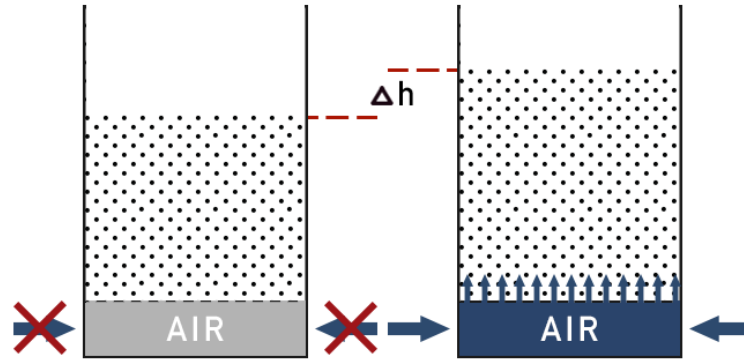


FIGURE 3.9 – Schéma représentant la variation de hauteur de la couche de granulaire lorsque de l'air est injecté dans la cuve.

3.3.2 Mesures de débit et de pression

L'aspect du lit fluidisé est directement lié à la vitesse du fluide qui se déplace au travers du granulaire. Comme décrit dans les sections 2.2 et 2.3.1, la vitesse est liée à la différence de pression qui s'applique entre le haut et le bas de la cuve.



FIGURE 3.10 – Débitmètre "2540I acrylic flowmeter 100-700 LPM of air".

Pour maintenir une fluidisation constante lors des expérimentations, les arrivées d'air sont munies d'un débitmètre (figure 3.10) permettant de caractériser le flux d'air injecté au fond de la tour.

En plus de cet instrument, un capteur de pression différentiel permet de mesurer la différence de pression entre l'étage intermédiaire et la partie supérieure de la cuve.

3.3.3 Mesures de la poussée

Comme pour l'expérience d'Archimède, la mesure de la poussée (verticale) s'effectue en calculant la différence entre le poids d'un intrus hors de la cuve et dans la cuve.

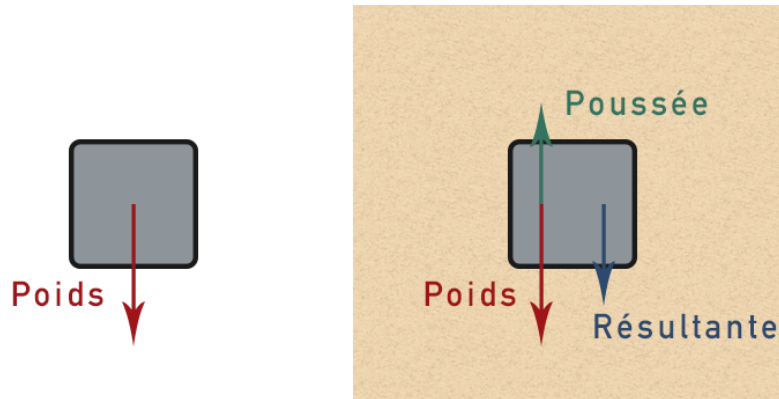


FIGURE 3.11 – Schéma de la situation expérimentale. La poussée est la différence entre les poids mesurés hors et dans la cuve.

Pour obtenir une mesure précise, un capteur de force numérique précis à 0.01N (figure 3.12) est utilisé. La majorité des mesures présentées dans le chapitre 4 sont obtenues à l'aide de celui-ci. Mais une première approche de l'expérience avec un dynamomètre analogique a permis la mise en évidence de certains phénomènes. Les mesures effectuées à l'aide de ce dernier sont présentées dans la section 4.1.

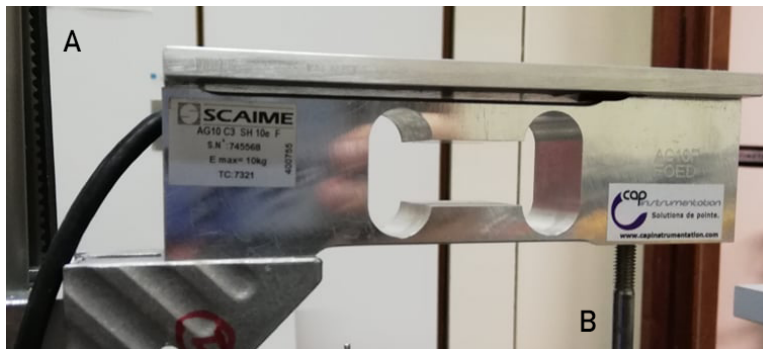


FIGURE 3.12 – Capteur de force numérique monté sur un rail (A) permettant de le déplacer. L'intrus se fixe à l'attache (B) à l'aide d'une tige rigide ou d'un câble.

3.3.4 Prise et analyse d'images

Comme déjà énoncé, l'objectif des tours 2D est de permettre l'observation directe de la dynamique du granulaire. Pour permettre l'analyse de celle-ci, la cuve est placée entre un écran LED permettant de l'éclairer et une caméra.

Les images obtenues à l'aide de cette caméra révèlent alors des zones d'ombre plus ou moins intenses. Ces variations d'intensité lumineuse sont dues à la présence de régions de densité plus faible (bulles d'air). En suivant le mouvement de ces bulles, il est possible d'étudier la dynamique du lit fluidisé.

Pour améliorer encore la visibilité, le sable utilisé précédemment est remplacé par des billes de verre ayant un diamètre compris entre 0.4 et 0.6 μm . Selon la classification de Geldart (section 2.3.3), ce type de granulaire correspond également au groupe B. C'est-à-dire le groupe qui laisse apparaître directement un régime de fluidisation bouillonnante.

Chapitre 4

Résultats expérimentaux

4.1 Expériences types

La première approche expérimentale a été effectuée avec un matériel basique. Celui-ci, imprécis, a tout de même permis d'observer divers comportements tels que :

La poussée apparaît

- indépendante de la masse,
- indépendante de la profondeur¹,
- dépendante du volume,
- dépendante de la forme du volume,
- dépendante de l'orientation du volume.

La dépendance du volume en particulier est un phénomène très intéressant. En plaçant les mesures sur un graphe, il est clair que l'augmentation du volume implique une augmentation de la poussée. Mais en plus, en traçant la droite de régression, il apparaît que la dépendance est linéaire et parallèle à la droite théorique de la poussée d'Archimède² (figure 4.1). Ce comportement combiné à l'indépendance de la masse et à l'indépendance de la profondeur laissent à penser que la poussée dans le lit fluidisé a un lien avec la poussée d'Archimède "classique". Mais ce léger décalage entre les droites suggère qu'il y a quelque chose en plus.

1. En réalité, il y a une dépendance de la profondeur. Mais elle sera observée plus tard à l'aide d'un matériel plus précis.

2. C'est-à-dire la droite qui serait obtenue avec les mêmes volumes plongés dans un liquide ayant la même masse volumique que celle du sable fluidisé ($1\,304 \pm 18 \text{ kg/m}^3$ mesuré suivant la procédure décrite dans la section 3.3.1)

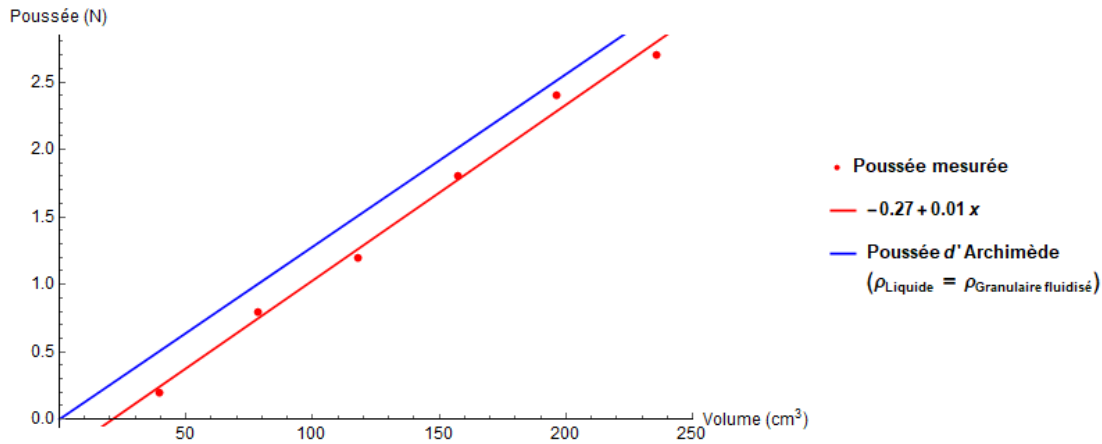


FIGURE 4.1 – Graphes des mesures de la poussée obtenue en plongeant des volumes de tailles variables. En rouge, la droite théorique que l'on obtiendrait avec Archimède dans un liquide ayant la même masse volumique que le sable fluidisé. Les barres d'erreurs sont absentes car impossibles à évaluer avec le matériel à disposition.

Une autre dépendance qui attire l'attention est la dépendance de l'orientation d'un volume asymétrique.

La dynamique du lit fluidisé permet d'imaginer que l'orientation d'un objet peut avoir une influence. Pour tester cette hypothèse sans faire varier le volume, une pyramide est plongée pointe vers le haut et ensuite pointe vers le bas dans la cuve.

Dans les deux cas, le poids effectif³ mesuré dans le lit fluidisé est inférieur au poids mesuré hors de la cuve. Cela implique que la pyramide subit une poussée. Mais selon l'orientation, la poussée mesurée n'est pas la même (figure 4.2).

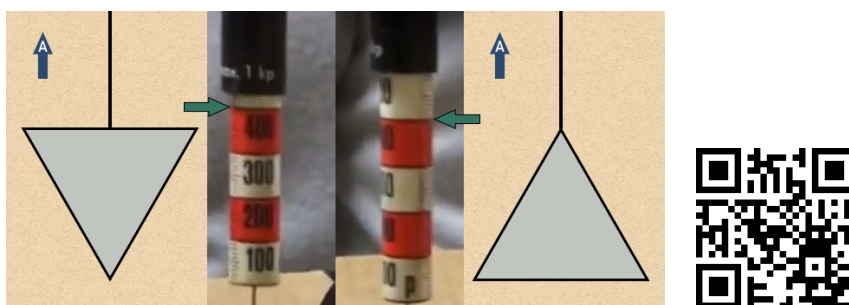


FIGURE 4.2 – Illustration de la mesure effectuée sur le dynamomètre. Lorsque la pyramide à sa pointe vers le bas, ce dernier indique que le poids effectif est plus faible que lorsque la pyramide à sa pointe vers le haut.

3. Pour rappel, la poussée est la différence entre le poids de l'objet mesuré hors de la cuve et le poids de l'objet dans la cuve (poids effectif).

Cette figure (4.2) illustre que le poids effectif de la pyramide n'est pas le même en fonction de son orientation. Elle paraît plus lourde lorsque sa pointe est vers le haut que lorsqu'elle est vers le bas.

La conclusion des expériences types est qu'il y a très probablement un lien entre la poussée d'Archimède dans un fluide et la poussée qui s'applique sur un objet placé dans un lit fluidisé. Mais qu'il existe des différences qui sont probablement causées par la dynamique du lit fluidisé.

Ces observations sont à l'origine de la poursuite de cette expérience.

4.2 Traitement des données

L'ensemble des valeurs illustrées sur les graphes à suivre ont été obtenues à l'aide du capteur de force numérique (figure 3.12). Chaque valeur est la moyenne d'un jeu de 300 mesures distinctes. Il est important de signaler que, bien qu'elles soient difficiles à distinguer dans certains cas, une barre d'erreur accompagne chaque points de chaque graphes. Cette barre d'erreur est calculée à partir des erreurs "quantifiables".

- Précision du capteur (0.01N).
- Écart type.

Il faut tout de même tenir compte également des erreurs non quantifiables bien qu'elles n'apparaissent pas sur les graphes.

- Bulle d'air dans le sable (remue l'objet).
- Mouvement horizontal de l'objet.
- Agrégation de sable sur l'objet.

4.3 Influence de la masse

L'ensemble des influences énoncées dans la section 4.1 sont étudiées une seconde fois à l'aide du capteur de force numérique.

Pour cette expérience, un récipient creux qu'il est possible de lester est plongé dans la cuve. l'intrus possède donc un volume constant, et il est plongé à une profondeur constante.

Les données illustrées dans la figure 4.3 sont donc obtenues en modifiant le contenu

de l'intrus pour qu'il soit plus ou moins lourd.

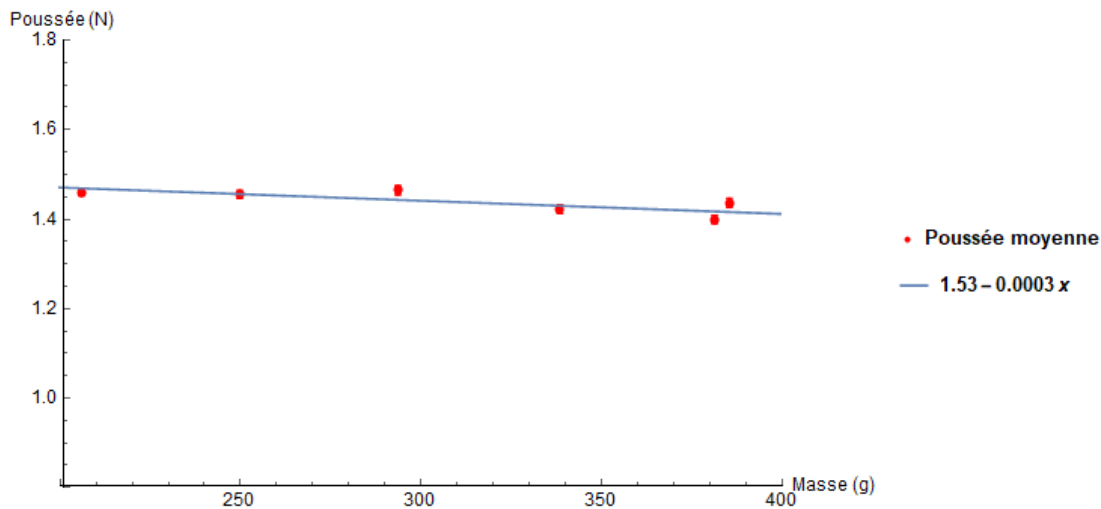


FIGURE 4.3 – Poussée moyenne en fonction de la masse d'un intrus de volume constant plongé dans le lit fluidisé.

La droite de régression tracée à partir de ces mesures laisse apparaître une pente visible. Mais l'équation de cette droite illustre que cette pente est très faible. La poussée est donc considérée indépendante de la masse.

4.4 Influence de la profondeur

Dans cette section, l'influence de la profondeur sur la poussée est étudiée à nouveau. Cette influence est déjà au centre du rapport "Archimedes principle's in fluidized sand : The influence of depth" (rédigé par l'auteur de ce mémoire) [14]. Cette section contient donc un résumé des résultats nécessaires pour ce mémoire ainsi que les résultats obtenus après la rédaction de ce rapport.

Remarque : Dans la suite de ce mémoire, l'**étude des mesures** relatives à l'influence de la profondeur sera réalisé en utilisant le terme hauteur. Le terme profondeur étant intuitivement relié à un référentiel décroissant dont l'origine est la surface, il est plus simple de lever toute ambiguïté et de traiter les données à l'aide d'un axe dont le référentiel est croissant et dont l'origine est "le fond" de la cuve. On nomme donc cet axe la hauteur⁴.

4.4.1 Premières mesures

À l'aide du capteur numérique qui est plus précis que le dynamomètre, l'étude de la poussée en fonction de la hauteur laisse cette fois apparaître une dépendance.

4. Il s'avère également que l'utilisation de la hauteur plutôt que de la profondeur est plus simple pour discuter des résultats numériques dans le chapitre 6.

Le graphe ci-dessous (figure 4.4) illustre les valeurs moyennes de la poussée depuis la surface du lit fluidisé (130 mm)⁵ jusqu'à une hauteur de 0 mm (ce qui correspond à la mesure la plus proche de l'injecteur).

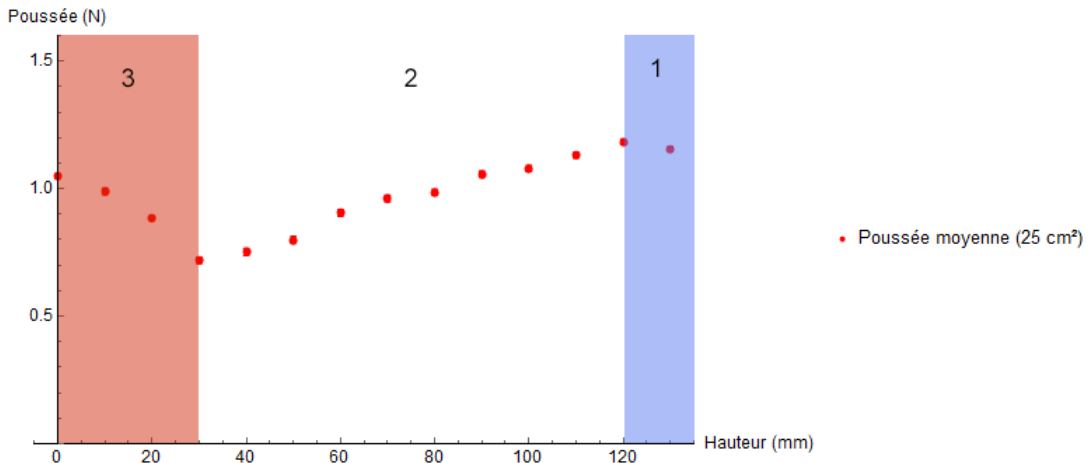


FIGURE 4.4 – Poussée moyenne en fonction de la position verticale (hauteur) d'un intrus plongé dans le lit fluidisé.

Trois régions distinctes peuvent être observées :

- 1) 120 → 130 mm : Puisque la surface du granulaire remue à cause de la fluidisation bouillonnante, un dépôt de granulaire se forme rapidement au-dessus de l'objet. De plus, les remous ayant tendance à laisser apparaître une partie de celui-ci par moments, il est possible que la mesure soit également influencée par une variation du volume immergé. Pour cette raison, le comportement à la surface semble dépendre de la géométrie du système.
- 2) 30 → 120 mm : Entre ces hauteurs, la poussée diminue lorsque l'intrus est plongé plus profondément. Cette première région indique une influence claire de la profondeur sur la poussée.
- 3) 0 → 30 mm : Dans cette région colorée en rouge, les mesures indiquent que la poussée augmente lorsque l'intrus descend sous une certaine hauteur. Mais les dimensions de la cuve⁶ utilisée ne permettent pas de discuter ces données. À ces hauteurs, la proximité de l'intrus avec l'injecteur pourrait être la cause de ce comportement⁷.

Puisque les comportements dans les régions 1 et 3 peuvent être liés à la géométrie du dispositif, ils sont mis de côté dans la suite de l'étude.

5. L'objet "placé à la surface" est placé de telle sorte que sa base supérieure se trouve à la surface du granulaire fluidisé. Il est donc complètement immergé.

6. Il s'agit de la tour prototype 3D.

7. Ces résultats motivent la construction de la cuve 3D améliorée.

4.4.2 Hypothèse

Pour expliquer le comportement observé dans la région 2, l'hypothèse suivante est proposée :

Comme le granulaire fluidisé est constamment en mouvement à cause de l'air qui essaie de s'échapper vers le haut, il est possible qu'un phénomène aérodynamique se produise et que l'air ne fluidise pas de manière homogène le granulaire au-dessus de l'objet. Il est donc possible qu'il y ait une colonne moins fluidisée qui surplombe ce dernier lorsqu'il est plongé dans le lit fluidisé (figure 4.5).

Si cela s'avère correct, alors lorsque l'objet est plongé plus profondément dans la cuve, la taille et donc le poids cette colonne augmente. Puisque la poussée correspond à la différence entre les poids de l'objet dans et hors de la cuve, elle semble varier à cause de la variation du poids de cette colonne qui, elle, dépend de la position verticale de l'objet. La poussée pourrait donc être constante, mais apparaître variable à cause de ce phénomène.

En résumé, cette hypothèse propose que la fluidisation au voisinage d'un intrus n'est pas homogène. Cette hypothèse est à l'origine de la construction des cuves 2D.

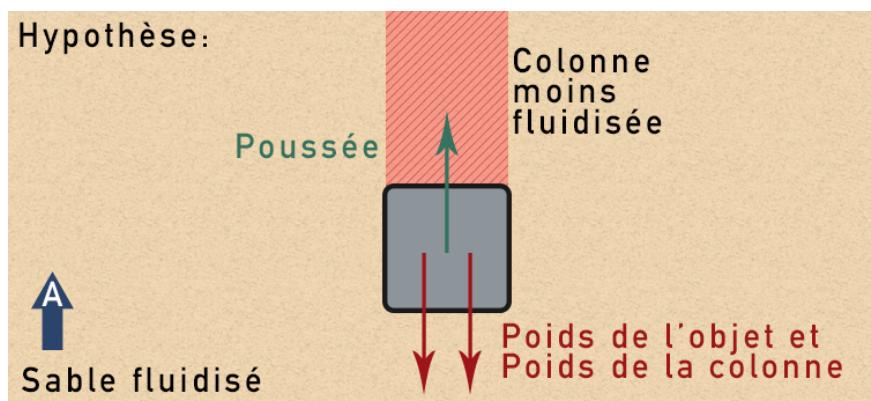


FIGURE 4.5 – Le calcul de la poussée tient compte de la différence entre le poids de l'objet et son poids effectif dans le lit fluidisé. Mais il ne tient pas compte de l'ajout du poids d'une colonne de sable qui s'appuierait sur l'intrus. Puisque selon la situation, la géométrie de cette colonne pourrait varier, elle pourrait induire une variation de la poussée apparente.

4.4.3 Influence des surfaces

Pour tester l'hypothèse, la même expérience que celle décrite dans la section 4.4.1 est menée avec deux nouveaux intrus. Ceux-ci possèdent des sections horizontales différentes du premier.

- 6.5 x 6.8 cm² (Bleu)
- 5 x 5 cm² (Rouge) (intrus précédemment utilisé)
- 3.5 x 3.8 cm² (Vert)

S'il existe une colonne de granulaire qui s'appuie sur l'objet, alors le volume de cette colonne doit dépendre de la section horizontale de celui-ci et de sa position verticale dans le lit fluidisé.

Pour garder des conditions expérimentales similaires, les objets ont tous la même taille. C'est-à-dire que les hauteurs auxquelles se trouvent les bases supérieures et inférieures de chaque objets sont les mêmes pour chaque mesures illustrées dans la figure 4.6. Mais forcément les volumes utilisés sont différents.

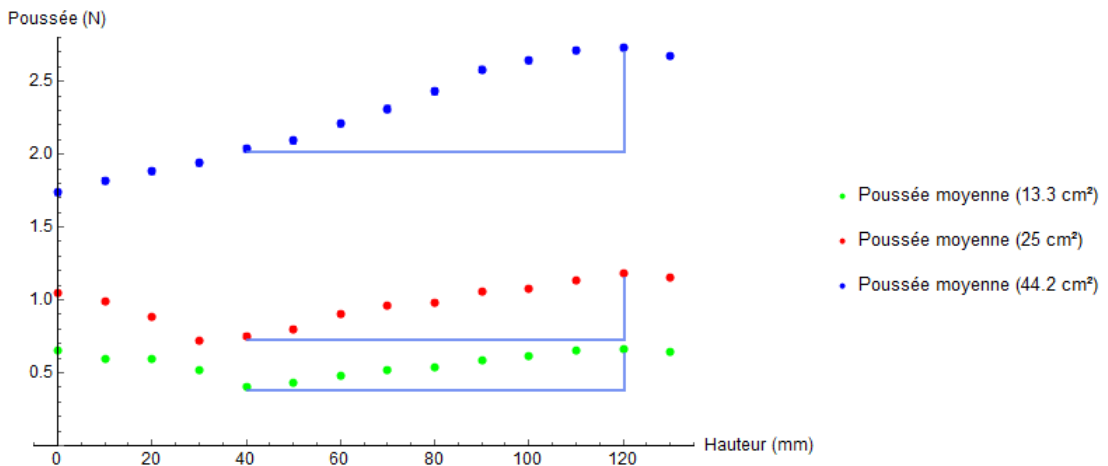


FIGURE 4.6 – Poussée en fonction de la hauteur pour les trois objets. Les données représentées en rouge sont celles illustrées dans la figure 4.4.

L'observation de cette figure laisse apparaître plusieurs informations.

1) Le décalage vertical des jeux de données :

Il s'agit d'une conséquence de l'utilisation de volumes différents. Le volume le plus important (bleu) subit une poussée plus importante que les autres.

2) La forme globale des jeux de données est la même :

Jusqu'à une certaine hauteur (qui dépend d'un intrus à l'autre), la poussée diminue lorsque l'intrus descend plus bas dans la cuve (région de 40 à 120 mm de hauteur).

3) La pente dépend de la section horizontale de l'objet :

La pente des différents jeux de données dans la région 40 à 120 mm est plus importante lorsque la section horizontale de l'objet est la plus grande.

Ce comportement des courbes correspond à celui attendu selon l'hypothèse proposée.

En effet, la colonne s'appuyant sur un objet ayant une petite section horizontale est logiquement plus fine que celle sur un objet ayant une surface plus importante placée à la même hauteur. Si ces deux objets sont ensuite placés un centimètre plus bas dans la cuve, la couche de granulaire ajoutée au-dessus du petit objet est forcément plus petite que celle sur le gros objet. Dès lors, le poids de la couche ajoutée est moins important dans le cas du petit objet. Et donc, la poussée mesurée semble diminuer moins rapidement que pour le gros objet.

4.4.4 Observations directes

Les essais effectués avec la tour prototype ont permis d'obtenir les images des figures 4.7 et 4.8 (respectivement elles représentent le lit fluidisé sans objet et avec un objet). Chaque série correspondent à une suite de 20 images successives enregistrées à l'aide d'une caméra. Sur ces images apparaissent des zones sombres (forte densité) et des zones claires (faible densité / bulles).

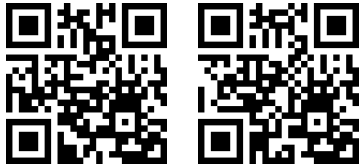
La première série (4.7) est un timelapse d'environ une seconde. Elle permet de voir que les bulles d'air se forment de manière aléatoire sur toute la largeur de la cuve.

La seconde série (4.8) est similaire à la première. Mais dans celle-ci, un objet est placé dans la cuve. Il s'agit d'un parallélépipède rectangle en plexiglas transparent. Celui-ci est trop petit pour combler l'espace entre les parois de la cuve⁸. Mais il est tout de même possible de remarquer que les bulles venant frapper

8. Il y a un espace non négligeable entre l'objet et les parois de la cuve. Une partie des bulles d'air parvient de temps à autre à se glisser par cet interstice.

l'objet par le dessous sont dévié sur les côtés. Cette dynamique correspond à celle proposé dans l'hypothèse précédemment énoncée.

Finalement, la figure 4.9 contient deux images qui sont des additions de 85 photos successives du lit fluidisé seul et avec l'objet en plexiglas. Cette figure met clairement en évidence une zone sombre qui s'appuie sur l'objet. Elle illustre donc la présence d'une zone de densité plus importante qui surplombe l'objet, la colonne énoncée précédemment.



Vidéos à partir desquels les séries d'images sont obtenues.



FIGURE 4.7 – Timelapse permettant d’illustrer la dynamique du lit fluidisé dans la tour 2D prototype en l’absence d’intrus. La fluidisation est homogène.

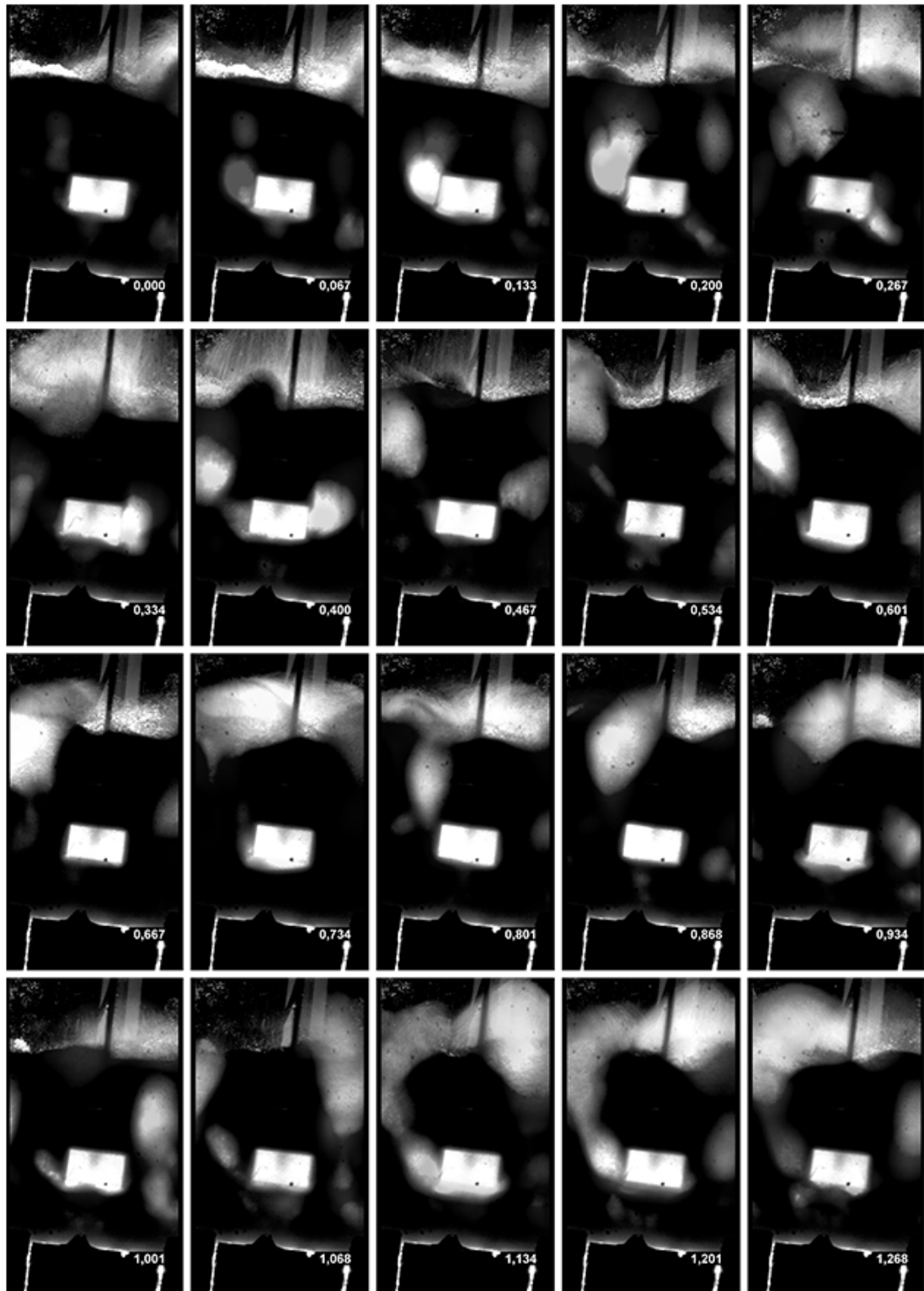


FIGURE 4.8 – Timelapse permettant d’illustrer la dynamique du lit fluidisé dans la tour 2D prototype en présence d’un intrus. La fluidisation n’est pas homogène. Les bulles d’air qui entrent en contact avec l’objet sont déviés et ne reviennent pas au-dessus de celui-ci.

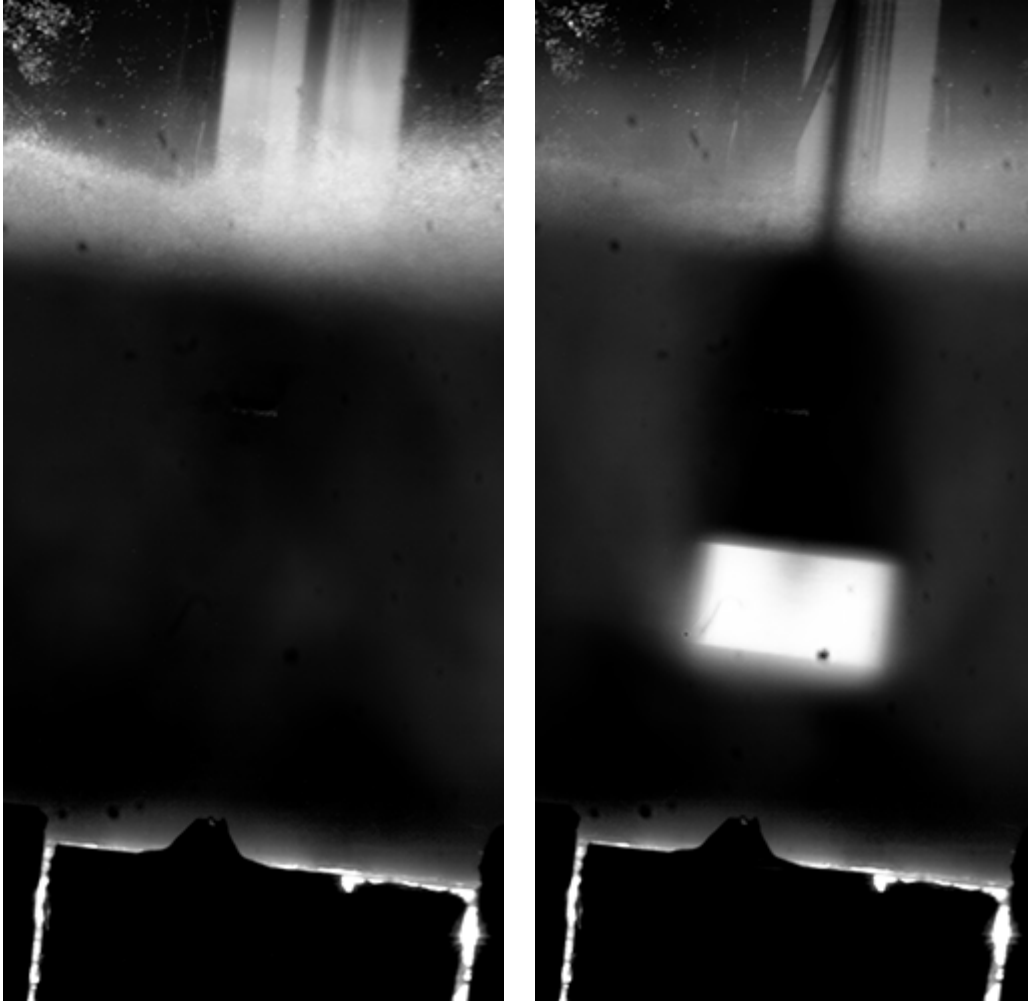


FIGURE 4.9 – Images construites à partir de l’addition de 85 images successives provenant des vidéos illustrées dans les figures 4.7 et 4.8. L’image de gauche illustre que la fluidisation est homogène en l’absence d’objet. La densité moyenne apparaît constante dans la cuve. Par contre, l’image de droite met clairement en évidence la présence d’une zone plus dense qui surplombe l’objet.

4.5 Influence du volume

Dans cette section, l'influence du volume de l'objet sur la poussée est étudiée à nouveau. Cette influence est déjà au centre du rapport "Buoyancy in fluidized sand : The influence of volume" rédigé par A. Rufo [14]. Cette section discute des résultats nécessaires pour ce mémoire à la lumière des résultats précédents.

4.5.1 Premières mesures

L'étude précédente du volume (figure 4.1) laisse apparaître un comportement proche de celui attendu avec la poussée d'Archimède. À l'aide du capteur de force numérique, la même expérience est effectuée à nouveau.

Cette fois, au vu les résultats obtenus dans la section 4.4, trois séries de parallélépipèdes sont construites. Chaque objets de chaque séries possèdent un volume différent tout en gardant une même section horizontale. L'ensemble des dimensions des objets sont décrites dans le tableau suivant :

	Sections horizontales (cm ²)	Hauteurs (cm)	Volumes (cm ³)
Série A	13.3	2.2	29.3
		3.3	43.9
		4.2	55.9
		8.4	111.7
		12.4	164.9
Série B	25	2	50
		4	100
		6	150
		8	200
		10	250
		12	300
Série C	44.2	2.8	123.8
		3.7	163.4
		5	221
		6	265.2
		7.3	322.7
		9.3	411.1
		11.2	495



FIGURE 4.10 – La série B est composée de 6 objets ayant une section horizontale commune.

La figure 4.11 permet de comparer les résultats obtenus pour les trois séries. Dans chaque cas, un comportement similaire à celui illustré dans la figure 4.1 est observé. La poussée dépend linéairement du volume. Plus celui-ci est important, plus la poussée est importante.

La comparaison des trois jeux de données donne plusieurs informations intéressantes.

- 1) Toutes les droites de régression laissent apparaître un décalage similaire à celui observé dans la figure 4.1. C'est-à-dire que les droites passent sous l'origine.
- 2) Le décalage en question dépend de la section horizontale. Plus celle-ci est grande, plus le décalage est important. Ce comportement est cohérent selon l'hypothèse de la fluidisation inhomogène laissant apparaître une colonne de granulaire sur l'intrus.
- 3) Les pentes des droites de régression linéaire sont quasiment identiques pour les trois séries d'objets. Ce qui est également cohérent avec l'hypothèse de la fluidisation inhomogène.

Ces graphes représentent donc trois jeux de données qui laissent apparaître trois droites presque parallèles. Mais celles-ci sont décalées verticalement vers le bas.

Selon l'hypothèse de la fluidisation inhomogène, ce comportement est cohérent. La poussée qui s'applique sur les objets semble dépendre linéairement de la variation de volume. Mais puisqu'il existe une colonne de granulaire qui s'appuie sur ces objets, selon la section horizontale de ceux-ci, il apparaît un décalage.

Le comportement observé semble donc correspondre à la combinaison de deux phénomènes qui sont :

- 1) La poussée verticale qui pousse l'objet vers le haut.
- 2) L'apparition d'une région de granulaire plus dense qui s'appuie sur l'objet (phénomène aérodynamique).

Comme décrit dans la section 2.3.1, les articles [7] et [8] suggèrent que le gradient de pression dans un lit fluidisé est linéaire. Plus encore, le mémoire [15] décrit en s'appuyant sur ces mêmes articles que le lit fluidisé peut s'apparenter à un fluide dont la masse volumique est donnée par $(\rho_p - \rho_g) c$, avec ρ_p la masse volumique du granulaire, ρ_g la masse volumique du fluide et c la fraction du volume occupée par les grains.

De ce fait, il est possible de faire le rapprochement entre la poussée d'Archimède qui s'applique dans un liquide au repos (section 2.1) et la poussée observée expérimentalement. Les origines de ces dernières ne sont pas les mêmes. Mais les principes restent proches. Dans un liquide, la poussée est causée par une différence de pressions hydrostatiques. Alors que dans un lit fluidisé, la poussée est probablement⁹ causée par un effet aérodynamique.

9. Ce n'est pas une affirmation, c'est une hypothèse.

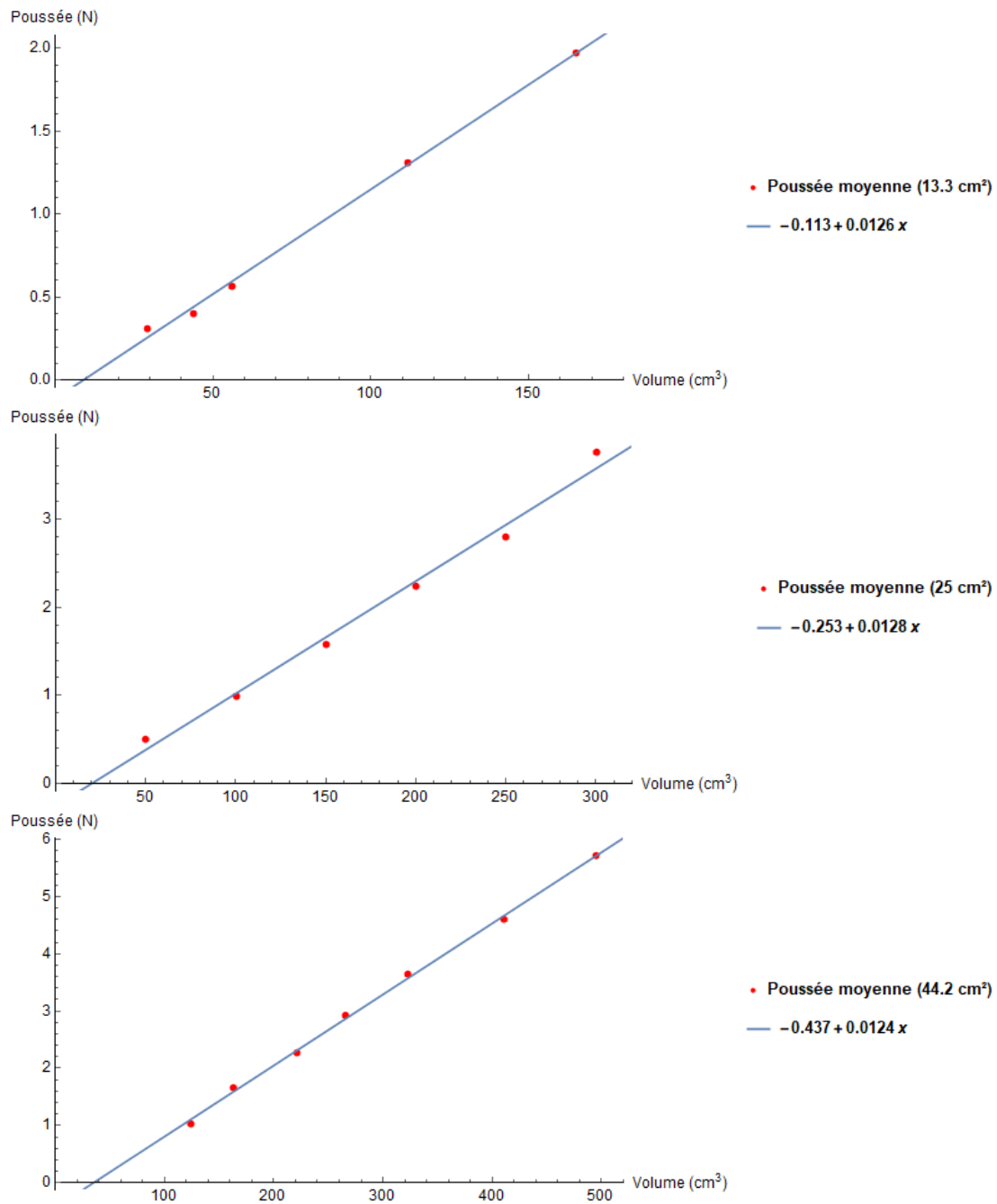


FIGURE 4.11 – Poussée moyenne s’appliquant sur les objets des séries A, B et C (de haut en bas).

4.5.2 Immersion partielle

Si la figure 4.11 illustre la combinaison de la poussée et de l'apparition d'une colonne, l'expérience d'immersion partielle a pour but d'exclure l'influence de la colonne.

Pour cela, trois objets sont construits (A, B et C). Ceux-ci sont nommés en référence des séries décrites dans la section 4.5.1. C'est à dire qu'ils ont respectivement les mêmes sections horizontales que les objets de ces différentes séries.

Mais contrairement aux objets précédents, ceux-ci sont construits avec une hauteur telle qu'il n'est pas possible de les immerger complètement. Une partie du volume reste forcément hors du lit fluidisé. Et donc aucune colonne de granulaire ne peut se former au-dessus d'eux.

Par contre, il est possible de mesurer le poids de ces objets en fonction du volume qui est immergé dans la cuve.

Expérimentalement, ils sont donc accrochés au capteur de force. Le système est descendu à l'aide du rail illustré sur la figure 3.12 avec un pas de 1 centimètre. La hauteur de 0 cm correspond à la surface inférieure de l'objet placé juste à la surface du lit fluidisé.

	Sections horizontales (cm ²)	Hauteurs immergées (cm)	Volumes immergés (cm ³)
Série A	13,3	0 - 18 (pas de 1cm)	0 - 239,4
Série B	25	0 - 18	0 - 450
Série C	44,2	0 - 18	0 - 795,6

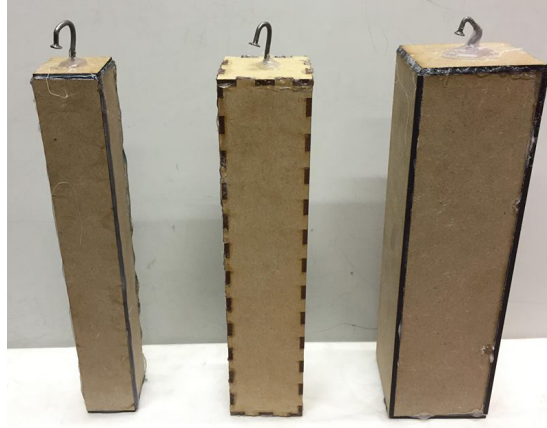


FIGURE 4.12 – Les objets A, B et C utilisés pour les expériences d’immersions partielles.

Comme pour l’expérience précédente (section 4.5.1), trois graphes sont obtenus. Sur ceux-ci il est possible d’observer un comportement très similaire à ceux observés précédemment (figure 4.11).

- 1) Toutes les droites de régression laissent apparaître un décalage similaire. Mais cette fois ce décalage s’effectue vers le haut.
- 2) Le décalage en question dépend encore de la section horizontale. Comme pour la figure 4.11, plus celle-ci est grande, plus le décalage est important.
- 3) Les pentes des droites de régression linéaire sont quasiment identiques pour les trois séries d’objets. Ce qui est également le même comportement que celui illustré par la figure 4.11.

Ce comportement n’est pas totalement surprenant. Le décalage de la droite de régression vers le bas dans les figures 4.1 et 4.11 s’explique par l’apparition d’une colonne de granulaire non/moins fluidisé qui apparaît au-dessus de l’objet. Sans cette colonne, ce décalage disparaît. On retrouve un comportement presque similaire à celui attendu avec la poussée d’Archimède classique. Cela suggère que la poussée étudiée jusqu’ici illustre la combinaison des phénomènes décrits dans la section 4.5.1. Mais il reste surprenant car il apparaît un léger décalage vers le haut.

Ce décalage peut être causé par plusieurs facteurs. Le fait qu’il soit lié à la taille de la section horizontale laisse penser à un phénomène aérodynamique.

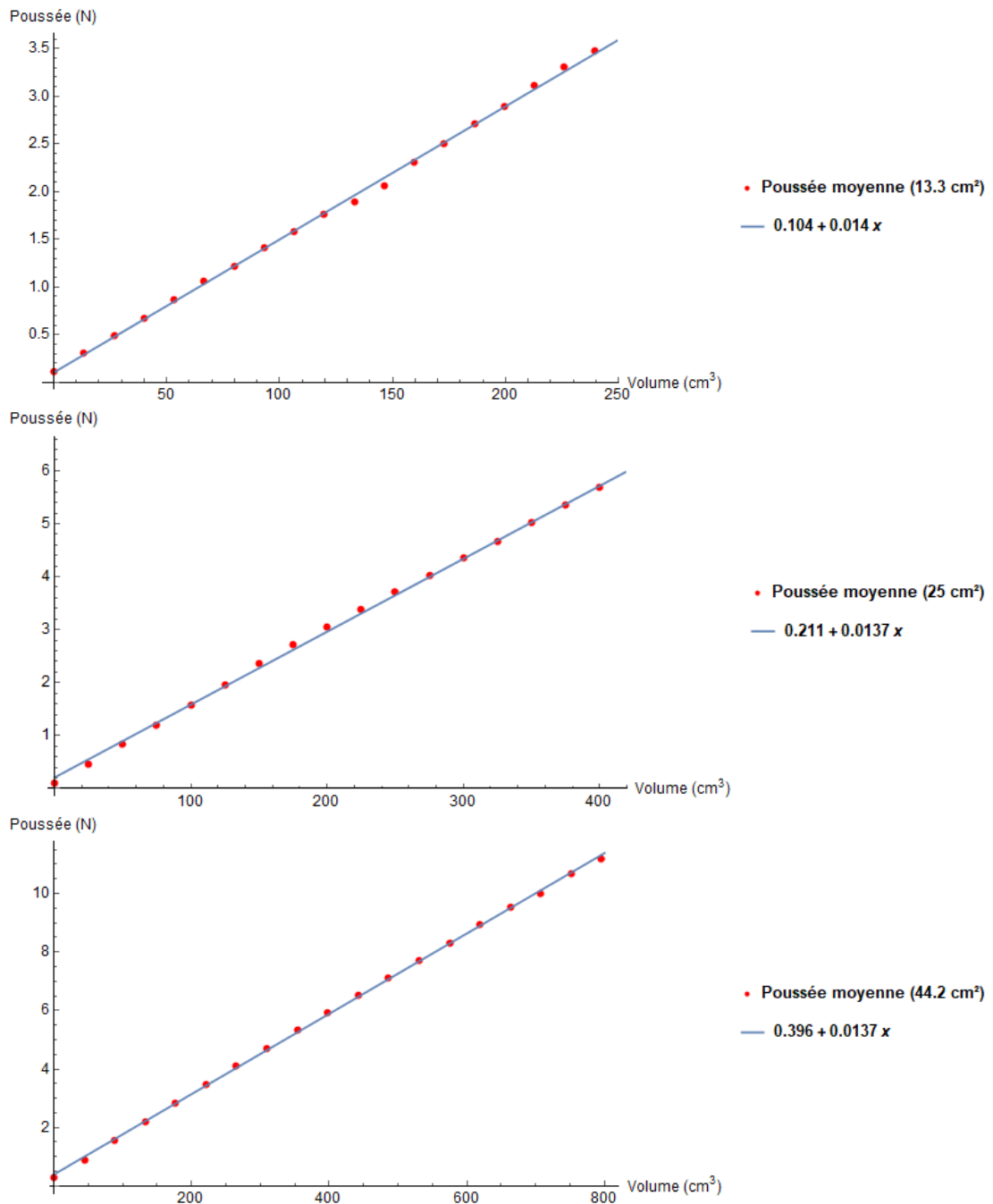


FIGURE 4.13 – Poussée moyenne s’appliquant sur les objets A, B et C en fonction du volume qui est immergé dans la cuve.

4.6 Influence de l'orientation

Comme énoncé dans la section 4.1, l'orientation d'un objet asymétrique influence la poussée qui s'applique dessus.

Les résultats précédents permettent de proposer une explication pour cette influence. La pyramide pointe vers le haut n'a pas sa base à la même hauteur que lorsque la pyramide est orientée pointe vers le bas. De ce fait, la colonne de granulaire qui s'appuie dessus n'a pas la même hauteur. Et donc, la poussée doit forcément être affectée.

4.6.1 Influence de la profondeur

Pour vérifier cette proposition, la pyramide est plongée à différentes hauteurs pointe vers le haut, ensuite pointe vers le bas. Pour obtenir plus de mesures, une seconde pyramide est construite.

La première possède une grande base et une petite hauteur ("basse"). La seconde possède une base plus petite et une grande hauteur ("haute"). Cependant, elles n'ont pas le même volume.

La figure 4.14 illustre des résultats cohérents avec l'explication proposée. Lorsque la pointe est dirigée vers le haut, la base de la pyramide est plus basse, il y a donc une plus grande colonne de sable sur la pyramide. On obtient donc deux jeux de données qui paraissent similaires mais décalés l'un par rapport à l'autre.

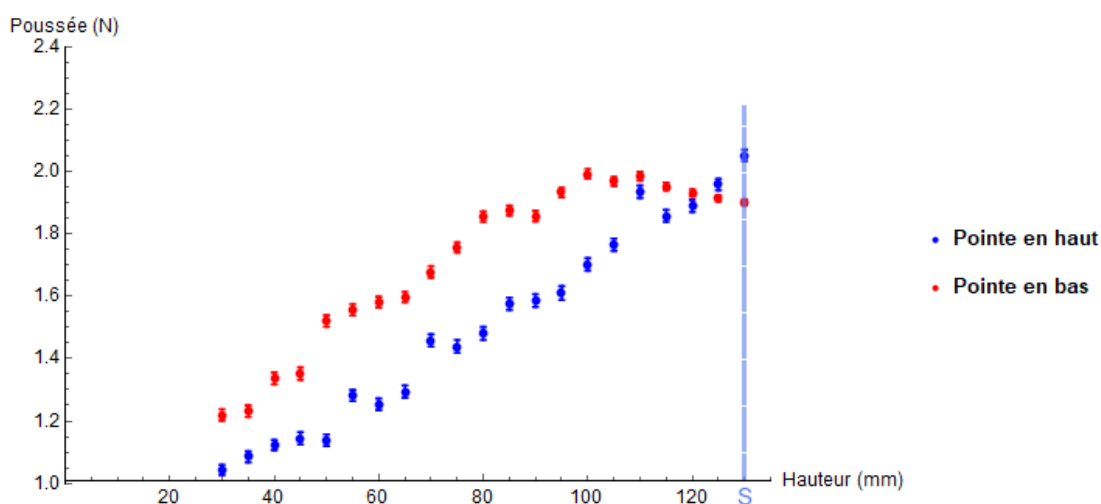


FIGURE 4.14 – Poussée en fonction de la position verticale (hauteur) et de l'orientation de la pyramide "basse".

À proximité de la surface, le comportement est similaire avec celui observé dans

la figure 4.4 pour la pyramide avec la pointe vers le bas. Un dépôt de granulaire se forme sur la base. De plus, une partie du volume n'est pas toujours complètement immergée à cause des remous à la surface. Cette combinaison de facteurs influence certainement la valeur de la poussée obtenue. Pour la pyramide ayant sa pointe vers le haut, ce comportement n'apparaît pas. La fraction du volume qui n'est pas toujours immergée est tout aussi négligeable que le dôme de granulaire qui se forme.

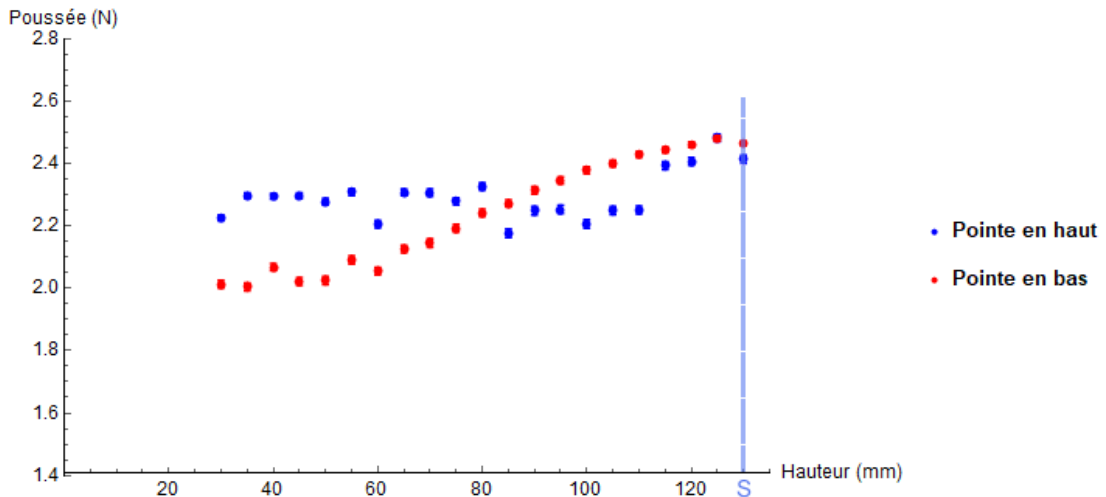


FIGURE 4.15 – Poussée en fonction de la position verticale (hauteur) et de l'orientation de la pyramide "haute".

La figure 4.15 illustre des résultats plus mitigés. Le jeu de données pour la pyramide avec la pointe vers le bas illustre une tendance similaire à celle obtenue dans la figure 4.14. Mais la pente est moins prononcée.

En comparant cette observation aux résultats obtenus dans la section 4.4.3, elle ne paraît pas si surprenante. La section 4.4.3 met en évidence qu'une section horizontale plus faible implique une pente moins marquée lorsque la hauteur varie. Dans le cadre de cette expérience, comme énoncé précédemment, la pyramide "haute" possède une base plus petite que la pyramide "basse". La différence de pente est probablement¹⁰ une conséquence de cette différence.

Concernant l'autre jeu de données, sa forme est assez particulière. Mais la figure 4.4 indique un comportement qui peut s'apparenter à celui observé. Sous une certaine hauteur (région 3 de la figure 4.4), la poussée devient de plus en plus forte au fur et à mesure que l'objet descend. L'explication retenue était que la géométrie de la cuve pouvait avoir un rôle dans ce comportement. Et donc, il est nécessaire d'étudier ce comportement à l'aide de cuves plus grandes.

10. Il s'agit d'une hypothèse nécessitant plus d'expériences.

Chapitre 5

Dispositif numérique

5.1 Méthode des éléments discrets (DEM)

5.1.1 Description

La DEM est une méthode introduite en 1979 par Cundall Strack [16]. Elle a été développée pour simuler le comportement d'un granulaire. Cette méthode fonctionne en résolvant les équations de Newton pour chaque particules après une certaine période de temps, le pas de temps Δt . En tenant compte de leurs vitesses, de leurs positions et de leurs accélérations au temps t_1 , un ordinateur est capable d'évaluer les trajectoires que vont suivre les différents éléments durant le pas de temps suivant. Une fois celui-ci écoulé, au temps t_2 , la somme des forces est évaluée à nouveau et l'itération recommence

En considérant un pas de temps assez court, il est possible de générer des simulations suffisamment précises pour établir la dynamique de différents systèmes complexes contenant un grand nombre d'éléments.

5.1.2 Algorithme Leapfrog

L'algorithme Leapfrog ou "saut de grenouille" est une méthode d'ordre 2 de résolution des équations différentielles. Celui-ci a de nombreux avantages par rapport aux autres méthodes telles qu'Euler ou Runge-Kutta [17]. En particulier, il est plus précis qu'Euler, et il nécessite beaucoup moins de calculs que les méthodes de même ordre. Dans le cadre d'une simulation nécessitant de travailler avec un très grand nombre de particules telle que celle présentée, il s'agit d'un atout non négligeable.

Contrairement aux autres algorithmes, celui-ci ne met pas à jour la position et la vitesse de chaque particule en même temps. Il y a toujours un pas de temps entier entre la réévaluation de ces valeurs. Mais elles sont mises à jour avec un demi-pas de temps d'écart comme illustrées dans la figure 3.1 (inspirée par [17]).

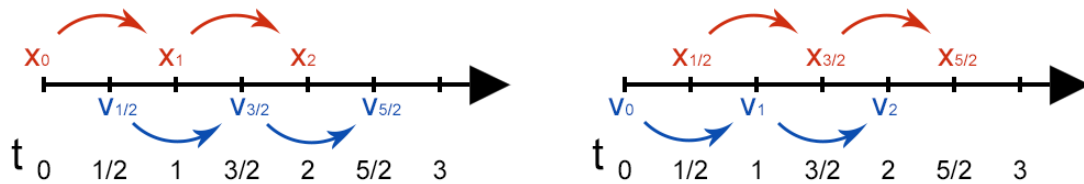


FIGURE 5.1 – Représentation schématique du fonctionnement de l'algorithme Leapfrog. À gauche, la vitesse est mise à jour au milieu d'un pas de temps. À droite, la position est mise à jour au milieu d'un pas de temps.

Pour évaluer ces valeurs, on utilise les règles régissant les mouvements rectilignes uniformes (MRU) et uniformément accélérés (MRUA).

Il existe deux méthodes de simulation avec l'algorithme Leapfrog. La première est de mettre à jour la vitesse au milieu du pas de temps. La position est alors évaluée à la fin de ce dernier avec cette nouvelle vitesse (figure 5.2, [18]).

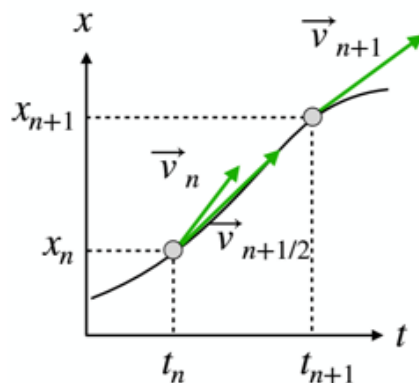


FIGURE 5.2 – La vitesse est mise à jour au milieu du pas de temps. La position de l'objet à la fin de ce dernier est évaluée à l'aide de cette nouvelle vitesse.

La seconde est de calculer la position au milieu du pas de temps (figure 5.3, [18]). Dans le cadre de ce mémoire, c'est cette seconde méthode qui est appliquée.

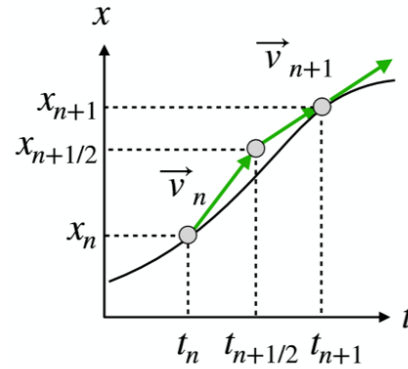


FIGURE 5.3 – La position est mise à jour au milieu du pas de temps. Le mouvement est réévalué à partir de cette nouvelle position.

Dans cette méthode, la position et la vitesse sont évaluées à l'aide des formules suivantes.

$$\begin{aligned} x_{n+1/2} &= x_n + \frac{1}{2}v_n\Delta t \\ v_{n+1} &= v_n + f(x_{n+1/2})\Delta t \\ x_{n+1} &= x_{n+1/2} + \frac{1}{2}v_{n+1}\Delta t \end{aligned}$$

En combinant ces trois relations, on obtient :

$$x_{n+1} = x_n + v_n\Delta t + \frac{1}{2}a_{n+1/2}\Delta t^2$$

Avec $a_{n+1/2} = f(x_{n+1/2})$, on retrouve la formule d'un MRUA dont l'accélération est calculée au milieu du pas de temps. Cette accélération est évaluée à partir des forces qui s'appliquent sur chaque éléments représentés dans la cavité. Dans les expériences numériques à suivre, les uniques forces subies par les diverses particules sont la pesanteur et les forces de contacts.

La pesanteur est assez simple à modéliser. Connaissant la masse de chaque objets, en utilisant l'accélération gravifique $g = 9,81 \text{ m/s}^2$, il suffit d'ajouter une force constante dirigée vers le bas à chaque réévaluations de la force lors des itérations de l'algorithme.

Les forces de contacts sont plus complexes à gérer puisque chaque contact est différent. Dans un premier temps, il est important de signaler que les contacts entre deux disques et les contacts entre un disque et une paroi sont analogues¹.

1. Il y a des différences entre la gestion des détails de ses différents contacts. Mais il s'agit globalement du même principe.

Le principe de ces deux types de contacts se basent sur la superposition des deux éléments qui se rencontrent.

La distance surface à surface (δ) permet de déduire si deux éléments se superposent. Dans le cas de deux particules de rayon R_a et R_b , un contact est détecté si

$$\delta = \sqrt{(x_a - x_b)^2 + (y_a - y_b)^2} - (R_a + R_b) \leq 0$$

avec les x_i et y_i les coordonnées du centre des objets (respectivement a et b).

Pour optimiser la rapidité d'exécution de l'algorithme, celui-ci calcul la valeur de δ uniquement pour des particules proches. Pour obtenir une simulation stable (aucun oubli d'interaction) avec un temps d'exécution optimale, on évalue que les contacts qui sont possibles. Pour cela, on utilise un réseau de cellules liés².

Chaque particule est associée à la cellule dans laquelle elle se trouve. Les contacts sont alors évalués entre la particule et les particules présentent dans cette même cellule et les cellules voisines. En liant à chaque itérations les particules à leurs cellules, il n'est pas possible d'obtenir un contact non répertorié tant que les particules n'ont pas une vitesse trop importante.

Ce système de cellules liées permet de réduire significativement le nombre de calculs nécessaires à chaque itérations.

5.1.3 Forces de contact

Lorsque deux éléments se rencontrent (particule - particule ou particule - paroi), ceux-ci se superposent partiellement. La force de répulsion entre eux dépend de l'importance de cette superposition (figure 5.4, [18]). Cette force suit la loi de Hooke.

$$F_c = -k_n \delta$$

Avec k_n la raideur du ressort.

2. Le module 2D est décomposé en une grille de cases à l'instar du célèbre jeu "touché-coulé".

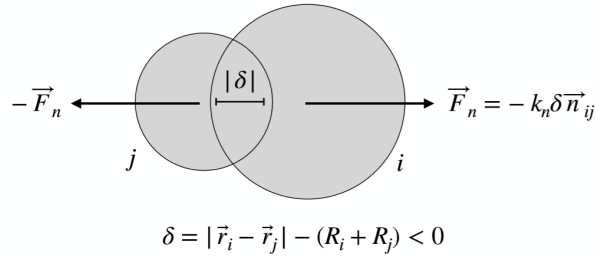


FIGURE 5.4 – Représentation schématique de la superposition (δ) à l'origine de la force entre deux éléments i et j . cette force est dirigée selon la normale, l'axe qui passe par les centres des deux particules.

La direction de cette force est dirigée selon l'axe passant par les centres des deux particules en contact, ou perpendiculairement à la paroi selon le type de contact. La force étant répulsive, le sens dépend des positions relatives des deux éléments.

Afin de tenir compte du caractère dissipatif des collisions dans un milieu granulaire, le ressort du modèle de contact peut être couplé à un amortisseur visqueux. La force de répulsion normale est alors donnée par

$$\begin{aligned} F_n &= F_c + F_v \\ &= -k_n \delta - \eta \frac{d\delta}{dt} \end{aligned}$$

Avec η le coefficient de viscosité tel que :

$$\eta = -2 \ln e \sqrt{\frac{M k_n}{(\ln e)^2 + \pi^2}}$$

Qui s'exprime à l'aide de M , la masse effective des éléments en contact³, et e , le coefficient de restitution qui appartient à l'intervalle $[0,1[$. Ce dernier est fixé à 0.3 dans le cadre de ce mémoire.

$$M = \frac{m_a m_b}{m_a + m_b}$$

5.1.4 Forces de friction

La friction entre les grains n'est simulée que dans un cas dynamique. La friction statique n'est pas représentée.

3. Pour un contact disque - paroi, on utilise la masse du disque.

La friction dynamique s'obtient selon la méthode de Coulomb.

$$\vec{F}_t = \mu F_n \vec{t}$$

Cette force est donc obtenue à partir de la force normale multipliée par le coefficient de friction μ . Elle est tangentielle au contact et orientée de manière à s'opposer à la vitesse de glissement qui est parallèle au vecteur \vec{t} .

5.1.5 Cavité

La cavité qui est définie dans la simulation est similaire à celle présentée dans la figure 3.1. Il s'agit d'une enceinte en 2 dimensions qui se divise en deux parties.

Contrairement aux cuves 2D réelles nécessitant deux étages inférieurs séparés, la cuve numérique ne nécessite qu'un seul étage inférieur qui est similaire à l'étage intermédiaire décrit dans la section 3.2.3. Dans cet étage séparé par une paroi semi-perméable de la partie supérieure ("cuve"), On initialise l'air qui est ensuite poussé vers le haut (plus de détails dans la section 5.1.8).

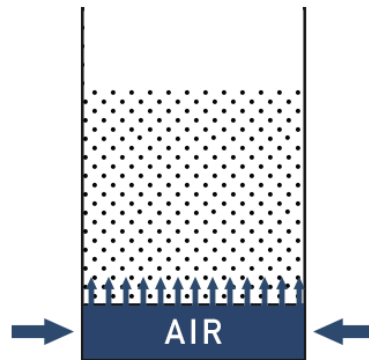


FIGURE 3.1 – Schéma de base de la cuve à granulaire. (Répétition page 16)

La cuve est immobile (pas de mouvement des parois) et verticale (pesanteur dirigée vers le bas). Le flux d'air est supposé être homogène sur toute la largeur de celle-ci. Les particules d'air apparaissent aléatoirement sur toute la largeur de l'étage inférieur.

5.1.6 Granulaire

Pour simuler le granulaire, des disques (nous sommes en 2D) sont disposés dans la cuve de manière aléatoire. Avant que la prise de mesure ne débute, les grains sont soumis à la pesanteur et chute dans le fond de la cuve. Au début de chaque simulation, se forme donc un empilement aléatoire de grains.

Pour éviter la formation de structures particulières dans l'empilement des grains, ceux-ci sont initialisés avec un rayon variable. Le choix du rayon de chaque grains est aléatoire mais limité entre deux valeurs.

- Rayon maximal (R_{max}) : valeur maximale que peut prendre le rayon d'un grain.
- Déviation (Dev) : pourcentage défini tel que chaque élément du granulaire possède un rayon choisi aléatoirement entre $R_{max} (1 - Dev)$ et R_{max} .

La masse de chaque élément du granulaire est calculée pour que chaque grains possèdent la même masse surfacique.

La taille des cellules décrites dans la section 5.1.2 est définie à partir de R_{max} . Il s'agit de carrés dont le côté est légèrement supérieur au double de R_{max} .

5.1.7 Intrus

Dans chaque simulation, tout comme dans les expérience, un objet est introduit dans la cuve. Dans le cadre de ce mémoire, l'objectif est d'étudier la dynamique du granulaire autour d'un intrus qui reste à une position fixe dans la cuve et d'essayer d'obtenir un comportement similaire à celui observé avec les manipulations expérimentales.

Plutôt que de fixer l'intrus dans la cuve, on le définit avec une masse très importante. Suivant la seconde loi de Newton, $\vec{F} = m \vec{a}$, puisque sa masse est importante, les accélérations seront négligeables. De ce fait, l'objet reste presque immobile. L'intrus se comporte alors comme tous les autres éléments qui se trouvent dans la cuve.

Pour éviter qu'il ne chute dans le fond de cette dernière, la pesanteur ne s'applique pas dessus. L'intrus n'est donc soumis qu'aux forces de contacts.

Pour chaque expériences, l'intrus qui est introduit dans la cuve correspond à un disque dont le rayon est un multiple de R_{max} . L'une des perspectives futures est de mettre en place un objet de forme plus complexe en associant plusieurs disques.

5.1.8 Air

Finalement, comme introduit dans la section 2.4, l'air est simulé à l'aide de particules de petite taille qui sont poussées à remonter dans la cuve.

Simuler l'air de cette façon pose de nombreux problèmes théoriques et pratiques. Mais dans le cadre des simulations effectuées, il s'agit d'une modélisation qui a plusieurs avantages.

Dans la littérature, modéliser un fluide dans ce genre de simulation (DEM) est complexe. D'autres types de simulation permettent d'obtenir des résultats plus ou moins réalistes. Mais peu d'entre elles parviennent à combiner la simulation réaliste d'un fluide et d'un grand nombre d'éléments se déplaçant dedans.

Puisque l'objectif de ce mémoire est de parvenir à étudier la dynamique du granulaire autour d'un intrus, le modèle choisi s'est orienté vers une simulation capable de traiter un grand nombre de particules.

Comme décrit dans la section 2.3, le modèle DEM permet de simuler des lits fluidisés en appliquant des forces directement sur les éléments représentant le granulaire. En suivant ce principe, il est possible d'obtenir une fluidisation homogène et de construire un lit fluidisé plus ou moins réaliste. Mais les expériences réelles décrites dans le chapitre 4 mettent en évidence que la fluidisation n'est pas tout à fait homogène autour d'un intrus plongé dans la cuve.

Pour représenter ce phénomène numériquement, l'idée proposée est de simuler l'air à l'aide de petites particules qui, poussées par une force verticale, se frayent un chemin au travers du granulaire. En remontant de cette manière au travers de celui-ci, elles bousculent les différents éléments présents dans la cuve et sont donc à l'origine de la dynamique du lit fluidisé. Mais ces contacts ont également une influence sur le mouvement des particules d'air. On obtient alors un flux qui dépend des éléments sur la route des différentes particules et donc une fluidisation qui n'est plus homogène.

Cette dynamique n'est pas contrainte ou lié au choix de certaines variables placées dans diverses formules. De plus, le choix d'utiliser ce type d'élément pour simuler l'air est d'autant plus intéressant dans ce type de simulation puisque celles-ci sont faites pour traiter de manière optimale les interactions entre différents grains.

Toute la difficulté de ce modèle est de trouver des paramètres permettant de simuler au mieux un lit fluidisé à l'aide de ces particules d'air. Parmi ceux-ci, la taille et la masse des particules, la norme de la force qui les pousse et surtout le nombre d'éléments.

L'étude de ce paramétrage est au centre du mémoire d'A. Rufo. Celui-ci se base sur le même modèle. Mais aucun intrus n'est présent dans sa cuve.

Les forces sur les particules d'air

La première force qui s'applique sur les particules d'air est la force motrice (F_m). Il s'agit une force constante dirigée vers le haut qui, à chaque itération, donne une impulsion à toutes les particules d'air. Cette impulsion est calculée automatiquement pour que la particule soit capable d'atteindre une vitesse (v_{max}) définie en un certain nombre de pas de temps (T_{car})⁴ lorsqu'elle est initialement au repos. Cette force peut être assimilée à la différence de pression à l'origine du flux d'air entre le bas et le haut de la cuve.

$$\begin{aligned} F_{m,y}^{\vec{}} &= m a_y^{\vec{}} \\ |a_y| &= \frac{v_{max}}{T_{car}} \end{aligned}$$

La seconde force qui s'applique sur les particules d'air est une force visqueuse (F_v). Cette force, est dirigée dans le sens opposé à la vitesse et elle dépend des mêmes paramètres que la poussée verticale. C'est elle qui permet d'empêcher la particule d'air de dépasser la vitesse maximale définie. Lorsqu'une particule atteint cette vitesse, la force visqueuse s'oppose parfaitement à la force de poussée. Mais contrairement à la poussée qui est purement verticale, cette force visqueuse agit aussi bien verticalement qu'horizontalement.

$$\vec{F}_{v,i} = -\frac{m|a_y|}{v_{max}} \vec{v}_i, \quad i \equiv x, y$$

La force totale qui s'applique sur les particules d'air (F_a) est donc la combinaison des composantes horizontales et verticales

$$\begin{aligned} F_{a,x}^{\vec{}} &= F_{v,x}^{\vec{}} \\ F_{a,y}^{\vec{}} &= F_{m,y}^{\vec{}} + F_{v,y}^{\vec{}} \end{aligned}$$

4. Dans le cadre de ce mémoire $T_{car} = 100 \Delta t$

5.1.9 Paramétrage

Le tableau ci-dessous décrit le paramétrage utilisé dans le cadre des simulations.

<u>Paramètres</u>	<u>Valeurs</u>
<u>Paramètres globaux</u>	
Pas de temps (dt)	$1 \cdot 10^{-6}$ s
Coefficient de friction (μ)	0.6
Coefficient de restitution (e)	0.3
Coefficient de raideur du ressort (k_n)	200 N/m
<u>Dimensions de la cavité</u>	
Hauteur de la cuve	10 cm
Hauteur de l'étage intermédiaire	0.5 cm
Largeur de la cavité	3 cm
<u>Granulaire</u>	
Rayons minimum et maximum	336 - 400 μm (Dev = 16%)
Masse unitaire	$2.3 \cdot 10^{-6}$ kg
Masse surfacique	1.14 kg/m ²
Nombre de grains	2 000
<u>Intrus</u>	
Masse	100 000 kg
Rayon ($N \times R_{max}$)	[10 à 20]*400 μm Variable
Position du centre (0 \equiv fond de cuve)*	[1.25 - 2.45] cm Variable
<u>Air**</u>	
Rayon	200 μm
Masse unitaire	$1.2 \cdot 10^{-6}$ kg
Masse surfacique	2.39 kg/m ²
Vitesse maximale	5 cm/s
Densité (surface des particules / surface injecteur)	0.025

* Numériquement, la hauteur est mesurée à partir du fond de la cuve alors qu'expérimentalement, la mesure s'effectue à partir de la surface du granulaire!

** Les simulations traitant de la profondeur et du volume sont effectuées avec les paramètres cités ci-dessus. En parallèle, A. Rufo évalue la dynamique d'un lit fluidisé numérique en faisant varier les paramètres énoncés dans la section "Air".

Chapitre 6

Résultats numériques

6.1 Aperçu

L'analyse des données décrites dans les sections suivantes permet de juger de l'efficacité du paramétrage ainsi que du fonctionnement du modèle proposé. Mais avant d'étudier les données brutes, il est intéressant de prendre un instant pour observer visuellement la dynamique numérique qui a été mise en place.



Ces Qr codes permettent d'accéder respectivement à des vidéos illustrant la dynamique du granulaire et la dynamique des particules d'air en présence des mêmes intrus.

Pour ces deux vidéos, il s'agit d'animations produites à partir des mêmes simulations. Mais elles illustrent uniquement une partie des éléments présents dans la cuve par soucis de clarté.

Le mouvement du granulaire dans ces animations est causé par le passage des particules d'air comme illustré dans la figure 6.1. Plus nette que les animations, cette figure met en évidence que le granulaire est bousculé par les particules d'air. Et elle met également en évidence la déviation de ces dernières par l'intrus. Visuellement, cette figure et les animations montrent que la dynamique numérique est qualitativement similaire à la dynamique expérimentale.

Il est tout de même important de noter que des éléments du granulaire sont emportés en haut de la cuve. Ce comportement particulier est causé par des poches de particules d'air qui piègent quelques grains et qui les emportent. La première image de la figure 6.1 illustre clairement ce comportement. La modélisation du fluide à l'aide des particules et le fait que la simulation soit en deux dimensions sont à l'origine de ces poches. Il est probable qu'elles n'apparaîtront pas dans une

simulation en trois dimensions.

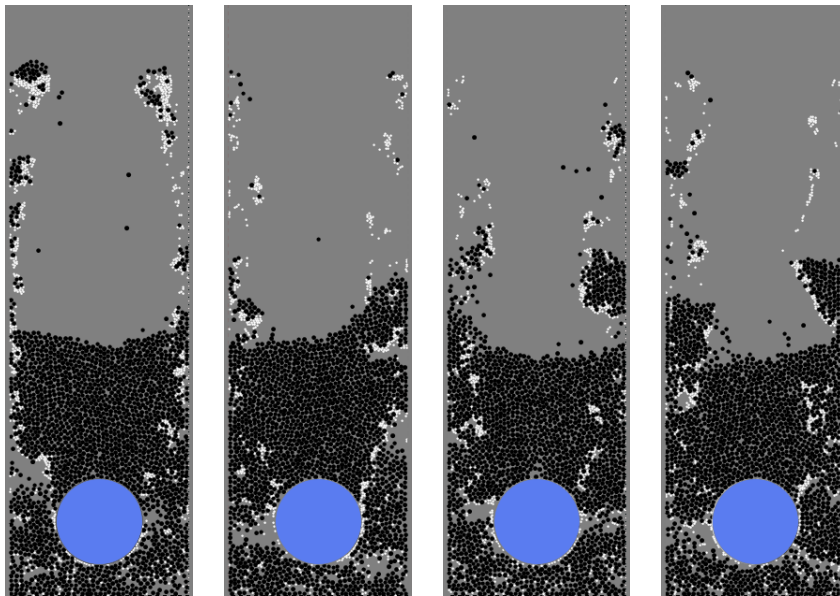


FIGURE 6.1 – Quatre instantanés provenant d’une simulation avec un intrus dont le rayon est $18 R_{max}$. Le granulaire (noir) est bousculé par les particules d’air (blanche). Ces dernières sont déviées par l’intrus (bleu).

La figure 6.2 est une photo construite en superposant 200 images successives d’une des animations du granulaire. Cette image met en évidence la présence d’une zone plus foncée située au-dessus de l’intrus tout comme la figure 4.9 (expérimentale). Le lit fluidisé numérique n’est donc pas homogène. Il apparaît une zone moins fluidisé au-dessus d’un intrus. Cette figure est discutée plus en détail dans la section 6.5.5 où elle est comparée avec des images similaires. Mais à première vue, les simulations numériques se comportent comme les lits fluidisés expérimentaux décrivent dans le chapitre 4 lorsqu’un intrus est plongé dedans.

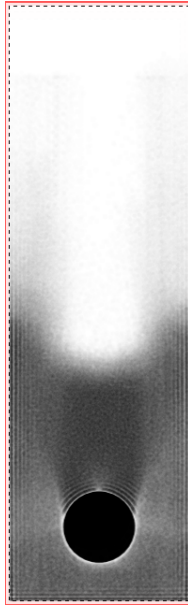


FIGURE 6.2 – Superposition de 200 images successives de l’animation du lit fluidisé numérique dans lequel est plongé un intrus dont le rayon est 15 fois R_{max} .

6.2 Mesure de la Poussée

Chaque simulations effectuées permettent de collecter de nombreuses données. Expérimentalement, c’est la poussée qui s’applique sur l’intrus qui est particulièrement étudiée. Numériquement, cette mesure est également possible en étudiant la somme des forces verticales sur l’intrus.

Dans les sections à suivre, l’étude de la somme des forces verticales sur l’intrus permet de mettre en évidence plusieurs comportements. Les mesures des forces s’effectuent toutes de la même manière.

Comme décrit dans le chapitre 5, la simulation avance dans le temps par itération. Entre deux de ces itérations, un pas de temps de $1 \mu s$ s’écoule. Et ensuite, les forces qui s’appliquent sur chaque éléments dans la cuve sont calculées à nouveau. La force verticale qui s’applique sur l’intrus est donc calculée à chaque pas de temps.

Une mesure comme celles qui sont illustrées dans les figures des sections suivantes, est obtenue en divisant la somme des forces verticales qui s’appliquent sur l’intrus entre deux instants t_1 et t_2 par le nombre de pas de temps présent dans cet intervalle. Chaque mesures correspondent donc à la valeur moyenne de la force sur les pas de temps séparant la dernière mesure de la précédente. De manière générale, l’intervalle de temps en question correspond à $1/30$ de seconde.

Cela correspond à 33 324 pas de temps entier entre les temps t_1 et t_2 .

Dans les mesures à suivre, la somme des forces ne tient compte que des contraintes externes sur l'intrus. Les mesures se distribuent donc autour de l'axe des abscisses car elles ne tiennent pas compte du poids de celui-ci. Les figures à suivre indiquent donc des forces qui oscillent entre des valeurs positives et négatives. Une valeur positive signifie que l'intrus subit une force résultante verticale vers le haut. Une valeur négative signifie que la force résultante est dirigée vers le bas.

Par facilité, la force verticale sur l'intrus est notée poussée (numérique) dans la suite de ce document.

6.3 Analyse de densité

Expérimentalement, une première analyse de la densité est illustrée avec la figure 4.9. Numériquement, le même comportement apparaît dans la figure 6.2. Mais à l'aide des données collectées, les simulations permettent d'aller plus loin dans l'étude de la densité.

Le dispositif est découpé en plusieurs petites sections. Dans celles-ci, le nombre moyen de grains est calculé entre les instants t_1 et t_2 . Il est alors possible de suivre l'évolution de la densité des grains dans chacune de ces régions pendant la simulation.

Cette analyse met en évidence la disposition du granulaire dans la cuve. Une analyse comparative entre les résultats expérimentaux et numériques est à envisager dans les perspectives.

6.4 Champs des vitesses (PIV)

Associé à l'étude de la densité qui permet d'obtenir une idée de la disposition du granulaire, l'étude du champs des vitesses permet d'étudier le mouvement moyen des grains présents dans ces mêmes régions.

La vitesse moyenne du granulaire dans chaque régions est obtenue en divisant la somme des vitesses par le nombre de grains présents dans la région.

Comme pour l'analyse de la densité, une comparaison expérimentale / numérique est à envisager dans les perspectives.

6.5 Influence de la taille de l'intrus

6.5.1 Déroulement d'une simulation

Comme pour les expériences décrites dans le chapitre 4, un intrus de tailles variables est introduit dans la cuve numérique. Puisque la situation numérique est en deux dimensions, l'étude de la taille de l'objet revient à analyser l'influence qu'a la surface sur la poussée.

Des intrus de rayons variables sont placés à une hauteur déterminée. Les rayons des différents intrus varient de $10 R_{max}$ à $20 R_{max}$. Et pour chaque simulations, le centre des objets se trouve initialement à 1.25 cm au-dessus du fond de la cuve (la séparation semi-perméable). Cette hauteur correspond à $1/8$ de la hauteur de la cuve.

Les simulations ont toutes une durée de 10 secondes pendant lesquelles les contraintes sont enregistrées à un rythme de 30 mesures par seconde. Dans le cadre de l'étude de l'influence de la surface, un schéma similaire pour toutes les simulations est apparu.

0 - 2 secondes :

Le granulaire est tassé dans le fond de la cuve et entoure l'objet. L'air est injecté depuis le bas de la cuve. Mais l'empilement du granulaire étant très compacts, les particules d'air ne parviennent pas à se frayer un chemin. Plutôt que de traverser, ces particules forment un front sous le granulaire. Une fois que ce front est suffisamment fort¹, l'empilement se soulève, comme emporté par une vague. Mais l'intrus, très lourd, reste immobile.

Une fois que ce front atteint l'objet, il se brise et laisse échapper plusieurs grains qui retombent dans le fond de la cuve. Mais l'empilement compact ne se reforme pas, car les particules d'air forment un flux continu qui maintient le granulaire en mouvement.

Au bout d'environ deux secondes, le front initial est totalement désagrégé. Le granulaire est retombé dans la cuve. Mais le flux constant de particules d'air maintient une dynamique suffisante pour ne pas voir apparaître un nouveau front. Le granulaire numérique est alors fluidisé. La situation est stabilisée.

1. Lorsque suffisamment de particules d'air poussent l'empilement de granulaire.

2 - 10 secondes :

Lorsque la situation est stabilisée, la simulation se maintient dans une dynamique constante. Les particules d'airs se frayent un chemin au travers des grains ce qui a pour conséquence de les maintenir en mouvement.

Toutes les mesures sont effectuées une fois ce régime stationnaire établi.

6.5.2 Profils de poussée

Le profil de poussée illustre le schéma décrit ci-dessus. La figure 6.3 qui montre l'évolution poussée qui s'applique sur l'intrus ($15 R_{max}$) en fonction du temps, laisse apparaître un pic important dans les deux premières secondes de simulation. Celui-ci est suivi de 8 secondes pendant lesquelles les mesures se distribuent entre deux valeurs (intervalle stable).

Les profils de poussée obtenus pour les différents objets laissent apparaître le même comportement. Le pic, dont la hauteur varie d'un graphe à l'autre, est toujours suivis par une zone stable (régime stationnaire). Cette zone stable apparaît toujours après environ 2 secondes de simulation. C'est pourquoi l'étude de l'influence de la surface n'utilise que les mesures postérieures à 2 secondes pour chaque simulations.

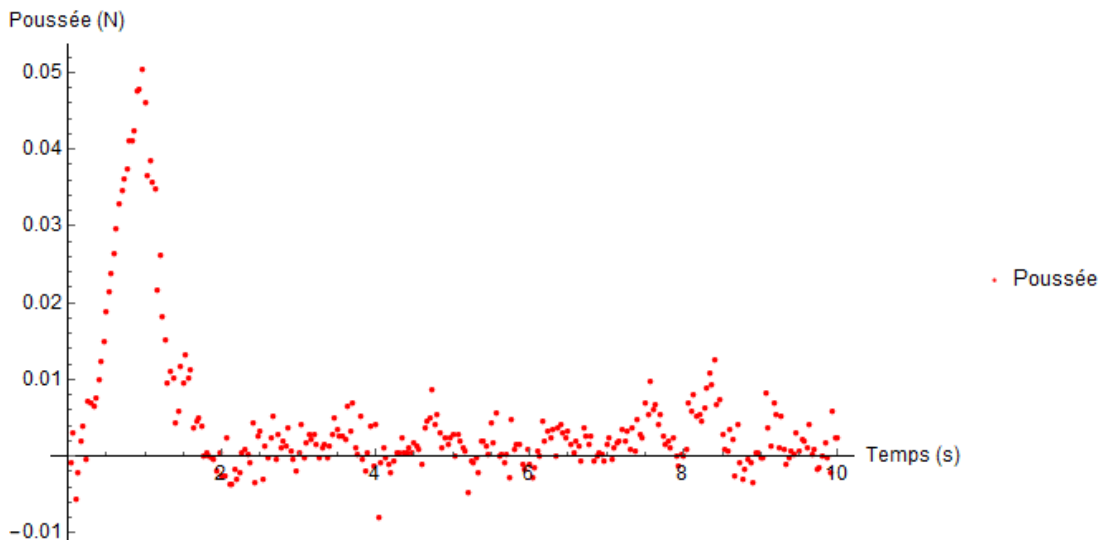


FIGURE 6.3 – Profil de poussée pour un objet dont le rayon est 15 fois supérieur à R_{max} .

6.5.3 Distribution des mesures de la poussée

Les mesures de la poussée obtenues en régime stationnaire se distribuent dans chaque cas selon une Gaussienne. Ce type de lois décrit typiquement des comportements naturels ou aléatoires. Selon l'étude effectuée dans le rapport d'A. Rufo [19], ce type de distribution correspond avec celle obtenue en étudiant les jeux de données expérimentales.

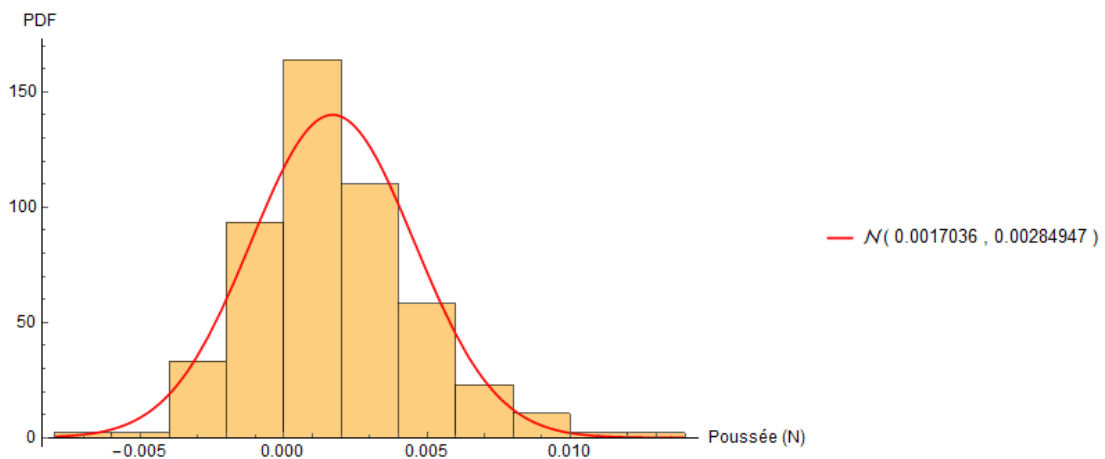


FIGURE 6.4 – Distributions des mesures de la poussée pour un intrus dont le rayon est $15 R_{max}$. Une fonction Gaussienne dont les paramètres sont la valeur moyenne et l'écart type des mesures est représentée par-dessus la distribution.

L'analyse des graphes de distribution des différentes simulations laisse apparaître une variation de la valeur moyenne en fonction de la taille de l'intrus. Cette variation est illustrée et discutée dans la section suivante (6.5.4).

6.5.4 Poussée moyenne en fonction de la taille de l'intrus

La poussée moyenne qui s'applique sur chaque intrus est illustré dans la figure 6.5.

Il apparaît clairement que la poussée que subit un intrus dépend de la taille de celui-ci. Plus encore, la comparaison des résultats numériques (2D) avec les résultats expérimentaux (3D) (section 4.5) met en évidence des comportements similaires.

Tout comme dans le chapitre 4, la poussée dépend linéairement de la taille de l'intrus. Le comportement observé expérimentalement (3D) qui lie le volume et la poussée se répète dans la simulation numérique (2D) avec la surface. De plus, la droite de régression linéaire tracée à partir des résultats numériques est décalée tout comme les droites de régression de la figure 4.11.

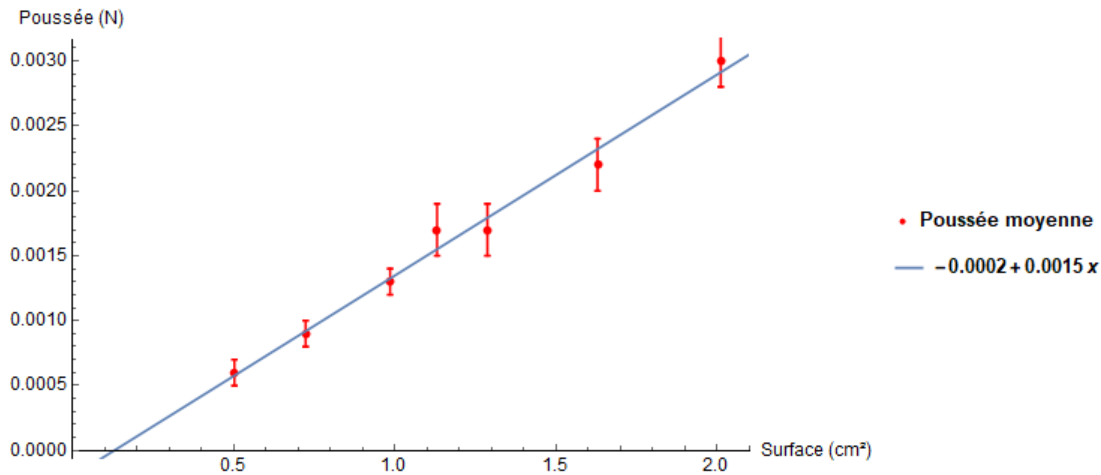


FIGURE 6.5 – Valeurs moyennes de la poussée s’appliquant sur les différents intrus plongés dans la cuve numérique. Bien que ce graphe représente une situation en 2 dimensions, il y a de nombreuses ressemblances avec les graphes représentant la situation expérimentale (3D) (section 4.5).

6.5.5 Analyse de la densité

De la même manière que pour la figure 6.2, 200 images successives des simulations avec les objets $10 R_{max}$ et $20 R_{max}$ sont additionnées dans la figure 6.6. Sur ces images apparaissent clairement des zones plus sombres. Celles-ci correspondent à des régions qui sont en moyenne plus densément peuplées au-dessus de l’objet. Il apparaît que ces zones sont également plus larges au-dessus d’objets plus larges.

En regardant plus en détail ces images, il apparaît que la forme de la colonne reste plus ou moins similaire d’un intrus à l’autre². Le granulaire autour reste globalement assez homogène, excepté de part et d’autre des intrus (régions plus claires). Mais cela est logique puisque les particules d’air dévié par ces intrus vont former des amas plus compacts dans ces régions (donc la densité de granulaire est plus faible). Les animations déjà présentées illustrent l’apparition de bulles importantes dans ces régions.

À l’aide de la méthode décrite dans la section 6.3, les images nécessaires à la construction de la figure 6.7 sont obtenues. Cette figure associe trois images qui sont construites à partir de 200 images successives des animations liées au QR code qui se trouve dans la figure. Il apparaît également une zone plus dense au-dessus de l’objet (qui n’est pas illustré, mais que l’on repère facilement). Les

2. La colonne ressemble à une traînée comme il est possible d’étudier en aérodynamique. La forme de cette colonne est une perspective d’étude, surtout pour comparer l’influence de la forme de l’intrus sur la poussée.

couleurs des différentes cases sont associées au nombre de grains qui se trouvent dedans³. Cette figure met clairement en évidence l'apparition d'une zone plus dense au-dessus de chaque objets. Celles-ci sont plus larges pour des objets plus imposants.

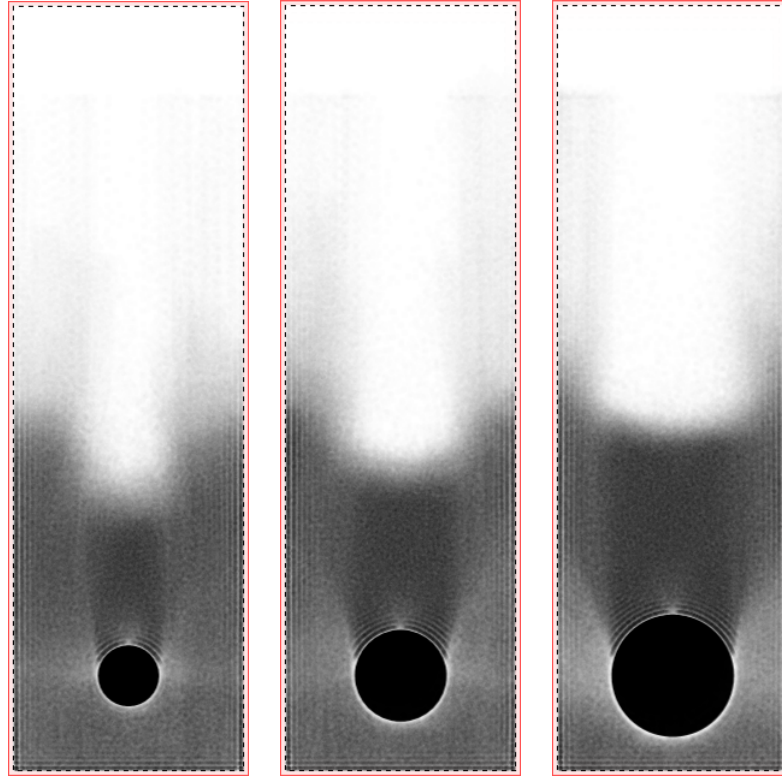


FIGURE 6.6 – Superposition de 200 images successives des animations pour les objets 10, 15 et 20 R_{max} . Ces trois animations sont celles présentées dans la vidéo liée au premier QR code au début du chapitre 6.

3. Dans les animations, les couleurs sont obtenues à partir du nombre moyen de grains présents dans un laps de temps très court. Dans la figure, les couleurs mettent en évidence la "couleur moyenne de chaque cases" pour 200 images successives.

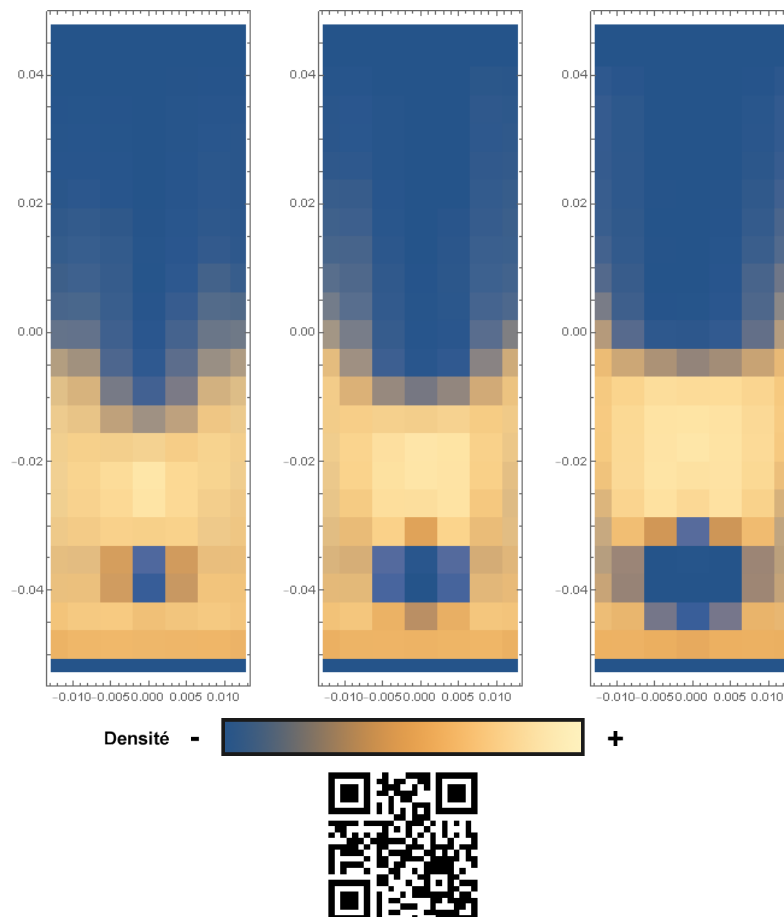


FIGURE 6.7 – Superposition de 200 images successives des animations liées au QR code. Ces images illustrent la densité de grains dans chaque cases à l'aide du code couleur qui se trouve juste en dessous d'elles. (En abscisse et ordonnée les coordonnées dans la cuve.)

6.5.6 Analyse du champ des vitesses

En combinaison avec l'analyse de la densité, l'analyse du champ des vitesses permet de déterminer la dynamique générale des grains présents dans chacune des cases représentées dans la figure 6.7. Cette analyse permet de décrire le mouvement du granulaire.

La figure 6.8 représente trois images prises dans chacune des simulations. Le QR code en dessous de ces images permet de visualiser les animations dans lesquelles ces images ont été prises.

Contrairement aux figures précédentes qui représentent des superpositions de plusieurs images, la figure 6.8 ne reprend que trois instantanées. Ceux-ci illustrent une dynamique qui n'est pas constante (comme le montre les animations), mais récurrente. De manière générale, les grains présents dans la cuve ont une dynamique assez stable.

Les colonnes de grains qui apparaissent au-dessus des intrus sont composées de grains qui préférentiellement descendent. Alors que de part et d'autre de celle-ci, les grains ont tendance à monter.

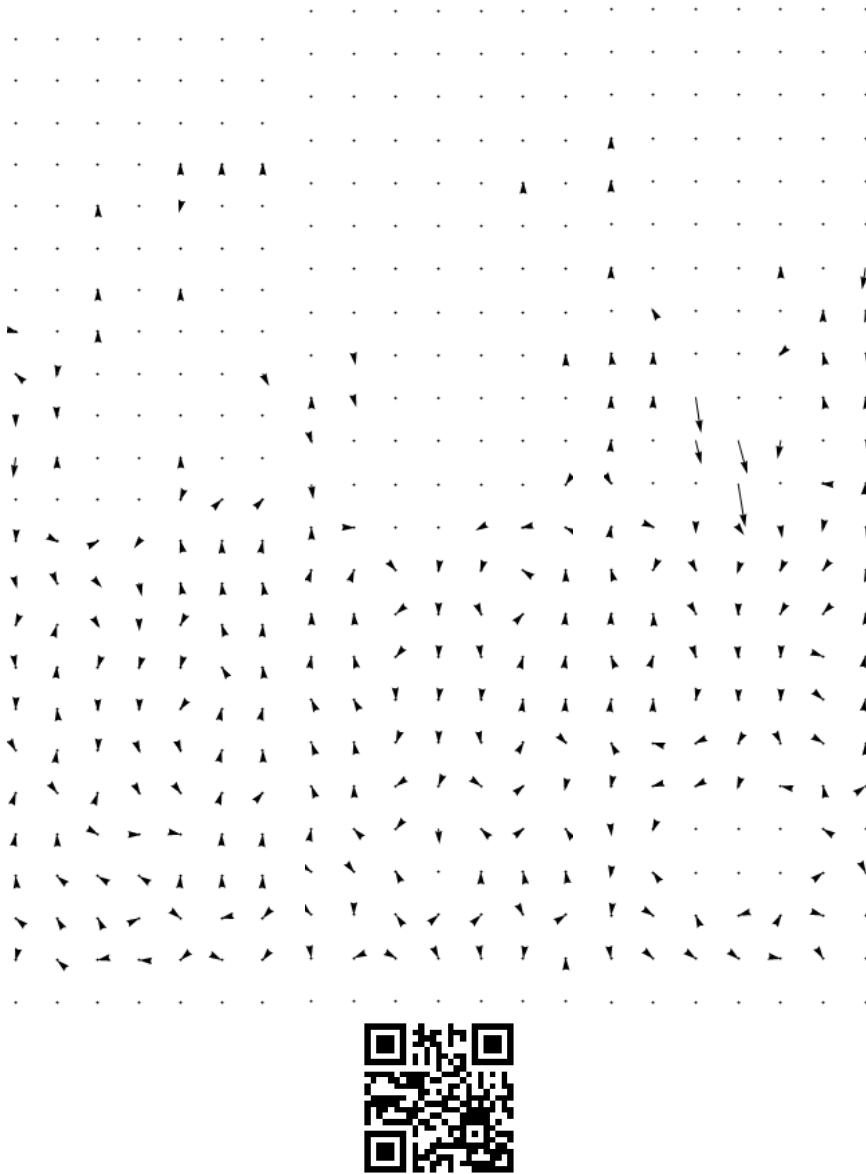


FIGURE 6.8 – Distribution des vitesses du granulaire dans la cuve. Au-dessus des intrus, il est possible de distinguer une colonne où la vitesse est préférentiellement dirigée vers le bas. Autour de celle-ci, la vitesse est dirigée vers le haut.

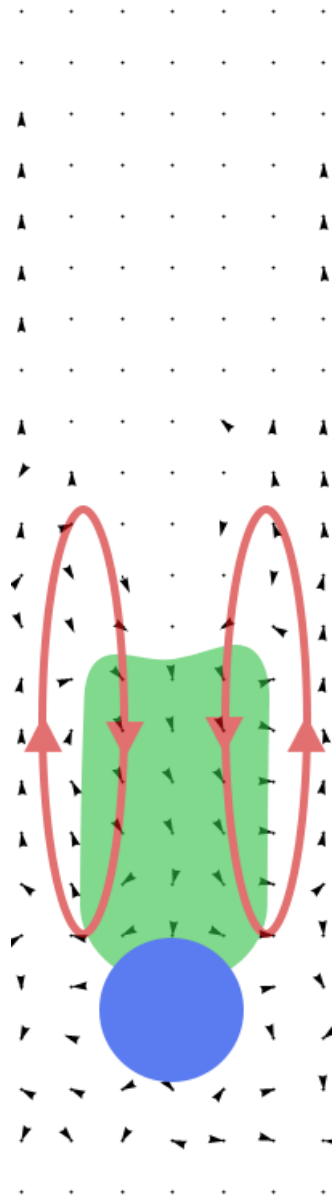


FIGURE 6.9 – Schéma de la dynamique du granulaire observée dans le dispositif numérique.

Il y a donc des grains qui quittent la colonne par le bas, à proximité de l'intrus à cause du mouvement du granulaire autour, et d'autres qui viennent s'ajouter au-dessus de la colonne.

Apparaît donc une colonne qui est dynamique. Mais elle garde une hauteur constante lorsque la situation est stable. Les grains qui quittent la colonne semblent être aussitôt "remplacés" par des nouveaux. Cette dynamique, semblable au phénomène de convection, est très probablement à l'origine de cette forme de cuvette qui apparaît à la surface. Le mouvement du granulaire reste néanmoins assez faible au vu de la taille des flèches. De plus la géométrie de l'intrus a sûrement

Entre la colonne où les grains descendent et les "cheminées" où les grains montent, apparaissent des zones intermédiaires. Le comportement des grains dans ces régions est représenté dans le schéma ci-contre (figure 6.9).

Au-dessus de l'intrus représenté en bleu, une colonne de granulaire plus dense se forme (vert). De part et d'autre de cette colonne, des grains remontent à cause de la dynamique des particules d'air. À cause de ce mouvement, la densité de granulaire dans ces régions est plus faible que dans la colonne. La figure 6.8 met en évidence que les grains aux bords de la colonne surplombant l'intrus ont tendance à être emportés par le mouvement des grains qui remontent.

Ensuite, lorsqu'ils atteignent la surface, il n'y a plus de grains au centre et le phénomène s'inverse. Ce sont les grains à l'extérieur qui ont tendance à revenir au centre.

une influence sur la dynamique de la colonne.

6.5.7 Conclusion de l'influence de la taille

Au-delà du fait qu'il s'agisse d'un modèle 2D, la dynamique observée en utilisant des particules d'air pour fluidiser le granulaire numérique correspond à la dynamique proposée en hypothèse dans le chapitre 4. Les particules d'air sont déviées par l'intrus présent dans le granulaire. À cause de cette déviation apparaît une fluidisation non homogène autour de l'objet. Plus encore il semble qu'une dynamique particulière s'installe et se maintienne.

À la suite de l'observation de cette dynamique numérique, il est intéressant d'envisager de nouvelles expériences avec les manipulations expérimentales et les simulations. Celles-ci pourraient indiquer si le modèle numérique proposé est proche ou non du comportement de l'expérience.

Mais à partir des résultats déjà obtenus, il semble que la dynamique numérique soit, jusqu'ici, en accord avec la dynamique expérimentale. À la vue des résultats, il semble que le modèle s'approche du comportement expérimentale. La combinaison de la dynamique des particules d'air et des éléments du granulaire permettent à la fois de faire apparaître une poussée qui dépend de la taille de l'objet et un décalage similaire à celui observé dans les figures 4.5.

Toutefois, ces premières mesures, bien que réjouissantes, ne sont pas suffisantes pour conclure directement si le modèle est aussi proche de l'expérience que souhaité. De nombreuses simulations impliquant des intrus de formes différentes sont encore nécessaires pour obtenir une idée correcte de l'efficacité de celui-ci.

6.6 Influence de la profondeur

6.6.1 Déroulement d'une simulation

Tout comme dans la section 6.5.1, l'objectif est d'étudier numériquement un paramètre déjà évoqué dans le chapitre 4. Dans celui-ci, on se sert d'un référentiel croissant que l'on nomme hauteur. Numériquement on utilise le même. Mais cette fois, la hauteur est mesurée à partir du fond de la cuve (à la place de la surface du granulaire). Un intrus de rayon $15 R_{max}$ est donc initialement placé entre 1.25 et 2.45 cm au-dessus du fond de la cuve.

La dynamique observée pour les diverses simulations est semblable à celle décrite

dans la section 6.5.1. Mais cette fois, le régime stationnaire n'est pas toujours atteint au bout de 2 secondes. Il apparaît une différence d'une simulation à l'autre. Certaines se stabilisent plus rapidement que d'autres. Mais au bout de 3 secondes, toutes les simulations atteignent ce régime. Pour cette raison, seules les mesures postérieures à 3 secondes sont analysées dans les sections suivantes.

6.6.2 Profils de poussée

Les profils de poussée comme celui illustré dans la figure 6.10, sont semblables à ceux déjà présenté dans la section 4.4.3. La différence la plus notable est la largeur du pic qui cette fois varie d'une simulation à l'autre. La région dans laquelle le régime est stationnaire garde un comportement similaire à celui énoncé dans l'étude de l'influence de la taille de l'objet.

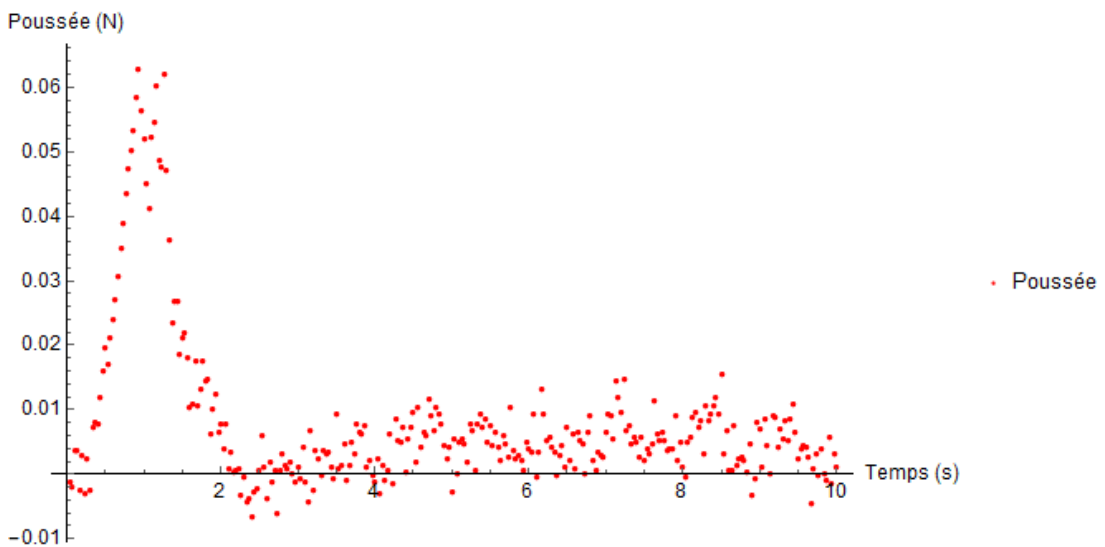


FIGURE 6.10 – Profil de poussée pour un intrus placé à une hauteur de 1.85 cm et dont le rayon est $15 R_{max}$.

6.6.3 Distribution des mesures de la poussée

Sans surprise, la distribution des mesures de la poussée qui sont postérieures à 3 secondes (figure 6.11) correspond toujours à une Gaussiennes. En comparant les graphes des différentes distributions, il apparaît que la poussée moyenne varie en fonction de la hauteur à laquelle se trouve l'intrus.

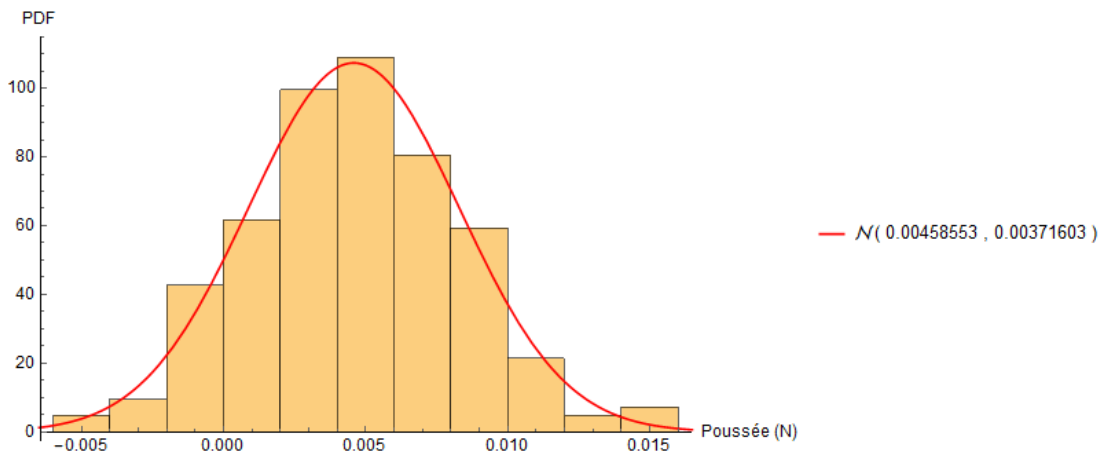


FIGURE 6.11 – Distributions des mesures de la poussée pour un intrus ($R = 15 R_{max}$) placé à une hauteur de 1.85 cm au-dessus du fond de la cuve. Une fonction Gaussienne dont les paramètres sont la valeur moyenne et l'écart type des mesures est représentée par-dessus la distribution.

6.6.4 Poussée moyenne en fonction de la position de l'intrus

La figure 6.12 indique clairement que la poussée dépend de la hauteur à laquelle l'intrus est placé dans la cuve numérique. Mais elle ne permet pas de définir si cette influence est linéaire ou non. La droite de régression linéaire tracée à titre indicatif met en évidence ce qui semble être une légère oscillation des mesures autour d'elles.

Le comportement expérimental illustré dans la figure 4.6 laisse apparaître une gamme de valeur où la dépendance semble à peu près linéaire. Plus d'expériences sont nécessaires avec des dispositifs plus profonds pour réellement affirmer qu'il s'agit de ce type dépendance. Mais elle est suggérée.

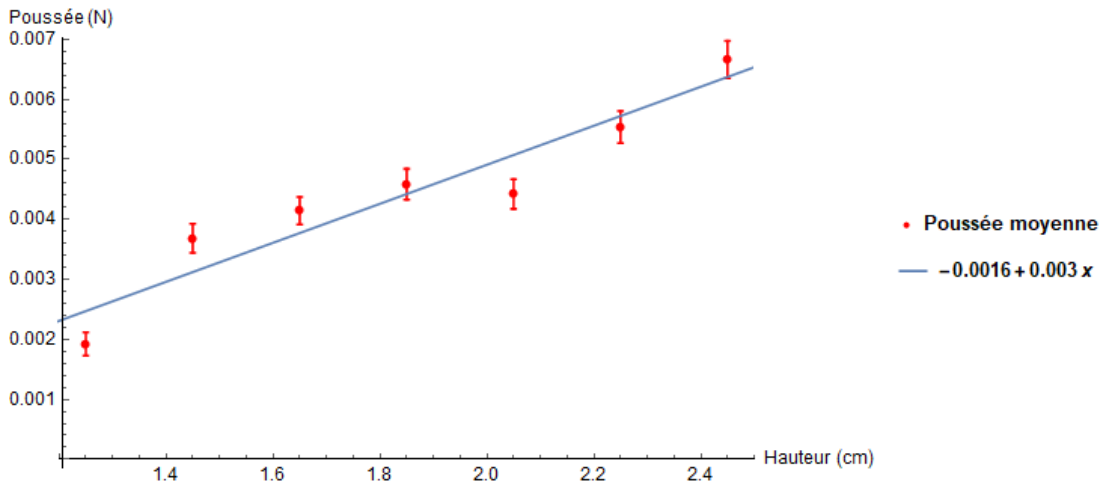


FIGURE 6.12 – Poussée moyenne s’appliquant sur l’intrus plongé à différentes hauteurs dans la cuve numérique.

Pour obtenir une meilleure idée de la distribution des poussées moyennes, de nouvelles simulations sont effectuées. Dans un premier temps, celle mettant en place un intrus à une hauteur de 1.25 cm est effectuée à nouveau. La valeur moyenne de la poussée obtenue avec cette nouvelle simulation (B) est très proche de l’originale (A). La différence entre ces valeurs moyennes est plus petite que l’écart type des mesures permettant de les obtenir.

- Simulation A : $F_{moyenne} = 0,0019 \text{ N}$
- Simulation B : $F_{moyenne} = 0,0022 \text{ N}$

Dans un second temps, puisque d’une simulation à l’autre utilisant les mêmes paramètres les résultats sont cohérents, des simulations avec l’intrus à des hauteurs intermédiaires sont effectuées (figure 6.13). Sur cette figure, il apparaît une série de points qui paraissent assez bien alignés. Mais parmi ces points, trois puits apparaissent.

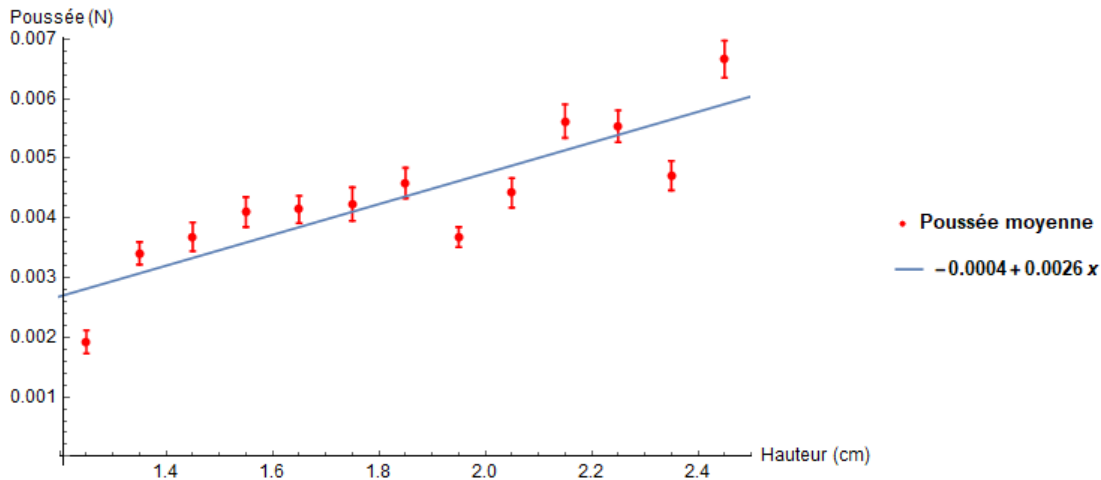


FIGURE 6.13 – Poussée moyenne s’appliquant sur l’intrus plongé à différentes hauteurs dans la cuve numérique. Cette figure contient le jeu de données présenté dans la figure 6.12 ainsi que les mesures pour l’objet à des hauteurs intermédiaires.

Ces points particuliers correspondent aux simulations pour des intrus placés à 1.25, 1.95 et 2.35 cm.

Deux hypothèses sont proposées pour expliquer l’apparition de ces puits.

- A) La hauteur approximative du lit fluidisé numérique est de 3.8 centimètres. $3/8$ de cette valeur correspond à 1.47 cm, $4/8$ à 1,9 cm et $5/8$ à 2.37 cm. Il est possible qu’à certaines hauteurs particulières un comportement particulier apparaisse et influence la poussée. Pour deux hauteurs en particulier, la position des puits correspond avec les fractions énoncées. Mais pour la première, la fraction ne correspond pas tout à fait à la hauteur à laquelle le puits est observée. La proximité avec le fonds de la cuve pourrait avoir un lien avec ce décalage.
- B) Le rayon de l’intrus utilisé est $15 R_{max} = 0.06$ cm. Les positions des différents puits correspondent plus ou moins à des multiples de cette valeurs. Il pourrait exister un lien entre les dimensions de l’intrus et l’apparition de ces puits.

6.6.5 Analyse de la densité

Tout comme dans la section 6.5.5, les figures 6.14 et 6.15 sont construites en superposant 200 images successives provenant des différentes animations obtenues.

La figure 6.14 illustre que lorsque l'objet est placé plus haut dans le lit fluidisé, la colonne qui s'appuie dessus garde la même forme que celle au-dessus d'un objet plus bas. Mais elle est plus petite car il se trouve plus près de la surface. Il apparaît tout de même que la surface du granulaire change très légèrement de hauteur d'un cas à l'autre. Plus l'objet est haut et plus la surface est haute. Mais cette variation paraît limitée par rapport à la variation de la taille de la colonne. Les colonnes semblent tout de même moins marquées lorsque l'intrus est plus haut.

Une autre observation concerne la forme de la cuvette formée par les "cheminées" et la colonne. La concavité de la surface est plus marquée lorsque l'objet est proche de la surface.

La figure 6.15 confirme les observations. La surface du granulaire paraît légèrement plus haute. Mais la taille de la colonne diminue lorsque l'intrus est plus haut. Par contre, l'objet placé à une hauteur de 2.45 cm au-dessus du fond de la cuve paraît proche de la hauteur limite à partir de laquelle il ne devrait plus y avoir de colonne selon ces images.

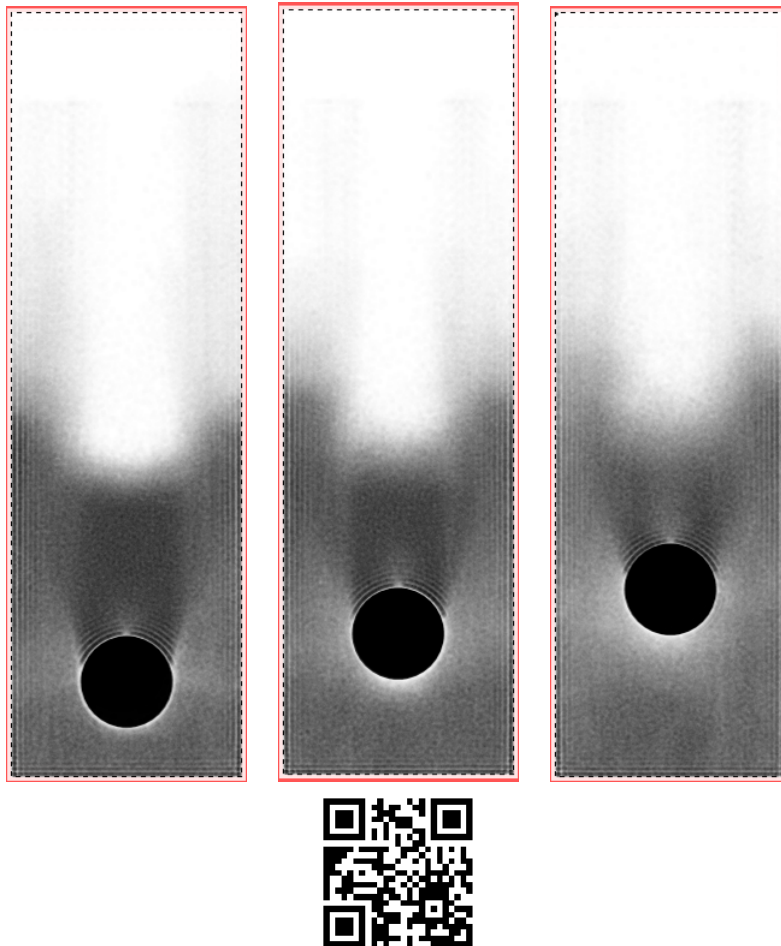


FIGURE 6.14 – Superposition de 200 images successives des animations pour l'intrus $15 R_{max}$ plongé à trois hauteurs différentes dans la cuve (1.25, 1.85 et 2.45 cm). Ces trois animations sont celles présentées dans la vidéo liée au QR code inclus dans la figure.

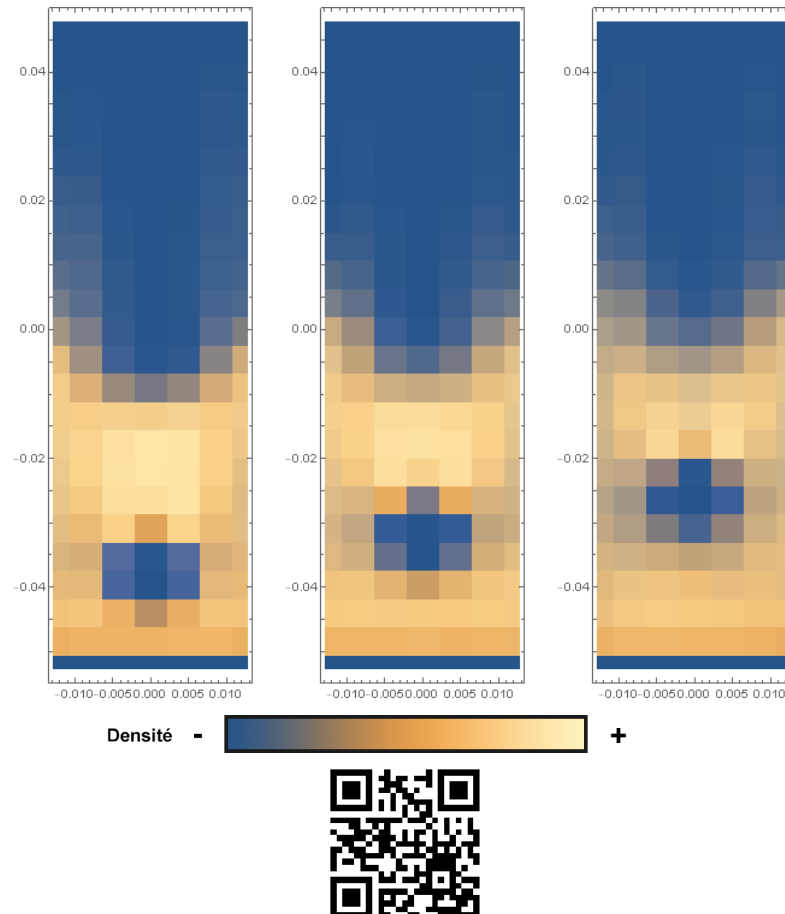


FIGURE 6.15 – Superposition de 200 images successives des animations liées au QR code. Ces images illustrent la densité moyenne de grains dans chaque cases à l'aide du code couleur visible sous les images. (En abscisse et ordonnée les coordonnées dans la cuve.)

6.6.6 Analyse du champ des vitesses

La figure 6.16 illustre la même dynamique que celle décrite dans la section 6.5.6. La hauteur de la colonne ne peut être déduite à partir de ces images. Mais à la suite de la discussion de l'influence de la profondeur sur la poussée qui s'exerce sur l'intrus dans la cuve numérique, il est possible de deviner dans ces images et dans les animations que le bas de la colonne s'appuyant sur l'objet n'est pas exactement à la même taille.

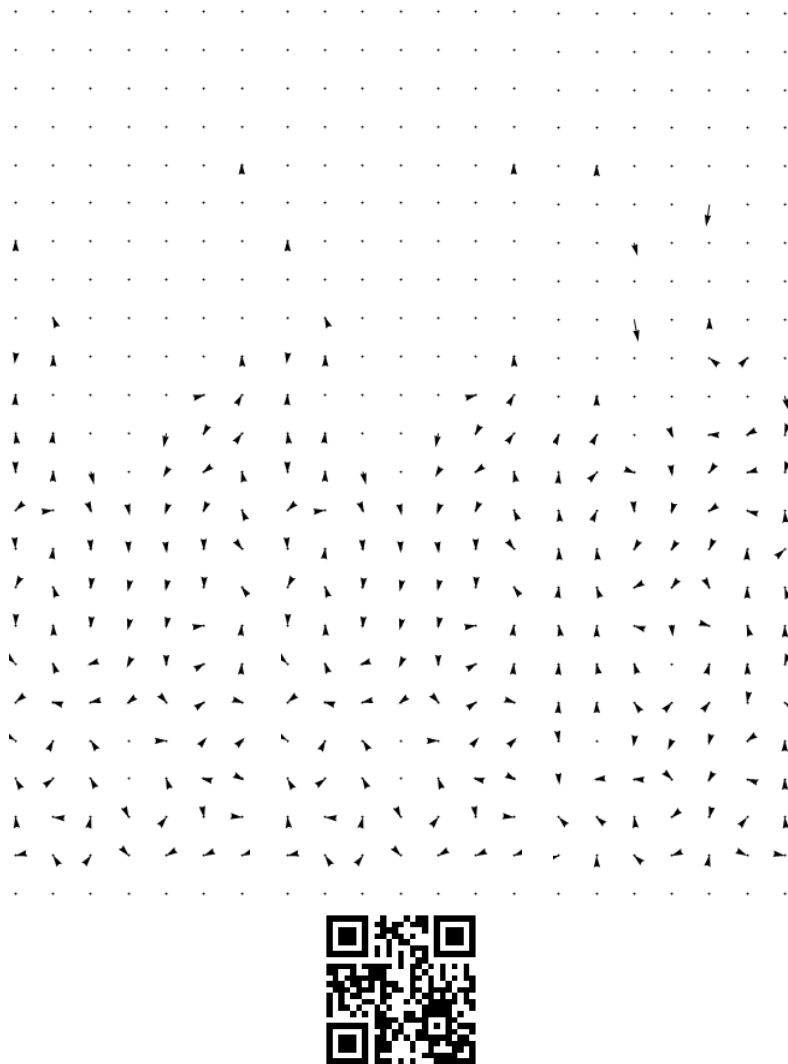


FIGURE 6.16 – Distribution des vitesses du granulaire dans la cuve. Au-dessus de l'intrus placé à des hauteurs différentes, il est possible de distinguer la colonne où la vitesse est préférentiellement dirigée vers le bas. Autour de celle-ci, la vitesse est dirigée vers le haut.

6.6.7 Conclusion de l'influence de la profondeur

Visuellement, la dynamique observée correspond à celle observée dans le chapitre 4. Expérimentalement et numériquement, une colonne de granulaire s'appuie

sur l'intrus. Et numériquement cette colonne possède une taille qui dépend de la profondeur à laquelle est plongé l'intrus, comme proposé en hypothèse.

Les mesures obtenues laissent apparaître des comportements qui s'approchent de la dynamique connue. Mais qui également laissent apparaître des comportements expérimentalement non observés ("puits").

L'étude de ce paramètre nécessitant encore du travail expérimentalement, il n'est pas possible de conclure si la simulation rend compte d'un comportement correct où si elle ne convient pas. Toutefois, les quelques comportements expérimentaux non observés mis à part, la dynamique mise en place numériquement correspond à la dynamique expérimentale observée jusqu'ici.

Chapitre 7

Conclusions

7.1 Conclusions expérimentales

La poussée verticale dans un lit fluidisé a un comportement très similaire à la poussée d'Archimède dans un liquide. Cette dernière est causée par la répartition inégale des pressions hydrostatiques sur les surfaces de l'objet. Il s'agit donc d'une différence de pression qui engendre une poussée. Celle-ci dépend principalement du volume de l'intrus. Mais elle est totalement indépendante d'autres paramètres tels que la forme de celui-ci ou la profondeur à laquelle il est plongé.

Dans un lit fluidisé, le granulaire est mis en mouvement à la suite du passage d'un fluide (souvent un gaz). Entre le haut et le bas de la cuve apparaît alors un gradient de pression linéaire. Ce qui signifie qu'un objet plongé dans un granulaire fluidisé subit des pressions différentes sur ces surfaces supérieures et inférieures.

Cette différence de pression, cette fois d'origine aérodynamique, est potentiellement la cause de la poussée verticale qui s'applique sur l'objet. Ceci expliquerait pourquoi les poussées verticales observables dans un liquide au repos et dans un granulaire fluidisé ont des comportements qui paraissent dans certains cas très similaires. En effet, l'étude expérimentale met en évidence que la poussée subie par un intrus plongé dans un lit fluidisé dépend du volume de cet intrus presque exactement comme avec Archimède.

Toutefois, il existe quelques différences. L'expérience met également en évidence plusieurs autres dépendances qui ne correspondent pas du tout au comportement de la poussée d'Archimède. En particulier, l'influence de la profondeur ainsi que l'influence de l'orientation de l'intrus sur la poussée.

Mais comme l'étude le suggère, ces dépendances peuvent être reliées à la dynamique du granulaire. Celui-ci est mis en mouvement par le fluide qui le traverse. Ce fluide, dévié par l'objet, ne fluidise pas le granulaire qui surplombe l'intrus. Apparaît alors une colonne qui s'appuie sur celui-ci. La taille de cette colonne dépend à la fois de la forme de l'intrus et de la profondeur à laquelle il se trouve.

La présence de cette colonne explique alors les dépendances qui ne correspondent pas à une poussée d'Archimède. Plus encore elle explique la différence observée entre l'influence du volume dans le lit fluidisé et le celle connue avec la poussée d'Archimède dans un liquide. Ce qui permet de conclure que les comportements observés sont la combinaison de deux phénomènes. L'apparition d'une fluidisation inhomogène au-dessus d'un intrus plongé dans un lit fluidisé. Et l'apparition d'une poussée verticale vers le haut qui peut potentiellement être liée à une différence de pression comme pour Archimède. Mais dont l'origine est aérodynamique et non hydrostatique.

7.2 Conclusions numériques

Le modèle proposé a pour but de simuler la dynamique décrite ci-dessus. Contrairement aux autres modèles qui permettent de générer une fluidisation homogène du granulaire, celui-ci parvient à générer une fluidisation influencée par la présence de l'intrus. Plus encore les résultats obtenus paraissent similaires aux résultats des expériences correspondantes. En particulier pour l'influence de la taille de l'intrus.

Ce modèle nécessite encore beaucoup d'améliorations et il doit être confronté à d'autres expériences pour conclure sur sa validité. Mais les résultats présentés sont encourageants. De plus, le phénomène de convection mis en évidence au-dessus de l'intrus numérique permet d'en apprendre plus sur la dynamique potentielle du lit fluidisé expérimental. Cela permet d'orienter la réflexion à propos du comportement de ce dernier.

7.3 Perspectives

Il reste un grand nombre d'expériences à mener pour lever certaines incertitudes qui sont présentées dans certains résultats. Par exemple, il reste à établir si le comportement observé à partir d'une certaine profondeur est causé par la géométrie du dispositif ou non.

Plus encore, il y a énormément des manipulations qui ont été envisagées. Entre autres, l'étude de plusieurs intrus immergés simultanément dans la cuve, ou encore l'étude des contraintes horizontales.

Mais la perspective expérimentale la plus importante reste de lever le doute sur l'origine de la poussée. L'hypothèse de la différence de pression liée à l'aérodynamique paraît cohérente. Elle nécessite encore d'être confronté à l'expérience. Pour réaliser cette dernière, l'utilisation d'un intrus capable de mesurer la pression qui s'applique sur chaque surface est envisagée.

Pour la partie numérique, le modèle proposé n'est encore qu'à ses débuts. Il nécessite des améliorations et d'être confronté à des situations plus complexes. Une perspective très intéressante est la mise en place d'une version en 3 dimensions de ce modèle.

Bibliographie

- [1] D. Kalita, Pankaj et Baruah, *Investigation of Biomass Gasifier Product Gas Composition and its Characterization* (2018) pp. 115–149.
- [2] M. Omidvar, M. Iskander, and S. Bless, *Response of granular media to rapid penetration, International Journal of Impact Engineering*, Vol. 66 (2014) pp. 60 – 82.
- [3] G. Broersma, *Pneumatic Transport of Fine Granular Material, Journal of Engineering for Industry*, Vol. 91 (1969) pp. 315–322.
- [4] D. Steinmetz and C. Laguerie, *Sciences Géologiques. Bulletin, tome 46, n1-4, 1993. Minéraux finement divisés, sous la direction de Jacques Yvon.*, (1993).
- [5] R. Andreux, T. Gauthier, J. Chaouki, and O. Simonin, *New description of fluidization regimes, AIChE Journal*, Vol. 51 (2005) pp. 1125–1130.
- [6] E. Mehrabi Gohari, M. Sefid, E. Jahanshahi Javaran, and A. Soltani Goharrizi, *Hydrodynamic simulation of a liquid–solid fluidized bed using Lattice Boltzmann and smoothed profile methods*, Vol. 12 (2017) pp. 196–211.
- [7] Y. Tsuji, Y. Morikawa, and H. Shiomi, *LDV measurements of an air-solid two-phase flow in a vertical pipe, Journal of Fluid Mechanics, Cambridge University Press*, Vol. 139 (1984) p. 417–434.
- [8] K. Shakourzadeh, *Techniques de fluidisation, Techniques de l'ingénieur Opérations unitaires : tri et traitement des liquides et des solides*, Vol. base documentaire : TIB446DUO. (2002).
- [9] S. L. L. Seah and E. W. C. Lim, *Density segregation of dry and wet granular mixtures in gas fluidized beds, AIChE Journal*, Vol. 61 (2015) pp. 4069–4086.
- [10] C. Dragan, O. Fati, M. Radu, L. Calin, A. Samuila, and L. Dascalescu, *Tribocharging of Mixed Granular Plastics in a Fluidized-Bed Device, IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 47 (2010) pp. 1 – 6.

-
- [11] J. M. Valverde Millán, *Fluidization of Fine Powders : Cohesive versus Dynamical Aggregation* (Springer Netherlands, Dordrecht, 2013) pp. 1–6.
- [12] F. Fraïge and P. Langston, *Integration schemes and damping algorithms in distinct element models*, *Advanced Powder Technology*, Vol. 15 (2004) pp. 227 – 245.
- [13] Y. Tsuji, T. Kawaguchi, and T. Tanaka, *Discrete particle simulation of two-dimensional fluidized bed*, *Powder Technology*, Vol. 77 (1993) pp. 79 – 87.
- [14] A. François, *Archimedes principle’s in fluidized sand : The influence of depth*, *Master 1 stage report* (2019).
- [15] A. Rufo, *Existe-t-il un équivalent granulaire de la poussée d’Archimède ?*, *Mémoire* (2019).
- [16] P. A. Cundall and O. D. L. Strack, *A discrete numerical model for granular assemblies*, *The Essence of Geotechnical Engineering : 60 years of Géotechnique* (2015) pp. 305–329.
- [17] D. Oliver, D. Antoine, G. Antoine, L. Maxime, P. Charles, and S. Coralie, *Projet P6 : Modélisation de la collision de particules sphériques pour la simulation numérique d’un sablier 3D* (2017).
- [18] E. Opsomer, *Outils numériques de la matière molle*, *supports de cours* (2019).
- [19] A. Rufo, *Buoyancy in fluidized sand : The influence of volume (Master 1 stage report)* (2019).