

Université de Montpellier
Laboratoire Géosciences

Master Géosciences
Spécialité Dynamique Terrestre et Risques Naturels

**Modélisation analogique et numérique de l'initiation des cheminées
d'expulsions de fluides dans les bassins sédimentaires immergés**

Antoine MULLOR

Sous l'encadrement de : Aurélien GAY, Alfredo TABOADA et Valérie VIDAL

Soutenu le 11 juin 2019 devant le jury composé de
Rodolphe CATTIN (rapporteur)
N. Launay (rapporteur)
P. Camps
R. Cattin
S. Gautier
P. Vernant
F. Gueydan
C.Champollion

Modélisation numérique et analogique des cheminées d'expulsions de fluide dans les bassins sédimentaires immergés

Antoine MULLOR

Résumé : On observe de nombreuses structures d'échappement de fluide sur le fond marin qui sont associées en profondeur à des cheminées de migration de fluides de formes variées. Les structures d'échappement de fluide sur le fond marin sont sources de problèmes pour l'exploitation de ces zones. Nous savons aujourd'hui que ces structures évoluent en différents stades morphologiques pouvant mettre en péril des infrastructures offshore ou les réseaux câblés. Les mécanismes physiques à l'origine de l'initiation de ces structures d'échappement appelé « pockmark » sont encore mal connus. L'étude, couplant modélisation numérique et analogique, a d'abord permis de développer un modèle d'injection bicouche encore jamais étudié. Les modélisations analogiques ont permis de mettre en évidence que le confinement et l'épaisseur d'une zone source ont une influence sur la dimension de sa zone d'initiation de cheminée. Cependant, il reste beaucoup de points à améliorer pour mieux caractériser les influences des paramètres étudiés.

Mots clefs : migration de fluide, structures d'échappement de fluide, initiation, simulations numériques, expériences analogiques, pockmark, modèle bicouche

TABLES DES MATIÈRES

1. Introduction et problématique	4
2. État de l'art.....	6
2.1/ <i>Le milieu granulaire</i>	6
2.2/ <i>État de l'art des simulations numériques</i>	7
2.3/ <i>État de l'art des simulations analogiques</i>	8
3. Méthodes.....	9
3.1/ <i>Expériences analogiques</i>	9
3.2/ <i>Simulations numériques</i>	11
4. Résultats.....	13
4.1/ <i>Expériences analogiques</i>	13
4.2/ <i>Simulations numériques</i>	20
5. Interprétation et Discussion.....	22
5.1/ <i>Interprétation des résultats analogiques</i>	22
5.2/ <i>Discussion des résultats analogiques</i>	25
5.3/ <i>Interprétation et discussion des résultats numériques</i>	28
6. Conclusions et perspectives.....	29
7. Références bibliographiques.....	30
8. Annexes.....	32

Remerciements

Je tiens à remercier Aurélien GAY et Valérie VIDAL qui m'ont encadré avec soin. Je tiens à remercier Rémy MOZUL pour sa patience sans faille. Je tiens également à remercier Rémi CAILLIBOTE, Solène MEYER, Juliette GROSSET et Sylvain JOUBAUD pour leur aide précieuse.

1. Introduction et problématique

L'exploration systématique des marges continentales avec des moyens géophysiques de plus en plus performants a révélé la complexité des processus de compaction qui opèrent dans la colonne sédimentaire, et notamment la remobilisation post-dépôt des matériaux par des cheminées de migration de fluides (*cf figure 1*), appelées aussi pipes, qui alimentent des structures d'expulsion sur le fond de la mer comme les pockmarks (fluides seuls), les volcans de boue (fluides+boue) ou les injectites (fluides+sable) ([Gay et al., 2007](#); [Monnier et al., 2013](#); [Monnier et al., 2015](#)). Ces grands types de structures sont caractérisés par des morphologies très différentes. Que ce soit les pockmarks, les volcans de boue ou les injectites, ces structures présentent des morphologies variées, de circulaire à ovoïde et de conique à plan. Elles apparaissent dans tous les contextes géologiques et géodynamiques, aussi bien en offshore qu'en on shore ([Anka et al., 2012](#); [Dupré et al., 2015](#)).

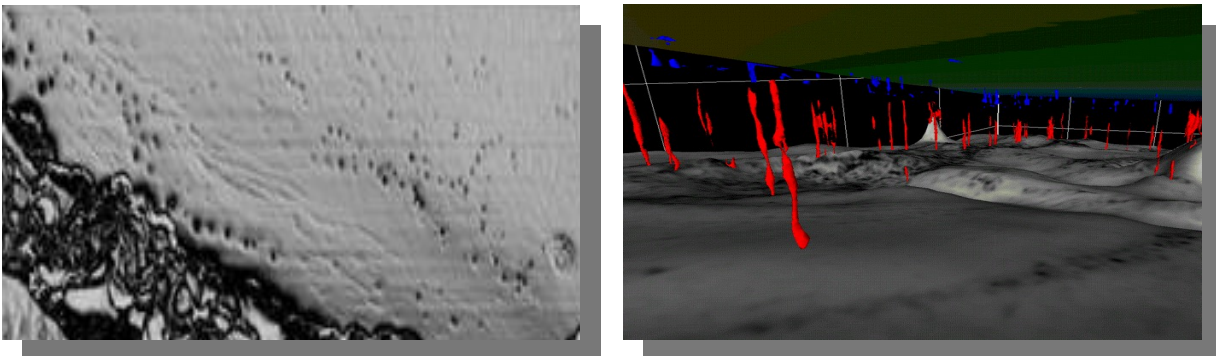


Figure 1: A gauche, carte DIP du fond marin obtenue grâce aux données de sismique 3D. Grâce à la résolution (un profil tous les 12,5 m) il est possible d'identifier sur le fond de nombreuses structures d'échappements de fluides comme les pockmarks ([Gay et al., 2007](#)), mais aussi des volcans de boue. A droite, ces mêmes données

montrent qu'elles sont alimentées par des cheminées sous-jacentes que l'on représente traditionnellement sous forme tubulaire.

Or, elles sont toutes alimentées par des cheminées de migration de fluides qui sont identifiées essentiellement grâce à la sismique 2D ou 3D sous la forme d'empilements verticaux d'anomalies de forte amplitude (cf figure 2) qui traduisent la présence de fluides (eau et/ou gaz et/ou huile) qui remontent la colonne sédimentaire et alimentent ces structures sur le fond de la mer ou bien des réservoirs temporaires comme sous des pièges structuraux, sous des barrières de perméabilité ou sous des pièges sédimentaires avant d'être redistribués latéralement ou verticalement (Gay et al., 2007).

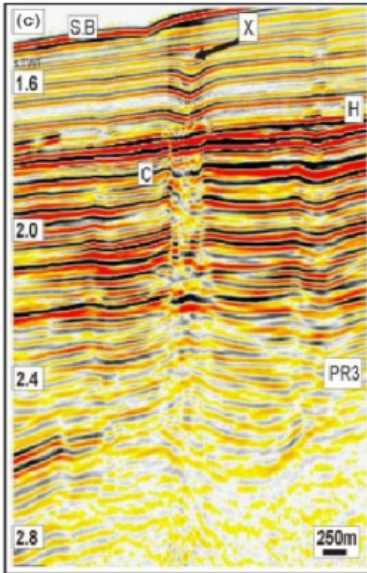


Figure 2: Profil sismique issu de données de sismique 3D (Ho et al., 2012), montrant un empilement vertical d'anomalies d'amplitude, interprétées comme une cheminée de migration de fluides, ou pipe (Ho et al., 2012). Bien que la résolution de ces données soit très fine, elle ne permet d'imager qu'une anomalie géophysique de plusieurs centaines de mètres de diamètre qui correspond probablement à une zone imprégnée par des fluides riches en gaz. Cependant il s'agit d'une photographie de la structure prise au moment de l'acquisition des données qui ne permet pas d'identifier clairement les processus mécaniques mis en jeu pour sa formation ni de comprendre la dynamique de la mise en place de la cheminée.

Ces cheminées sont généralement interprétées comme des zones de forte perméabilité, la plupart du temps suivant des discontinuités structurales comme des réseaux de failles et forment des conduits verticaux plutôt tubulaires (Loseth et al, 2011). Indirectement cela induit l'idée que ces conduits fonctionnent comme des tubes ouverts. Cependant, des fossiles nous permettent de constater que **ces cheminées ne sont absolument pas des conduits ouverts de plusieurs dizaines à plusieurs centaines de mètres de diamètre, continus ou connectés tout le long du chemin identifié en sismique**. Ces cheminées s'expriment plutôt sous la forme de champs de conduits pluri-décimétriques à métrique ayant des perméabilités très élevées au moment où ils sont actifs (cf figure 3) et montrant une forte concentration en fluides interstitiels, ce qui est exactement à l'origine de l'anomalie identifiée par les outils géophysiques.



Figure 3: A gauche, conduit de migration de fluides de plusieurs dizaines de cm de large. Les conduits se concentrent dans des champs affectés par une intense fracturation discrète et sont espacés de quelques mètres à quelques dizaines de mètres en moyenne. A droite, les conduits vus en coupe révèlent la présence d'un véritable conduit minéralisé et témoignent d'importants échanges avec l'encaissant sédimentaire.

Pour des raisons évidentes de risque et donc de sécurité des installations et des personnels, ces cheminées n'ont jamais été forcées jusqu'à présent et donc encore moins

monitorées. En l'absence de mesures in-situ il est très difficile de comprendre comment ces cheminées fonctionnent.

Il existe pourtant des indices indirects du fonctionnement des cheminées, comme les structures en fleurs visibles en profils sismiques de haute résolution. Ces structures traduisent une migration focalisée en profondeur à travers un conduit pluri-décamétriques à pluri-hectométrique et, à proximité du fond de la mer, une migration plus diffuse formant un cône dont les dimensions dépendent de la nature de l'encaissant, de la nature du fluide et des propriétés pétrophysiques de l'encaissant sédimentaire ([Gay et al., 2007](#); [Gay et al., 2012](#)).

À ce jour, les paramètres mécaniques qui régissent l'initiation de cette migration focalisée à travers des cheminées et sa propagation à travers la pile sédimentaire restent mal compris. Comprendre ces mécanismes est absolument essentiel dans l'industrie marine (pétrolière, gazière, télécoms) car le développement de zones potentielles d'expulsion de fluides représente un risque majeur pour les installations anthropiques, pour la compréhension des fuites depuis les réservoirs enfouis ([Mourgues et al., 2011](#)), et pour les échanges entre la lithosphère superficielle et l'hydrosphère voire l'atmosphère.

Lors de ce stage, notre but était de mettre en évidence les paramètres qui influencent l'initiation de cette migration focalisée et ceux qui font varier les dimensions de ces remontées de fluides.

Nous avons utilisé une approche couplant modélisation analogique et modélisation numérique pour tenter de se rapprocher au mieux des conditions réelles. Dans les deux cas, il s'agit de modéliser une injection basale de fluide dans un milieu granulaire lui-même immergé dans un fluide identique à celui injecté.

Contrairement au stage de M2 effectué par Manon POCHE en 2018, l'objectif ici n'est pas de reproduire ces structures d'échappement de fluide dans leur totalité mais leurs conditions d'initiation.

Après avoir défini ce qu'est un milieu granulaire, nous présenterons un état de l'art des simulations numériques et analogiques.

Dans cette étude nous avons développé une méthode originale qui couple pour la première fois des résultats de simulations d'un milieu bi-couche avec un contraste granulométrique important. Le but de ces expériences était de modéliser l'interface d'un niveau sédimentaire poreux considéré comme niveau source de la remontée de fluide perturbant les réflecteurs de la colonne sédimentaire. De ce fait les simulations numériques et analogiques sont composées de 2 couches de granulométries relativement différentes.

2. État de l'art

2.1/ Le milieu granulaire

Un milieu est appelé granulaire quand il est divisé en un grand nombre de particules dont la taille est supérieure 100 μ m et dont les collisions sont dissipatives du point de vue énergétique. On considère qu'un milieu granulaire peut se comporter de manière solide, liquide ou gazeuse selon les conditions auxquelles il est soumis. Quand le milieu granulaire est sans mouvement et dominé par les interactions de contacts permanents entre les grains, il a un comportement

« solide ». Des particules très agitées et espacées interagissant par collisions binaires auront un comportement gazeux. Et lorsque des particules interagissent par collision et par contacts frictionnels de longue durée formant un écoulement, elles auront un comportement liquide (Andreaotti et al., 2011).

Les sédiments marins dans lesquels les structures d'échappement ont été observées sont assimilés à un milieu granulaire immergé. On considère que les modélisations numériques et analogiques présentées dans ce rapport utilisent un milieu comparable à un milieu granulaire. Dans notre étude, nous ne considérerons pas les zones fluidisées, car elles ne représentent que de très rares cas réels. Les mouvements de fluides étant plutôt focalisés mais diffus à travers la matrice sédimentaire (cf figure 3). Par contre, nous nous focaliserons sur des faibles mouvements de grains pouvant être associés à de la fracturation discrète et aux changements de compacité qui en résultent.

2.2/ État de l'art en modélisation numérique

Avant les expériences de Manon POCHET (2018), seulement deux études ont été réalisées à partir d'une injection focalisée d'un fluide en base d'un lit granulaire monocouche : Cui et al. (2012) ; Ngoma (2015). Elles ont utilisé des modèles numériques hybrides en deux dimensions, associant la méthode des éléments discrets (DEM) et la méthode Lattice Boltzmann pour le fluide. Toutes deux mettent en évidence trois mêmes régimes fonction du comportement mécanique du milieu granulaire tel que :

- le **régime statique** correspondant à de la percolation du fluide dans le milieu granulaire (sans mouvements de grains).
- le **régime de cavité stable** présentant une poche où le milieu granulaire a un comportement fluide. Les grains en dehors de cette zone reste immobile.
- le **régime de fluidification totale** de la couche sur toute sa hauteur produisant une « cheminée » où le milieu granulaire a un comportement liquide à gazeux. À la surface, un relief borde souvent les deux segments de la cheminée. Certaines simulations numériques de Manon POCHET ont montré la formation d'un canal sans grains (cf figure 4).

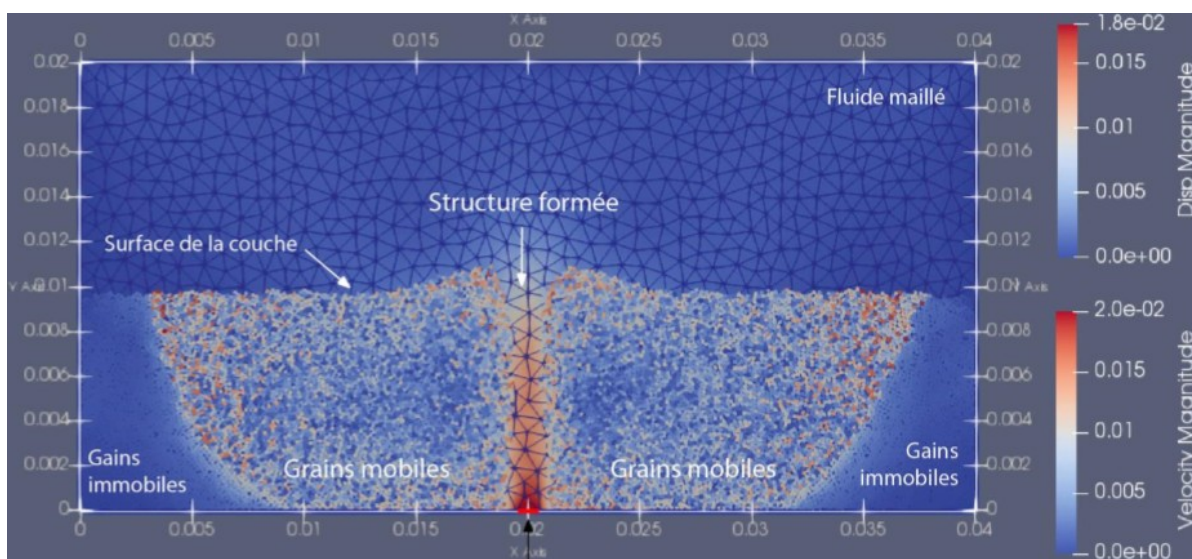


figure 4 : Simulation numérique effectuée par Manon POCHET au cours de son stage en 2018 (extrait du rapport) ; L'injection ponctuelle (trait rouge) à la base de la couche va entraîner la formation d'une structure au centre, au dessus de l'injection qui est un canal accompagnée d'une remobilisation des grains de chaque côté. Au delà d'une certaine distance les grains ne sont plus impactés par la structure et sont immobiles.

[Cui et al. \(2012\)](#) montre notamment l'influence de la cohésion de la couche lors de l'initiation de ces régimes. Elle influe sur les seuils de pression à l'origine de la fluidification et entraîne la formation de fractures dans le lit granulaire.

[Ngoma \(2015\)](#) a, entre autres, montré que dans une couche peu compacte la fluidification est rapide et entraîne des mouvements turbulents alors que dans une couche compacte la fluidification est retardée par un soulèvement de la couche.

Plus récemment, l'étude de [Ludovic Räss et al. \(2018\)](#) modélise la formation de « cheminée » à plus forte perméabilité dans un milieu de perméabilité connue, montrant que des décompactions locales d'un milieu granulaire confiné forment des migrations de fluides canalisées (*cf figure 5*).

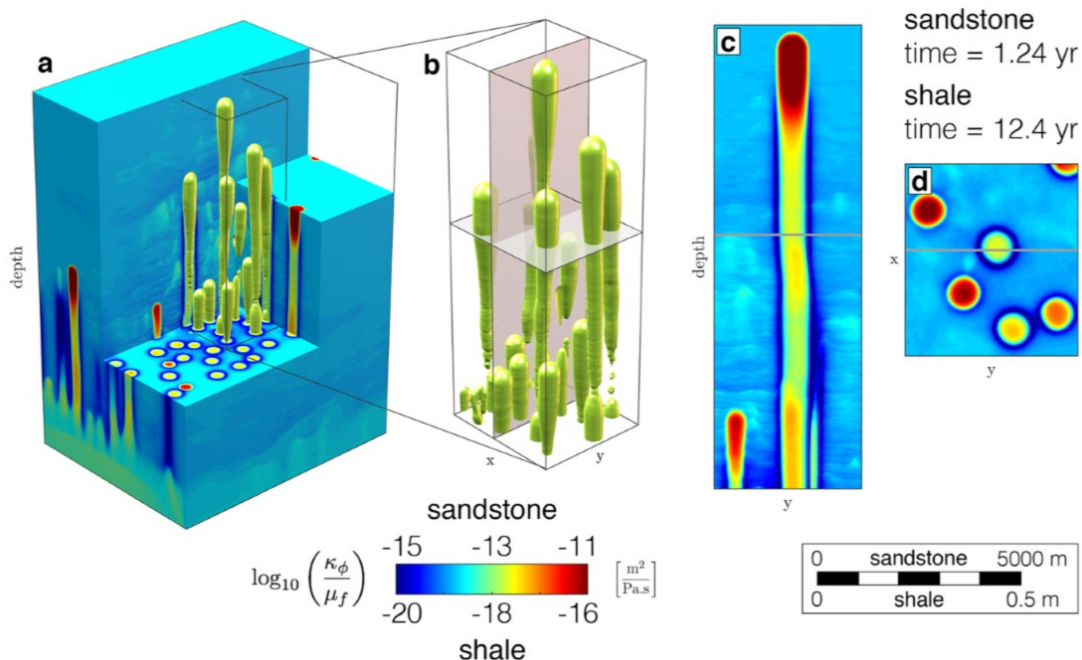


Figure 5 : Extrait de la publication Ludovic Räss et al. (2018) ; Genèse de cheminée à haute perméabilité à partir d'une région source (réservoir) en trois dimensions. Couleur tracé (échelle logarithmique) de la perméabilité dynamique pour deux lithologies différentes, grès conducteur et schiste imperméable. (a) Aperçu du modèle hydro-mécanique révélant l'existence de cheminées à haute perméabilité en forme tubulaire en trois dimensions. (b) Agrandissement sélectif du centre du modèle affichant les cheminées profilées. (c) tranche bidimensionnelle verticale de (b) affichant un tracé de couleur du champ de perméabilité d'une cheminée isolée. (d) Tranche horizontale de (b) affichant un tracé de couleur du champ de perméabilité.

2.3/ État de l'art en Modélisation analogique

Contrairement aux simulations numériques, les simulations analogiques présentant une injection basale de fluide dans un milieu granulaire sont nombreuses. Toutes ont en commun le fait qu'elles étudient de manières différentes des régimes de comportements du milieu granulaire tendant vers sa fluidification.

[Zoueshtiagh et Merlen \(2007\)](#) et [Philippe et Badiane \(2013\)](#) ont réalisé des travaux en 3 dimensions. Comme pour les modélisations numériques, ils mettent en évidence 3 régimes de comportement : régime statique, régime de cavité stable et régime de fluidification locale formant une «cheminée» quasi-cylindrique légèrement évasée vers le haut, dont la forme s'élargit avec le débit. [Zoueshtiagh et Merlen \(2007\)](#) montrent un effet d'hystérésis entre les débits de fluidification et le débit de défluidification : le débit de défluidification est plus faible que

le débit de fluidisation. On parle de défluidification lorsqu'un milieu granulaire fluidisé tend à retrouver un comportement solide. *Philippe et Badiane (2013)* remettent en question la présence du régime de cavité se trouvant entre les régimes statique et fluidifié. Il pourrait correspondre à une progression très lente du régime de fluidification.

Alsaydalani et Clayton (2013) ont étudié pour différentes variétés de sable, l'évolution du flux et de la pression. Ainsi, ils mettent en évidence que le déclenchement de la fluidification est contrôlé par plusieurs paramètres comme le flux, la taille des particules, leur sphéricité, l'épaisseur de la couche et sa perméabilité. Par exemples, le déclenchement de la fluidification d'un milieu granulaire avec des grains peu sphériques sera plus long que pour un milieu granulaire à grain parfaitement sphérique.

Ngoma (2015) a mis en évidence la différence de comportement de la couche en fonction de sa compacité : la fluidification d'une couche lâche se fait plus rapidement que pour une couche compacte.

D'autres travaux de fluidification de couche granulaire comme *Roche et al. (2001)* et *Gallo et Woods (2004)* ont montré la formation d'un canal de remontée de fluide dans un milieu granulaire immergé.

Toutes ces études tentent de modéliser une structure de remontée de fluides dans son ensemble en étudiant la fluidification d'un milieu granulaire monocouche avec une source définie. Aucune de ces études ne portent sur l'initiation d'une zone source de migration de fluide dans un milieu granulaire bicouche.

3. Méthodes

3.1/ Expériences analogiques

Les expériences analogiques ont été menées au laboratoire de physique de l'École Normale Supérieure de Lyon et encadrées par Valérie VIDAL (chercheuse à l'ENS en physique du milieu granulaire et poreux).

Développement expérimental

Le but était d'abord de chercher comment se rapprocher le plus possible des structures de remontées de fluides observées dans les bassins sédimentaires immergés. Nous avons alors essayé de faire varier plusieurs paramètres.

- Nous avons fait des essais avec des grains de céramiques non sphériques pour augmenter la **masse volumique** du milieu granulaire.
- Nous avons essayé d'injecter le fluide par pression constante pour **se rapprocher asymptotiquement du seuil de fluidification** ; le but étant de voir s'il y a fracturation. Il a donc fallu créer un dispositif où la pompe injectait le fluide dans un récipient placé en haut et connecté à l'injecteur de la cellule.
- Nous avons aussi essayé d'injecter un fluide plus visqueux pour créer une **cohésion** du milieu granulaire

La dimension de ces modèles analogiques comparée au poids total des particules ne permet pas d'atteindre des pressions de confinement similaires à celles observées dans la réalité.

C'est à partir de cette réflexion que notre choix de modélisation s'est porté sur la reproduction des conditions à l'interface d'une zone source où s'initient les remontées de fluides.

Dispositif expérimental

Le dispositif utilisé lors des expériences analogiques est composé des éléments suivants (cf figure 6) :

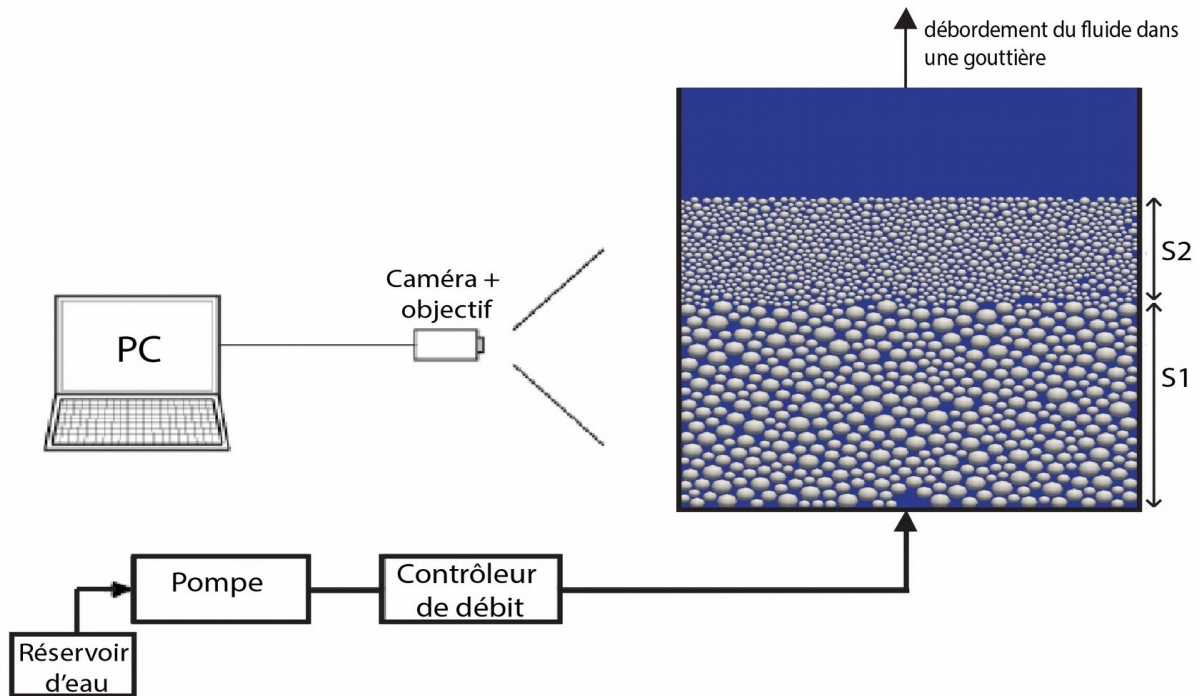


Figure 6 : schéma du dispositif expérimental

- une cellule de Hele-Shaw : composée de 2 plaques de verres (356 mm x 295 mm) présentant un espace de 3mm fermé sur 3 des 4 côtés.
- un injecteur de diamètre central d'un millimètre sur le fond de la cellule (équidistant des parois latérales)
- une pompe (Universal Motors MOT BF31 63M-2) avec un contrôleur de débit (Bronkhorst CORI-TECH mini CORI-FLOW M15-ABD-22-0-S) permettant un débit Q constant
- une hauteur de grains sphériques en billes de verre (ou en céramique pour certains tests) de diamètres variables selon les expériences. Cette couche est elle-même composée de 2 couches de hauteurs $S1$ et $S2$ chacune de granulométries différentes, le but étant de modéliser l'interface d'un niveau source poreux et de son toit à granulométrie plus fine.
- une caméra (BASLER acA2040-90u m 21725282 + objectif FUJIFILM Fujinon CF 12,5HA-1) placé devant la cellule
- un plan lumineux (Just NormLicht, Classic Line) placé derrière la cellule de Hele-Shaw
- un logiciel Pylon Viewer (Version 5.0.0.6150 64bit) qui permet de prendre des photos à intervalles de temps régulier.

Ainsi, l'évolution du milieu granulaire au sein de la cellule est mis en évidence par une différence d'intensité lumineuse. Ce procédé est détaillé dans la partie *Traitement des images* (cf. 3.1.1)

Granulométrie

Plusieurs échantillons présentant chacun une distribution différente ont été utilisés lors de mes expériences. La granulométrie des échantillons indiqué par le fournisseur est relativement imprécise. De plus, des tamis sont utilisés pour obtenir de nouvelles granulométries selon les besoins. Nous avons alors analysé un échantillon de chaque gamme granulométrique pour définir plus précisément leur distribution. La distribution des grains sera discutée dans la partie 5.2/ discussion des résultats analogiques.

Nous avons utilisé un microscope (Wild Heerbrugg Makroskop M420 00007650) équipé d'un objectif (Leica Makrozoom 1:5), d'une lumière (Leitz Type 301_314.001 8591) et d'une caméra (pixelINK PL-B781U 781009473). Avec ce matériel nous avons pris plusieurs photos de l'échantillon à analyser en faisant attention à ne pas prendre les mêmes grains sur plusieurs photos. 1000 particules photographiées au minimum sont nécessaires à une analyse fiable.

Les photos sont prises à l'aide du logiciel Pixelink Capture OEM (Version 2.3.5.0) et ont ensuite été traitées sur MatLab (R2015a) pour la reconnaissance des particules.

Traitement des images

Les images obtenues sont traitées par des programmes Matlab déjà développés par Valérie VIDAL (laboratoire de physique de l'ENS de Lyon) et Manon POCHE (anciennement stagiaire M2). Il a fallu modifier le script en fonction de ce que l'on a voulu mettre en évidence par analogie : l'influence de certains paramètres sur l'initiation de remontées de fluides dans un milieu granulaire. Pour ce faire, il est préférable de regarder l'évolution du milieu sur des intervalles de temps court.

On décide de procéder par soustraction d'images successives prises à intervalles de temps régulier. Concrètement, les images obtenues sont numériquement des matrices finies où chaque couple i/j (ligne/colonne) est un pixel ayant une valeur dépendant de l'intensité lumineuse. L'image est donc affichée en nuance de gris. La valeur de chaque pixel d'une image est ensuite soustraite à celle de pixel de l'image précédent du même couple i/j . La différence est affichée comme image où plus le changement d'intensité lumineuse entre 2 images est important, plus le pixel tend vers le blanc. (cf figure 7)

L'analyse des images brutes sera aussi nécessaire pour l'étude d'un paramètre présenté dans la partie résultat.

3.2/ Modélisation numérique

Les expériences numériques ont été réalisées en collaboration avec Rémy MOZUL et Emilien AZEMA (Ingénieurs au Laboratoire de Mécanique et Génie Civile de Montpellier) et Matthieu CONSTANT (Ingénieurs Université Catholique de Louvain, Institute of Mechanics, Materials and Civil Engineering).

Dispositif de simulations

« Un modèle numérique est une discrétisation dans l'espace d'un modèle physique. » ([Dubois et al.](#)) Dans cette étude, il s'agit d'un modèle couplé fluide-grain CFD-DEM (Computational Fluid Dynamics - Discrete Element Methods) multi-échelle. On distingue deux phases : liquide (fluide injecté et fluide d'immersion) et solide (particules). La phase fluide est modélisée par le maillage d'une zone définie qui permet une discrétisation de la vitesse et de la direction du fluide par petites zones. La modélisation de la phase fluide est faite à partir de lois de conservation qui ont été obtenues à partir des lois de Navier-Stokes, de la porosité du milieu, de la densité du fluide et des vitesses partielles fluide-grain.

La partie solide représentant le milieu granulaire, est modélisée avec une méthode d'éléments discrets à l'échelle des particules individuelles. La vitesse, l'accélération et la trajectoire de chaque particule sont calculées. Les interactions de la phase solide sont définies par des forces de contacts qui sont obtenues à partir des lois de Newton. Le comportement des grains lorsqu'ils entrent en contact, est défini par des lois de contact notamment une loi de Coulomb inélastique qui ne restitue pas l'énergie élastique lors des collisions.

Les deux phases sont couplées par une loi empirique qui définit la force de traînée pour des milieux granulaires monodisperses, et qui définit le transfert de moment entre fluide et grains. Chaque « maille de fluide » présente des vitesses et directions de fluide différentes qui s'appliquent sur les grains présents dans ces mailles.

Concrètement, le logiciel MigFlow (toujours en développement) applique les forces de traînées du fluide sur les grains, calcule la trajectoire et la vitesse de chaque grain qui en découle et recalcule la vitesse et direction du fluide résultant de cette dissipation d'énergie. Il s'agit donc pour **MigFlow** de résoudre un grand nombre d'équations différentielles du second ordre par le biais d'une bibliothèque **PETSc** (utilisée pour la résolution de systèmes linéaires creux).

Les logiciels **Scontact** et **LMGC90** se chargent des contacts entre grains et entre les grains et les parois. Scontact est plus récent et plus rapide que **LMGC90** et est codé pour **MigFlow**. Cependant, il ne prend pas en compte la friction entre grains et ne fonctionne que pour des disques ou des sphères (2D ou 3D). Une fois les calculs effectués, on utilise le logiciel de logiciel de visualisation **Paraview**.

Développement expérimental

Dans cette partie, l'exercice a d'abord été de produire le modèle initial. Nous avons choisi de modéliser des expériences avec 2 couches pour voir les phénomènes autour de l'interface. Cependant, on a voulu tirer profit de la modélisation numérique, car elle nous permet de modéliser des conditions impossibles à reproduire actuellement en modélisations analogiques : la pression lithostatique. Mais faire une cellule numérique plus grande avec plus de grains demande une quantité de calculs très importante avec des temps de calculs a fortiori beaucoup plus longs. Alors, notre objectif était de n'avoir à modéliser que la zone d'interface entre 2 couches de granulométries différentes tout en ayant un confinement plus important que si on avait modélisé le système dans son ensemble. Il a donc fallu découper et modifier le code produisant la situation initiale développée par Matthieu CONSTANT en plusieurs étapes. À noter qu'il fut impossible d'utiliser les codes développés par Manon POCHE l'année précédente car le logiciel MigFlow a évolué dans ses fonctions et leurs paramètres associés. Ces étapes sont présentées dans la partie résultats numériques.

4. Résultats

4.1/ Expériences analogiques

Le but de ces expériences était de modéliser l'interface d'un niveau sédimentaire poreux considéré comme niveau source de la remontée de fluide perturbant les réflecteurs sur toute la hauteur de la colonne sédimentaire. De ce fait les simulations sont composées de 2 couches de granulométries différentes avec une granulométrie plus grosse dans la couche 1 (au-dessous) que dans la couche 2 (au-dessus). L'injection se fait à la base de la couche 1.

Ici notre intérêt se porte sur les quelques premières secondes voir les quelques dixièmes de secondes suivant le début de l'injection, bien avant la fluidification amenant à la formation d'une « cheminée » où le milieu granulaire se comporte de manière gazeuse ou/et liquide (*cf 2.2 modélisation numérique*). Les simulations sont filmées à 10 images par secondes. L'analyse par soustraction d'images successives permet alors de voir en détail les phénomènes liés à l'interface formée par les granulométries différentes des deux couches. Les changements d'intensité lumineuse sont des mouvements de grains au sein du milieu granulaire.

Le déroulement commun à toutes ces expériences est le suivant :

- L'injection commence après avoir tourné la vanne manuellement.
- Des mouvements dans le milieu granulaire de la couche 1 sont observés sous l'interface grâce à la soustraction d'images successives. Selon les cas, on remarque que ces mouvements sont soit généralisés à toute la largeur de la cellule, soit plus focalisés avec une largeur inférieure à la largeur totale de la cellule. Il est important de remarquer que ces mouvements sont de faible amplitude : on considère que le milieu granulaire de la couche 1 se comporte toujours comme un solide. (*cf figure 7*)
- Ensuite, le réseau granulaire de la couche 2 (au-dessus) se voit perturbé à sa base (l'interface) à cause d'un afflux important causant un front de perturbations plus ou moins diffus. (*cf figure 8*)
- Le front de la perturbation continue de se propager vers le haut et latéralement en développant des digitations dans la couche 2 (*cf figure 9c*). La plus grande digitation atteindra la surface en éclatant (*cf figure 9d*), ce qui amène alors à la fluidisation des 2 couches au dessus de l'injecteur par la remontée d'une cavité fluidisée qui grossi dans le même temps (*cf figure 9b*). Après avoir atteint la surface, cette cavité formera une « cheminée » où le milieu granulaire est fluidisé. C'est à partir de ce stade que Manon POCHET étudiait les morphologies de ces « cheminées » fluidisées également décrites par [Zoueshtiagh et Merlen \(2007\)](#) (*cf 2/3. état de l'art en modélisation analogique*). Le régime de cavité fluidisée, énuméré ci-avant, est observé pour toutes les simulations dès le début de l'injection. Il s'agit d'une cavité pluri-millimétrique à centimétrique similaire à celles décrite par [Philippe et Badiane \(2013\)](#).

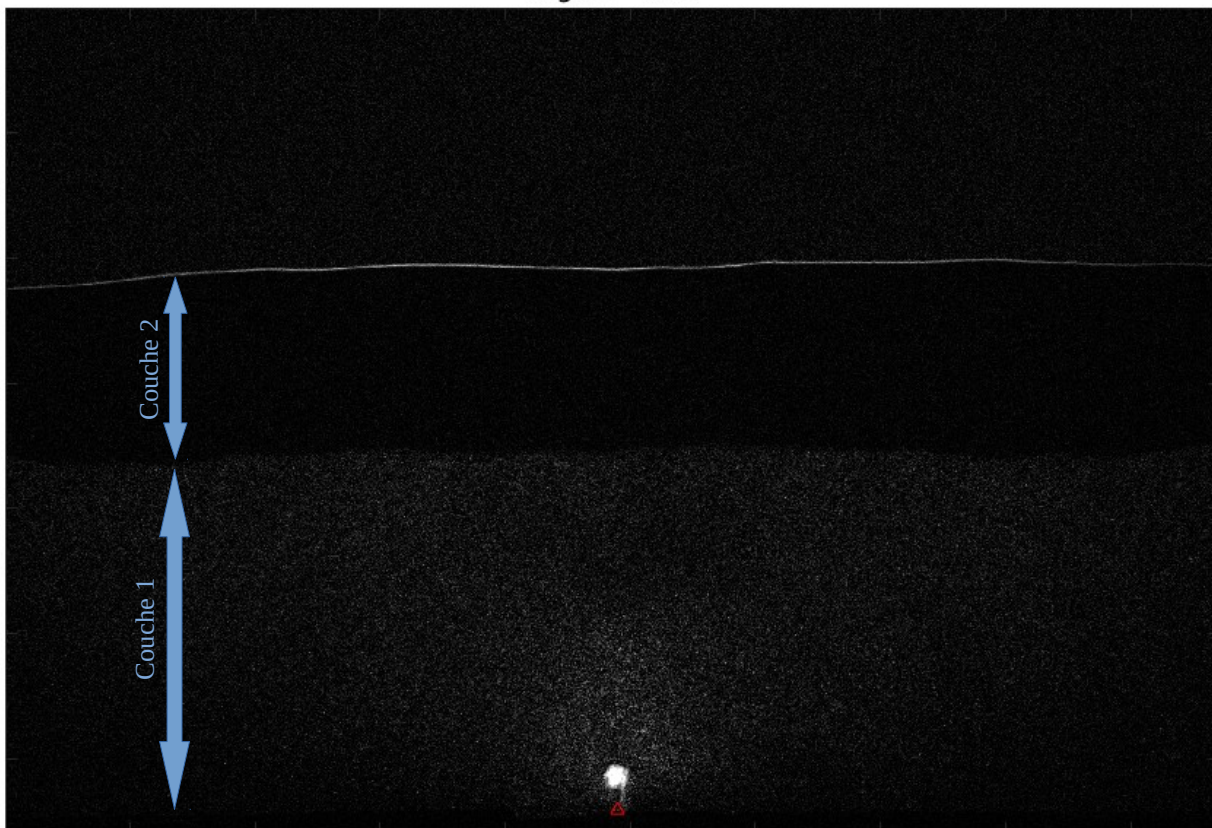


Figure 7 : Image obtenu par soustraction de l'image brute 21 à l'image brute 22 de l'expérience 20 ; Ici la couche 1 est mise en évidence par des mouvements de faibles amplitudes généralisés sur toute la largeur de la cellule. On remarque que les zones proches des parois à la même hauteur que l'injecteur présente peu de mouvements. ; On remarque également que la surface est mise en évidence par un trait blanc : sa position a bougé de l'image 21 à 22.

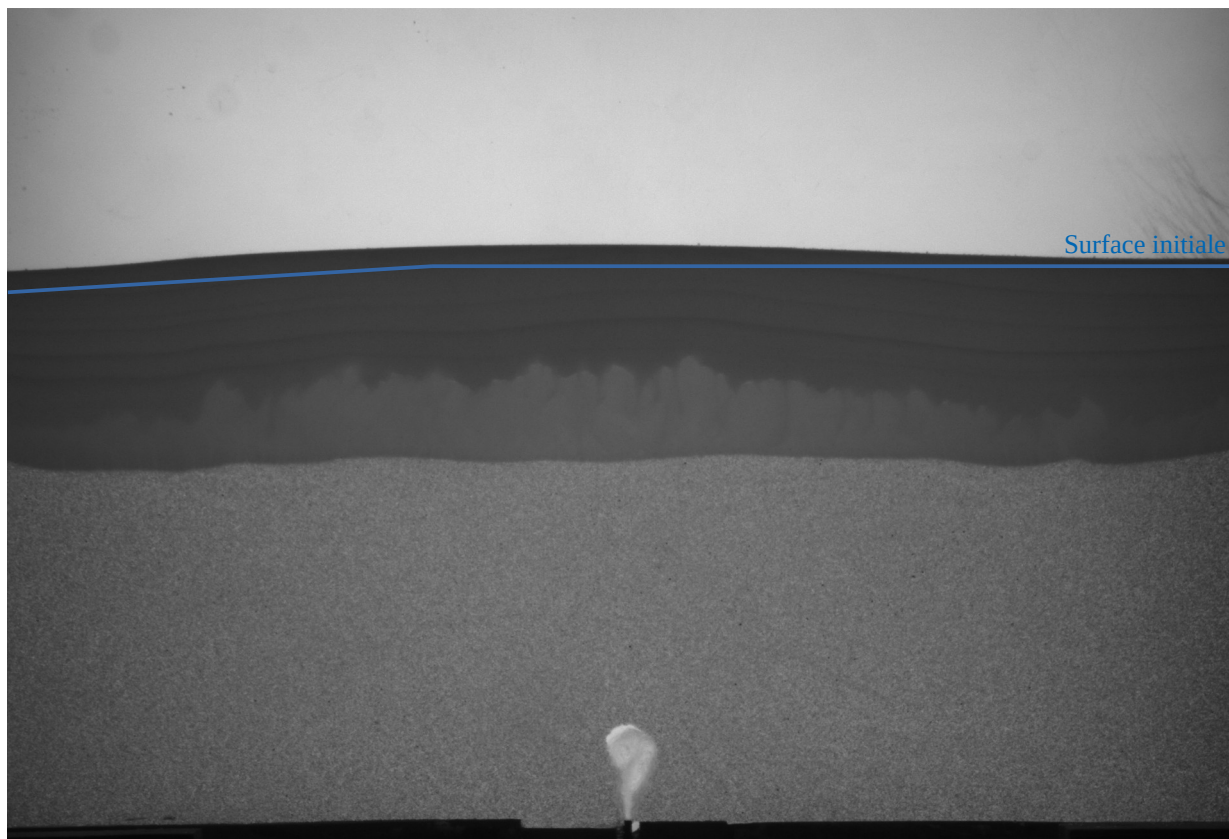


Figure 8 : Image brute 83 de l'expérience 20 ; $T_{invasion} + 28$ (2,8s après le début de la perturbation dans la couche 2) ; Dans la couche 2, on observe que le front de la perturbation formant des petites digitations a surélevé la surface initiale.

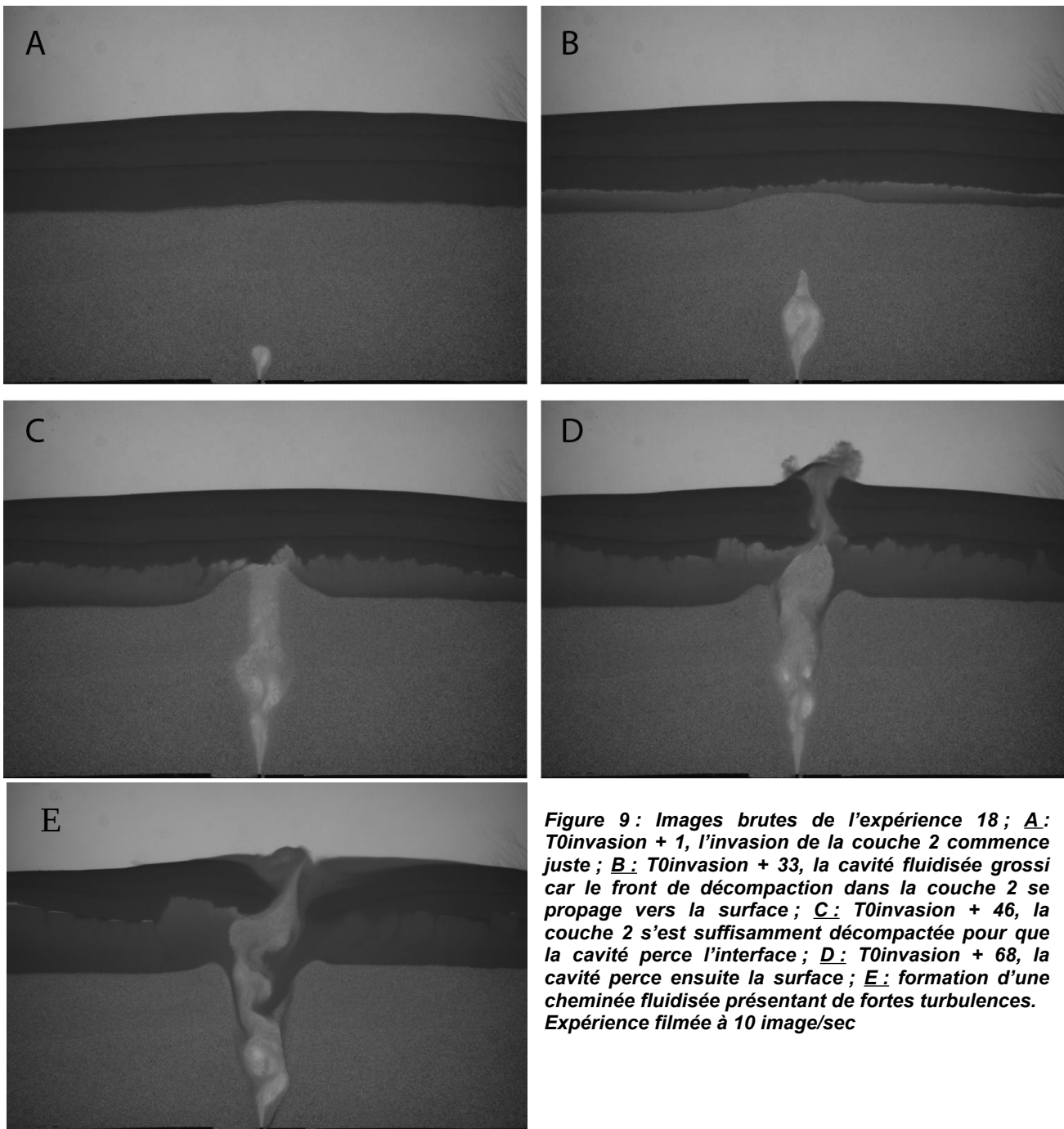


Figure 9 : Images brutes de l'expérience 18 ; **A :** $T_{0invasion} + 1$, l'invasion de la couche 2 commence juste ; **B :** $T_{0invasion} + 33$, la cavité fluidisée grossi car le front de décompaction dans la couche 2 se propage vers la surface ; **C :** $T_{0invasion} + 46$, la couche 2 s'est suffisamment décompactée pour que la cavité perce l'interface ; **D :** $T_{0invasion} + 68$, la cavité perce ensuite la surface ; **E :** formation d'une cheminée fluidisée présentant de fortes turbulences. Expérience filmée à 10 image/sec

Dans cette étude, notre intérêt porte sur :

- la largeur de la zone présentant des mouvements de faibles amplitudes dans la couche 1 avant l'invasion de la couche 2.
- la largeur de la zone perturbée au-dessus de l'interface au début de l'invasion du fluide dans la couche 2

Pour pouvoir comparer les résultats de manière cohérente, il a fallu trouver un marqueur temporel commun à toutes les expériences. Notre intérêt portant sur les phénomènes autour de l'interface, on choisit $T_{0invasion}$ qui correspond au moment juste avant l'initiation de la perturbation du réseau granulaire de la couche 2.

Une fois $T_{0invasion}$ défini pour toutes les expériences, nous avons défini :

- la largeur L_m de la zone présentant des mouvements sous l'interface, dans la couche 1 (à $T_{0invasion} - 1$). L_m est mesuré par soustraction d'image (cf 3/1. Expériences analogiques). (cf figure 10)
- la largeur L_i de la zone d'invasion du fluide dans la couche 2 (à $T_{0invasion} + 1$). L_i est mesuré sur les images originales obtenues avec la caméra. (cf figure 11)

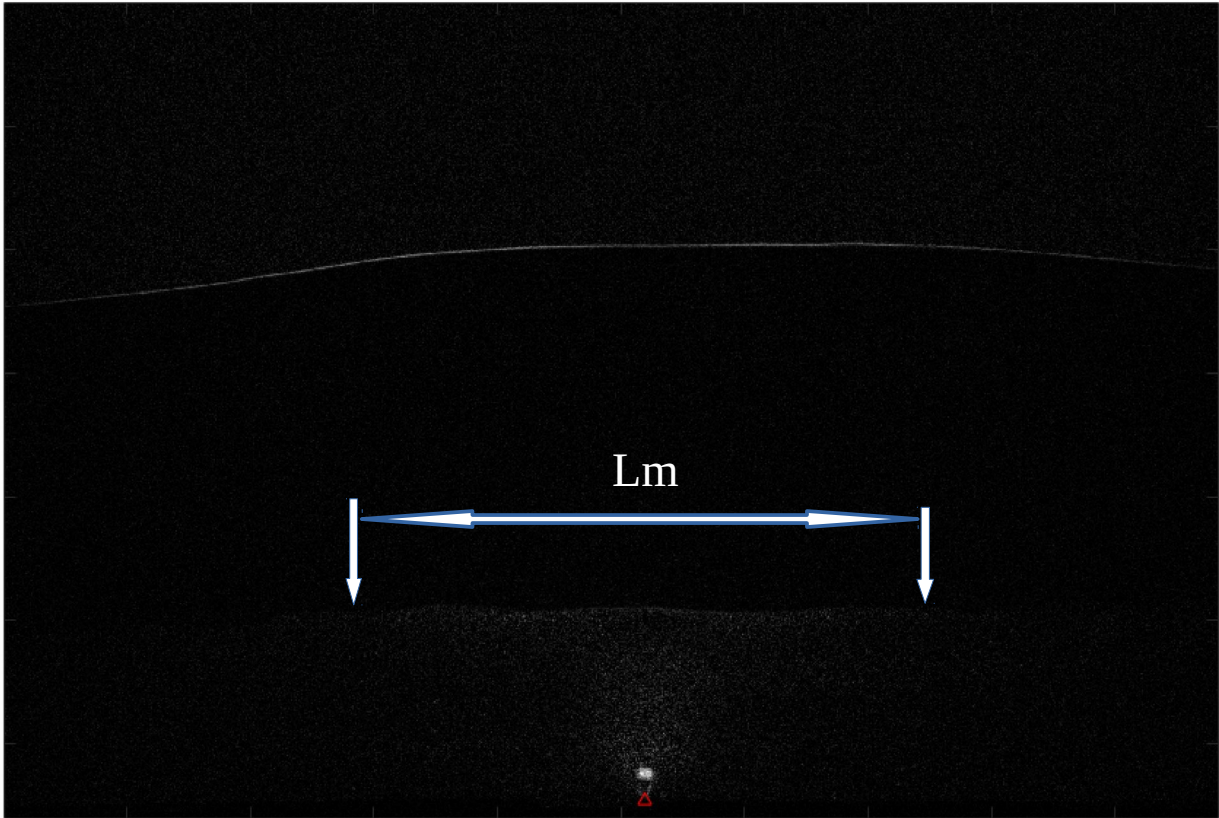


Figure 10 : image issue de la soustraction d'image successive de l'expérience 19 à $T_{0invasion} - 1$ présentant un front d'invasion délimité par les flèches noires ($S1=5cm$ et $S2=10cm$) ; la largeur L_m est délimitée par les flèches blanches.

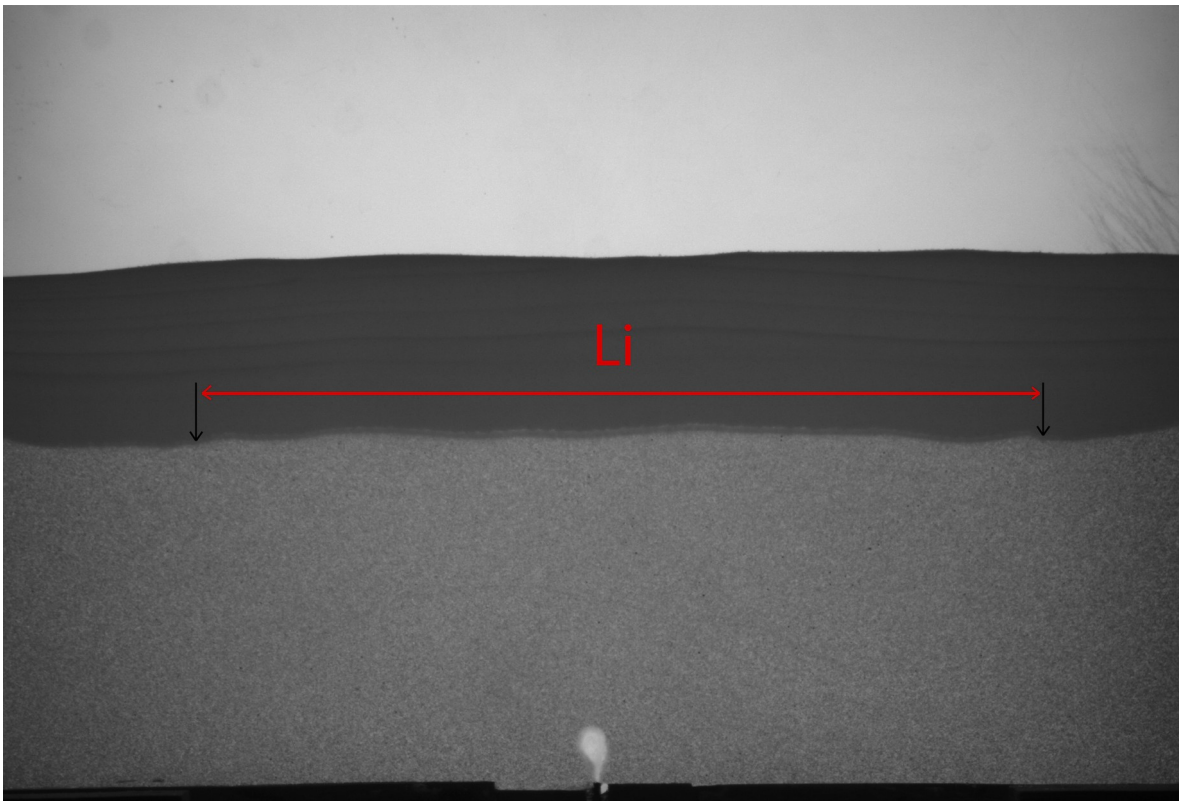
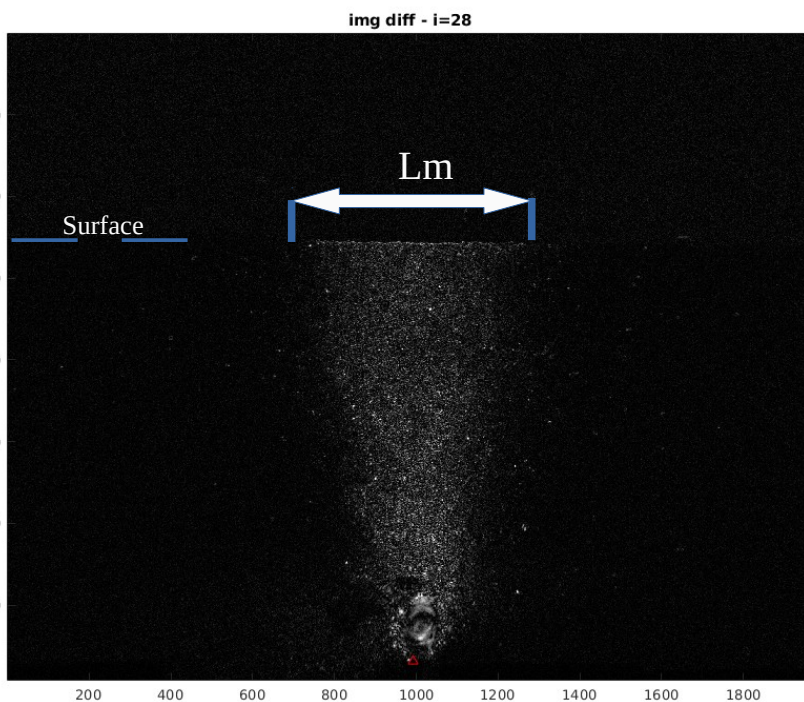


Figure 11 : image brute de l'expérience 20 à $T_{0invasion} + 1$ présentant un front d'invasion délimité par les flèches noires ($S1=10cm$ et $S2=5cm$)

L'ensemble des paramètres fixés et des largeurs L_m et L_i mesurées dans les expériences étudiées est présenté dans le tableau ci-dessous.

XP	granulométrie (μm)		épaisseur (cm)		débit (mL/min)	T0invasion -1		Rapport S2/Lm	T0invasion + 1		Rapport S1/Li
	Couche 1	Couche 2	Hauteur Couche 1 (S1)	Hauteur Couche 2 (S2)		N° soustraction d'image étudié	largeur (Lm) (cm)		N° image brute étudié	Largeur (Li) (cm)	
9	400/500		5		50	30	6,15				
16	400/500	200/250	10	10	100	12	35,6	0,28	27	9,135	1,03
17	400/500	125/160	5	5	50	61	35,6	0,14	66	6,325	0,87
18	400/500	125/160	10	5	100	21	35,6	0,14	24	35,6	0,14
19	400/500	125/160	5	10	50	27	17,9	0,55	30	5,225	1,18
20	400/500	125/160	10	5	50	22	35,6	0,14	26	23,085	0,42
23	400/500	80/125	5	10	50	20	17,36	0,58	25	5,67	0,93
24	400/500	80/125	10	10	50	33	35,6	0,28	37	14,79	0,66
25	500/600	80/125	10	10	50	22	35,6	0,28	28	19,14	0,5
26	500/600	80/125	5	15	50	17	13,8	1,08	21	3,915	1,18

Figure 12 : Tableau récapitulatif des paramètres et résultats des expériences étudiées ; en rouge Lm=Largeur totale de la cellule



L'expérience 9 est une expérience test en monocouche dont nous nous sommes servi comme expérience témoin pour comparer les largeurs de zones de faibles mouvements Lm. Pour cela, nous avons mesuré Lm juste avant que la cavité fluidisée remonte, initiant la formation de la « cheminée » fluidisée (cf figure 13)

On remarque alors que la largeur Lm mesurée est plus petite que toutes les largeurs Lm mesurées sur les modèles bicouches.

Figure 13 : image issue de soustraction de l'image 27 et 28 de l'expérience 9 ; intervalle de temps juste avant le début de la remontée de la cavité fluidisée.

Dans un premier temps, nous avons cherché un débit limite pour voir des phénomènes à l'interface sans fluidiser trop vite le milieu granulaire pour avoir le temps d'enregistrer au mieux les étapes. Il s'est avéré qu'en dessous d'un débit de 50mL/min, le débit devient de plus en plus instable. Nous avons donc choisi de fixer à 50mL/min le débit des expériences à analyser.

Nous avons ensuite fait varier indépendamment les épaisseurs de la couche 1 et 2 entre 5cm et 10cm. Nous avons aussi fait varier la granulométrie de 80/125 μm à 125/160 μm pour la couche 1 et de 400/500 à 500/600 μm pour la couche 2. Le but est de voir l'influence de la granulométrie entre les deux couches et celle de l'épaisseur des couches 1 et 2 sur les largeurs Li et Lm. (cf figure 13)

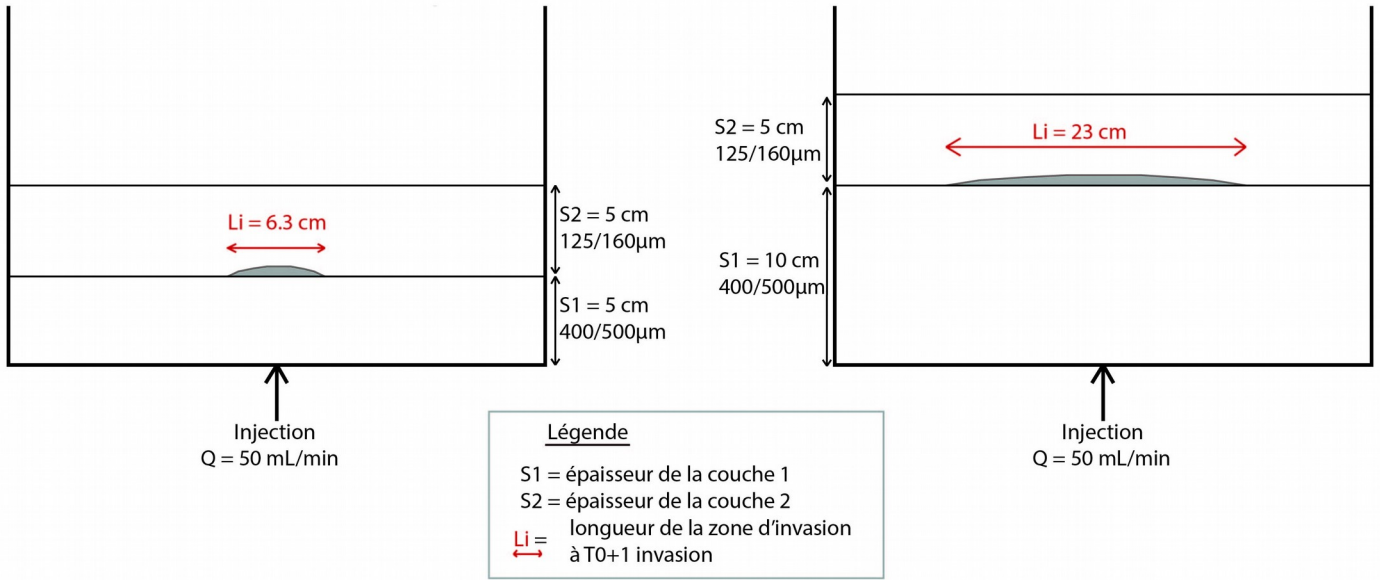


Figure 14 : schéma comparant la largeur L_i par rapport à la hauteur S_1 des expériences 17 et 20

Influence de la hauteur S_1 sur les largeurs L_i et L_m

Comparons les expériences 17 et 20 (cf figure 14), seules leurs hauteurs S_1 varient dans leurs paramètres passant respectivement de 5 à 10cm (cf figure 12 : tableau récapitulatif).

Nous remarquons alors que quand la hauteur S_1 augmente, la largeur L_i du front de perturbation est plus importante. On remarque aussi que l'évolution de L_i par rapport à S_1 ne semble pas linéaire car la valeur de L_i quand $S_1 = 10$ cm n'est pas le double de la valeur de L_i quand $S_1=5$ cm. (cf figure 14)

Aussi, on voit que pour les deux expériences, la largeur L_m atteint la largeur totale de la cellule. On ne peut donc pas comparer les deux expériences sur ce point.

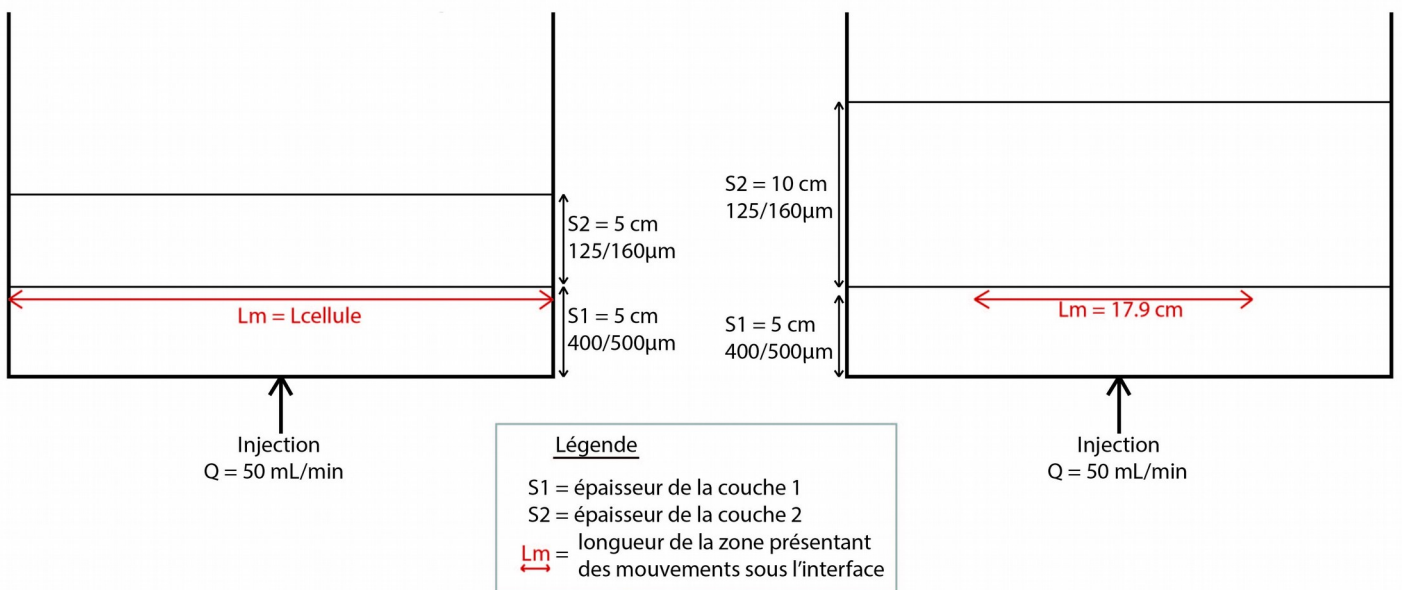


Figure 15 : schéma comparant la largeur L_m par rapport à hauteur S_2 des expériences 17 et 20

Influence de la hauteur S2 sur les largeurs Lm et Li

Dans les expériences 17 et 19 (cf figure 15), l'épaisseur de la couche 2 est respectivement égale à 5cm et 10cm (cf figure 12 : tableau récapitulatif). On remarque que quand la hauteur S2 augmente, la largeur Lm de la zone sous l'interface présentant des mouvements diminue.

En comparant les deux expériences, on remarque aussi que la largeur Li passe de 6,3cm pour S2=5cm à 5,2cm pour S2=10cm.

Influence de la granulométrie sur Li et Lm

De l'expérience 19 à 23, la granulométrie de la couche 2 passe respectivement 125/160 et 80/125. En observant le graphe de la figure 13, on remarque qu'en diminuant la granulométrie de la couche 2, les largeurs Li et Lm augmente.

En comparant les expériences 24 et 25, on remarque que seul Li augmente quand la granulométrie de la couche 1 passe de 400/500µm à 500/600µm. Cependant dans les deux cas, la largeur Lm a atteint la largeur totale de la cellule. On ne peut donc pas les comparer sur ce point. (cf figure 12)

Pour compiler ces résultats en une figure, nous calculons le rapport **S1/Li** de toutes les expériences bicouches ainsi que le rapport **S2/Lm**. Le rapport entre deux longueurs, donc deux valeurs de mêmes unités, permet de s'affranchir de leur dimension. Ici cela nous permet aussi de synthétiser les 2 rapports sur un même graphique de dispersion où les rapports S2/Lm sont en abscisse et les rapports S1/Li en ordonnée.

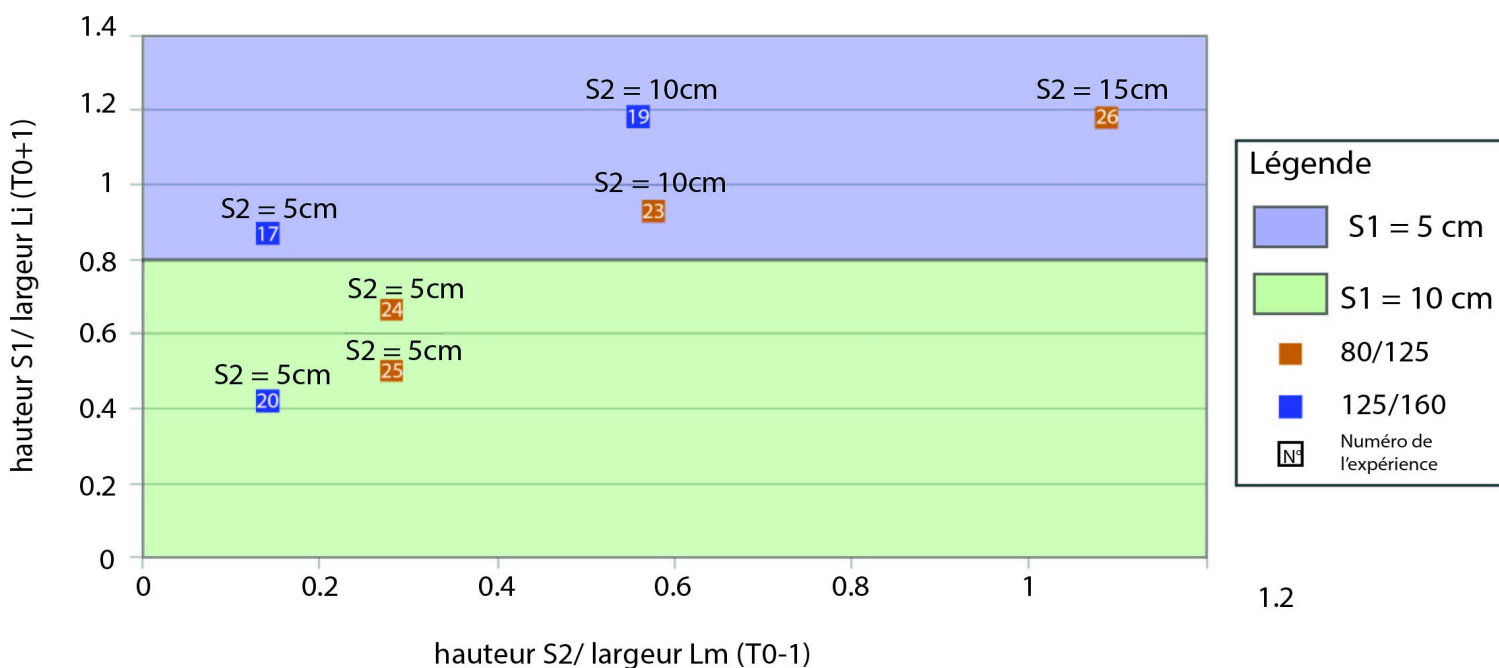


Figure 13: Graphe synthétique de l'influence de la hauteur S1 sur la largeur d'initiation de l'invasion Li et de la hauteur S2 sur la largeur Lm ; les expériences présentes sur le graphique ont un débit Q= 50mL/min

Le graphique de la figure 13 présente l'ensemble des analyses précédentes. Elles ont montré que :

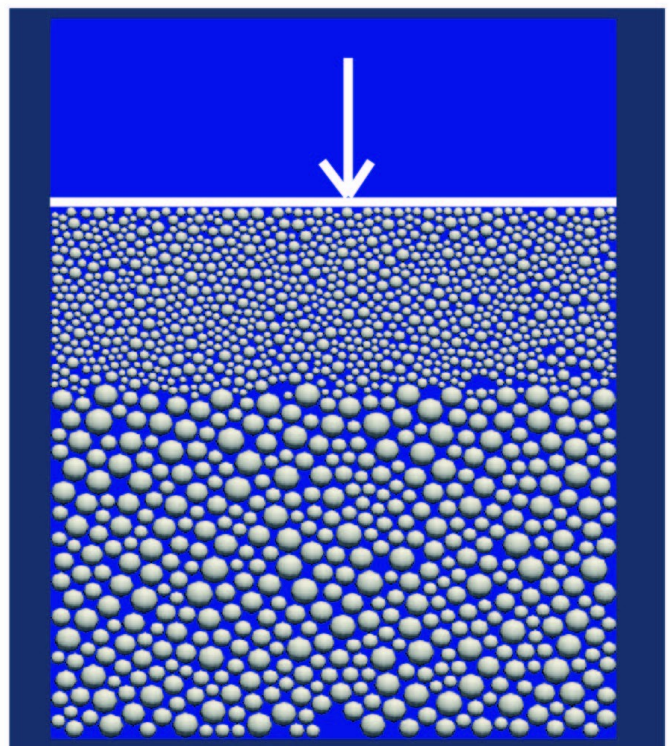
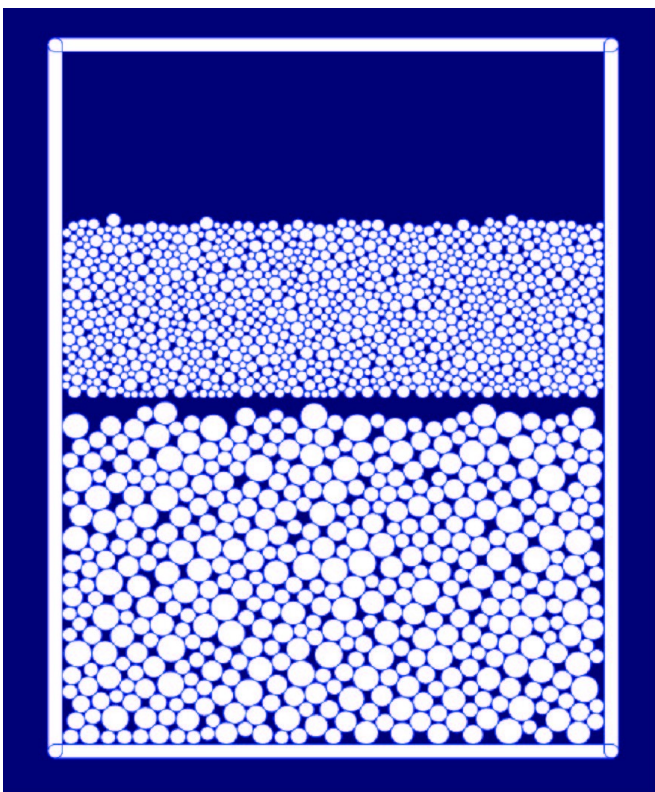
- Quand la hauteur **S2 augmente**, la largeur de la zone qui présente des mouvements de faibles amplitudes **Lm diminue**.
- Quand la hauteur **S2 augmente**, la largeur de l'invasion **Li diminue**.
- Quand la hauteur **S1 augmente**, la largeur de l'invasion **Li augmente**
- Quand la **granulométrie de la couche 2 diminue**, les largeurs **Li et Lm augmente**.
- Quand la **granulométrie de la couche 1 augmente**, la **largeur Li augmente**.

Tous ces résultats seront discutés dans la partie 5/ interprétation et discussion.

4.2/ Simulations numériques

Le code initial créé par Mr CONSTANT a été celui utilisé par Manon POCHET pour ses modélisations lors du stage de 2018. Il génère une distribution uniforme de grains à partir d'un rayon maximum et minimum dans une zone délimitée par des parois. Viens ensuite l'injection du fluide. Dans cette simulation, la couche de grains avait une surface libre. Elle ne présentait pas de pression de confinement si ce n'est celle de sa hauteur.

Dans notre cas, on commence par générer aléatoirement une première couche puis une deuxième dans deux « boîtes » l'une sur l'autre. Ensuite, on supprime la paroi séparant les deux couches. Pour finir, on applique une force sur la paroi supérieure qui vient tasser les grains. Il est important de noter que, contrairement aux grains, le fluide n'est pas retenu par la paroi supérieure contrairement aux parois latérales. De ce fait, la force de la paroi supérieure ne s'oppose qu'à la force des grains entraînés par le fluide. (cf figure 13)



Visualisation par le logiciel ToolKit avant le tassement

Visualisation par le logiciel Paraview après le tassement

Figure 16: Visualisation de l'état du milieu granulaire modélisé avant et après le tassement. ; La différence de style dans la représentation des grains est due à la différence de logiciel de visualisation. ; La première image est générée par le premier code qui utilise Toolkit. Il s'agit d'une image de contrôle qui présente les échantillons produits avant d'être transformés dans le code suivant. ; La flèche blanche et la paroi blanche de la deuxième image sont ajoutées a posteriori. Elle ne sont pas visible sur Paraview. ; La deuxième image est obtenu par Paraview après avoir fait tourner le dernier script qui fait l'injection dans le milieu granulaire. Le code donnant l'image de gauche en annexe

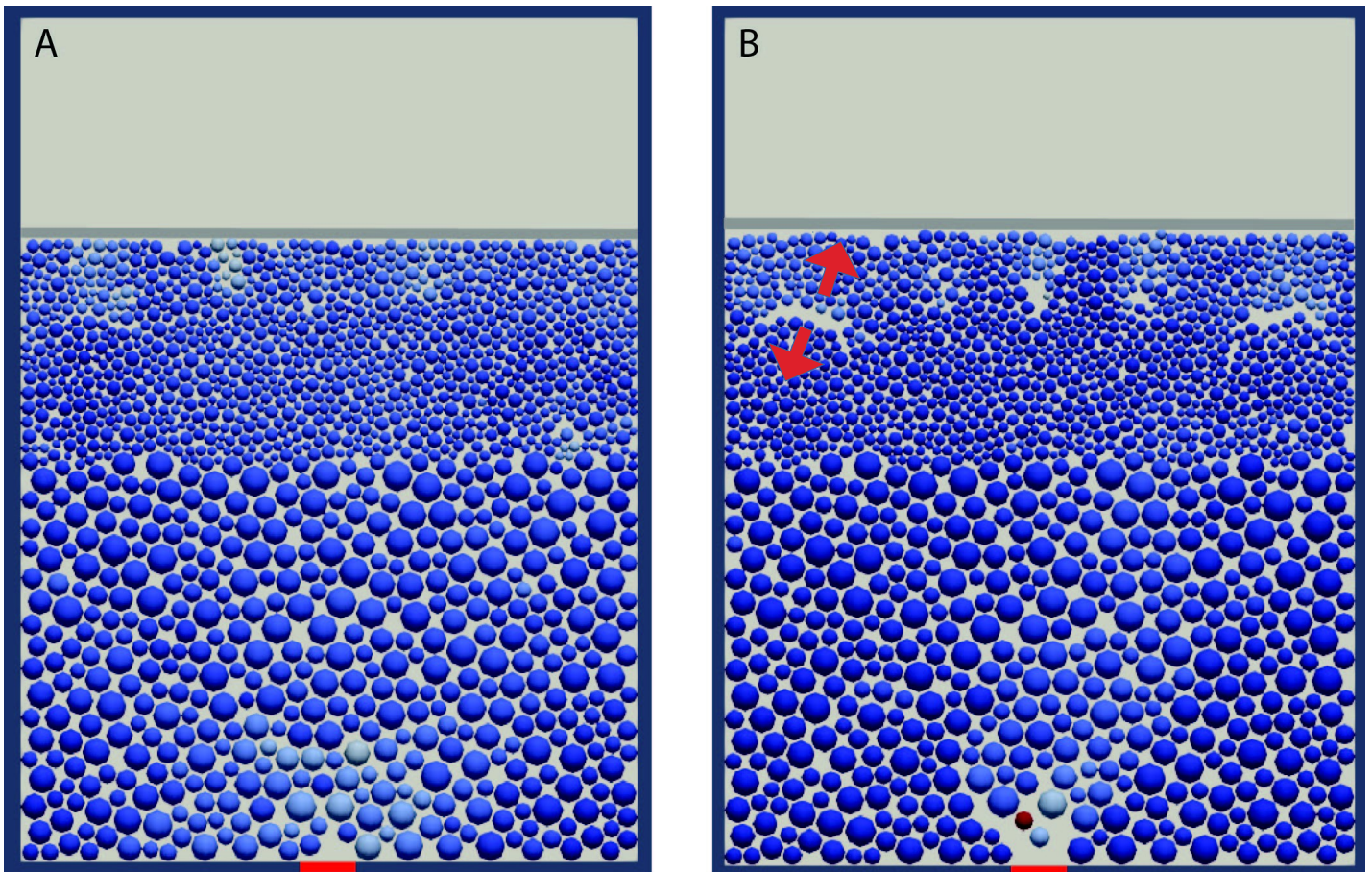


Figure 15 : visualisation Paraview d'un résultat numérique ; A : T0 injection / B : après 4 secondes d'injection ; Trait rouge = taille de l'injection ; flèches rouges : elles indiquent le sens d'ouverture de la fracture en tension

NOMBRE DE GRAINS par couche	1000
Masse volumique du fluide (kg/m ³)	1026
Masse volumique des grains (kg/m ³)	1500
Viscosité cinématique du fluide (m ² /s)	1,00E-06
Vitesse d'injection (m/s)	8
Ouverture d'injection (m)	1
Coefficient de friction	0,3
rayons max (couche 1)	2
rayons min (couche 1)	1
rayons max (couche 2)	1
rayons min (couche 2)	0,5
Sigma (N/m)	1000

Figure 16 : tableau des paramètres de la simulation numérique présenté en figure 15

Les codes développés dans ce stage grâce à l'aide de Remy MOZUL et Emilien AZEMA (Ingénieurs au Laboratoire de Mécanique et de Génie Civile) sont perpétuellement en cours de développement. Chaque modèle créé comme celui-ci apporte son lot de problème à résoudre et permet d'améliorer les fonctions de LMGC90, Scontact et MigFlow.

Les dimensions et les paramètres fixés pour la simulation effectuée sont présentés dans le tableau suivant.

Dans l'image B de la figure 15, on voit que le milieu granulaire de la couche 1 n'a été perturbé qu'à proximité de l'injecteur.

Aussi, on observe des cavités formées dans la couche 2. Ces cavités sont des fractures discrètes du milieu granulaire. Les deux fractures, respectivement proche de la paroi gauche et droite, sont des fractures en tension (mode 1). Les 3 cavités centrales se sont initiées par des fractures en tension, mais elles présentent ensuite du cisaillement en grandissant.

On remarque que aucuns mouvements sous l'interface pouvant être associé à la largeur L_m (Cf 4/1.résultats analogiques) ne s'est produit. Également, aucun front de perturbation n'est observé dans la couche 2 pouvant être apparenté à la largeur L_i (Cf 4/1.résultats analogiques).

Le modèle bicouche créé ici est inédit en l'état de l'art des simulations numériques modélisant l'injection d'un fluide dans un milieu granulaire. Les limites de ce modèle seront présentées dans la partie 5.3/ Interprétation et Discussion des résultats numériques.

5. Interprétation et discussion

5.1/ Interprétation des résultats analogiques

Dans la couche 2, nous interprétons la zone présentant un front de changement de luminosité comme une zone où le milieu granulaire est décompacté de manière plus ou moins diffuse (cf figure 8).

Dans la couche 1, nous interprétons les faibles mouvements de grains sous l'interface comme un réarrangement du milieu granulaire due à une pression de pore en excès. Cette surpression de pore est due au fait que le flux rentrant dans la couche 1 est plus important que le flux sortant. Les forces qui résultent de cet excès de pression de pore s'opposent aux forces dues au confinement, certains grains du milieu se voient forcés de bouger pour faciliter la migration du fluide.

L'analyse des résultats montre que lorsque l'épaisseur de la zone source augmente, la taille de la zone envahie/perturbée de la colonne sédimentaire augmente aussi (cf figure 18). Cependant, le lien entre épaisseur de la zone source et zone envahi ne semble pas linéaire.

L'analyse des résultats montre aussi que lorsque le confinement augmente, la largeur de la zone présentant des mouvements sous l'interface diminue (cf figure 19). L'initiation de remontées de fluides se ferait donc par le biais de surpressions de pores au sein d'une zone d'un milieu poreux.

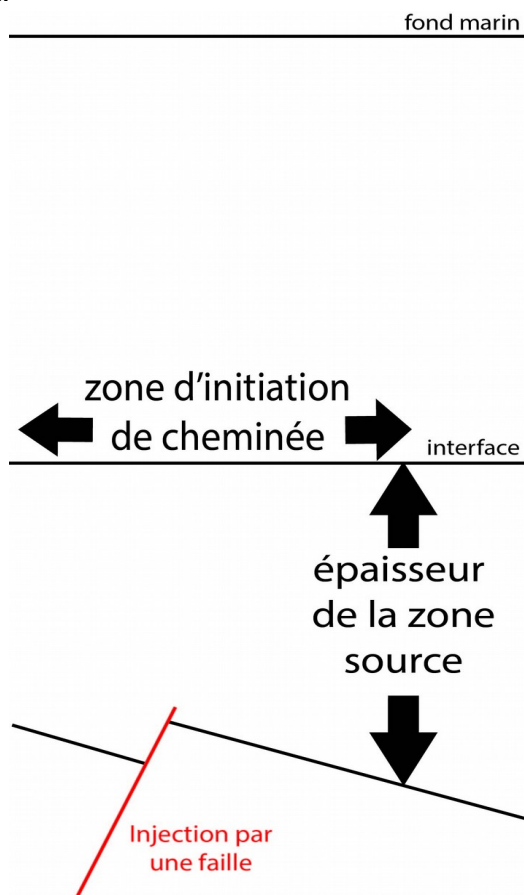


Figure 18 : schéma d'interprétation de l'effet de la variation de l'épaisseur de la zone source sur la taille de la zone d'initiation de remontée de fluides

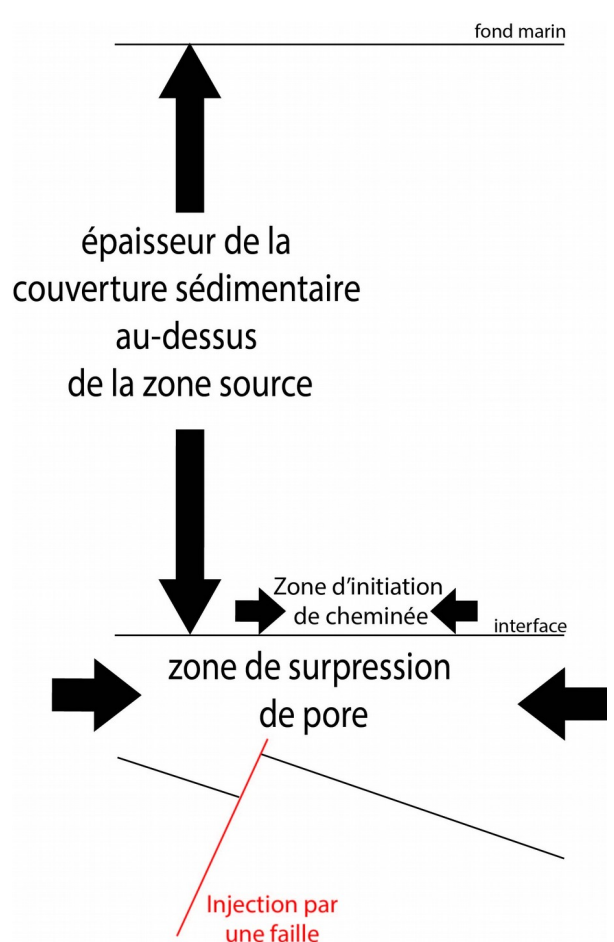


Figure 19 : schéma d'interprétation de l'effet de confinement lié à la hauteur de la colonne sédimentaires sur la taille de la zone de surpression de pore et celle de la zone d'initiation de remontée de fluides

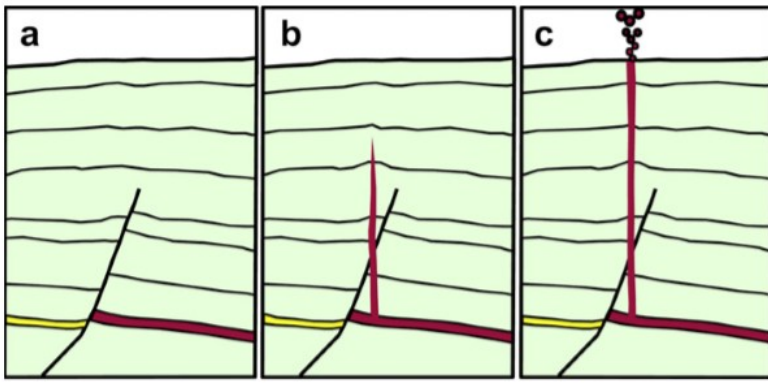


Figure 16 : issue modèle de formation de remontée de fluide suggéré par [Loseth et Al. \(2011\)](#) ; a : la pression de pore du fluide augmente dans le niveau représenté en rouge ; b : La pression du fluide dépasse la pression lithostatique. Des fracturations se propagent vers le haut pendant la surcharge. ; c : formation d'un conduit d'écoulement.

C'est aussi le modèle d'initiation de remontées de fluides suggéré par [Loseth et al. \(2011\)](#) d'après l'interprétation d'affleurements et de profils sismiques (cf figure 16).

A. Gay et al. / Marine Geology 332–334 (2012) 75–88

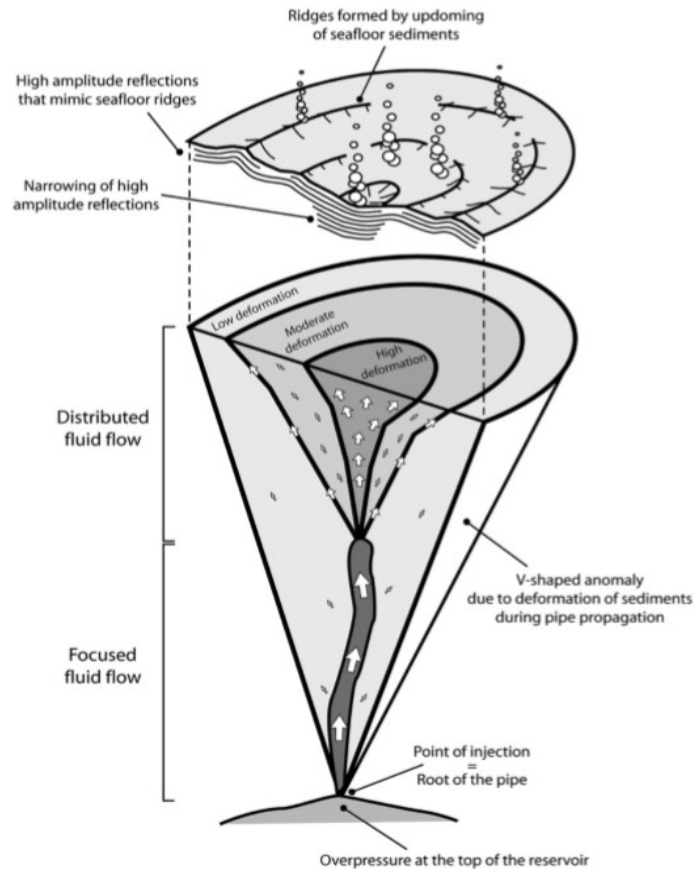


Figure 17 : modèle d'initiation et de progression de pipe ([Gay et al. 2012](#)) ; ce modèle présente une structure en deux parties : une partie

D'après nos résultats, le confinement aurait pour rôle de focaliser la migration. Ces migrations focalisées de fluide sont décrites par [Gay et al. 2012](#) (cf figure 17) d'après l'analyse de profils sismiques d'une structure de remontées de fluides en mer de Norvège et des expériences analogiques modélisant une injection de gaz dans un milieu granulaire. Ces dernières ont montré des structures en deux parties : une zone de flux focalisés surmonté d'une zone où le flux est distribué. Les travaux fait par [Mourgues et al. 2011](#) montre des structures similaires pour des injections d'aire dans un milieu granulaire.

Les structures de remontée de fluide peuvent avoir des différences morphologiques importantes. Ces différences peuvent être liées aux différentes natures de fluides que les structures transportent. Le schéma suivant compare la morphologie des cheminées de gaz à celles formés par des hydrates de méthanes. (cf figure 18)

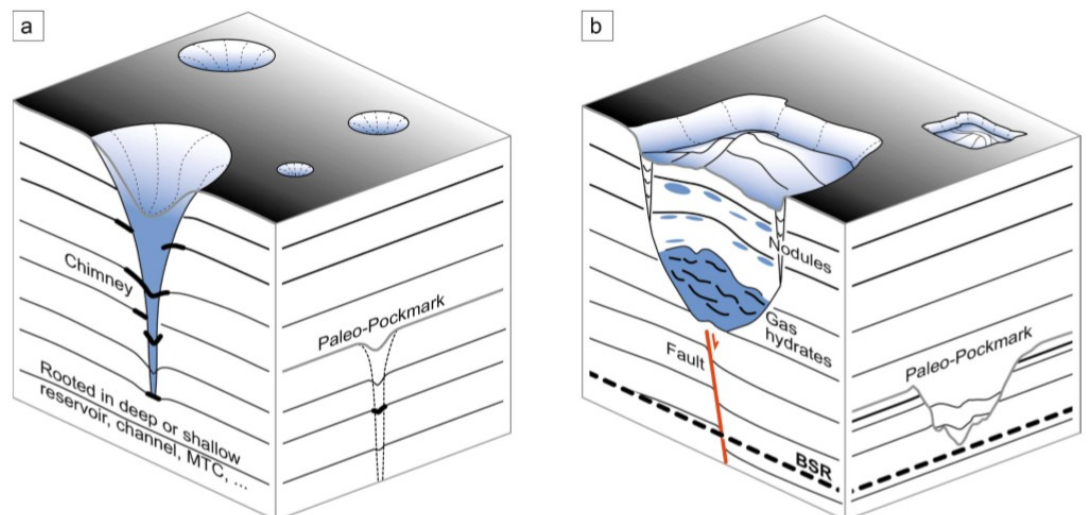


Figure 18 : extrait de [Riboulot et al. \(2015\)](#) ; caractéristique géométrique de 2 types de pockmarks ; a : dépression circulaire associé à une cheminée de remontée de gaz. ; b : pockmark formant une dépression irrégulière associée à la présence d'hydrate de carbone.

Les différences de morphologies peuvent aussi être liées aux propriétés des milieux traversés comme la rhéologie ou la géométrie du milieu (cf figure 19). Sachant qu'il existe plusieurs types de remontées de fluide donnant différentes morphologies, il semble évident que différents types d'initiation existe. Aussi, beaucoup de cheminées sont initiées par des failles en profondeurs (cf figure 20) or nous ne modélisons aucune faille à l'interface de notre modèle.

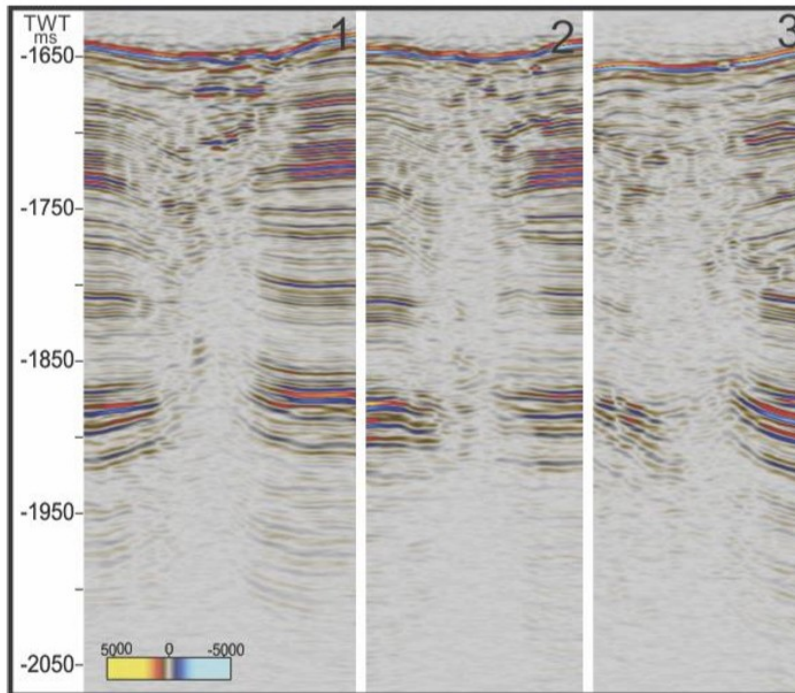


Figure 19 : extrait de la thèse de **Roberts Virs**, *A comparative seismic study of gas chimney structures from active and dormant seepage sites offshore mid-Norway and west-Svalbard* ; cheminées de remontées de gaz dans la zone de Neygga (mer de Norvège) ; on remarque la variabilité des morphologies pour des cheminées d'une même zone transportant le même fluide.

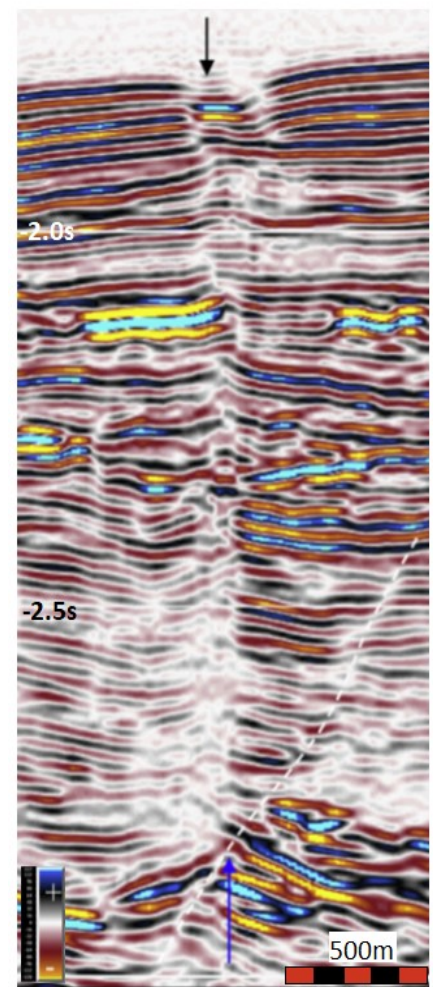


Figure 20 : extrait de **Loseth et Al. (2011)** ; profil sismique d'une structure de remontée de fluide au large du delta du Niger ; flèche noire : pockmark ; flèche bleu : la zone source de l'injection est réservoir source (en couleur vive) coupé par une faille (pointillés blanc)

A *contrario*, nos résultats montrent que l'augmentation de la différence de granulométrie entre le milieu source et le niveau formant son toit fait s'agrandir la zone en surpression de pore. Les grains utilisés pour les expériences sont des billes de verres sphériques qui forme un milieu poreux. Un milieu poreux peut avoir ses pores plus ou moins connectés, ce qui va lui conférer une certaine perméabilité. **Guillaume MALVAULT** (thèse 2013) présente différents type de pores dans le schéma suivant :

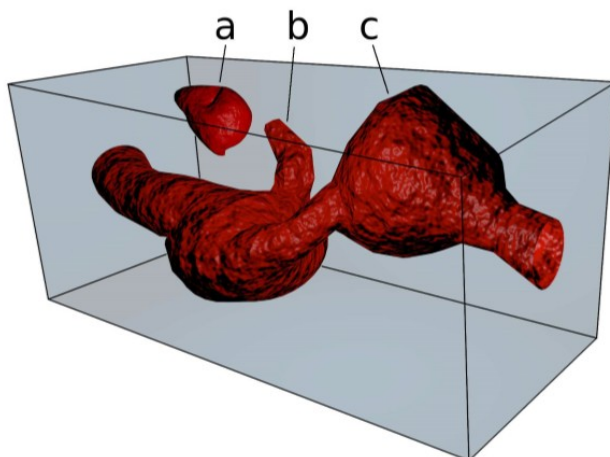


FIGURE 1.1 – Différents types de pores : a-pore isolé, b-bras mort, c-pore percolant

La perméabilité d'un milieu dépendant de sa proportion de pores percolants, il serait nécessaire de mesurer la perméabilité des couches pour mettre en évidence l'influence de la porosité et de la perméabilité des couches.

Figure 20 : Schéma extrait de la thèse de **Guillaume MALVAULT** sur la *Détermination expérimentale de la distribution de taille de pores d'un milieu poreux par l'injection d'un fluide à seuil ou analyse harmonique*

Beaucoup d'études portant sur l'invasion d'un milieu par un fluide ont été produites. Cependant, ces études sont pour beaucoup effectuées avec des milieux poreux rigides qui ne sont donc pas des milieux granulaires. C'est le cas de l'équipe Transfère en Milieu Poreux du laboratoire Géosciences Montpellier qui travaille sur l'invasion d'une matrice rigide par un fluide pour par exemple voir la cimentation d'un tel milieu. Dans cette étude, nous étudions au contraire un milieu granulaire déformable. La porosité du milieu peut alors changer au cours de la manipulation.

5.2/ Discussion des résultats analogiques

une approche qualitative

Il est important de rappeler que le but de ces expériences analogiques n'était pas de modéliser une structure de remontée de fluide dans son ensemble mais de modéliser le phénomène d'initiation au plus près de l'interface sédimentaire source. Ici, la mise à l'échelle des paramètres à fixer comme le débit et le confinement n'est pas respectée. Les structures de remontées de fluides peuvent avoir leur source de plusieurs dizaines de mètres à plusieurs kilomètres de profondeur avec des débits pouvant aller du cm^3/min jusqu'à plusieurs dm^3/min . Tandis que dans nos expériences, la zone source est entre 5 et 10cm de la surface avec un débit de 5 à 10 cm^3/min . Il fut techniquement impossible d'aller à des débits plus bas. La pompe utilisée donnait une injection d'autant plus instable que le débit était bas. Les débits d'injections de nos expériences présentent des pulses observés lors du remplissage de la cellule en eau avant de la remplir en grains. Le contrôleur de débit n'indiquait pas ces pulses dans le débit. Les résultats de ces simulations ne peuvent donc être discutés que d'un point de vue qualitatif.

De plus, la cohésion de notre milieu granulaire est nulle contrairement à celle des sédiments des bassins présentant des pockmarks. Il nous manque alors de connaître l'influence de ce paramètre.

Précision des mesures des résultats

La largeur L_i mesurée sur les images brutes est relativement diffuse. Il se peut que les paramètres de la caméra jouent un rôle dans la taille de L_i . En effet, l'ouverture diaphragme de l'objectif peut jouer sur l'intensité du contraste lumineux permettant de délimiter le front de décompaction et donc la largeur L_i .

La largeur L_m est aussi relativement diffuse. Cependant, L_m est mesurée sur des images traitées pouvant présenter du bruit de signal. De plus, la suppression de pores sous l'interface est un phénomène très rapide et la vitesse d'acquisition d'image n'a peut-être pas permis de capter la largeur L_m maximum au paroxysme de la suppression de pores.

Aussi, Il semble nécessaire de multiplier le nombre d'expérience pour obtenir plus de résultats afin de mieux définir les relations $S1/L_i$ et $S2/L_m$.

Distribution granulométrique

La distribution granulométrique des échantillons utilisés va influencer la porosité et la perméabilité d'un milieu poreux formé par un milieu granulaire. Pour comparer la

Granulométrie	mode (μm)	moyenne (μm)	médiane (μm)
500-600 μm	525	458	458
400-500 μm	470	411	434
200-250 μm	220	172	185
125-160 μm	111	103	109
80-125 μm	105	95	99

Figure 21 : tableau des modes, moyennes et médianes des distributions granulométriques des grains utilisés lors des expériences.

granulométrie de 2 couches, la taille de grains la plus représentée (le mode) est utilisée.

Cependant, le mode représente mal l'ensemble d'une distribution qui peut être asymétrique. C'est le cas de l'ensemble de nos distributions. Elles sont dans l'ensemble plus étalées vers les petites granulométries (cf figure 22). Cette asymétrie vient du fait que les échantillons de grains utilisés pour les expériences sont tamisés et les grains de petites tailles ont tendance à s'agglomérer et a fortiori, ne pas passer dans les trous des tamis. Une solution serait de tamiser en immersion pour rendre aux grains une cohésion nulle.

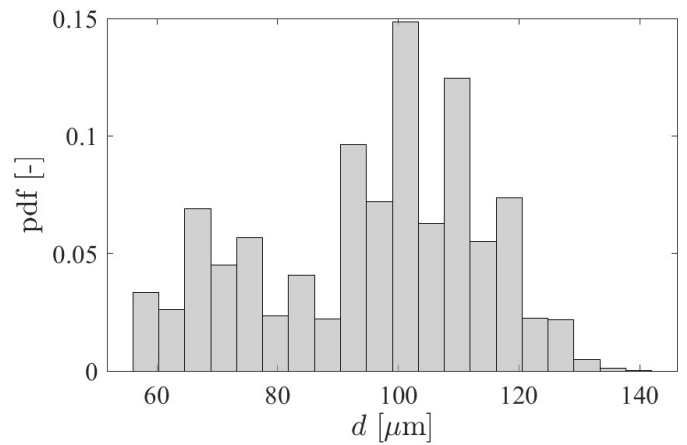


Figure 22 : Distribution granulométrique de l'échantillon 80/125µm

Le régime de cavité « stable »

La cavité fluidisée formée au-dessus de l'injecteur a une influence non négligeable sur le milieu granulaire environnant. Ce dernier présente une zone au-delà de la cavité fluidisée où il est décompacté. Cette zone de forme elliptique est visible au-dessus de l'injecteur dès que la cavité fluidisée apparaît (cf figure 23).

Dimensions de la cellule

La largeur de la cellule utilisée limite la largeur de la zone présentant des suppressions de pores. C'est le cas pour 6 expériences sur 9.

De plus, nous ne connaissons pas l'effet du faible espace de 3mm entre les deux plaques de verre sur le comportement du milieu granulaire. Une solution serait de redimensionner la cellule de Hele-Shaw utilisée.

Résolution de l'image

La caméra cadrée sur la cellule de Hele-Shaw offre une taille de pixel à 175µm. Cela pose des limites à l'analyse des mouvements de grains. Le problème se pose surtout pour la granulométrie de la couche 2, car les grains sont en majorité plus petits que les pixels.

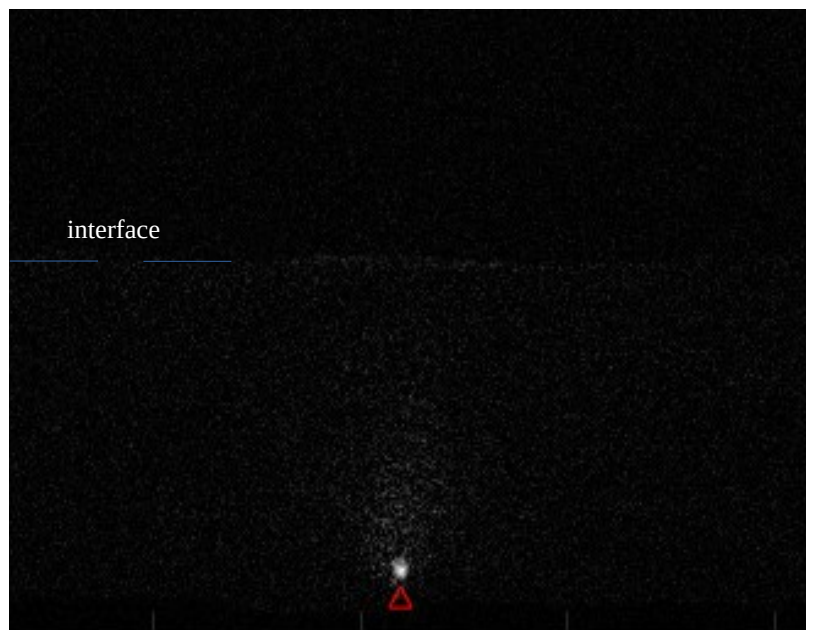


Figure 23 : image (issue de soustraction d'image successive) présentant la zone d'influence de la cavité. Issue de l'expérience 19 (S1=5cm ; S2=10cm)

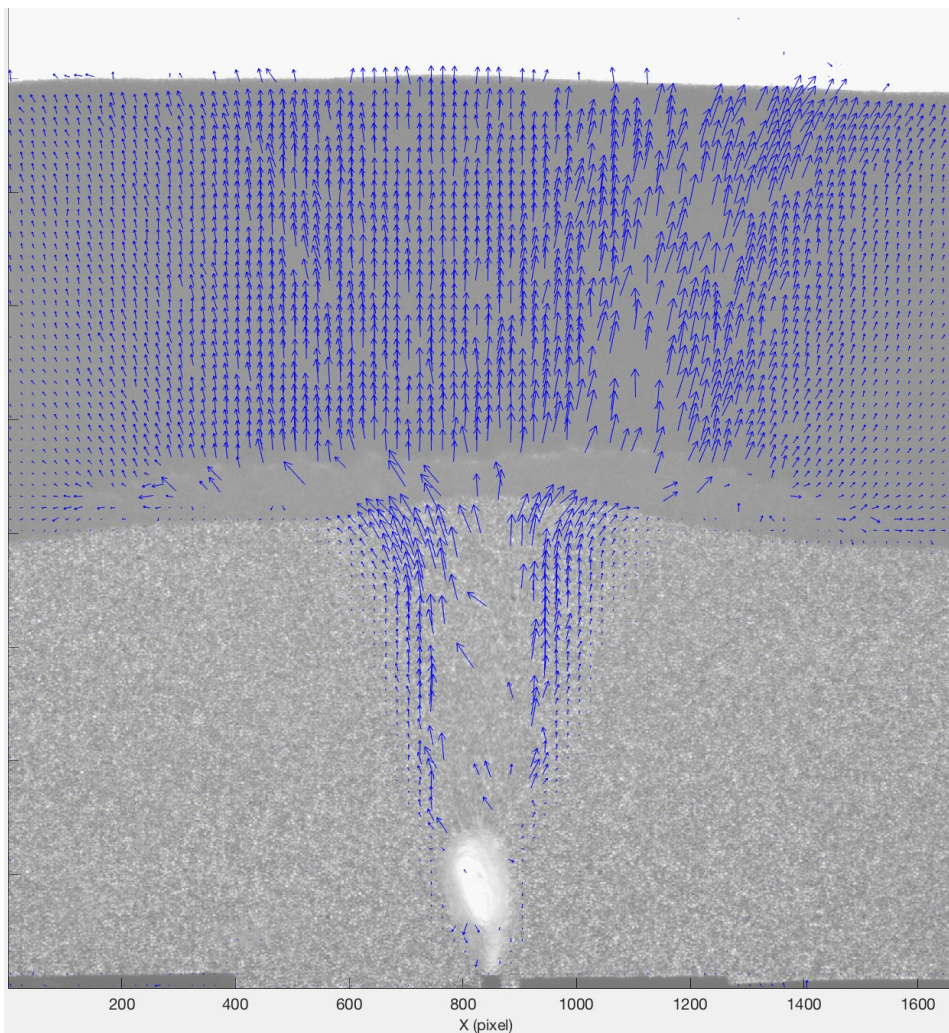


Figure 24 : image brute (issue d'une expérience test) analysé par PIV ; Les flèches bleues montrent les champs de vitesses de l'ensemble du milieu granulaire.

Analyse avec la méthode PIV

Au cours du stage, nous avons cherché à améliorer l'analyse des images obtenues au cours des expériences. L'analyse par PIV (Particle Image Velocimetry) consiste à mesurer les champs de vitesses de particules entre deux images successives. Cette approche a d'abord été proposée par Sylvain JOUBAUD (chercheur au laboratoire de physique de l'ENS de Lyon) qui a lui-même réalisé les analyses suivantes sur des images des premiers essais en bicouche.

La figure 19 est le résultat d'une analyse PIV qui met en évidence deux zones de cisaillements au-dessus de la cavité fluidisée. Il s'agit ici d'un stade avancé de l'invasion de la couche 2. Cette dernière remontant sous l'effet de l'invasion, la couche 1 au-dessus de l'injecteur voit sa pression de confinement diminuée. La cavité fluidisée remonte alors en poussant les grains formant deux zones de cisaillements conjuguées. Ce processus de fluidification est décrit dans la partie résultats analogiques (cf figure 9).

La qualité des réglages caméras n'ont ici pas permis de mettre en évidence les largeurs L_m . La zone d'initiation de la décompaction L_i est mal délimitée par les flèches représentant les champs de vitesses.

C'est avec Stéphane DOMINGUEZ (chercheur CNRS au laboratoire Géosciences Montpellier, équipe Aléa Tellurique) que nous avons poursuivi sur une même méthode PIV. Les résultats n'ont pas montré les mouvements du milieu granulaire que nous observons au moment de l'apparition de la surpression ou au moment de la formation du front de décompaction dans la couche 2. Les mouvements qui sont observés sont ceux associés à la remontée de la cavité fluidisée bien après l'initiation du front de décompaction. La qualité des images filmées ainsi que le nombre d'images par seconde devrait être adapté pour obtenir des résultats avec cette méthode.

Essai au Ucon

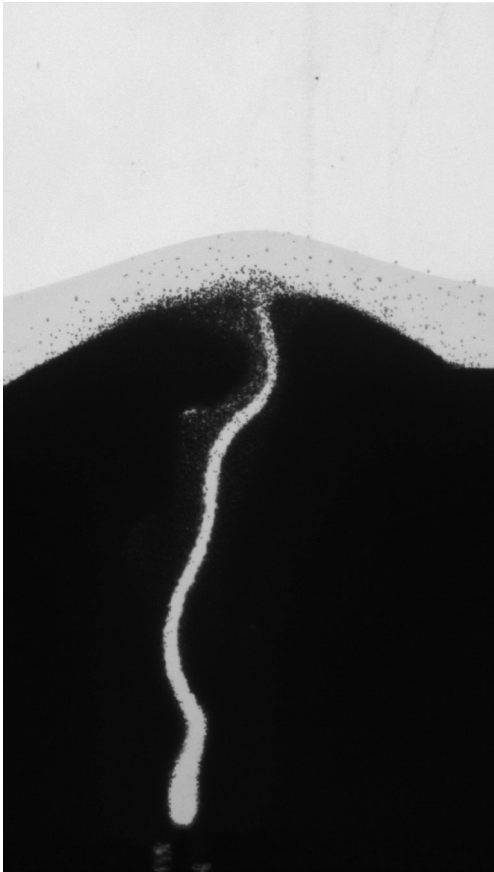


Figure 25 : Image brute d'un test d'injection au ucon ; la démarcation ucon/eau est visible proche de la surface ; expérience monocouche $S=5\text{cm}$; billes de céramique

Les billes de verres utilisées pour modéliser le milieu granulaire ne présente aucune cohésion dans le fluide d'immersion qu'est l'eau. De ce fait, la fluidification du milieu granulaire est beaucoup plus facile.

La figure suivante présente un test effectué lors de ma première semaine au laboratoire de l'ENS de Lyon. Dans ce cas, nous avons injecté, à l'aide d'une seringue, une solution aqueuse de *Ucon* dans le milieu granulaire immergé dans de l'eau. Cette solution a été proposée par Sylvain JOUBAUD (*ENS Lyon*). Le ucon est une huile faite à base de chaîne de polymère miscible à l'eau avec une viscosité très importante.

On remarque la formation d'un canal de remontée de fluide avec une zone fluidisée très petite. À mesure que le canal se formait, la solution aqueuse de ucon a envahi le milieu granulaire parce qu'elle est 200 fois plus visqueuse que l'eau. Nous pouvons observer la délimitation ucon/eau sur la figure ci-contre. La dilution du ucon dans l'eau est visiblement lente.

Cependant, dans ce cas le fluide entraîne des grains jusqu'à la surface. On observe donc une remontée de sédiments avec le fluide. Or les structures formant les pockmarks n'emportent pas ou très peu de sédiments jusqu'à la surface. De plus, l'injection s'est fait à la seringue donc le débit n'est pas constant.

Le ucon semble conférer au milieu granulaire qu'il immerge une certaine cohésion. Il serait intéressant de remplacer le fluide d'injection et d'immersion par une solution aqueuse de ucon dans le modèle bicouche développé après ces essais. Il faudrait pour cela une pompe capable d'injecter un fluide de cette viscosité ou un dispositif de seringue avec un pas de vis et un moteur permettant de la faire tourner à vitesse constante même pour des faibles vitesses.

5.3/ Interprétation et Discussion des résultats numériques

Contrairement à la modélisation analogique, la modélisation numérique n'a pas de facteur difficile à contrôler ni de facteur totalement incontrôlable comme la viscosité d'un fluide ou la pesanteur. C'est le cas dans ce modèle couplé fluide-grain. Ce dernier est dit multi-échelle en ce sens que l'on peut définir l'échelle spatiale et temporelle du modèle. Dans le modèle initiale l'échelle spatiale est métrique et l'échelle temporelle est en seconde.

Il est important de remarquer que dans cette simulation la dimension des grains est totalement disproportionnée par rapport à la viscosité cinématique du fluide ou encore aux masses volumiques du fluide et des grains.

La mise à l'échelle du modèle fut un échec parce que les paramètres des matériaux et de simulations (pas de temps, nombre d'itérations de calcul) choisis ont créé des configurations

incompatibles avec la méthode numérique utilisée, ce qui a posé problème pour la détection des contacts grains/grains et grains/parois. Il faut donc chercher un pas de temps adéquat ou changer les paramètres des matériaux pour que l'échantillon soit moins dynamique.

Aussi, une limite importante du modèle numérique développé est qu'il soit en 2D. Toute représentation bidimensionnelle d'un poreux est par nature biaisée car elle ne présente qu'une section des grains.

6. Perspectives et conclusion

L'objectif de ce stage était de mettre en évidence les paramètres qui influencent l'initiation de migration focalisée en une cheminée de remontées de fluides. L'étude, couplant modélisation numérique et analogique, à d'abord permis de développer un modèle d'injection basale en milieu granulaire bicouche immergé encore jamais étudié. Les modélisations analogiques ont permis de mettre en évidence que le confinement et l'épaisseur d'une zone source ont une influence sur la dimension de sa zone d'initiation de cheminée. Cependant, il reste beaucoup de points à améliorer pour mieux caractériser les influences des paramètres étudiés.

Pour améliorer le modèle analogique, il est nécessaire de redimensionner le modèle et ses paramètres pour se rapprocher des conditions réelles d'initiation de remontées de fluide. Pour cela, il serait intéressant de construire une cellule de Hele-Shaw plus grande pour pouvoir jouer sur le confinement ou encore pour que la largeur de la cellule ne limite plus la largeur de la zone en surpression sous l'interface. Aussi, il serait bénéfique d'opter pour une nouvelle pompe adaptée aux débits très faibles et aux fortes pressions de confinement. Pour se rapprocher des conditions réelles en créant de la cohésion entre les grains, il serait aussi intéressant de faire plus d'essais sur des solutions de différentes concentrations de l'huile miscible appelée Ucon. Il faudrait alors se rapprocher de la cohésion réelle des sédiments observés en carotte.

Pour améliorer l'analyse des résultats, il serait aussi bénéfique d'augmenter la résolution de l'image et d'augmenter le nombre d'images capturées par seconde. Grâce à cela il serait possible d'analyser les images brutes avec la méthode PIV. Cette dernière pourrait ouvrir l'opportunité d'analyser les mouvements dans le milieu granulaire à une plus petite échelle.

Pour aller plus loin dans l'analyse des paramètres influents, nous pourrions aussi mesurer la perméabilité des échantillons de grains utilisés et ainsi voir l'influence d'un différentiel de perméabilité d'un niveau sédimentaire à l'autre. Là encore, il faudrait faire tendre les perméabilités utilisées vers celles observées dans les bassins sédimentaires.

Nous pourrions aussi tenter de décliner le modèle créé pour toutes les morphologies et conditions particulières pouvant être observées dans la réalité. Par exemple, il serait intéressant de travailler sur une cellule avec une injection sur toute la base en plus de l'injecteur ponctuel comme dans l'étude de [Mourgues et al. 2011](#) pour montrer l'influence de la pression de pores dans la fracturation d'un milieu granulaire. Un autre exemple serait de former différentes morphologies d'interfaces.

Aussi, pour voir l'influence du chargement sédimentaire sur un milieu poreux captif, nous avons commencé à développer avec *Stéphane DOMINGUEZ (chercheur CNRS)* un modèle sans

injection de fluide. Le but est alors de faire monter la pression de pores uniquement par l'augmentation de la charge sédimentaire.

Bien qu'il n'est pas montré des résultats concluants, le modèle numérique développé semble prometteur dans ses possibilités de développements. Pour se rapprocher des conditions réelles, il est d'abord nécessaire de mettre les dimensions des paramètres comme la taille des particules ou la pression de confinement à une échelle réelle. Dans le même soucis de se rapprocher d'observation réelle, il serait intéressant d'introduire la cohésion entre les grains dans les codes Scontact ou LMGC90.

7. Bibliographie

-

- M. ALSAYDALANI and C. CLAYTON, « Internal fluidization in granular soils », American Society of Civil Engineers, vol. 140, no. 0413024, 2013.
- B. ANDREOTTI, Y. FORTERRE and O. POULIQUEN, « Les milieux granulaires: entre fluide et solide », EDP Sciences, « Savoirs Actuels », 512 p., 2011
- Anka, Z., Berndt, C., Gay, A. (2012). Hydrocarbon leakage through focused fluid flow systems in continental margins. *Marine Geology*, v. 332-334, p. 1-3.
- M. CONSTANT, F. DUBOIS, J. LAMBRECHTS and V. LEGAT, « Implementation of an unresolved stabilised FEM-DEM model to solve immersed granular flows »
- X. CUI, H. LI, A. CHAN, and D. CHAPMAN, « A 2d dem-lbm study on soil behaviour due to locally injected fluid », *Particuology*, vol. 10, pp. 242–252, 2012.
- Dupré, S., Scalabrin, C., Grall, C., Augustin, J.M., Henry, P., Şengör, A.M., Görür, N., Çağatay, M.N., Géli, L., 2015. Tectonic and sedimentary controls on widespread gas emissions in the Sea of Marmara: Results from systematic, shipborne multibeam echo sounder water column imaging. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 120: 2891-2912.
- F. GALLO and A. WOODS, « On steady homogeneous sand-water flows in vertical conduit », *Sedimentology*, vol. 51, no. 1111, pp. 195–210, 2004.
- A. GAY, M. LOPEZ, C. BERNDT and M. SERANNE, « Geological controls on focused fluid flow associated with seafloor seeps in the Lower Congo Basin », *Marine Geology*, vol. 244, pp. 68–92, 2007.
- Gay, A., Mourgues, R., Berndt, C., Bureau, D., Planke, S., Laurent, D., Gautier, S., Lauer, C. and Loggia, D. (2012). Anatomy of a fluid pipe in the Norway Basin: initiation, propagation and 3D shape. *Marine Geology*.
- Ho, S., JA Cartwright, P Imbert (2012). Vertical evolution of fluid venting structures in relation to gas flux, in the Neogene-Quaternary of the Lower Congo Basin, Offshore Angola. *Marine Geology*, Vol. 332, P. 40-55
- Løseth, Helge et al. 2011. "1000 M Long Gas Blow-Out Pipes." *Marine and Petroleum Geology* 28(5): 1047–60.
- Monnier, D., Gay, A., Imbert, P., Soliva, R. and Lopez, M., 2015. Sand injectites network as a marker of the palaeostress field, the structural framework and the distance to the sand source: Example in the Vocontian Basin, SE France. *Journal of Structural Geology*.

- Monnier, D., Gay, A., Imbert, P. and Lopez, M., 2013. Sand injections vs. sedimentary processes: geophysical evidences along the margins of a turbidite channel system, a case study from the Lower Congo Basin. *Marine Geology*.
- Mourgues et al. (2011). "Basin scale" versus "localized" pore pressure/stress coupling e Implications for trap integrity evaluation. *Marine and Petroleum Geology* 28 1111-1121
- J. NGOMA, « Étude numérique et expérimentale de la déstabilisation des milieux granulaires immergés par fluidisation », *Mécanique des fluides [physics.class-ph]*, Aix Marseille Université, 2015. Français.
- P. PHILIPPE and M. BADIANE, « Localized fluidization in a granular medium », *Physical Review E*, vol. 87, no. 042206, 2013
- Räss, Ludovic, Nina S.C. Simon, and Yury Y. Podladchikov. 2018. "Spontaneous Formation of Fluid Escape Pipes from Subsurface Reservoirs." *Scientific Reports* 8(1): 1–11.
- O. ROCHE, T.H. DRUITT, R.A.F. CAS, « Experimental aqueous fluidization of ignimbrite », *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, vol.112, pp.267-280, 2001.
- Riboulot, V., N. Sultan, P. Imbert, and S. Ker. 2016. "Initiation of Gas-Hydrate Pockmark in Deep-Water Nigeria: Geo-Mechanical Analysis and Modelling." *Earth and Planetary Science Letters* 434: 252–63. <http://dx.doi.org/10.1016/j.epsl.2015.11.047>.
- Zoueshtiagh, F., and A. Merlen. 2007. "Effect of a Vertically Flowing Water Jet underneath a Granular Bed." *Physical Review E - Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics* 75(5): 1–12.

8. Annexes

8.1/ déroulement complet d'une simulation

Expérience 19

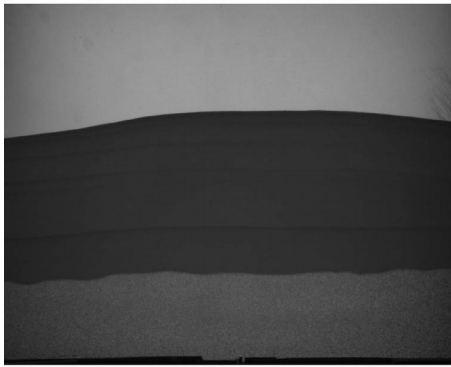


image 22

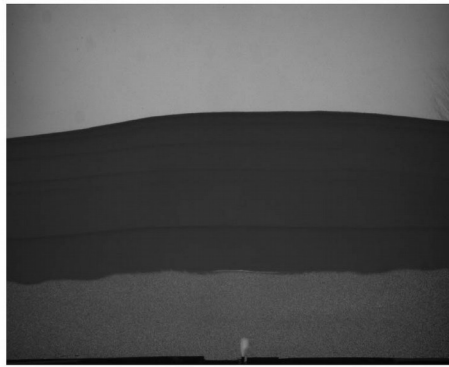


image 32

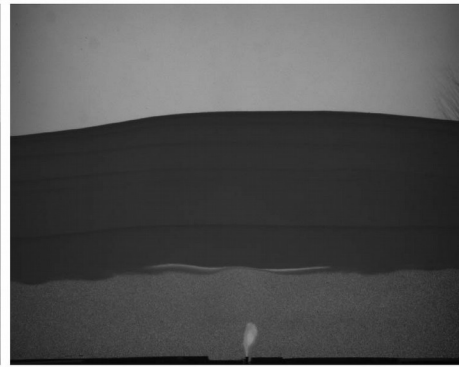


image 42

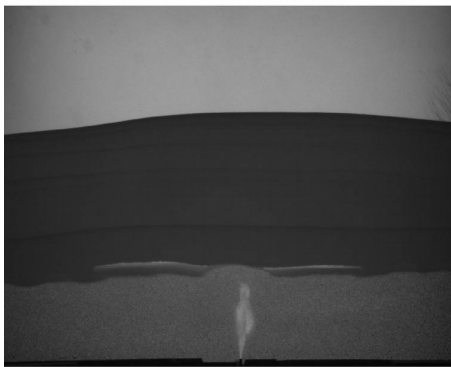


image 52

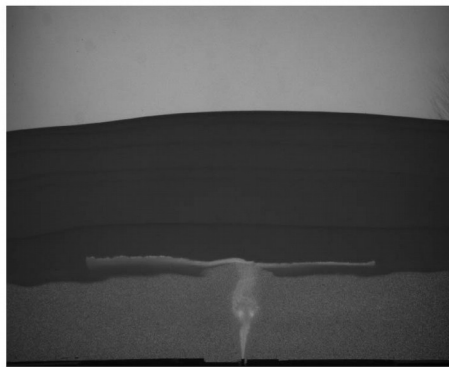


image 62

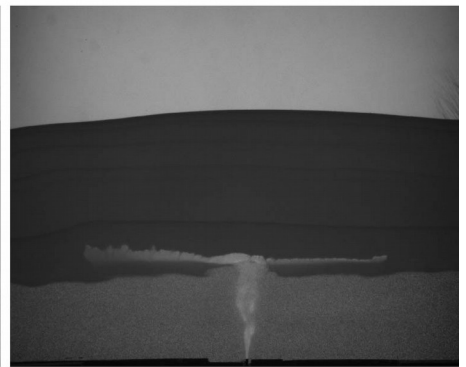


image 72

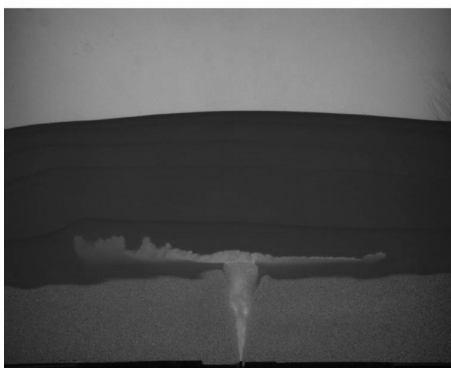


image 82

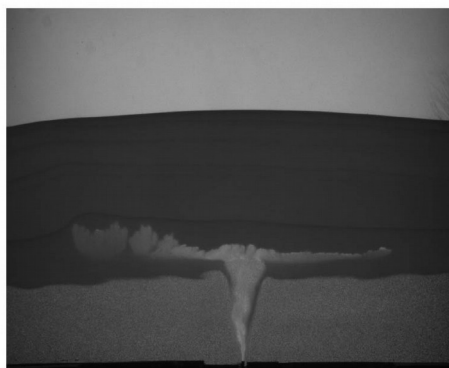


image 92

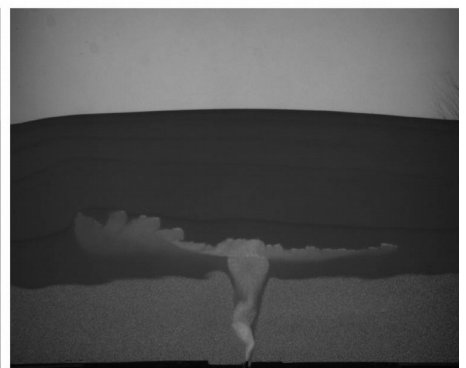


image 102

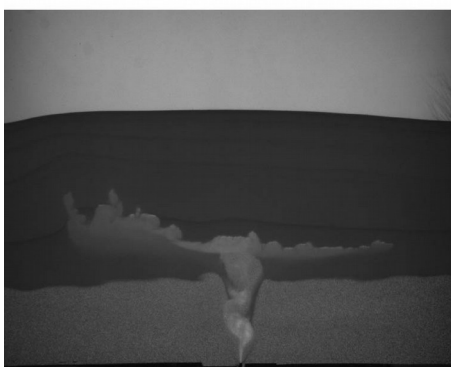


image 112



image 122

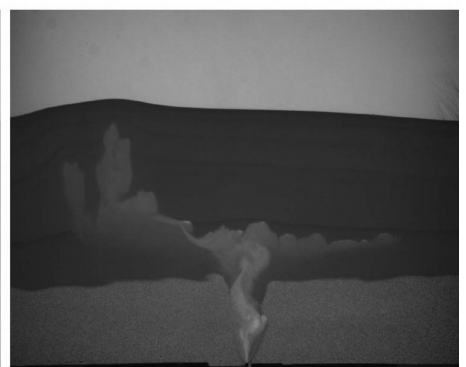


image 132

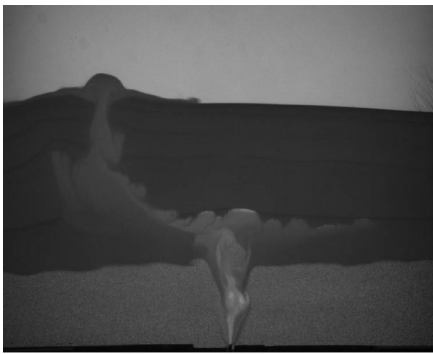


image 142

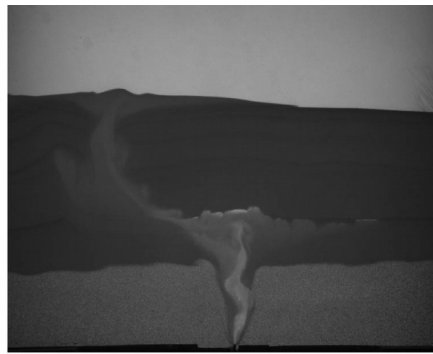


image 152

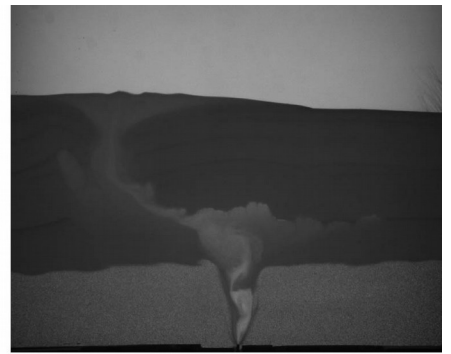


image 162

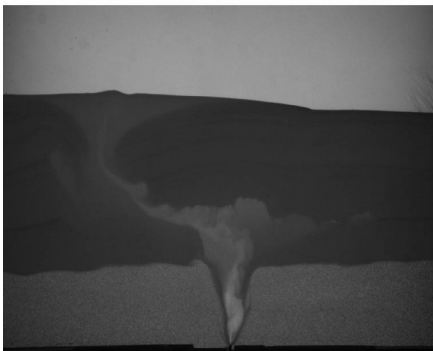


image 172

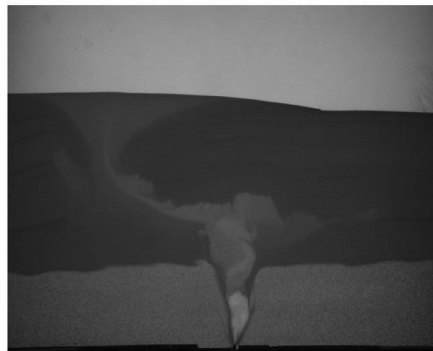


image 182



image 192

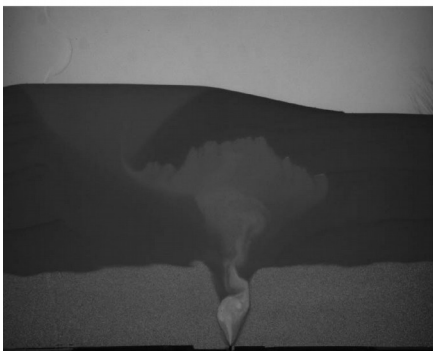


image 292

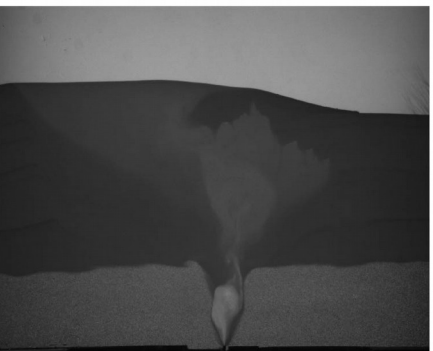


image 242

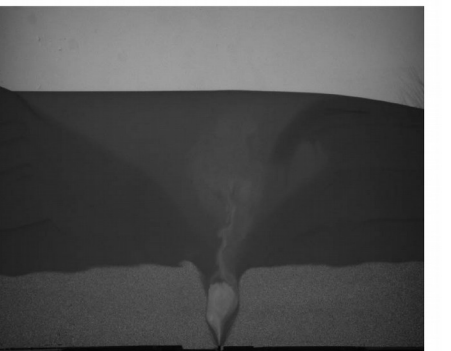


image 392

Ici, la cavité fluidisée a été dévié vers la gauche lors de sa remontée. Ce n'est que bien après que le système retrouve sa symétrie. Il s'agit d'un cas particulier.

8.2/ Code de génération d'échantillon granulaire

Le code suivant donne le résultat présenté sur l'image gauche de la figure

```
1 import os,sys
2
3 sys.path.append('/home/stagiaire/SOFTS/lmgc90_dev/build')
4
5
6
7 import numpy
8 import math
9
10 from pylmgc90.pre import *
11
12 if not os.path.isdir('./DATBOX'):
13     os.mkdir('./DATBOX')
14
15 # on se place en 2D
16 dim = 2
17
18 # creation des conteneurs
19 # * pour les corps
20 bodies = avatars()
21 mat = materials()
22 svcs = see_tables()
23 tacts = tact_behavs()
24
25 # creations de deux materiaux
26 tdur = material(name='TDURx',materialType='RIGID',density=1000.)
27 plex = material(name='PLEXx',materialType='RIGID',density=100.)
28 mat.addMaterial(tdur,plex)
29
30 # on cree un modele de rigide
31 mod = model(name='rigid', physics='MECAx', element='Rxx2D', dimension=dim)
32
33 # on genere 1000 particules
34 nb_particles=1000
35
36 radius_min=5e-4
37 radius_max=1e-3
38 radii=granulo_Uniform(nb_particles, radius_min, radius_max)
39
40 # distribtion dans [1., 2.]
41 radius_tres_min=1e-3
42 radius_tres_max=2e-3
43 radii2=granulo_Uniform(nb_particles, radius_tres_min, radius_tres_max)
44
45 # depot dans des boite rectangulaire
46 lx = 0.075
47 ly = 0.05
48 sigma = 1000
49
50 [nb_remaining_particles, coor] = depositInBox2D(radii, lx, ly)
51 [nb_remaining_particles2, coor2] = depositInBox2D(radii2, lx, ly)
52
53
54
55 # si toutes les particules deposees n'ont pas ete conservees
56 if (nb_remaining_particles2 < nb_particles):
57     # on affiche un avertissement
58     print("Warning: granulometry changed, since some particles were removed!")
59 # si toutes les particules deposees n'ont pas ete conservees
60 if (nb_remaining_particles < nb_particles):
61     # on affiche un avertissement
62     print("Warning: granulometry changed, since some particles were removed!")
63
64
65
66 # boucle d'ajout des disques :
67 for i in range(0,nb_remaining_particles2,1):
68     # creation un nouveau disque rigide, constitue du materiau plex
69     body=rigidDisk(r=radii2[i], center=coor2[2*i : 2*(i + 1)],
70                  model=mod, material=plex, color='BLEUX')
71     # ajout du disque dans le conteneur de corps
72     bodies += body
73
```

```

64
65
66 # boucle d'ajout des disques :
67 for i in range(0,nb_remaining_particles,1):
68     # creation un nouveau disque rigide, constitue du materiau plex
69     body=rigidDisk(r=radii2[i], center=coor2[2*i : 2*(i + 1)],
70                  model=mod, material=plex, color='BLEUX')
71     # ajout du disque dans le conteneur de corps
72     bodies += body
73
74 coor[1::2] += ly
75 for i in range(0,nb_remaining_particles,1):
76     # creation un nouveau disque rigide, constitue du materiau plex
77     body=rigidDisk(r=radii[i], center=coor[2*i : 2*(i + 1)],
78                  model=mod, material=plex, color='BLEUX')
79     # ajout du disque dans le conteneur de corps
80     bodies += body
81
82
83 # ajout d'une boite lisse, i.e. faite de joncs :
84 # on declare un corps par paroi
85
86 ly = 2*ly
87 down = rigidJonc(axel=0.5*lx+radius_max, axe2=radius_max, center=[0.5*lx, -radius_max],
88                  model=mod, material=tdur, color='WALLx')
89
90
91 up    = rigidJonc(axel=0.5*lx+radius_max, axe2=radius_max, center=[0.5*lx, ly+radius_max],
92                  model=mod, material=tdur, color='WALLx')
93
94
95 left = rigidJonc(axel=0.5*ly+radius_max, axe2=radius_max, center=[-radius_max, 0.5*ly],
96                  model=mod, material=tdur, color='WALLx')
97
98
99 right= rigidJonc(axel=0.5*ly+radius_max, axe2=radius_max, center=[lx+radius_max, 0.5*ly],
100                  model=mod, material=tdur, color='WALLx')
101

```