



UNIVERSITÉ
DE MONTPELLIER

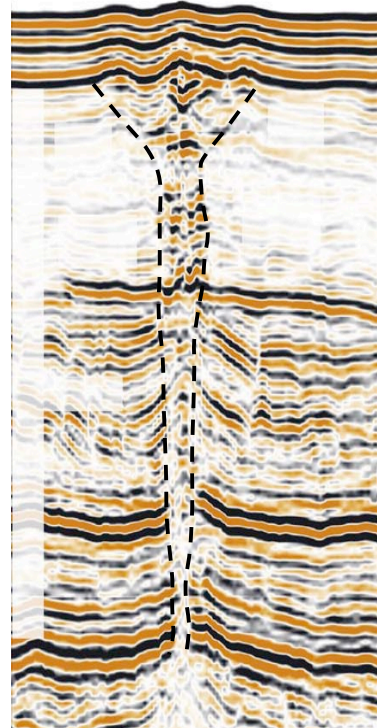
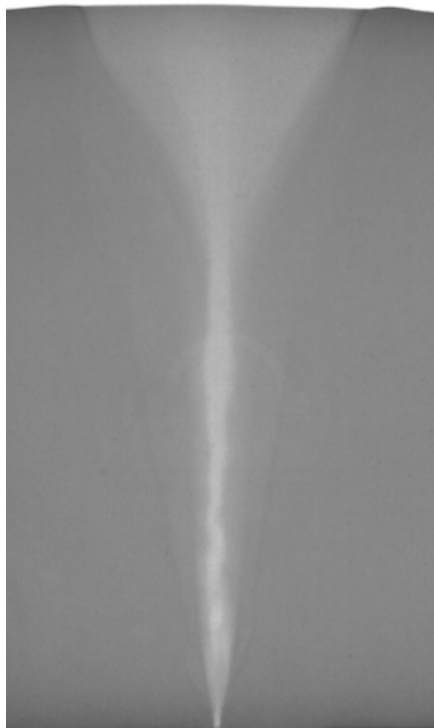
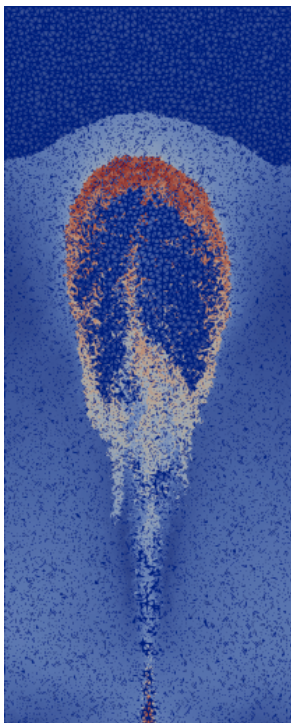
Université de Montpellier
Laboratoire Géosciences



Master Géosciences
Spécialité Dynamique Terrestre et Risques Naturels

Modélisation numérique et analogique des cheminées d'expulsion de fluides dans les bassins sédimentaires

Manon POCHET



Soutenu le 12 juin 2018

Sous l'encadrement de : Aurélien GAY (*Géosciences Montpellier*), Alfredo TABOADA (*Géosciences Montpellier*), Emilien AZEMA (*LMGC Montpellier*) et Valérie VIDAL (*Laboratoire de Physique - ENS Lyon*)

Modélisation numérique et analogique des cheminées d'expulsions de fluide dans les bassins sédimentaires¹

Manon POCHET²

RESUME

L'exploration systématique des marges continentales a mis en évidence, grâce à la sismique, la présence de nombreuses structures d'échappements de fluide sur le fond marin qui sont associées en profondeur à des cheminées de migration de fluides de formes variées. Les mécanismes physiques contrôlant le fonctionnement et l'évolution temporelle de ces structures sont très mal définis, principalement dû au risque important que représente un forage dans de telles structures avec des fluides sous pression. Pour essayer de comprendre ces mécanismes une approche couplée de simulations numériques et d'expériences analogiques est utilisée. Cette approche permet de modéliser l'injection ponctuelle d'un fluide à la base d'une couche granulaire immergée similaire aux colonnes sédimentaires des marges continentales dans lesquelles ces structures sont observées. Ces simulations mettent en évidence que la couche granulaire est caractérisée par différents régimes d'écoulement lorsqu'elle subit une injection ponctuelle de fluide à sa base. En particulier, dans certains cas la couche subit une fluidification, correspondant à la mise en mouvement des particules la constituant. L'étude de ces cas a permis de constater que les structures formées lors de la fluidification ont une évolution temporelle caractérisée par différentes morphologies qui correspondent à des structures d'échappement de fluides observées dans la nature. Les résultats suggèrent donc que certaines structures d'échappement imagées par la sismique correspondent à différents stades d'évolution, ce nous a permis de proposer un modèle conceptuel d'évolution des structures d'échappement de fluide.

Mots clefs : migration de fluide, structures d'échappement de fluide, simulations numériques, expériences analogiques, évolution temporelle.

¹ Master Géosciences, Spécialité Dynamique Terrestre et Risques Naturels, Université de Montpellier, Place E. Bataillon, 34095, Montpellier Cedex 5, France.

² Stage effectué au laboratoire Géosciences de Montpellier, dans l'équipe Bassins

TABLE DES MATIÈRES

1. INTRODUCTION ET PROBLEMATIQUE	3
1.1. LES STRUCTURES D'ÉCHAPPEMENT DE FLUIDES.....	3
1.1.1. <i>Morphologies</i>	3
1.1.1.1. En plan, sur le fond marin	3
1.1.1.2. En profondeur	4
1.1.2. <i>Problématique</i>	5
2. ETAT DE L'ART	5
2.1. LE MILIEU GRANULAIRE.....	5
2.2. SIMULATIONS NUMERIQUES	6
2.3. EXPERIENCES ANALOGIQUES.....	7
3. MATERIELS ET METHODES	8
3.1. SIMULATIONS NUMERIQUES	8
3.1.1. <i>Fonctionnement</i>	8
3.1.2. <i>Utilisation</i>	9
3.2. EXPERIENCES ANALOGIQUES.....	10
3.2.1. <i>Dispositif expérimental</i>	10
3.2.2. <i>Granulométrie</i>	11
3.2.3. <i>Traitement des photos : détection de la zone fluide</i>	12
4. RESULTATS	12
4.1. SIMULATIONS NUMERIQUES	12
4.1.1. <i>Etude paramétrique</i>	12
4.1.2. <i>Simulations des structures d'échappement de fluides</i>	17
4.2. EXPERIENCES ANALOGIQUES.....	19
5. DISCUSSION	22
5.1. DISCUSSION DES RESULTATS NUMERIQUES ET ANALOGIQUES.....	22
5.1.1. <i>Résultats numériques</i>	22
5.1.2. <i>Résultats analogiques</i>	23
5.1.3. <i>Conclusions</i>	24
5.2. INTERPRETATIONS DES STRUCTURES D'ÉCHAPPEMENT DE FLUIDES	25
6. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES	28
7. REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	29
8. REMERCIEMENTS	30
9. CALENDRIER DE REPARTITION DES TACHES	30
10. ANNEXES	31
10.1. SIMULATIONS NUMERIQUES.....	31
10.2. EXPERIENCES ANALOGIQUES	35
10.2.1. <i>Résultats</i>	36
10.2.2. <i>Analyse des résultats</i>	37

1. Introduction et problématique

1.1. Les structures d'échappement de fluides

Depuis les années 1960, les techniques géophysiques ont permis d'explorer les marges continentales dans de nombreux contextes géologiques et géodynamiques. D'abord grâce à la sismique 2D puis à la 3D, ces explorations ont mis en évidence des empilements verticaux d'anomalies de forte amplitude et des turbidités acoustiques qui indiquent la présence de fluides (liquide ou gaz) dans la colonne sédimentaire (Figure 1). Ces anomalies correspondent à des cheminées de migration de fluides, ou pipes, qui alimentent des réservoirs temporaires ou des structures d'échappement de fluides sur les fonds marins telles que les pockmarks (fluides) (Gay et al., 2006a, b, c, 2007, 2012, 2017 ; Ho et al., 2012), les volcans de boue (fluides et boues) (Løseth et al., 2009) ou les injectites (fluides et sables) (Rodrigues et al., 2009 ; Monnier et al., 2014 ; Monnier et al., 2015). Bien qu'il ait été établi que ces structures de migration sont des zones de haute perméabilité verticale (Cartwright et al., 2007), les mécanismes physiques à l'origine de leur formation et de leur évolution temporelle sont très mal définis, en particulier les phénomènes physiques à l'œuvre entre l'initiation de la migration et les structures formées par cette migration observées en sismique. Dans le cadre de ce stage, l'étude se limitera aux structures formées par les circulations de fluides seuls.

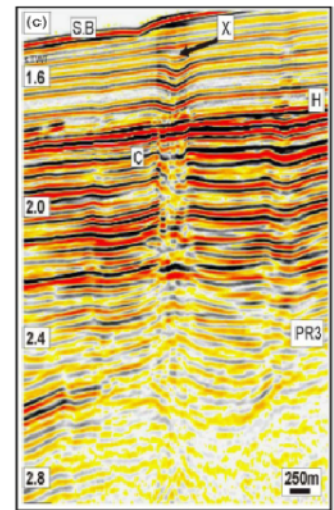


Figure 1 : Profil sismique issu de données de sismiques 3D (Ho et al., 2012), montrant un empilement vertical d'anomalies d'amplitudes, interprétées comme une cheminée de migration de fluides.

1.1.1. Morphologies

1.1.1.1. En plan, sur le fond marin

Les structures d'échappement s'expriment sur les fonds marins par la remobilisation des sédiments post-dépôt. Certaines de ses structures sont caractérisées par un relief positif (Figure 2) de forme circulaire ou allongée avec des tailles qui peuvent atteindre plusieurs kilomètres (Løseth et al., 2009). Elles peuvent également être de taille plus réduite, en forme de dôme large de 200 à 400 m d'une hauteur de 30 m (Gay et al., 2007). Elles se retrouvent dans des sédiments fins comme les argiles ou les carbonates.

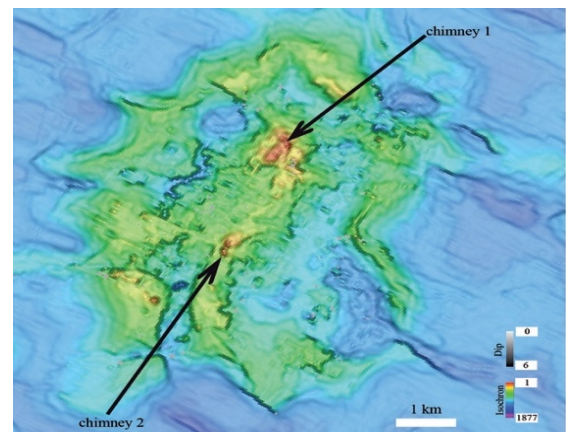


Figure 2 : Dôme de 5km de diamètre en mer de Norvège, correspondant à une structure géante d'échappement de fluides (Gay et al., 2012).

Mais certaines structures d'expulsion s'expriment sur le fond marin par un relief négatif en forme de cratère, appelé pockmarks (Figure 3). Ils ont une forme circulaire, elliptique ou composite avec des diamètres allant de quelques dizaines de mètres à 700 m et des profondeurs de plusieurs dizaines de mètres. Les plus petits sont en forme de v, sur les sections sismiques, et les plus gros peuvent avoir la forme d'une assiette avec de forts pendages sur les bords et

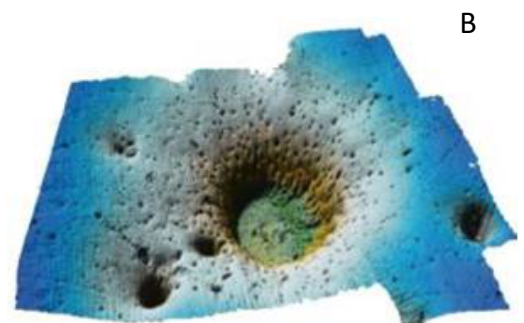
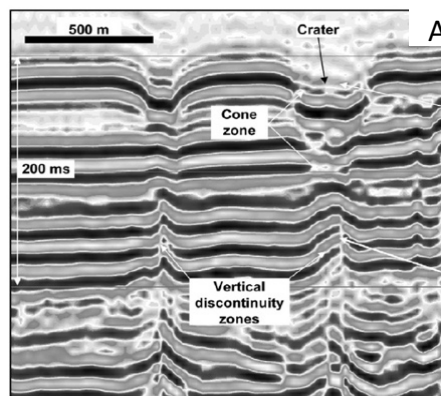


Figure 3 : A. Cratère surplombant une zone conique et un pipe interprétés à partir des discontinuités des réflecteurs. La zone conique est interprétée comme un cratère d'effondrement. Une deuxième dépression est remarquable sur la gauche du profil, surplombant un conduit vertical (Løseth et al., 2009). B. Imagerie d'un pockmark dans le bassin de Norvège (Webb et al., 2009).

une base plate ou encore avoir une forme asymétrique. Ce type de relief se retrouve généralement dans des sédiments peu consolidés à granulométrie fine (Løseth et al., 2009, 2011).

1.1.1.2. En profondeur

Les cheminées sous-jacentes qui semblent alimenter ces structures d'expulsion peuvent elles aussi avoir des morphologies variables. La première morphologie remarquable est une morphologie **tubulaire**. Ces conduits ont une forme circulaire à ovale, en coupe. Leur diamètre est variable de quelques mètres à 150 m, et ils peuvent atteindre une hauteur de plus de 1000 m. Ces conduits connectent un réservoir en profondeur à des pockmarks en surface. La roche hôte est déformée à proximité du pipe avec un gradient qui décroît avec l'éloignement au centre du conduit (Løseth et al., 2009, 2011 ; Ho et al., 2012). La Figure 1 montre l'expression sismique de ce type de cheminée.

Les cheminées de migration s'expriment également sous forme **conique** ou **en fleur** (Figure 4.A.). Ces conduits sont caractérisés par une taille étroite au niveau de la racine, dû à un flux focalisé, qui s'évase vers la surface, dû à un flux plus diffus. Ils peuvent s'exprimer sur des largeurs de 50 à 1000 m et jusqu'à des profondeurs de plus de 1000 m. Ils sont associés en surface à des structures d'expulsion à relief positif ou négatif (Gay et al., 2012 ; Løseth et al., 2011).

Les **failles** peuvent également jouer le rôle de conduit sub-vertical (Figure 4.B.). Les fractures dans une roche imperméable sont souvent empruntées par les fluides comme moyen d'ascension du fait de leur perméabilité plus importante (Løseth et al., 2009). Les cheminées de migration se trouvent, par ailleurs, parfois dans des systèmes de failles polygonales, qui peuvent être même à l'origine de leur formation (Gay et al., 2004).

Les profils sismiques montrent parfois des formes de cheminée beaucoup plus **digitées** que les précédentes (Figure 4.C.). La cheminée correspond à une grande zone où le signal sismique est détérioré dû à une distribution irrégulière de zones à faible vitesse. Les fluides peuvent être distribués dans la zone par le biais de fractures hydrauliques ou tectoniques d'où l'irrégularité de distribution. Les formes et les tailles de ces cheminées digitées sont variables : ombre diffuse, entonnoir, conduit vertical, cigare ou obélisque (Løseth et al., 2009).

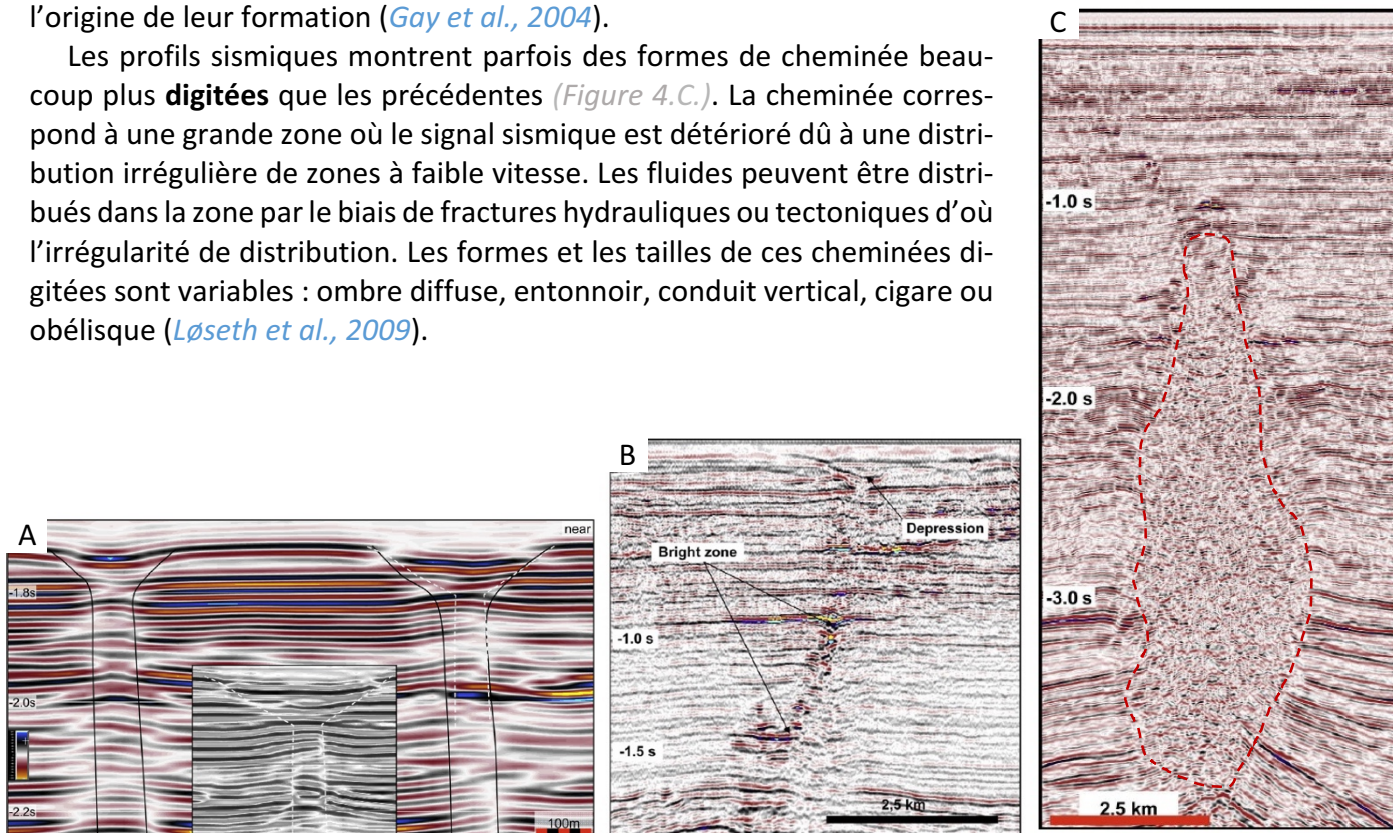


Figure 4 : A. Expression sismique à l'échelle 1:1 de deux cheminées de migration de fluide en forme de fleurs, surplombées par des dépressions. La partie inférieure des cheminées est interprétée à partir de la combinaison d'un empilement vertical d'anticlinaux et de discontinuités latérales de ces anticlinaux. L'expression sismique insérée entre les deux cheminées est une ancienne interprétation de la cheminée de droite (Løseth et al., 2011). B. Empilement d'anomalies de forte amplitude dans le mur d'une faille indiquant la présence de fluides ascendants le long de la faille. La présence de fluides est confirmée par la dépression surplombant la faille. C. Expression sismique d'une cheminée ayant la forme d'un obélisque, située au dessus d'un dôme de sel. Les délimitations de la zone sont nettes et la zone est interprétée comme étant un ensemble de fractures tectoniques par lesquelles des fluides circulent (Løseth et al., 2009).

1.1.2. Problématique

Les cheminées de migrations sont donc généralement interprétées comme des conduits ayant de fortes perméabilités qui évacuent la surpression créée dans un intervalle sédimentaire réservoir (Løseth et al., 2009, 2011 ; Mourgues et al., 2011, 2012). Cette interprétation sous-entend que ces cheminées de migration fonctionnent comme des tubes ouverts qui permettent la circulation des fluides de leur réservoir vers le fond marin. Ces hypothèses n'ont pas pu être vérifiées pour l'instant, dû au risque qu'implique un forage dans de telles structures avec des fluides en surpression. Et sans accès direct il est difficile de comprendre leur fonctionnement qui est aujourd'hui encore très mal compris et sujet à de nombreuses questions : Existe-t-il différents mécanismes à l'origine des différentes structures ? Pourquoi certaines structures ont des reliefs positifs et d'autres des reliefs négatifs ? Pourquoi un flux focalisé en profondeur, devient diffus à l'approche de la surface ? Quels sont les régimes de pression dans ce type de structures ? La nature des sédiments a-t-elle un rôle sur le type de structure formé ?

Pour répondre à ces questions un des moyens à notre disposition est d'utiliser une approche couplant des expériences analogiques et des simulations numériques. L'objectif est d'essayer de reproduire la formation de ces structures d'échappement de fluide par le biais de ces deux méthodes dans des systèmes où les paramètres physiques sont connus, afin de quantifier les mécanismes à l'origine de leur formation. Les simulations numériques vont permettre de modéliser l'injection ponctuelle d'un fluide à la base et au centre d'une couche granulaire homogène polydispersée immergée dans le même fluide. Les expériences analogiques réalisées consisteront en une injection ponctuelle d'eau à la base d'une couche granulaire constituée de billes de verre sphériques polydispersées immergées dans de l'eau. Les fluides ascendants dans les structures d'échappement étant majoritairement aqueux, ils seront modélisés lors de notre étude par de l'eau, sont identiques au fluide environnant.

Dans un premier temps le milieu granulaire sera décrit et un état de l'art des simulations numériques et des expériences analogiques déjà réalisées sera dressé. Par la suite, le matériel et les méthodes utilisés lors de ce stage seront présentés. Les résultats issus des simulations et des expériences seront ensuite exposés et ils seront discutés et confrontés aux structures observées en imagerie géophysique.

2. Etat de l'art

2.1. Le milieu granulaire

Le milieu granulaire est un « milieu divisé » composé d'un grand nombre de particules dont la taille est typiquement supérieure à 100 μ m. Les particules de ce milieu interagissent par friction et collisions inélastiques. Ce milieu peut se comporter comme un solide, un liquide ou un gaz suivant la situation et il dissipe aisément l'énergie. Lorsque le milieu est « solide », il est sans mouvement et dominé par les interactions de contact permanents entre les grains. Lorsqu'il se comporte comme un gaz, le milieu est peu dense et les particules sont très agitées et interagissent par collision. Enfin lorsqu'il se comporte comme un liquide, le milieu subit des écoulements denses, où les particules interagissent à la fois par collision et contact frictionnel de longue durée (Andreaotti et al., 2011).

Les sédiments marins dans lesquels les structures d'échappement ont été observées sont assimilés à un milieu granulaire immergé. Lors des simulations et des expériences qui ont été réalisées dans le cadre du stage, c'est donc un milieu comparable qui a été utilisé. Dans notre étude, nous nous focaliserons sur les cas où le liquide ascendant entraîne un **mouvement des particules** composant le milieu, qui peut alors se comporter comme un fluide de viscosité effective. On parlera alors de **fluidification** ou de **zone fluidifiée**.

2.2. Simulations numériques

L'injection localisée d'un fluide en base d'un lit granulaire a été très peu étudié auparavant. Seulement deux études ont été réalisées, par *Cui et al. (2012)* et *Ngoma (2015)*. Elles ont été réalisées à l'aide de modèles numériques hybrides associant la méthode des éléments discrets (DEM) pour la couche granulaire et la méthode Lattice-Boltzmann pour le fluide, en deux dimensions.

Les deux études modélisent des lits granulaires de dimensions différentes et composés de particules de tailles différentes. L'injection se fait dans les deux cas, à la base du lit mais les injecteurs ont des tailles différentes. Les temps de simulation dans les deux études sont également différents, mais un débit constant est injecté dans les deux cas.

Malgré ces différences, les deux études ont mis en évidence, selon les vitesses v d'injection, trois mêmes régimes fonction du comportement mécanique du milieu granulaire :

- Un **régime statique** où le fluide injecté percole dans les pores de la couche, ce qui est assimilé à un écoulement dans un milieu poreux (*Figure 5.A*).

- Un **régime de cavité stable**, où la fluidification de la couche est amorcée et s'accompagne d'un soulèvement de la couche au dessus de l'injection. C'est un régime propre ou transitoire (*Figure 5.B*).

- Un **régime de fluidification locale** de la couche sur toute son épaisseur, entraînant la formation d'une cheminée et un relief positif en surface (*Figure 5.C*).

Nous considérerons dans la suite de ce travail la définition suivante pour la **fluidification** : « la fluidification d'une couche granulaire résulte de la mise en mouvement des particules la constituant par l'injection d'un fluide ».

L'étude de *Cui et al. (2012)*, est principalement portée sur l'analyse de l'évolution de la pression de fluide dans le lit granulaire, qui permet de mettre en évidence les seuils à l'origine des différents régimes observés. Ils démontrent que la fluidification succède à une chute de pression importante due à la mobilisation des particules. L'effet de la cohésion de la couche a aussi été étudié lors de l'initiation. La cohésion influe sur les seuils de pression à l'origine de la fluidification et entraîne la formation de fractures dans le lit granulaire. Mais cette étude n'a pas considéré l'influence d'autres paramètres, tels que la friction interparticulaire, la viscosité du fluide ou la taille des particules.

Les travaux de *Ngoma (2015)*, ont permis une étude paramétrique plus approfondie. Il démontre que la vitesse minimale permettant la fluidification de la couche est proportionnelle à la hauteur de la couche et qu'elle décroît avec la taille de l'injection (seulement pour les faibles viscosités du fluide). Il a également montré que pour des viscosités de fluide élevées, la gamme de vitesse pour laquelle le régime de cavité est observé est réduite, alors que pour des viscosités faibles, cette gamme de vitesse est large. L'impact

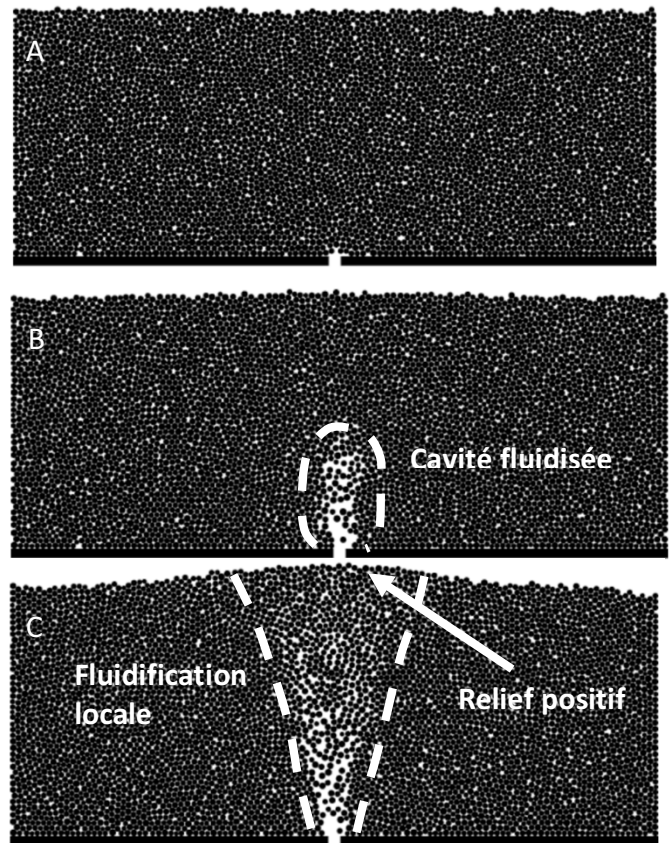


Figure 5 : Illustration des trois régimes stationnaires observés pour un empilement de hauteur initiale $H_0 = 85.8$ mm avec un diamètre d'injection $d_i = 8.0$ mm obtenue par simulation numérique : A. Régime statique obtenu avec une vitesse d'injection $v = 0.29$ $m.s^{-1}$; B. Régime de cavité fluidisée obtenu avec une vitesse d'injection $v = 0.40$ $m.s^{-1}$; C. Régime de cheminée fluidisée obtenu avec une vitesse d'injection $v = 0.60$ $m.s^{-1}$ (*Ngoma, 2015*).

de la compaction a également été étudié, montrant ainsi 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.

2.3. Expériences analogiques

Plusieurs auteurs ont étudié expérimentalement l'injection d'un fluide à la base d'une couche granulaire (Roche et al., 2001 ; Gallo et Woods, 2004 ; Zoueshtiagh et Merlen, 2007 ; Philippe et Badiane, 2013 ; Alsaydalani et Clayton, 2013 ; Ngoma, 2015 ; Philippe et al., 2017). Ces travaux expérimentaux sont plus nombreux que les travaux numériques. Ces études ont été réalisées en trois dimensions mais également dans des systèmes bidimensionnels.

Les travaux réalisés par Zoueshtiagh et Merlen (2007) et Philippe et Badiane (2013) sont très similaires. Ils considèrent un flux vertical et ascendant à débit Q constant à la base (injecteur centré) d'une couche granulaire immergée, en trois dimensions. Zoueshtiagh et Merlen (2007) n'ont étudié que la surface de la couche granulaire immergée dans de l'eau, tandis que Philippe et Badiane (2013), ont également visualisé l'intérieur de la couche. Ces études mettent en évidence la présence de trois régimes du milieu granulaire en fonction du débit injecté :

- Un **régime statique**, dans lequel la couche se comporte comme un milieu poreux et le fluide circule à travers les pores (flux de Darcy) avec une légère expansion (Figure 6.A).
- Un **régime de cavité**, dans lequel une cavité fluidisée se forme au dessus de l'injecteur dans laquelle les grains sont agités par des mouvements de convection, entraînant une déformation en surface du milieu sous forme de monticule. C'est un régime propre ou transitoire (Figure 6.B).
- Un **régime de fluidification locale** sur toute l'épaisseur de la couche au dessus de l'injection, qui est stabilisée par le mouvement ascendant des grains en son centre et le mouvement descendant des grains sur ses bords, le reste de la couche étant immobile. Cette cheminée s'exprime à la surface par une explosion de la couche formant un cratère plus large que la zone fluidisée accompagnée d'un dôme central de taille similaire à la cheminée. La fluidification est possible lorsque la pression créée par le flux injecté devient égale au poids de la couche sus-jacente (Figure 6.C).

Ces deux études démontrent une relation linéaire entre la hauteur de la couche et la vitesse critique permettant la fluidification, ainsi que l'effet négligeable du diamètre de l'injecteur. Les résultats de Zoueshtiagh et Merlen (2007) montrent que près du seuil de fluidification la cheminée a une forme quasi-cylindrique légèrement évasée vers le haut, dont la forme s'élargit avec le débit. Ils montrent aussi un effet d'hystérésis entre les débits de fluidification et le débit de défluidification qui correspond à l'arrêt de la mobilisation des grains qui retrouvent un comportement solide. En diminuant le débit progressivement, la zone fluidisée continue d'exister pour des débits faibles. Pourtant ces mêmes débits faibles ne suffiraient pas à initier une fluidification en premier lieu.

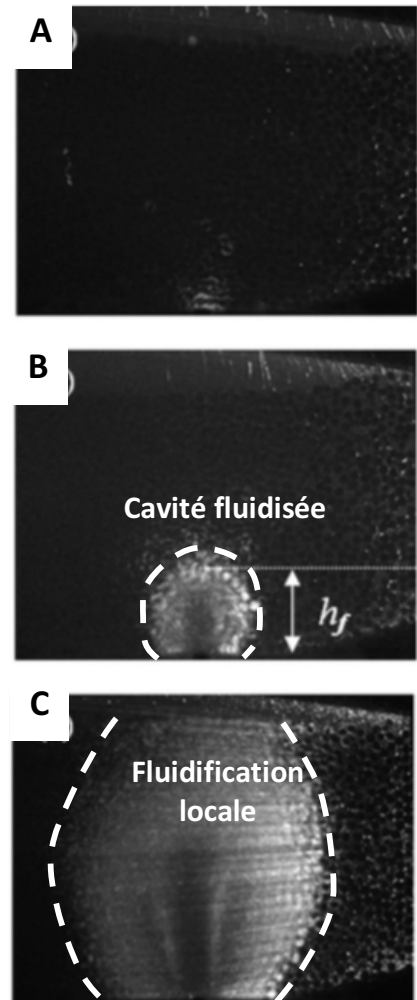


Figure 6 : Illustration des trois régimes stationnaires observés pour un empilement de hauteur initiale $H_0 = 120$ mm avec un diamètre d'injection $d_i = 14$ mm obtenue lors des expériences : A. Régime statique ($Q=69,5\text{cm}^3.\text{s}^{-1}$). B. Régime de cavité ($Q=86,9\text{cm}^3.\text{s}^{-1}$). C. Régime de fluidification locale ($Q=100,8\text{cm}^3.\text{s}^{-1}$) (Philippe et Badiane, 2013).

En plus de ces trois régimes, [Philippe et al. \(2017\)](#) ont mis en évidence deux régimes de mise en place de la cheminée fluidisée : un régime rapide où la cheminée est formée instantanément et un régime lent, où la cheminée est formée très lentement. Ils remettent également en question la présence du régime de cavité se trouvant entre le régime statique et fluidifié, car les temps de manipulation ne permettent pas d'affirmer avec certitude que ce régime est propre. Il pourrait correspondre à une progression très lente du régime de fluidification. Ils affirment cependant que ce régime est observable à la suite de la fluidification par décroissance de la vitesse d'injection. Ils montrent également l'importance de la taille de l'injecteur sur la durée du régime transitoire lors du régime lent, probablement dû à la réduction de vitesse induite.

[Alsaydalani et Clayton \(2013\)](#) ont étudié pour différentes variétés de sable, l'évolution du flux et de la pression au cours des expériences. Ils démontrent que l'évolution du rapport débit/pression favorise l'identification des différentes étapes d'évolution du système. Ils mettent en évidence que le déclenchement de la fluidification est contrôlé par le flux, la taille des particules, leur sphéricité, l'épaisseur de la couche et sa perméabilité.

[Ngoma \(2015\)](#) a mis en évidence au cours de ses travaux, la différence de comportement de la couche en fonction de sa compacité. Comme lors des simulations numériques, la fluidification d'une couche lâche se fait rapidement de la base à la surface et de façon chaotique et turbulente. Tandis que la fluidification d'une couche compacte est précédée d'un soulèvement de la couche sans déformation et la base de la couche se déstabilise progressivement jusqu'à ce que cette déstabilisation atteigne la surface.

D'autres travaux de fluidification de couche granulaire ont montré la formation d'un canal dans une couche immergée. C'est le cas de [Roche et al. \(2001\)](#) qui constatent la formation de canaux dans une couche granulaire d'ignimbrite qui peut même entraîner un tri granulométrique dans certains cas. [Gallo et Woods \(2004\)](#), en injectant un mélange sable et d'eau dans une couche de sable par surpression, montrent la formation d'un canal vertical qui alimente un volcan de sable en surface.

Les travaux expérimentaux et numériques précédents ont donc mis en évidence les mêmes régimes d'écoulement au sein d'une couche granulaire lorsqu'un fluide y est injecté ponctuellement. Ces régimes dépendent en expérimental du débit injecté et en numérique de la vitesse injectée. Les travaux traitent principalement des conditions d'initiation de la fluidification dans la couche granulaire, en quantifiant les différents paramètres du système comme la pression, la compacité ou la taille des particules. La différence entre débit et vitesse entre numérique et analogique provient des conditions d'études. En numérique, les simulations sont réalisées en 2D et l'injection du fluide est contrôlée par une vitesse. En revanche en expérimental, l'injection du fluide est assurée soit par des contrôleurs de pression, ou plus fréquemment par des contrôleurs de débit, d'où l'utilisation du terme de débit. Jusqu'à présent ces travaux ont essentiellement porté sur l'initiation de la fluidification de la couche granulaire immergée et très peu se sont intéressés à son évolution temporelle.

3. Matériels et méthodes

3.1. Simulations numériques

3.1.1. Fonctionnement

Le modèle utilisé pour simuler la formation des structures d'échappement de fluide dans une couche granulaire immergée est un modèle couplé fluide-grain CFD-DEM (Computational Fluid Dynamics - Discrete Element Methods) multi-échelle utilisant LMG90, qui est en cours de développement par [Constant et al.](#) Ce modèle permet de simuler un système contenant à la fois du fluide et des solides et leurs interactions.

Le fluide est résolu avec une méthode d'éléments finis à maillage large par rapport à la taille des particules. Il est déduit d'une représentation continue facilitant la modélisation et mettant à disposition l'évolution des variables qui le constituent. La phase fluide est modélisée 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 composée de grains est modélisée avec une méthode d'éléments discrets à l'échelle des particules individuelles, permettant de calculer leurs vitesses, leurs déplacements et leurs trajectoires. 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. Nous avons utilisé dans les simulations une loi de Coulomb inélastique qui est une loi sans restitution d'énergie élastique lors des collisions. Par conséquent, lors d'un contact entre deux particules toute l'énergie est dissipée dans la couche.

Les deux phases sont ensuite 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. La force d'interaction entre le fluide et les grains est calculée pour chaque grain du milieu en tenant compte des interactions mécaniques avec les grains voisins. Elle ne sera donc pas la même si la couche granulaire est dense ou peu dense. Cette force de traînée s'oppose au mouvement d'un corps dans un liquide ou un gaz pesant :

$$f_i = g(\phi|_{x_i}) C_d \pi r_i^2 \frac{\rho}{2} \left\| v_i - \frac{u}{\phi|_{x_i}} \right\| \left(v_i - \frac{u}{\phi|_{x_i}} \right) \quad (1)$$

où r_i est le rayon du grain, g est la gravité, ϕ est la porosité, ρ est la densité du fluide, v_i est la vitesse du grain, u la vitesse du fluide et C_d est le coefficient de traînée qui est obtenue à partir du nombre de Reynolds particulaire (Re_i) et qui a été défini par [Dallavalle \(1943\)](#) :

$$C_d = \left(0.63 + \frac{4.8}{\sqrt{Re_i}} \right)^2 \quad (2)$$

$$Re_i = \frac{2r_i \rho \phi|_{x_i}}{\mu} \left\| v_i - \frac{u}{\phi|_{x_i}} \right\| \quad (3)$$

3.1.2. Utilisation

Le modèle est utilisé pour simuler le comportement d'une couche granulaire bidimensionnelle composée de grains sphériques lorsqu'un fluide est ponctuellement injecté par une petite ouverture à sa base. La couche est contenue dans une boîte remplie du même fluide, dont les dimensions sont connues. La simulation de l'injection du fluide se fait par une remobilisation ascendante du fluide au niveau du point d'injection choisi, qui se trouve à la base de la couche. Les paramètres à définir par l'utilisateur pour réaliser une simulation sont les suivants :

- Maillage du fluide, qui est sa précision de modélisation
- Dimensions de la boîte contenant le fluide et la couche granulaire (centimétrique)
- Nombre et taille des particules constituant la couche (particules micrométriques)
- Taille de l'injecteur (millimétrique)
- Nature du fluide : viscosité cinématique et densité
- Nature des grains : densité
- Friction inter-granulaire et friction grains-parois
- Pas de temps pendant la simulation (10^{-2} à 10^{-4} seconde)

Les simulations peuvent durer de quelques minutes à plusieurs jours selon les paramètres choisis et les durées de simulations souhaitées.

La taille des particules a été choisie suffisamment petite pour représenter le comportement des sédiments les plus fins et le maillage du fluide est jusqu'à 5 fois supérieur au diamètre des plus grandes. Les dimensions de la boîte dépendent du nombre de particules choisies et de la hauteur de fluide que l'on

souhaite avoir au-dessus de la couche. La taille de l'injecteur par lequel le fluide est injecté a été choisie pour correspondre à celle qui va être utilisée ensuite dans les modèles analogiques, soit de 1 mm. Les densités du fluide et des solides et la viscosité cinématique du fluide ont été choisies, afin de modéliser des billes de verre immergées dans de l'eau. Le coefficient de friction du milieu sera choisi selon les expériences et le pas de temps de la simulation est fixé selon la taille des particules.

Les résultats des simulations sont visualisés à l'aide du logiciel Paraview (version 5.4.1). La *Figure 7* montre un résultat typique des structures et phénomènes observés lors des simulations. La couleur des grains correspond à l'amplitude de leur déplacement, passant du bleu vers le rouge lorsque le déplacement augmente, son échelle correspondante est « disp magnitude » et s'exprime en mètre. La couleur du fluide reflète sa vitesse et permet d'illustrer sa migration, son échelle correspondante est « velocity magnitude » et s'exprime en m/s. Le trait rouge à la base de la couche granulaire signale l'injecteur.

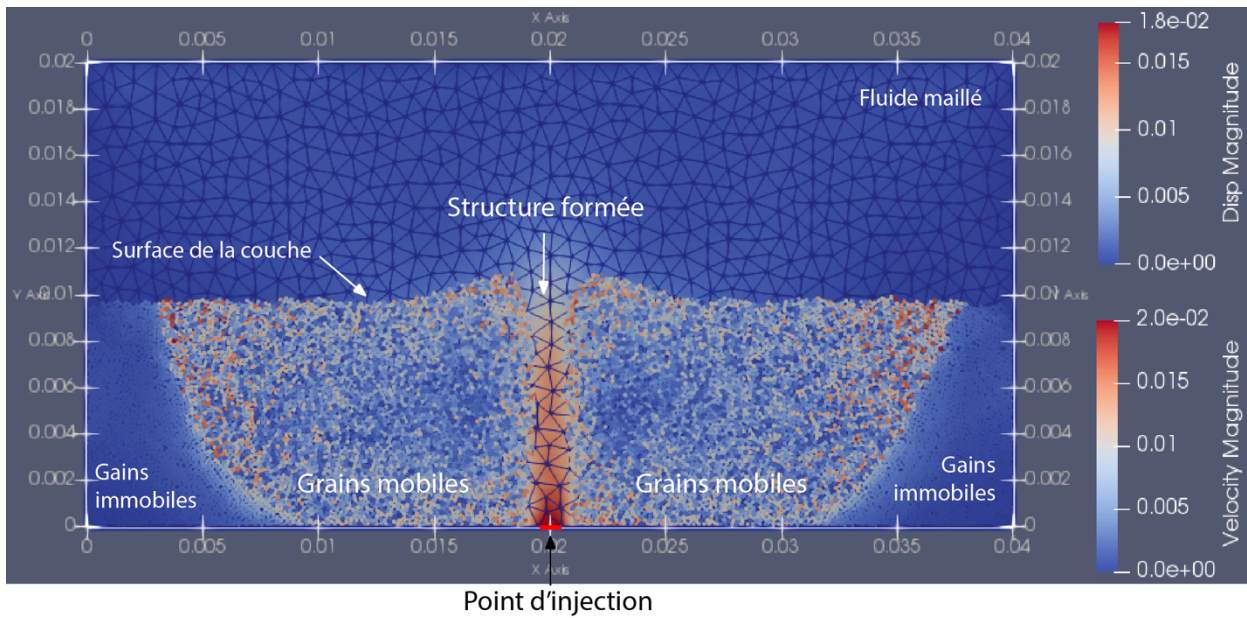


Figure 7 : Exemple de visualisation d'une simulation faite sur Paraview. L'injection ponctuelle (trait rouge) à la base de la couche va entrainer la formation d'une structure au centre, au dessus de l'injection qui est un canal accompagnée d'une remobilisation des grains de chaque côté. Au delà d'une certaine distance les grains ne sont plus impactés par la structure et sont immobiles. La surface de la couche subit également des déformations, avec la formation de talus de chaque côté de la structure. Le maillage du fluide apparaît également sur la figure ainsi que la zone où le fluide à un mouvement ascendant (en rouge). Les unités sont en mètre.

3.2. Expériences analogiques

3.2.1. Dispositif expérimental

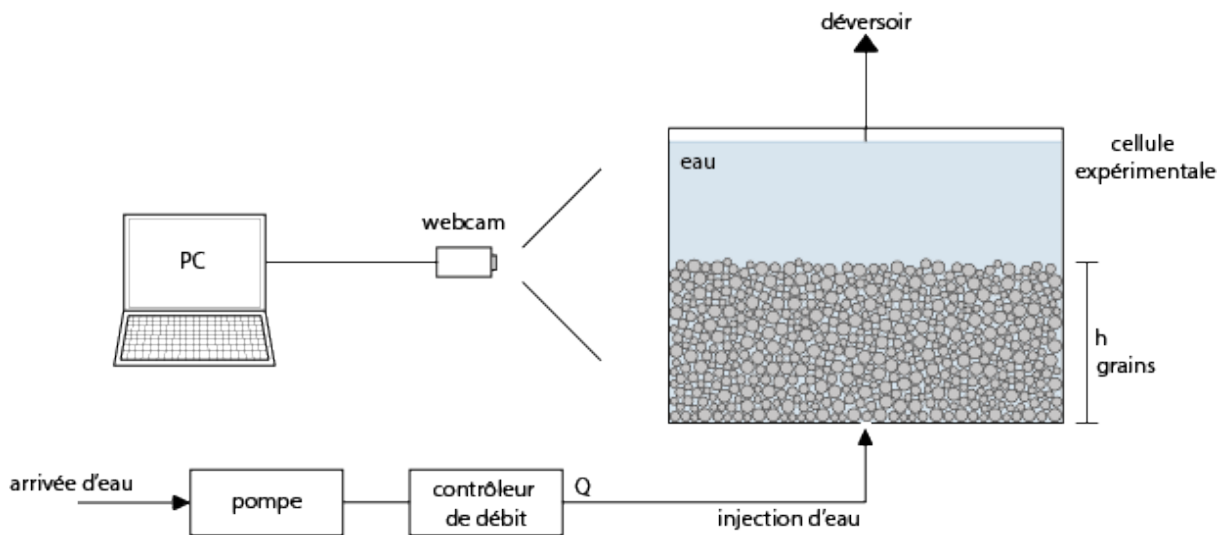


Figure 8 : Schéma du dispositif expérimental utilisé

Les expériences analogiques ont été réalisées au Laboratoire de Physique de l'ENS à Lyon du 3 au 13 Avril 2018 sous la direction de la Valérie Vidal. Nous avons utilisé une cellule de Hele-Shaw (356 mm x 295 mm, épaisseur de 3 mm) (cellule quasi-bidimensionnelle, composée de deux plaques de verre séparées par une faible épaisseur) avec un injecteur de diamètre interne 1mm à la base de la cellule, permettant d'injecter de l'eau avec un débit Q dans la cellule. La cellule contient une couche granulaire immergée dont la hauteur h varie selon les expériences (Figure 8). Ces grains sont des billes de verre sphériques (106-212 μm USF MATRASUR) dont la granulométrie sera détaillée par la suite. L'eau est injectée à la base de cette couche granulaire par le biais d'une pompe (Universal Motors MOT BF31 63M-2) et d'un contrôleur de débit (Bronkhorst CORI-TECH mini CORI-FLOW M15-ABD-22-0-S) qui permettent d'imposer un débit constant. L'épaisseur de la cellule étant faible (3mm), il est considéré que cette expérience représente un milieu en deux dimensions.

Avant chaque expérience, une condition initiale est réalisée : la couche de grains est mélangée dans la cellule afin d'effacer toutes traces de précédente mobilisation, la couche est ensuite déposée de façon homogène par gravité. Cette condition initiale permet d'obtenir une couche granulaire lâche, avec une surface libre environ horizontale.

Pour visualiser les expériences, la cellule rétroéclairée par un plan lumineux (Just NormLicht, Classic Line) et une caméra (BASLER acA2040-90u m 21725282 + objectif FUJIFILM Fujinon CF 12,5HA-1) prend des photos à intervalle de temps régulier à l'aide du logiciel Pylon Viewer (Version 5.0.0.6150 64bit). Cette méthode permet de mettre en évidence la couche granulaire par contraste d'intensité. Plus l'intensité lumineuse est faible, plus la compacité des grains est importante.

3.2.2. Granulométrie

Deux échantillons de grains ont été utilisés lors des expériences. Le premier provient directement du batch fabricant (USF Matrasur, 106-212 μm). Sa granulométrie réelle a été mesurée à l'aide d'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). Une dizaine de photos de l'échantillon ont été prises à l'aide du logiciel PixeLink Capture OEM (Version 2.3.5.0) et ont ensuite été traitées sur MatLab (R2015a), afin d'obtenir la taille des particules (Figure 9.A.) ainsi que leur nombre grâce à une fonction de reconnaissance de cercles.

La granulométrie du premier échantillon (Figure 9.B.) est bimodale avec un premier pic autour de 60 μm et un second pic autour de 150 μm . Le second échantillon (Figure 9.C) est issu du même batch fabricant mais a été passé au tamis de 80 μm , et seul les grains de taille supérieure à celle donnée par le tamis ont été gardés. La granulométrie après tamis est toujours bimodale mais la proportion des grains de petite taille a légèrement diminué et les pics ont été décalés. Le premier pic se trouve maintenant autour de

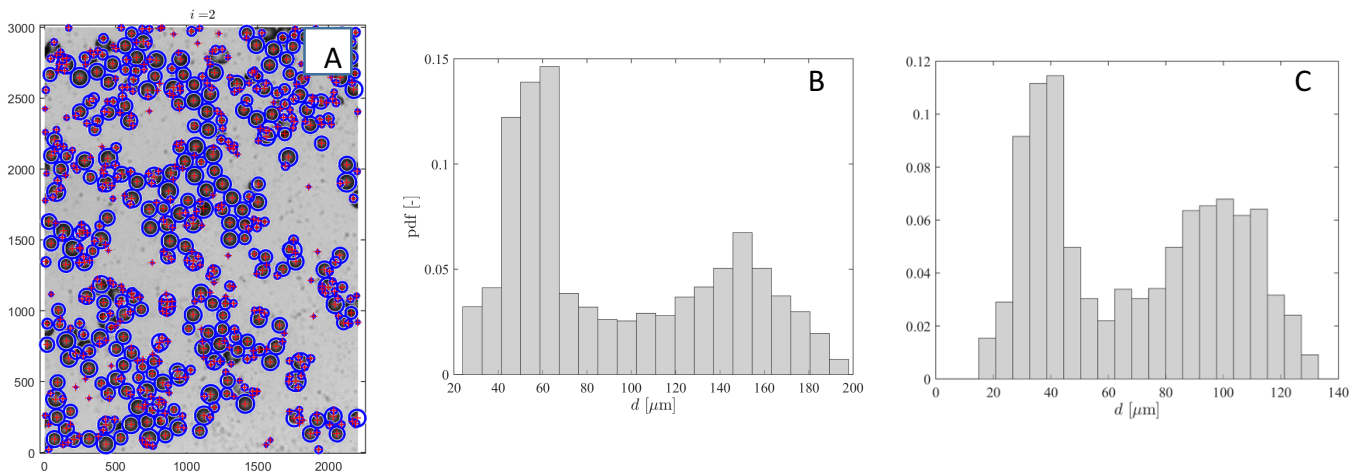


Figure 9 : A. Une des photos de l'échantillon après traitement sur MatLab, les grains entourés sont les grains qui ont été traités et dont la taille a été mesurée (photo associée à la granulométrie B.). B. Granulométrie pondérée de l'échantillon non tamisé sur 8541 grains. C. Granulométrie pondérée de l'échantillon tamisé sur 7141 grains. Les histogrammes présentés sont normalisés et représentent la fonction densité de probabilité (pdf).

40µm et le second autour de 110µm. La présence des plus petits grains après tamisage s’explique par la difficulté de les détacher des gros grains due à l’électrostatique (car le tamisage se fait sur les grains secs).

3.2.3. Traitement des photos : détection de la zone fluide

Les photos enregistrées au cours des expériences ont été traitées dans le but de détecter les contours de la zone fluidisée formée lors de l’injection. Le traitement a été réalisé grâce à une méthode basée sur le suivi global de mouvement développée par *Varas et al. (2015)*. Elle permet d’obtenir l’état de la zone fluide à tout moment de l’expérience.

1 – Mise en évidence de la zone fluidisée

Les mouvements de grains dans la couche sont suivis grâce à la différence absolue d’intensité entre deux photos consécutives ($I_{k+1} - I_k$). Les photos consécutives sont donc soustraites, les unes après les autres afin de mettre en évidence les zones de la couche où il y a eu du mouvement. Les résultats de ces soustractions sont stockés dans une matrice M_k . Ces résultats sont ensuite sommés et permettent de définir une densité de mouvement, notée ρn . Cette sommation permet par un processus cumulatif des mouvements de mettre en évidence la zone fluidisée. Cette densité de mouvement est ensuite normalisée par la valeur de densité maximale ($\overline{\rho n}$). Elle est échelonnée entre 0 et 1, où 1 est la densité de mouvement maximale de la couche. La densité de mouvement est donc définie par la formule suivante :

$$\overline{\rho n} = \frac{\rho n}{\max(\rho n)} = \frac{\sum_{k=1}^{n-1} M_k}{\max(\rho n)} = \frac{\sum_{k=1}^{n-1} |I_{k+1} - I_k|}{\max(\rho n)} \quad (4)$$

La détection de mouvement se fait à l’échelle d’un pixel qui représente 150µm. Les mouvements issus des particules dont la taille est inférieure à celle d’un pixel sont donc bien visibles, et les mouvements des particules de taille supérieure sont moins visibles. Peu de particules ont une taille qui dépasse celle d’un pixel (*figure 8*), ce qui suggère un faible impact de l’échelle.

Cette sommation peut se faire sur l’ensemble des photos de l’expérience pour avoir l’état final de la zone fluidisée, ou sur des photos entre t1 et t2 pour avoir son état à un temps t2 donné.

2 – Détection de contours

Les contours de la zone fluidisée sont déterminés à partir de la carte de densité de mouvement. Cette densité est binarisée grâce à un seuil choisi manuellement, ce qui permet de délimiter la zone (0 = pas de mouvement, 1 = mouvement). Les contours de la zone fluidisée sont lissés et la matrice de la densité est parcourue ligne à ligne afin d’extraire les premières et dernières valeurs positives de chaque ligne. Ce sont ces valeurs qui permettent d’obtenir les contours de la zone.

Les images issues des deux étapes de traitements sont présentées en annexes.

4. Résultats

4.1. Simulations numériques

4.1.1. Etude paramétrique

Une étude paramétrique a été réalisée pour analyser l’influence des différents paramètres sur le régime de déformation de la couche granulaire. Chaque paramètre a été varié en gardant tous les autres paramètres constants. Les paramètres constants utilisés sont répertoriés dans le *tableau 1*. La vitesse d’injection n’est pas renseignée car elle sera variable selon le paramètre étudié, afin d’avoir des résultats pertinents. Les simulations ont été réalisées dans une boîte remplie de fluide de

Rayon des particules	$2 \cdot 10^{-4} \text{ m}$
Nombre particules	5000
Taille de l’ouverture	0,001 m
Friction granulaire	0
Densité du liquide	1000
Densité du solide	2500
Viscosité cinématique	$1 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$
Pas de temps	$1 \cdot 10^{-2} \text{ s}$

Tableau 1 : Paramètres utilisés dans l’étude paramétrique.

dimensions 2 cm x 2 cm avec une épaisseur de couche d'un peu moins de 1 cm. Pour 5000 particules, le temps moyen de calcul variait entre 30 min et une heure selon les paramètres. Les dimensions ne sont pas comparables au système analogique, mais il ne s'agit ici que d'observer l'influence des différents paramètres sur la dynamique du système avant de lancer des simulations sur une plus grande couche de grains.

- Vitesse d'injection

En faisant varier la vitesse d'injection, quatre régimes d'écoulement ont été observés. Chacun de ces régimes représente un état plus ou moins développé de mobilisation de grains et est dépendant de la vitesse. Le premier régime est **quasi-statique**, et se produit lorsque la vitesse d'injection est faible : le fluide est diffusé à travers la couche (Figure 10.A) et il y a très peu de mouvement de grains. La couleur rouge des grains indiquant un mouvement dans la partie supérieure de la couche reflète le dépôt initial de la couche. Le deuxième régime se produit pour une vitesse plus élevée, et est caractérisé par une **mobilisation** des grains, sous forme de cellule de convection à partir de l'injection (Figure 10.B). Le troisième régime se manifeste par la présence d'une **cavité** initiée au dessus de l'injecteur, accompagnée de la formation de deux cellules de convection symétriques situées de part et d'autre de l'injecteur (Figure 10.C). La cavité observée correspond à l'initiation d'un canal, mais celui-ci s'arrête à une hauteur qui dépend de la vitesse d'injection. Les cellules de convection sont formées par une fluidification du milieu granulaire causée par l'injection centrale. Le dernier régime correspond à la formation d'un canal qui atteint la surface de la couche et qui est toujours accompagné de cellules de convection (Figure 10.D). Plus la vitesse est élevée, et plus les structures formées sont développées. Une structure bien développée sera une structure similaire au canal formé dans la Figure 10.D accompagnée d'une forte remobilisation des grains et une structure peu développée sera une structure similaire à une petite cavité fluidisée comme dans la Figure 10.C accompagnée d'une remobilisation de grains plus faible.

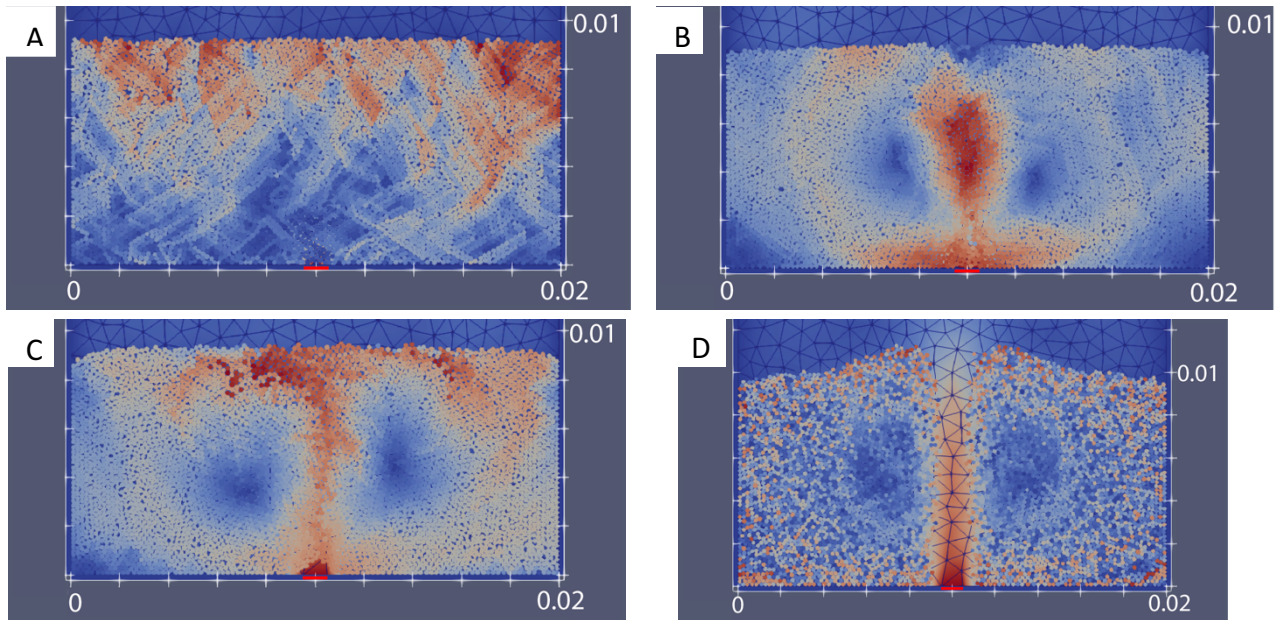


Figure 10 : Etats de la couche granulaire après 25 s de simulation pour différentes vitesses. A. Premier régime avec une vitesse d'injection v de $3,3 \cdot 10^{-3}$ m/s : le fluide percole à travers la couche de grains comme dans un milieu poreux. B. Second régime avec une vitesse d'injection v de $5,5 \cdot 10^{-3}$ m/s : mobilisation de grains sous forme de cellules de convection. C. Troisième régime avec une vitesse d'injection v de $7 \cdot 10^{-3}$ m/s : cavité fluidisée à la base et remobilisation des grains sous forme de cellules de convection. D. Quatrième régime avec une vitesse d'injection v de $2 \cdot 10^{-2}$ m/s : formation d'un canal jusqu'à la surface de la couche et remobilisation des grains sous forme de cellules de convection.

Ces premières simulations permettent d'avoir une référence pour l'étude des paramètres suivants. Lorsqu'une zone de la couche est affectée par une remobilisation de grains, cette zone est considérée comme fluidisée, et les cavités ou les canaux font également partie de cette zone. La présence des zones de convection est en partie liée à la recirculation du fluide dans la boîte, qui est prélevé près de l'injecteur. Mais elles sont principalement causées par le cisaillement de la couche induit par le mouvement ascendant du fluide. Cette condition de bord est une première approximation des conditions observées dans

les milieux naturels. Les échelles de déplacement du fluide et des grains ne seront pas affichées dans cette partie car nous intéressons au comportement global de la couche et aux structures formées.

- Taille de l'injecteur

Lorsque la taille de l'injecteur l diminue pour une vitesse constante, les structures formées dans la couche de grains sont moins développées (Figure 11.A). Inversement lorsque la taille de l'ouverture augmente les structures sont de plus en plus développées (Figure 11.C et D). Ce résultat est cohérent car dans le premier cas, le débit est diminué et dans le second il est augmenté (le débit est en partie définie par le produit de la vitesse et de la taille de l'injecteur). Lorsque la taille de l'injecteur est grande, la base du canal formé est large mais le canal retrouve au cours de son ascension une largeur plus faible (Figure 11.D).

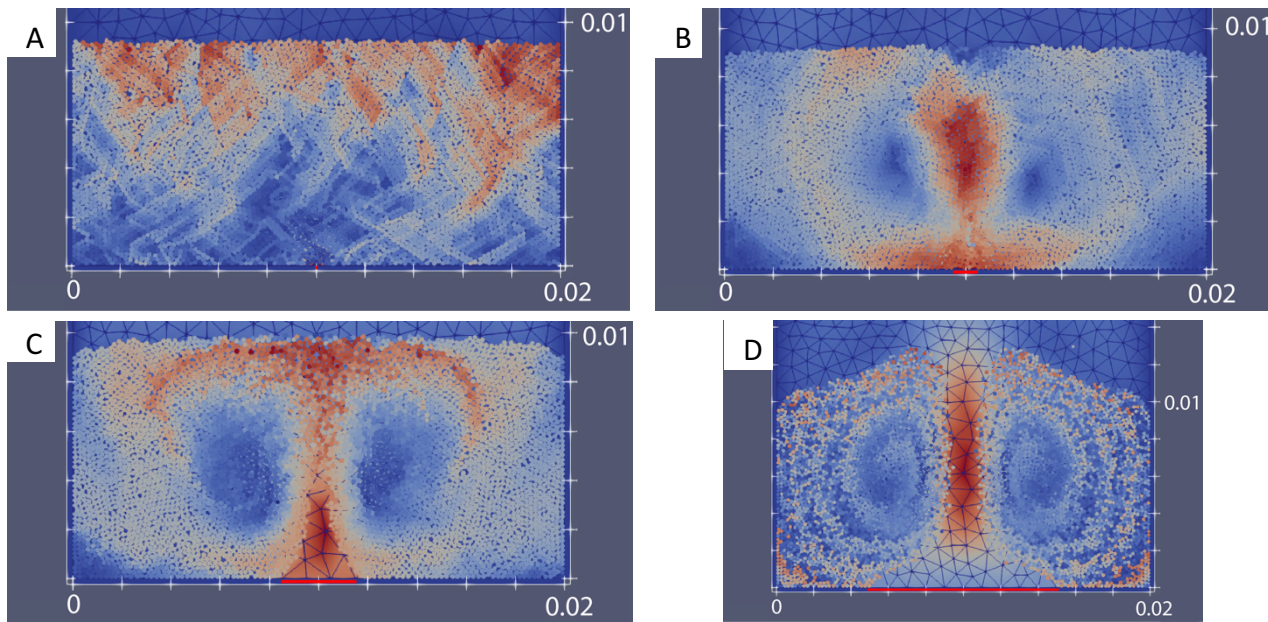


Figure 11 : Etats de la couche granulaire après 25 s de simulation pour différentes tailles d'injecteur l pour une vitesse de $5,5 \cdot 10^{-3}$ m/s. A. Taille l de $1 \cdot 10^{-4}$ m : aucune mobilisation. B. Taille l de $1 \cdot 10^{-3}$ m : mobilisation de grains sous forme de cellules de convection. C. Taille l de $3 \cdot 10^{-3}$ m : mobilisation des grains sous forme de cellules de convection avec cavité fluidisée à base large. D. Taille l de $1 \cdot 10^{-2}$ m : formation d'un canal avec une base large et forte mobilisation des grains sous forme de cellule de convection.

- Débit constant pour différentes vitesses et tailles d'injecteur

Trois simulations à débit constant mais avec des vitesses v et des tailles d'injecteur l variables ont été effectuées. Ces simulations ont mis en évidence que ce n'est pas le débit qui contrôle le système mais la

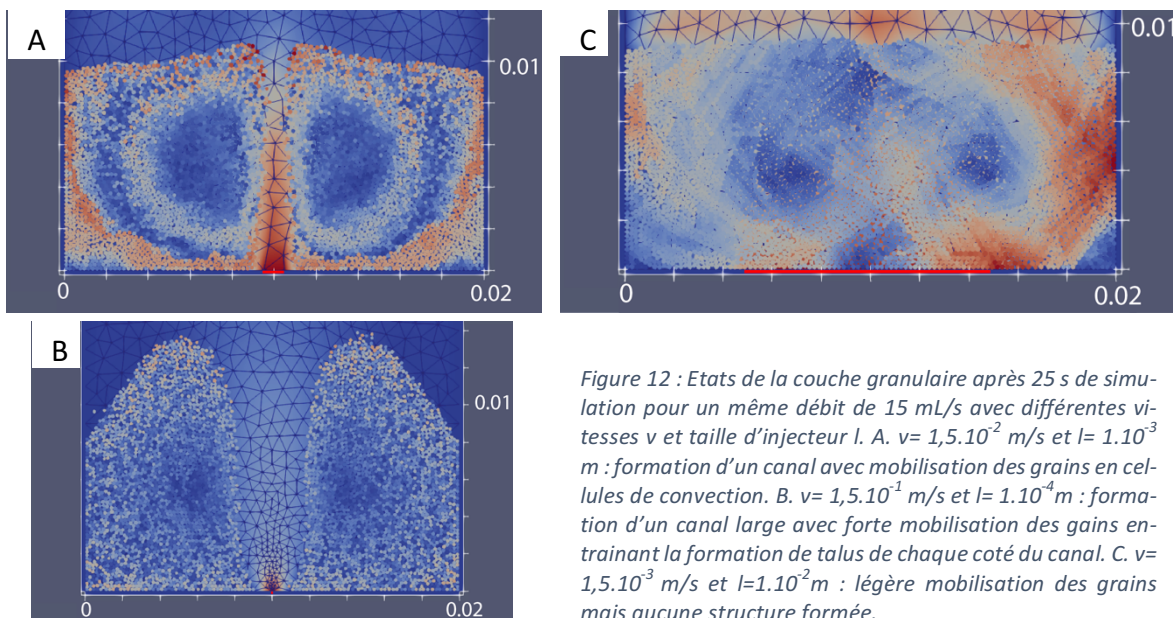


Figure 12 : Etats de la couche granulaire après 25 s de simulation pour un même débit de 15 mL/s avec différentes vitesses v et taille d'injecteur l . A. $v = 1,5 \cdot 10^{-2}$ m/s et $l = 1 \cdot 10^{-3}$ m : formation d'un canal avec mobilisation des grains en cellules de convection. B. $v = 1,5 \cdot 10^{-1}$ m/s et $l = 1 \cdot 10^{-4}$ m : formation d'un canal large avec forte mobilisation des gains entraînant la formation de talus de chaque côté du canal. C. $v = 1,5 \cdot 10^{-3}$ m/s et $l = 1 \cdot 10^{-2}$ m : légère mobilisation des grains mais aucune structure formée.

vitesse d'injection. En augmentant la vitesse et en réduisant l'ouverture, par rapport à la simulation de la *Figure 12.A*, la mobilisation de la couche est très importante (*Figure 12. B*). Et au contraire pour un débit avec une vitesse plus faible mais une ouverture plus grande, la mobilisation de la couche est plus faible (*Figure 12.C*).

- Hauteur de la couche de grains

Plus la hauteur de la couche de grains augmente, pour une vitesse d'injection constante, moins les structures se propagent vers la surface. En augmentant la hauteur, un régime en canal (*Figure 13.A*) se transforme en un régime de cavité (*Figure 13.B et C*). Si la hauteur est suffisante tout mouvement peut être inhibé. Quand la hauteur de la couche augmente, la vitesse d'injection critique permettant la fluidisation augmente également.

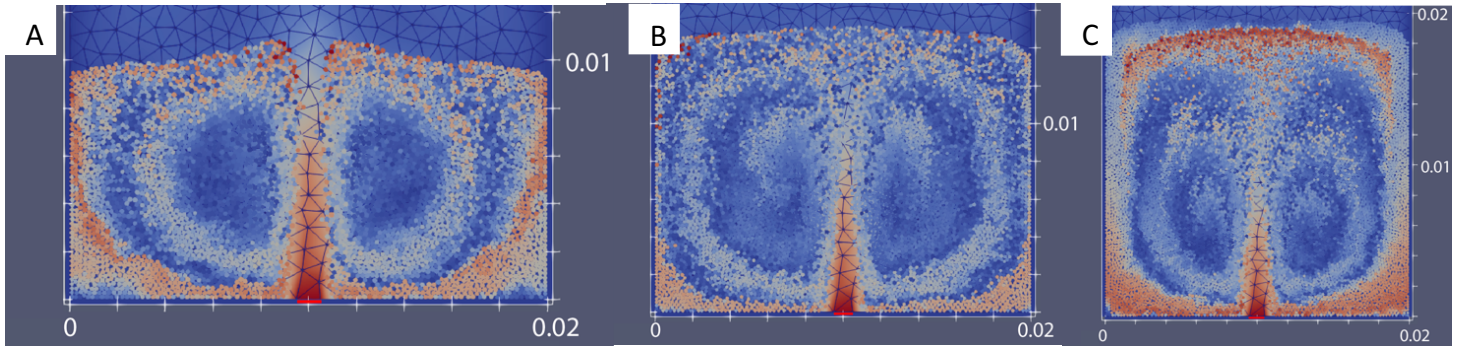


Figure 13 : Etats de la couche granulaire après 25 s de simulation pour différentes hauteurs h de couche pour une même vitesse d'injection de $1,5 \cdot 10^{-2}$ m/s. A. 5000 grains et $h = 0,0095\text{m}$: formation d'un canal et mobilisation des grains en cellules de convection. B. 7500 grains et $h = 0,0145\text{m}$: formation d'une cavité fluidisée de hauteur $0,012\text{m}$ avec mobilisation des grains en cellules de convection. C. 10000 grains et $h = 0,019\text{m}$: formation d'une cavité fluidisée de hauteur $h=0,01\text{m}$ avec mobilisation des grains en cellules de convection.

- Densité des grains et du fluide

En augmentant la densité du fluide, la remobilisation de la couche granulaire, à vitesse d'injection constante, est facilitée et se fait en bloc et inversement (*Figure 14*). Au contraire, en augmentant la densité des grains, la remobilisation de la couche granulaire, à vitesse d'injection constante, est plus limitée et inversement (*Figure 15*).

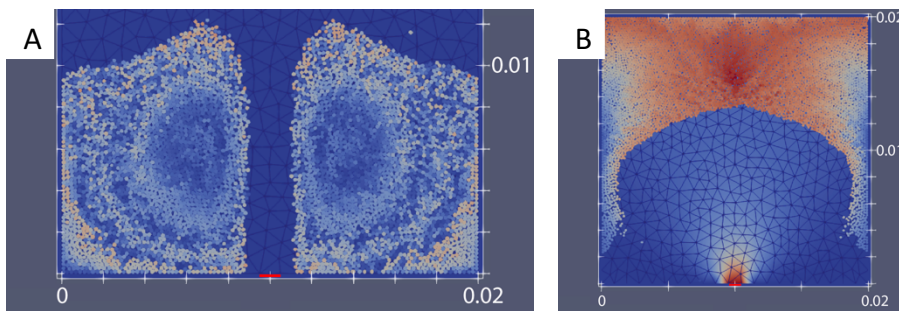


Figure 14 : Etats de la couche granulaire après 50 s de simulation pour différentes densités du liquide avec une même vitesse d'injection $v=7 \cdot 10^{-3}$ m/s. A. Densité du liquide de 2500 : formation d'un canal assez large avec mobilisation des grains en cellules de convection. B. Densité du liquide de 4000 : mobilisation des grains de façon extrême et les grains se déplacent en blocs.

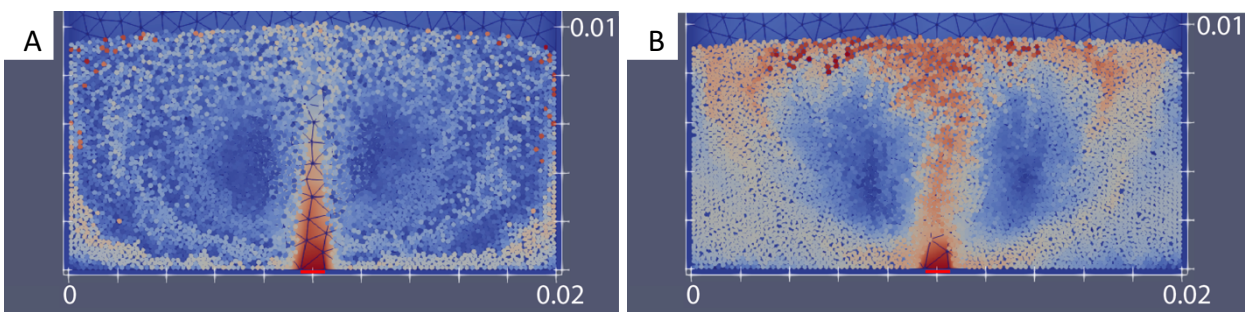


Figure 15 : Etats de la couche granulaire après 25 s de simulation pour différentes densités de grains avec une même vitesse d'injection $v=1,5 \cdot 10^{-2}$ m/s. A. Densité de grains de 3000 : formation d'une cavité fluidisée de hauteur $h=0,008\text{m}$ et mobilisation des grains en cellules de convection. B. Densité de grains de 4000 : formation d'une cavité fluidisée de hauteur plus petite $h=0,002\text{m}$ et mobilisation des grains en cellules de convection.

- Coefficient de friction inter-granulaire

En augmentant le coefficient de friction inter-granulaire, les limites du canal formé sont moins lisses, les talus de chaque côté des canaux sont légèrement plus grands et la taille des cellules de convection est légèrement réduite (*Figure 16*). La friction inter-granulaire limite donc légèrement l'expansion des cellules de convection.

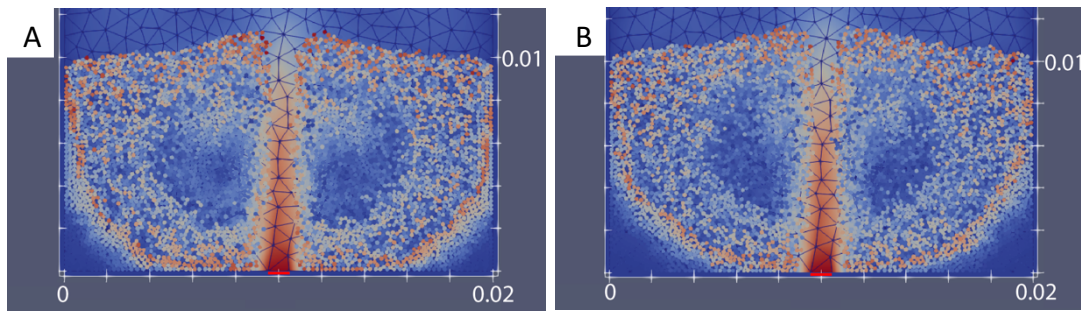


Figure 16 : Etat de la couche granulaire après 25s de simulation avec coefficient de friction inter-granulaire différents et une même vitesse d'injection de $v=1,5 \cdot 10^{-2}$ m/s. A. Friction granulaire de 0,3 : les cellules de convection ont légèrement réduit en taille et les parois du canal sont moins lisses. B. Friction granulaire de 1 : les cellules de convection ont de nouveau réduit en taille, les parois du canal sont toujours granuleuses et les talus bordant le canal au sommet de la couche ont augmenté.

- Taille des particules

L'augmentation de la taille des particules pour un nombre constant de grains entraîne une augmentation du poids de la couche, et de sa hauteur, et donc la vitesse d'injection critique nécessaire à la mobilisation des grains augmente également (résultat similaire à l'étude de la hauteur de couche).

- Viscosité cinématique

La viscosité cinématique du fluide contrôle la magnitude des forces de cisaillement exercées par le fluide sur les particules et donc le couplage dynamique des deux phases. La conductivité hydraulique du fluide est inversement proportionnelle à la viscosité. En diminuant la viscosité cinématique la conductivité

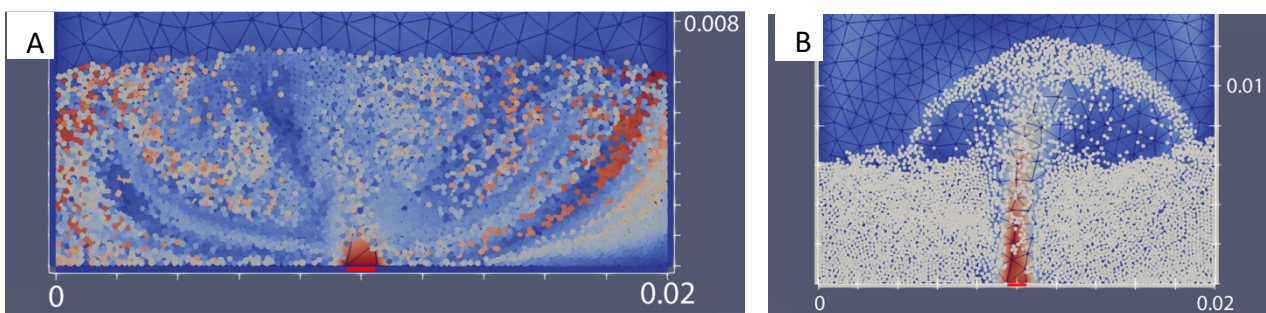


Figure 17 : Etat de la couche granulaire après 25 s de simulation pour une viscosité cinématique de $1 \cdot 10^{-5}$ m²/s. A. Vitesse d'injection de $2,5 \cdot 10^{-1}$ m/s : formation d'une cavité fluidisée et mobilisation des grains. B. Vitesse d'injection de $4 \cdot 10^{-1}$ m/s : formation d'un canal avec forte mobilisation des grains. Les grains sont propulsés dans le liquide.

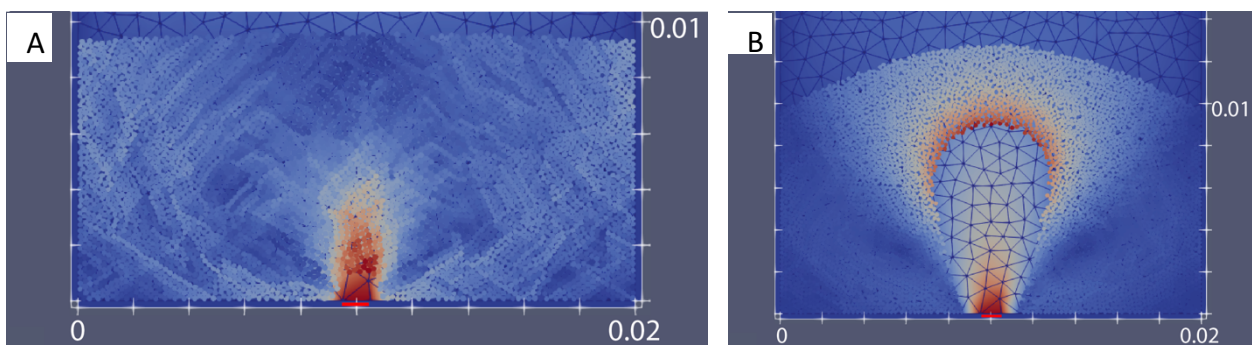


Figure 18 : Etat de la couche granulaire après 25 s de simulation pour une viscosité cinématique de $1 \cdot 10^{-1}$ m²/s. A. Vitesse d'injection de $1 \cdot 10^{-4}$ m/s : formation d'une cavité fluidisée avec des mouvements de grains centrés au dessus. B. Vitesse d'injection de $1 \cdot 10^{-3}$ m/s : formation d'une cavité fluidisée qui grandit et qui soulève les grains de la couche en bloc.

hydraulique augmente, le fluide traverse la couche granulaire plus facilement (Figure 17) et la vitesse d'injection critique permettant la fluidification augmente. Les mouvements de grains individuels sont facilités car les forces visqueuses du fluide sont moins importantes. En augmentant la viscosité cinématique, les forces de couplage fluide-grain (et les forces visqueuses du fluide) augmentent, et la vitesse d'injection critique de fluidification diminue. Les remobilisations dans la couche granulaire sont beaucoup plus limitées, il n'y a plus de remobilisation à l'échelle des grains mais les grains se déplacent en blocs car le fluide ne peut pas percoler à travers le milieu granulaire dû à la diminution de la conductivité hydraulique (Figure 18).

- Polydispersité des grains

Lorsque les grains sont monodisperses, le système a tendance à cristalliser et les grains se déplacent en blocs. Pour palier à cet effet il faut utiliser un échantillon de grains polydisperses. Lorsque l'échantillon est polydisperse (avec un même nombre de grains), la vitesse d'injection critique pour remobiliser les grains est plus importante bien que la hauteur de couche soit plus faible dû à l'augmentation de la compacité de la couche (Figure 19). Pour une même vitesse les régimes observés dans la couche sont différents.

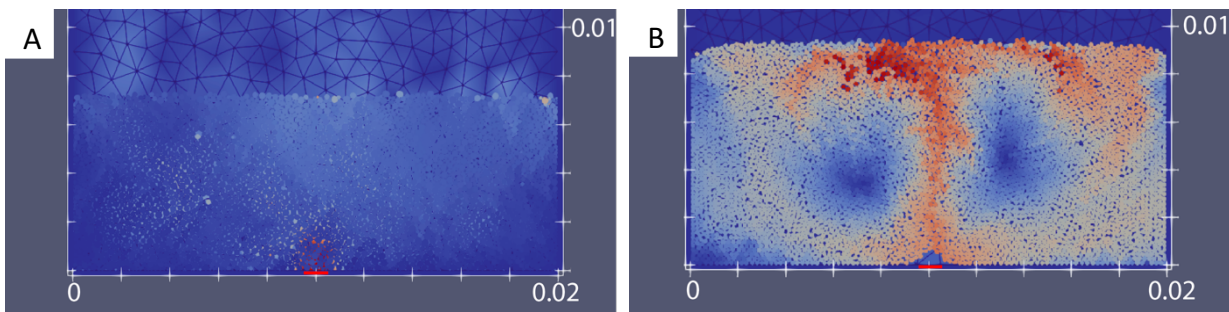


Figure 19 : Etat de la couche après 10 s de simulation pour une vitesse d'injection de $7 \cdot 10^{-3}$ m/s. A. Couche de grains polydisperse de hauteur $h=0,007$ m avec des diamètres compris entre $0,2 \cdot 10^{-4}$ et $3 \cdot 10^{-4}$ m : diffusion du liquide injecté à travers la couche. B. Couche de grains monodisperse de hauteur $h=0,009$ m : avec des diamètres en moyenne égaux à $2 \cdot 10^{-4}$ m : mobilisation des grains et formation d'une petite cavité fluidisée.

Cette étude a permis d'observer l'influence des différents paramètres du système et a également permis de mettre en évidence que la vitesse d'injection est le paramètre principal déterminant le comportement mécanique du système et que la valeur de cette vitesse varie selon les paramètres utilisés. La liste de toutes les simulations réalisées dans le cadre de l'étude paramétrique se trouve en annexe.

4.1.2. Simulations des structures d'échappement de fluides

Nous avons réalisé quelques simulations avec 50 000 particules pour analyser de manière plus détaillée les différents régimes d'écoulement ainsi que les structures d'échappement de fluide qui leur sont associées. Les granulométries utilisées lors des simulations sont générées aléatoirement et ont des distributions uniformes (Figure 20). Elles ne sont pas exactement identiques pour chaque simulation, mais les différences sont si faibles qu'elles n'ont a priori pas d'impact sur les simulations.

La liste des paramètres qui ont été utilisés lors des simulations numériques se trouve dans le *tableau 2*.

Rayon des particules	$0,2 \cdot 10^{-4} - 2 \cdot 10^{-4}$ m
Nombre particules	50 000
Taille de l'ouverture	0,001 m
Friction inter-granulaire	0,3
Densité du liquide	1000
Densité du solide	2500
Viscosité cinématique	$1 \cdot 10^{-6}$ m ² /s
Pas de temps	$1 \cdot 10^{-6}$ s

Tableau 2 : Listes des paramètres utilisés lors des simulations numériques

La couche de grains a une hauteur de 6,7cm et est contenue dans une boîte de 4cm de large sur une dizaine de centimètres de haut. Le temps de calcul des simulations peut être très long en fonction du

nombre de particules et de la taille du maillage du fluide : il faut 20 jours pour calculer 1,6 secondes de simulations constituées de 50 000 particules.

Les simulations ont mis en évidence quatre régimes d'écoulement dépendant de la vitesse d'injection :

- **Régime statique**

○ $v < 3,8 \text{ m.s}^{-1}$

Pour des vitesses d'injection inférieure à $3,8 \text{ m.s}^{-1}$, la couche granulaire reste immobile. Le flux est diffusé à travers la couche granulaire sans déplacer les grains. La couche se comporte comme un milieu poreux et le fluide circule selon la loi de Darcy.

- **Régime de cavité sans mouvement**

○ $3,8 \leq v < 7,5 \text{ m.s}^{-1}$

Pour des vitesses d'injection comprises entre $3,8$ et $7,5 \text{ m.s}^{-1}$, l'injection entraîne la formation d'une petite cavité au dessus de l'injecteur, en déplaçant des grains (Figure 21). Les grains sont déplacés sur de faibles distances, qui dépendent de la vitesse : plus la vitesse d'injection est importante et plus le déplacement des grains est important. Cependant une fois la cavité formée, plus aucun mouvement dans la couche ne s'opère et le flux circule alors à travers le milieu granulaire de façon similaire au régime statique.

- **Régime de cavité fluidisée**

○ $7,5 \leq v < 9,6 \text{ m.s}^{-1}$

En augmentant la vitesse d'injection, la cavité grandit et entraîne des mouvements de particules dans la couche. La couche granulaire se comporte alors localement comme un liquide, avec l'apparition d'une cavité fluidisée (Figure 22.A). Les mouvements sont initiés verticalement au dessus de l'injecteur, où se forme un petit canal qui génère des cellules de convection de part et d'autre. La taille du canal initiateur de mouvement et des cellules de convection induites dépendent de la vitesse d'injection. En augmentant la vitesse la cavité formée se propage verticalement et horizontalement (Figure 22.B). La formation de cette cavité fluidisée entraîne également un soulèvement de la couche sus-jacente. Pour une vitesse de 8 m.s^{-1} (Figure 22.A), la hauteur de la couche passe de $6,7 \text{ cm}$ à $6,8 \text{ cm}$ après injection. Pour une vitesse d'injection de 9 m.s^{-1} (Figure 22.B), la hauteur de couche passe de $6,7 \text{ cm}$ à presque 7 cm après injection. Cela suggère donc que plus la vitesse d'injection augmente, plus le soulèvement de la couche est important. La cavité fluidisée de la Figure 22.A est également caractérisée par une forme arrondie. Les effets des limites latérales de la boîte empêchent de retrouver cette forme pour la cavité de la Figure 22.B. L'apparition des cavités se fait très rapidement, mais leur évolution est ensuite très lente. Au delà des cavités fluidisées, le fluide circule à travers le milieu granulaire par diffusion.

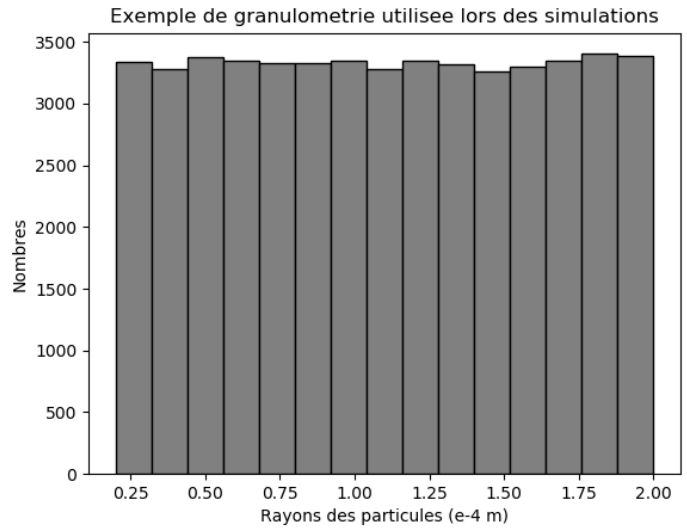


Figure 20 : Exemple de granulométrie générée aléatoirement à distribution uniforme à partir de 50 000 grains dont les rayons sont compris entre $0,2 \cdot 10^{-4}$ et $2 \cdot 10^{-4} \text{ m}$.

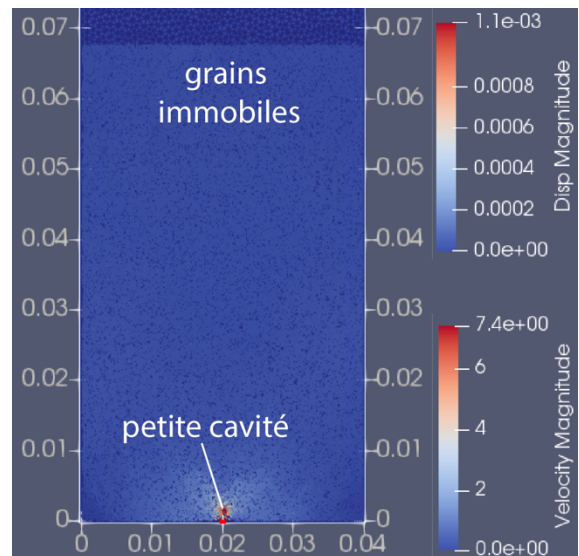


Figure 21 : Illustration du régime de cavité sans mouvement, après 0,69s de calcul, atteint après injection d'un fluide à la base de la couche à une vitesse de 7 m.s^{-1} . Le fluide déplace les grains sur une petite distance pour former une petite cavité, puis circule dans la couche à travers la porosité. La couleur rouge indique les grains qui ont été déplacés pour former la cavité.

- Régime de fluidification

○ $v \geq 9,6 \text{ m.s}^{-1}$

A partir d'une certaine vitesse la cavité progresse verticalement jusqu'à atteindre la surface de la couche. Les mouvements des grains sont alors beaucoup plus important, ce qui entraîne un remaniement complet de la couche et un soulèvement très prononcé. Un canal reste visible en profondeur et

il est à l'origine d'une fontaine de grains à la surface de la couche, qui expulse des grains de façon épisodique (Figure 23.A). Lors de la progression de la cavité, à l'initiation de la fluidification, une structure particulière se forme (Figure 23.B). Cette structure est composée de deux parties : une forme tubulaire en partie basse de type canal et une forme parabolique en partie haute correspondant à une zone turbulente.

La liste de toutes les simulations de structures d'échappement réalisées se trouve en annexes.

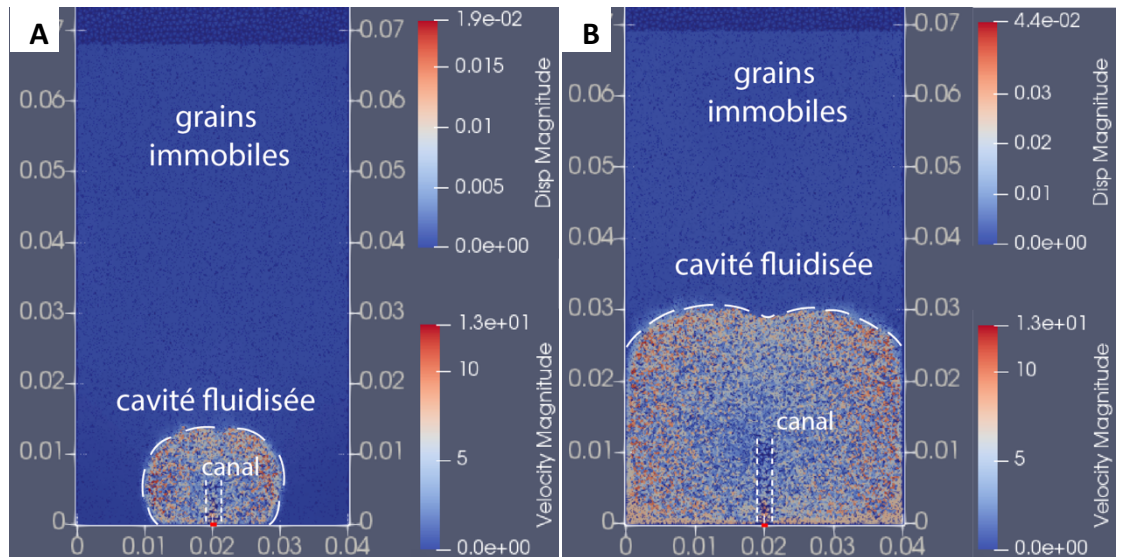


Figure 22 : Illustration du régime de cavité fluidisée atteint après injection d'un fluide à la base de la couche à une vitesse de 8 m.s^{-1} après $1,17\text{s}$ de calcul (A), et 9 m.s^{-1} après $1,29 \text{ s}$ de calcul (B). L'injection du fluide entraîne des remobilisations des grains formant les cavités fluidisées. Leur taille est dépendant de la vitesse injectée. Au delà de la cavité, le fluide circule dans la couche à travers la porosité.

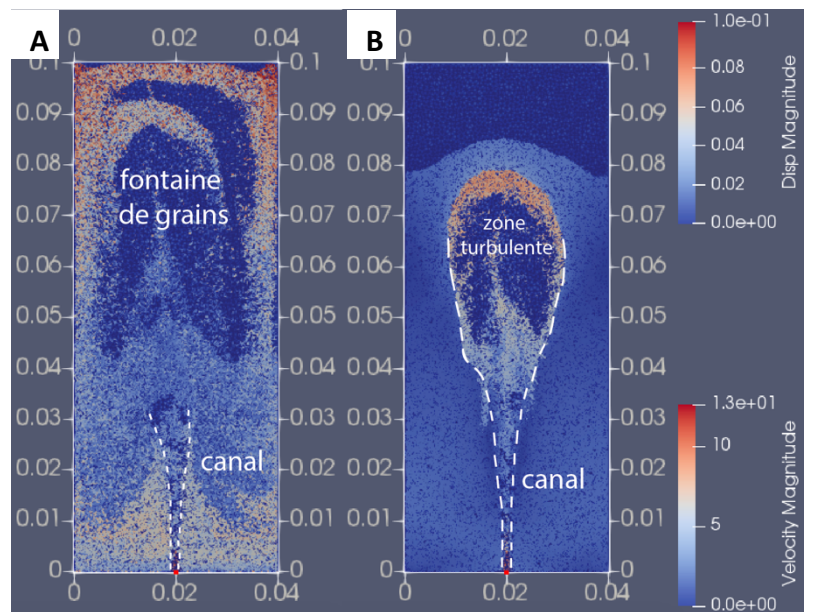


Figure 23 : Illustration du régime de fluidification après injection d'un fluide à la base de la couche à une vitesse de 10 m.s^{-1} . A. Etat de la couche à $1,05$ secondes. A cette vitesse la remobilisation des grains se fait à l'échelle de la couche et il n'y a pas de structure remarquable à l'exception d'un canal au niveau de l'injecteur. B. Etat de la couche à $1,9.10^{-1}$ secondes. Morphologie en deux partie à l'initiation du régime, une partie inférieure conique et une partie supérieure parabolique.

4.2. Expériences analogiques

Les expériences ont été réalisées sur une gamme de débit allant de 10 à 200 mL.min^{-1} , qui correspondent à des vitesses entre $0,2$ et $4,2 \text{ m.s}^{-1}$. Au cours de ces expériences, les régimes qui ont été observés sont le régime de fluidification locale et le régime statique. Notre étude s'est principalement portée sur l'évolution de la morphologie des zones fluidisées au cours du temps.

Cette étude a permis de mettre en évidence trois morphologies de zone fluidisée :

- Une **morphologie en deux parties**, composée d'une partie inférieure turbulente et d'une partie supérieure conique. Cette morphologie s'observe généralement une fois que la zone fluidisée atteint la surface de la couche. C'est la première morphologie qui apparaît au cours du temps et c'est la plus large (Figure 25.A).

- Une **morphologie tubulaire**, plus étroite que la morphologie précédente. Elle est également caractérisée par une petite zone de turbulence à sa base. La zone fluide s'apparente ici plutôt à un canal. Cette zone fluide s'observe généralement à la suite de la première, après un certain temps d'injection dans la couche (Figure 25.B). L'élargissement observé près de la surface libre est la signature fossilisée de la partie conique observée dans le régime précédent.
- Une **morphologie lenticulaire** où la zone fluide est souterraine, il n'y a plus de contact directe entre la zone fluide et la surface. Elle contient également une petite zone turbulente à sa base. Cette dernière morphologie apparaît à la suite de la seconde, pour de faibles débits, lorsque les expériences sont réalisées sur un temps suffisamment long (Figure 25.C).

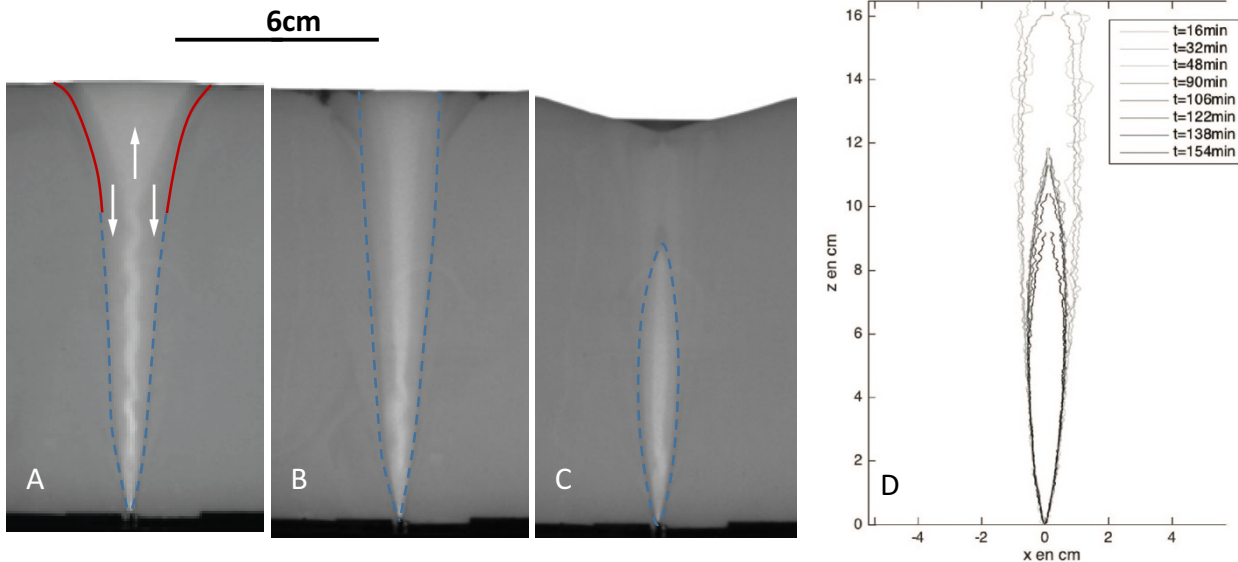


Figure 25 : Illustration des trois morphologies de zones fluides observées pendant les expériences. A. Morphologie en deux parties, où la partie supérieure est conique (rouge) et la partie inférieure est plus droite et turbulente (bleu). C'est la première morphologie observée. Les flèches indiquent le mouvement ascendant des grains au centre et le mouvement descendant sur les bords de la zone. B. Morphologie plus droite, moins large, contient également une petite zone de turbulence à sa base. Elle est une évolution de la première morphologie. C. Morphologie lenticulaire, où la zone fluidisée est souterraine. Elle contient également une petite zone de turbulence à sa base. Elle apparaît, pour de faibles débits, à la suite de la précédente lorsque les expériences sont suffisamment longues. D. Evolution de morphologie de la zone fluidisée formée par un débit de 50 mL/min, au cours du temps. L'expérience a été réalisée avec l'échantillon non tamisé, et les trois morphologies sont observables mais seules les deux dernières sont visibles sur la figure car la première évolue rapidement.

Pour ces trois morphologies, il y a systématiquement un mouvement ascendant de grains (qui sont très agités) au centre et un mouvement descendant sur les bords (Figure 25.A). En surface aucun grain n'est advecté dans la couche de liquide sus-jacente. Et bien qu'il y ait formation d'une zone fluidisée, les expériences ont montré que le fluide diffuse toujours à travers la couche de part et d'autre de cette zone.

Les différentes morphologies ne dépendent pas du débit injecté mais du volume total de liquide injecté. Quel que soit le débit, au moins les deux premières ont été observés. Mais l'évolution d'une morphologie à l'autre se fait plus ou moins rapidement selon le débit : de manière contre-intuitive, un débit faible est associé à une évolution plus rapide. La Figure 25.D illustre l'évolution de la morphologie d'une zone fluidisée formée par à débit d'injection de 50 mL/min dans

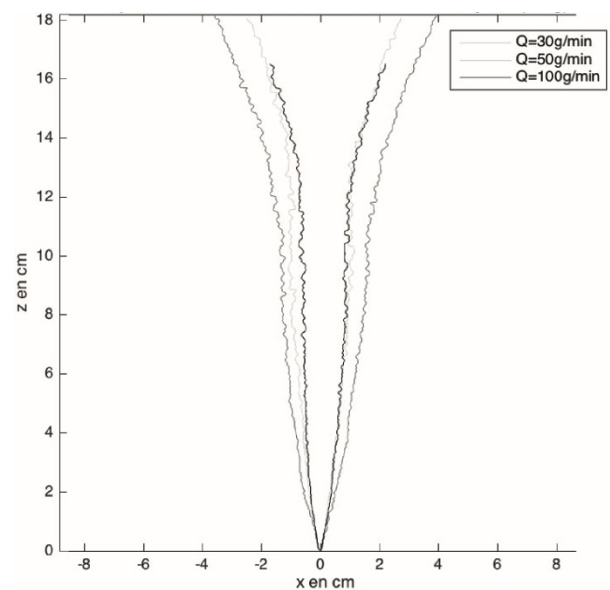


Figure 24 : Comparaison des morphologies des zones fluidisées issues de différents débits Q dans l'échantillon de grains tamisé, à même volume d'eau injecté (500mL). Les zones fluidisées issues des faibles débits ont des dimensions plus grandes (plus haute et plus large) que celle issue de $Q=100$ mL/min.

l'échantillon de grains non tamisé. Certaines expériences ont montré que le stade final de cette évolution est la disparition de la zone fluidisée et une diffusion du fluide à travers la couche.

Les expériences ont montré que pour l'échantillon non tamisé le débit n'a pas d'effet sur la largeur de la zone fluidisée quelle que soit la morphologie, les profils de la zone fluidisée se superposent. En revanche, pour l'échantillon tamisé, le débit a une influence (Figure 24). Les débits qui ont été injectés dans cet échantillon, sont 30, 50 et 100 mL/min. Les analyses montrent que la zone fluidisée formée par les débits de 30 et 50 mL/min est plus grande, que celle formée par le débit de 100mL/min. Cette différence de dimensions disparaît ensuite dû à l'évolution plus rapide des zones formées par les débits de 30 et 50 mL/min.

Les expériences ont également montré que la hauteur de la couche granulaire n'a pas d'effet sur la largeur de la zone fluidisée. Deux expériences (avec l'échantillon non tamisé) avec deux hauteurs de couche et un débit identique de 50 mL/min ont été comparées. La première a été réalisée avec une épaisseur de couche de 20 cm et la seconde avec une épaisseur de 10cm. Dans les deux cas, la zone fluidisée atteint la surface et les contours des zones se superposent sur les 10 premiers centimètres, aux effets de surface libre près (léger évasement du profil pour 10cm) (Figure 26.A). Les deux expériences conduisent également à la formation d'une zone fluidisée souterraine. Les contours des zones fluidisées continuent à se superposer près de l'injection, mais les morphologies semblent homothétiques (Figure 26.B).

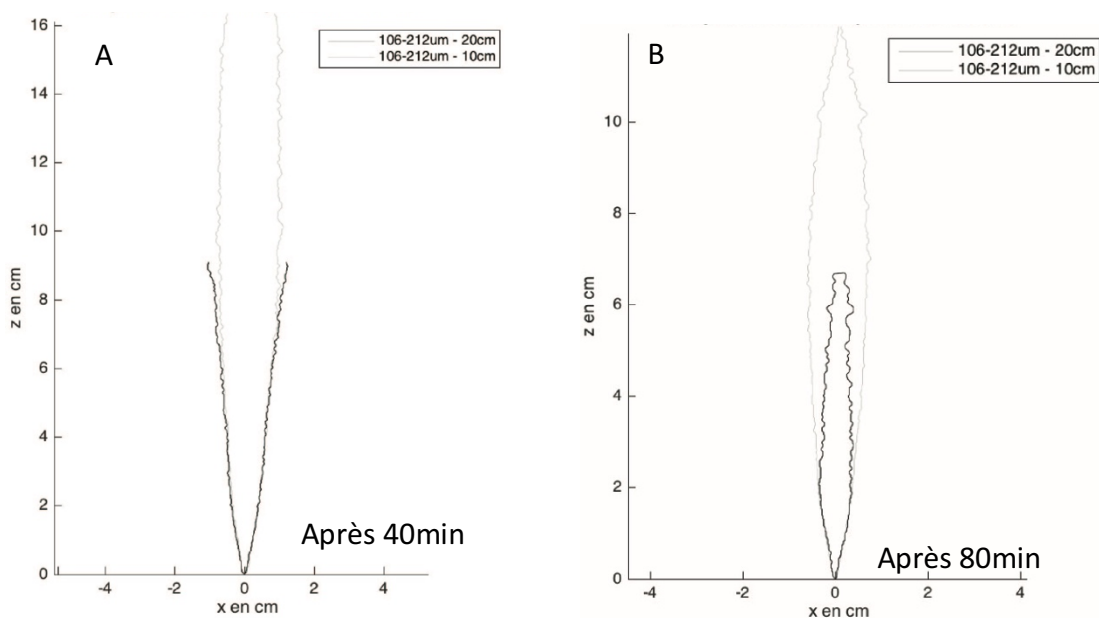


Figure 26 : Comparaison d'une expérience réalisée avec une épaisseur de couche de 20 cm à une expérience réalisée avec une épaisseur de 10cm, toute deux subissant un débit de 50 mL/min. Les échantillons utilisés dans les deux expériences proviennent de l'échantillon non tamisé. Cette comparaison illustre que peu importe la hauteur de la couche de grains, les zones fluidisées ont des largeurs et des formes semblables.

Enfin, les expériences ont mis en évidence différentes topographies qui correspondent à différents stades d'évolution de la zone fluidisée (Figure 27). Ces topographies sont particulièrement visibles dans les expériences réalisées avec l'échantillon tamisé. A l'initiation de la zone fluidisée, lorsque la morphologie est la plus large, la fluidification s'accompagne d'un soulèvement de la couche (Figure 27. A et B). Puis au cours de l'évolution de la fluidification, ce soulèvement disparaît peu à peu jusqu'à ce qu'une dépression apparaisse (Figure 27.C). Cette dépression est particulièrement visible lorsque la zone fluidisée est souterraine (Figure 25.C). Et ce relief négatif est d'autant plus accentué lorsque l'injection est arrêtée, en fin d'expérience (Figure 27.D).

Toutes les analyses faites à partir des résultats expérimentaux se trouvent en annexes, ainsi qu'un récapitulatif de toutes les expériences réalisées.

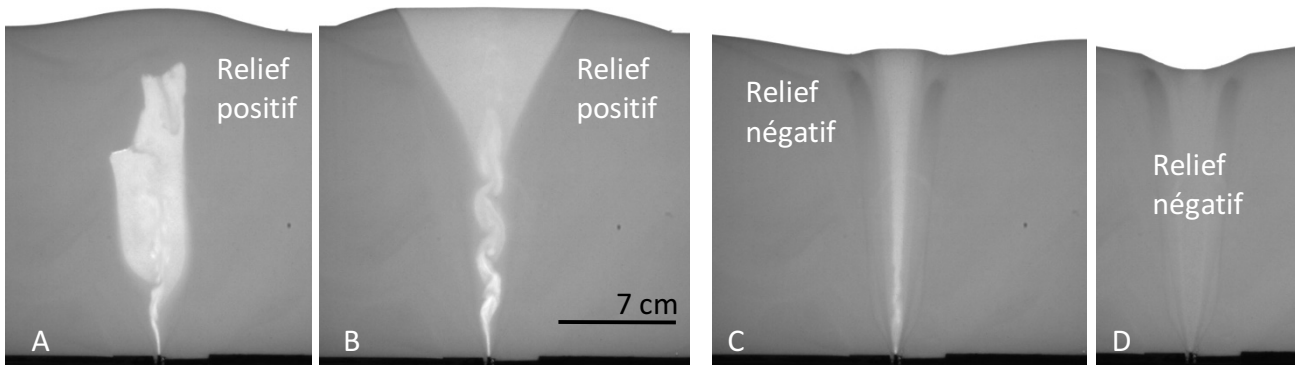


Figure 27 : Illustration des différentes topographies de la couche associées à différents stade d'évolution de la zone fluidisée. Résultats issus d'une expérience réalisée avec l'échantillon tamisé et un débit constant de 50 mL/min. A. Au cours de la formation de la zone fluidisée, le relief à la surface est positif et forme un dôme. B. Une fois la zone fluidisée formée, le relief est toujours positif, mais s'apparente plutôt un plateau. C. Après évolution de la zone et de sa morphologie, le relief est négatif avec une légère bosse au centre. D. Une fois l'injection arrêté le relief se creuse davantage.

5. Discussion

5.1. Discussion des résultats numériques et analogiques

5.1.1. Résultats numériques

Cui et al. (2012) et *Ngoma (2015)* n'ont identifié que trois régimes d'écoulement dans de leurs travaux : 1. un régime statique, 2. un régime de cavité fluidisée et 3. un régime de fluidification locale. Tandis que nos simulations ont mis en évidence quatre régimes distincts : 1. un régime statique, 2. un régime de cavité sans mouvement (viscosité de fluide faible et une couche polydispense) ou un régime de mouvement sans cavité (viscosité élevée et une couche monodisperse), 3. un régime de cavité fluidisée et 4. un régime de fluidification. La variabilité du second régime provient probablement du changement de viscosité du fluide et/ou de la polydispensité de la couche. Dans le cas d'un fluide visqueux, les forces visqueuses permettent de mobiliser les grains plus facilement ce qui est accentué par le comportement cristallin de la couche qui est monodisperse. Dans le cas du fluide moins visqueux, la fluidification est probablement initiée mais elle s'arrête rapidement car le processus de diffusion demande moins d'énergie.

Les résultats de l'étude paramétrique montrent des similitudes et des différences avec l'étude de *Ngoma (2015)*. Dans les deux cas, la vitesse de fluidification augmente avec l'épaisseur de la couche. *Ngoma (2015)* démontre que lorsque la viscosité cinématique du fluide augmente, le régime de cavité n'est observable que sur une gamme de vitesse très restreinte. Et lorsque la viscosité diminue, cette gamme augmente considérablement. Nos résultats démontrent une tendance similaire. Lors de l'étude paramétrique, la viscosité du fluide est de $1.10^{-3} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ et le régime de cavité est observable sur l'intervalle de vitesse de $5,5.10^{-3}$ à $15.10^{-3} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Tandis que lors des simulations des structures d'échappement, avec une viscosité de $1.10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, le régime de cavité est observable sur une gamme de vitesse comprise entre $3,8$ et $9,6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. L'étude de *Ngoma (2015)*, met également en évidence que pour des viscosités de fluide faibles, la vitesse décroît avec la taille de l'injection. Nous avons étudié l'influence de la taille de l'injection que sur des viscosités élevées, il est donc difficile de comparer l'effet de ce paramètre. Ce qui est remarquable malgré tout, c'est que la tendance de nos résultats est inverse : lorsque la taille de l'injecteur diminue, la vitesse critique de fluidification augmente. Enfin le soulèvement de la couche constaté lors des simulations suggère que notre couche granulaire est déposée de façon compacte dans la boîte (*Ngoma, 2015*).

L'analyse des mouvements convectifs des grains montre qu'ils résultent d'un transfert de moment lié au cisaillement visqueux exercé par le fluide sur les particules situées de part et d'autre du canal, qui entraîne un mouvement ascendant. Les particules étant plus denses que le fluide, elles suivent ensuite un

mouvement convectif qui entraîne avec elles le fluide contenu dans le milieu granulaire. Ces mêmes mouvements avaient déjà été observés dans les travaux numériques et expérimentaux de [Philippe et Badiane \(2013\)](#) et [Ngoma \(2015\)](#).

Les simulations des structures d'échappement ont été réalisées avec un nombre important de particules afin d'avoir une couche d'une épaisseur assez conséquente. Plus le nombre de particules est important et plus le temps de calcul est long. A la vue des structures observées expérimentalement (peu étalées horizontalement), il a été privilégié, lors des simulations, d'utiliser une forte épaisseur de couche plutôt qu'une largeur importante. Ce choix a donné lieu à des effets de bords importants ([Figure 23](#) et [Figure 25](#)).

Pour avoir des résultats plus pertinents, il faudrait donc lancer des simulations avec un nombre de grains bien plus important, permettant de simuler une couche de dimensions plus grandes. [Zoueshtiagh et Merlen, \(2007\)](#), définissent grâce à leurs expériences deux quotients qui permettent de s'assurer que le système modélisé (en 3D) est représentatif d'une source ponctuelle dans un domaine infini. Le premier est le quotient entre la taille d'injection et l'épaisseur de la couche (d_i/S) et le second est le quotient entre l'épaisseur de la couche et le rayon de la cellule cylindrique utilisée (S/R). Pour une bonne représentation, les quotients doivent vérifier $d_i/S \leq 0,2$ et $S/R \sim 0,6$. Si ces quotients sont valables en 2D, nos simulations respectent le premier ratio ($\sim 0,015$) mais ne respecte pas le second (3,35), ce qui confirme les effets de bords latéraux observés. Pour que nos simulations soient représentatives il faudrait donc augmenter la largeur de la boîte jusqu'à 10cm.

Les calculs étant très longs, les simulations des structures d'échappement ont été réalisées sur des temps très courts (~ 1 seconde). Cela ne pose pas de problème pour la visualisation de la mise en place des structures, qui se fait très rapidement quelque soit le régime. Mais cela pose problème pour l'étude de l'évolution de ces structures, qui peut être lente. Les résultats reflètent donc seulement la mise en place des structures et leur état ne peut être interprété comme stationnaire. Afin de palier au problème de temps de calcul, des essais de simulation avec des particules plus grosses (de taille millimétrique) ont été réalisés, mais les simulations ont échoué, à cause d'une erreur générée au cours du calcul.

Les résultats obtenus ont seulement permis d'étudier les tendances du système et les formes des structures issues de l'injection de fluide. Pour avoir des résultats plus précis, et une meilleure idée des mécanismes à l'origine de la formation de structures d'échappement, il faudrait faire une étude quantitative de ces simulations. Cela permettrait de définir les lois d'échelles régissant le système, comme cela a pu être fait par [Ngoma \(2015\)](#). Cela permettrait d'étudier, par exemple, les gradients de pression de la couche granulaire au moment de la fluidification, comme cela a été fait par [Cui et al. \(2012\)](#).

5.1.2. Résultats analogiques

Les régimes intermédiaires décrits lors des simulations (2.2 et 4.1.2) et des précédentes expériences (2.3) n'ont pas été observés lors de nos expériences. Les expériences ont permis de voir les formes d'initiation de la fluidification mais ont également permis d'observer l'évolution temporelle et morphologique des zones fluidisées ce qui a été très peu étudié auparavant. Et c'est principalement cette évolution que nous avons étudiés. Les expériences ont permis d'identifier plusieurs morphologies qui témoignent de différents stades d'évolution de ces zones : 1. morphologie en fleur, 2. morphologie tubulaire et 3. morphologie souterraine ([Figure 25](#)). Certaines des morphologies identifiées avaient déjà été observées, comme la morphologie en fleur ([Figure 25.A](#)) qui avait été observé en 3D par [Zoueshtiagh et Merlen \(2007\)](#) et qui avait été qualifiée de cylindrique et légèrement évasée vers le haut et dont la forme s'élargie avec le débit. Ce dernier point a seulement été constaté pour l'échantillon tamisé entre les débits de 30 et 50 mL/min. [Philippe et Badiane \(2013\)](#), décrivent dans le régime de fluidification locale, une cheminée cylindrique en 3D, qui pourrait correspondre à notre seconde morphologie ([Figure 25.B](#)). Seuls [Philippe et al.](#)

(2017) ont observé un passage à une phase souterraine après que la cheminée ait atteint la surface. Cependant les conditions dans lesquels ils ont constaté ce passage sont différentes des nôtres. Leurs expériences montrent qu'une diminution du débit est nécessaire, tandis que nos résultats suggèrent que cette phase est une évolution naturelle des cheminées d'échappement, pour les faibles débits en tout cas. Ces morphologies présentent cependant une différence de forme non négligeable : plutôt arrondie dans les expériences de *Philippe et Badiane (2013)* (Figure 6) contre une forme lenticulaire dans nos expériences (Figure 25.C). Cette différence peut provenir de la différence de dimensions de notre étude, qui est réalisée en 2D, alors que celle de *Philippe et Badiane (2013)* est réalisée en 3D. L'apparition de relief à la surface d'une couche fluidisée avait déjà été observé, par *Zoueshtiagh et Merlen (2007)*, qui avaient constaté la présence d'un cratère et d'un dôme en son centre au dessus des zones fluidisées, similaire au relief de la Figure 27.C. Les mouvements de grains au sein de la zone fluidisée observée lors des expériences (Figure 25) semblent également correspondre à ceux observé par *Philippe et Badiane (2013)* : mouvements descendants sur les bords et mouvements ascendants au centre.

Le fait que les contours des zones fluidisées issues de différents débits, dans l'échantillon non tamisés, se superposent à l'initiation de la fluidification et que l'épaisseur de la couche n'a pas d'effet sur la largeur des zones fluidisées (Figure 26) suggère que c'est la taille de l'injecteur qui contrôle les dimensions des zones. Cependant les contours des zones fluidisées formées dans l'échantillon tamisé (Figure 24), suggère une dépendance au débit, qui avaient déjà été évoquée par *Zoueshtiagh et Merlen (2007)*. Cette différence provient probablement de la différence de granulométrie entre les deux échantillons. Des études supplémentaires avec une plus grande variété de granulométries seraient nécessaires afin de comprendre leur influence.

Les seuls paramètres qui ont été étudiés lors des expériences sont : le débit, la granulométrie et l'épaisseur de la couche. Mais cette étude paramétrique, qualitative, est très limitée avec seulement deux granulométries (très proches) et deux épaisseurs de couche. Il serait intéressant d'approfondir cette étude et d'analyser quantitativement l'influence de la taille de l'injecteur (*Zoueshtiagh et Merlen, 2007* ; *Philippe et Badiane, 2013* ; *Ngoma, 2015*), de la forme des particules (*Alsaydalani et Clayton, 2013*), de la compaction de la couche (*Ngoma, 2015*) et des dimensions de la cellule utilisée. Il serait également pertinent pour comprendre les mécanismes de formation de ces structures d'étudier les gradients de pression du système (*Alsaydalani et Clayton, 2013*), les vitesses du fluide et des particules au sein de la couche ainsi que le comportement individuel des particules.

Une critique que l'on peut faire sur les expériences, est que les conditions limites du système ne sont pas tout à fait représentatives de la réalité. La présence d'un déversoir dans le dispositif (Figure 8), entraîne des variations de la pression de confinement au cours du temps. Tandis que dans la nature, ainsi que dans les simulations numériques, la pression de confinement est constante dans tout le système. De plus les expériences sont réalisées à une échelle beaucoup plus petite et dans un système confiné dû à la représentation en bidimensionnelle.

5.1.3. Conclusions

Les résultats numériques semblent, en majeure partie, confirmer ce qui avait été observé dans les travaux précédents. Mais la nouveauté qu'apporte ces simulations est qu'un nouveau régime intermédiaire a été mis en évidence, et qu'une morphologie similaire à celle que l'on observe expérimentalement, a été observée lors du régime de fluidification, bien qu'elle soit à considérer avec beaucoup de précaution car les effets de bords sont très importants. Les résultats analogiques semblent également confirmer certaines observations qui avaient été faites auparavant. Mais la nouveauté de ce travail est l'étude de l'évolution spatio-temporelle des zones fluidisées formées tandis que les travaux précédents s'étaient principalement intéressés à l'initiation de ces structures.

Les méthodes numérique et expérimentale montrent des résultats complémentaires qui illustrent différents mécanismes des structures d'échappement : les simulations numériques décrivent l'initiation de la fluidification et les expériences analogiques décrivent l'évolution à long terme des morphologies des zones fluidisées. Le seul résultat en commun est la morphologie en fleur (*Figure 23 et Figure 25.B*), bien que lors des simulations numériques cette morphologie soit accompagnée d'un soulèvement de la couche et d'un panache de grains. Ces différences peuvent provenir des conditions limites des deux méthodes qui ne sont pas tout à fait les mêmes. Les résultats numériques demandent encore beaucoup de travail et soulèvent beaucoup de questions. Les résultats analogiques sont assez denses et seront utilisés pour essayer de comprendre les structures observées dans la nature.

Nos travaux se sont basés sur l'étude d'une **injection ponctuelle** de fluide à la base de la couche granulaire. Dans le cas d'une injection sur toute la base, les expériences réalisées par *Mörz et al. (2007)* et *Rigord et al. (2005)* ont montré 3 régimes : 1. Régime statique, 2. Régime de micro-conduits à la surface de la couche et 3. Régime de fracture hydraulique qui forme un conduit traversant toute la couche entraînant une fluidification locale. Le conduit n'est pas fixe et peut se déplacer dans la couche, fluidifiant une zone de plus en plus grande. Ces résultats suggèrent qu'une source ponctuelle n'est pas indispensable à la création de cheminées fluidisées. Cependant considérant les conditions et l'échelle des temps géologiques dans lesquelles se forment les cheminées dans la colonne sédimentaire, l'hypothèse d'une source ponctuelle reste plus plausible. Il paraît très peu probable qu'une cheminée d'échappement puisse se déplacer aussi facilement dans les sédiments. Ce qui confirme que nos méthodes de travail sont adaptées à la problématique.

5.2. Interprétations des structures d'échappement de fluides

Les zones fluidisées des simulations numériques et analogiques caractérisées par une forte remobilisation des grains, sont considérées dans le cadre de cette étude comme des homologues des structures de migration de fluides présentes dans sur les marges continentales.

Les structures observées expérimentalement montrent des similitudes avec les structures observées dans la nature. Les résultats des simulations analogiques montrent que la formation d'une structure en fleur est un stade très précoce de la formation d'une structure d'échappement de fluides. La remobilisation de matière (fluides et sédiments) affecte l'ensemble de la structure et engendre la formation d'un dôme (relief positif) à la surface (*Figure 27. A et B*). Ces structures en fleurs ont également été observés grâce à la sismique par *Gay et al. (2012)*, *Løseth et al. (2011)* et *Dumke et al. (2014)*. *Dumke et al. (2014)* ont observé une structure similaire en mer de Norvège, appelée « Giant Gjallar Vent ». Cette structure géante est caractérisée en profondeur par un conduit vertical qui alimente une structure évasée sous le fond de la mer (*Figure 28*). C'est le principe de structure en fleur avec une tige et sa corolle tel que définie par *Gay et al., 2012*. Sur le fond marin, elle est caractérisée par un relief positif et deux structures d'échappement de fluide. Mais contrairement aux expériences analogiques, cette structure n'atteint pas le sommet

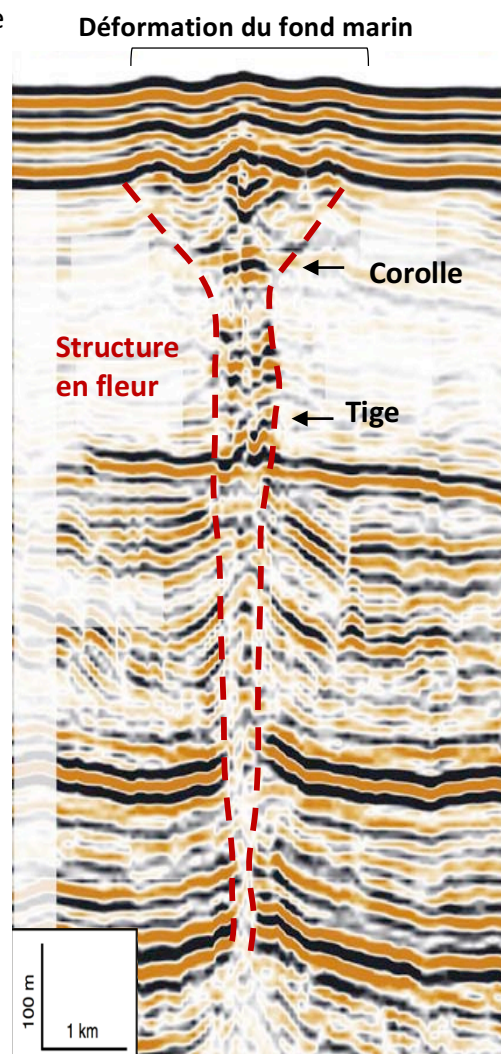


Figure 28 : Profil sismique du « Giant Gjallar Vent », dans le bassin de Norvège, montrant une structure en fleur géante en profondeur, accompagnée de déformations sous forme de dômes sur le fond marin (modifié à partir de *Dumke et al. (2014)*).

de la colonne sédimentaire, elle est scellée par une couche imperméable de sédiments. La présence de cette couche perméable aurait entraîné la suppression à l'origine de la formation des pipes qui apparaissent sur le fond marin (Figure 3.A). Il serait intéressant de recréer ces conditions (couche perméable au sommet de la couche sédimentaire) en expérimental afin de voir si les structures formées sont les mêmes. Les résultats analogiques ont également montré qu'une fois le relief positif créé, le relief de la structure en fleur diminue progressivement jusqu'à devenir négatif et il peut être limité de part et d'autre par des talus, vestiges du relief positif. Les structures en fleur peuvent donc être associées en surface à des reliefs négatifs ou positifs, ce que Løseth et al. (2011) avaient déjà observé. Nos résultats suggèrent donc que ce type de structure correspond au premier stade d'évolution des structures d'échappement de fluide. La Figure 30 illustre les différents stades d'évolution supposés des structures d'échappement, dont le premier correspond aux structures en fleur qualifiées de dôme actif qui sont associées à de forts échappement de fluide en surface et à de grandes structures en profondeur.

Ces structures sous-entendent également des indices de fonctionnement. Elles suggèrent une fracturation conique (Mourgues et al., 2012) qui a été mise en évidence dans plusieurs bassins (Gay et al., 2007, 2012, 2017 ; Dumke et al., 2014) montrant que la zone affectée par les migrations de fluide est bien plus large que celle induite par les sorties de fluide. Cependant les mécanismes physiques à l'origine de la formation et de l'évolution des cheminées de migrations de fluide restent, à ce jour, mal compris, en particulier les interactions entre le fluide qui migre et l'encaissant sédimentaire (Rodrigues et al., 2009). Ils sont pourtant essentiels dans l'industrie marine (pétrolière, gazières, télécoms) car le développement de zones potentielles d'expulsions de fluides représente un risque majeur pour les installations anthropiques, pour la compréhension des fuites depuis les réservoirs enfouis (Mourgues et al., 2012) et pour les échanges entre la lithosphère superficielle et l'hydrosphère voire l'atmosphère.

En analogique, la formation de structures tubulaires résulte de l'évolution d'une structure en fleur. Elles correspondent à un stade plus évolué des cheminées d'échappement de fluides, qui s'associe souvent à une dépression dans laquelle se trouve parfois un petit dôme (Figure 27.C). Ces structures tubulaires ont également été observés sur les marges continentales par Løseth et al. (2009, 2011) et Ho et al. (2012) (Figure 1 et Figure 3.A). La sismique a permis de caractériser la forme en coupe de ces structures qui est circulaire à ovale. Lors de leurs expériences analogiques en 3D, Philippe et Badiane (2013) avaient caractérisé la forme de ce type de structure de cylindrique et nos résultats suggèrent également une forme similaire. Tous les résultats semblent donc converger vers une seule et même forme. Cela suggère que les cheminées tubulaires observables aujourd'hui sont des cheminées plus évoluées que les cheminées en fleur, qui sont caractérisées par une taille plus petite en profondeur et un échappement plus faible en surface. Soit elles sont plus anciennes que les structures en fleur, soit elles subissent un débit moins important permettant une évolution plus rapide vers cette nouvelle morphologie. Elles correspondent au second stade d'évolution des structures d'échappement qui est le stade de dépression active (Figure 30).

L'exploration des marges a mis en évidence que certaines structures d'échappement présentent des traces d'effondrement, par le biais de réflecteurs infléchis vers le bas et d'une dépression sur le fond marin (Figure 29). L'interprétation de ce type de structures effondrées est qu'elles sont d'anciennes structures d'échappement qui sont aujourd'hui inactives, en datant le démarrage de la migration de fluide au

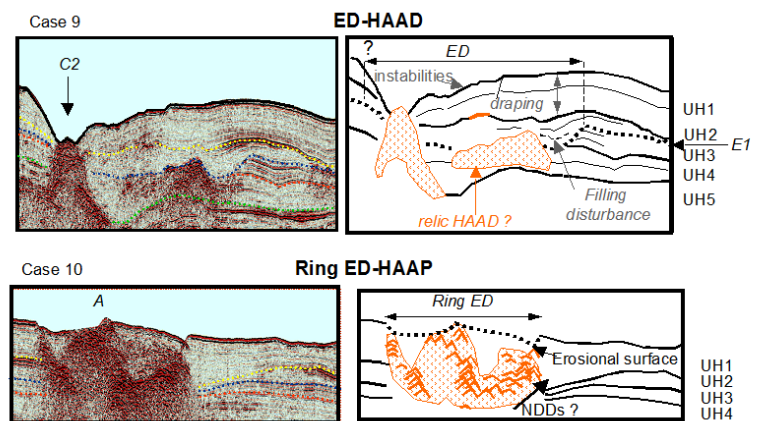


Figure 29 : Profils sismique de structures d'échappement de fluide (Marsset et al., 2018). Case 9 correspond à une structure effondrée, elle est associée en surface à une dépression et à des réflecteurs inclinés vers le bas en profondeur. Case 10 correspond à une structure d'échappement associée à un léger relief positif sans trace d'effondrement. Nos résultats suggèrent que la structure de case 10 serait dans un état antérieur à celui de la structure de case 9.

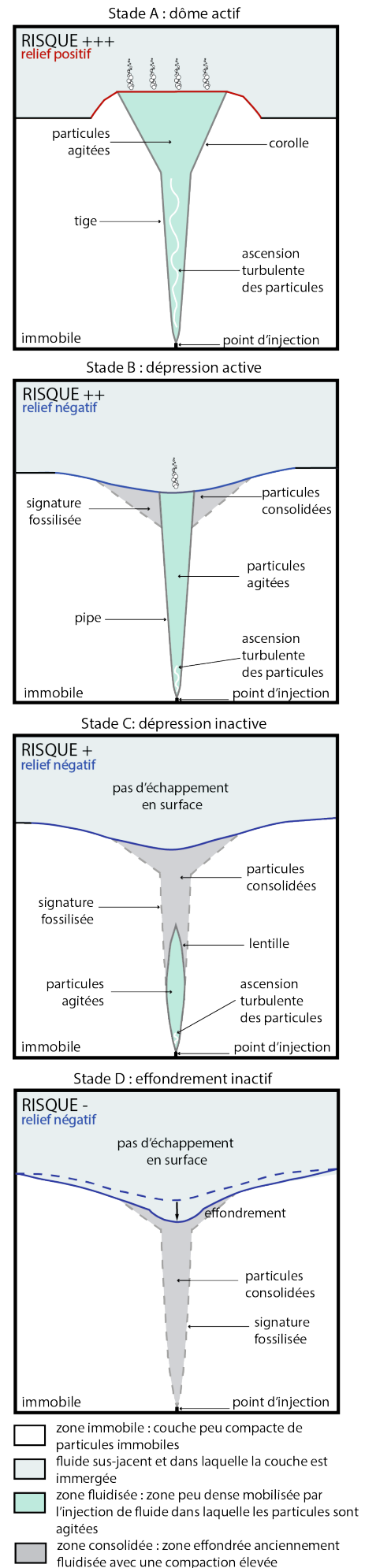
premier réflecteur infléchis (Marsset et al., 2018). Les simulations analogiques confirment une telle hypothèse. Elles montrent que lorsque l'injection de fluide est supprimée, la zone qui avait été fluidisée, la cheminée, s'effondre (Figure 27.D) et laisse une trace derrière elle. Cependant les simulations montrent également qu'il peut y avoir un effondrement surplombant une zone toujours active (Figure 25.C). Ce type de cheminée souterraine est une évolution naturelle, qui intervient plus ou moins rapidement selon le débit (bien qu'elle n'a été observé que pour des débits faibles). La partie supérieure effondrée est sur-consolidée et l'architecture des grains est telle qu'elle permet seulement au fluide de diffuser à la surface. Il est donc possible que certaines des structures considérées comme inactives ne le soient pas, mais qu'elles correspondent à un stade très évolué des cheminées d'échappement, qui est le stade de dépression inactive dont le stade final sera un effondrement complet et inactif (Figure 30).

Un résultat analogique qui est discutable en le comparant aux données sismiques, est la diffusion qui se produit dans la couche granulaire, simultanément à la formation de la zone fluidisée. Si une telle diffusion se produisait dans la colonne sédimentaire, elle serait visible sur les profils sismiques par des anomalies de forte amplitude. Or autour des structures d'échappement il n'y a pas de trace de diffusion et s'il y en avait les structures seraient difficilement visibles car « noyées » dans les anomalies associées à la diffusion.

Nos résultats suggèrent donc que certaines morphologies de structures d'échappement qui ont pu être observé au cours des nombreuses explorations correspondent aux différents stades d'évolution d'une cheminée d'échappement de fluide (Figure 30). Une évolution similaire avait déjà été proposée par Gay et al. (2012). Par le biais de l'étude de la structure géante du bassin norvégien, « Giant Gjallar Vent », ils suggèrent que cette structure, qui est actuellement associée à un relief positif, est dans un stade précoce de développement et que son évolution conduira à son effondrement et la formation de dépressions sur le fond marin. Ce qui suggère que les différentes structures correspondent à différentes fenêtres d'observation dans les processus géologiques à l'origine de la formation de ces cheminées d'échappement de fluide.

Figure 30 : Modèle conceptuel de l'évolution temporelle des structures d'échappement de fluide, réalisé à partir des expériences analogiques. L'évolution est découpée en 4 stades. Stade A : stade précoce des structures d'échappement avec une morphologie en fleur associée à un dôme en surface et à des échappements de fluides à la surface de la couche. Stade B : stade évolué des structures d'échappement avec une morphologie tubulaire associée à une dépression et à des échappements de fluides à la surface de la couche. Stade C : stade évoluée des structures d'échappement avec une morphologie lenticulaire associée à une dépression. La structure est mourante et il n'y a plus d'échappement de fluide à la surface de la couche. Stade D : stade terminal de l'évolution des structures d'échappement correspondant à l'effondrement et la disparition des structures.

TEMPS



Cette hypothèse a un enjeu majeur en terme de risques. Le relief d'une structure reflète son état d'avancement et il permet donc de déterminer quelles structures sont susceptibles d'être stables (*Figure 30*). Une structure à fort relief serait ainsi très peu stable et sujette à un effondrement, tandis qu'une structure à relief négatif serait plus stable car elle serait déjà bien établie et probablement plutôt proche de sa « fin de vie ». Bien qu'un effondrement supplémentaire soit possible s'il existe une structure souterraine car une structure effondrée n'indique pas forcément l'arrêt de son fonctionnement.

6. Conclusions et perspectives

L'objectif de ce stage était d'utiliser une approche couplée pour comprendre et quantifier les mécanismes physiques à l'origine de la formation des structures d'échappements de fluides observées sur les marges continentales. Les simulations numériques et analogiques ont permis de proposer un premier modèle conceptuel sur l'initiation et le fonctionnement de ces structures. Ce modèle retrace l'évolution morphologique de ces structures d'échappement de fluide et permet d'expliquer certaines des morphologies observées lors des explorations géophysiques.

Il reste cependant beaucoup d'incertitudes sur les mécanismes physiques à l'œuvre dans ces structures d'échappement pour lesquelles davantage d'études sont nécessaires. En numérique, il serait par exemple intéressant d'approfondir l'étude paramétrique réalisée, afin de quantifier l'influence des paramètres pour définir des lois d'échelles pertinentes sur les régimes et les structures observées. Il serait pertinent de réaliser des simulations de plus grande échelle pour limiter les effets de bord et pour se rapprocher des conditions expérimentales et naturelles. Il serait également pertinent, lorsque le modèle le permettra, de réaliser les simulations en trois dimensions de systèmes à trois phases, avec l'injection d'un fluide de nature différente que celle du fluide environnant.

Concernant les expériences analogiques, une vérification de leur reproductibilité est indispensable afin de considérer avec certitude les résultats obtenus. Il serait intéressant d'explorer une plus grande gamme de variabilités des paramètres du système afin de comprendre davantage leur influence sur les structures formées et leur évolution dans le temps (par exemple : la taille de l'injecteur, des granulométries plus différentes, des dimensions de cellules différentes). Il serait également intéressant d'étudier l'agitation des particules de la couche avec plus de détail, ce qui permettrait d'avoir une idée plus précise des mouvements qui s'opèrent dans les zones fluidisées. Et enfin, comme en numérique, il serait plus pertinent par la suite de réaliser ces expériences avec l'injection d'un fluide de nature différentes que le fluide environnant et de les réaliser en trois dimensions, afin d'éviter les problèmes de confinement.

L'interprétation des structures observées dans la nature a été réalisée principalement grâce aux structures observées expérimentalement. Pour aller plus loin dans cette comparaison, il existe des systèmes d'acquisition sismique artificiels qui permettent de simuler ce que serait le profil sismique correspondant à une image donnée. Un travail additionnel sur les morphologies analogiques à partir de ces systèmes permettrait donc de vérifier si leur comparaison avec les structures observées en sismique est justifiée.

Gay et al. (2007) avaient remarqué lors de leur étude de la marge continentale du Congo, que parmi tous les pockmarks observés très peu étaient actifs en terme d'échappement de fluide. Les résultats obtenus lors de cette étude suggèrent qu'une structure de type dépression similaire à un pockmark peut correspondre à différents stades d'évolution des structures d'échappement de fluide, avec des dépressions actives et inactives. Il serait donc intéressant d'essayer, à partir du modèle conceptuel, de classer les pockmarks observés par *Gay et al. (2007)* en fonction des différents stades d'évolution d'une structure d'échappement.

7. Références bibliographiques

- B. ANDREOTTI, Y. FORTERRE and O. POULIQUEN, « Les milieux granulaires: entre fluide et solide », EDP Sciences, « Savoirs Actuels », 512 p., 2011.
- M. ALSAYDALANI and C. CLAYTON, « Internal fluidization in granular soils », American Society of Civil Engineers, vol. 140, no. 0413024, 2013.
- J. CARTWRIGHT, M. HUUSE and A.C. APLIN, « Seal bypass system », AAPG, bulletin 91 (8), pp 1141-1166, 2007.
- M. CONSTANT, F. DUBOIS, J. LAMBRECHTS and V. LEGAT, « Implementation of an unresolved stabilised FEM-DEM model to solve immersed granular flows », en cours de rédaction.
- X. CUI, H. LI, A. CHAN, and D. CHAPMAN, « A 2d dem-ibm study on soil behaviour due to locally injected fluid », Particuology, vol. 10, pp. 242–252, 2012.
- J.M. DALLAVALLE and A. KLEMIN, « Micromeritics: the technology of the particles », Pitman Publishing Corporation, 1943.
- I. DUMKE, C. BERNDT, G.J. CRUTCHLEY, S. KRAUSE, V. LIEBETRAU, A. GAY and M. COUILLARD, « Seal bypass at the Giant Gjallar Vent (Norwegian Sea) : Indications for a new phase of fluid venting at a 56-Ma-old fluid migration system », Marine Geology, vol. 351, pp. 38-52, 2014.
- 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, T. CAVAILHES, D. GRAULS, B. MARSSET and T. MARSSET, « Repeated fluid expulsions during events of rapid sea-level rise in the Gulf of Lion, western Mediterranean Sea », Bull. Soc. géol. Fr. 188: 24, 2017.
- 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.
- A. GAY, M. LOPEZ, P. COCHONAT, D. LEVACHE, G. SERMONDADAZ and M. SERANNE, « Evidences of early to late fluid migration from an upper Miocene turbiditic channel revealed by 3D seismic coupled to geochemical sampling within seafloor pockmarks, Lower Congo Basin », Marine and Petroleum Geology, vol.23, pp. 387–399, 2006.
- A. GAY, M. LOPEZ, P. COCHONAT, M. SERANNE, D. LEVACHE and G. SERMONDADAZ, « Isolated seafloor pockmarks linked to BSRs, fluid chimneys, polygonal faults and stacked Oligocene–Miocene turbiditic palaeochannels in the Lower Congo Basin », Marine Geology, vol. 226, pp. 25–40, 2006.
- A. GAY, M. LOPEZ, P. COCHONAT, G. SERMONDADAZ, « Polygonal faults-furrows system related to early stages of compaction – upper Miocene to recent sediments of the Lower Congo Basin », Basin Research, vol.16, issue 1, pp. 101-116, 2004.
- A. GAY, M. LOPEZ, H. ONDREAS, J.-L. CHARLOU, G. SERMONDADAZ and P. COCHONAT, « Seafloor facies related to upward methane flux within a Giant Pockmark of the Lower Congo Basin », Marine Geology, vol.226, pp. 81–95, 2006.
- A. GAY, R. MOURGUES, C. BERNDT, D. BUREAU, S. PLANK, D. LAURENT, S. GAUTIER, C. LAUER and D. LOGGIA, « Anatomy of a fluid pipe in the Norway Basin: Initiation, propagation and 3D shape », Marine Geology, vol.332–334, pp. 75–88, 2012.
- S. HO, J.A. CARTWRIGHT and P. IMBERT, « 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.332–334, pp. 40–55, 2012.
- H. LØSETH, M. GADING and L. WENSAAS, « Hydrocarbon leakage interpreted on seismic data », Marine and Petroleum Geology, vol. 26, pp. 1304–1319, 2009.
- H. LØSETH, L. WENSAAS, B. ARNTSEN, N.-M. HANKEN, C. BASIRE and K. GRAUE, « 1000 m long gas blow-out pipes », Marine and Petroleum Geology, vol. 28, pp. 1047-1060, 2011.
- T. MARSSET, L. RUFFINEA, A. GAY, S. KERA and E. CAUQUILC, « Types of fluid-related features controlled by sedimentary cycles and fault network in deepwater Nigeria », Marine and Petroleum Geology, vol. 89, pp. 330-349, 2018.
- D. MONNIER, A. GAY, P. IMBERT, T. CAVAILHES, R. SOLIVA and M. LOPEZ, « 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, vol. 79, pp. 1-18, 2015.
- D. MONNIER, P. IMBERT, A. GAY, R. MOURGUES and M. LOPEZ, « Pliocene sand injectites from a submarine lobe fringe during hydrocarbon migration and salt diapirism: a seismic example from the Lower Congo Basin », Geofluids, vol. 14, pp. 1-19, doi: 10.1111/gfl.12057, 2014.
- T. MÖRZ, E. A. KARLIK, S. KREITER, A. KOPF, « An experimental setup of fluid venting in unconsolidated sediments: New insights to fluid mechanics and structures », Sedimentary Geology, vol 196, pp 251-267, 2007.
- R. MOURGUES, D. BUREAU, L. BODET, A. GAY and J.B. GRESSIER, « Formation of conical fractures in sedimentary basins : Experiments involving pore fluids and implications for sandstone intrusion mechanisms », Earth and Planetary Sciences Letters, vol. 313-314, pp. 67-78, 2012.
- R. MOURGUES, J.B. GRESSIER, L. BODET, D. BUREAU and A. GAY, « « Basin scale » versus « localized » pore pressure/stress coupling – Implications for a trap integrity evaluation », Marine and Petroleum Geology, vol. 28, pp. 1111-1121, 2011.
- 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. <tel-01151604>
- P. PHILIPPE and M. BADIANE, « Localized fluidization in a granular medium », Physical Review E, vol. 87, no. 042206, 2013.
- P. PHILIPPE, S. MENA, F. BRUNIER-COULIB and J. CURTIS, « An experimental study of the transient regime to fluidized chimney in a granular medium », EPJ Web of Conferences, 140, 09030, doi : 10.1051/epjconf/201714009030, 2017.

P. RIGORD, A. GUARINO, V. VIDAL, and J. GEMINARD, « Localized instability of a granular layer submitted to an ascending liquid flow », *Granular Matter*, vol. 7, pp. 191– 197, 2005.

N. RODRIGUES, P.R. COBBOLD and H. LØSETH, « Physical modelling of sand injectites », *Tectonophysics*, vol. 475, pp. 610-632, 2009.

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.

G. VARAS, G. RAMOS, J-C. GEMINARD and V. VIDAL, « Flow and fracture in water-saturated, unconstrained granular beds », *Front. Phys.* 3:44, doi: 10.3389/fphy.2015.00044, 2015

K.E. WEBB, Ø. HAMMER, A. LEPLAND and J.S. GRAY, « Pockmarks in the inner Oslofjord, Norway », *Geo-Marine Lett.*, vol29, pp. 111-124, 2009.

F. ZOUESHTIAGH and A. MERLEN, « Affect of a vertically flowing water jet underneath a granular bed », *Physical Review E*, vol. 75, no. 056313, 2007.

8. Remerciements

Je souhaite tout d’abord remercier mes encadrants pour leur accompagnement et leur disponibilité tout au long de mon stage. Je les remercie de m’avoir donné l’opportunité de travailler sur un sujet qui m’a permis de développer différentes compétences et une certaine polyvalence qui sera très certainement un plus pour la suite. Je remercie mes maîtres de stage Aurélien GAY et Alfredo TABOADO pour leurs conseils et leur partage de savoir. Je remercie Emilien AZEMA, Frédéric DUBOIS et Rémi MOZUL qui ont joué un rôle important dans la bonne réalisation et la compréhension des simulations numériques. Je remercie également Valérie VIDAL pour son accueil chaleureux et son accompagnement au laboratoire de physique à l’ENS Lyon qui m’a permis de découvrir un nouveau cadre de travail et les nombreuses péripéties associées au monde de l’expérimental.

9. Calendrier de répartition des tâches

	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai
Etude bibliographique	■	■			■
Formation LMGC90		■			
Simulations numériques : étude paramétrique		■	■		
Simulations numériques : structures d'échappement			■	■	■
Expériences analogiques (à l'ENS Lyon)				■	
Analyse des données expérimentales				■	
Rédaction du rapport					■

10. Annexes

10.1. Simulations numériques

Liste des simulations réalisées dans le cadre de l'étude paramétrique (les données en *gras* représentent les paramètres dont la valeur a été changée pour l'étude).

Tableau 3 : Liste des simulations réalisées dans le cadre de l'étude paramétrique

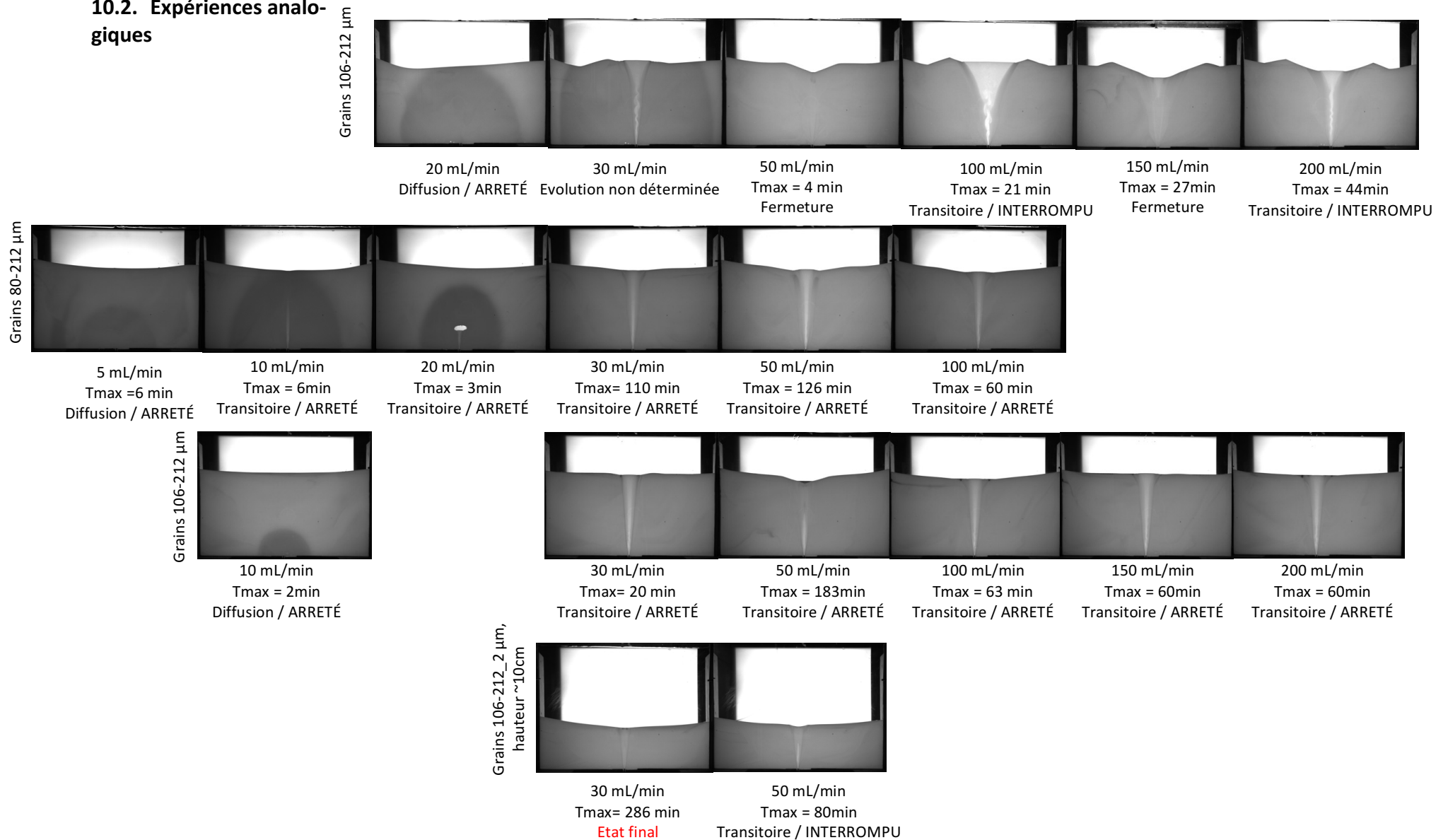
	TAILLE DES GRAINS (m)	NOMBRE DE GRAINS	DENSITE DE FLUIDE	DENSITE DE SOLIDE	VISCOSITE CINEMATIQUE DU FLUIDE (m ² /s)	VITESSE D'INJECTION (m/s)	OUVERTURE D'INJECTION (m)	COEFFICIENT DE FRICTION	MAILLAGE (m)	PAS DE TEMPS (s)
VITESSE	0,9.10 ⁻⁴ - 1,1.10 ⁻⁴	5000	1000	2500	1.10 ⁻³	3,3.10⁻³	1.10 ⁻³	0	1.10 ⁻³	1.10 ⁻²
	0,9.10 ⁻⁴ - 1,1.10 ⁻⁴	5000	1000	2500	1.10 ⁻³	5.10⁻³	1.10 ⁻³	0	1.10 ⁻³	1.10 ⁻²
	0,9.10 ⁻⁴ - 1,1.10 ⁻⁴	5000	1000	2500	1.10 ⁻³	5,5.10⁻³	1.10 ⁻³	0	1.10 ⁻³	1.10 ⁻²
	0,9.10 ⁻⁴ - 1,1.10 ⁻⁴	5000	1000	2500	1.10 ⁻³	6.10⁻³	1.10 ⁻³	0	1.10 ⁻³	1.10 ⁻²
	0,9.10 ⁻⁴ - 1,1.10 ⁻⁴	5000	1000	2500	1.10 ⁻³	6,5.10⁻³	1.10 ⁻³	0	1.10 ⁻³	1.10 ⁻²
	0,9.10 ⁻⁴ - 1,1.10 ⁻⁴	5000	1000	2500	1.10 ⁻³	7.10⁻³	1.10 ⁻³	0	1.10 ⁻³	1.10 ⁻²
	0,9.10 ⁻⁴ - 1,1.10 ⁻⁴	5000	1000	2500	1.10 ⁻³	9.10⁻³	1.10 ⁻³	0	1.10 ⁻³	1.10 ⁻²
	0,9.10 ⁻⁴ - 1,1.10 ⁻⁴	5000	1000	2500	1.10 ⁻³	1,5.10⁻²	1.10 ⁻³	0	1.10 ⁻³	1.10 ⁻²
	0,9.10 ⁻⁴ - 1,1.10 ⁻⁴	5000	1000	2500	1.10 ⁻³	2.10⁻²	1.10 ⁻³	0	1.10 ⁻³	1.10 ⁻²
	0,9.10 ⁻⁴ - 1,1.10 ⁻⁴	5000	1000	2500	1.10 ⁻³	2,5.10⁻²	1.10 ⁻³	0	1.10 ⁻³	1.10 ⁻²
	0,9.10 ⁻⁴ - 1,1.10 ⁻⁴	5000	1000	2500	1.10 ⁻³	3.10⁻²	1.10 ⁻³	0	1.10 ⁻³	1.10 ⁻²
	0,9.10 ⁻⁴ - 1,1.10 ⁻⁴	5000	1000	2500	1.10 ⁻³	3,3.10⁻²	1.10 ⁻³	0	1.10 ⁻³	1.10 ⁻²
	0,9.10 ⁻⁴ - 1,1.10 ⁻⁴	5000	1000	2500	1.10 ⁻³	5.10⁻²	1.10 ⁻³	0	1.10 ⁻³	1.10 ⁻²
	0,9.10 ⁻⁴ - 1,1.10 ⁻⁴	5000	1000	2500	1.10 ⁻³	7.10⁻²	1.10 ⁻³	0	1.10 ⁻³	1.10 ⁻²
	0,9.10 ⁻⁴ - 1,1.10 ⁻⁴	5000	1000	2500	1.10 ⁻³	9.10⁻²	1.10 ⁻³	0	1.10 ⁻³	1.10 ⁻²
	0,9.10 ⁻⁴ - 1,1.10 ⁻⁴	5000	1000	2500	1.10 ⁻³	1.10⁻¹	1.10 ⁻³	0	1.10 ⁻³	1.10 ⁻²
	0,9.10 ⁻⁴ - 1,1.10 ⁻⁴	5000	1000	2500	1.10 ⁻³	2.10⁻¹	1.10 ⁻³	0	1.10 ⁻³	1.10 ⁻²
0,9.10 ⁻⁴ - 1,1.10 ⁻⁴	5000	1000	2500	1.10 ⁻³	3,3.10⁻¹	1.10 ⁻³	0	1.10 ⁻³	1.10 ⁻²	
0,9.10 ⁻⁴ - 1,1.10 ⁻⁴	5000	1000	2500	1.10 ⁻³	1	1.10 ⁻³	0	1.10 ⁻³	1.10 ⁻²	
0,9.10 ⁻⁴ - 1,1.10 ⁻⁴	5000	1000	2500	1.10 ⁻³	3,3.10¹	1.10 ⁻³	0	1.10 ⁻³	1.10 ⁻²	
TAILLE D'INJECTEUR	0,9.10 ⁻⁴ - 1,1.10 ⁻⁴	5000	1000	2500	1.10 ⁻³	5,5.10 ⁻³	1.10⁻⁵	0	1.10 ⁻³	1.10 ⁻²
	0,9.10 ⁻⁴ - 1,1.10 ⁻⁴	5000	1000	2500	1.10 ⁻³	5,5.10 ⁻³	1.10⁻⁴	0	1.10 ⁻³	1.10 ⁻²
	0,9.10 ⁻⁴ - 1,1.10 ⁻⁴	5000	1000	2500	1.10 ⁻³	5,5.10 ⁻³	3,7.10⁻⁴	0	1.10 ⁻³	1.10 ⁻²

Liste des simulations modélisant les structures d'échappement de fluide.

Tableau 4 : Liste des simulations réalisées dans le cadre de la simulation des structures d'échappement de fluides.

	TAILLE DES GRAINS (m)	NOMBRE DE GRAINS	DENSITE DE FLUIDE	DENSITE DE SOLIDE	VISCOSITE CINEMATIQUE DU FLUIDE (m ² /s)	VITESSE D'INJECTION (m/s)	OUVERTURE D'INJECTION (m)	COEFFICIENT DE FRICTION	MAILLAGE (m)	PAS DE TEMPS (s)
essai1	1,1.10 ⁻⁴ - 3,5.10 ⁻⁴	40 000	1000	2500	1.10 ⁻⁶	18	1.10 ⁻³	0,3	1.10 ⁻³	1.10 ⁻⁴
essai2	0,2.10 ⁻⁴ - 2.10 ⁻⁴	50 000	1000	2500	1.10 ⁻⁶	10	1.10 ⁻³	0,3	1.10 ⁻³	1.10 ⁻⁴
essai3	0,2.10 ⁻⁴ - 2.10 ⁻⁴	40 000	1000	2500	1.10 ⁻⁶	10	1.10 ⁻³	0,3	1.10 ⁻³	1.10 ⁻⁴
essai5	0,2.10 ⁻⁴ - 2.10 ⁻⁴	50 000	1000	2500	1.10 ⁻⁶	8	1.10 ⁻³	0,3	1.10 ⁻³	1.10 ⁻⁴
essai6	0,2.10 ⁻⁴ - 2.10 ⁻⁴	40 000	1000	2500	1.10 ⁻⁶	8	1.10 ⁻³	0,3	1.10 ⁻³	1.10 ⁻⁴
essai7	0,2.10 ⁻⁴ - 2.10 ⁻⁴	50 000	1000	2500	1.10 ⁻⁶	9	1.10 ⁻³	0,3	1.10 ⁻³	1.10 ⁻⁴
essai11	0,2.10 ⁻⁴ - 2.10 ⁻⁴	40 000	1000	2500	1.10 ⁻⁶	8,5	1.10 ⁻³	0,3	1.10 ⁻³	1.10 ⁻⁴
essai13	0,2.10 ⁻⁴ - 2.10 ⁻⁴	60 000	1000	2500	1.10 ⁻⁶	8	1.10 ⁻³	0,3	1.10 ⁻³	1.10 ⁻⁴
essai14	0,2.10 ⁻⁴ - 2.10 ⁻⁴	80 000	1000	2500	1.10 ⁻⁶	8,8	1.10 ⁻³	0,3	1.10 ⁻³	1.10 ⁻⁴
essai15	0,2.10 ⁻⁴ - 2.10 ⁻⁴	60 000	1000	2500	1.10 ⁻⁶	9	1.10 ⁻³	0,3	1.10 ⁻³	1.10 ⁻⁴
essai16	0,2.10 ⁻⁴ - 2.10 ⁻⁴	60 000	1000	2500	1.10 ⁻⁶	10	1.10 ⁻³	0,3	1.10 ⁻³	1.10 ⁻⁴
essai38	0,2.10 ⁻⁴ - 2.10 ⁻⁴	50 000	1000	2500	1.10 ⁻⁶	9,6	1.10 ⁻³	0,3	1.10 ⁻³	1.10 ⁻⁴
essai1_gg	4.10 ⁻⁴ - 7.10 ⁻⁴	40 000	1000	2500	1.10 ⁻⁶	10	1.10 ⁻³	0,3	3.10 ⁻³	1.10 ⁻⁴
essai2_gg	4.10 ⁻⁴ - 6,5.10 ⁻⁴	10 000	1000	2500	1.10 ⁻⁶	8	1.10 ⁻³	0,3	3.10 ⁻³	1.10 ⁻⁴
essai3_gg	4.10 ⁻⁴ - 6,5.10 ⁻⁴	10 000	1000	2500	1.10 ⁻⁶	9	1.10 ⁻³	0,3	3.10 ⁻³	1.10 ⁻⁴
essai4_gg	4.10 ⁻⁴ - 7.10 ⁻⁴	10 000	1000	2500	1.10 ⁻⁶	7	1.10 ⁻³	0,3	3.10 ⁻³	1.10 ⁻⁴
essai5_gg	4.10 ⁻⁴ - 7.10 ⁻⁴	20 000	1000	2500	1.10 ⁻⁶	10	1.10 ⁻³	0,3	3.10 ⁻³	1.10 ⁻⁴

10.2. Expériences analogiques

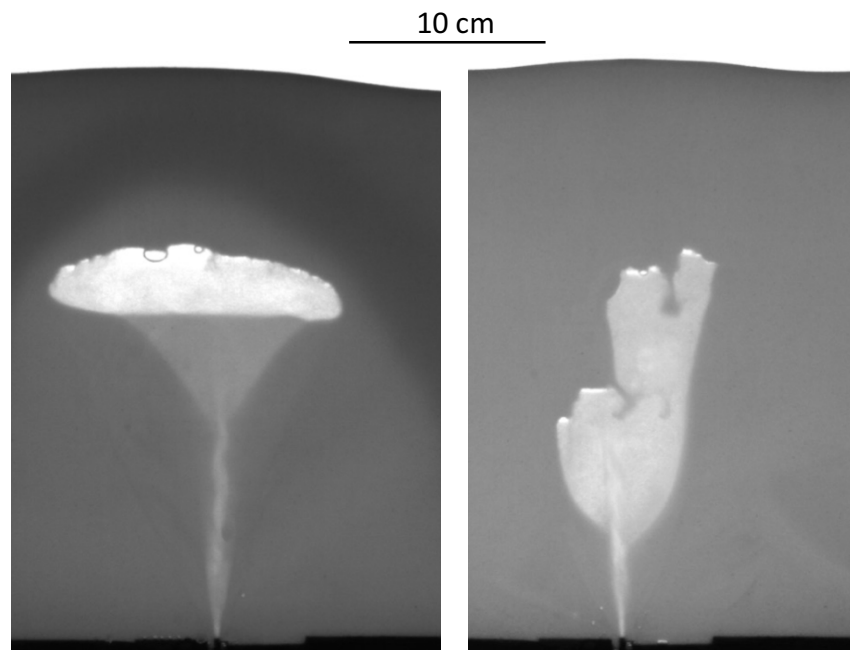


Annexe 1 : Récapitulatif de toutes les expériences analogiques qui ont été réalisées. La première ligne correspond à une première série de manipulations réalisée avec la granulométrie non tamisée, mais dont les conditions n'étaient pas optimales : l'injecteur n'était pas protégé, ce qui entraînait une chute des grains à l'intérieur et qui ajoutait de la surpression au système. La seconde ligne correspond à une seconde série de manipulations réalisée avec la granulométrie tamisée, l'injecteur était ici protégé. La troisième ligne correspond à une troisième série de manipulations réalisées avec la granulométrie non tamisée, comme pour la première série mais avec cette fois l'injecteur protégé. Et enfin la dernière ligne correspond à une dernière série de manipulation, identique à la précédente sauf que la hauteur de la couche de grains a été divisée par 2. Pour chaque expérience, il est précisé le débit constant injecté, la durée T_{max} de l'expérience, l'état de la fluidification à la fin de l'expérience et la raison pour laquelle l'expérience a été arrêtée.

Le récapitulatif (*annexe 1*) présente toutes les expériences qui ont été réalisées. Les expériences de la première, la troisième et la quatrième ligne ont été réalisées avec l'échantillon de grains non tamisé (106-212 μ m), et celles de la deuxième ligne ont été réalisées avec l'échantillon tamisé (80-212 μ m). Les expériences de la quatrième ligne ont été faites avec une hauteur de couche de grains initiale deux fois plus petite que les autres expériences. Les conditions expérimentales de la première ligne sont légèrement différentes des trois autres lignes, entraînant une augmentation de la surpression à l'injecteur. Toutes les expériences illustrées dans ce tableau récapitulatif ont été analysées, à l'exception de la première ligne d'expériences.

10.2.1. Résultats

Lors de l'initiation des zones fluidisées, plusieurs morphologies de progression ont été observées. Certaines morphologies d'initiation ressemblent fortement aux morphologies en deux parties des zones établies et d'autres ont une forme beaucoup plus digitée (*annexe 2*).



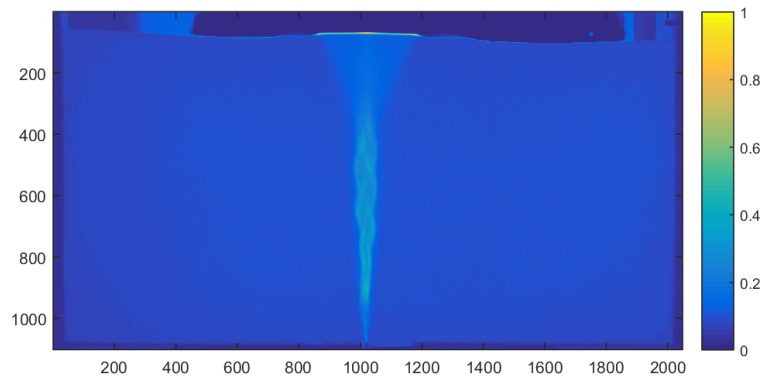
Annexe 2 : Morphologie des zones fluidisées à l'initiation de l'injection. A. Morphologie ressemblant fortement aux morphologie en deux parties observées par la suite. Morphologie observée lors d'une expérience réalisée dans l'échantillon tamisé, sur une épaisseur de 20cm et avec un débit d'injection de $Q=30\text{mL/min}$ B. Morphologie digitée observée lors d'une expérience réalisée dans l'échantillon tamisé, sur une épaisseur de 20cm et avec un débit d'injection de $Q=50\text{mL/min}$.

Un résultat contre-intuitif a également été remarqué lors des dernières expérimentations. Avec un dispositif expérimental correspondant à la dernière série de manipulation (granulométrie non tamisée et épaisseur de couche divisée par 2), nous avons augmenté le débit de l'injection une fois qu'une zone fluidisée était établie. Nous sommes partis d'un débit de $Q=30\text{ mL/min}$ et nous avons atteint progressivement un débit de $Q=150\text{ mL/min}$. Le résultat de cette augmentation est l'accélération de l'évolution de la zone fluidisée qui passe rapidement de la morphologie en deux parties, à la morphologie tubulaire jusqu'à la morphologie souterraine. La zone fluidisée a ensuite rapidement disparue, en quelques minutes. Cette disparition rapide est très étonnante car pour un débit de $Q=30\text{ mL/min}$, pour lequel l'évolution est la plus rapide à débit constant, une même disparition avait été observée mais après 5h de manipulation. Cet effet a été observé à deux reprises, mais plus d'expériences seraient nécessaires afin de vérifier sa véracité et de comprendre son origine.

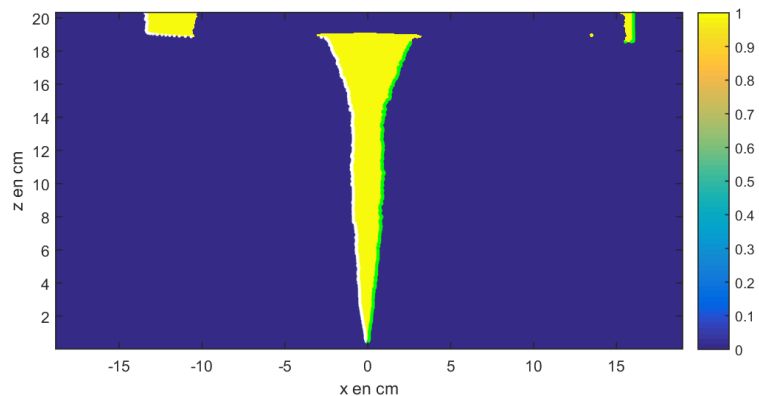
10.2.2. Analyse des résultats

1. Traitement des photos des expériences

Voici deux exemples de photos issues du traitement des photos prises lors des expériences. La première (*annexe 3*) correspond à l'image cumulée normalisée des mouvements qui se sont opérés dans la couche granulaire. Les mouvements mis en évidence dessinent la zone fluidisée. Et la seconde (*annexe 4*) correspond à l'image cumulée binarisée et lissée mettant en évidence la zone fluidisée. Les deux images sont issues d'une expérience réalisée avec l'échantillon de grains non tamisé, avec une hauteur de couche d'une vingtaine de centimètre et un débit de 50mL/min après 16 min d'injection.



Annexe 4 : Image cumulée normalisée des mouvements de la couche. La couleur bleue indique peu ou pas de mouvement de grains et la couleur jaune indique au contraire beaucoup de mouvement.



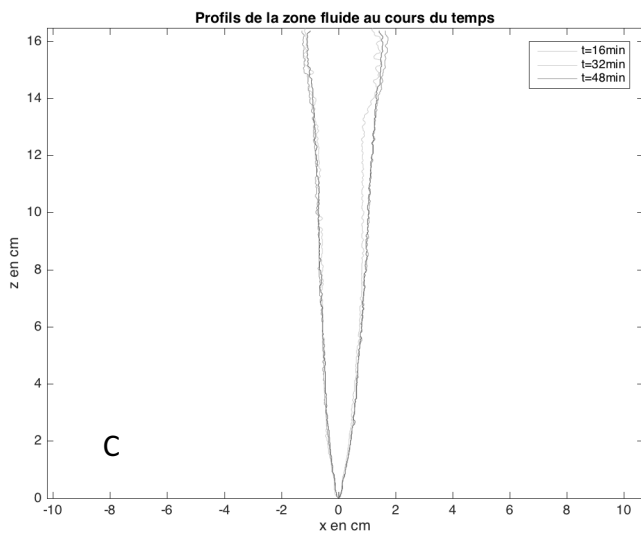
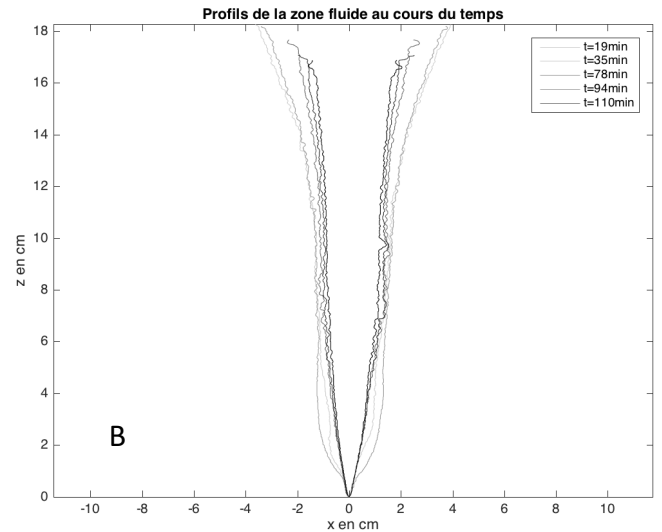
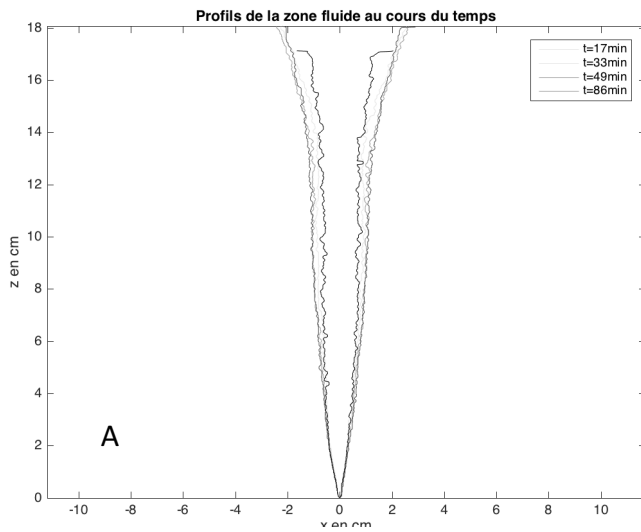
Annexe 3 : Image cumulée binarisée et lissée, la couleur bleue correspond à la couche immobile et la couleur jaune correspond à la zone fluidisée dans laquelle les grains sont en mouvement. La ligne blanche correspond au profil gauche de la zone fluidisée et la verte au profil droit, qui correspondent aux premières et dernières valeurs positives de chaque ligne de la matrice..

2. Analyse temporelle de la zone fluidisée

Les profils temporels des zones fluidisées ont été obtenue pour toutes les expériences traitées et les résultats sont les suivants :

- Deuxième série de manipulation

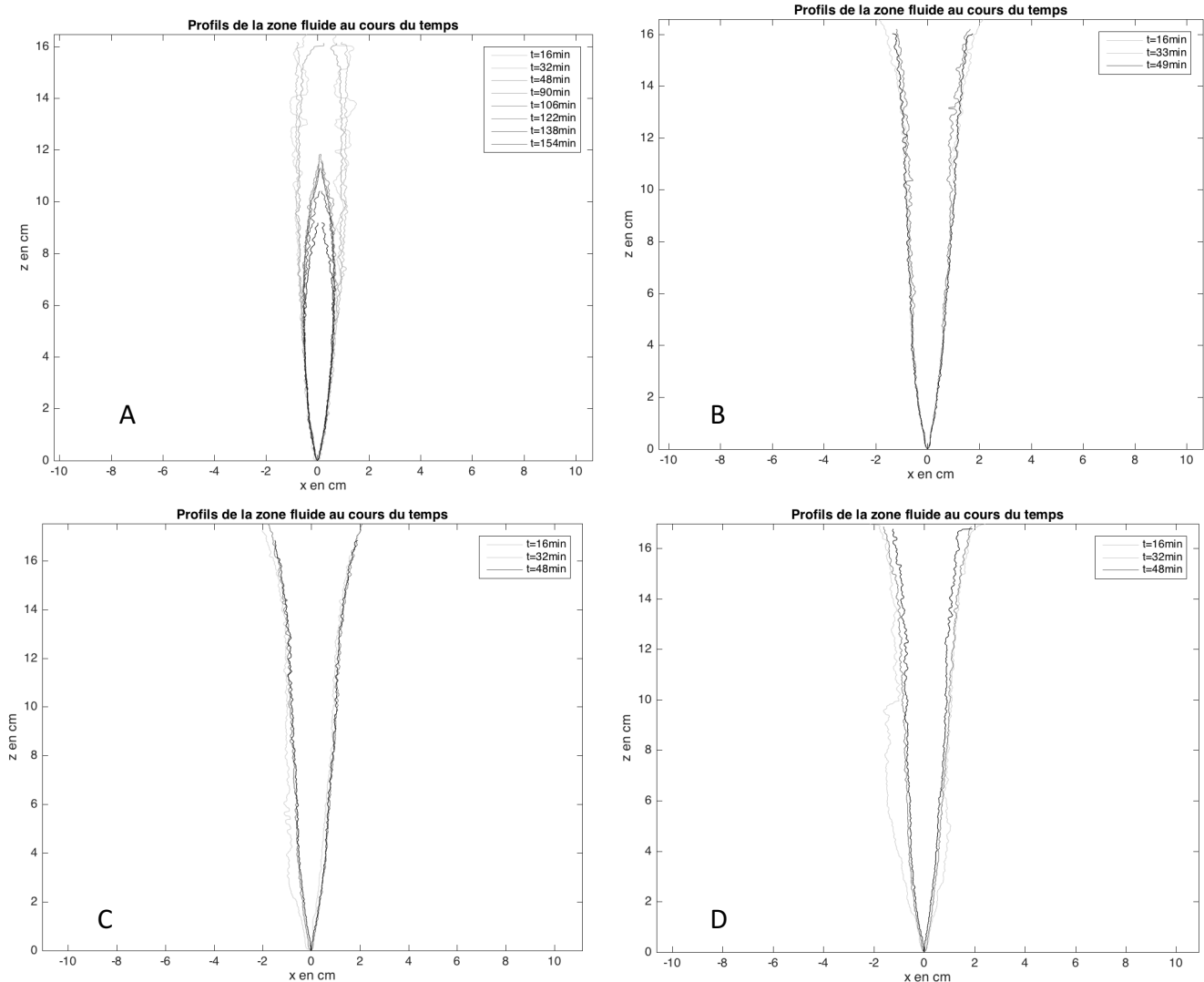
Pour les faibles débits, la zone fluidisée a d'abord une forme large et évasée vers la surface, qui se réduit au cours du temps (*annexe 5.A et B*). Tandis que pour $Q=100\text{mL/min}$ (*annexe 5.C*), la taille et la forme de la zone fluidisée reste plus ou constante pendant toute la durée de l'expérience.



Annexe 5 : Profils temporels de la zone fluidisée pour un débit de 30 mL/min (A), 50 mL/min (B) et 100 mL/min (C) dans l'échantillon tamisé.

- Troisième série de manipulations

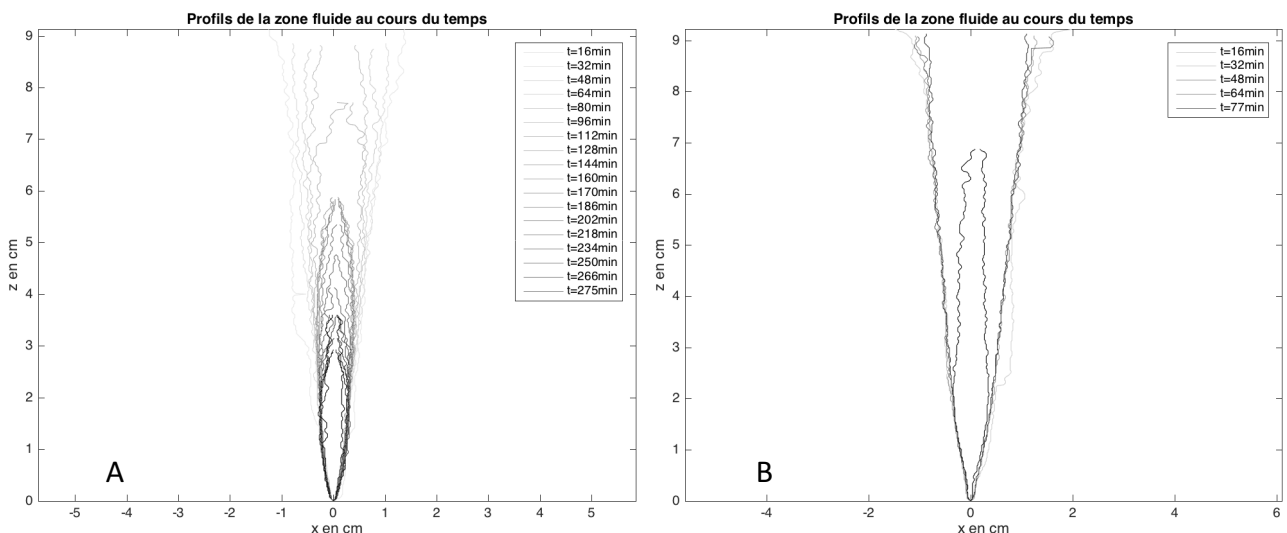
Contrairement aux expériences précédentes, les zones fluidisées semblent toutes avoir des dimensions très similaires (*annexe 6*). La zone fluidisée formée par le débit de $Q=50\text{ mL/min}$ (*annexe 6.A*) à évoluée jusqu'à atteindre un stade souterrain contrairement aux autres zones fluides qui sont restées dans un stade ouvert.



Annexe 6 : Profils temporels de la zone fluidisée pour les débits de A. 50mL/min, B. 100 mL/min, C. 150g :min et D. 200mL/min dans l'échantillon de grains non tamisé.

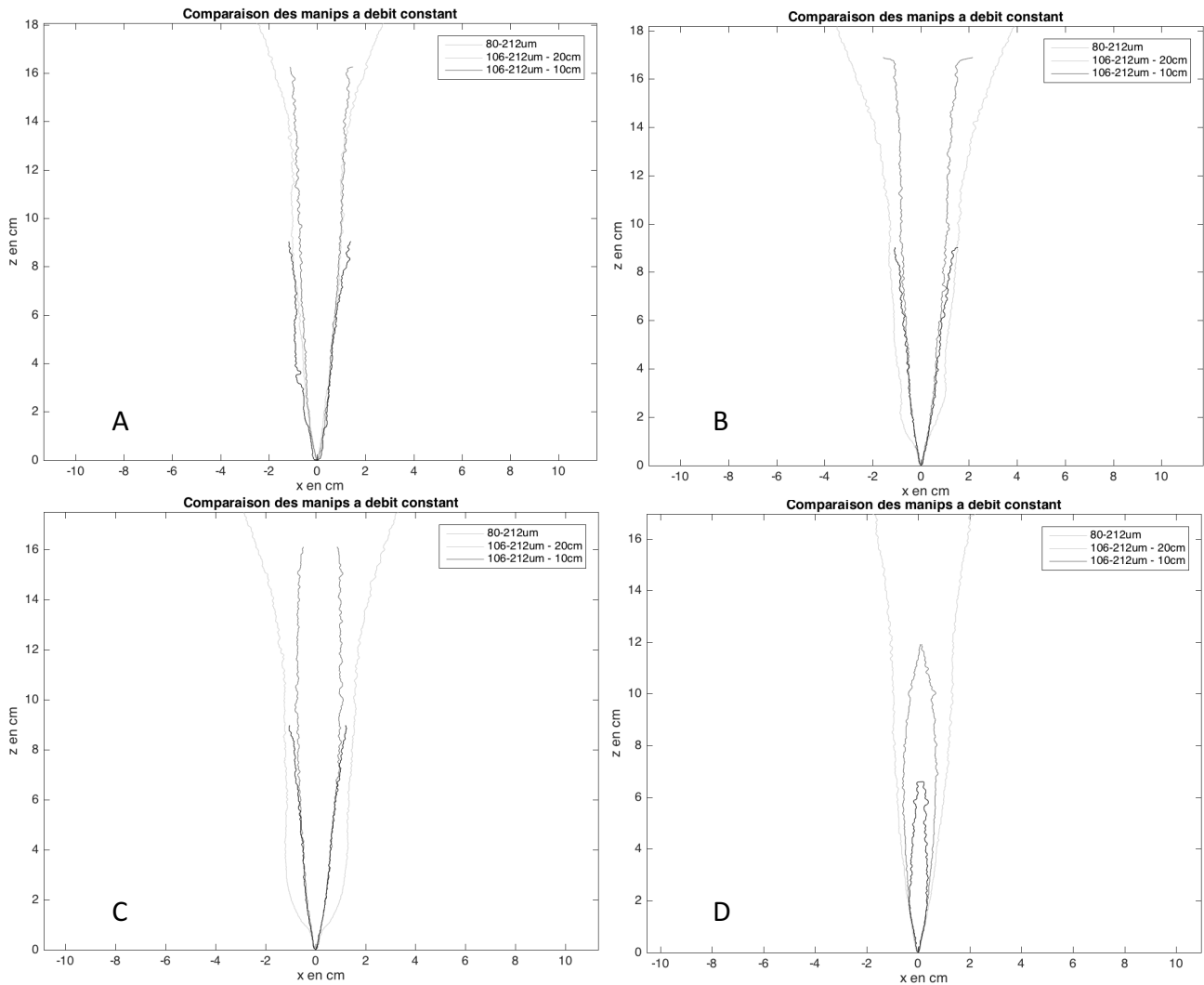
- Quatrième série de manipulations

Les deux zones fluidisées formées au cours des manipulations ont toutes les deux atteint le stade sou-terrain et semblent avoir des dimensions très similaires (annexe 7). La zone fluidisée form e par le débit de $Q=30$ mL/min (annexe 7.1) se démarque par sa fermeture au bout de 286min.



Annexe 7 : Profils temporelles des zone fluidisée pour des débits de A. 30mL/min et B. 50mL/min dans l'échantillon non tamisé.

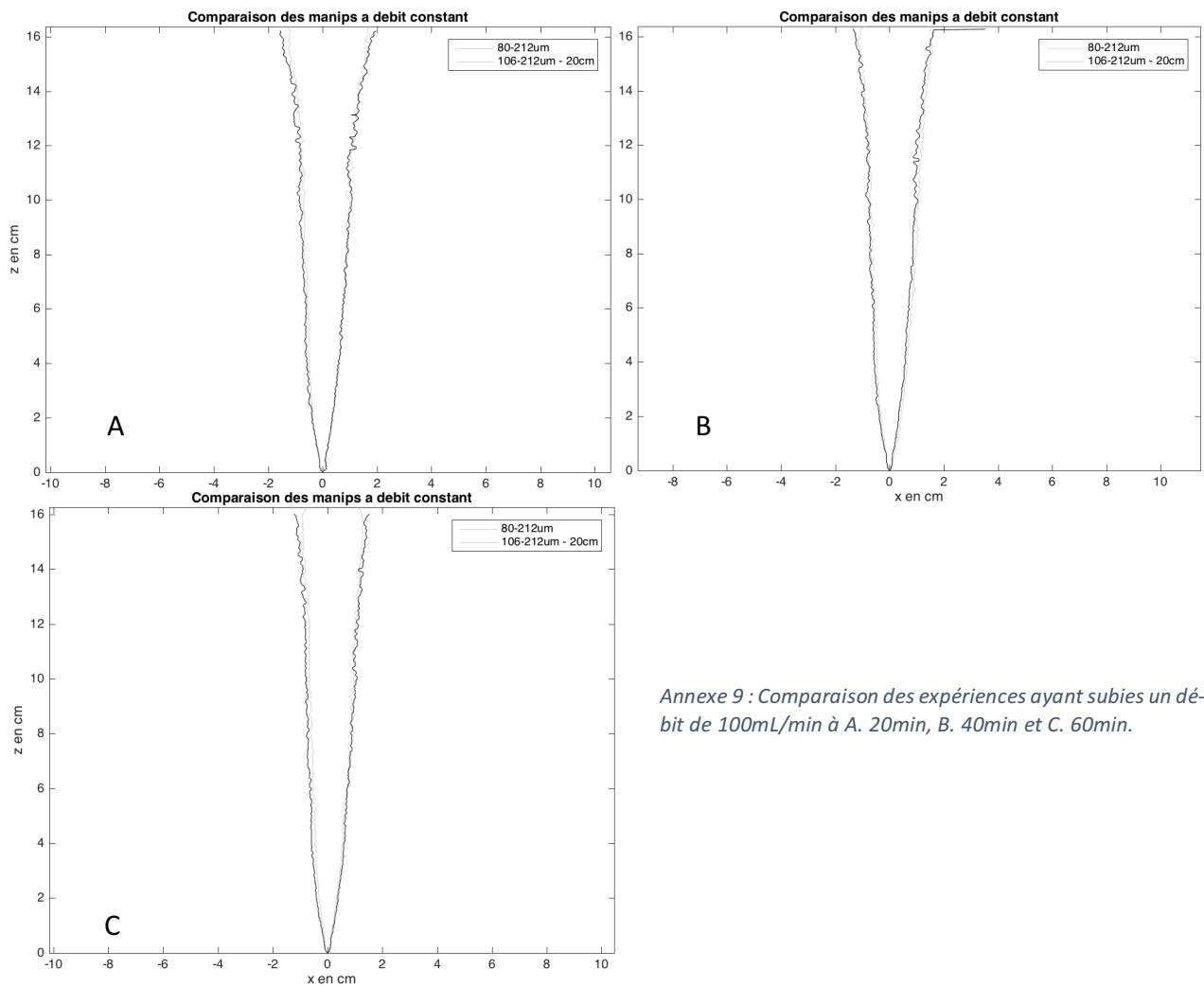
3. Comparaison des expériences ayant subi les mêmes débits



Annexe 8 : Comparaison des expériences ayant subies un même débit Q . A. Comparaison à 20 min des expériences ayant subi $Q=30\text{mL/min}$. B. Comparaison des expériences à 20min ayant subies $Q=50\text{mL/min}$. C. Comparaison des expériences à 40min ayant subies $Q=50\text{mL/min}$. D. Comparaison des expériences à 80min ayant subies $Q=50\text{mL/min}$

La comparaison des expériences ayant subi les mêmes débits d'injection permet d'observer les conditions d'expériences peuvent avoir sur la fluidification (*annexe 8*). On compare l'expérience réalisée avec la granulométrie tamisée dont l'épaisseur de couche est de 20cm, l'expérience réalisée avec la granulométrie non tamisée dont l'épaisseur de couche est de 20cm et l'expérience réalisée avec la granulométrie non tamisée mais avec une épaisseur de couche de 10cm.

- Les dimensions des trois zones fluidisées sont très similaires. Les formes des zones fluides issues de l'échantillon 106-212 μm semblent identiques contrairement à la forme issue de 80-212 μm qui est plus évasée vers la surface de la couche et plus haute.
- Les dimensions et les formes des zones fluidisées obtenues à partir de l'échantillons 106-212 μm sont très similaires contrairement à la zone fluidisée de l'échantillon 80-212 μm qui est bien plus large, bien plus évasée et bien plus haute.
- Au bout de 40min, on retrouve les mêmes différences qu'au bout de 20min. Les zones fluidisées ont toutes réduit de taille, mais cette réduction est plus marquée pour l'échantillon 80-212 μm .
- Au bout de 80min, on retrouve toujours les mêmes différences. Les zones fluidisées issues de l'échantillon 106-212 μm ont évolué vers une forme souterraine tandis que la zone fluidisée issue de l'échantillon 80-212 μm est toujours ouverte mais moins évasée.



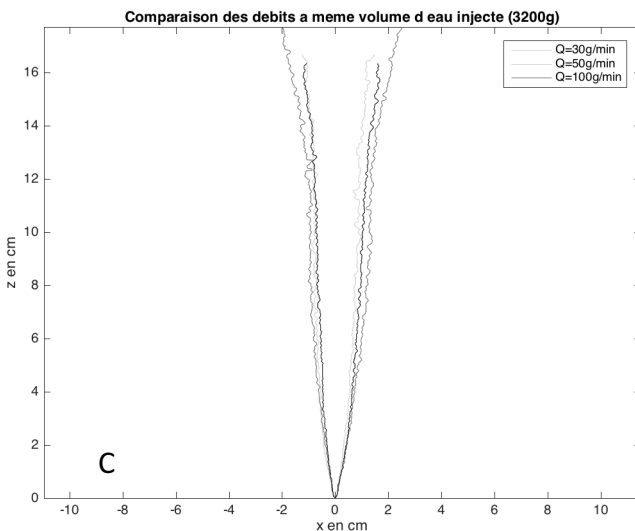
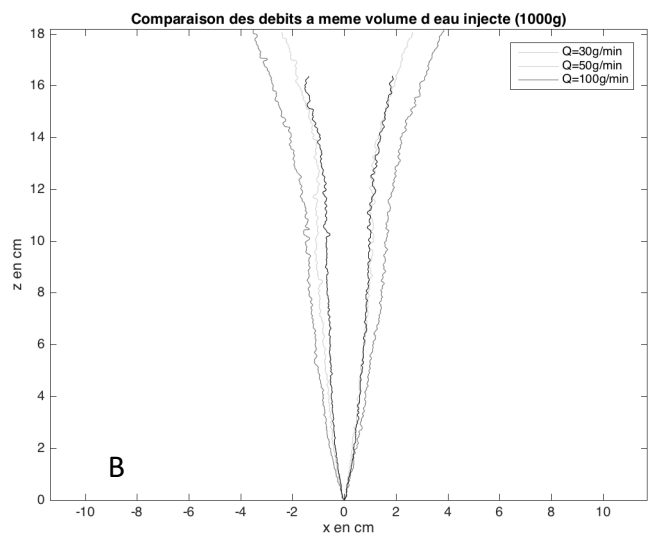
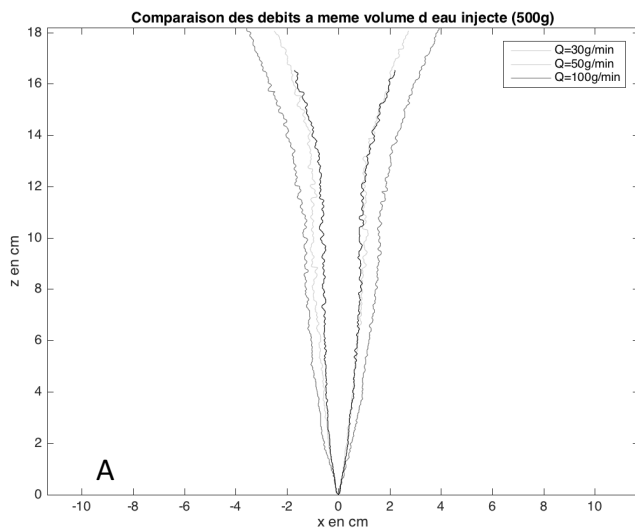
Annexe 9 : Comparaison des expériences ayant subies un débit de 100mL/min à A. 20min, B. 40min et C. 60min.

Contrairement aux faibles débits (*annexe 8*), il n'y a pas de différence notable de dimensions ou de forme des zones fluides entre les expériences pour un débit de $Q=100\text{mL/min}$ (*annexe 9*). Les profils semblent se superposer à tout temps.

4. Comparaison des débits à volume constant d'injection

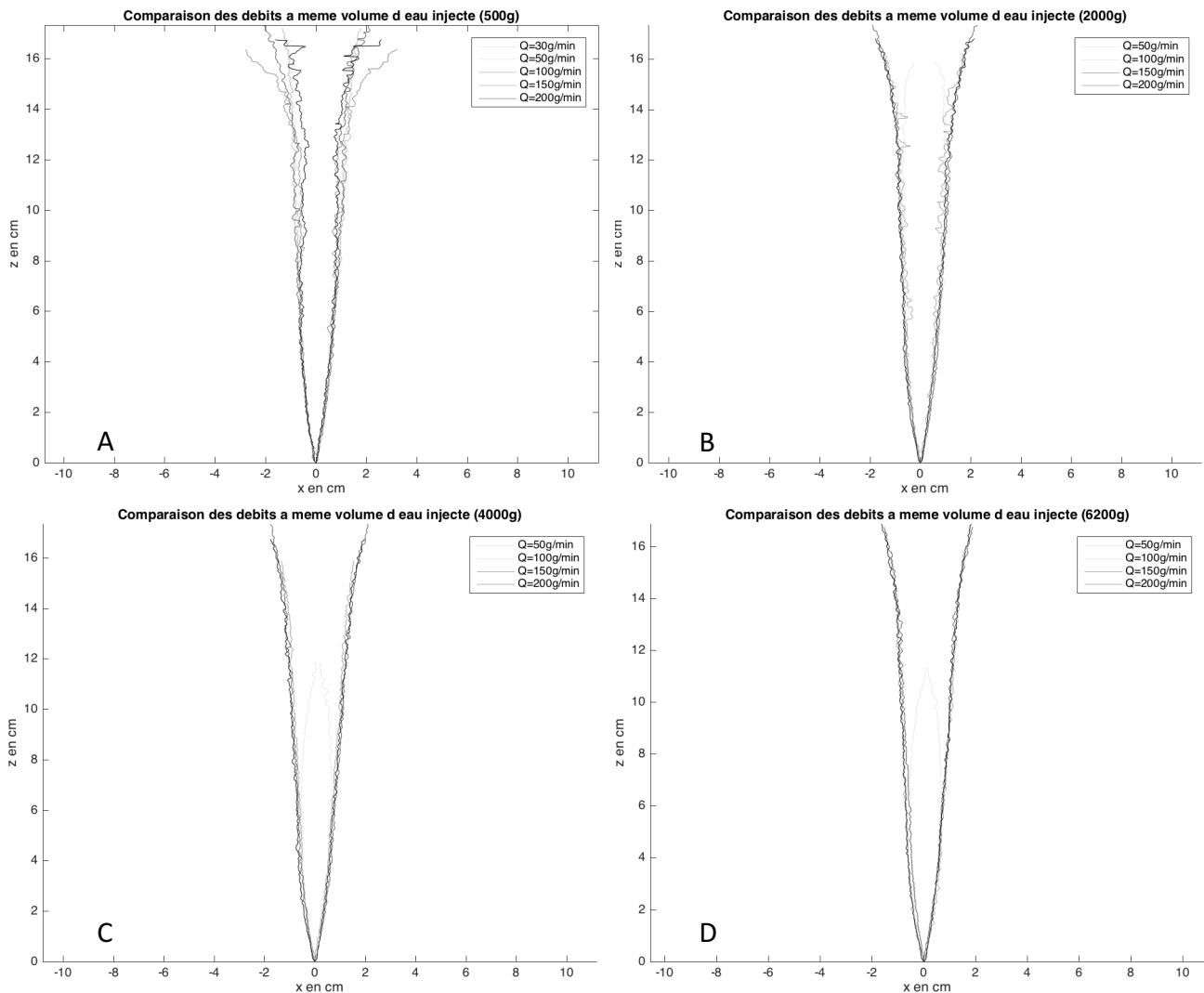
Cette comparaison permet de mettre en évidence les variations de forme et de taille des zones fluidisées induites par le débit injecté.

La comparaison des expériences réalisées lors de la deuxième série de manipulation, avec des débits différents, mais à volume constant montre que les zones fluidisées formées ont toutes des formes très semblables mais des dimensions différentes selon le débit (*annexe 10*). Pour les faibles débits, les dimensions des zones fluidisées sont plus grandes (*annexe 10.A et B*) que celles de la zone fluidisée issue de $Q=100\text{mL}/\text{min}$. Cette comparaison montre également que les zones des plus faibles débits ont une taille qui réduit plus rapidement, car elles ont une taille similaire à celle issue de $Q=100\text{mL}/\text{min}$ à 3200mL de fluide injecté (*annexe 10.C*).



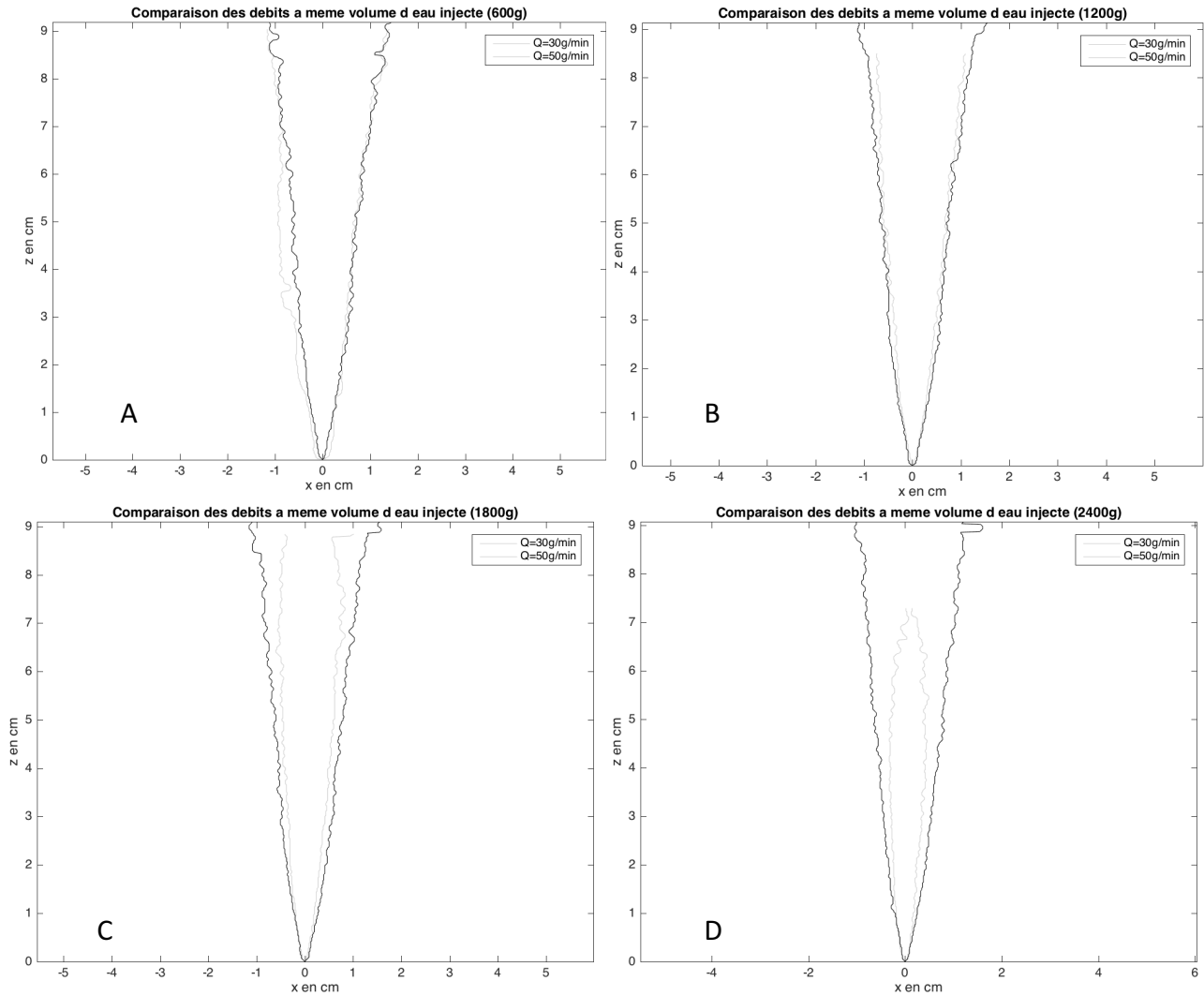
Annexe 10 : Comparaison des expériences faites à différents débits dans l'échantillon tamisé, à volume constant de fluide injecté. A. Comparaison pour 500g (ou mL) de fluide injecté. B. Comparaison pour 2000g (ou mL) de fluide injectée. C. Comparaison pour 3200g (ou mL) de fluide injecté.

La comparaison des expériences réalisées lors de la troisième série de manipulations, avec des débits différents, mais à volume injecté constant montre que les zones fluidisées formées ont toutes des formes et des dimensions très semblables quel que soit le débit (*annexe 11*). La seule différence notable est que la taille de la zone fluidisée issue du plus faible débit s'est réduite plus rapidement que les autres zones, jusqu'à atteindre un stade souterrain (*annexe 11.D*).



Annexe 11 : Comparaison des expériences faites à différents débits dans l'échantillon non tamisé dont l'épaisseur est de 20cm, à volume constant de fluide injecté. A. Comparaison pour 500g (ou mL) de fluide injecté. B. Comparaison pour 2000g (ou mL) de fluide injectée. C. Comparaison pour 4000g (ou mL) de fluide injecté. D. Comparaison pour 6200g (ou mL) de fluide injecté.

La comparaison des expériences réalisées lors de la quatrième série de manipulation, avec des débits différents, mais à volume constant montre que les zones fluidisées formées ont des formes et des dimensions très semblables quelque soit le débit (*annexe 12*). La seule différence notable est que la taille de la zone fluidisée issue de $Q=30\text{mL}/\text{min}$ à réduit plus rapidement que celle issue de $Q=50\text{mL}/\text{min}$, jusqu'à atteindre un stade souterrain (*annexe 12.D*).



Annexe 12 : Comparaison des expériences faites à différents débits dans l'échantillon non tamisé dont l'épaisseur est de 10cm, à volume constant de fluide injecté. A. Comparaison pour 600g (ou mL) de fluide injecté. B. Comparaison pour 1200g (ou mL) de fluide injecté. C. Comparaison pour 1800g (ou mL) de fluide injecté. D. Comparaison pour 2400g (ou mL) de fluide injecté.