

# Liquido Sabulum : Des grains fluides

## Table des matières :

<b>Introduction:</b>	<b>2</b>
I. Pression, poussée d'Archimède, et lit d'air fluidisé	4
A) Forces de pression et compresseur	4
B) Poussée d'Archimède	5
C) Lits d'air fluidisé	7
II. Conception et réalisation des prototypes et des expériences	8
A) Conception et réalisation des différentes maquettes	8
B) Expériences avec les petites maquettes	13
C) Réalisation des expériences avec la poussée d'Archimède	16
III. Analyse des résultats obtenus et confrontation aux résultats obtenus lors d'expériences déjà réalisées.	19
A) Analyse des résultats au microscope	19
B) Analyse et modélisation des expériences avec la poussée d'Archimède	22
C) Confrontation aux modèles théoriques et aux expériences déjà réalisées.	23
IV. Conclusion et perspectives	24
A) Bilan des expériences et du projet	24
B) perspectives pour l'avenir	24
C) Remerciement et conclusion	24
D) Sources	25

Lien de la vidéo : <https://www.youtube.com/watch?v=im6D-CgDTpA>

## Introduction:

Nous sommes un groupe de lycéens en classe de terminale générale passionnés par les sciences et ayant pour ambition la réalisation d'un projet scientifique. Nos lieux de résidence sont assez éloignés, mais nous tenions à travailler ensemble malgré cette difficulté. Dans ce mémoire, vous trouverez l'ensemble de nos recherches ainsi que notre démarche expérimentale dans la réalisation et l'étude des milieux granulaires rendus fluides.

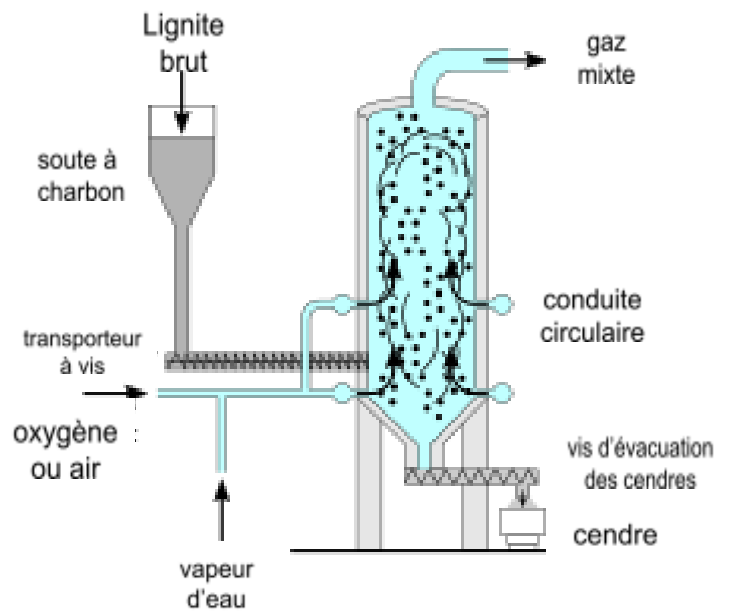
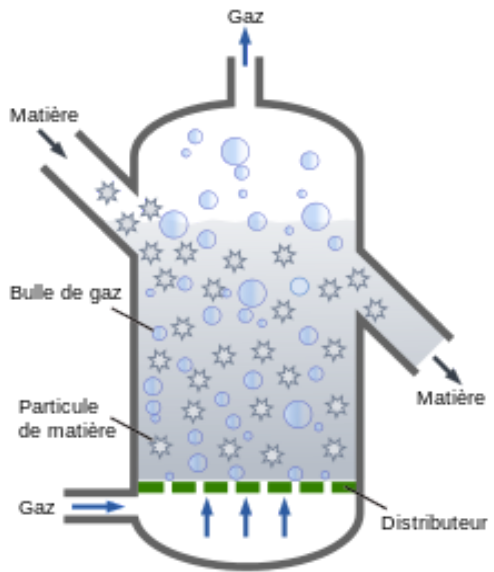


Notre projet consiste à mettre en place une situation dans laquelle le sable se comporte comme un liquide, et étudier son comportement dans différentes configurations. Le sable dit "liquide", ou bien "fluidisé" est un objet physique reposant sur le principe des lits fluidisés. Notre étude portera tout d'abord sur la manière dont on peut fluidiser des grains, sur les différentes configurations du milieu possibles et la manière la plus optimale d'en créer (nous cherchons à avoir un résultat le plus fluide possible tout en consommant le moins d'air possible). Nous essayerons ensuite d'expliquer de quelle manière réagissent et interagissent les objets plongés dans ce milieu, et ainsi vérifier par exemple si certaines lois de mécanique des fluides y sont également vérifiables.

Ainsi, nous étudierons les principes physiques autour de ce phénomène, et réaliserons plusieurs maquettes, en transparence afin de l'observer. Elles seront de plus en plus grandes et variées afin d'avoir des résultats plus concluants et précis.

D'un point de vue historique, le sable liquide n'est pas une découverte très récente. Dans le secteur de la chimie, la gazéification du charbon correspond à la production de gaz de synthèse à partir de charbon, d'air et d'eau. Durant l'année 1922, pour effectuer ce procédé, le chimiste allemand Fritz Winkler a développé et breveté en Allemagne le premier lit fluidisé pour un usage industriel.

Un lit fluidisé, grâce à une injection d'air, permet de donner aux matériaux granulaires des propriétés usuellement associées aux fluides, telle que la faculté de donner naissance à des bulles, etc.



Il a ensuite théorisé sur le gazogène à lit fluidisé.

William Lawrence Bragg, un physicien australien, fut président de l'institut royal de Londres. En 1959, lors d'un événement intitulé "*The Nature of Things*", il montre au public à l'aide de deux balles solides qu'il a réalisé une "soupe liquide" de sable aux propriétés de l'eau, grâce à un lit fluidisé.



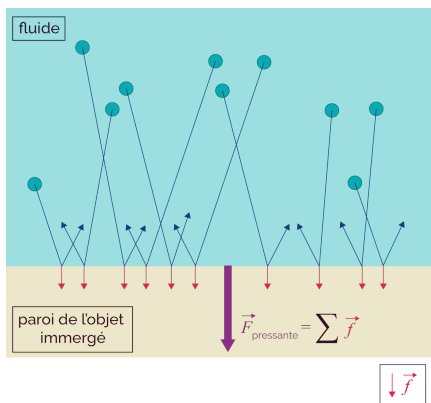
Dans les années 1960, l'entreprise VAW-Lippewerk, en Allemagne, a mis en place le premier lit industriel pour la combustion du charbon. Nous développerons davantage ci-dessous sur différents exemples d'utilisation de lits fluidisés dans l'industrie.

# I. Pression, poussée d'Archimède, et lit d'air fluidisé

## A) Forces de pression et compresseur

Avant d'attaquer le vif de la théorie, en préambule, quelques bases en statique des fluides s'imposent. Un fluide est un état de la matière sans forme propre, contrairement à un solide qui lui en possède une.

La propriété la plus notable d'un fluide est sa fluidité, c'est-à-dire sa capacité à s'étendre et à se déformer sans élasticité par l'action de forces extérieures. Cela se définit plus simplement par le fait que, contrairement à un solide, le fluide épousera la forme du solide qui le contient. Le sens d'écoulement d'un fluide dépend donc du sens des forces qu'il subit. Il existe deux états dans lesquels la matière peut être assimilée à un fluide : l'état gazeux et l'état liquide. Ces deux états présentent des propriétés différentes, en particulier lorsque la matière est en mouvement. Nous développerons ces différences ultérieurement.



La statique des fluides étudie le comportement d'un fluide macroscopiquement au repos. Lorsqu'un fluide est statique, celui-ci exerce naturellement des forces perpendiculaires sur les surfaces du solide qui le contient, ce phénomène peut être mesuré par une grandeur physique appelée pression. Celle-ci est exprimée par la relation suivante :

$$p = \frac{dF}{dS}$$

*P* représente la pression, exprimée en Pascal

*dF* représente la force élémentaire, exprimée en Newton

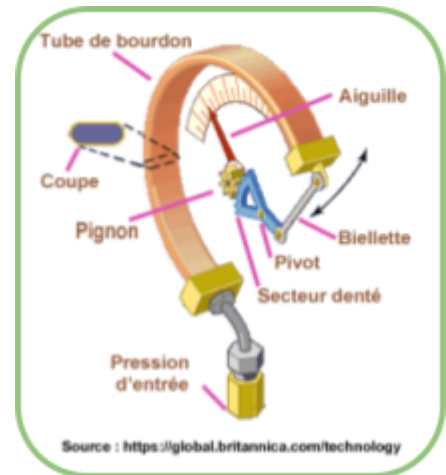
*dS* représente la surface élémentaire, exprimée en  $m^2$

La pression est un scalaire, c'est-à-dire qu'elle est représentée par un nombre, et ne nécessite pas de modèle vectoriel. Par conséquent, en un point donné d'un milieu fluide statique, la valeur des forces est la même dans absolument toutes les directions. Cependant, la force de pression est vectorielle, c'est à dire que la valeur, le sens et la direction de ces forces peuvent varier d'un point de la surface à un autre, les conséquences de ce point se manifestent surtout pour de grandes surfaces.

Il existe différents outils permettant de mesurer la pression exercée par un fluide. Certains appareils utilisent les propriétés générales des fluides, d'autres s'appuient sur les propriétés spécifiques des liquides. On compte parmi ces outils de mesures les piézomètres, les manomètres et les baromètres. L'outil le plus utilisé pour mesurer une pression est le manomètre, mais par abus de langage, il est couramment appelé "baromètre" car il donne une valeur en bar. Un bar équivaut à  $10^5$  Pascal.

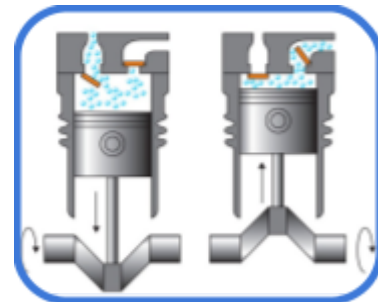


Le manomètre Bourdon est le plus utilisé, son système est purement mécanique et donne des mesures précises. Son fonctionnement est basé sur un tube cylindrique pincé dans lequel on fait passer un fluide sous haute pression. Les forces appliquées sur la surface intérieure du cylindre le déforment de façon imperceptible à l'œil nu, mais en cintrant le tube, il est possible d'amplifier ce phénomène. C'est alors cette déformation qui déclenche un mécanisme indiquant la pression sur une échelle. Connecté à un réseau de tuyauterie distribuant un fluide sous pression, il indiquera la pression contenue dans l'intégralité du système.



..... Cependant, pour qu'un gaz soit considéré comme soumis à de hautes pressions, cela nécessite un différentiel de pression entre le gaz et l'atmosphère. Dans la nature, cela est presque impossible car lorsque deux zones sont soumises à des pressions différentes et sont en capacité de communiquer, le fluide ira spontanément des zones hautes pressions vers les zones basses pressions. C'est dans cet objectif qu'une invention a vu le jour le 1776 : les compresseurs. Leur usage peut varier, ils sont utilisés pour nettoyer une surface d'encombrants légers, ou plus récemment gonfler les pneus massifs de véhicules imposants. Mais aussi plus spécifiquement dans certaines industries ou domaines tels que l'aviation ou le gonflage de bouteilles de gaz sous haute pression (bouteilles d'air en plongée subaquatique, ou d'oxygène dans le milieu médical, par exemple).

Il existe de très nombreux types de compresseurs, utilisant chacun leur propre mécanisme pour mettre de l'air sous pression. Le compresseur à piston est le plus répandu, fonctionnant avec un moteur à piston. Le piston contenu dans le moteur monte et descend de manière rapide. Lorsque le piston descend, cela crée une dépression, aspirant une grande quantité d'air, cet air est ensuite coincé dans le compresseur car les sorties d'air sont obstruées par des vannes, et enfin le piston monte, comprimant l'air piégé dans le cylindre, avant de le libérer. Nous obtenons ainsi de l'air sous pression.



Les compresseurs que nous utilisons sont des compresseurs à piston en raison de leur disponibilité dans le commerce et leur puissance adaptée à nos besoins.

## B) Poussée d'Archimède

La Légende de la naissance du théorème:

Ce théorème a été mis au point par Archimède, un savant Grec originaire de Syracuse au cours du III<sup>e</sup> siècle av. J.-C., quand le roi Hiéron II de Syracuse lui demanda de vérifier que sa couronne était bien constituée d'or massif et non d'alliage d'or et d'argent. Réfléchissant au moyen de réaliser le test sur la couronne sans la détériorer, Archimède se serait rendu compte alors qu'il était au bain public que les objets dans l'eau ne flottaient pas tous de la même manière. Après avoir posé les bases de son théorème, il compara le volume d'eau déplacé par la couronne à



celui déplacé par une quantité d'or pur ayant un poids identique, pour se rendre compte que la couronne déplaçait plus d'eau en s'immergeant ! Il en déduisit donc que la couronne n'était pas constituée d'or pur, l'argent ayant une plus petite masse volumique que l'or, un plus grand volume d'argent était donc nécessaire pour obtenir la même masse que le tas d'or témoin.

La poussée d'Archimède est une force verticale exercée par un fluide sur un objet immergé en lui. Cette force est dirigée vers le haut et est proportionnelle au volume du fluide déplacé par l'objet. Elle est régie par le théorème d'Archimède, qui stipule que tout corps plongé dans un fluide subit une force verticale, orientée vers le haut, égale au poids du volume de fluide déplacé.

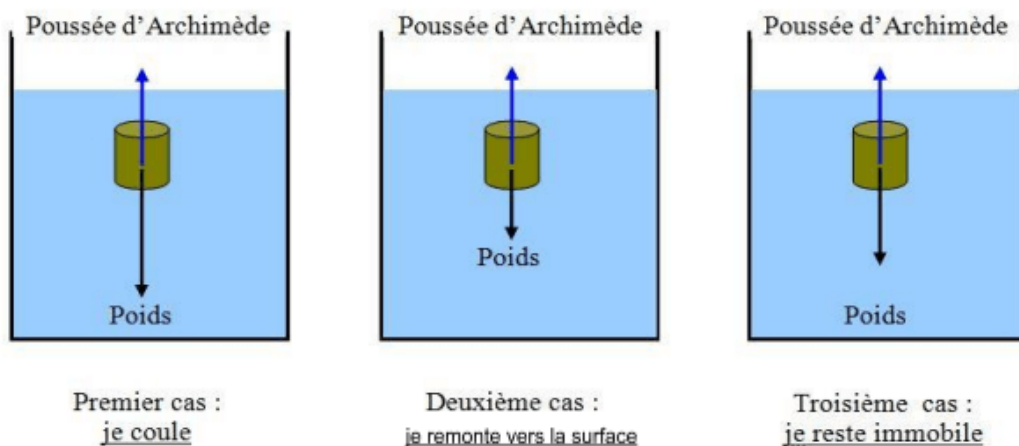
$$P_a = \rho_{liq} \times g \times V_{im}$$

$P_a$ : Poussée d'Archimède (N)

$\rho_{liq}$ : Masse volumique du liquide ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )

$g$ : Coefficient de pesanteur (N/kg)

$V_{im}$ : Volume immergé ( $\text{m}^3$ )



Étonnamment, la valeur de la poussée d'Archimède ne dépend pas de la profondeur à laquelle l'objet sur lequel elle s'exerce est immergé. Cela peut sembler étrange vu que la pression augmente avec la profondeur. Mais il faut garder à l'esprit que la pression qui s'exerce sur le sommet de la boîte et celle qui s'exerce sur sa base augmentent de la même manière, et donc leur différence reste constante.

On sait qu'un corps immergé dans un fluide est soumis systématiquement à la poussée d'Archimède, tant qu'il y a un champ de pesanteur. Donc si notre sable vérifie les relations on pourra le qualifier de fluide.

## C) Lits d'air fluidisé

Un lit fluidisé désigne une couche de particules solides fluidisées par un écoulement de fluide. Dit plus simplement, il s'agit d'un lit granulaire constitué de petites particules solides en suspension dans l'air, maintenues en mouvement par un flux ascendant de fluide, tel qu'un gaz. Il trouve une large application dans des secteurs tels que l'industrie chimique, la métallurgie, et la production d'énergie thermique et pétrolière. Les procédés utilisant un lit fluidisé engendrent un ensemble complexe de variables liées aux interactions gaz-solide, rendant le processus particulièrement complexe à prévoir et gérer.

Les applications des lits fluidiques vont de la combustion dans les centrales électriques aux réacteurs catalytiques, en passant par l'ingénierie des particules. On les utilise plus simplement pour appliquer de la peinture en poudre sur des surfaces métalliques, pour l'écoulement des céréales dans les silos à grain, pour incinérer de la boue résiduaire, vase semi-solide, ou autres déchets, etc.

Les types de lits peuvent être grossièrement classés en fonction de leur comportement d'écoulement, on peut retrouver donc 8 grands types de lits fluidisés :

- **Le lit fluidisé stationnaire ou particulaire** : modèle classique dans lequel le gaz est utilisé à faible vitesse donc la fluidisation des solides est relativement stationnaire, avec quelques fines particules entraînées.
- **Lit fluidisé bouillonnant** : (également appelé lit fluidisé agrégatif) : utilise une vitesse de fluide élevée, formant ainsi trois phases distinctes, une phase continue (phase dense ou émulsion), une phase intermédiaire (phase "nuage") une phase discontinue (phase pauvre ou bulle). La fluidisation se fait alors par bullage.
- **Lits fluidisés circulants (CFB)** : où les atomes/molécules composant le gaz ont une vitesse élevée, suffisante pour suspendre le lit de particules. En tant que telle, la surface du lit est moins lisse et des particules plus grosses peuvent être entraînées hors du lit, mais seulement dans le cas des lits fixes. Les particules entraînées sont redirigées via une boucle externe dans le lit du réacteur. En fonction du processus, les particules peuvent être classées par un séparateur cyclone et séparées du lit ou renvoyées vers celui-ci, en fonction de la taille des particules coupées.
- **Les lits fluidisés vibratoires** : ajoutent une vibration mécanique pour exciter davantage les particules.
- **Réacteur de transport ou flash (FR)** : à des vitesses supérieures à CFB, les particules se rapprochent de la vitesse du gaz. La vitesse de glissement entre le gaz et le solide est considérablement réduite au prix d'une distribution de chaleur moins homogène.

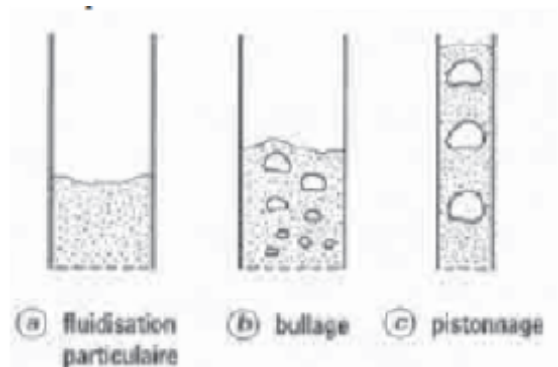


Schéma de différentes fluidisations  
source : cours de l'ECOLE  
CENTRALE MARSEILLE  
lien : <http://alain.mailliat.free.fr>

- **Lit fluidisé annulaire (AFB)** : une grande buse au centre d'un lit de bulles introduit le gaz à grande vitesse, atteignant une zone de mélange rapide au-dessus du lit environnant comparable à celle trouvée dans la boucle externe d'un CFB.
- **Réacteur fluidisé mécaniquement (MFR)** : Un agitateur mécanique est utilisé pour déplacer les particules et obtenir des propriétés similaires à celles d'un lit fluidisé bien mélangé. Il ne nécessite pas de gaz de fluidisation.
- **Lits fluidisés étroits (NFB)** : Dans ce cas, le rapport entre les diamètres du tube et des grains est égal ou inférieur à environ 10. La dynamique du lit est alors différente des autres types de lits fluidisés en raison de forts effets de confinement, et la présence de bouchons granulaires, constitués de régions à fortes concentrations de solides alternant avec de faibles concentrations de solides, est courante.

Nous avons donc opté pour un lit fluidisé bouillonnant car celui-ci est le plus simple à mettre en place, ne nécessitant pas de grandes installations, ni de contraintes spécifiques. Celui-ci comporte comme dit plus tôt trois phases distinctes :

1. La phase dite "bulle" dans laquelle le solide est complètement absent
2. La phase dite "nuage" se formant autour de la bulle, comportant des grains solide, mais étant constitué d'une majorité de gaz
3. La phase dite "émulsion" dans laquelle le solide est majoritaire mais fluidisé.

## II. Conception et réalisation des prototypes et des expériences

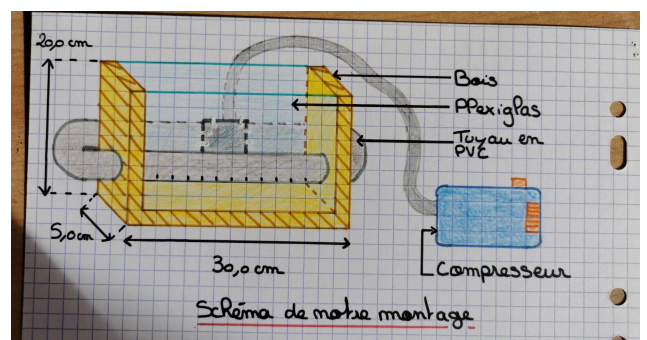
### A) Conception et réalisation des différentes maquettes

#### 1) Conception

Avant de commencer nos expériences, nous sommes allés à la rencontre de Baptiste Darbois-Textier et Cyprien Morize, travaillant tous deux au laboratoire FAST (Fluides, Automatique, Systèmes Thermiques) de l'université Paris-Saclay, spécialisés sur l'étude des milieux granulaires. Ils nous ont conseillé de réaliser en premier lieu des maquettes à petite échelle en un matériau transparent afin de pouvoir observer et mieux comprendre le phénomène. Ces expériences auront pour but de nous donner des éléments d'optimisation à utiliser dans la conception de notre premier prototype de taille moyenne.



Avec ces éléments en main, nous avons alors commencé à imaginer nos premières expériences. Celles-ci reposent sur une base en bois munie de deux plaques de plexiglas sur les côtés afin de pouvoir observer l'intérieur que l'on remplit de

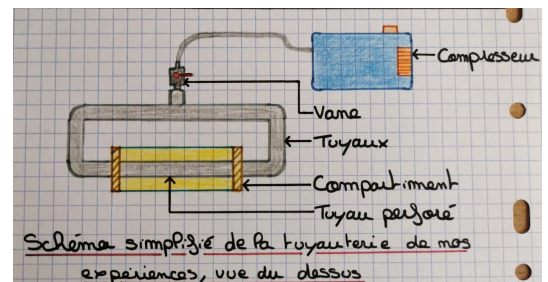


grains. On fait passer un tuyau par les côtés, dans lequel on perce des trous de faible diamètre au niveau du compartiment et on relie le tout à un compresseur afin de créer une force allant vers le haut, créant un lit fluidisé.

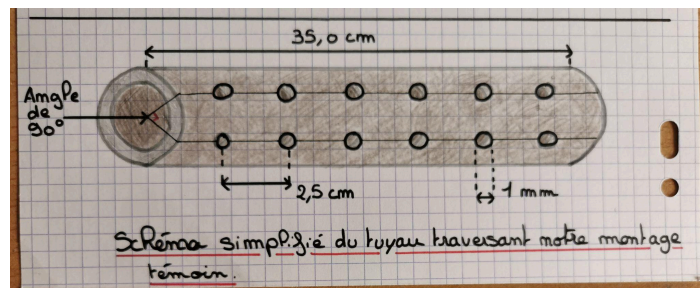
Nos expériences seront donc toutes menées à partir du même système, en faisant varier certaines variables d'une expérience à l'autre :

1. différents types de grain.
2. différents types de perçage,
3. différents angles séparant les lignes de trou
4. différentes distances entre les trous,
5. différents niveaux de pression.

Nous avons alors commencé à concevoir nos différentes expériences, tous les compartiments sont identiques, ils font... 30,0 cm de long, 5,0 cm de large, et 20,0 cm de haut. Le tuyau passe par deux trous au niveau des côtés en bois et se rejoignent en un même point afin que l'air traverse les deux côtés et desserve les trous de droite et de gauche à pression équivalente.



Les tuyaux de notre premier compartiment sont percés par un foret de 1 mm de diamètre. Il est fait de 26 trous séparés en deux lignes de trous horizontales à 90° l'une de l'autre, chaque ligne est donc composée de 13 trous séparés de 2,5 cm. (justifications des paramètres). Voir schéma simplifié ci-dessous. Les trous sont orientés vers le bas afin d'éviter que les grains de sable ne tombent dans les trous. Nous l'avons nommé "Témoin" car c'est une configuration que nous avons vu être utilisée le plus souvent, et donc qui nous sert de base, de témoin.



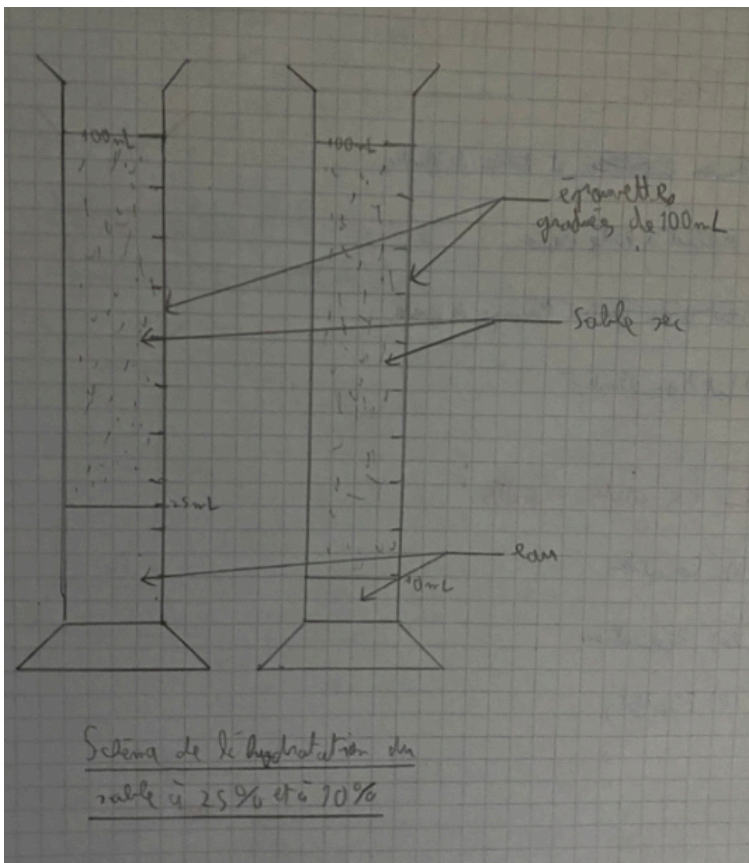
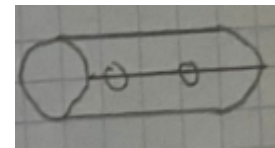
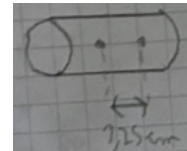
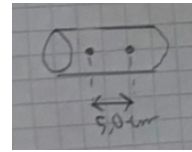
Les autres compartiments, que nous pouvons considérer comme expérimentaux, car nous n'avons pas vu de configuration similaire au cours de nos recherches, sont très similaires au témoin, ils reprennent chacun les mêmes configurations que celui-ci, mais changent uniquement un élément, comme l'orientation des trous au niveau du tuyaux ou bien comme l'espacement entre ces derniers et donc leur nombre. Ce choix nous permet de plus facilement lier un élément de configuration à un effet sur la fluidification. Voici donc les expériences que nous avons pris soin de nommer avec clarté, pour une meilleure compréhension de nos conversations et de notre rédaction :

- Le "témoin inversé", qui reprend la même configuration que le témoin, mais avec les trous orienté vers le haut ; celui-ci a été conseillé par M.Darbois-Texier dans l'optique



de vérifier si il est vrai que la tombée des grains de sable dans les tuyaux empêche son fonctionnement à long terme, ou si d'autres problèmes se posent dans une tel configuration.

- Le "500", dont les trous sont espacés de 5 cm, nous avons choisi cette distance car celle-ci reprend la distance entre les trous du témoin mais multipliée par 2 afin de simplifier tout calcul de comparaison avec le témoin si nécessaire.
- Le "125", tout comme le précédent, celui-ci voit sa distance entre les trous modifiée, mais cette fois-ci divisée par 2.
- Le "sans angle", n'étant composé que d'une seule ligne de 13 trous orientés vers le bas. Nous émettons l'hypothèse que sur celui-ci, l'expérience ne fonctionnera pas car non munis d'angles, l'air remontera tout droit, et donc ne couvrira pas les 5 cm de large du compartiment.



Toutes ces expériences seront également testées avec différents types de grains. Nous pensons tout d'abord tester avec du sable fin acheté à brico-dépôt d'une granulométrie de 0,2 mm, ce qui sera notre "grain témoin". Nous avons testé les mêmes expériences sur un autre sable venant de bricomarché d'une granulométrie de 0,2 mm. Nous avons également utilisé de la farine et du sucre afin de voir si un milieu granulaire organique peut être utilisé dans un lit d'air fluidisé. Nous avons également testé d'autres types de sables tels des microsphères de verre et nous avons mélangé différents types de grains entre eux afin d'avoir un grain regroupant une granulométrie plus large, représentant un échantillon de type inconnu. Nous avons également pour projet dans l'avenir d'humidifier notre sable afin de voir si l'humidité influencerait sur la fluidification d'une quelconque

manière. Nous comptons utiliser des éprouvettes graduées afin de procéder à cette humidification, en adoptant un protocole similaire à celui de la dilution en chimie.

## 2) Réalisation

Afin de réaliser ces maquettes, nous avons utilisé des matériaux que nous avons à disposition chez nous. Nous avons utilisé des plaques de plexiglas et des planches de bois présentes sur place afin de réaliser nos premières maquettes. Nous disposions également de tous les outils nécessaires (perceuse, coupe tuyaux, scie sauteuse, visseuse etc.). Nous avons alors découpé le bois et le plexiglas avec une scie sauteuse et nous avons par la suite poncé les bords afin d'avoir un résultat esthétique. Nous avons assemblé le bois à l'aide de vis et de mastic. Les plaques de plexiglas tenaient sur le bois de la même manière. Nous avons utilisé la visseuse avec une cloche (voir photo) afin de percer les trous faisant passer les tuyaux.



Embout de perceuse en scie de cloche



Yanis et Raphaël procédant à la découpe du bois



Photo de nos tuyaux découpés et percés.

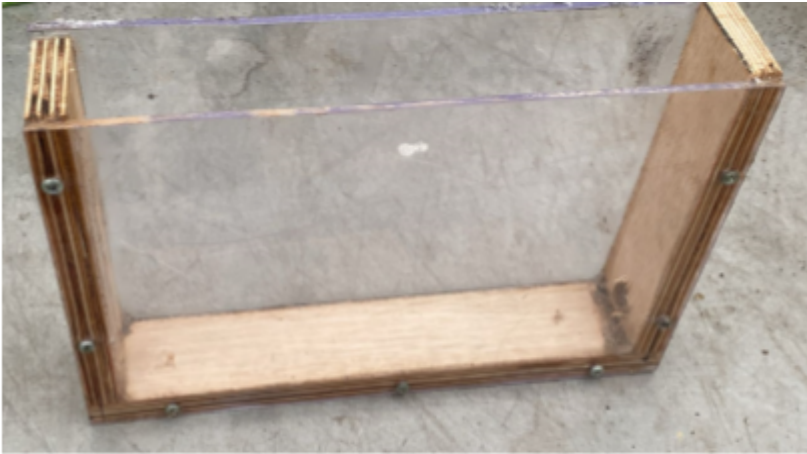


Marquage des emplacements des trous sur un tuyau

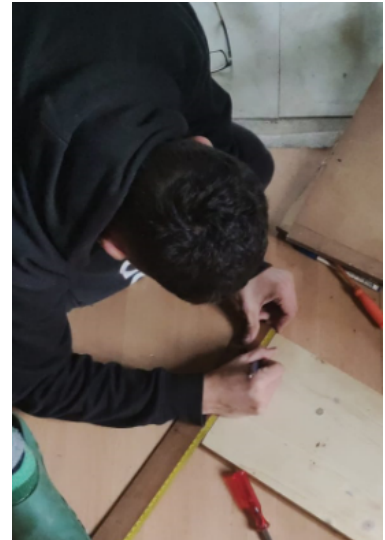
Les tuyaux de nos maquettes sont faits en PVC pression d'une pression nominale de 25, c'est-à-dire que nos tuyaux ne peuvent supporter une pression dépassant les 25 bars. Les pressions que nous utiliserons durant nos expériences sont bien évidemment très inférieures à cette valeur qui nous exposerait à des risques mécaniques importants, nous veillons très précautionneusement à notre sécurité lors des expériences. Les tuyaux ont été découpés avec une pince à tuyau, un outil très pratique car facile à utiliser et faisant des coupes nettes, ne déformant pas le tuyau. Le calcul des angles s'est fait à l'aide d'une feuille quadrillée sur laquelle nous avons tracé un cercle faisant le diamètre exact du tuyau.



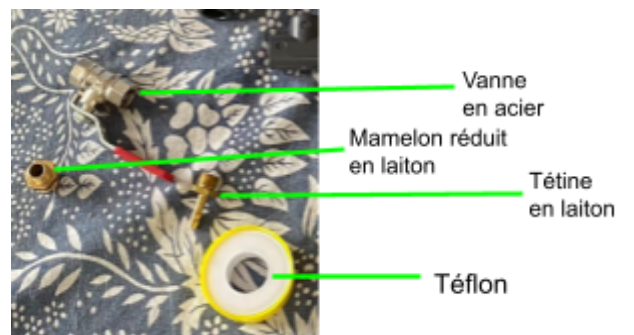
Nous avons alors tracé sur le cercle deux points à 90° l'un de l'autre, puis reporté ce cercle sur le tuyau. Une fois l'angle obtenu, nous avons alors tracé un trait sur une table droite en prenant soin de respecter les marquages aux deux angles. La mesure de la distance entre les trous s'est faite avec un mètre-ruban, et le perçage avec un Dremel®.



Montage assemblé "nu", non munis de tuyau ou de sable.



Les tuyaux, étant en PVC-Pression, doivent donc être enduits de décapant aux extrémités afin d'être collés. La connexion au compresseur se fait par des pièces taraudées métalliques, comprenant un robinet, un mamelon réduit, et une tétine. Pour un souci d'étanchéité du système qui sera soumis à de hautes pressions, nous avons appliqué du téflon sur les pas de vis de nos pièces en métal. L'espace entre le tuyau et les murs en bois des maquettes est comblé par du mastic.



Notre premier type de grain a été acheté à Brico-Dépôt. Il s'agit d'un sac de 35 kg de sable à enduire, soit un sable très fin, allant jusqu'à 0,2 mm de diamètre. Cependant, celui-ci était humidifié de manière excessive, il nous a donc fallu faire preuve de créativité. Le lieu dans lequel nous avons travaillé sur ce projet était muni d'un poêle à bois pour se chauffer, nous avons pris un plat à four, nous avons mis du sable dessus, et nous l'avons placé sur le poêle afin de faire évaporer l'eau se trouvant dans le sable. Cela a permis un séchage rapide et efficace de notre sable.



Photo de notre sable en train de sécher

Une fois le sable sec, nous avons remarqué que celui-ci comportait nombre de grains volumineux (d'un diamètre supérieur à 2mm). Face à ce problème, nous avons trouvé une solution. N'ayant aucun tamis assez fin pour trier des grains de cette taille, nous avons alors utilisé un infuseur à thé dont les trous mesurent 1 mm. Ce tamisage fut laborieux, mais



après avoir eu une quantité raisonnable de grains d'un diamètre inférieur ou égale à 1 mm, il était temps de placer les grains dans nos compartiments.

Notre système est relié à un compresseur à piston non munis de réservoir. Celui-ci peut fournir selon les indications du constructeur une pression maximum égale à 8 bars. Mais son débit est variable, et mettre sa puissance à la moitié de sa capacité nous suffit largement pour nos expériences.



Photo de notre compresseur.

## B) Expériences avec les petites maquettes

### 1) Nos premières expériences

Le résultat de notre première expérience effectuée sur un montage témoin fut très satisfaisant, le sable se fluidifie. Nous avons eu l'idée de placer un objet dans notre compartiment afin d'observer l'interaction de celui-ci avec le lit d'air fluidisé que nous avons créé. Une clé de 12 en métal fut donc le premier objet que nous avons mis dans le compartiment, et celle-ci est tombée tout en bas presque aussi rapidement que si on la lâchait dans un compartiment rempli d'eau. Nous avons ensuite essayé avec une



Balle ne bougeant pas malgré le compresseur activé

balle en caoutchouc creuse, celle-ci flottait dans le sable liquide, en exerçant une pression dessus, on pouvait la plonger au fond, mais au moment où on la lâchait, celle-ci remontait à la surface. Nous avons par la suite procédé à la même expérience, mais sans le sable, c'est-à-dire le bac avec seulement la balle à l'intérieur et nous remarquons que la balle ne bouge pas. Sachant que dans un lit fluidisé, le sable n'applique pas de forces de friction, et que la puissance du compresseur n'est pas assez conséquente pour soulever à elle seule la balle, on peut alors conclure que des forces orientées vers le haut s'appliquent dans ce système. Par la suite, nous considérerons que cette force est semblable à la poussée d'Archimède dans un fluide car on retrouve le même phénomène d'objet flottant et coulant, et il semblerait que les objets ayant une masse volumique plus conséquente couleraient.



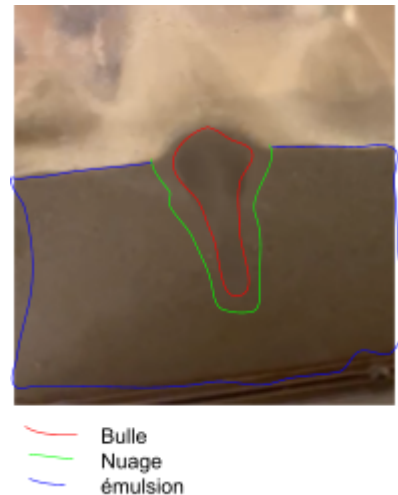
Photo de notre première expérience, compresseur éteint



Photo de notre première expérience, compresseur allumé

Nous remarquons ensuite que le sable liquide possède une des caractéristiques d'un fluide : le fait que tout comme un liquide, le sable épouse la forme de son récipient. On le remarque lorsque l'on verse le sable dans un compartiment vide, et qu'une "dune de sable" à échelle réduite se forme. Une fois fluidisé, cette dune s'effondre petit à petit pour laisser place à un horizon que l'on peut considérer comme plat si on néglige les vagues et les bulles issues des turbulences causées par le souffle du compresseur.

Un autre phénomène assez intéressant à constater est le fait que tout comme certains liquides, les différents grains peuvent être non miscibles. Cela s'observe après un certain temps de fluidification, on remarque alors des couches composées de différents grains se former. On suppose alors que, tout comme pour les fluides, le sable ayant la masse volumique la plus élevée se trouvera le plus bas en raison d'une plus grande force gravitationnelle appliquée par la Terre sur ce sable. Cela n'est qu'une supposition et reste à démontrer, mais dans le cas d'un fluide, c'est le fluide le moins dense qui se situera au-dessus des autres.

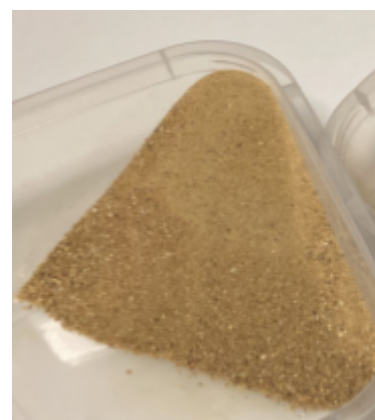


Nous constatons également la présence des trois phases d'un lit d'air fluidisé bouillonnant : le bullage, le nuage et l'émulsion. Bien que la phase d'émulsion paraisse dépourvue d'air, elle n'en reste pas moins fluidifiée. Lorsqu'on entre en contact avec la phase d'émulsion, la sensation est similaire à celle d'un fluide, cependant lorsque l'on touche une phase de bulle, on le sent comme une bulle d'air dans de l'eau remontant à la surface.

Alors que nous pensions constater une importante différence de fluidification entre les modèles expérimentaux, il n'en était rien. Il n'existe en effet que très peu de différences notables entre les différents modèles. On remarque seulement que la puissance nécessaire pour fluidifier les modèles comportant un nombre important de trous est moins importante que pour ceux en comportant moins. On pense que cela est dû au fait que nos maquettes sont des pavés droits horizontaux, ce faisant il y a une surface de sable plus importante sur la longueur que sur la hauteur, demandant donc plus de sorties différentes que de puissance. Nous pensons que sur un modèle plus vertical, la pression nécessaire serait alors plus élevée, demandant donc à avoir le moins de trou possible pour une demande en puissance la moins élevée. Nous avons pour projet de construire plusieurs modèles très verticaux afin de réfuter ou valider notre hypothèse. Outre cela, on remarque que le modèle du témoin inversé fluidifie très mal les grains se trouvant en dessous du tuyau, et ce pour une demande en puissance très proche de celle du témoin, bien qu'elle soit tout de même légèrement moins élevée. Enfin, nous pensons que la raison des faibles différences de puissance nécessaire entre les différents modules s'explique par leurs échelles réduites, et nous pensons que sur un modèle plus grand, ces différences se verront davantage.

## 2) Nos expériences avec différents grains

Nous avons premièrement essayé de fluidifier le sable acheté à Brico-Dépôt, ce qui n'a posé aucune difficulté, celui-ci était très simple à fluidifier. Nous avons ensuite essayé de fluidifier le sable acheté à Brico Marché, mais cela ne semblait pas fonctionner. Nous avons remarqué que malgré l'indication sur le paquet, indiquant une granulométrie de 0,2 mm, de très nombreux grains étaient bien plus gros. Nous avons alors utilisé un filtre à thé afin de tamiser le sable. Une fois tamisé, nous remarquons plusieurs choses : Premièrement le tamisage révèle un volume très important de grains très gros (supérieur à 2 mm de diamètre). Ensuite on remarque que même après tamisage, la fluidification n'est pas tout à fait effective, il nous faut tamiser une seconde fois le tout afin d'avoir une fluidification effective. Et enfin, après ces deux tamisages effectués, nous remarquons que lorsque nous procédons à la fluidification de ce sable, celle-ci provoque un nuage de sable très contraignant pour l'étude du phénomène. En plus de brouiller la visibilité et de créer des dépôts de sable sur un rayon de plusieurs mètres, une baisse considérable du niveau de sable se fait remarquer, en effet, après 10 minutes d'activation, la masse totale du système (compartiment + sable) baisse d'approximativement 100 grammes sur un système pesant à la base 2,62 kg, cette perte est donc non négligeable.



Sable de bricomarché non tamisé

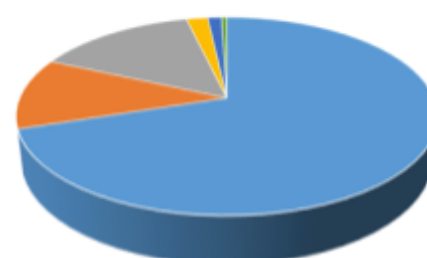
Nous avons également créé involontairement, en faisant tomber les boîtes contenant les sables, un mélange des sables de Bricomarché et Brico-dépôt, la part de l'un par rapport à l'autre nous est donc inconnue, mais nous avons pris la décision de tout de même travailler sur cet échantillon. Nous nous sommes rendus au laboratoire FAST dans lequel nous avons usé de tamis de précision afin de "découper" notre sable en plusieurs parts de granulométrie précises. Nous avons donc des grains de :

Diamètre des grains (en $\mu\text{m}$ )	Plus de 400	400 - 280	280 - 200	200 - 150	150 - 80	Moins de 80
-----------------------------------------	-------------	-----------	-----------	-----------	----------	-------------

Nous avons également demandé à ce que les grains compris entre 400 et 280  $\mu\text{m}$ , ceux entre 280 et 200  $\mu\text{m}$ , et ceux entre 200 et 150  $\mu\text{m}$  soient examinés dans un microscope de haute précision spécialisé dans l'étude d'un milieu granulaire, mais nous reviendrons sur ces observations plus tard.

Des tests ont également été effectués avec des milieux granulaires issus de matières organiques telles que de la farine de blé ou du sucre de betterave. La fluidification de la farine s'est soldée par un échec, mais nous nous y attendions. En effet M.Darbois-Textier a

Composition d'une farine Type 55



Amidon protéines sucre **sucre** Matières grasses matières minérales

Source : <https://www.agir-crt.com/>



supposé que ce serait un échec en raison de la présence naturelle d'eau dans une farine car celle-ci est issue de végétaux naturellement composé d'eau. Les liaisons hydrogènes liant donc les grains entre eux feraient défaut au principe de lit d'air fluidisé. Sur le plan pratique, cette fluidification est un échec tout d'abord car, tout comme le sable bricomarché, la fluidification entraîne la création d'un nuage de farine, et de nombreux dépôts de farine autour du compartiment. De plus, la fluidification ne semble pas s'effectuer, l'air sort bel et bien, mais crée des trous allant verticalement du fond à la surface du boîtier, et ces trous



Photo des trous que l'on peut voir dans la farine

restent visibles lorsque l'on coupe le système. Enfin on remarque que la farine est déjà naturellement semblable au sable liquide car lorsque l'on passe sa main dans un milieu farineux, on est très proche d'une liberté totale de ses mouvements. Cela rend alors la comparaison difficile entre de la farine que l'on tente de fluidifier et de la farine normale. Pour ce qui est du sucre, le résultat est également un échec, mais pas pour les mêmes raisons. Le sucre refuse de se fluidifier, nous pensons que cela est dû à la taille des grains de sucre, qui sont de taille semblables aux grains empêchant le sable de Bricomarché de se fluidifier. Nous pensons également que la géométrie hasardeuse des grains de sucre les rend très peu

aérodynamiques, et influe négativement sur le bon déroulement de la fluidification, demandant donc une bien plus grande puissance que nous ne sommes pas en mesure de fournir.

Enfin, nous avons testé les microsphères de verres d'une granulométrie de 80 microns selon le vendeur. Ce sont ces grains qui ont le mieux fonctionné, la puissance minimum de notre compresseur était déjà bien trop forte pour fluidifier le tout. Nous pensons que cela est dû au fait que les grains sont très petits comparé au sable normal, et que ces grains issus de l'industrie étant fait pour l'industrie, ils doivent adopter une forme plus régulière que le sable normal qui est naturellement informe. Nous n'avons cependant pas eu le temps de les observer au microscope afin de vérifier s'il s'agissait bien d'un grain à forme régulière.

### C) Réalisation des expériences avec la poussée d'Archimède

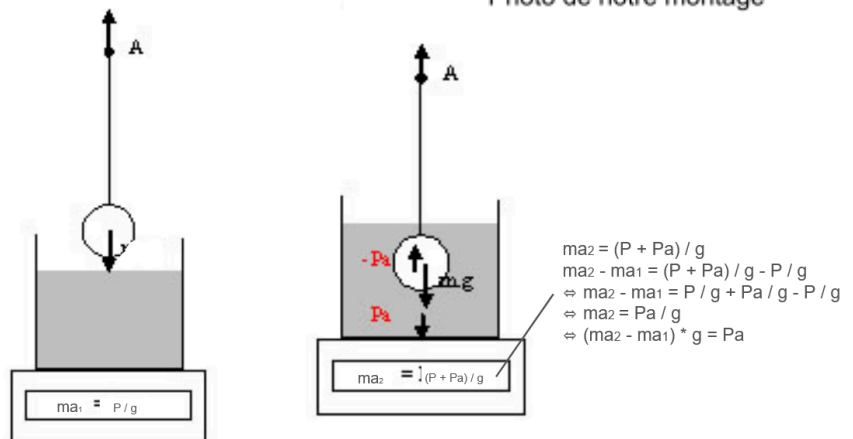
Il était clair que la poussée d'Archimède était bel et bien présente dans le sable liquide, il nous fallait cependant un moyen de la mesurer et de déterminer une relation la traduisant. Pour se faire, nous avons utilisé la troisième loi de Newton qui stipule que tout corps A exerçant une force sur un corps B subit en retour une force exercée par le corps A, de même direction et de même valeur, mais de sens opposé. Or il apparaît que pour le cas

de la poussée d'Archimède, il s'agit d'une force exercée par un fluide sur un objet, cela signifie que l'objet exerce également une force sur le fluide mais de sens opposé, soit confondu avec la force du poids. Avec ces éléments, nous avons donc opté pour deux protocoles permettant de mesurer la poussée d'Archimède.

Si on prend une balance, que l'on pose un récipient contenant un milieu granulaire fluide, que l'on immerge un certain volume d'un objet, en prenant garde à ce qu'il soit tenu par quelque chose d'autre, la différence de poids mesurée par la balance correspondra alors à cette force opposée à la poussée d'Archimède. Nous avons pour cela fait un montage avec une potence en bois que nous avons créé, accueillant une tige filetée vissée à un cylindre fermé. En plongeant progressivement le cylindre dans notre système jusqu'à une marque faite à un certain volume  $V$ , la balance, que nous avons préalablement mise en dessous de notre système, affichera alors une masse  $m$  différente, nous aurons alors à faire la différence et à multiplier cette différence par l'accélération de pesanteur afin d'avoir la valeur de la force.

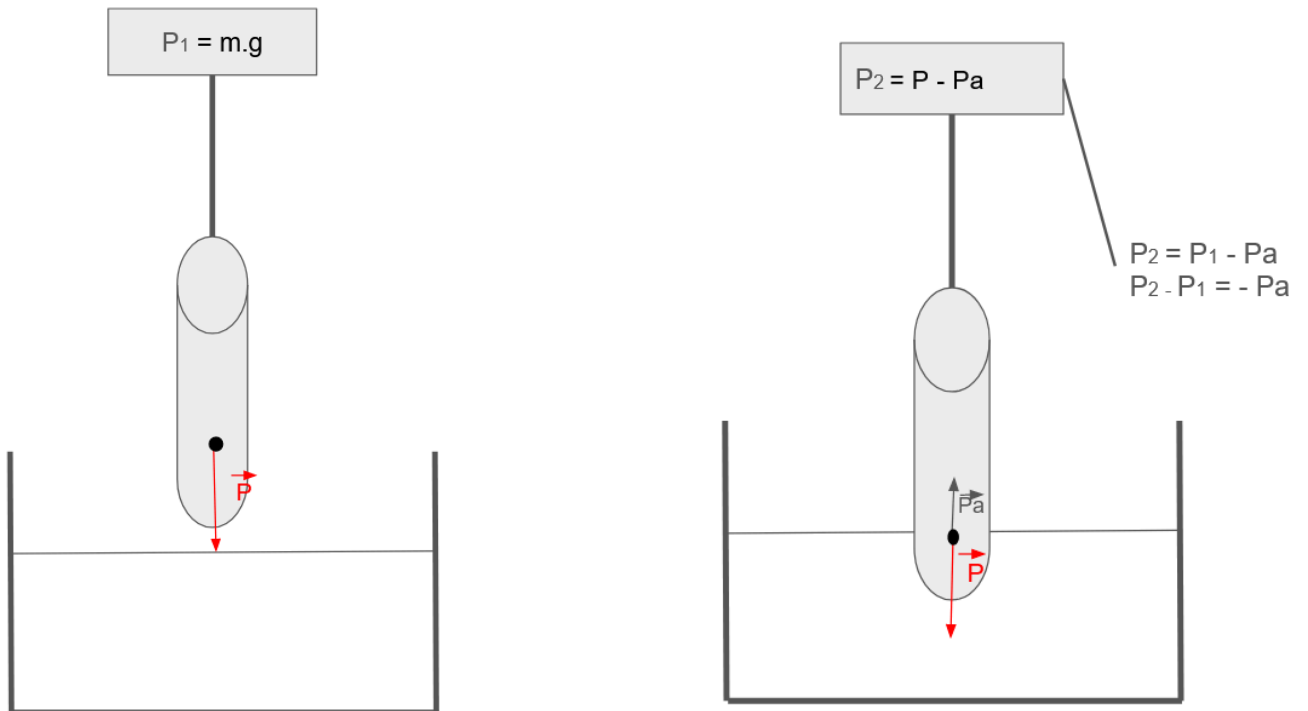


Photo de notre montage

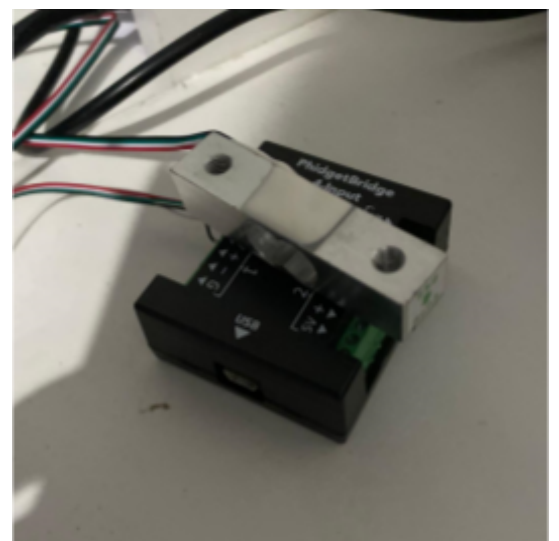


Ce protocole permet en théorie d'obtenir une valeur de cette poussée d'Archimède, mais en pratique c'est bien plus compliqué que ça. Premièrement le système nécessitant l'apport constant d'air sous pression rend la mesure sur la balance imprécise car l'air sortant des trous des tuyaux crée des vibrations détectées par la balance. De plus le milieu granulaire fluide basé sur un lit fluidisé bouillonnant n'est pas stable, de ce fait il n'existe pas de surface ou de ménisque fixe, alors le volume immergé est lui aussi instable. Enfin on peut également noter que certains aspects observés lors des précédentes expériences peuvent porter défaut au bon déroulement de l'expérience. L'exemple le plus évident serait celui du sable de bricomarché qui perd 100g de sable en 10 minutes d'utilisation, faussant complètement les mesures relevées sur la balance.

Cette méthode comprend un bon nombre d'incertitudes, bien qu'elle soit très simple à mettre en place, elle présente de nombreux inconvénients. C'est pour cela que nous avons pensé à une seconde méthode retirant quelques incertitudes, cependant celle-ci demande un matériel plus spécialisé : un dynamomètre électronique. Cette seconde méthode reprend le principe de la première, elle consiste à prendre le poids de notre objet à l'aide d'un dynamomètre, puis de plonger un volume  $V$  de cet objet dans le sable liquide. La valeur affichée sera donc égale au poids de l'objet moins la poussée d'Archimède étant donné que celle-ci est de sens opposé au poids. Pour retrouver la poussée d'Archimède, il suffit d'appliquer le calcul se trouvant sur le schéma ci-dessous :



Cette seconde méthode permet de lever le fort degré d'incertitude provenant de la force de collision de l'air sur les parois. Le problème du nuage de sable est facilement évitable en utilisant le bon sable, cela fait donc de cette méthode une manière bien plus efficace de mesurer la poussée d'Archimède. Cependant le problème de l'instabilité du milieu ne permettant pas d'immerger un volume fixe reste présent, bien qu'il puisse être limité en baissant la puissance du compresseur, pour avoir un milieu granulaire fluide on doit tout de même avoir cette turbulence. Le second problème de cette expérience est le fait qu'il nous faut posséder un dynamomètre électronique. Heureusement, le laboratoire FAST nous a prêté un outil permettant de mesurer les forces qui lui sont appliquées. Il suffit de le configurer pour qu'il fasse office de dynamomètre et ainsi il pourra réaliser les mesures.



Notre outil de mesure de force



### III. Analyse des résultats obtenus et confrontation aux résultats obtenus lors d'expériences déjà réalisées.

#### A) Analyse des résultats au microscope

Nous avons analysé 3 échantillons au microscope, celles-ci se font sur de très faibles volumes (de l'ordre du mm<sup>3</sup>) afin que l'analyse ne prenne pas trop de temps, cela a pris dans notre cas 2h30 par échantillons, et peut prendre jusqu'à 7 heures dans certains cas. La machine prend une photo de l'intégralité des grains les uns après les autres, puis traite les données obtenues et donne trois graphiques. Le plus long pour la machine est de prendre individuellement en photo chaque grain, mais cela est nécessaire pour avoir des données. Chaque graphique est important, car il comprend avec lui beaucoup d'autres données.

Le premier graphique nommé "Diameter report - Number distribution" met en évidence la taille des grains en  $\mu\text{m}$  en fonction du nombre total de grains en pourcentage. Celui-ci est très pratique pour identifier quelle est la taille de la part la plus importante des grains. Cependant dans un échantillon naturel comme celui que nous avons, beaucoup de grains très petits s'y trouvent, et ce malgré le tamisage. De ce fait, un nombre excessif de petits grains se trouvera dans le milieu, bien que le volume total de ces grains soit négligeable. En outre, ce premier graphique permet de bien identifier la quantité de ces grains "parasite", mais lorsqu'il y en a, la pertinence de ses résultats est limitée par la surabondance de ceux-ci. Le second graphique se nomme "Diameter report - Volume distribution" et met en

évidence la taille des grains en  $\mu\text{m}$  en fonction du volume totale de l'échantillon en pourcentage. Ainsi le problème des grains parasites est réglé et nous permet d'analyser la taille des grains de l'échantillon, et bien d'autres paramètres. Enfin le dernier graphique est quant à lui particulier, il se nomme "Aspect Ratio - Number Distribution" et classe l'allure des grains sur une échelle de 0 à 1 par rapport au nombre total de grains en pourcentage. Une allure de 1 signifie un grain parfaitement rond, et plus la valeur se rapproche de 1, plus le grain est proche du cercle parfait.

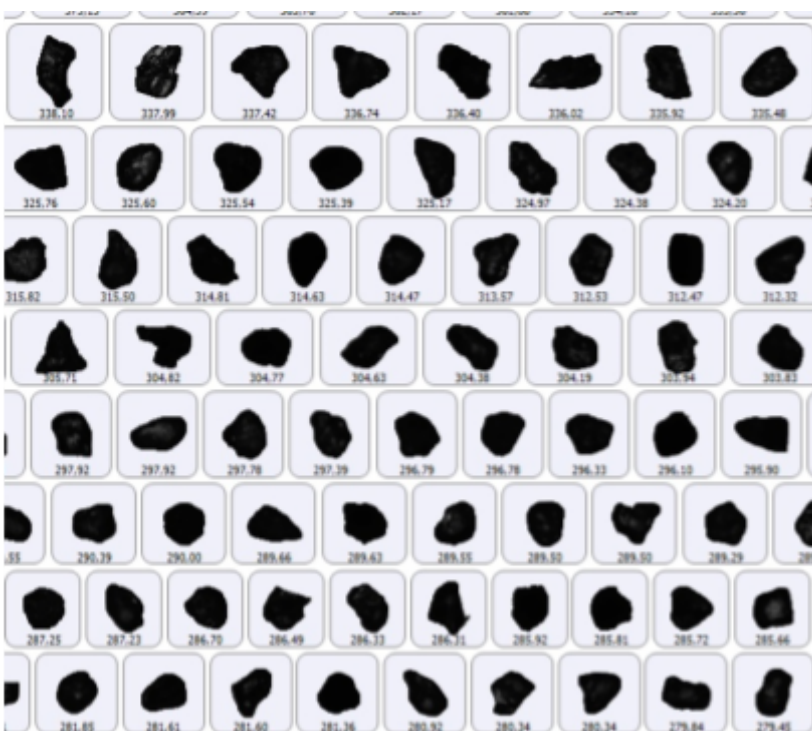


Photo et classement des grains par ordre de taille par le microscope

En plus de ces graphes, il nous est présenté bien des valeurs. Sur les analyses de diamètre, nous trouvons premièrement les valeurs du grain ayant le plus grand et le plus petit diamètre. Nous trouvons également la moyenne des diamètres par rapport au nombre dans le Number Distribution, et la moyenne des diamètres par rapport au volume total et par rapport à la surface totale dans le Volume Distribution. On trouve également la moyenne de la taille des grains dans les premiers 10%, 50% et 80% de l'échantillon, afin de bien se rendre compte de la part des petits grains par rapport aux plus gros grains. Sur le graphique Aspect Ratio, on retrouve l'allure minimum, l'allure maximum, et la moyenne par rapport au nombre. On retrouve également la moyenne des premiers 10%, 50% et 90% de l'échantillon. On retrouve également d'autres valeurs, mais celles-ci ne vont pas nous intéresser pour notre étude.

Analysis	
SOP Analysis: 3.0	SOP Fill Holes: True
SOP Segmentation: None	SOP Trash Size: 10
SOP Optic(s) used: Six	
Result	
CE Diameter Minimum (µm): 2,18	CE Diameter D[v, 0.1]: 229,3
CE Diameter Maximum (µm): 509,36	CE Diameter D[v, 0.5]: 336,2
CE Diameter D[4,3] (µm): 333,3	CE Diameter D[v, 0.9]: 423,6
CE Diameter D[3,2](µm): 295,5	CE Diameter STDV (µm): 39,68
Particles Counted: 20787	CE Diameter RSD (%): 322,40

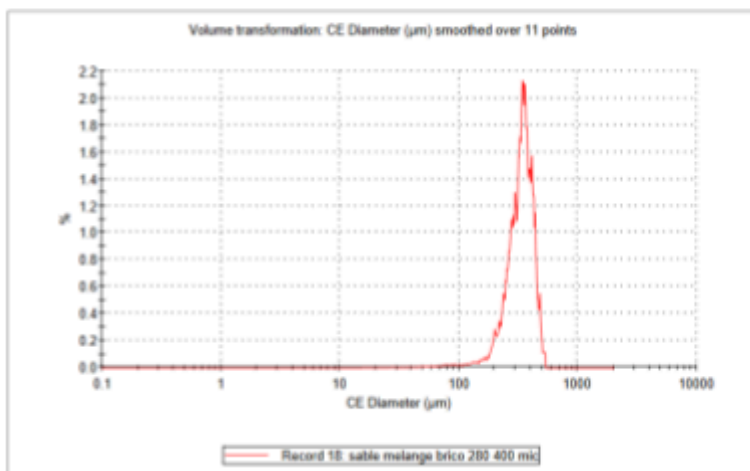
Diameter D[v,0,1] = Diamètre moyen des 10 premiers % de l'échantillon

Diameter D[v,0,5] = Diamètre moyen des 50 premiers % de l'échantillon

Diameter D[v,0,9] = Diamètre moyen des 90 premiers % de l'échantillon

Diameter D[4,3] = Diamètre moyen de l'échantillon par rapport au volume total

Diameter D[3,2] = Diamètre moyen de l'échantillon par rapport à la surface totale



Exemple d'un résultat de microscope de type Diameter Report :  
Volume Distribution

On remarque que d'ordre général, le nombre de petites particules parasites est conséquent, et ce malgré un tamisage de plusieurs heures. Cela montre premièrement la nécessité du contrôle de la pureté d'un milieu granulaire et l'efficacité très limitée du tamisage pour obtenir un milieu granulaire pur et uniforme. On remarque que la proportion de ces petits grains est réduite au fur et à mesure que les grains sont tamisés.

Échantillon	400-280	280-200	200-150
Grain le plus petit	2.18	2.18	2.18
Grain le plus grand	509.38	421.81	350.88
Nombre de grains	20787	9797	15710
Moyenne (Nombre)	12.31	31.89	43.84
Moyenne (Volume)	333.3	263.1	176.2
Moyenne (Surface)	295.5	241.9	157.8
50% (Nombre)	4.19	5.69	11.69
90 % (Nombre)	15.03	129.69	143.08
10% (Volume)	229.3	174	111.4
50% (Volume)	336.2	270.5	175.1
90% (Volume)	423.6	332.6	231.2
Ratio max	1	1	1
Ratio min	0.012	0.033	0.087
50 % (Ratio)	0.738	0.768	0.758
Moyenne Ratio	0.667	0.752	0.743

On remarque que les grains les plus grands de chaque échantillon sont plus grands que les tamis utilisés. On suppose que cela est dû au fait qu'un grain est un objet de l'espace en trois dimensions, et peut donc en étant retourné de la bonne manière passer à travers le tamis. On remarque que les ratios sont élevés, surtout pour du sable, cela à été confirmé par nos partenaires scientifiques.

On remarque également que les petits grains restent dans l'ensemble bloqués sur les tamis supérieurs, cela aurait pu être pallié par un tamisage plus long, mais cela aurait pris bien trop de temps.

## B) Analyse et modélisation des expériences avec la poussée d'Archimède

Les expériences sur la poussée d'Archimède ont été faites en 2 temps : premièrement nous avons utilisé la première méthode avec la balance, ensuite nous sommes passé à la seconde méthode avec un dynamomètre. La première méthode était très imprécise en raison du fait que la balance utilisée était une balance de cuisine, donc assez imprécise, ajoutée à cela tous les défauts de cette méthode, cela à donné des résultats très imprécis.

C'est pour cela que nous nous sommes tournés vers la seconde méthode, utilisant un outil Phidget, utilisant un pavé en métal et mesurant le courant y passant, la valeur de celui-ci changeant proportionnellement en fonction des forces appliquées sur celui-ci. On peut alors le calibrer pour avoir une valeur en Newton et avoir un graphique de l'évolution de la force appliquée par rapport au temps.

Nous avons alors réalisé un montage permettant d'inclure l'outil de mesure relié à un PC, nous avons marqué le cylindre grâce à la formule du volume du cylindre afin d'avoir un repère de quel volume on plonge dans le sable.



Photo de notre montage

Une fois les forces mesurées, nous mettons en place un décompte de 20 secondes durant lequel l'ordinateur stockera les mesures dans un tableur, cela fait un total de 80 mesures par immersions, sachant que l'on mesure cela avec un volume immergé de 0, 10, 20 et 30 mL, cela nous fait en tout 320 mesures. Nous faisons ensuite la moyenne des 80 résultats de chaque mesures afin d'avoir un seul et unique résultat à mettre dans notre tableur final. Nous calculons ensuite la valeur de la poussée d'archimède en faisant  $P_0 - P_1$ .

Nous retrouvons alors ces résultats :

Volume Immergé	Valeur de la poussée
10mL	0,14N
20mL	0,32N
30mL	0,46N

### C) Confrontation aux modèles théoriques et aux expériences déjà réalisées.

En tant que modèle théorique, nous pensons que la formule de la poussée d'Archimède dans un fluide est un bon comparatif. Nous avons utilisé un verre mesureur afin d'y mettre 25 cL de sable, nous l'avons pesé et nous avons trouvé une masse de 410 g. Nous en avons déduit une masse volumique de 1640 kg/m<sup>3</sup>. De là, nous sommes alors en mesure de calculer la poussée d'Archimède théorique appliquée sur notre cylindre.

$$P_a = \rho_{liq} \times g \times V_{im}$$

$$P_a = V_{im} \times 9,80665 \times 1640$$

Nous en avons alors déduit ce tableau :

	A	B	C	D	E
1	V immergé	Force mesurée		Poussé	Poussé Théo
2	mL	N		N	N
3	0	0,76		0	0
4	10	0,59		0,17	0,16082906
5	20	0,44		0,32	0,32165812
6	30	0,3		0,46	0,48248718
7					
8					

La colonne poussé définit la poussée d'Archimède mesurée expérimentalement, la colonne poussé Théo définit ce que serait la poussée d'Archimède théoriquement si c'est bel et bien la même loi que dans un fluide. On retrouve alors des valeurs très proches, signifiant qu'il est possible que la formule traduisant cette poussée d'Archimède dans un lit d'air fluidisé soit similaire, voire la même que celle qui s'applique universellement dans tous les fluides.

## IV. Conclusion et perspectives

### A) Bilan des expériences et du projet

Les expériences ont été dans l'ensemble un franc succès. Nous pensons que celles-ci permettent de confirmer la théorie, et nous souhaitons avec celles-ci permettre la création de modèle théorique et de formule liant les caractéristiques d'un milieu granulaire avec sa fluidification. Pour titre d'exemple, l'expérience avec la poussée d'Archimède qui a une valeur expérimentale très approchée de la valeur réelle. Nous espérons confirmer cela avec plus d'expériences dans un milieu plus grand.

### B) perspectives pour l'avenir

Suite à la réussite de nos expériences, nous avons prévu de réaliser une série de nouveaux tests à petite échelle que nous avons en partie évoqués au fil du mémoire tel l'ajout du facteur humidité dans nos mesures afin de vérifier si la théorie de la liaison hydrogène dans la farine est plausible. Nous souhaitons également essayer d'autres types de grains tels des grains volumineux mais légers, ou bien avec des billes de polystyrène. Nous souhaitons avant tout nous diriger vers la réalisation d'une expérience à plus grande échelle, un bac moyen de sable liquide, de XX cm sur XX cm, dans lequel nous pourrions réaliser des expériences sans nous soucier de l'effet de confinement produit par la petite taille de nos précédentes expériences. Ce bac servira également à effectuer des tests sur le sable liquide afin de l'étudier et le comparer à de réels fluides à l'aide d'expériences plus poussées et précises sur la poussée d'Archimède.

Nous avons plusieurs objectifs à long terme mais le premier serait de réussir à réaliser une expérience de grande envergure. A terme, nous voudrions créer un moyen simple et peu coûteux pour vérifier la pureté d'un milieu granulaire, ce qui dans certaines industries peut être un problème, c'est pour cela que nous effectuons des expériences nous permettant de connaître les différents paramètres influant sur la fluidification des sables. Nous souhaitons créer un produit fini pouvant être commercialisé, nous avons déjà plusieurs idées de produits à concevoir tel que la création d'un jacuzzi de sable liquide, mais avant toute chose, il nous faut étudier ce phénomène. Dans ce but, nous mêlerons sciences et sciences sociales, afin que nous élaborions une expérience sociale, une étude pour savoir si les gens seraient prêts à acheter un jacuzzi de sable, puis nous démarcherons des sociologues afin qu'ils donnent leur avis sur la validité de celle-ci. Notre but est de pouvoir proposer à terme un produit fini issu de ce phénomène scientifique.

### C) Remerciement et conclusion

Nous veillons à remercier chaleureusement toutes les personnes nous ayant aidé et soutenu de près ou de loin dans ce projet. Nous souhaitons tout d'abord remercier Monsieur Simon, notre professeur référent qui nous a énormément aidé et soutenu dans ce

projet, que ce soit en s'investissant dans notre projet en suivant l'avancée de nos travaux, ou en nous donnant des conseils et des explications sur certains aspects de la physique qui était assez obscure pour nous.

Ensuite, nous souhaitons également remercier nos lycées respectifs ainsi que leurs administrations qui ont permis une collaboration inter-lycée.

Ensuite, nous souhaitons également remercier les chercheurs qui nous ont aidés Baptiste Darbois-Textier, Cyprien Morize ainsi que Christophe Manquest qui ont permis au projet de prendre une direction, et qui nous ont beaucoup donné que ce soit en explication ou en moyen.

Nous aimerions également remercier nos camarades, notamment Lucas qui a gentiment modélisé en 3D les objets que nous avons utilisés pour les expériences sur la poussée d'Archimède. Nous aimerions aussi remercier Achille qui a monté notre vidéo de présentation et sans qui le résultat de celle-ci ne serait sûrement pas le même.

Enfin, nous sommes fiers de vous présenter ce mémoire, fruit de notre travail et de nos expériences, et nous vous remercions vous, membre du jury, d'avoir pris le temps de lire ce mémoire.

En guise de note de synthèse, cette aventure nous a permis de découvrir beaucoup de choses, nous avons beaucoup appris et pas uniquement en physique. Nous avons également rencontré des personnes, appris à optimiser au mieux les travaux de groupe et nous avons eu l'occasion de visiter des laboratoires, découvrir de nos propres yeux le monde du travail et de la recherche. En conclusion, ce projet fut quelque chose de bénéfique pour nous tous et nous ferons tout pour le continuer.

## D) Sources

Wikipedia :

<https://en.wikipedia.org>

Ecole Centrale Marseille :

<http://alain.mailliat.free.fr/PolyPhasique/COURS/Chap7/Chapitre07-Nov2008.pdf>

Institut Méditerranéen d'océanologie :

<https://people.mio.osupytheas.fr>

MOOC physique olivier granier :

<http://olivier.granier.free.fr>

Mark Rober :

[https://www.youtube.com/channel/UCY1kMZp36IQSyNx\\_9h4mpCg](https://www.youtube.com/channel/UCY1kMZp36IQSyNx_9h4mpCg)

Chaine youtube du Royal institut of science:

<https://www.youtube.com/watch?v=zjgURBlqJ6s>