

Table des matières

1	Introduction	2
2	Principales notations utilisées	3
3	Matériel utilisé	4
3.1	Les logiciels	4
3.2	Le débit-mètre	5
3.3	Le capteur de pression	5
4	Étalonnage des appareils utilisés	6
4.1	Étalonnage du débit-mètre	6
4.2	Étalonnage du capteur de pression	7
5	Comment étudier la transition entre les deux régimes ?	8
5.1	Considérations théoriques à propos du passage de l'air à travers la couche de sable	8
5.2	Comment montrer que l'air passe à travers le sable sans le soulever	8
5.2.1	Montage	8
5.2.2	Observations	8
5.2.3	Lien avec l'étude du stage	9
5.2.4	Résultats expérimentaux	10
6	Mesure du volume de la chambre	11
6.1	Principe	11
6.2	En pratique	11
6.2.1	Le problème	11
6.2.2	La solution	12
7	Mesure du débit critique à volume donné	13
7.1	Mesures	13
7.2	Interprétation : mesure de D_c	13
8	Tracé du diagramme	15
8.1	Le diagramme	15
8.2	Interprétation de ces graphes	15
8.2.1	Temps de montée et de descente de la pression	15
8.2.2	Temps de fermeture du canal	16
8.3	Influence du coefficient de tension superficielle du liquide	17
9	Étude des corrélations entre pics successifs	18
10	Conclusion	20
A	Comment l'air traverse la couche de sable	21

Chapitre 1

Introduction

Le stage portait sur l'étude du passage de l'air à travers un milieu granulaire immergé : il utilisait le dispositif représenté sur la figure 2.1, qui permettait d'emmagasiner de l'air apporté à débit massique constant sous une couche de sable immergée dans de l'eau. Lorsque la pression de l'air dans la chambre devient suffisante, de l'air passe à travers le sable. Le stage consistait à étudier l'évolution de la pression dans la chambre au cours du temps. En effet, il avait déjà été remarqué qu'à faible débit d'arrivée d'air, la pression évoluait périodiquement au cours du temps (figure 1.1), que quand on augmentait le débit, le régime devenait beaucoup plus chaotique, alternant des phases où des bulles passaient dans l'eau de façon périodique et des phases où des trains de bulles passaient de façon continue, et qu'à fort débit, le régime devenait totalement continu (figure 1.2). Le stage consistait à étudier la transition entre le régime périodique et le régime continu.

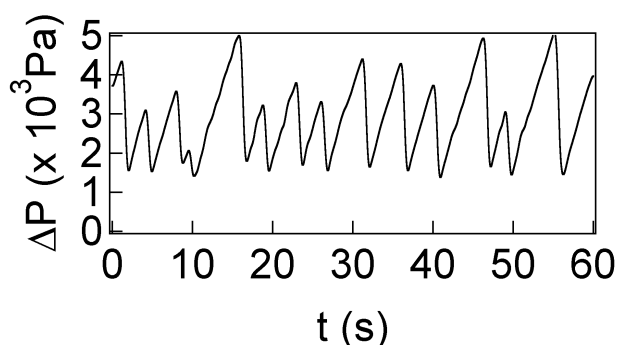


FIG. 1.1 - Évolution de la pression en régime périodique : $h = 11\text{cm}$, $s = 2,5\text{cm}$, $37 < r < 75\mu\text{m}$, $d = 1\text{mm}$, $V = 105\text{cm}^3$, $D = 0,8\text{mg/s}$

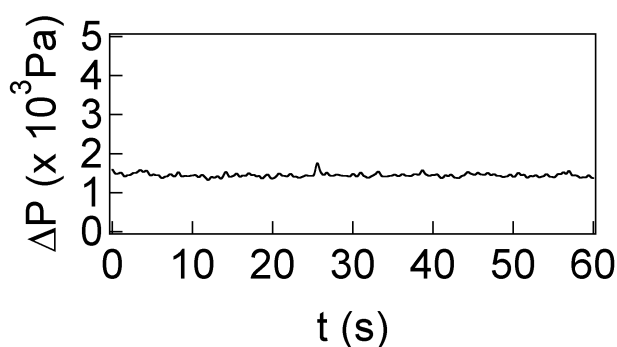


FIG. 1.2 - Évolution de la pression en régime continu : $h = 11\text{cm}$, $s = 2,5\text{cm}$, $37 < r < 75\mu\text{m}$, $d = 1\text{mm}$, $V = 105\text{cm}^3$, $D = 3,1\text{mg/s}$

Chapitre 2

Principales notations utilisées

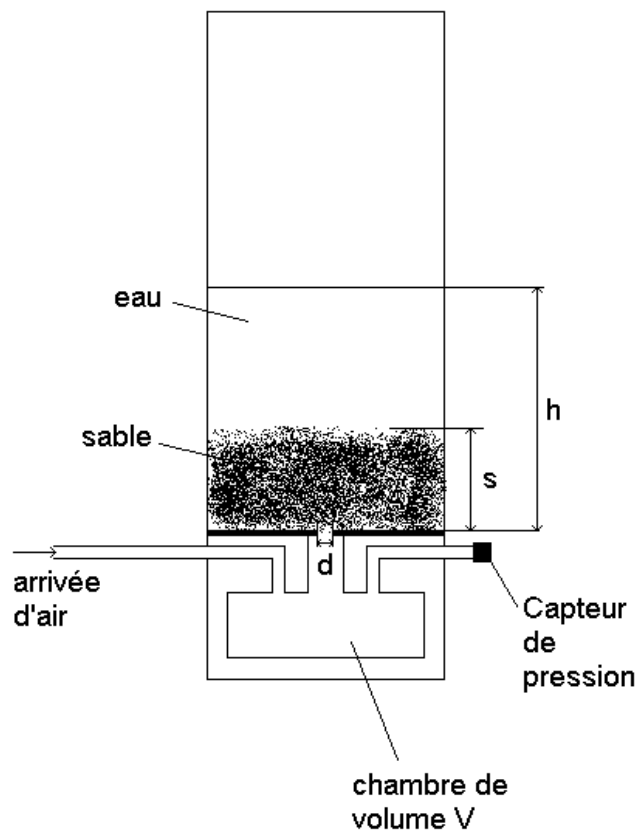


FIG. 2.1 – Schéma du dispositif expérimental utilisé

h : hauteur d'eau dans le dispositif
 s : hauteur de sable dans le dispositif
 r : rayon des grains de sable
 d : diamètre du trou entre la chambre et la couche de sable
 D ou D_m : débit massique d'arrivée d'air
 D_v : débit volumique d'arrivée d'air
 D_c : débit critique
 V_m : volume molaire de l'air

V : volume de la chambre
 M : masse molaire de l'air
 $\langle x \rangle$: valeur moyenne de x
 ρ : masse volumique de l'eau
 g : accélération de la pesanteur
 γ : coefficient de tension superficielle de l'eau
 τ : temps caractéristique de fermeture du canal
 Δp : sauf mention contraire, différence de pression entre les deux faces du capteur de pression

Chapitre 3

Matériel utilisé

Le montage utilisé est représenté sur la figure 3.1 :

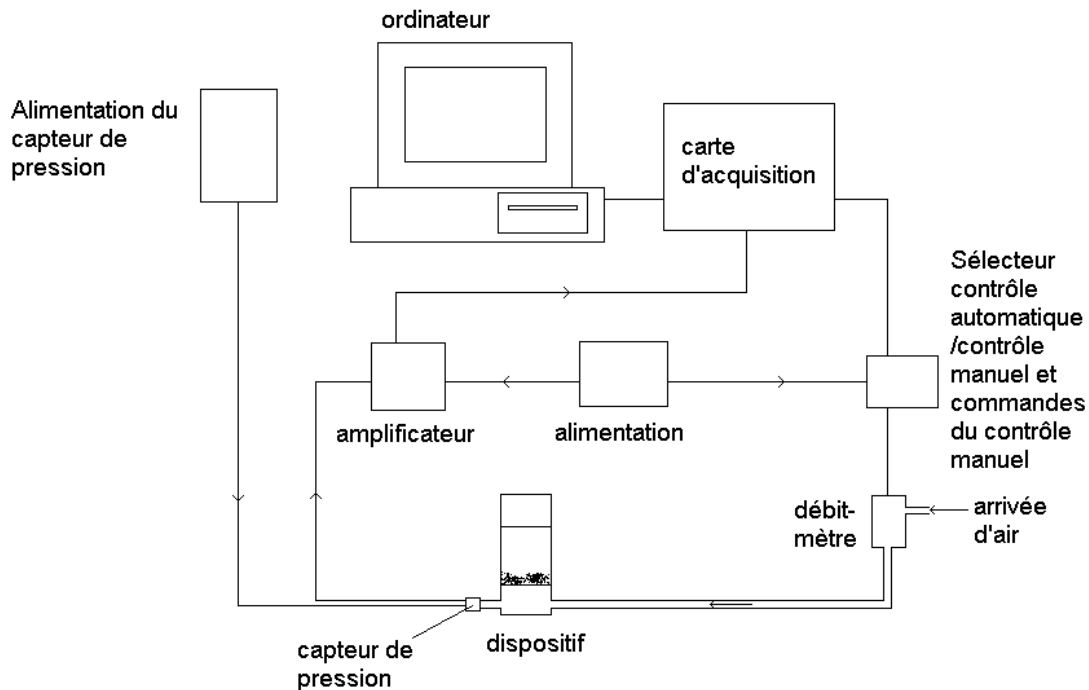


FIG. 3.1 – Montage utilisé

3.1 Les logiciels

J'ai utilisé deux logiciels :

- Un logiciel d'acquisition (DT-Open Layers Startup Utility - DT322). Ce logiciel permet d'une part d'envoyer une tension donnée au débit-mètre, via la carte d'acquisition, et d'autre part de recueillir les données enregistrées sous forme d'une différence de potentiel par le détecteur de pression, toujours à l'aide de la carte d'acquisition.
- Un logiciel de traitement (Igor pro 3.14) qui permet de traiter les données brutes fournies par le logiciel d'acquisition.

3.2 Le débit-mètre

Le débit-mètre utilisé (EL-Flow F201C) introduit de l'air dans la chambre à débit massique D constant, variant entre 0,2 et 4,3 mg/s. Il s'agit en fait d'une vanne. Une rétroaction la commande de sorte que le débit massique d'arrivée d'air soit constant.

3.3 Le capteur de pression

Le capteur de pression (OMEGA PX170) est constitué d'un pont de Wheastone dont une des résistances dépend de la pression. Si l'on applique une différence de pression entre les deux côtés, le pont est déséquilibré. La différence de potentiel qui en résulte dépend de la différence de pression (cf. paragraphe : «Étalonnage du capteur de pression», page 7). Dans toute la suite, le capteur de pression est relié d'un côté à la chambre, de l'autre à l'air environnant, de sorte qu'il mesure la différence de pression entre la chambre et l'atmosphère.

Chapitre 4

Étalonnage des appareils utilisés

4.1 Étalonnage du débit-mètre

À l'aide du logiciel d'acquisition, on peut piloter le débit-mètre afin de lui appliquer la tension de consigne voulue. Mais il faut connaître la loi liant la tension U appliquée au débit-mètre au débit massique d'air D qu'il fournit. Pour ce faire, j'ai utilisé le montage de la figure 4.1 :

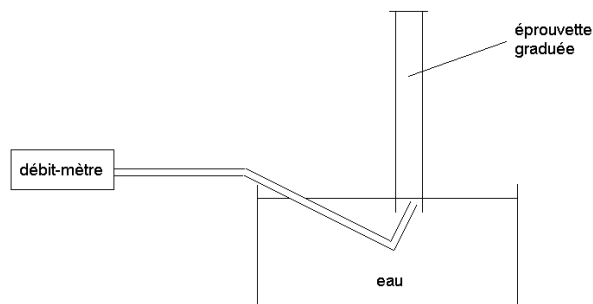


FIG. 4.1 – Montage réalisé pour étalonner le débit-mètre

L'éprouvette est plongée dans l'eau, puis l'air qu'elle contient est pompé à l'aide d'une trompe à eau, de sorte que l'éprouvette se remplit d'eau. Ensuite, on applique au débit-mètre une tension donnée, et avec un chronomètre, on mesure le temps qu'il met à envoyer 100mL d'air dans l'éprouvette. Le graphe obtenu est représenté sur la figure 4.2 :

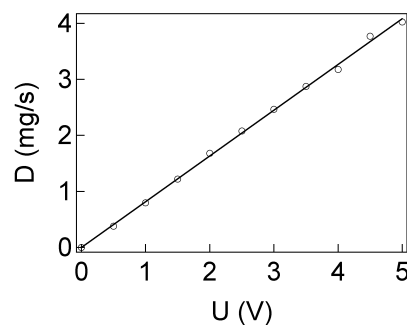


FIG. 4.2 – Courbe d'étalonnage du débit-mètre

On observe que le débit massique D fourni est une fonction linéaire de la tension U appliquée au débit-mètre :

$$D(\text{mg.s}^{-1}) = (0,82 \pm 0,01).U(\text{V}) \quad (4.1)$$

4.2 Étalonnage du capteur de pression

Le capteur de pression envoie à l'ordinateur une différence de potentiel, qu'il faut être capable de relier à la différence de pression mesurée. Pour étalonner cet appareil, j'ai utilisé le montage de la figure 4.3 :

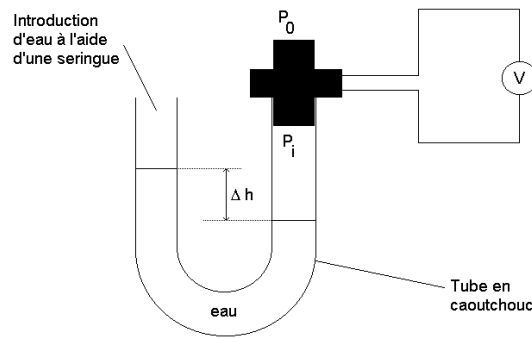


FIG. 4.3 – Montage réalisé pour étalonner le capteur de pression

D'un côté, le capteur de pression est soumis à la pression atmosphérique P_0 , et de l'autre, il est soumis à la pression P_i régnant à l'intérieur du tuyau en caoutchouc. Avant qu'on introduise de l'eau dans celui-ci, ces deux pressions sont égales. Petit à petit, on introduit de l'eau à l'aide d'une seringue, faisant monter la pression régnant dans le tuyau au voisinage du capteur de pression. La différence de pression $\Delta P = P_i - P_0$ mesurée par le capteur de pression vaut alors

$$\Delta p = \rho g \Delta h \quad (4.2)$$

On mesure alors la tension délivrée par le capteur de pression, avec un multimètre, et on trace la courbe suivante :

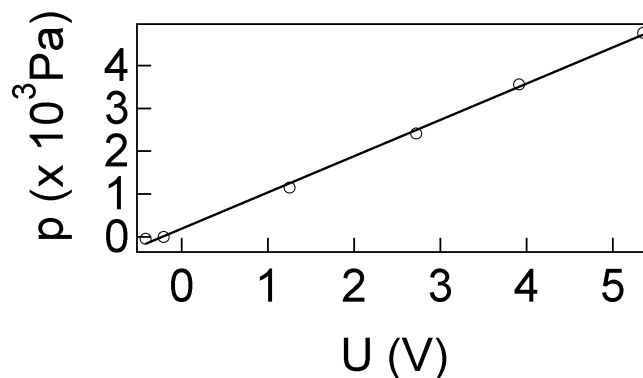


FIG. 4.4 – Courbe d'étalonnage du capteur de pression

Là encore, la réponse de l'appareil à une différence de pression est linéaire, puisque la loi liant la tension U qui apparaît entre ses faces suite à une différence de pression est :

$$\Delta P(\text{Pa}) = 200 \pm 50 + (850 \pm 20).U(\text{V}) \quad (4.3)$$

Chapitre 5

Comment étudier la transition entre les deux régimes ?

5.1 Considérations théoriques à propos du passage de l'air à travers la couche de sable

Dans l'annexe A (page 21), on voit que l'air traverse un canal qui existe déjà au sein de la couche de sable, et qu'il traverse une petite épaisseur de sable qui bouche le dessus de ce canal. Mais à chaque fois qu'une bulle d'air passe dans l'eau, elle déplace du liquide, et c'est ce déplacement de liquide qui provoque le soulèvement du bouchon de sable. Ensuite, le sable a tendance à former un nouveau bouchon en haut du canal.

Tout dépend de la rapidité avec laquelle la pression monte dans la chambre, et de la rapidité avec laquelle le bouchon se reforme après le passage d'une bulle : si le temps caractéristique de montée de la pression dans la chambre (homogène à $\frac{V}{D_v}$, où D_v est le débit volumique, directement lié au débit massique D_m par l'expression $D_v = D_m \times \frac{V_m}{M}$) est supérieur au temps caractéristique de formation du bouchon, le régime est périodique, car le bouchon a le temps de se reformer avant le passage d'une nouvelle bulle d'air. Sinon, le régime est continu, car le bouchon n'a pas le temps de se reformer.

Le temps caractéristique de montée de la pression dans la chambre dépend de D_m (par l'intermédiaire de D_v) et de V . On peut raisonnablement penser que le temps caractéristique de formation du bouchon dépend du rayon et de la masse des grains (directement liés l'un à l'autre), et de la nature du fluide dans lequel ils sont immergés, le mouvement des grains dans le fluide avant de reboucher le canal dépendant de ces données.

J'ai donc décidé, pour étudier la transition entre les deux régimes, de tracer un diagramme représentant les domaines des régimes périodique et continu dans un repère (D_m, V) , pour différentes tailles de grains. J'ai aussi fait une série de mesure en mettant du savon (DECON) dans l'eau afin de modifier le paramètre γ , mais c'est la seule mesure que j'ai faite concernant l'influence de la nature du fluide.

5.2 Comment montrer que l'air passe à travers le sable sans le soulever

5.2.1 Montage

Il est intéressant de savoir quelle est la taille des bulles au moment de leur formation. Cela permet en particulier de confirmer le fait que le sable se soulève après le passage de la bulle. Pour cela, j'ai monté une autre manipulation, dont la photo est reproduite sur la figure 5.1.

Un tube en pyrex de $1,4\text{cm}$ de diamètre et d'une hauteur de $37,3\text{cm}$ est maintenu verticalement, son extrémité inférieure se trouvant dans un cristalliseur. Ce tube est rempli de sable saturé d'eau, et le cristalliseur contient lui aussi de l'eau.

5.2.2 Observations

On observe qu'à l'équilibre, le sable est saturé d'eau sur une certaine hauteur, et que le sable se situant au-dessus est juste humide (on le voit sur la photo : le sable situé en haut de la colonne n'est pas de la même couleur que le sable situé en-dessous).

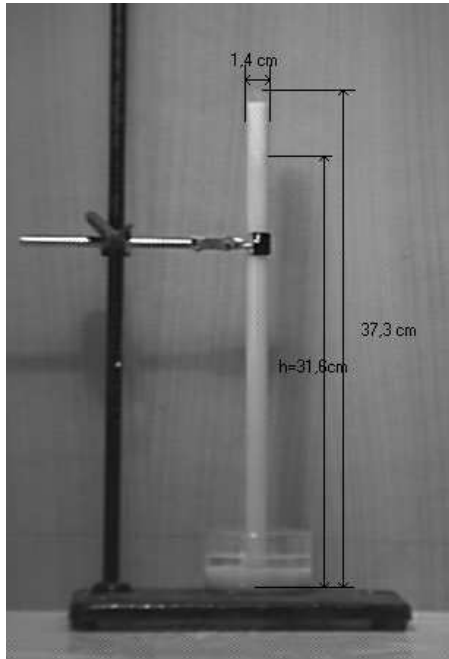


FIG. 5.1 – Photo du montage

5.2.3 Lien avec l'étude du stage

Le sable présent dans ce tube est formé de petites billes sphériques, entre lesquelles existe un petit espace par lequel l'air et l'eau peuvent passer. Cet espace est équivalent à un capillaire dont nous allons essayer d'estimer une grandeur caractéristique. Comme dans l'autre dispositif, l'air pénètre dans le sable tout en repoussant l'eau.

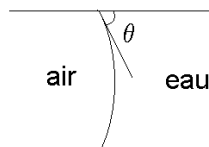


FIG. 5.2 – Définition de l'angle de mouillage

À l'équilibre (figure 5.2), l'interface air-eau fait avec les parois du capillaire un angle $\theta = \theta_0$ bien déterminé, donc elle a un rayon de courbure R bien défini, ce qui correspond à une différence de pression donnée entre l'air et l'eau, selon l'équation de Laplace :

$$\Delta p = \frac{2\gamma}{R} \quad (5.1)$$

La mesure de Δp permet donc de calculer R , sachant que $\gamma = 7,2 \cdot 10^{-2} \text{ kg} \cdot \text{s}^{-2}$. Si la différence de pression entre l'air et l'eau n'a pas cette valeur, l'air ne pénètre pas dans le capillaire. L'interface entre le sable saturé d'eau et le sable humide mise en évidence dans l'expérience correspond exactement à la situation où la différence de pression entre l'air et l'eau impose à R d'avoir cette valeur précise. Pour connaître Δp , il n'y a qu'à mesurer la hauteur h de l'interface par rapport à la hauteur d'eau dans le cristalliseur :

$$\Delta p = \rho g h \quad (5.2)$$

où ρ est la masse volumique de l'eau et g l'accélération de la pesanteur.

5.2.4 Résultats expérimentaux

Expérimentalement, avec des grains dont le rayon se situe entre 200 et 250 μm , et de l'eau du robinet, j'ai mesuré $h = 31,6cm$, ce qui correspond à $R = 45\mu m$, soit $R = 0,4r$. Ceci est en accord avec des résultats trouvés précédemment, où l'on trouvait $R = 0,46r$. Avec du sable et de l'eau très propres, on trouve $R = 0,30r$ avec les mêmes grains [1]. Cela influe sur le résultat car si le sable est propre, la valeur de θ_0 devient à peu près nulle, et si l'eau est propre, γ est plus élevé. Par ailleurs, sur l'acquisition correspondant à la figure 5.4, on peut faire un histogramme pour les différentes valeurs du rayon (figure 5.3). Le rayon de chaque bulle est calculé grâce à un programme que j'ai fait à l'aide d'Igor, qui permet de déterminer pour chaque pic la pression juste avant la montée en pression et la pression juste après. De cette différence de pression, on déduit le rayon de la bulle qui s'est formée grâce à l'équation de Laplace. L'historgramme sur les rayons a été fait sur 51 minutes d'acquisition (17 acquisitions comme celle de la figure 5.4). On observe que la valeur la plus probable du rayon de la bulle au moment de sa formation est voisine de la valeur donnée par l'expérience de la colonne, ce qui illustre le fait que l'air ne soulève pas le sable pour passer dans l'eau, mais passe entre les grains de sable.

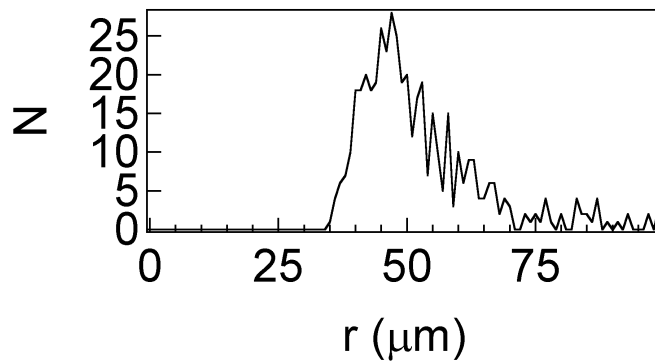


FIG. 5.3 – Histogramme pour le rayon des bulles : $s = 2,5cm$, $h = 3cm$, $d = 1mm$, $V = 119cm^3$, $D = 0,8mg/s$, $100 < r < 125\mu m$. Pour chaque valeur r du rayon, $N(r)$ est le nombre de bulles qui sont passées ayant un rayon compris entre r et $r + 1$.

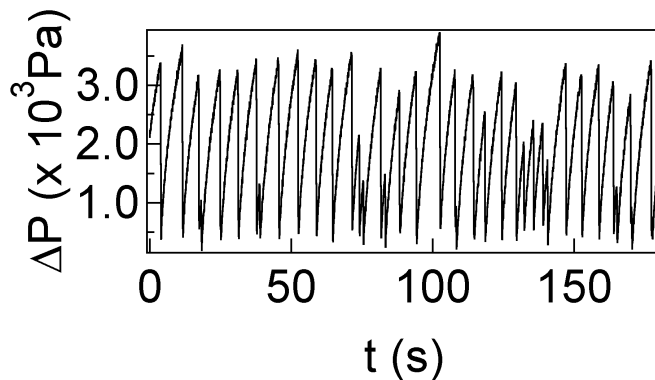


FIG. 5.4 – Évolution de la pression en fonction du temps, $s = 2,5cm$, $h = 3cm$, $d = 1mm$, $V = 119cm^3$, $D = 0,8mg/s$, $100 < r < 125\mu m$

Chapitre 6

Mesure du volume de la chambre

6.1 Principe

La mesure géométrique de ce volume n'est pas évidente, car la chambre est non seulement formée de la cavité présente au bas du dispositif, mais également du tuyau d'arrivée d'air. Elle a donc une forme relativement complexe. Mais on peut tout de même calculer son volume expérimentalement. En effet, lorsque l'air pénètre dans la chambre, si on le considère comme un gaz parfait, son équation d'état est :

$$PV = nRT \quad (6.1)$$

où V est le volume de la chambre (on considère le système durant une période où l'air ne quitte pas la chambre, c'est-à-dire lorsque le régime est périodique et entre le passage de deux bulles successives). Pendant le temps t de montée de la pression, la variation de la quantité d'air est :

$$\Delta n = \frac{tD_m}{M} \quad (6.2)$$

où D_m est le débit massique d'arrivée d'air et M sa masse molaire, soit $29g/mol$. De là, il résulte que la variation de pression pendant le temps t vaut :

$$\Delta p = \frac{tD_mRT}{VM} \quad (6.3)$$

La pente de la courbe au moment de la montée de la pression vaut :

$$pente = \frac{\Delta p}{t} = \frac{D_mRT}{VM} \quad (6.4)$$

De là, on déduit que le volume de la chambre est égal à :

$$V = \frac{D_mRT}{pente.M} \quad (6.5)$$

6.2 En pratique

6.2.1 Le problème

On remarque que sur les courbes expérimentales en régime périodique, la montée en pression n'est pas tout à fait linéaire (cela se voit bien sur la figure 5.4). Cela est dû à un effet thermique qui se produit dans la chambre au moment du passage de la bulle. En effet, la montée en pression, relativement lente, se fait à température ambiante, alors que la brutale baisse de la pression due au passage de la bulle se fait de façon adiabatique. Le passage de la bulle est donc accompagné d'une baisse de la température de l'air dans la chambre. L'équilibre thermique avec l'extérieur met quelques secondes à se rétablir. Dans l'expérience, le débit étant constant, et le canal se rebouchant quasiment instantanément après le passage de la bulle, la montée en pression n'a pas lieu à température constante, car elle commence avant que l'équilibre avec l'extérieur ne s'établisse. Cela explique ces courbes à l'aspect concave, car la pente de la courbe au moment de la montée en pression dépend de la température, d'après l'équation 6.4.

6.2.2 La solution

Pour remédier à ce problème, j'ai calculé le volume de la chambre en l'absence de la partie supérieure du système étudié : j'ai enlevé le sable, l'eau et le cylindre en plexiglas qui surmontait la chambre. Alors que le débit-mètre soufflait de l'air à débit massique constant, j'ai bouché le trou avec mon doigt pendant quelques secondes toutes les cinq secondes, en répétant cela pendant une minute. Le fait d'attendre cinq secondes entre deux montées en pression permet de rétablir l'équilibre entre la température de l'air dans la chambre et la température ambiante, donc de réaliser des montées en pression à température constante. La courbe représentant la pression en fonction du temps est reproduite sur la figure 6.1.

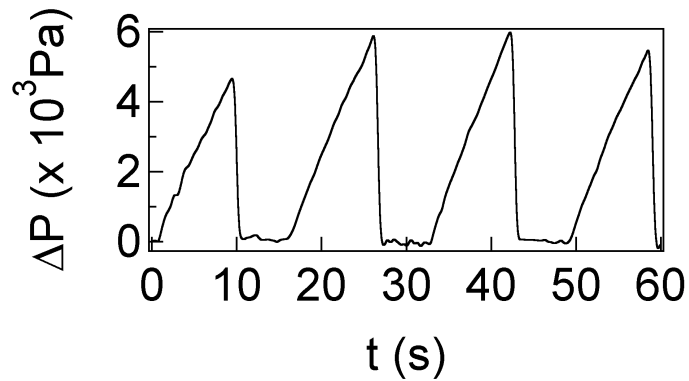


FIG. 6.1 – Courbe de mesure du volume : chambre vide, tuyau d'environ $1m$ de long et $3mm$ de rayon intérieur, débit de $0,8mg/s$

On observe que là, la montée en pression est bien linéaire. En mesurant la pente de chaque montée, j'ai obtenu, dans les conditions de ce graphe, un volume de $105cm^3$. Pour modifier le volume de la chambre, il suffit d'y introduire des objets, ou, pour obtenir un volume encore plus petit, de remplir la chambre d'eau. On peut aussi jouer sur la longueur du tuyau.

Chapitre 7

Mesure du débit critique à volume donné

7.1 Mesures

Le débit critique est défini comme étant le débit au-delà duquel le régime est continu (autrement dit, si le débit est inférieur au débit critique, le régime est soit périodique, soit chaotique). Pour mesurer ce débit, j'ai fait un certain nombre d'acquisitions d'une minute à différents débits pour une valeur donnée du volume. Le programme que j'avais écrit pour mesurer la pression maximale de chaque pic permettait de calculer la valeur moyenne de toutes ces pressions maximales (appelée $\langle \Delta P_{max} \rangle$ dans la suite), et de même pour les pressions minimales ($\langle \Delta P_{min} \rangle$ est la moyenne des pressions mesurées juste avant la montée de chaque pic). La valeur moyenne de la pression sur l'acquisition, notée $\langle \Delta P \rangle$, peut être donnée directement par Igor. Le graphe obtenu pour une chambre de volume 36cm^3 , avec des grains dont le diamètre se situe entre 75 et $150\mu\text{m}$, pour une hauteur d'eau de 11cm , une hauteur de sable de $2,5\text{cm}$ et un trou de diamètre 1mm entre la chambre et le sable est reproduit sur la figure 7.1.

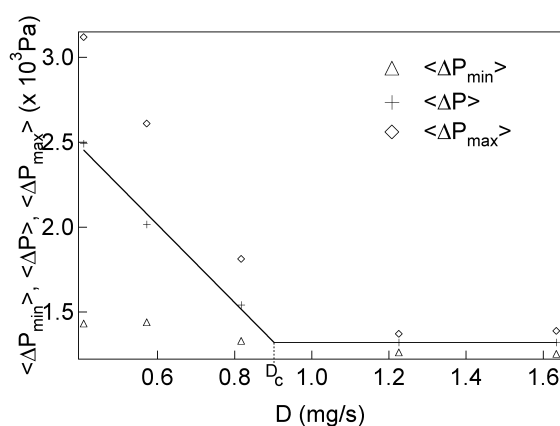


FIG. 7.1 – Évolution des pressions moyennes en fonction du débit : $h = 11\text{cm}$, $s = 2,5\text{cm}$, $37 < r < 75\mu\text{m}$, $d = 1\text{mm}$, $V = 36\text{cm}^3$

7.2 Interprétation : mesure de D_c

Sur ce graphe, on observe que la différence de pression moyenne entre la pression dans la chambre et la pression atmosphérique P_0 décroît linéairement jusqu'à être égale à $\langle \Delta P_{min} \rangle$. À petit débit, l'amplitude des variations de pression est très importante, ce qui correspond à un régime périodique : le canal se bloque fréquemment, empêchant l'air de quitter la chambre, ce qui provoque de grosses montées en pression. À débit élevé, l'amplitude des oscillations est très faible. Cela correspond à un régime continu, où le canal ne se bouche jamais, et où l'air quitte la chambre continuellement. Cela peut être observé sur les figures 7.2, 7.3 et 7.4, qui correspondent à trois des acquisitions que j'ai faites pour tracer cette courbe.

La courbe représentant la pression moyenne en fonction du débit est constituée de deux droites : l'une décroît, pendant que l'autre est une droite horizontale. Le débit critique D_c est alors défini comme le débit correspondant à l'intersection de ces deux droites. Sur le graphe, on lit $D_c = 0,9 \pm 0,1\text{cm}^3/\text{s}$.

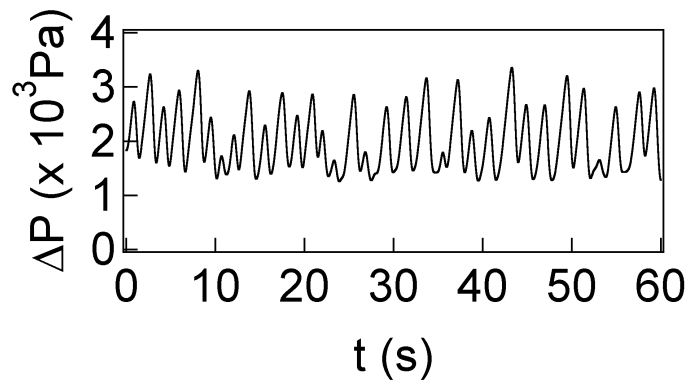


FIG. 7.2 – Évolution de la pression en fonction du temps à faible débit (le régime est périodique) : $h = 11\text{cm}$, $s = 2,5\text{cm}$, $37 < r < 75\mu\text{m}$, $d = 1\text{mm}$, $V = 36\text{cm}^3$, $D = 0,6\text{mg/s}$

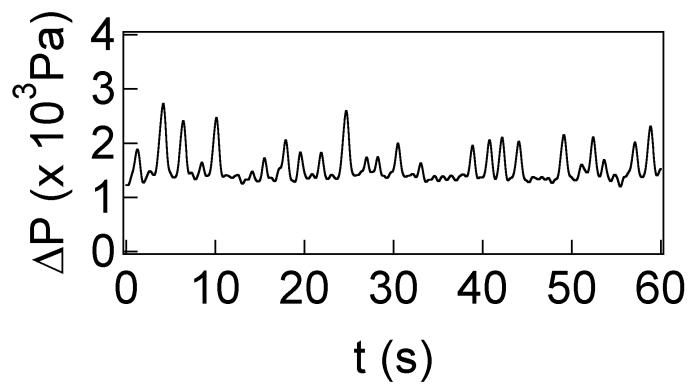


FIG. 7.3 – Évolution de la pression en fonction du temps à débit moyen (le régime est chaotique) : $h = 11\text{cm}$, $s = 2,5\text{cm}$, $37 < r < 75\mu\text{m}$, $d = 1\text{mm}$, $V = 36\text{cm}^3$, $D = 0,8\text{mg/s}$

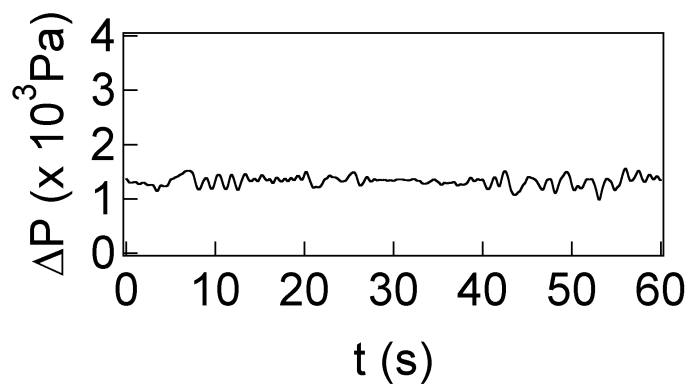


FIG. 7.4 – Évolution de la pression en fonction du temps à débit élevé (le régime est continu) : $h = 11\text{cm}$, $s = 2,5\text{cm}$, $37 < r < 75\mu\text{m}$, $d = 1\text{mm}$, $V = 36\text{cm}^3$, $D = 1,6\text{mg/s}$

Chapitre 8

Tracé du diagramme

Le tracé du diagramme représentant les domaines des régimes périodique et continu dans l'espace (D, V) doit être réalisé point par point, chaque point correspondant à une série de conditions (à r donné, il faut faire une série de mesures pour différentes valeurs du volume, chaque mesure correspondant à un débit donné). J'ai tracé ce diagramme dans le cas $h = 11\text{cm}$, $s = 2,5\text{cm}$, $d = 1\text{mm}$. J'ai fait des mesures pour différentes taille de grains et j'en ai fait une série aussi en rajoutant du savon dans l'eau pour voir l'influence de la présence du savon.

8.1 Le diagramme

Le diagramme est représenté sur la figure 8.1.

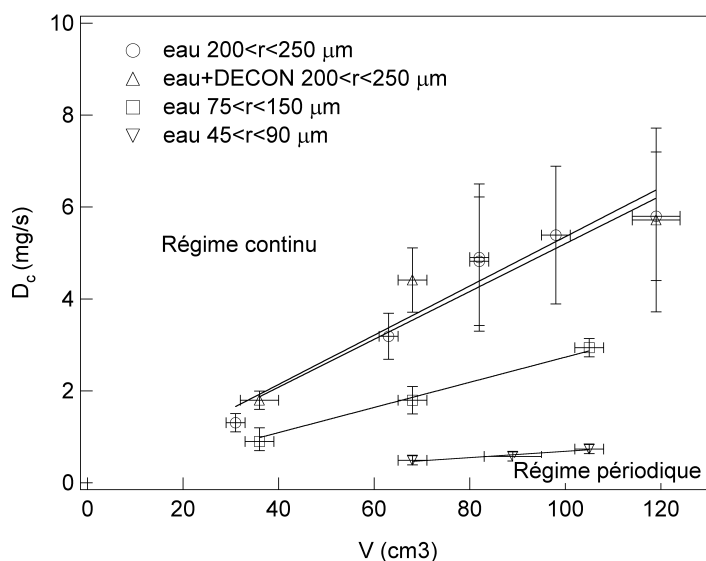


FIG. 8.1 – Diagramme représentant les domaines des régimes continu et périodique, pour différentes tailles de grains et différentes natures de fluides

On observe que dans l'espace (D, V) , les domaines d'existence des régimes sont séparés par une droite, dont la pente croît avec la taille des grains.

8.2 Interprétation de ces graphes

8.2.1 Temps de montée et de descente de la pression

Le graphe de la figure 8.2 montre un zoom sur la figure 1.1. Sur ce graphe, on observe une montée en pression, correspondant au moment où l'air entre dans la chambre mais reste confiné à l'intérieur. Cette montée en pression dure un certain temps t_a . Ensuite, la bulle est émise, et la baisse de la pression qui l'accompagne



FIG. 8.2 – Montée en pression suivie de l'émission d'une bulle : $h = 11\text{cm}$, $s = 2,5\text{cm}$, $37 < r < 75\mu\text{m}$, $d = 1\text{mm}$, $V = 105\text{cm}^3$, $D = 0,8\text{mg/s}$

s'étend sur un temps t_b . Cette baisse de pression est immédiatement suivie d'une nouvelle montée en pression, ce qui montre que le canal se rebouche exactement au moment où la pente de la courbe change. Le temps t_b correspond donc au temps qu'il faut au canal pour se reboucher.

Si $t_b < t_a$, le régime est périodique, car le canal a le temps de se reboucher avant que la pression dans la chambre atteigne la valeur seuil. Si $t_b > t_a$, le régime est continu. Le débit critique D_c correspond donc exactement au débit tel que $t_b = t_a$.

8.2.2 Temps de fermeture du canal

On peut définir $\tau = \frac{V}{D_c}$, qui est le temps nécessaire pour doubler la pression dans la chambre au débit critique. τ vaut par exemple 23s pour des grains dont les rayons se répartissent entre 100 et $125\mu\text{m}$. Ce temps caractéristique est représenté sur la figure 8.3.

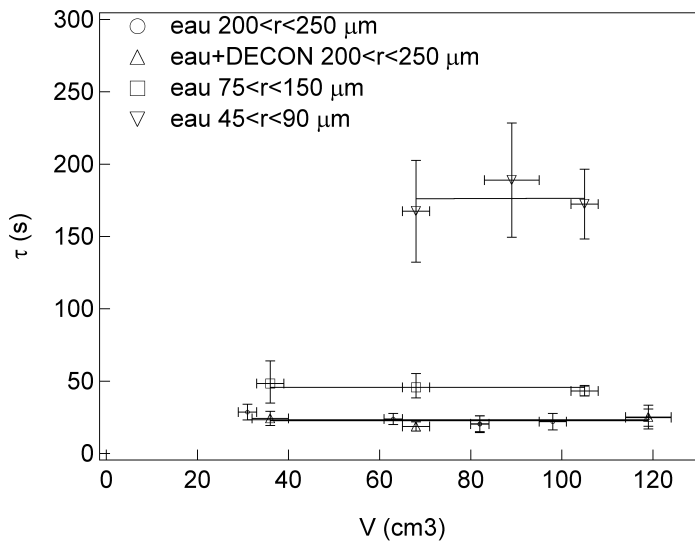


FIG. 8.3 – Diagramme représentant le temps caractéristique de montée en pression, pour différentes tailles de grains et différentes natures de fluides

On vérifie déjà que ce temps τ ne dépend pas du volume de la chambre, puisque les courbes le représentant dans l'espace (τ, V) pour différentes tailles de grains sont des droites horizontales. Par ailleurs, on observe que

τ dépend fortement de la taille des grains. Sur la courbe de la figure 8.4, on voit que τ semble proportionnel à $\frac{1}{r^2}$. Cependant, il faudrait faire plus de mesures pour s'en assurer. On peut tâcher de mesurer le temps que met

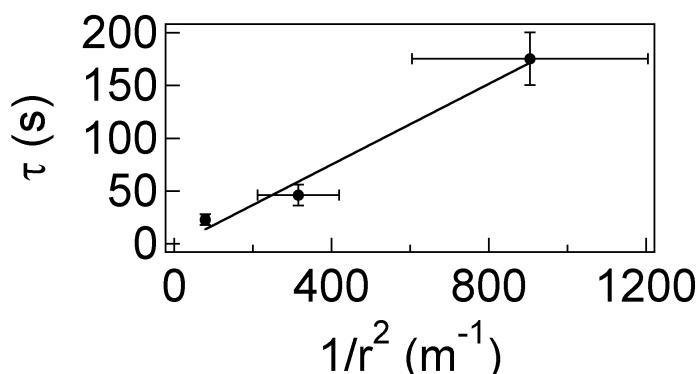


FIG. 8.4 – τ en fonction de $\frac{1}{r^2}$

le canal à se reboucher. Au débit critique, le temps de montée de la pression est égal au temps de descente. Ce temps de montée t_a vaut par ailleurs

$$t_a = \frac{P_{max} - P_{min}}{P_0} \cdot \tau \quad (8.1)$$

car τ est le temps nécessaire pour doubler la pression dans la chambre, c'est-à-dire pour la faire augmenter de la valeur de la pression atmosphérique P_0 . Par conséquent, le temps t_b de descente, au débit critique, vaut

$$t_b = t_a = \frac{P_{max} - P_{min}}{P_0} \cdot \tau \quad (8.2)$$

Or, d'après l'équation de Laplace,

$$P_{max} - P_{min} = \frac{2\gamma}{R} \quad (8.3)$$

où R est le rayon de courbure des bulles, soit $R = 0,4r$ (page 10). Par conséquent, t_b serait proportionnel à $\frac{1}{r^3}$.

8.3 Influence du coefficient de tension superficielle du liquide

Pour essayer de voir si le coefficient de tension superficielle du liquide avait une influence, j'ai fait une série de mesures en rajoutant du savon (DECON) dans l'eau. Cette série de mesures a été faite avec $h = 11\text{cm}$, $s = 2,5\text{cm}$, $100 < r < 125\mu\text{m}$, $d = 1\text{mm}$. La courbe représentant la frontière entre les régimes périodique et continu est représentée sur la figure 8.1. On observe que cette courbe est quasiment identique à celle obtenue en l'absence de savon. La même observation peut être faite sur la courbe représentant τ sur la figure 8.3. Cependant, les courbes représentant l'évolution de la pression en fonction du temps étaient peu différentes de celles obtenues sans savon, alors qu'on se serait attendu à ce que la différence de pression obtenue soit beaucoup plus faible, le coefficient de tension superficielle étant fortement abaissé par la présence de savon. On ne peut donc pas vraiment tirer de conclusions sur ce point. Je n'avais probablement pas mis assez de savon dans l'eau.

Chapitre 9

Étude des corrélations entre pics successifs

En observant des signaux comme celui de la figure 9.1, on peut se demander s'il n'y a pas des corrélations entre bulles successives. En effet, sur ce graphe, on observe clairement que presque toujours, une grosse bulle

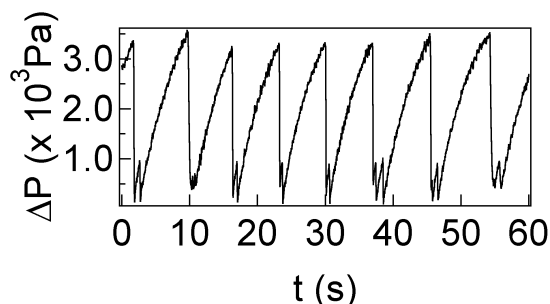


FIG. 9.1 – Évolution de la pression en fonction du temps : $h = 2,6\text{cm}$, $s = 1,5\text{cm}$, $d = 2\text{mm}$, $V = 119\text{cm}^3$, $100 < r < 125\mu\text{m}$, $D = 0,8\text{mg/s}$

est suivie d'une petite et inversement, ce que l'on voit bien sur la figure 9.2 : Cela peut paraître logique : en

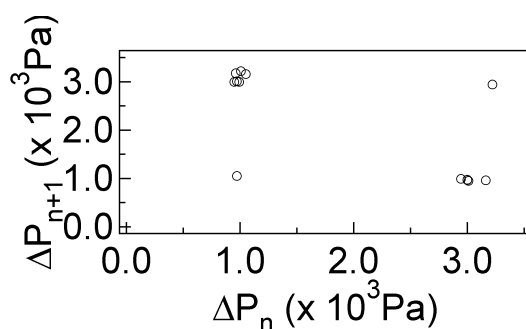


FIG. 9.2 – Pression maximale d'un pic en fonction de la pression maximale du précédent, dans le cas du graphe ci-dessus.

effet, une grosse bulle fragilise beaucoup la couche de sable, et celle-ci retient moins bien l'air, donc la bulle suivante contiendra moins d'air, puisqu'elle aura mis moins de temps à sortir. Cependant, en traçant le même graphe dans d'autres conditions, où les signaux sont moins nets, je ne suis pas arrivé à l'interpréter (figures 9.3 et 9.4).

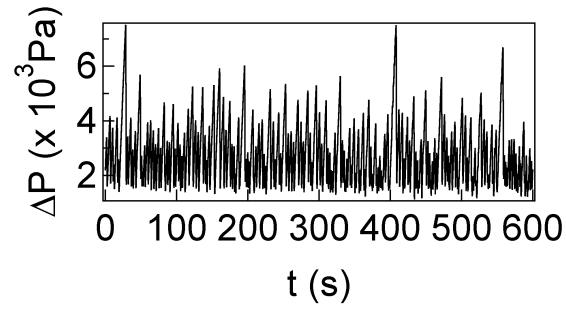


FIG. 9.3 – Évolution de la pression en fonction du temps : $h = 11\text{cm}$, $s = 2,5\text{cm}$, $d = 1\text{mm}$, $V = 105\text{cm}^3$, $37 < r < 75\mu\text{m}$, $D = 0,8\text{mg/s}$

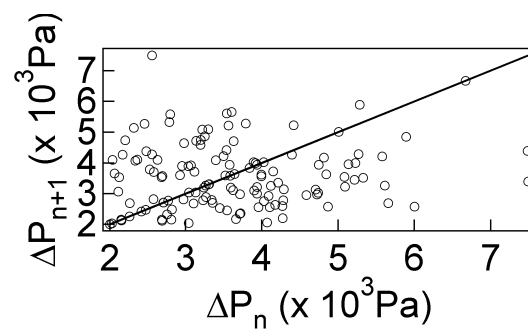


FIG. 9.4 – Pression maximale d'un pic en fonction de la pression maximale du précédent, dans le cas du graphe ci-dessus.

Chapitre 10

Conclusion

Lors de ce stage, j'ai obtenu un certain nombre de résultats sur le passage de l'air à travers un milieu granulaire immergé :

- Dans le dispositif décrit sur la figure 2.1, l'air ne passe pas de la chambre à l'eau en soulevant le sable, mais passe entre les grains de sable, équivalents à un capillaire. Le rayon de l'interface air-eau dans celui-ci vaut environ 0,4 fois le rayon des billes. Au moment du premier passage, l'air creuse un canal à travers le sable, canal stable qui ne fait que se reboucher après le passage d'une bulle.
- Lorsque le débit augmente, la valeur moyenne de la pression au cours du temps diminue linéairement, avant de stagner à une valeur proche de la moyenne des pressions minimales. Par définition, le débit critique est le débit correspondant à la transition entre ces deux comportements de la pression moyenne.
- Lorsque l'on trace, pour différentes tailles de grains, le débit critique D_c en fonction du volume V de la chambre, on observe que ce débit critique croît linéairement avec le volume. Le temps caractéristique τ , valant typiquement quelques dizaines de secondes, égal à $\frac{V}{D_c}$, et qui correspond au temps de doublement de la pression dans la chambre au débit critique, est proportionnel à $\frac{1}{\tau^2}$. Le temps de fermeture du canal après l'émission d'une bulle est proportionnel à $\frac{1}{\tau^3}$.
- La nature du fluide a vraisemblablement une influence sur le débit critique. Cependant, les expériences que j'ai réalisées en modifiant la tension superficielle en rajoutant du savon dans l'eau ne m'ont pas permis de conclure quant à l'influence sur D_c de la tension superficielle du liquide.
- J'ai essayé de voir s'il y avait des corrélations entre émissions de bulles successives, mais là non plus, je n'ai pas obtenu de résultats probants.

Il resterait à étudier l'influence de la viscosité du fluide sur ce système.

Annexe A

Comment l'air traverse la couche de sable

Dans des études précédentes, il a été observé qu'avant le passage de la première bulle, l'air creuse dans la couche de sable un canal stable, qui reste présent après le passage de la bulle. On peut construire un système à deux dimensions, constitué de deux plaques de plexiglas séparées par une très faible distance, entre lesquelles sont introduits du sable et de l'eau, comme sur la figure A.1.

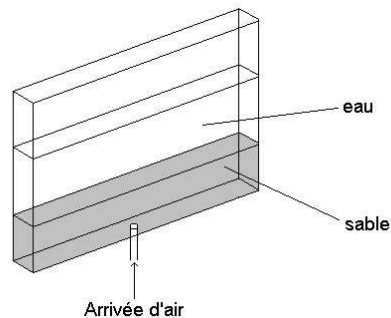


FIG. A.1 – Dispositif à deux dimensions

De l'air est introduit par un petit trou situé en bas de la cuve, à un débit fixé. Après le passage de la première bulle, on observe la formation d'un canal traversant presque la totalité de la couche de sable. À chaque fois qu'une bulle d'air passe, la petite couche de sable qui bouche le haut du canal est soulevée, puis le haut des parois du canal s'effondre, rebouchant ainsi le canal si le débit d'air n'est pas trop important.

Par ailleurs, on peut démontrer que le sable ne se soulève pas sous l'effet de la surpression de l'air qui se trouve en-dessous par rapport à l'eau qui se trouve au dessus, mais à cause des mouvements que le passage de la bulle fait naître dans le liquide. J'ai refait une expérience illustrant cela, dans le paragraphe «Comment montrer que l'air passe à travers le sable sans le soulever» à la page 8.

Bibliographie

- [1] L.Gostiaux, H.Gayvallet, J.-C.Géminard : *Dynamics of a gas bubble rising through a thin immersed layer of granular material : an experimental study*, Granular Matter, soumis en avril 2002
- [2] J.-C. Géminard, W.Losert, J.P.Gollub : *Frictional mechanics of wet granular material*, Phys. Rev. E **59**, 5881 (1999)
- [3] S.Nasumo, A.Kudrolli, J.P.Gollub : *Friction in Granular Layers : Hysteresis and Precursors*, Phys. Rev. Lett. **79**, 949, (1998)