
Rapport de stage de L3

Étude d'écoulements diphasiques gaz-liquide en milieux confinés

Sylvio ROSSETTI

encadré par Valérie VIDAL *et* Thomas BUSSE

Laboratoire de Physique de l'ENS de Lyon

Juin – Juillet 2019

Résumé

Ce stage visait à étudier le comportement d'un écoulement 2D biphasique eau-air en milieu poreux confiné, dans une cellule de Hele-Shaw. Dans un cadre de génie chimique, l'objectif est d'augmenter la surface d'échange entre les deux fluides. Le stage a nécessité l'adaptation d'un dispositif expérimental déjà existant, et au développement d'un programme numérique servant au traitement des données. Une caractérisation du milieu confiné a d'abord été faite, sans le milieu poreux. Les principaux paramètres étudiés étaient le débit d'air et l'angle d'inclinaison de la cellule. En plus de l'influence de ces paramètres sur la surface d'échange, une étude des tailles typiques de bulles a été menée. La comparaison avec le milieu poreux a ensuite été faite. Une augmentation globale de la surface d'échange eau-air a été mise en évidence, avec des particularités comme l'existence d'un angle critique marquant un changement de régime, et la diminution d'un paramètre qui peut desservir une réaction chimique.

Mots clés : *écoulement biphasique, milieu confiné, étude expérimentale, milieu poreux, surface d'échange spécifique.*

Table des matières

1	Introduction	3
2	Dispositif expérimental	3
2.1	Installation de départ et ajout d'une caméra	3
2.2	Protocole	5
2.3	Traitement d'images	5
2.3.1	Traitement sans la mousse	5
2.3.2	Traitement avec la mousse	6
2.3.3	Grandeurs calculées	7
2.4	Sources d'incertitudes	7
3	Essaim de bulles en milieu confiné	8
3.1	Influence du débit d'air	8
3.2	Influence de la flottabilité	9
3.2.1	Effet sur les surfaces d'échange	9
3.2.2	Effet sur la taille typique des bulles	12
4	Écoulement air-eau dans une mousse confinée	14
5	Conclusion	16
A	annexe	18
A.1	Test de regionprops	18
A.2	Expériences de reproductibilité	19
A.2.1	Test 1 : ergodicité	19
A.2.2	Test 2 : sensibilité au démarrage	19

1 Introduction

Contexte : Les écoulements multiphasiques gaz-liquide dans les milieux poreux sont des phénomènes existant à plusieurs échelles : des tremblements de terre [10] à l'exploitation ou le raffinage du pétrole. Ils sont, depuis peu, utilisés dans l'industrie chimique dans le but d'optimiser des réactions entre composés présents dans plusieurs phases. Jusqu'à présent, ce sont surtout des milieux granulaires, des réacteurs à lits de billes ou des colonnes à bulles qui sont utilisés. Ils offrent une grande surface interfaciale entre les fluides et le solide, ce qui peut permettre d'améliorer une catalyse. Néanmoins, ils provoquent une grande perte de charge entre le haut et le bas du réacteur [4]. L'utilisation de mousses poreuses permet d'atténuer fortement cette perte de charge de par leur structure très aérée (jusqu'à 97 % de vide!) [2], [3], tout en gardant une grande surface spécifique. L'étude de tels réacteurs mettant en jeu des éléments de mécanique des fluides, mais aussi de chimie réactionnelle, leur caractérisation générale est complexe.

Dans un contexte de génie chimique, les écoulements multiphasiques en milieu poreux sont encore assez peu maîtrisés, sauf dans des cas particuliers. Il existe de nombreuses lois empiriques et des caractérisations propres à des réacteurs déjà existant, mais il est encore très difficile de trouver des informations sur ce type d'écoulement qui permettent de prédire un comportement encore jamais étudié. Il existe quelques études pour des réactions chimiques dans des écoulements monophasiques en milieu poreux [8]. Néanmoins, une étude exhaustive de tels réacteurs nécessite des considérations d'homogénéité en concentration dans le réacteur [6], [9], de transferts thermiques entre le milieu poreux métallique et le(s) fluide(s) [7], ou encore d'écoulement visqueux en milieu poreux [1], [5].

Ce travail cherche à préciser les caractéristiques des différents régimes d'écoulement observés, en les liants à des contraintes qui seraient imposées par une réaction chimique. Il s'agit notamment de maximiser la surface d'échange entre un gaz et un liquide, dans le but de favoriser une réaction chimique entre les deux phases. Si la surface d'échange entre solide et fluide peut avoir de l'importance dans le cas d'une réaction catalysée sur phase solide, elle n'est pas étudiée ici.

Problématique : Le stage qui m'était proposé visait à caractériser les écoulements en milieu poreux confiné, en se limitant au cas d'une cellule de Hele-Shaw alimentée par un débit d'eau et un débit d'air. Il s'agissait donc d'un écoulement quasi bidimensionnel, et toute réaction chimique était ignorée. La première partie du travail s'est focalisée sur la cellule à vide, c'est-à-dire, sans milieu poreux. Dans un second temps, il s'agissait d'observer le comportement de l'écoulement à travers une mousse solide très poreuse (90% d'air), avec le même dispositif. L'étude s'est restreinte à déterminer l'influence de l'inclinaison de la cellule et du débit d'air sur l'écoulement. L'existence de plusieurs régimes d'écoulement a déjà été mise en évidence [10]. L'observation se base sur des statistiques de formes de bulles, afin de mesurer la surface d'échange disponible dans la cuve. Un traitement numérique est nécessaire après l'acquisition de vidéos.

Objectifs : On cherche dans un premier lieu à caractériser la cellule sans mousse, en faisant varier le débit d'air et la flottabilité. Cela est fait dans le but de pouvoir comparer avec les mesures effectuées avec la mousse solide. On cherche à déterminer si la mousse permet d'augmenter la surface d'échange air-eau, et quelles sont les paramètres qui permettent d'optimiser cette surface-là. On aura une discussion sur la surface d'échange à prendre en compte en fonction des caractéristiques la réaction utilisée.

2 Dispositif expérimental

2.1 Installation de départ et ajout d'une caméra

Le montage utilisé a été conçu dans le cadre de la thèse de Marion Serres, sous la direction de Valérie Vidal [10], pour une première étude des écoulements multi-phases en milieu poreux et confiné. Il est constitué d'une cellule de Hele-Shaw tenue par un support de barres REXROTH[®], et éclairée de manière homogène par un panneau LED¹, placé derrière la cellule. Il permet d'étudier des écoulements

1. Dalle LED, Euroshopled

à deux dimensions. Un cadre en PEEK² permet de maintenir deux plaques de verre trempé ($410 \times 210 \times 6 \text{ mm}^3$), espacées de 1,75 mm (figure 1a) ; l'écartement est maintenu par un joint en silicone qui assure également l'étanchéité de la cellule, et par un vissage dynamométrique. Des fixations amovibles permettent d'incliner la cellule (figure 1b) entre la verticale et l'horizontale. La cellule est alimentée par neuf injecteurs de gaz régulièrement espacés, situés au bas de la cellule, et par une arrivée d'eau déionisée. Le cadre de PEEK est creusé de manière à créer une chambre d'homogénéisation pour le liquide. Le tout fonctionne à l'aide d'une pompe à eau³ stabilisée par un contrôleur de débit à effet Coriolis⁴, et d'un contrôleur de débit pour le gaz⁵ ; ces instruments permettent de fixer Q_a et Q_e , les débits d'air et d'eau arrivant dans la cellule. L'ensemble des expériences réalisées pendant le stage ont été menées à $Q_e = 100 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$. On notera que pour faciliter le repérage des bulles, du colorant bleu⁶ a été ajouté dans le circuit du liquide. Le colorant bleu représentant 0,2% de la fraction volumique totale en liquide, on considère qu'il ne modifie pas significativement les propriétés de l'eau.

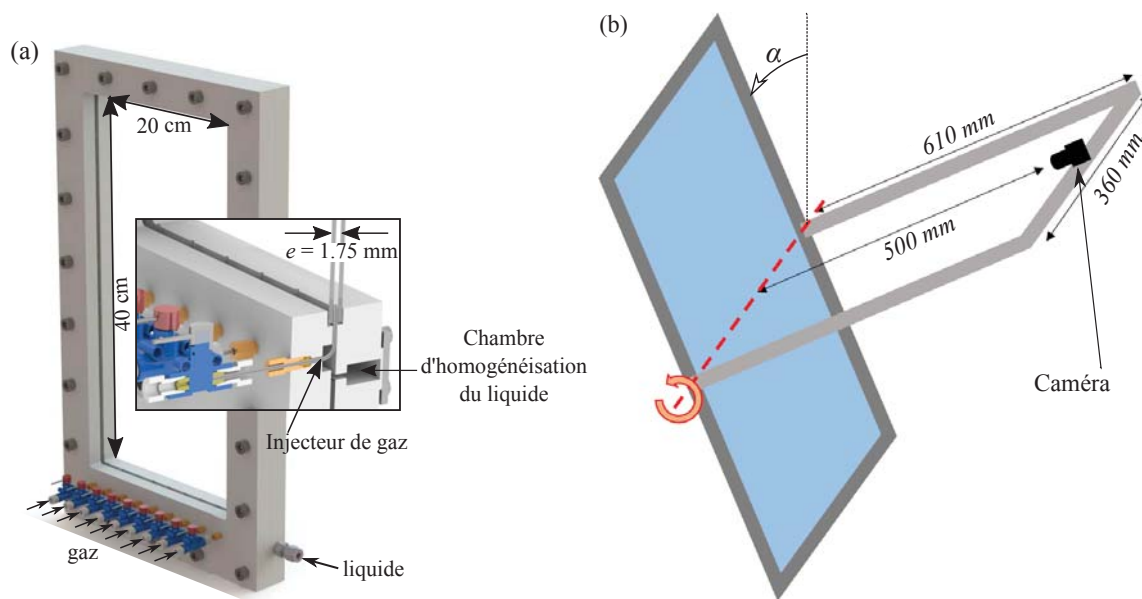


FIGURE 1 – Cellule de Hele-Shaw. (a) Vue d'ensemble du dispositif initial, avec une coupe au niveau des injecteurs. Support non représenté. Source : [10]. (b) Position de la caméra et inclinaison de la cellule. L'axe rouge est l'axe de rotation de la cellule. L'angle α est défini par rapport à la verticale. Support non représenté.

La première étape de ce stage a été de fixer la caméra⁷ à la cellule. Cela permet d'incliner cette dernière sans avoir à régler la caméra entre chaque expérience. Elle a été fixée sur une structure en PEEK (figure 1), en contrôlant son horizontalité à l'aide d'un inclinomètre numérique⁸. La caméra est reliée directement à un ordinateur, et fonctionne *via* le logiciel PYLON VIEWER[®].

Le milieu poreux utilisé est une mousse rigide en alliage de nickel, chrome, fer et aluminium⁹. Une photo de la mousse est disponible figure 2. La taille caractéristique des pores est de $580 \mu\text{m}$, et sa porosité ε est de 90%. L'échantillon utilisé avait pour dimensions $300 \times 200 \times 1.7 \text{ mm}^3$.

2. PolyEther Ether Ketone, matériau inerte chimiquement et facile à usiner

3. Bronkhorst Tuthill DXS1.6PPT2NNM103

4. Bronkhorst CORI-FLOW

5. Système Instrumentation Alicat MC-5SLM-D/CM-C2M

6. Colorant liquide alimentaire hydrosoluble E133, SELECTARÔME

7. BASLER acA2040 - 90um

8. RS Stock number 667-3916

9. ALANTUM

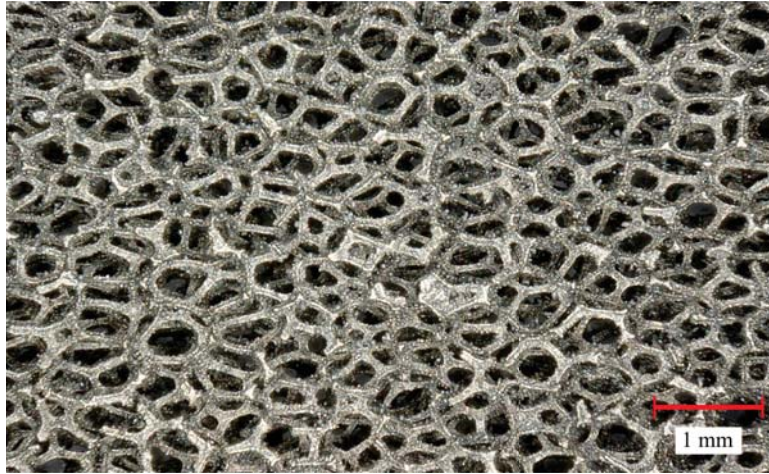


FIGURE 2 – Photo de la mousse solide NiCrFeAl. *Grossissement* $\times 50$. *Source* : Thomas Busser.

2.2 Protocole

À partir de la cellule vide, il y a plusieurs précautions à prendre pour remplir la cuve et réaliser un film. À chaque manipulation, on commence par remplir la cuve d'eau. Il faut éviter au maximum de coincer des bulles d'air, afin de photographier la cuve pleine d'eau. Une fois la cuve remplie, on peut ouvrir les injecteurs de gaz. Toutes les expériences ont été réalisées en ouvrant les neuf injecteurs. Lorsque Q_e et Q_a sont réglés, on attend 3 à 4 minutes pour se placer en régime stationnaire. La plupart des vidéos dure 250 s, sauf exception due à des contraintes expérimentales.

Si la mousse est dans la cuve, il est difficile de n'avoir aucune bulle coincée, car les pores ont une taille typique de $580 \mu\text{m}$. Pour minimiser cela, le remplissage se fait à faible débit ($Q_e = 30 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$), en se replaçant à la verticale. Le remplissage avec α trop grand ne chasse pas bien l'air. Il est également nécessaire de vider et remplir à nouveau la cuve entre chaque manipulation, afin de chasser les bulles d'air. Tout cela permet d'avoir des conditions initiales similaires à chaque expérience. Des tests de reproductibilité ont été effectués et sont détaillés en annexe.

2.3 Traitement d'images

L'acquisition de données se fait en filmant la cellule. Généralement, une image est enregistrée toutes les 5 secondes, avec un temps d'exposition de 1 ms. Le temps entre chaque prise de vue est calibré de sorte qu'une même bulle n'apparaisse pas sur deux images successives, afin de réaliser des statistiques sur la taille des bulles. Par ailleurs, le temps d'exposition a été choisi en faisant un compromis entre netteté et luminosité, en jouant en parallèle sur l'ouverture du diaphragme. Les vidéos, d'une cinquantaine d'images pour la plupart, sont en niveaux de gris. Leur traitement est ensuite différent selon que l'expérience est menée avec ou sans la mousse.

2.3.1 Traitement sans la mousse

Chaque image est enregistrée sous le format `.tiff` (figure 3a). Une photo du fond est prise avant le début de l'expérience : il est spécifique à chaque vidéo et est capturé alors que seul de l'eau s'écoule dans la cellule. À l'aide de MATLAB[®], on rogne les bords de toutes les images pour s'affranchir du cadre de la cellule (figure 3b), puis on soustrait le fond (figure 3c). On effectue ensuite un seuillage : les pixels plus clairs qu'un niveau de seuil fixé apparaissent blanc, les autres apparaissent noir (figure 3d). L'image paraît alors satisfaisante, mais une observation plus fine permet de s'apercevoir que les bulles ne sont pas bien résolues (figure 3e) : un remplissage des zones fermées permet d'obtenir une image exploitable (figure 3f).

À partir de là, le repérage des zones blanches et de leurs propriétés est direct, à l'aide de la fonction `regionprops` de MATLAB[®]. Un test de cette fonction figure en annexe.

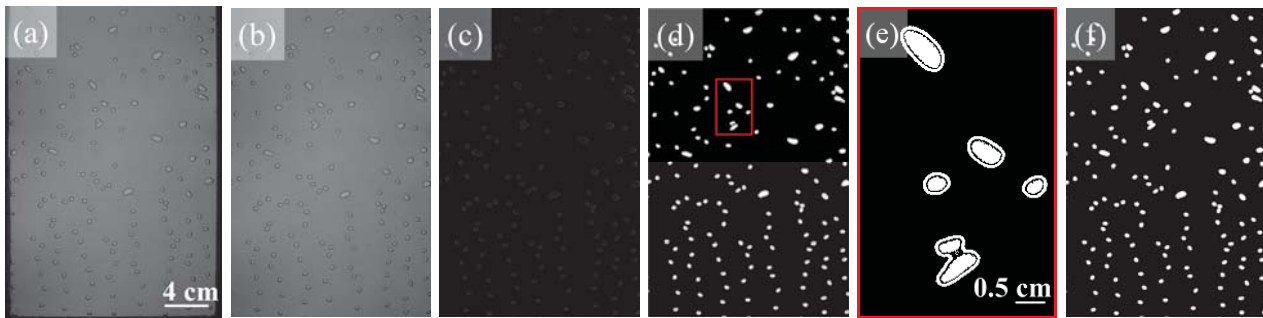


FIGURE 3 – Étapes du traitement des images sans mousse. (a) Image brute. (b) Image rognée. (c) Image dont on a soustrait le fond. (d) Image binarisée. (e) Zoom sur (d) : les bulles sont lacunaires. (f) Image exploitable.

2.3.2 Traitement avec la mousse

Le traitement des images avec la mousse pose plus de problèmes : les bulles sont beaucoup moins visibles (figure 4a), à cause de la texture de la mousse. Les images sont affichées en couleur par souci de visibilité. Là encore, on prend une photo de la cellule sans écoulement d'air ; on divise alors chaque image par cette image de fond (figure 4b). On observe quelques zones claires au premier coup d'œil, mais il y a aussi des zones plus foncées que le fond. Les deux correspondent à des bulles, mais les plus claires sont les bulles qui touchent la paroi frontale de la cellule, tandis que les plus foncées touchent la paroi dorsale. En pratique, on applique des seuillages différents pour chacun des deux types de bulles. Les seuils utilisés diffèrent un peu selon l'angle α que la cellule forme avec la verticale, et la valeur de Q_a . Leurs valeurs étaient testées sur quelques images avant de traiter toute la vidéo, et l'ensemble des images traitées était soumis à un contrôle visuel. La figure 4c montre l'image obtenue après le seuillage pour repérer les bulles claires, tandis que la figure 4d donne l'image obtenue pour les bulles foncées (les zones jaunes correspondent aux zones de gaz).

Les "bulles" obtenues sont encore très lacunaires : il faut remplir certaines zones pour retrouver la forme réelle des bulles. Pour cela, des opérations morphologiques sont appliquées, d'une part pour essayer de colmater les zones clairsemées, mais aussi pour éliminer certains points ne correspondant pas à des bulles. Il faut donc commencer par grossir les petites zones, en plaçant un cercle jaune d'une taille définie (de l'ordre de quelques pixels de rayon) dessus. Cela permet de fusionner les parties jaunes dans les zones denses en points. Il faut ensuite reprendre les points jaunes restants : on décide de les éliminer. S'ils étaient des points isolés, on considère que c'est une anomalie. Enfin, on peut superposer les images des bulles claires et foncées pour aboutir à l'image exploitable (4e).

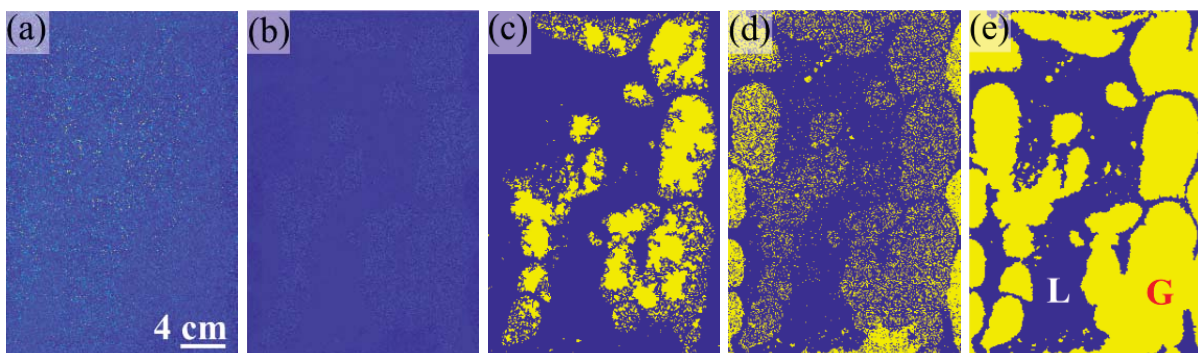


FIGURE 4 – Étapes du traitement avec mousse. Les images sont colorées par souci de visibilité. Les zones jaunes sont les zones de gaz (G), tandis que les zones bleues sont celles de liquide (L). (a) Image brute. (b) Image que l'on a divisé par l'image de fond. (c) Image des bulles claires. (d) Image des bulles foncées. (e) Image exploitable.

On notera aussi que, selon α , il peut être intéressant de superposer les deux images avant d'effectuer les opérations de morphologie : cette méthode donne de meilleurs résultats lorsque la cellule est proche de la verticale.

2.3.3 Grandeurs calculées

À partir des images 3f et 4e, on utilise la fonction `regionprops` pour récupérer la surface apparente des bulles et leur périmètre. Il intervient alors une discussion sur la grandeur qui nous intéresse. On cherche à maximiser la surface d'échange $S_{éch}$ entre le liquide et le gaz ; on différencie la surface d'échange dite périmétrique, $S_{éch}^{périm}$, c'est-à-dire, celle qui est matérialisée par le bord de chaque bulle, de la surface apparente des bulles, $S_{éch}^{app}$. La surface d'échange périmétrique est calculée comme :

$$S_{éch}^{périm} = e \times p \quad (1)$$

où e représente l'épaisseur du gap de la cellule et p la somme des périmètres de chacune des bulles de l'image. La surface apparente des bulles est directement donnée par `regionprops`, mais elle est multipliée par deux lors du traitement, pour prendre en compte les deux côtés de la bulle. C'est bien une interface entre l'air et l'eau, puisqu'il existe un film de lubrification entre la paroi et la bulle d'air [ref].

On normalise cette surface d'échange par le volume sondé. En génie chimique, on parle en terme de surface spécifique, c'est-à-dire, la surface d'échange disponible par unité de volume dans le réacteur :

$$a_S = \frac{S_{éch}}{V_{réacteur}} \quad (2)$$

Sa dimension est l'inverse d'une longueur. Dans la suite, on considère uniquement des surfaces d'échange spécifiques.

Une dernière considération est à prendre en compte, sur la taille des bulles : celles dont le diamètre équivalent est inférieur au gap de la cellule, ont une surface d'échange calculée comme :

$$S_{éch}^{petites\ bulles} = 4\pi r^2 \quad (3)$$

ce qui correspond à la surface d'une sphère. Il n'y a pas lieu de différencier surface apparente et périmétrique dans ce cas. Cette surface est donc toujours comptée dans la surface totale, mais jamais dans la surface périmétrique ou apparente. Par ailleurs, dans le pire des cas, elle représente environ 5% de la surface totale. Globalement, on a donc :

$$a_S = \frac{S_{éch}^{périm} + S_{éch}^{app} + S_{éch}^{petites\ bulles}}{V_{réacteur}} \quad (4)$$

On note également :

$$a_{SP} = \frac{S_{éch}^{périm}}{V_{réacteur}} \quad (5)$$

$$a_{SA} = \frac{S_{éch}^{app}}{V_{réacteur}} \quad (6)$$

Il est intéressant de caractériser la réaction chimique que l'on cherche à réaliser afin de déterminer quelle est la surface d'échange efficace. Ainsi, si le film de lubrification ne se renouvelle pas, la quantité de réactif dedans va rapidement venir à manquer : dans ce cas, cette surface d'échange n'a plus à être considérée. À l'inverse, il est possible d'imaginer que la phase liquide soit uniquement constituée de réactif : la réaction peut toujours se produire au niveau des films. Il faut alors prendre en compte $S_{éch}^{app}$. Cela implique une grosse différence car, le milieu étant très confiné, $S_{éch}^{app}$ est assez, voire très grande devant $S_{éch}^{périm}$. Les conclusions ne sont donc pas les mêmes, suivant la réaction envisagée.

2.4 Sources d'incertitudes

Si l'on cherche à réaliser des statistiques sur les bulles, il faut néanmoins connaître l'incertitude sur les valeurs que l'on mesure. Les différentes sources d'incertitudes identifiées sont les fluctuations de température, la luminosité de la pièce, le seuil appliqué lors de la binarisation des images, la forme légèrement arrondie du ménisque des bulles au niveau des interfaces eau-air, les incertitudes sur les valeurs indiquées par les appareils de mesure (Q_a , Q_e , α , ...) et l'incertitude sur la valeur du gap e .

Les fluctuations de températures ont été de l'ordre de la dizaine de °C durant le stage. Si cela a peu d'influence sur la masse volumique de l'eau, c'est plus important sur celle de l'air. Les débitmètres étant conçus pour mesurer un débit massique, la quantité d'air délivrée n'est pas indépendante de la température de la pièce. Un rapide calcul, détaillé en annexe, estime l'erreur relative liée aux variations de température commise sur Q_a à 3%.

La luminosité de la pièce est d'une importance bien plus grande : au départ, les expériences ont été menées dans la pénombre, mais sans faire attention au fait que les volets soient fermés de manière à ne laisser passer aucune lumière, ou non. Après plusieurs expériences, il s'est avéré que même la lumière sur la mezzanine au dessus du dispositif expérimental, en se reflétant sur une armoire, influait sur les résultats obtenus (jusqu'à 20% d'écart relatif!). À partir de là, les expériences ont été conduites en bannissant toute autre source de lumière que l'écran LED, afin de s'affranchir de cette source d'incertitude.

Les seuils utilisés pour binariser les images étaient choisis pour reproduire la forme des bulles le plus fidèlement possible. Dans le cas de la cuve vide verticale, une variation de 10% de la valeur du seuil donne lieu, dans le pire des cas, à un écart relatif de 2% sur la valeur de a_S .

La cellule a été conçue pour avoir un gap connu et uniforme, e . Des mesures interférométriques ont permis d'évaluer cette valeur à $0,175 \pm 0,005$ mm. Cela apporte un écart relatif sur a_{SP} de 3%.

L'angle d'inclinaison de la cellule était mesuré avec un inclinomètre précis à $0,2^\circ$ près. Devant l'étendue de la plage des angles de mesure, cette incertitude est négligeable ($< 1\%$).

On a également supposé en première approximation que l'interface eau-air au niveau du périmètre d'une bulle était plane. En réalité, il se forme un ménisque courbe [ref article Sylvain]. Seulement, le fait de prendre en compte cette courbure nécessite également une correction sur le calcul de a_{SA} , pour ne pas compter plusieurs fois la même surface. J'ai fait le choix de ne pas considérer cette zone courbe : en effet, soit on est proche de début du ménisque, et dans ce cas le liquide se trouve dans des conditions similaires au film de lubrification. Il est cohérent de comptabiliser cela comme a_{SA} . Soit on se situe un peu plus proche du sommet du ménisque ; dans ce cas, on est dans les conditions de la surface périmétrique. Dans la mesure où la transition entre les 2 zones est assez floue, et dépend de la réaction considérée, on fait le choix de s'affranchir de ces considérations.

Durant les expériences, il arrivait que la valeur indiquée par le débitmètre d'air fluctue légèrement. Seul le dernier digit venait à changer d'une ou deux unités, ce qui représente 2% de la valeur affichée pour le plus petit débit. L'incertitude constructeur sur la valeur affichée est de 1% pour ce débitmètre. Celui associé à la pompe à eau a une incertitude constructeur de $0,2\% + 50 \text{ g}\cdot\text{h}^{-1}$, ce qui correspond à une erreur de 1% pour la valeur de Q_e utilisée.

Au total, la prise en compte de toutes ces sources d'incertitudes mènerait à une incertitude type calculée de 5,3%, dans le pire des cas.

Enfin, des tests de reproductibilité présentés en annexe ont été réalisés, afin de contrôler la pertinence des résultats obtenus, et de vérifier qu'une éventuelle autre source d'incertitude n'a pas été oubliée. Globalement, ces tests étant très concluants et les fluctuations étant plus grandes que les incertitudes obtenues, on choisit de ne représenter que les fluctuations. Elles ont par ailleurs une réelle signification physique qu'il me semble important de signaler.

3 Essaim de bulles en milieu confiné

La première série d'expériences réalisée visait à caractériser la cuve à vide : cela permet de comparer le comportement de la cuve sans mousse à celui de la cuve avec la mousse. Toutes les expériences ont été menées à $Q_e = 100 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$

3.1 Influence du débit d'air

L'étude a été menée en faisant varier Q_a entre 0,1 et $1,5 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$. La cellule est laissée à la verticale, et on attend que le régime stationnaire s'instaure avant chaque mesure. À bas débit, les bulles apparaissent assez circulaires (figure 5a), mais elles se déforment à mesure que l'on augmente Q_a (figures 5b, 5c).

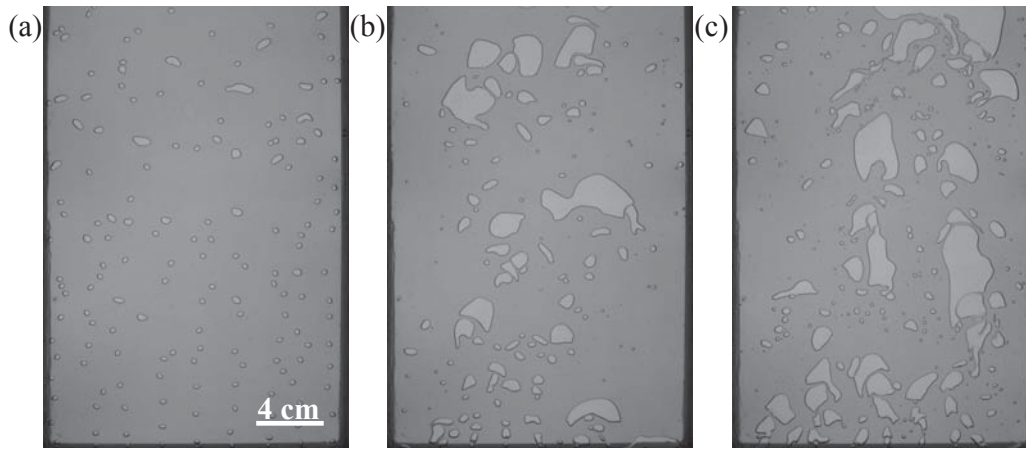


FIGURE 5 – Différents régimes d’écoulement. Cellule à la verticale. (a) $Q_a = 0,1 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$. (b) $Q_a = 0,9 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$. (c) $Q_a = 1,7 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$.

Le traitement des vidéos donne accès aux courbes des différentes surfaces d’échange en fonction du temps (figure 6a, b et c). Ces courbes ont un intérêt double : elles permettent en premier lieu de vérifier que l’on est bien en régime stationnaire. On vérifie alors qu’il n’y a pas de tendance générale d’évolution de la surface d’échange, mais qu’elle fluctue autour d’une valeur moyenne. Ces fluctuations sont liées au fait que l’écoulement est assez turbulent. Elles sont caractérisées à l’aide des courbes en calculant leur écart-type. Ces valeurs définissent alors des barres d’erreur pour la surface d’échange moyennée sur une vidéo. Ainsi, on sait que la surface d’échange va varier dans la limite des barres d’erreur.

La figure 6 montre que a_S , a_{SP} et a_{SA} augmentent avec Q_a . Cela est facilement explicable, par le fait que l’on injecte plus d’air dans la cellule. Néanmoins, l’augmentation de la surface apparente est plus marquée que celle de la surface périmétrique, de sorte qu’à bas débit, a_{SP} et a_{SA} sont comparables, tandis que a_{SA} devient prépondérante à haut débit.

3.2 Influence de la flottabilité

On réitère les mêmes expériences, en changeant cette fois l’angle d’inclinaison α . Différentes valeurs de Q_a ont été testées pour chaque angle. Le comportement de l’écoulement est visuellement assez proche du cas où la cellule est à la verticale, sauf pour les grandes valeurs de α (au delà de 85°). De grosses bulles ont tendance à se former, et elles ont une durée de vie dans le réacteur beaucoup plus longue. Des réarrangements de la forme des bulles ont lieu assez souvent, mais paraissent aléatoires. En pratique, il était nécessaire d’espacer les prises de vues d’une minute, afin de décorrélérer au mieux les images ; les prises de vues s’étendent alors sur une vingtaine d’image, par souci de durée de l’expérience. Trois exemples de régimes d’écoulement sont présentés figure 7.

3.2.1 Effet sur les surfaces d’échange

La figure 8a montre que a_{SP} varie assez peu avec Q_a , quelque soit l’angle considéré. Aux valeurs de α inférieures à 75° , cette surface augmente lorsque l’on augmente Q_a . Cependant, au delà de cet angle, sa valeur décroît. Cela se voit en consultant les images de la figure 7 : les bulles deviennent très grandes, leurs formes beaucoup plus arrondies, ce qui diminue la surface d’échange périmétrique. On note que a_{SP} a tendance à diminuer avec α .

Les valeurs de a_{SA} sont globalement plus grandes que celles de a_{SP} , surtout à grand débit. Dans ce cas, la surface d’échange augmente avec α : les bulles apparaissent plus grosses (figure 7c). Néanmoins, la différence est perceptible qualitativement seulement à partir d’une forte inclinaison. Il y a peu de différence entre les comportements de la cuve à 0 et 75° . Il semble que le seul paramètre évoluant ici est la flottabilité. Le rapport entre la tension de surface et la gravité augmente, ce qui tend à favoriser de plus grosses bulles, plus stables.

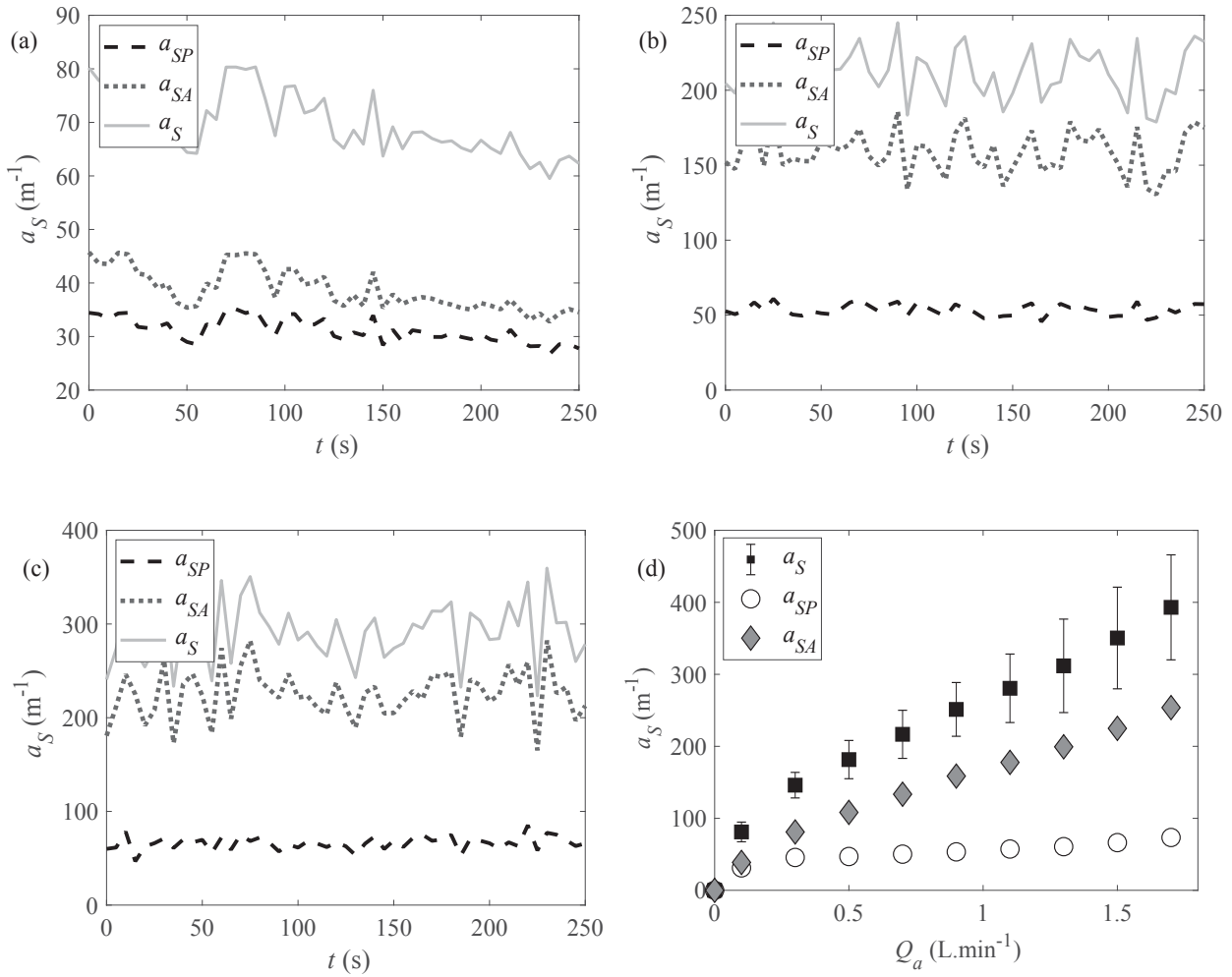


FIGURE 6 – Courbes de a_{SP} , a_{SA} et a_S en fonction du temps pour différents débits. Les débits de (a), (b) et (c) sont les mêmes que pour la figure 5 : (a) $Q_a = 0,1 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$. (b) $Q_a = 0,9 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$. (c) $Q_a = 1,7 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$. (d) Surface d'échange en fonction de Q_a . Les barres d'erreur représentent les fluctuations de a_S . Elles ne sont pas affichées pour a_{SP} et a_{SA} par souci de lisibilité.

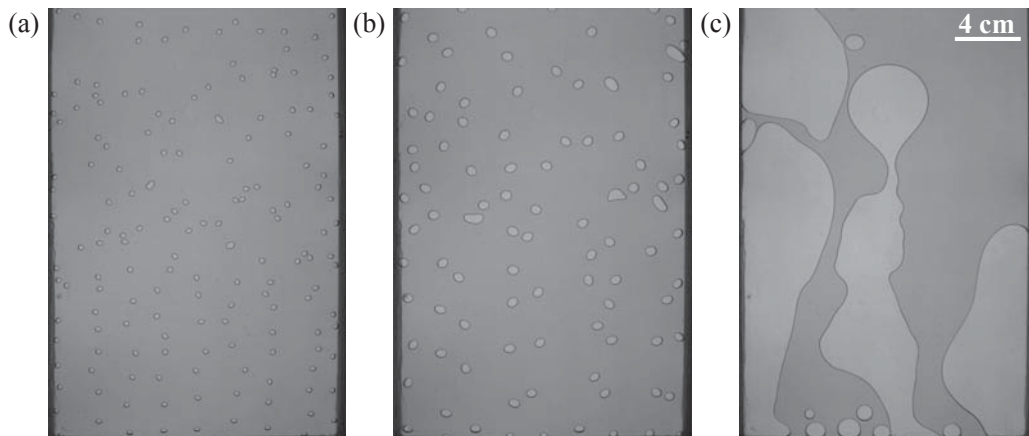


FIGURE 7 – Différentes formes de bulles lorsque la cellule est inclinée pour $Q_a = 0,1 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$. (a) $\alpha = 15^\circ$. (b) $\alpha = 75^\circ$. (c) $\alpha = 89,1^\circ$. On observe des régimes d'écoulements allant de la remontée de bulle à la formation de poches de gaz.

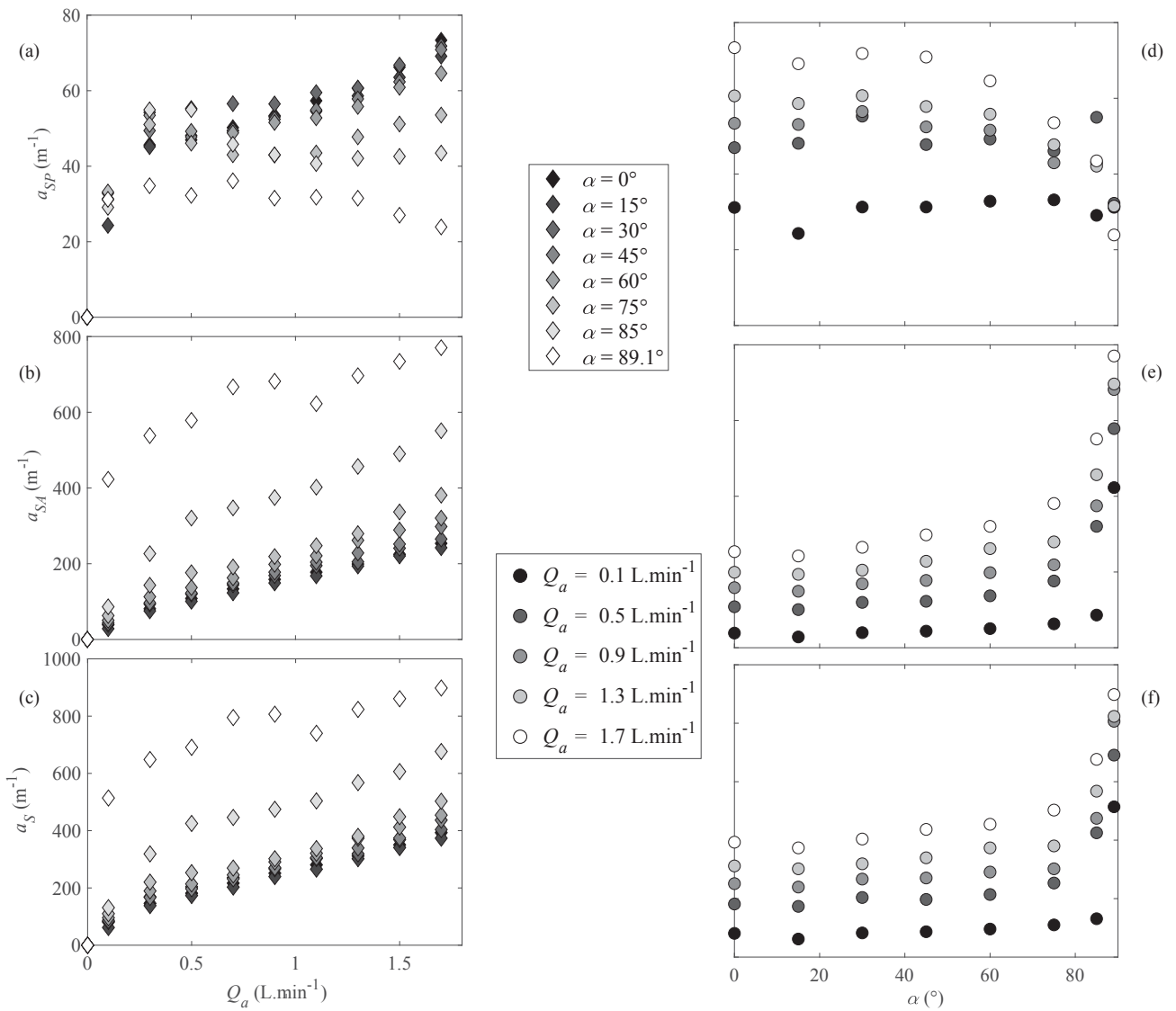


FIGURE 8 – Évolution de a_{SA} , a_{SP} et a_S en fonction de Q_a (gauche) et de α (droite). Les barres de fluctuations ne sont pas représentées par souci de lisibilité.

Globalement, c'est surtout la surface d'échange apparente qui donne l'allure de a_S (figures 8b et c).

Les figures 8 d, e et f montrent l'évolution des différentes surfaces d'échanges spécifiques avec α , pour plusieurs débits. a_{SP} diminue lorsque α augmente (figure 8d : en effet, les bulles formées sont plus grosses et offrent moins de périmètre. En revanche, cela favorise l'augmentation de la surface apparente : a_{SA} augmente et prend rapidement le dessus sur a_{SP} , si bien que l'allure de la courbe de a_S (figure 8f) est la même que celle de a_{SA} (figure 8e).

3.2.2 Effet sur la taille typique des bulles

On s'intéresse à la taille moyenne des bulles. On définit le rayon équivalent $r_{\text{éq}}$ d'une bulle de surface apparente A :

$$r_{\text{éq}} = \sqrt{\frac{A}{\pi}} \quad (7)$$

On regarde alors la distribution des bulles en fonction de leur rayon équivalent. Afin d'affiner le résultat, on pondère la population associée à un rayon par la fraction volumique gazeuse associée, car cela permet de s'affranchir des petites bulles (assez nombreuses, mais peu représentatives). On définit ainsi un nombre par unité de volume n . La figure 9 représente la distribution de n en fonction de $r_{\text{éq}}$, pour $Q_a = 0,1 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$. On voit apparaître plusieurs pics assez espacés, correspondant à des tailles de bulles plus représentées. Il semble que ces différents pics sont issus de la coalescence des bulles. Notons r_0 le rayon correspondant au premier pic sur la figure 9a. Si deux bulles de rayon r_0 coalescent et forment une bulle de rayon r_1 , alors par conservation du volume de gaz :

$$2 \times e\pi r_0^2 = e\pi r_1^2 \quad (8)$$

Donc :

$$r_1 = \sqrt{2}r_0 \quad (9)$$

Et par récurrence :

$$r_{N+1} = \sqrt{N}r_0 \quad (10)$$

Afin de vérifier cela, on trace la figure 9b. Les points rouges correspondent aux valeurs centrales des pics de la figure 9a. Les incertitudes sont estimées comme la largeur du bin central. La courbe noire a pour équation :

$$r_{\text{éq}} = r_0 \times \sqrt{N} \quad (11)$$

L'accord entre les données expérimentale et cette courbe est assez bon : il semble que ce soit effectivement la coalescence des bulles qui donne lieu aux pics de la figure 9a.

On s'intéresse alors à l'évolution de la taille typique des bulles : c'est la taille la plus représentée, *i.e.* le rayon équivalent correspondant au premier pic sur la figure 9a. On trace l'évolution de ce rayon en fonction de $\cos(\alpha)$. Sur la figure 10 est tracé ce graphe en coordonnées logarithmiques. Pour les deux valeurs de débits pour lesquelles l'expérience a été menée, il semble que l'on puisse ajuster les données par une droite de pente $-1/2$. Il n'a pas été possible de mener cette expérience à plus haut débit, car il est impossible de déterminer une taille typique de bulle à partir des histogrammes de répartition, pour $Q_a > 0,3 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$. Cela s'explique par le fait que les bulles fragmentent à haut débit : la population devient beaucoup plus polydisperse.

On peut développer un modèle simpliste pour interpréter la valeur de la pente de la figure 10. On considère une bulle de gaz remontant dans la cellule, sans interaction avec les autres bulles et ayant atteint une vitesse constante. On évalue le nombre de Reynolds Re de l'écoulement à :

$$Re = \frac{VR}{\nu} \sim 1 \quad (12)$$

avec $V \sim 10^{-2} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ la vitesse de la bulle, $R \sim 10^{-3} \text{ m}$ sa taille caractéristique et ν la viscosité cinématique de l'eau ($\sim 10^{-6} \text{ m}^2\cdot\text{s}^{-1}$) ou de l'air ($\sim 10^{-5} \text{ m}^2\cdot\text{s}^{-1}$).

La bulle est soumise à la poussée d'Archimède et à une force de traînée. À vitesse constante, la bulle est à l'équilibre et ces deux forces se compensent. En notant ρ la masse volumique de l'eau et r le rayon de la bulle, la poussée se note :

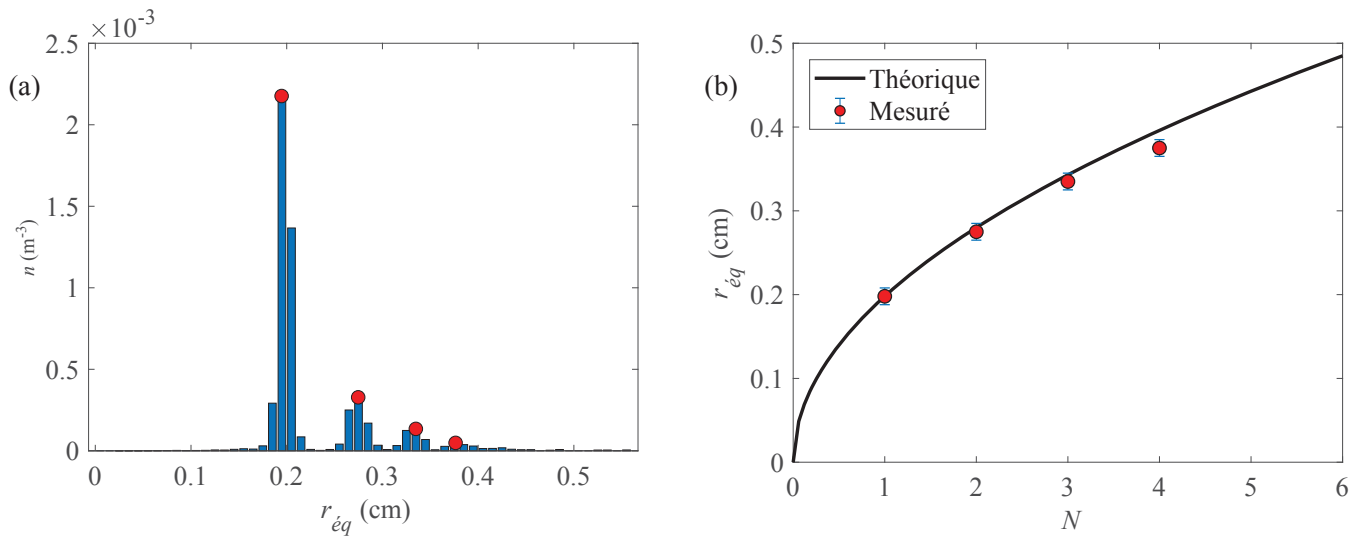


FIGURE 9 – (a) Histogramme de répartition de la taille des bulles pondérée par la fraction volumique associée. (b) Taille typique des bulles. $Q_a = 0,1 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$. (a) On repère les pics correspondant aux tailles typiques des bulles. (b) permet de s’assurer que les différents pics correspondent à la coalescence des bulles.

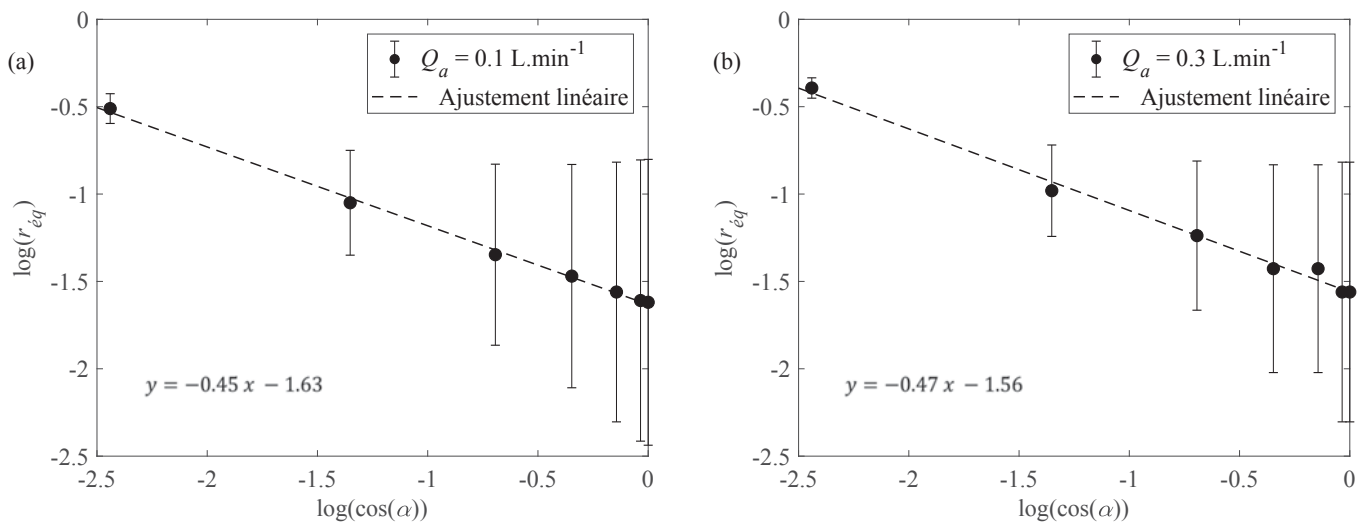


FIGURE 10 – Taille typique des bulles en fonction de l’angle d’inclinaison et ajustement, en coordonnées logarithmiques. L’équation est celle de la droite en pointillés.

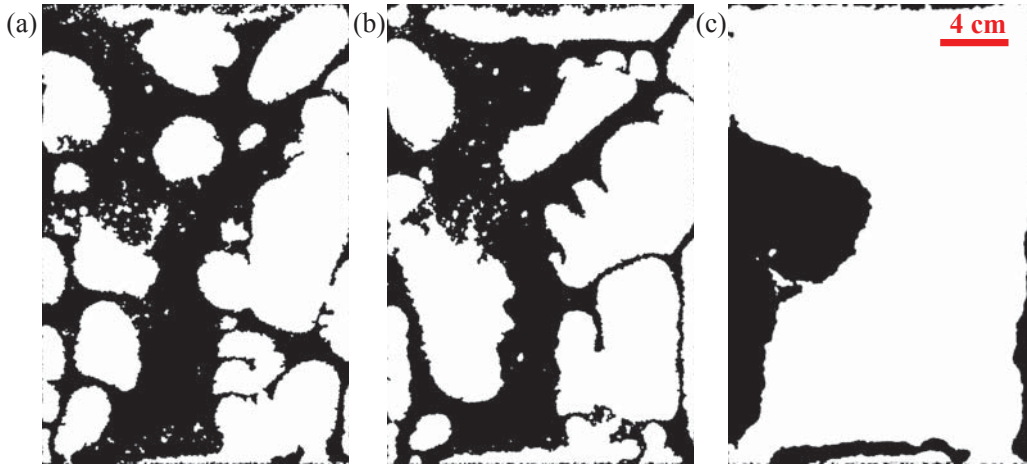


FIGURE 11 – Images exploitables à différents régimes d’écoulement, avec la mousse. $Q_a = 1,5 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$. Les zones blanches correspondent aux poches de gaz. (a) $\alpha = 0^\circ$. (b) $\alpha = 45^\circ$. (c) $\alpha = 85^\circ$.

$$\vec{\Pi}_A = -\rho e \pi r^2 \vec{g} \cos(\alpha) \quad (13)$$

en négligeant la masse volumique de l’air devant celle de l’eau. On fait par ailleurs l’hypothèse que la force de traînée est de type visqueuse, malgré la valeur de Re un peu limite. On ne connaît pas l’expression exacte de la force de Stokes dans cette géométrie ; on écrit donc :

$$\vec{F}_t \propto \eta e \vec{V} \quad (14)$$

En égalisant ces deux forces, on obtient :

$$r \propto \frac{1}{\sqrt{g \cos(\alpha)}} \quad (15)$$

ce qui permet de retrouver le coefficient directeur de la pente, en $-1/2$.

4 Écoulement air-eau dans une mousse confinée

Le même type d’analyse a été effectué avec la mousse dans la cuve. Le comportement de l’écoulement avec la mousse est assez différent du cas sans mousse. Le milieu poreux favorise la formation de poches de gaz statiques, et peu de bulles parviennent à atteindre le haut de la cellule sans rejoindre une poche. Classiquement, lorsqu’une bulle atteint une poche de gaz, elle chasse une autre bulle de taille similaire de la poche. On arrive à distinguer des bulles individuelles pour $\alpha = 0$ (figure 11a) et 45° (figure 11b), mais ce n’est pas le cas pour $\alpha = 85^\circ$ (figure 11c). On remarque que la zone occupée par le gaz est beaucoup plus grande à grande inclinaison, et la poche de gaz est très statique : une fois qu’une poche de gaz est mise en place, elle a tendance à ne pas changer de forme durant l’écoulement, si bien que toutes les images enregistrées à $\alpha = 85^\circ$ et $Q_a = 1,5 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ sont très similaires à la figure 11c. Dans le but de se focaliser sur l’influence de la flottabilité, et au vu du temps nécessaire pour réaliser une expérience, les mesures n’ont été effectuées que pour 3 débits distincts ($Q_a = 0,1, 0,8$ et $1,5 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$).

La figure 12 montre l’évolution des surfaces d’échange spécifiques en fonction de l’angle d’inclinaison α . On observe des comportements globalement identiques au cas sans mousse : la a_{SA} est prépondérante sur a_{SP} et dicte l’allure de la courbe de a_S . a_{SA} augmente avec α , tandis que a_{SP} diminue. Remarquons que les valeurs atteintes par a_S sont plus élevées que sans la mousse, de 10 à 20%. Cependant, un phénomène est visible sur les courbes 12a et c : il y a un angle critique autour de 75° pour lequel la surface d’échange spécifique chute, puis elle augmente de nouveau. Ce comportement s’observe à tous les débits. Afin de comprendre ce qu’il se passe, il est intéressant de consulter les vidéos enregistrées. Avant l’angle critique, les bulles sont assez séparées (images similaires à 11 a et b). Les

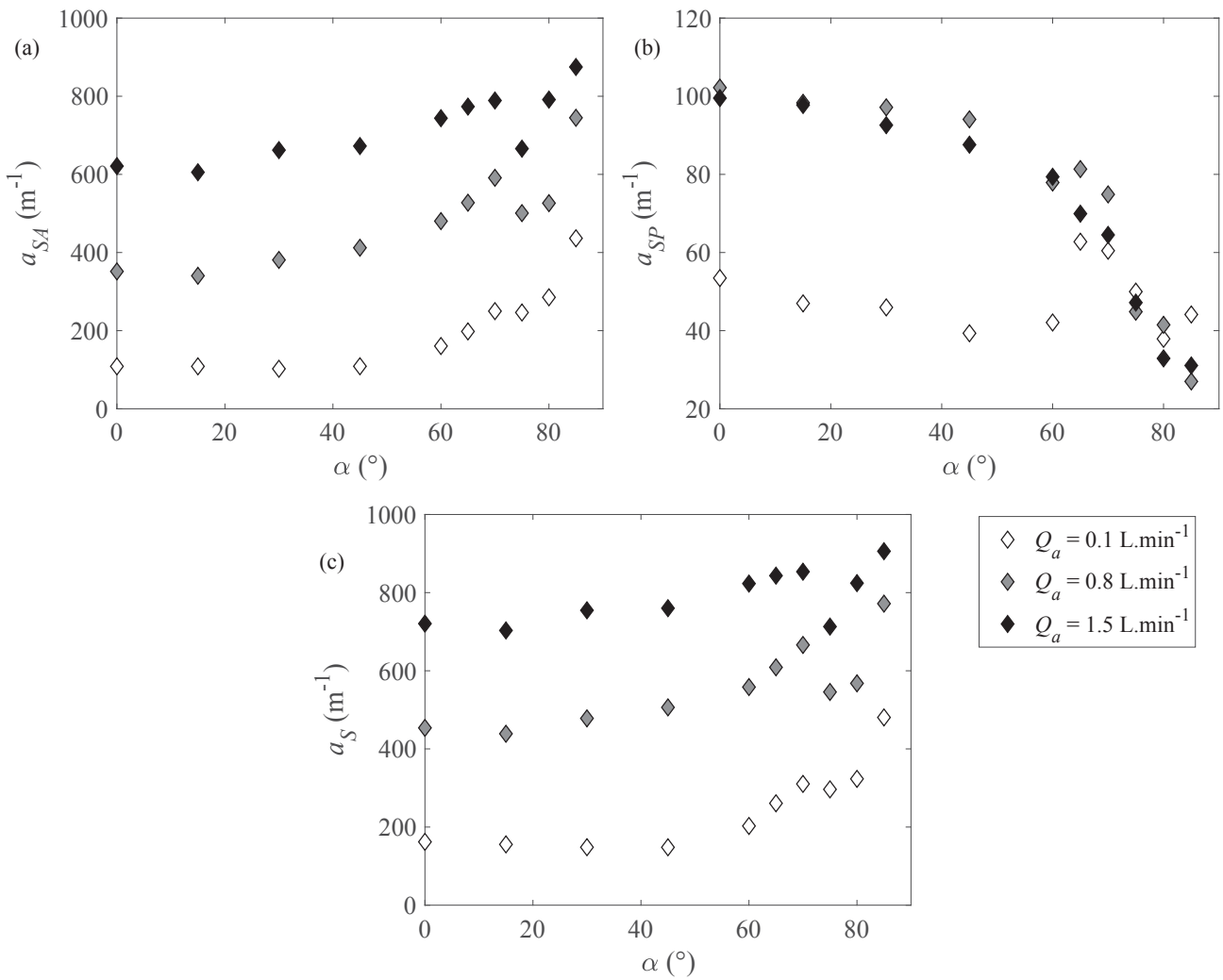


FIGURE 12 – Évolution des surfaces d'échanges spécifiques en fonction de α pour $Q_a = 0,1, 0,8$ et $1,5 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$. (a) Surface apparente. (b) Surface périmétrique. (c) Surface totale. Les barres de fluctuation ne sont pas représentées par souci de lisibilité.

bulles empruntent des chemins assez bien définis, mais elles sont toujours séparées par une couche de fluide. À l'inverse, lorsque l'on se place au dessus de l'angle d'inclinaison limite, les bulles sont connectées entre elles (figure 11c), et il n'y a pas ou peu d'alternance entre gaz et liquide. À la frontière entre ces deux comportements, les bulles commencent à devenir connexes : les chemins privilégiés restent globalement les mêmes, mais il n'y a plus d'alternance liquide-gaz. Or, la gravité semble encore avoir une certaine influence, et ainsi les canaux de gaz entre les poches sont très fins. Cela devrait contribuer à diminuer a_{SA} , et à augmenter a_{SP} : en effet, sur la figure 12, on observe un saut de a_{SP} autour de $\alpha = 75^\circ$, pour $Q_a = 0,1$ et $0,8 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$. En résumé, l'angle limite correspond à la transition entre un régime où la gravité prédomine sur la capillarité, avec des bulles assez séparées, et un régime où la capillarité tend à former de plus grosses bulles, la cellule étant proche de l'horizontale. Cette transition semble se caractériser par une diminution brutale de a_{SA} .

Cependant, on doit s'interroger sur l'effet du milieu poreux sur ce comportement : en effet, l'interprétation effectuée ne prend pas en compte la mousse, et devrait être valable dans tous les cas. Il semblerait donc que la mousse favorise la formation de poches de gaz de forme assez stable, et de canaux entre ces poches.

5 Conclusion

Bilan

Cette étude a permis la caractérisation du comportement de l'écoulement dans une cellule de Hele-Shaw alimentée conjointement par un débit d'eau et un débit d'air. Il a été mis en évidence que la surface spécifique apparente augmente avec le débit d'air. Cela est avantageux si l'on cherche à faire des réactions chimiques pouvant avoir lieu dans le film de lubrification. La surface spécifique périmétrique augmente également, mais dans une bien plus faible mesure. L'inclinaison de la cellule est également avantageuse pour la surface apparente. Sa valeur peut être multipliée par 2 à 12 entre $\alpha = 0$ et 85° , selon le débit d'air utilisé. Cependant, c'est désavantageux pour la surface périmétrique, qui peut être divisée par 2 sur la même plage de valeur d'angles d'inclinaison. En pratique, la surface apparente est bien plus grande que la surface périmétrique. On s'est intéressé à la taille des bulles aux petits débits d'air. On a mis en évidence le fait que les bulles ont tendance à coalescer dans ce régime, et pas à fragmenter. Il est possible d'interpréter la dépendance de la taille des bulles en fonction de l'angle d'inclinaison de la cellule, à l'aide d'un modèle simpliste. La comparaison a ensuite été faite entre la situation sans la mousse, et la situation avec la mousse. Globalement, l'insertion de la mousse dans la cuve a en premier lieu mené à une augmentation des surfaces spécifiques (a_S , a_{SP} et a_{SA}). Le comportement global est assez similaire dans les deux situations, à une exception près : l'existence d'un angle critique pour lequel la surface d'échange chute brutalement, avant d'augmenter brutalement à nouveau. Cela est spécifique aux expériences réalisées avec la mousse. De manière analogue, la surface périmétrique subit une brutale augmentation pour cet angle là, à bas débit d'air. Cela peut être utilisé dans le cadre d'une réaction chimique. Ce comportement est inattendu, car la surface d'échange périmétrique a surtout tendance à décroître avec l'angle d'inclinaison.

Perspectives

- De nombreux paramètres et contraintes sont à prendre en compte dans l'étude de ce problème. On n'a considéré qu'un système eau-air, c'est-à-dire, sans réaction chimique. L'utilisation de données sur l'air et l'eau nécessite au préalable une caractérisation de la réaction chimique que l'on cherche à réaliser. Il semble que chaque type de réaction aie des contraintes particulières à prendre en compte.
- Aucune étude n'a été faite sur l'influence du débit d'eau dans la cellule : son influence reste à caractériser.
- Un angle critique a été mis en évidence. On sait qu'il se situe autour de 75° , mais sa position exacte reste à déterminer. Il est par ailleurs probable que celle-ci dépende du débit d'air.
- Aucune mesure n'a été faite sur la surface d'échange entre le milieu solide et le milieu fluide. Aucun outil n'a été mis en place pour le faire pendant ce stage, et la question reste encore très ouverte.

- Par ailleurs, il peut être intéressant de distinguer les zones de fort renouvellement en fluide des zones statiques. En effet, des zones de réacteur où les fluides ne sont pas renouvelés dans un réacteur finissent par devenir des zones mortes et sont parfaitement inutiles. Selon les caractéristiques des réactions chimiques étudiées, il peut être utile de définir un temps de renouvellement moyen, à l'échelle locale ou celle du réacteur. Dans tous les cas, il est clair que les zones à fort renouvellement en fluide seront plus productives en terme de réaction chimique.
- Enfin, le passage à 3 dimensions reste également à explorer. C'est une transition qui ne nécessite plus la distinction entre surface périmétrique et apparente, et donc ne demande pas autant de discussion sur les caractéristiques de la réaction chimique. Cependant, la visualisation des surfaces d'échange devient beaucoup plus complexe.

A annexe

A.1 Test de regionprops

L'aire d'une région calculée par `regionprops` est le nombre de pixels dans la région. Le calcul de son périmètre est en revanche basé sur une formule qui pondère le poids des pixels en fonction de leur position. Elle est détaillée dans [12], où une justification théorique est également proposée. À mon niveau, j'ai préféré tester directement la fonction sur des images synthétiques.

On applique donc la fonction à des images sur lesquelles on place aléatoirement 10 cercles de même rayon r , ne se chevauchant pas et ne rencontrant pas le bord de l'image (figure 13). La taille des images est similaire à celle des images que j'ai eu à traiter.

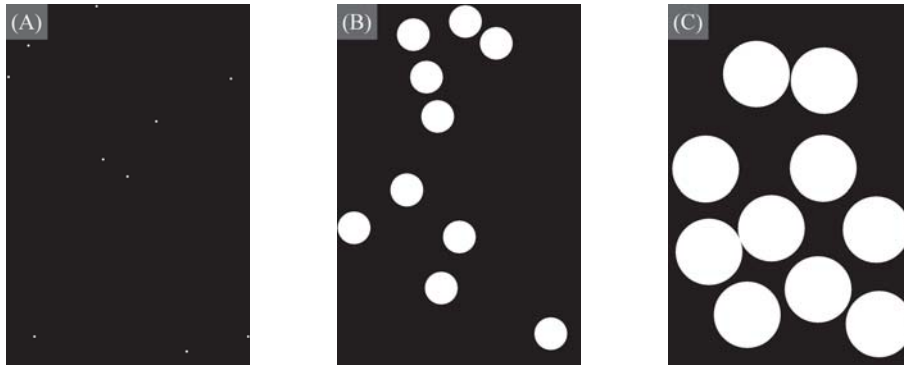


FIGURE 13 – Exemples d'images de test. Taille similaire aux images capturées lors des expériences.

On peut alors comparer les résultats obtenus par la formule théorique et ceux issus du traitement numérique. On notera que les "cercles" tracés sont nécessairement pixelisés, et donc qu'il existe un biais puisque la formule théorique ne s'applique pas. Cependant, en contrôlant que l'aire des cercles mesurée est proche de celle donnée par la formule théorique, on s'assure que les zones blanches sont plus ou moins circulaires.

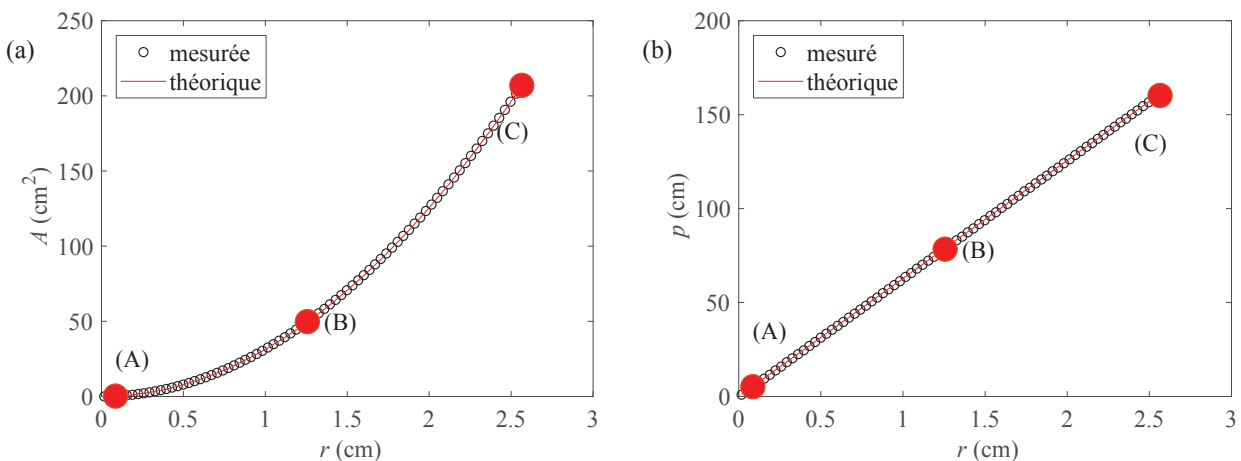


FIGURE 14 – Résultats obtenus pour le périmètre et l'aire. (a) Comparaison des périmètres mesuré et théorique. (b) Comparaison des aires mesurée et théorique. Les points (A), (B) et (C) mis en valeurs correspondent aux trois images de la figure 13.

Les résultats sont très proches de la valeur attendue, sauf pour les tout petits périmètres (figure 14). Au delà de 1 mm de rayon, l'erreur relative est inférieure à 5 %, et même inférieure à 2 % après 2,5 mm. Le test est donc globalement satisfaisant, pour des cercles.

A.2 Expériences de reproductibilité

Deux méthodes différentes ont été utilisées pour tester la reproductibilité des expériences menées. À chaque fois, 3 vidéos ont été enregistrées et comparées. Les tests ont été effectués sans mousse, la cellule à la verticale. Le débit d'air Q_a était de $1,1 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$, débit intermédiaire et pour lequel l'écoulement est assez turbulent.

A.2.1 Test 1 : ergodicité

Les 3 premières vidéos ont été enregistrées selon le protocole suivant :

1. On réalise la première mesure selon le protocole habituel.
2. À la fin de la première mesure, on ne modifie aucun paramètre. On attend une dizaine de minute, puis on relance l'acquisition.
3. On réitère le même procédé, afin d'avoir 3 vidéos.

On obtient trois fois des valeurs différentes de a_S , a_{SA} et a_{SP} , présentées dans le tableau 15.

$a_S \text{ (m}^{-1}\text{)}$	$a_{SA} \text{ (m}^{-1}\text{)}$	$a_{SP} \text{ (m}^{-1}\text{)}$
229,0	173,4	55,6
230,4	174,5	55,9
231,2	175,1	56,1

FIGURE 15 – Tableau des valeurs obtenues lors du premier test.

Les écarts types que l'on obtient sur ces valeurs sont de 1%. Ce test est donc concluant et la reproductibilité est très satisfaisante.

A.2.2 Test 2 : sensibilité au démarrage

Le second test a été mené un peu différemment : au lieu de patienter une dizaine de minutes entre chaque vidéo, on éteignait tout le dispositif expérimental, les capteurs, les débitmètres, *etc...* jusqu'aux multiprises. Puis on relançait l'expérience, selon le protocole habituel. Les valeurs obtenues sont présentées dans le tableau 16.

$a_S \text{ (m}^{-1}\text{)}$	$a_{SA} \text{ (m}^{-1}\text{)}$	$a_{SP} \text{ (m}^{-1}\text{)}$
229,0	173,4	55,6
231,3	175,4	55,6
232,3	176,0	56,3

FIGURE 16 – Tableau des valeurs obtenues lors du second test.

Les écarts types que l'on obtient sur cette série d'expériences sont de l'ordre de 1,5%. Ce test a également été très concluant.

Références

- [1] K. Boosma and D. Poulikakos. On the effective thermal conductivity of a three-dimensionally structured fluid-saturated metal foam. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 45, 2002.
- [2] Ali Faridkhou and Faïçal Larachi. Hydrodynamics of gas-liquid cocurrent flows in micropacked beds-wall visualization study. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 51, 2012.
- [3] J.G. Fourie and J.P. du Plessis. Pressure drop modelling in cellular metallic foams. *Chemical Engineering Science*, 14, 2002.
- [4] Volker Hessel, Panagiota Angeli, Asterios Gavriilidis, and Holger Lowë. Gas-liquid and gas-liquid-solid microstructured reactors : Contacting principles and applications. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 44, 2005.
- [5] T. J. Lu, H. A. Stone, and M. F. Ashby. Heat transfer in open-cell metal foams. *Acta Materialia*, 46, 1998.
- [6] A. Montillet, J. Comiti, and J. Legrand. Axial dispersion in liquid flow trough packed reticulated metallic foams and fixed beds of different structures. *Chemical Engineering Journal*, 52, 1993.
- [7] M. S. Phanikumar and R.L. Mahajan. Non-darcy natural convection in high porosity metal foams. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 45, 2002.
- [8] J.T. Richardson, D. Remue, and J.K. Hung. Properties of ceramic foam catalysts supports : mass and heat transfer. *Applied Catalysis A : General*, 250, 2003.
- [9] D. Seguin, A. Montillet, J.Comiti, and F. Huet. Experimental characterization of flow regimes in various porous media - ii : transition to turbulent regime. *Chemical Engineering Science*, 53, 1998.
- [10] Marion Serres. *Étude hydrodynamique d'un écoulement gaz-liquide dans un milieu poreux confiné*. PhD thesis, École Normale Supérieure de Lyon, 2017.
- [11] Marion Serres, Thimothée Maison, Régis Philippe, and Valérie Vidal. A phenomenological model for bubble coalescence in confined highly porous media. *International Journal of Multiphase Flow*, 105, 2018.
- [12] A.M. Vossepoel and A.W.M. Smeulders. Vector code probability and metrication error in the representation of straight lines of finite lenght. *Computer Graphics and Image Processing*, 20, 1982.