

Peut-on mesurer la vitesse de remontée d'une bulle dans un liquide à l'aide d'un transducteur ultrasonore ?

Alexandre Larrieu

Silio-Manolo Cordelier

Corentin Mosca

27 Mars 2025

L3 Physique

Encadré par Steeve Cronenberger

HAP606P – Projets Tuteurés



Table des matières

1 Les ultrasons	3
1.1 Bases	3
1.2 Transducteur Ultrasonore	4
1.3 Echogramme	4
2 Matériel à notre disposition	6
3 Mesure de la vitesse des ultrasons dans un liquide	6
3.1 Protocole de mesure	6
3.2 Résultats expérimentaux	7
4 Mesure de la vitesse de remontée de bulles d'airs dans un liquide	9
4.1 Protocole de mesure	9
4.2 Protocole de traitement des données	11
4.3 Résultats expérimentaux	12
5 Discussions sur la cohérence des résultats avec la littérature scientifique	14
6 Conclusion	16
A Lien GitHub contenant toutes les traces, les liens vidéos, ainsi que le code et son code source	18

Introduction

De l'imagerie médicale au contrôle industriel, les transducteurs ultrasonores sont aujourd'hui un outil de contrôle non-destructif omniprésent dans le domaine de la physique appliquée. Leur utilisation particulièrement simple leur permet de mettre en place des mesures simples mais précises très rapidement. Lors de ce projet, nous nous sommes proposés d'étudier le comportement de bulles d'air dans des liquides de différentes viscosités, notamment la vitesse à laquelle celles-ci remontent à la surface du liquide. Pour arriver à ce résultat, nous aurons besoin de commencer par définir quelques concepts clés sur les ultrasons, les sondes que nous utiliserons, et la manière de s'en servir. Une fois cela fait nous pourrions alors, après avoir rapidement évoqué le matériel à notre disposition, décrire la mesure tout d'abord de la vitesse des ultrasons dans les différents liquide que nous utiliserons pour finalement établir la mesure de la vitesse de remontée des bulles d'airs. Nous finirons notre étude par quelques discussions sur la cohérence de nos résultats expérimentaux avec le modèle théorique établi précédemment.

1 Les ultrasons

1.1 Bases

Les ultrasons correspondent aux ondes sonores avec une fréquence supérieure à 20KHz. Cette fréquence correspond également à la limite d'audition d'un adulte en bonne santé, ce pourquoi les ultrasons sont nommés ainsi, car non perceptibles par l'oreille humaine [Wikipédia, Ultrasons (Version du 21/12/2024)]. Les solides et les liquides n'étant pas opaque aux ultrasons, ils nous permettent de nous renseigner sur la structure interne des matériaux sans la modifier (on parle de contrôle non destructif) : défauts dans une pièce, propriétés mécaniques pour un solide, etc. Dans notre cas, nous étudierons leur propagation dans de l'eau, ainsi que des mélanges de différentes densités d'eau et de glycérol. Il faut noter que les ondes ultrasonores peuvent être longitudinales ou transversales, et cela est important car tandis que les premières ne se propagent que dans les liquides, les ondes transversales ne se propagent que dans les solides. Dans notre cas, nous n'utiliserons donc que des transducteurs à onde longitudinale.

Un concept important qu'il convient de définir maintenant est l'impédance acoustique d'un milieu donné. En effet même si nous y reviendrons plus tard, nous en aurons besoin pour déterminer la faisabilité théorique de notre expérience. Pour une onde acoustique plane progressive, l'impédance acoustique caractéristique est :

$$Z_{cara} = \rho_m c_m$$

Avec ρ_m la masse volumique du milieu, et c_m la célérité de l'onde acoustique dans celui-ci. A partir de cette impédance acoustique, nous pouvons définir les coefficients de réflexion r et de transmission t acoustique en amplitude de l'interface entre deux milieux 1 et 2 :

$$r = \frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2}$$

Ainsi que :

$$t = \frac{2Z_1}{Z_1 + Z_2}$$

Etant donné la simplicité théorique de notre projet, ces éléments seront suffisant pour nous permettre de comprendre son déroulé, nous n'encombrerons donc pas davantage cette partie, et pouvons passer à la présentation de l'élément principal de notre projet : le transducteur ultrasonore.

1.2 Transducteur Ultrasonore

Pour pouvoir générer des ultrasons de l'ordre du MHz comme ceux que nous allons ici utiliser, il n'est pas possible de simplement faire vibrer une membrane comme pour un haut-parleur, en effet les propriétés mécaniques du matériau utilisé pour ces membranes ne permettent pas la génération d'ultrasons. Ainsi, la méthode utilisée pour générer des ultrasons est la vibration de matériau piézoélectriques. Ces matériaux, lorsqu'on leur applique une déformation mécanique, génèrent une différence de potentiel, et inversement. Ainsi, en excitant un matériau piézoélectrique (le plus souvent un cristal) avec une tension, celui-ci va se déformer, et si on applique cette différence de potentiel sous forme d'impulsions d'une fréquence assez élevée (de l'ordre du MHz), le matériau va se mettre à se déformer de manière répétée, et ces vibrations vont produire des ultrasons.

Pour nos manipulations, nous utiliserons donc des sondes en réflexion, c'est à dire que celles-ci peuvent à la fois émettre une onde ultrasonore à l'aide d'un piézoélectrique comme expliqué ci-dessus, et simultanément convertir les ondes réfléchies par le milieu étudié en signal électrique (processus inverse) afin d'observer celui-ci à l'oscilloscope. Ainsi, cela va nous permettre d'observer ce que l'on définit comme l'échogramme de notre milieu, dont nous allons parler rapidement maintenant.

1.3 Echogramme

L'échogramme donc, correspond à l'observation des différents échos formés par les ondes réfléchies dans le milieu que nous étudions. Il apparaît alors évident que celui-ci va être intimement lié aux valeurs d'impédance des milieux que l'onde traverse, puisque celles-ci vont définir l'amplitude des ondes réfléchies aux interfaces entre les différents milieux. Chaque écho, possède donc une amplitude, qui dépend donc du coefficient de réflexion de l'interface dont il provient, ainsi que de l'absorption des milieux qu'il traverse avant de revenir à la sonde. Cette dernière notion n'étant pas importante pour notre projet, nous ne l'évoquerons pas davantage. Pour illustrer ce concept avec un exemple simple, on peut observer l'échogramme obtenu lorsque l'on observe avec un montage simple d'une sonde pointée sur un bocal en verre contenant de l'eau :

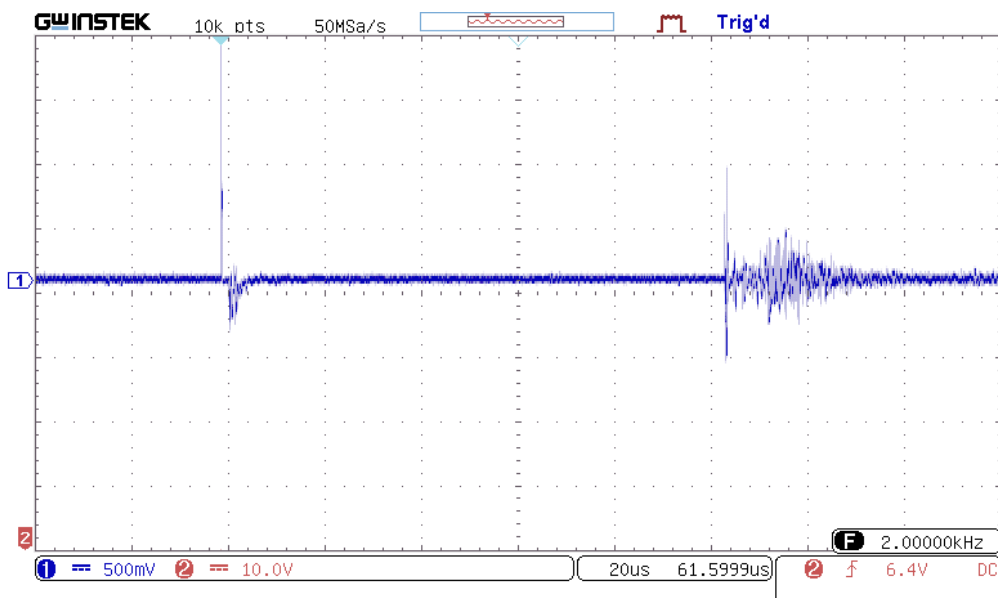


FIGURE 1 – Exemple d'un echogramme visualisé à l'oscilloscope

Ici apparaissent clairement deux échos principaux. Le premier correspond simplement à l'interface à l'extrémité de la sonde elle-même, qui réfléchit une partie de l'onde, étant donné que cet écho est fixe car

correspondant à la sonde, il sera notre point de référence pour mesurer des écarts temporels. Le second écho, lui, correspond à la réflexion sur la paroi en verre du bocal :

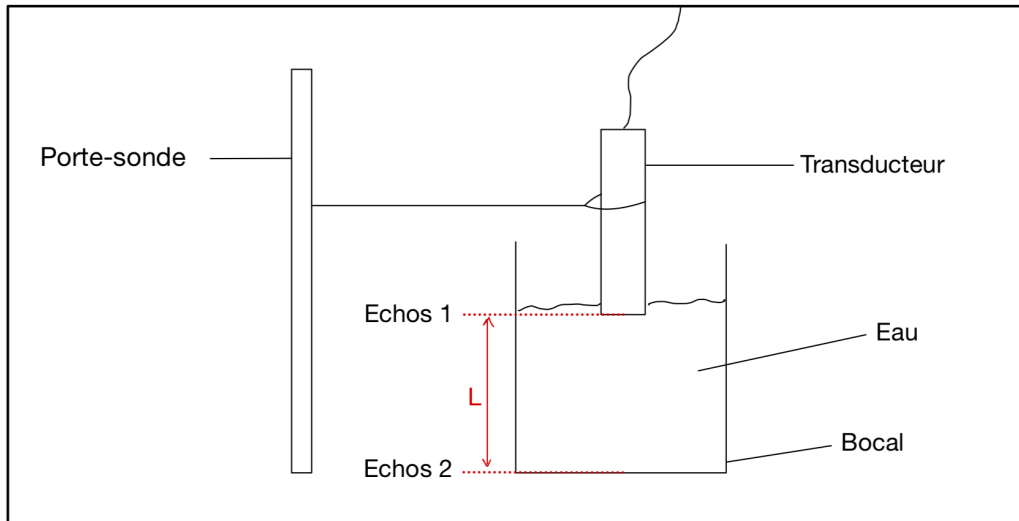


FIGURE 2 – Schéma du montage simple correspondant à cet échogramme

Ainsi, l'écho 2 est perçu avec un retard Δt par rapport à l'écho 1, correspondant au parcours d'une distance $\Delta x = 2L$ avec une célérité c_{eau} correspondant à la vitesse de l'onde ultrasonore dans l'eau. Ce principe va nous permettre durant tout le projet de mesurer les distances spatiales entre différents échos obtenus.

Pour clore cette brève introduction aux concepts élémentaires de ce projet, nous pouvons dès maintenant utiliser ces notions pour nous assurer qu'il est possible de mesurer la présence de bulles d'air dans un liquide, en tout cas du point de vue théorique, avec un transducteur ultrasonore. En effet, si l'on considère la masse volumique de l'air et de l'eau (à température ambiante), ainsi que des valeurs tabulées classiques de célérité du son dans ces milieux **cite**, on peut estimer leurs impédances acoustique :

$$\begin{aligned}
 Z_{eau} &= \rho_{eau} \times c_{eau} & Z_{air} &= \rho_{air} \times c_{air} \\
 &= 10^3 \times 1470 & &= 1.204 \times 340 \\
 &= 1.47 \times 10^6 \text{ kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1} & &= 4.01 \times 10^2 \text{ kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}
 \end{aligned}$$

On en déduit alors le coefficient de réflexion en amplitude à l'interface eau/air :

$$\begin{aligned}
 R_{eau/air} &= \frac{Z_{eau} - Z_{air}}{Z_{eau} + Z_{air}} \\
 &= \frac{1.47 \times 10^6 - 4.01 \times 10^2}{1.47 \times 10^6 + 4.01 \times 10^2} \\
 \boxed{R_{eau/air} &= 0.99}
 \end{aligned}$$

Ainsi, 99% de l'amplitude de l'onde étant réfléchi à l'interface avec la bulle d'air, nous sommes persuadés de la possibilité théorique de la détection de bulles d'air dans un liquide comme l'eau. En revanche, le paramètre restant à déterminer est la résolution spatiale de nos sonde. En effet, si la taille des bulles est trop faible pour permettre leur détection par la sonde, nous ne pourrons pas mesurer leur vitesse malgré le fait que la réflexion à leur surface soit quasi-totale, nous déterminerons donc cela expérimentalement par la suite. Pour cette même raison et ce lors de toutes nos manipulations, nous plongerons toujours l'extrémité de la sonde dans le liquide étudié, afin d'éviter de créer une interface air/eau avant le liquide, ce qui rendrait

impossible la pénétration dans celui-ci. Passons maintenant à une présentation rapide du matériel que nous utiliserons pour nos manipulations.

2 Matériel à notre disposition

Nous avons déjà évoqué une partie du matériel que nous utiliserons lors de nos mesures, mais nous pouvons revenir rapidement sur la liste pour en définir clairement l'utilisation. La liste qui restera constante entre les différentes mesures est la suivante :

1. Transducteur ultrasonores Panametrics – Olympus de différentes fréquences (2.25MHz, 5MHz)
2. Générateur d'impulsions électriques Panametrics – Olympus
3. Un porte-sonde qui permet une mesure verticale de la position de la sonde
4. Un oscilloscope GW Instek GDS-1102B
5. Un ordinateur pour l'acquisition des données de l'oscilloscope
6. Un récipient contenant le liquide étudié
7. Un générateur de fonctions électriques
8. Différentes solutions à base d'eau et de glycérol (100%, 75%, 50%, 25% et 0% de glycérol)
9. Une pipette à l'extrémité de laquelle est placée une gaine souple, afin de souffler dans les récipients

Comme nous l'avons déjà expliqué, l'oscilloscope nous sert à visualiser l'échogramme obtenu par le transducteur. Le générateur d'impulsions, lui, définit comme son nom l'indique la fréquence des impulsions envoyées par la sonde. Cette fréquence sera donc choisie selon la profondeur de l'échantillon étudié, ainsi que de la vitesse des ultrasons dans cet échantillon, car ces deux paramètres vont définir le temps que mettront les échos qui nous intéressent à revenir à la sonde. Il faudra donc choisir une période d'impulsion inférieure au temps nécessaire à ces échos pour revenir, et ainsi éviter de superposer les impulsions. Une partie de l'onde sera toujours réfléchi par la sonde elle-même ou par les parois du récipients pour revenir de plus en plus tard à la sonde, mais leur amplitudes seront rapidement diminuées et nous pourrons les négliger.

Le générateur de fonctions électriques, quant à lui, nous servira plus tard pour mesurer les vitesses des bulles d'air dans l'eau, nous y reviendrons.

Enfin, les différentes solutions à base d'eau et de glycérol nous permettront d'obtenir des liquides avec différentes masses volumique. Cette masse volumique définissant la vitesse à laquelle remontent les bulles d'air dans le liquide, nous sommes donc censés obtenir différentes valeurs de vitesses selon les mélanges. Passons maintenant aux mesures mises en place en elles-mêmes.

3 Mesure de la vitesse des ultrasons dans un liquide

La première campagne de mesure que nous devons effectuer, indispensable pour la suivante, est la mesure de la célérité des ultrasons dans les différents mélanges d'eau et de glycérol. En effet, comme nous l'expliquions en partie 1.3, nous ne pouvons relier la mesure d'écart temporels sur les échogrammes à un écart spatial sans avoir la valeur de la célérité du son dans le liquide étudié.

3.1 Protocole de mesure

Pour effectuer correctement cette mesure, nous pouvons simplement reproduire le graphe présent en Figure 2. Le protocole que nous avons utilisé est le suivant :

- Fixer une position verticale de la sonde à l'aide du porte-sonde gradué
- Repérer la position temporelle de l'écho réfléchi à la surface inférieure du récipient
- Faire varier la position verticale de la sonde d'une longueur Δx
- Mesurer l'écart Δt entre la position temporelle de l'ancien écho et le nouveau

On obtient alors simplement la vitesse de l'onde ultrasonore dans le milieu comme le rapport :

$$c_{exp} = \frac{2\Delta x}{\Delta t}$$

Etant donné que l'onde a parcouru une distance supplémentaire (si l'on a choisi Δx positif) égale à deux fois la variation de hauteur de la sonde, étant-donné que l'onde fait un aller-retour avant de revenir à la sonde.

Pour ce qui est de la préparation des solutions d'eau et glycérol, nous avons simplement utilisé une pipette graduée, puis à l'aide d'un agitateur magnétique et d'un barreau aimanté, procédé à l'homogénéisation du mélange.

3.2 Résultats expérimentaux

Pour faire apparaître rapidement la vitesse du son dans le milieu étudié, on trace donc la courbe de $2\Delta x$ en fonction de Δt et on obtient la vitesse à partir de la pente de la droite, dont l'équation nous est donné par QtiPlot. Nous obtenons donc les valeurs suivantes pour l'eau pure :

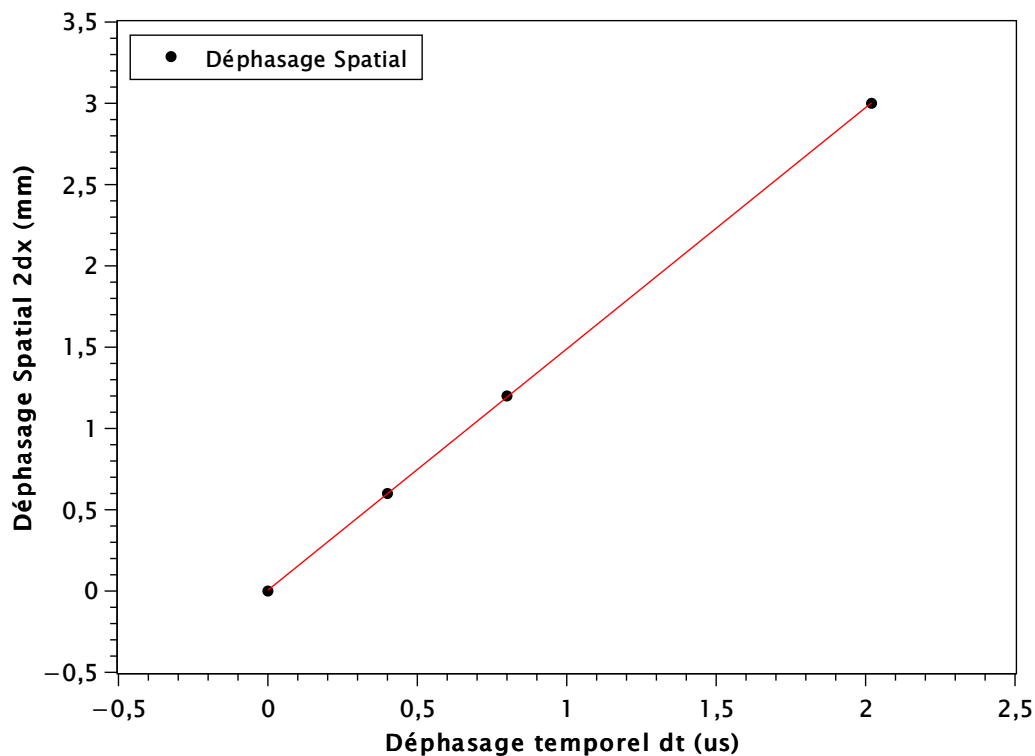


FIGURE 3 – Déphasage spatial de l'écho en fonction de son déphasage temporelle (eau pure)

La modélisation se fait ici sans exclusion de point ou d'écart notable avec le modèle, on peut donc conclure que nos valeurs semblent totalement exploitables. On obtient donc une valeur de :

$$c_{eau} = 1484 \pm 4 \text{ m.s}^{-1}$$

Pour 4 autres mélanges eau-glycérol, nous avons obtenu les données suivantes :

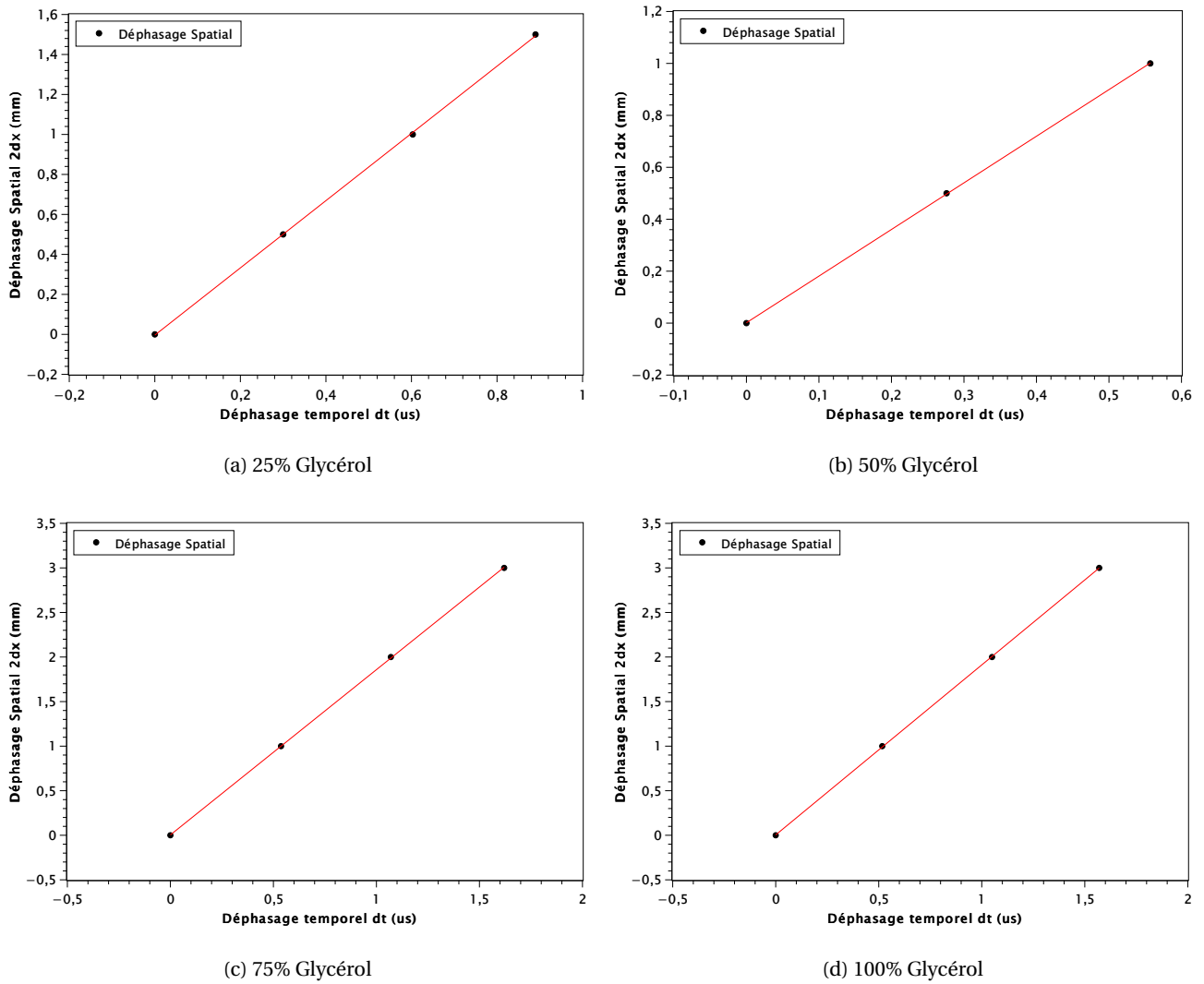


FIGURE 4 – Résultat expérimentaux pour le reste des mélanges eau-glycérol

Encore une fois, de par la simplicité du protocole et la précision de la sonde, nous obtenons une modélisation propre de la vitesse à partir de la mesure des positions temporelles et spatiales des échos. Nous avons récapitulé les valeurs obtenues pour la vitesse, ainsi que leurs incertitudes, dans le tableau suivant :

TABLE 1 – Valeurs obtenues expérimentalement pour la célérité des ultrasons dans nos mélanges

	0% Glycérol	25% Glycérol	50% Glycérol	75% Glycérol	100% Glycérol
$c_{exp}/m.s^{-1}$	1484	1682	1795	1854	1907
$\Delta c_{exp}/m.s^{-1}$	5	14	9	9	8

La valeur de la vitesse semble bien augmenter avec la densité ce qui est le résultat auquel on s'attend, nous pouvons finalement superposer ces valeurs expérimentales à celles obtenues théoriquement à partir des équations entre la température et la célérité du son dans le glycérol, à température ambiante [Roland Clift - Bubbles, Drops, and Particles-Academic Press (1978)]. Les vitesses théoriques pour les mélanges sont simplement obtenues à partir des moyennes pondérées des vitesses en fonction des pourcentages des mélanges :

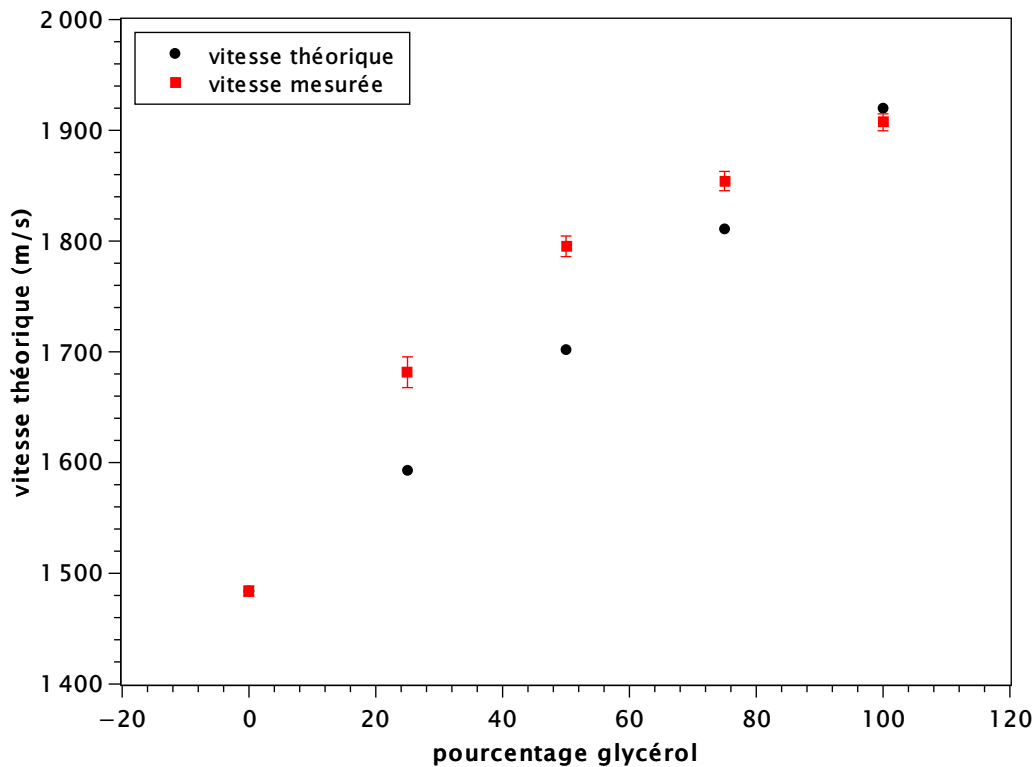


FIGURE 5 – Comparaison de nos résultats avec les valeurs théoriques

Nos valeurs encadrent les valeurs théoriques pour les liquides purs (eau, glycérol) mais à partir du moment où l'on travaille avec les mélanges, nos mesures s'éloignent considérablement des valeurs tabulées. Cela s'explique sûrement par l'homogénéisation des mélanges, malgré l'agitateur magnétique, les deux liquides ont dû avoir du mal à se mélanger, et la vitesse de l'onde dans ces derniers ne devaient donc plus être constante. Nous utiliserons tout de même nos propres valeurs expérimentales pour les calculs de la partie suivante, dans le cas où l'erreur viendrait d'ailleurs (préparation des échantillons), et ainsi être sûr de travailler avec la célérité mesurée directement sur les échantillons que nous allons utiliser. Maintenant que nous possédons ces valeurs, nous pourrions donc mesurer des déplacements dans l'espace à partir de l'échogramme, et ainsi mesurer la vitesse de remontée des bulles d'air dans les liquides.

4 Mesure de la vitesse de remontée de bulles d'airs dans un liquide

4.1 Protocole de mesure

Le premier protocole que nous allons mettre en place va servir de protocole de faisabilité. Ainsi, il nous permettra de vérifier si l'on peut ou non détecter correctement les bulles d'air et leur position dans un récipient. Pour ce faire, nous allons utiliser toujours un bocal en verre contenant le liquide, comme précédemment, et toujours avec la sonde disposée de manière verticale sur celui-ci, introduire la gaine à l'extrémité de la pipette au fond du récipient, juste en dessous de la sonde, afin de créer des bulles qui vont remonter dans l'axe de détection du transducteur :

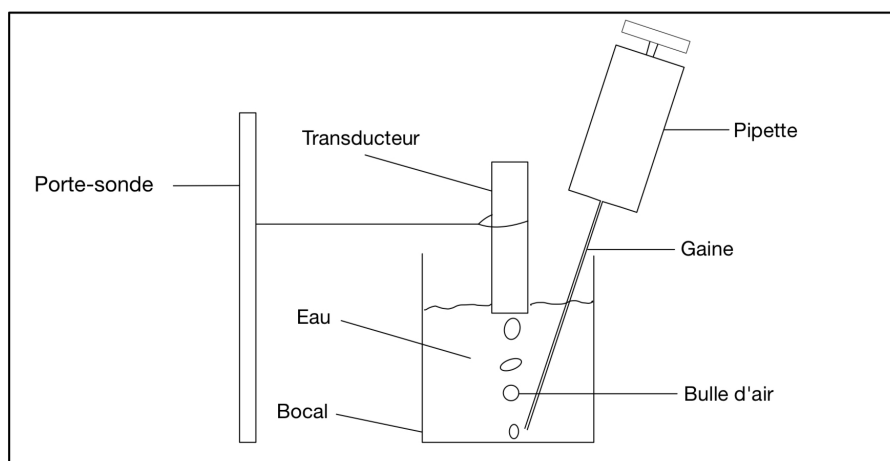


FIGURE 6 – Montage utilisé pour vérifier la faisabilité de la détection de bulles d’air dans les liquides

Pour ce protocole de faisabilité, nous avons réalisé une vidéo de la trace de l’oscilloscope ainsi que du trajet des bulles d’air, afin de voir clairement leur allure sur l’oscilloscope. Cette vidéo se trouve [ici](#). Nous voyons clairement à partir de ce protocole simple que la résolution spatiale de la sonde est suffisante pour détecter les positions successives des bulles d’air, et pouvons donc poursuivre le déroulé de notre protocole.

En effet, à partir du logiciel [OpenWave](#) et de la fonction *record*, nous allons pouvoir sauvegarder au format .CSV les traces brutes obtenues durant le trajet de la bulle, et donc à partir de ses positions (temporelle, desquelles on déduira les positions spatiales grâce aux mesures précédentes) successives et des écarts de temps réel entre ces positions, obtenir la vitesse de remontée des bulles. Nous détaillerons plus tard la méthode précise pour exploiter ces valeurs. Ce premier protocole nous donnera donc une valeur approximative de la vitesse de la bulle, mais comme visible sur la vidéo, celle-ci ne parcourt qu’une faible distance durant son trajet, selon la rapidité d’acquisition de notre logiciel, cette méthode sera donc potentiellement très imprécise, nous allons donc la compléter avec une méthode plus rigoureuse.

Nous allons donc, pour améliorer la précision de nos valeurs, utiliser non plus un bocal en verre dont la taille n’est pas idéale mais une éprouvette graduée. Celle-ci sera donc beaucoup plus haute, la bulle parcourra une distance plus grande, et sa forme améliorera la qualité du signal en limitant les ondes qui se réfléchissent sur les surfaces du bocal en verre :

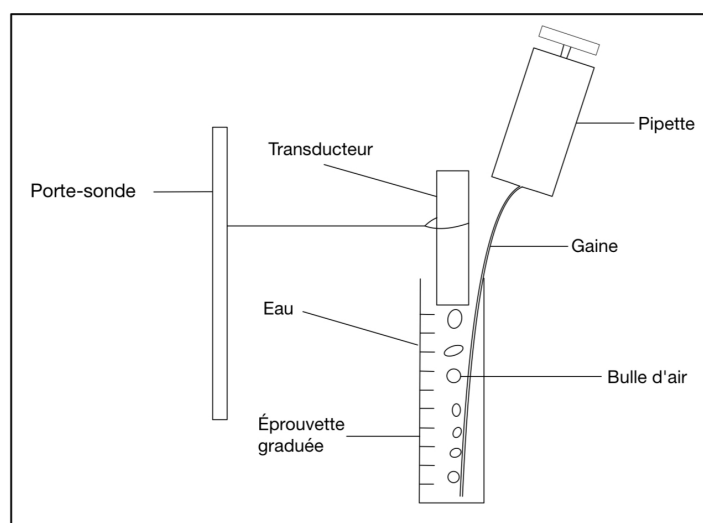


FIGURE 7 – Montage utilisé pour améliorer la précision des valeurs mesurées de vitesse

Ce montage améliore non-seulement la précision des valeurs, mais permet également, toujours en réalisant une acquisition vidéo de l'oscilloscope et de l'allure de la bulle correspondante, d'estimer la taille de chaque bulle à l'aide des graduations de l'éprouvette, qui aura un impact sur sa dynamique et donc sa vitesse.

Enfin, en plus de ces éléments, nous allons avoir besoin de rajouter une rampe de tension à notre visualisation sur l'oscilloscope. En effet, nous en reparlerons juste après pour détailler le protocole de traitement des données, mais il sera nécessaire de retrouver le temps réel écoulé entre chaque acquisition réalisée par le logiciel OpenWave, étant donné qu'aucune valeur de fréquence d'acquisition précise n'est fournie dans la documentation, et que celle-ci ne semble pas être constante. Le montage final de ces deux mesures, avec le matériel complet, sera donc le suivant :

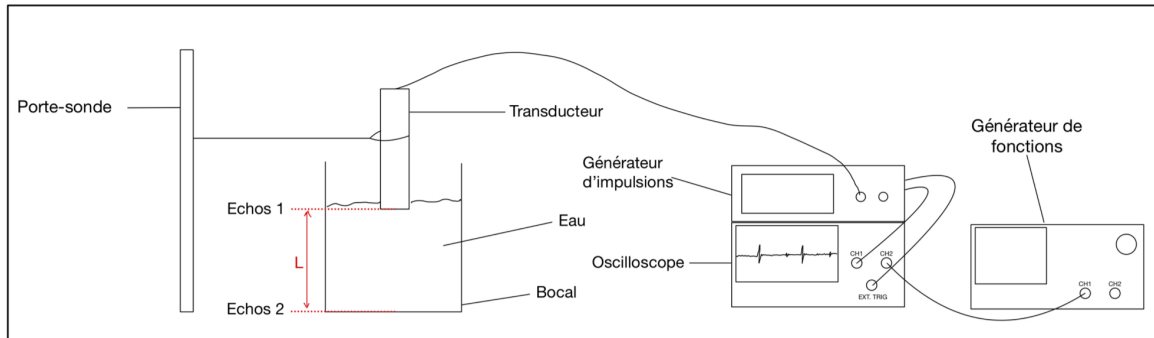


FIGURE 8 – Montage complet utilisé pour mesurer la vitesse de remontée des bulles d'air

Nous allons maintenant détailler plus clairement comment nous utiliserons cette rampe pour retrouver l'échelle temporelle.

4.2 Protocole de traitement des données

Le protocole précédent, ainsi que les record avec OpenWave, nous fournissent une quantité colossale de données. En effet, chaque acquisition conserve les données brutes de 10 000 points sur la trace de chaque channel, donc 20 000 points par acquisition dans notre cas, et la cadence est d'environ 10 acquisition par seconde. Pour une acquisition d'environ 30s, on arrive donc à un nombre de valeur de l'ordre de quelques millions. Ainsi, pour pouvoir traiter efficacement ces données, il a fallu développer un code Python pour pouvoir retrouver rapidement les données qui nous intéressent parmi ces millions de valeurs. Nous ne détaillerons pas son fonctionnement ici, car cela serait bien trop long, mais le code source, les versions compilées ainsi que les données brutes obtenues via OpenWave sont disponibles sur [GitHub](#).

Même si nous n'en détaillons pas le fonctionnement donc, celui-ci agit comme un lecteur vidéo, et retrace les données brutes de l'oscilloscope acquisition par acquisition, et nous permet de nous arrêter aux graphes qui nous intéressent tout en naviguant graphe par graphe. Aussi, à partir de la rampe de courant que nous avons placée en channel 2, celui-ci calcul le temps écoulé entre chaque acquisition grâce à son intensité en une acquisition donnée et la fréquence connue de cette rampe. Le logiciel fonctionnant avec Matplotlib, nous pouvons ensuite donc utiliser le pointeur pour obtenir les valeurs brutes qui nous intéressent sur un graphe, et identifier la position temporelle des échos à la surface des bulles d'air à la manière des curseurs de l'oscilloscope. Finalement, à partir de la vitesse des ultrasons dans le milieu étudié, et de l'affichage du temps écoulé entre les graphes, on obtient la vitesse des bulles d'airs à un instant donné.

Enfin, afin de relier la taille de chaque bulle avec leur allure sur la trace, nous avons encore une fois synchronisé vidéo de la trace sur l'oscilloscope et de la bulle, cette fois-ci donc dans l'éprouvette, et à l'aide de l'affichage du temps réel sur le code, retrouver la taille de chaque bulle sur les graphes, à condition d'avoir lancé les 3 enregistrements (vidéo de l'oscilloscope, de la bulle et acquisition donnée brute) en même temps. Tout est encore une fois disponible sur le [GitHub](#), qui contient également un lien vers la chaîne YouTube.

4.3 Résultats expérimentaux

A partir des protocoles décrits ci-dessus, nous avons donc obtenu dans un premier temps une valeur relativement quantitative de la vitesse de remontée des bulles d'air dans un mélange choisi, à savoir 25% de glycérol :

TABLE 2 – Valeur obtenues pour la vitesse de remontée des bulles d'air, premier protocole

	25% Glycérol	0% Glycérol
$c_{exp}/cm.s^{-1}$	22	26
$\Delta c_{exp}/cm.s^{-1}$	3	4

Nous discuterons plus tard en détail de la cohérence de ces valeurs, simplement nous pouvons les comparer, en ordre de grandeur, à un exemple de valeur tabulée pour une telle vitesse. Dans de l'eau pure par exemple, une bulle de 1cm devrait remonter à une vitesse d'environ $22 cm.s^{-1}$ [Roland Clift - Bubbles, Drops, and Particles-Academic Press (1978)] , ce protocole nous permet donc que vérifier qu'avec un tel de montage, on retombe sur le bon ordre de grandeur pour la vitesse des bulles. Affinons maintenant nos résultats, avec le second protocole.

Nous avons donc relié la vitesse de bulles de différentes tailles en fonction de leur position sur leur trajectoire, dans un premier temps dans du glycérol pur, qui est le mélange le plus dense que nous avons utilisé. Nous devons donc obtenir des valeurs de vitesse relativement plus faibles que celles que nous venons de trouver. Voici le graphe obtenu :

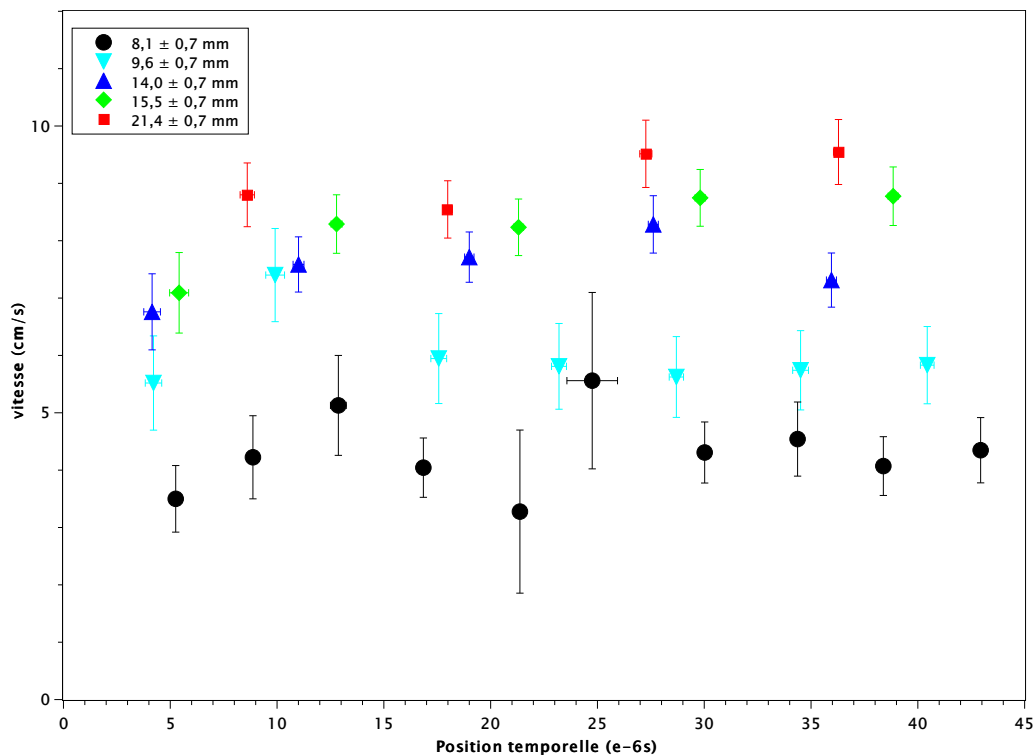
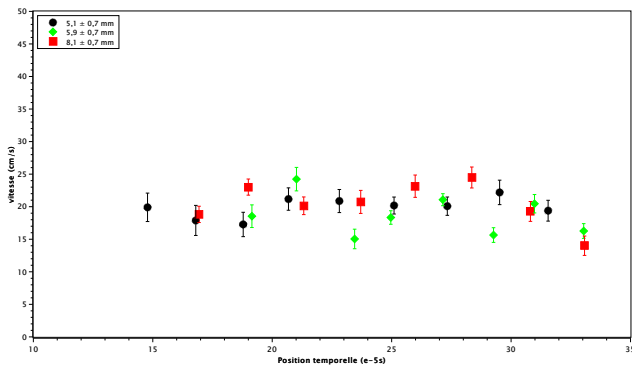
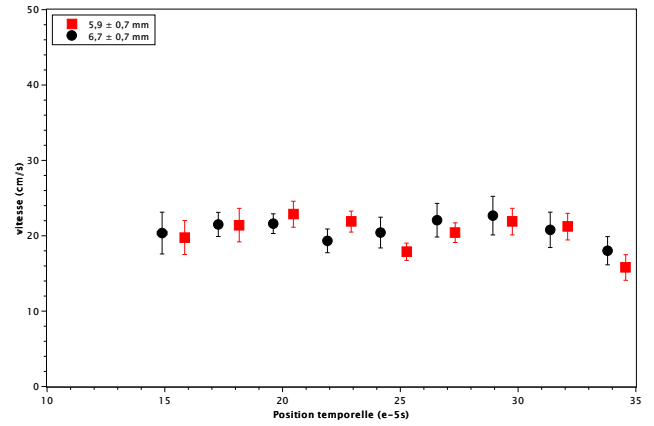


FIGURE 9 – Vitesse de remontée des bulles en fonction de leur position sur la trajectoire, différentes tailles

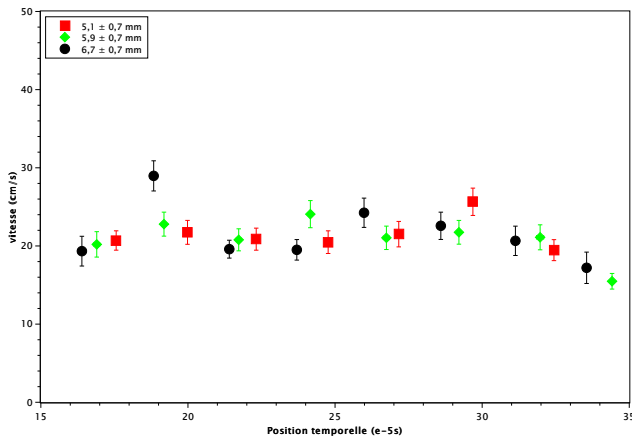
Plusieurs choses sont importantes à remarquer. Dans un premier temps, la vitesse des bulles est effectivement plus faible que pour l'eau pure. Ensuite, on observe bien des vitesses moyennes différentes selon la taille des bulles. Enfin, l'incertitude sur leur vitesse est relativement élevée, notamment sur la bulle de 8.2 cm. Voici les graphes obtenus pour les vitesses dans les mélanges et l'eau pure :



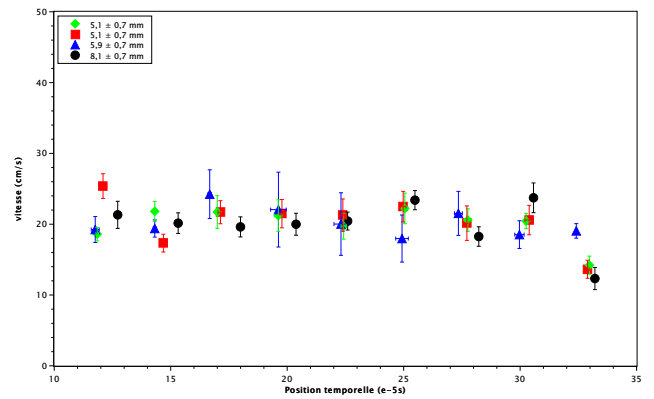
(a) 50% Glycérol



(b) 25% Glycérol (1)



(c) 25% Glycérol (1)



(d) 0% Glycérol

Notons avant tout que l'on observe plus à partir du premier mélange, de séparation claire entre les vitesses moyennes en fonction de la taille des bulles. On observe ensuite effectivement une vitesse supérieure au liquide précédent, qui avait une très grande densité, mais il n'y a pas de séparation claire entre les différentes densités des liquides. Enfin, pour le mélange à 75% de Glycérol, une mauvaise acquisition ne nous a fourni qu'un faible nombre de points, nous n'avons donc pas produit de graphe, mais les vitesses mesurées sont les suivantes :

TABLE 3 – Valeur obtenues pour la vitesse de remontée des bulles d'air, second protocole

75% Glycérol	
$c_{exp}/cm.s^{-1}$	17.8
$\Delta c_{exp}/cm.s^{-1}$	0.5

Ces mesures ont été établies avec une bulle d'une taille de $8.8 \pm 0.7 \text{ mm}$. Encore une fois, elle ne dessine aucune tendance particulière de vitesse en fonction de la densité, contrairement à ce que l'on attend. Pour résumer ces valeurs, nous avons retenu une valeur de vitesse pour chaque mélange, pour des bulles de taille la plus similaire possibles, soit autour de 7 cm . Ainsi, on obtient le graphe suivant, pour la vitesse en fonction de la position sur la trajectoire pour le mélange choisi :

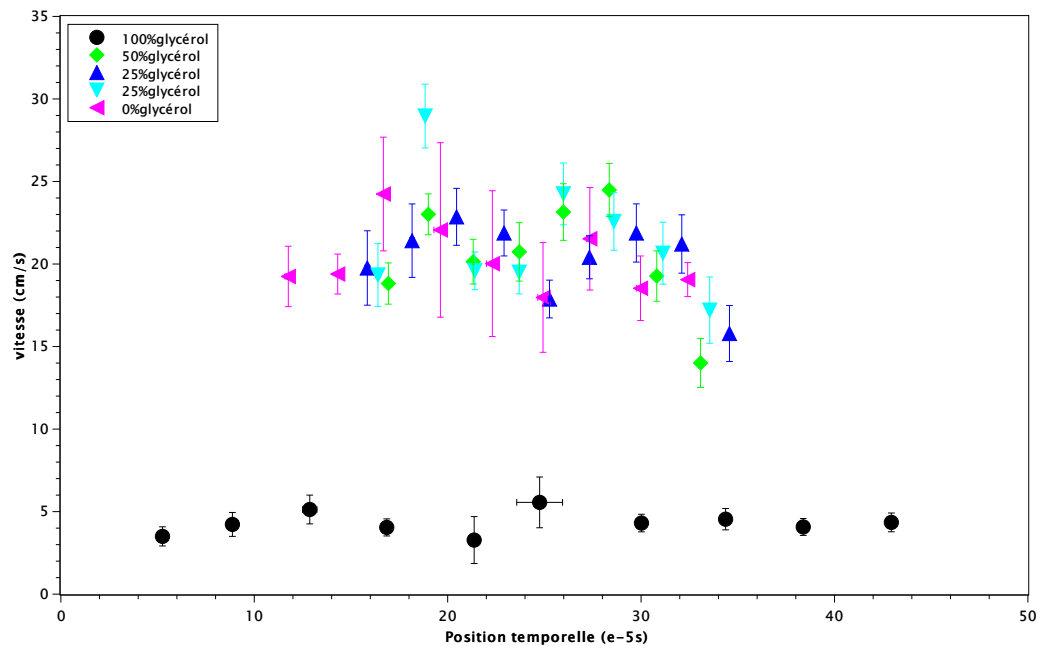


FIGURE 11 – Vitesses mesurées expérimentalement pour des bulles de taille similaire

Se confirme donc ici l'absence de tendance claire pour la vitesse d'une bulle de même taille dans différents mélange, malgré une séparation claire entre le glycérol pur et les autres mélanges. Cela peut dans un premier temps être dû à la grande incertitude obtenue sur la vitesse, qui s'est propagée notamment de l'incertitude sur la position temporelle de l'écho. En effet, de par la forme étendue de celui-ci, il est difficile d'en déterminer sa forme, nous avons donc dû en prendre une valeur assez large pour être sûr de ne pas le couper. Aussi, étant donné que nous avons déjà des doutes sur la perfection de nos mélanges, si ceux-ci ne sont pas homogènes, il est probable que cela soit une grande source d'erreur également. En effet, de par la forme de l'éprouvette graduée, très verticale, il était difficile de mélanger verticalement le liquide contenu à l'intérieur, surtout avec un agitateur magnétique qui se situe à l'extrémité basse de l'éprouvette, cela est donc sûrement une grande source d'erreur. Enfin, nous allons discuter de la cohérence de ces valeurs avec d'autres valeurs obtenues dans la littérature scientifique pour des protocoles similaires, toujours à vitesse ambiante.

5 Discussions sur la cohérence des résultats avec la littérature scientifique

Pour cette dernière partie, nous n'étudierons que nos valeurs obtenues pour les liquides purs donc, car les mélanges semblent produire des valeurs trop hasardeuses. Commençons par discuter des vitesses mesurées dans de l'eau "pure". Dans la littérature [Roland Clift - **Bubbles, Drops, and Particles-Academic Press (1978)**], on trouve le graphe suivant de la vitesse de remontée des bulles d'air, à température ambiante, en fonction de la taille :

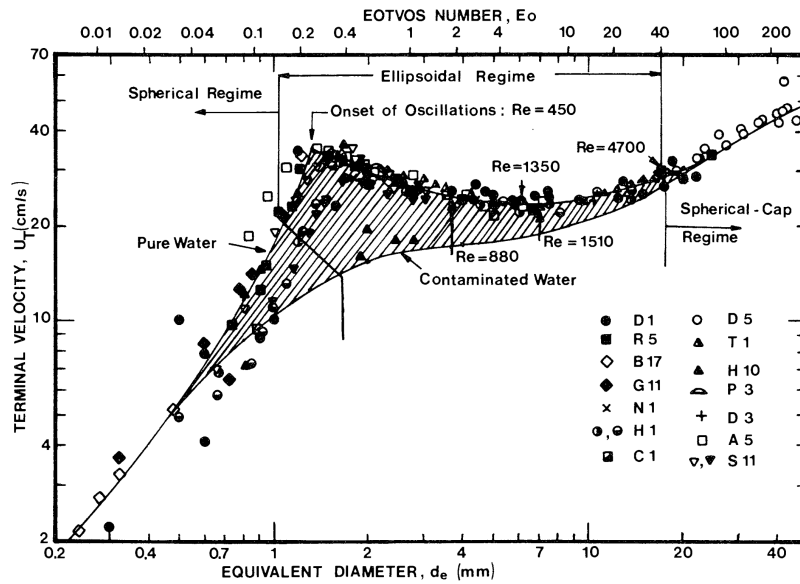


FIGURE 12 – Célérité des bulles d'air dans l'eau à 20 °

Ce graphe nous permet de comprendre pourquoi en Figure 10d, nous n'obtenions pas de tendance claire entre la taille des bulles. En effet, la taille de nos bulles correspond à cette partie de la courbe :

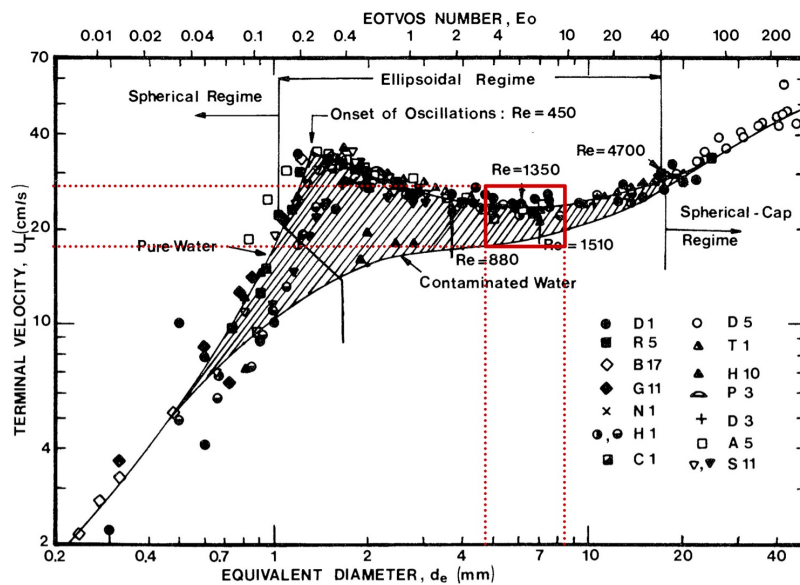


FIGURE 13 – Zone couverte par nos valeurs expérimentales

Ainsi, quand on prend en compte l'impureté de notre eau, l'ensemble de nos valeurs rentrent dans la plage couverte par ce graphe, nous n'avons donc simplement pas prit des différences de tailles suffisantes pour obtenir des vitesses assez différentes. Nos valeurs sont tout à fait compatibles avec celles de la littérature scientifique.

Ensuite, nous allons regarder ce que l'on obtient pour le glycérol pur, soit la Figure 9. Notre source pour ce liquide sera la suivante [**Dynamique de bulles dans des fluides rhéologiquement complexes, Denis Funfschilling**] :

Solution	N° figure	Volume $\times 10^{-9} [m^3]$	Vitesse [m/s]	Reynolds
Glycérol 99,5%	VI.2.a et VI.3	400	0,063	0,67
	VI.2.b et VI.4	1100	0,11	1,6
CMC 2%	VI.5.a et VI.6	200	0,13	2,31
	VI.5.b et VI.7	900	0,2	5,63
PAAm 0,25%	VI.8.a et VI.9	90	0,17	8,2
	VI.8.b et VI.10	200	0,23	15
	VI.8.c et VI.11	700	0,25	19,6
PAAm 0,5%	VI.12.a et VI.13	80	0,09	1,4
	VI.12.b et VI.14	190	0,17	4,38
	VI.12.c et VI.15	1000	0,25	9,5
PAAm 0,75%	VI.16.a et VI.17	100	0,02	0,047
	VI.16.b et VI.18	250	0,1	0,836
	VI.16.c et VI.19	1200	0,25	4,7

FIGURE 14 – Caractéristiques des différents champs de vitesse, à température ambiante

Un calcul rapide sur le volume des bulles observées dans le glycérol pur dans cette étude, nous donne des bulles d'un diamètre de 7 mm et 11 mm, pour une vitesse respectivement de 6.3 cm.s^{-1} et 11 cm.s^{-1} . Prenons les bulles que nous possédons avec la taille la plus proche possible de celles-ci, soit la bulle de $8.1 \pm 0.7 \text{ mm}$, qui se situe donc entre ces deux dernières. On obtient une vitesse moyenne de

$$c_{\text{moy}} = 4.3 \pm 0.7 \text{ cm.s}^{-1}$$

Bien que très proche, cette valeur n'est pas entre les deux valeurs trouvées dans la littérature, et cette fois-ci cela s'explique encore une fois par la difficulté de l'indentification visuelle de l'écho. Dans le glycérol pur, celui-ci est particulièrement étalé, et nous avons dû mal estimer son incertitude.

6 Conclusion

Pour conclure, nous avons donc pu obtenir une quantité importantes de valeurs expérimentales pour les vitesses de remontée des bulles d'air, et ce dans des liquides de différentes densités. Nous n'avons pas pu relier clairement cette vitesse à la densité du milieu, même si une séparation claire apparaissait entre le glycérol pur et ses mélanges avec l'eau. Les sources d'erreurs évidentes sont donc l'homogénéité des mélanges, et la mesure de la vitesse des ultrasons dans ces mélanges, qui va donc totalement définir les résultats suivants. Enfin, pour ce qui est de l'eau seule, nous avons obtenues des valeurs qui semblent parfaitement correctes, malgré une gamme de taille mal choisie pour obtenir des tendances claires sur celles-ci, cependant nous pouvons maintenant totalement affirmer qu'il est possible de mesurer la vitesse de remontée d'une bulle d'air à la surface d'un liquide quelconque, et ce en obtenant des valeurs tout à fait cohérentes avec la littérature scientifique. Il est cependant très probable que les transducteurs ultrasonores que nous avons utilisé durant ce projet ne possédaient pas la résolution spatiale nécessaire pour pouvoir mesurer les écarts de vitesse sur de si petites différences de taille de bulles, et sur des milieux aux densités aussi proche. En effet, la tendance avec le glycérol pur suggère fortement que l'utilisation d'un autre liquide, plus visqueux encore, aurait permis d'identifier une tendance plus claire.

Table des figures

1	Exemple d'un échogramme visualisé à l'oscilloscope	4
2	Schéma du montage simple correspondant à cet échogramme	5
3	Déphasage spatial de l'écho en fonction de son déphasage temporelle (eau pure)	7
4	Résultat expérimentaux pour le reste des mélanges eau-glycérol	8
5	Comparaison de nos résultats avec les valeurs théoriques	9
6	Montage utilisé pour vérifier la faisabilité de la détection de bulles d'air dans les liquides	10
7	Montage utilisé pour améliorer la précision des valeurs mesurées de vitesse	10
8	Montage complet utilisé pour mesurer la vitesse de remontée des bulles d'air	11
9	Vitesse de remontée des bulles en fonction de leur position sur la trajectoire, différentes tailles	12
11	Vitesses mesurées expérimentalement pour des bulles de taille similaire	14
12	Célérité des bulles d'air dans l'eau à 20 °	15
13	Zone couverte par nos valeurs expérimentales	15
14	Caractéristiques des différents champs de vitesse, à température ambiante	16

Liste des tableaux

1	Valeurs obtenues expérimentalement pour la célérité des ultrasons dans nos mélanges	8
2	Valeur obtenues pour la vitesse de remontée des bulles d'air, premier protocole	12
3	Valeur obtenues pour la vitesse de remontée des bulles d'air, second protocole	13

A Lien GitHub contenant toutes les traces, les liens vidéos, ainsi que le code et son code source

<https://github.com/Sili0/projet-ultrasons>

Résumé

L'étude de la vitesse de bulles d'air par ultrason a été effectuée dans des liquides à base d'eau et de glycérol. Dans chaque cas, nous avons au préalable vérifié la propagation des ultrasons dans notre liquide puis nous avons mesuré la vitesse des bulles afin de déterminer l'action de leur diamètre sur cette vitesse. Nous n'avons pas pu observer que la vitesse des bulles dans nos liquides était proportionnelle à la densité du liquide, et les diamètres utilisés pour ces mêmes bulles étaient trop proches pour obtenir une relation sur la vitesse. Nous avons négligé les effets de paroi de nos récipients durant notre étude.

Abstract

With mix of water and glycerol, it has been possible to study the air bubbles' speed in different liquids thank to ultrasound. We checked the propagation of ultrasound in each liquid, then we measured the bubbles' speed to determine the link between their diameter and the speed. We didn't observed that the bubbles's speed in ours liquids were proportional to the liquid's density and the diameter of the bubble. During our study, we neglected wall effects of ours recipients.
