

Propagation des ultrasons et vitesse de remontée des bulles d'air

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 Notions d'hydrodynamique	6
2.1 Nombre de Reynolds	6
2.2 Frottement fluide	6
2.3 Poussée d'archimède	7
2.4 Volume équivalent	7
3 Matériel à notre disposition	7
4 Mesure de la vitesse des ultrasons dans un liquide	8
4.1 Protocole de mesure	8
4.2 Résultats expérimentaux	9
5 Mesure de la vitesse de remontée de bulles d'airs dans un liquide	12
5.1 Protocole de mesure	12
5.2 Protocole de traitement des données	14
5.3 Résultats expérimentaux	15
6 Discussions sur la cohérence des résultats avec la littérature scientifique	19
7 Conclusion	22
A Annexes	23

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. Cette vitesse de remontée, dans la littérature scientifique, a déjà fait l'objet de nombreuses recherches, notamment dans l'eau et les liquides visqueux comme le glycérol. Notre objectif sera donc de tenter de répondre à la question suivante : peut-on également utiliser la propagation des ultrasons comme outil pour effectuer des mesures de vitesse de bulle d'air dans des liquides ? 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. Nous évoquerons ensuite les notions hydrodynamiques importantes à l'interprétation de nos résultats. Une fois cela fait nous pourrons alors, après avoir rapidement évoqué le matériel à notre disposition, décrire la mesure tout d'abord de la vitesse des ultrasons dans les différents liquides que nous utiliserons pour finalement établir la mesure de la vitesse de remontée des bulles d'air. 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, raison pour laquelle les ultrasons sont nommés ainsi, car non perceptibles par l'oreille humaine [1]. Les solides et les liquides n'étant pas opaques 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 concentrations d'eau et de glycérol. Il faut noter que les ondes ultrasonores peuvent être longitudinales ou transversales, selon la direction dans laquelle celles-ci perturbent leur milieu de propagation. 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 suffisants 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 matériaux 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 crystal) 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 et reçues par le transducteur 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 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 place une sonde dans un bocal en verre rempli d'eau, perpendiculairement à la surface inférieure du bocal :

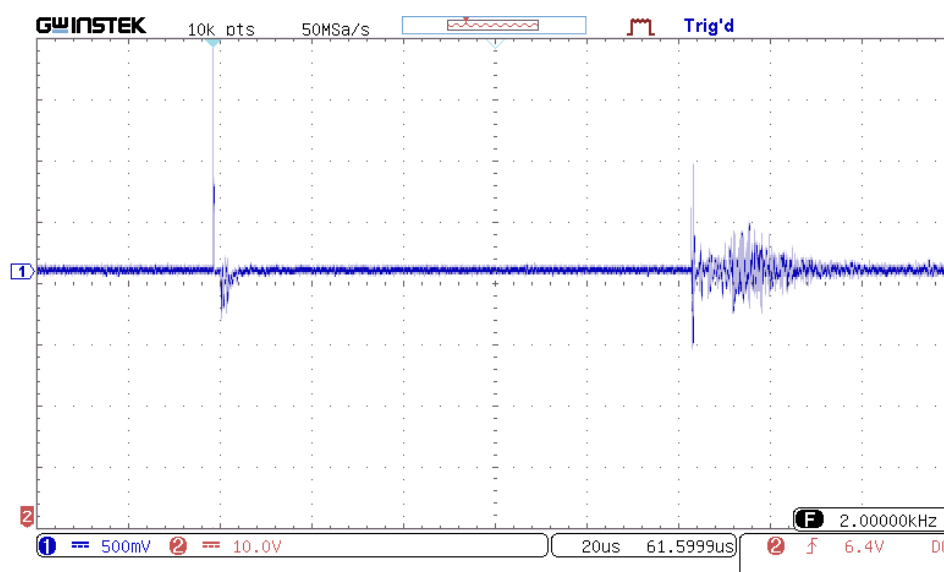


FIGURE 1 – Exemple d'un echogramme visualisé à l'oscilloscope pour une sonde dans un bocal en verre rempli d'eau

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 :

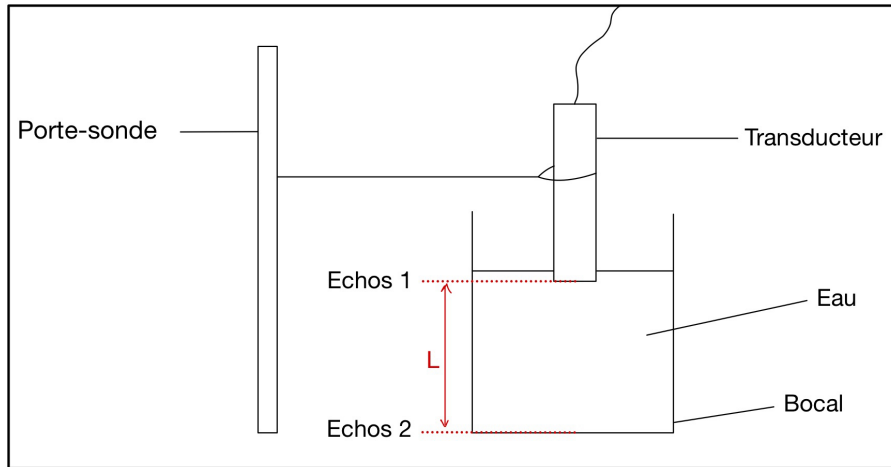


FIGURE 2 – Schéma du montage simple correspondant à l'échogramme de la Figure 1

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, on peut estimer leur impédance 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 :

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

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 sondes. En effet, si la taille des bulles est trop faible pour permettre leur détection par la sonde, nous ne pourrions 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. Enfin, un dernier élément que nous devons mentionner, est le fait que nous allons par la suite négliger les effets de bord sur les parois de nos récipients. Ces effets ont un impact direct sur l'allure de notre échogramme, car la paroi inférieure de notre récipient n'est pas la seule à produire des réflexions, une partie des échos perçus par la sonde proviendra donc toujours des rebonds successifs des ultrasons sur les bords de nos récipients et c'est un facteur à prendre en compte si l'on veut améliorer la précision de nos mesures, n'ayant cependant pas de moyen d'en évaluer l'impact, nous ne les prendrons pas en compte. Passons maintenant à une présentation rapide des concepts d'hydrodynamique qu'il nous sera utile d'avoir en tête pour interpréter le comportement de nos bulles d'air.

2 Notions d'hydrodynamique

2.1 Nombre de Reynolds

Un premier concept qu'il est important de présenter est celui de nombre de Reynolds, noté R_e . Il s'agit d'une grandeur sans dimension qui va permettre de prédire l'allure de l'écoulement d'un fluide, laminaire ou turbulent. Son expression est la suivante :

$$R_e = \frac{\rho V L}{\mu}$$

où ρ est la masse volumique du fluide, V est la vitesse de l'écoulement, L la longueur sur laquelle la vitesse varie et μ la viscosité dynamique du fluide étudié. Ce concept est important car, sous couvert de quelques hypothèses et d'un changement de référentiel, la remontée d'une bulle d'air dans un fluide est analogue à l'écoulement de ce fluide autour de cette bulle, nous pourrions donc considérer les différents régimes d'écoulement dans notre cas. Ceux-ci sont donc définis à partir du nombre de Reynolds comme suit [2] :

- **Régime laminaire** : $R_e < 1$
- **Régime transitoire** : $30 < R_e < 800$
- **Régime turbulent** : $2000 < R_e$

les intervalles de définitions de ces régimes peuvent varier selon les hypothèses effectuées et les sources, mais nous utiliserons ces derniers dans la suite de nos considérations. Une fois ce coefficient défini, nous pouvons donc nous pencher sur l'expression de la première des deux principales forces qui vont rentrer en compte dans la trajectoire de notre bulle d'air : le frottement fluide.

2.2 Frottement fluide

Ainsi, selon le régime d'écoulement, on va définir une expression, ou à minima une loi de proportionnalité, pour cette force. Nous la noterons F_D pour drag force en anglais. La force de frottement sera donc la force qui agira contre la remontée de nos bulles d'air vers la surface, s'appliquant dans le sens opposé à leur trajectoire. Celle-ci est donc égale ou proportionnelle à, dans le cas d'une sphère présente dans l'écoulement [2] :

- **Régime laminaire** : $F_D = 3\pi\mu Dv$
- **Régime transitoire** : $F_D \propto \mu^{0.5} R^2 \pi^{-0.5} v^{1.5}$
- **Régime turbulent** : $F_D \propto \frac{1}{2}\rho v^2 C_x S$

avec D le diamètre de l'écoulement, C_x un coefficient de traînée, R le rayon et S l'aire qu'offre la sphère à l'écoulement. Plusieurs choses sont donc à relever ici. Dans un premier temps on observe dans les régimes laminaires et transitoires, l'intervention de la viscosité du fluide dans l'expression nous assure que les deux vont varier ensemble, linéairement dans un premier temps puis de manière quadratique. Ensuite, on observe que dans un régime turbulent le terme de viscosité devient négligeable, cependant comme nous venons de le voir le nombre de Reynolds augmente comme l'inverse de la viscosité des milieux. Ainsi, plus le liquide que l'on étudie est visqueux, plus on se rapproche d'un écoulement laminaire à vitesse égale, et

on augmente donc l'impact de la viscosité sur le terme de frottement. Nous pouvons donc formuler l'hypothèse que pour des vitesses assez faibles, donc pour des régimes non turbulent, la vitesse de remontée d'une bulle d'air va augmenter avec la diminution de la viscosité, le frottement fluide ayant moins d'impact sur sa trajectoire. Maintenant, la seconde principale force qu'il faudra prendre en compte pour interpréter la trajectoire de nos bulles est la poussée d'archimède, que nous allons nous proposer de définir.

2.3 Poussée d'archimède

Cette force, qui est donc la seconde la plus importante à prendre en compte pour une bulle d'air qui remonte à la surface d'un liquide, agit elle dans le même sens que celui de la trajectoire de nos bulles, et assure qu'elles remontent à la surface. Son expression est la suivante :

$$P_a = \rho V g$$

avec V le volume du corps immergé. Nous observons directement que celle-ci varie linéairement avec le volume de nos bulles, donc comme le cube de leur diamètre. Pour des conditions expérimentales similaires, nous nous attendons donc à observer des vitesses de bulles d'air qui augmente avec leur taille, étant donné donc que cette force agit dans le sens de leur remontée. Un dernier concept qu'il est important de considérer, maintenant que nous parlons du volume de nos bulles, est celui de volume équivalent.

2.4 Volume équivalent

Les forces que nous venons de mentionner, ainsi que la structure d'une bulle d'air, indiquent donc que selon sa taille une bulle d'air sera sujette à des déformations pendant sa trajectoire dans un liquide. Dans notre cas, étant donné que nos bulles remonteront à la surface perpendiculairement à l'interface de l'eau, on s'attend à observer un "écrasement" vertical de nos bulles. Cela aura un impact sur la mesure de leur diamètre, il est donc important de considérer pour interpréter les précédentes équations une bulle d'un volume équivalent à celui que l'on observe pendant la mesure :

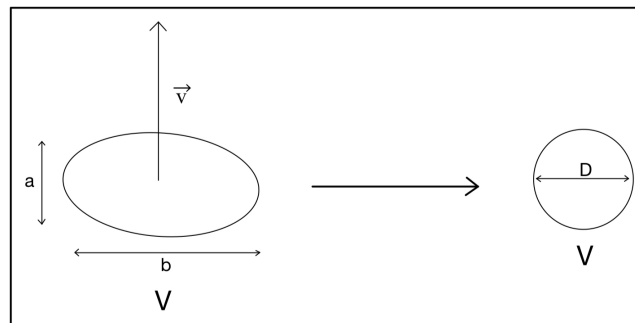


FIGURE 3 – Concept de volume équivalent d'une bulle

cette bulle d'un volume équivalent aura donc une géométrie parfaitement sphérique, comme on l'a supposé lorsque l'on a exprimé les forces de frottements fluides. Maintenant que nous avons introduit ces notions importantes, nous allons pouvoir passer à une rapide présentation du matériel que nous allons utiliser pendant nos mesures.

3 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 Panamétrics – Olympus de différentes fréquences (2.25MHz, 5MHz)
2. Générateur d'impulsions électriques Panamétrics – 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 réfléchiée par la sonde elle-même ou par les parois du récipients pour revenir de plus en plus tard à la sonde, mais l'amplitude de ces réflexions sera rapidement diminuée et nous pourrions 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 volumiques. 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.

4 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.

4.1 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 :

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

On obtient le facteur 2 lorsque l'on prend en compte que chaque onde détectée, étant donné que l'on utilise des transducteurs en réflexion, a parcouru une première fois la distance la séparant de l'interface qui l'a réfléchiée, puis une seconde fois avant de revenir à notre sonde, il faudra donc garder ce facteur en tête lorsque l'on reliera des écarts temporels à des distances sur nos échogrammes.

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.

4.2 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 donnée par QtiPlot. Nous obtenons donc les valeurs suivantes pour l'eau pure :

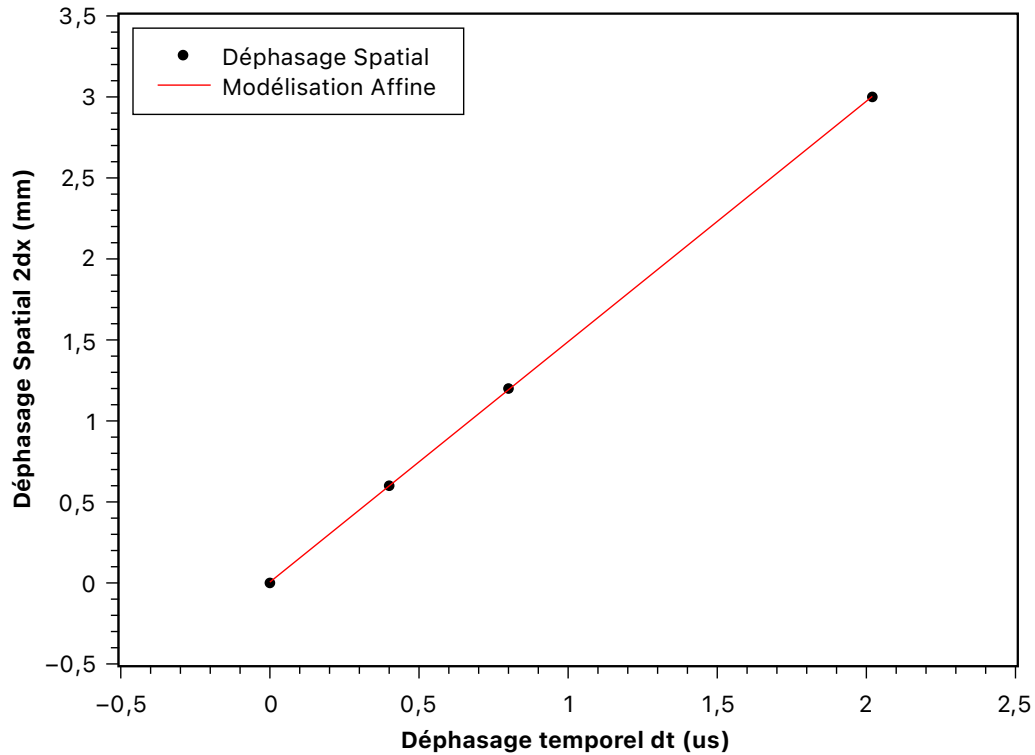


FIGURE 4 – Retard spatial de l'écho en fonction de son retard temporel (eau pure)

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 :

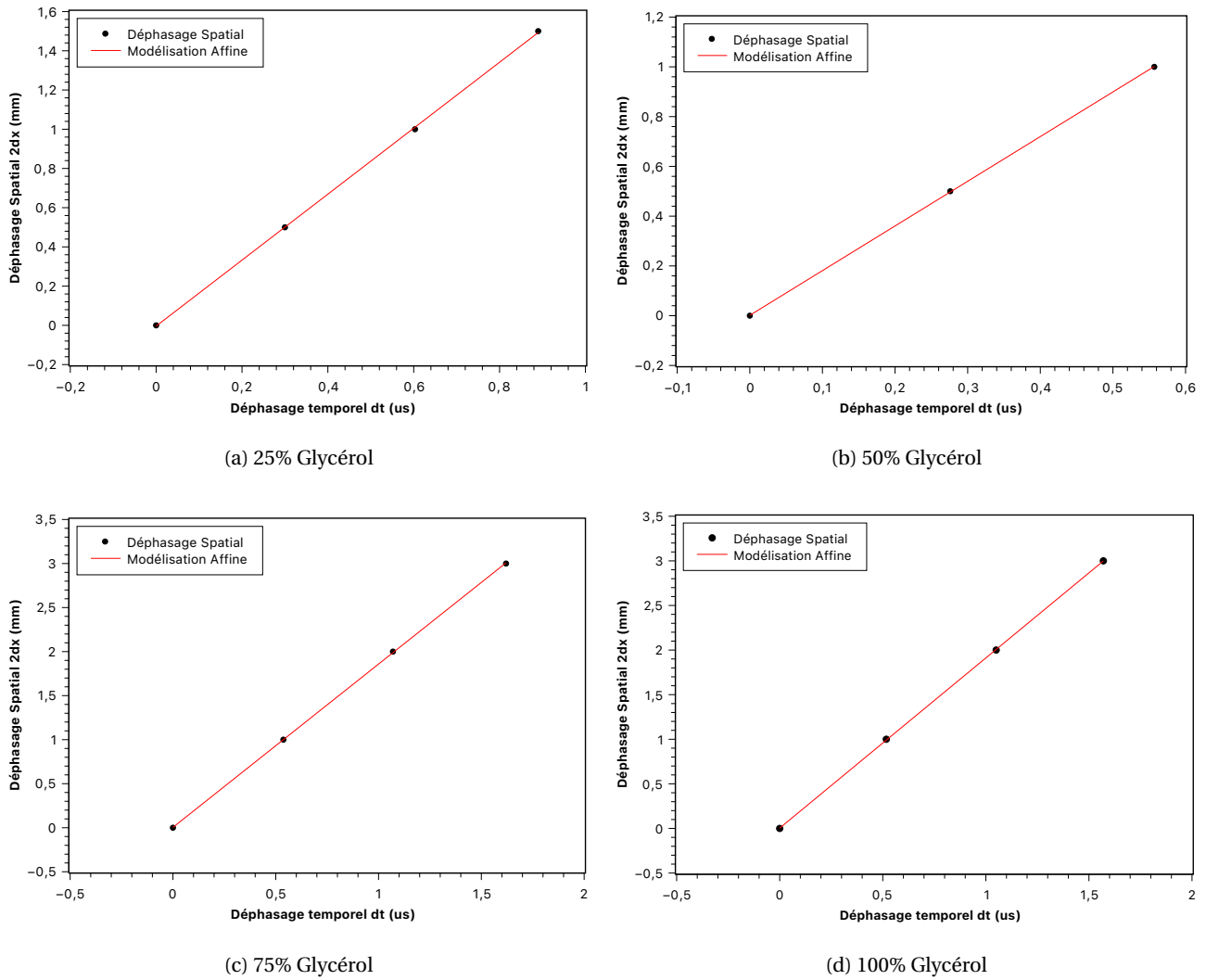


FIGURE 5 – Résultat expérimentaux pour le reste des mélanges eau-glycérol

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 célérité des ultrasons dans l'eau est souvent évaluée entre 1480 et 1500 $m.s^{-1}$ dans la littérature, notre résultat semble donc tout à fait pertinent. Pour ce qui est du glycérol pur, cette étude portant sur les propriétés mécaniques du glycérol [3] a mesuré une vitesse des ultrasons de 1906 $m.s^{-1}$ à température ambiante, nous retrouvons donc le même résultat. Pour ce qui est des mélanges, il est plus difficile de trouver une source fiable ou une expression théorique qui nous permettrait de vérifier nos résultats. Commençons par observer ces derniers sur un graphe pour essayer d'en déduire la tendance :

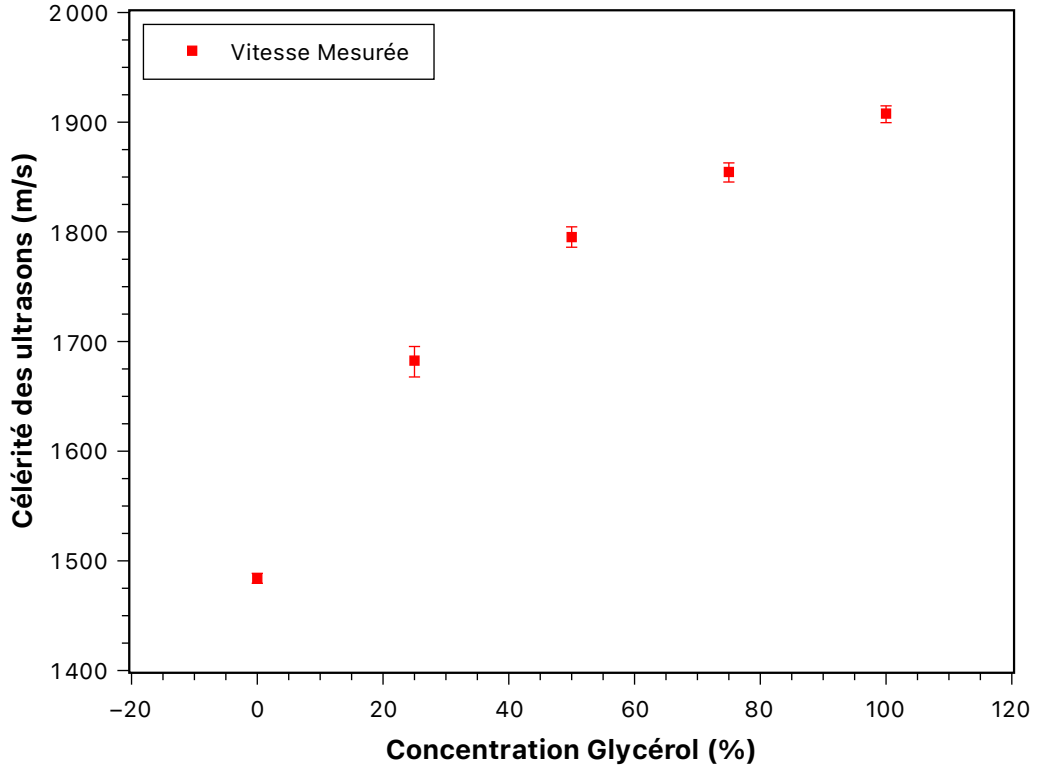


FIGURE 6 – Vitesse des ultrasons dans le mélange eau-glycérol en fonction de la concentration en glycérol

Commençons par relever que, étant-donné la précision avec laquelle nous avons réussi à trouver nos valeurs pour les deux liquides purs, nous allons tenter d'analyser nos résultats en considérant qu'aucune erreur expérimentale majeure n'a été réalisée. En effet, l'eau et le glycérol étant miscibles, nous avons utilisé un agitateur magnétique pour nous assurer de l'homogénéité des mélanges. Ensuite, il semble évident sur le graphe ci-dessus que la célérité des ultrasons n'est pas linéaire avec la concentration en glycérol, une tentative d'estimation par une simple moyenne serait donc très infructueuse. Nous avons tout de même tenté d'établir une expression théorique, et pour cela nous avons utilisé l'équation de Wood, une formule apparaissant de manière récurrente dans la littérature scientifique, notamment dans ce papier [4], lorsqu'il est question de la célérité du son dans des mélanges de liquides aux propriétés connues. Celle-ci considère que dans ce cas, on peut approximer la célérité des ultrasons dans le mélange comme :

$$c_{mélange} = \sqrt{\frac{1}{\rho_{mélange} \left(\frac{\alpha_{eau}}{\rho_{eau} c_{eau}^2} + \frac{\alpha_{gly}}{\rho_{gly} c_{gly}^2} \right)}}$$

Avec α_{eau} et α_{gly} les fractions respectives des liquides dans un mélange donné. Tentons de superposer ce modèle à nos valeurs :

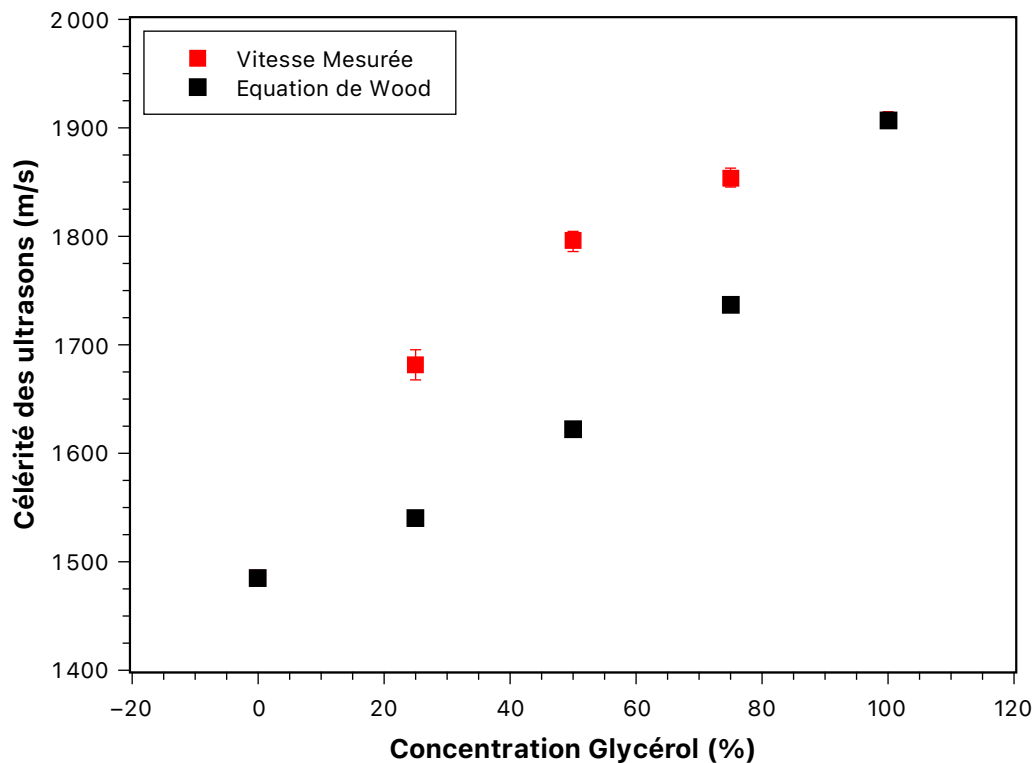


FIGURE 7 – Vitesse des ultrasons dans les mélanges eau-glycérol, valeurs expérimentales et loi de Wood

Apparaît immédiatement ici un écart considérable entre cette loi et nos valeurs expérimentales. Si l'on exclue donc l'homogénéité et la préparation expérimentale des mélanges comme source d'erreur, nous pouvons conclure que ce modèle ne semble absolument pas exploitable dans notre cas. Cela provient très sûrement de l'hypothèse majeure utilisée pour établir cette loi : la non-miscibilité des liquides, or les molécules de glycérol, dans un mélange avec l'eau, vont pouvoir former des liaisons hydrogènes, et cela assure donc la miscibilité. N'ayant pas de moyen de vérifier la pertinence de nos valeurs, nous les utiliserons tout de même dans la suite de nos mesures, au risque que cela soit une source d'erreur qui se propagerait, par manque de mieux. Maintenant que nous avons obtenus ces vitesses et discuté de leur validité, nous sommes capables de relier des écarts temporels sur nos échogrammes à des écarts de distance et ainsi mesurer des vitesses de remontée de bulles d'air, passons donc à la présentation des protocoles que nous utiliserons.

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

5.1 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 :

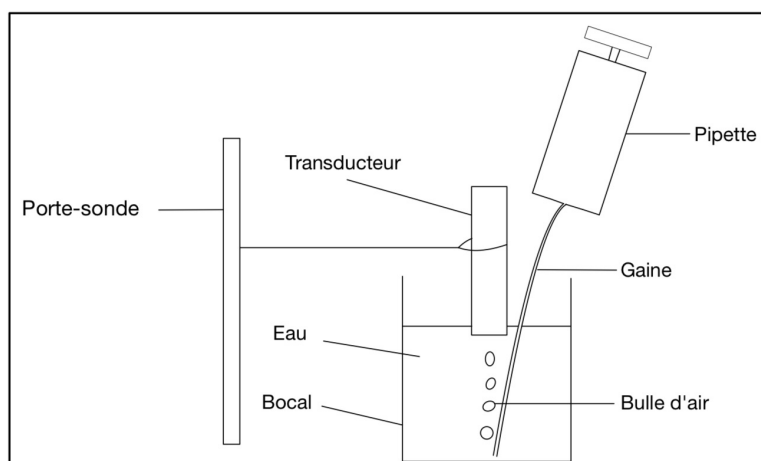


FIGURE 8 – Montage utilisé pour vérifier la faisabilité de la détection de bulles d’air dans les liquides

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 :

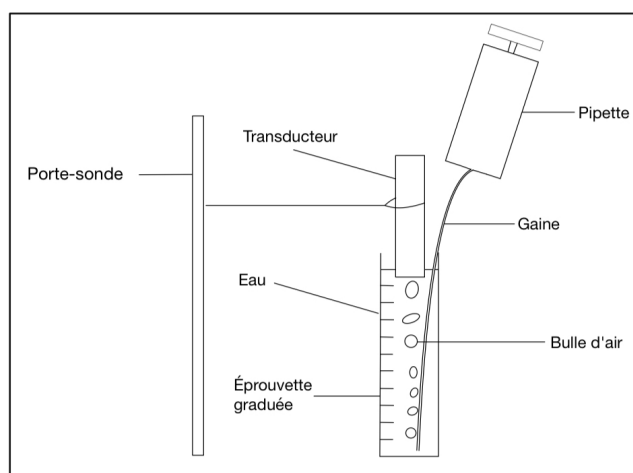


FIGURE 9 – Montage utilisé pour améliorer la précision des valeurs mesurées de vitesse

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. Il est ici important de relever qu'une erreur importante a été commise pendant cette mesure. En effet, comme nous en parlions en Partie 2.4, il est important de prendre en compte la déformation de la bulle durant sa trajectoire. Cependant, comme notre éprouvette possédait des graduations verticales, nous n'avons pas pu estimer la largeur des bulles déformées, les diamètres que nous avons donc mesurés correspondent à la longueur a sur la Figure 3, et le volume équivalent que l'on considère donc sera différent du volume réel de la bulle, sous-évalué, ce qui aura un léger impact sur nos mesures.

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 :

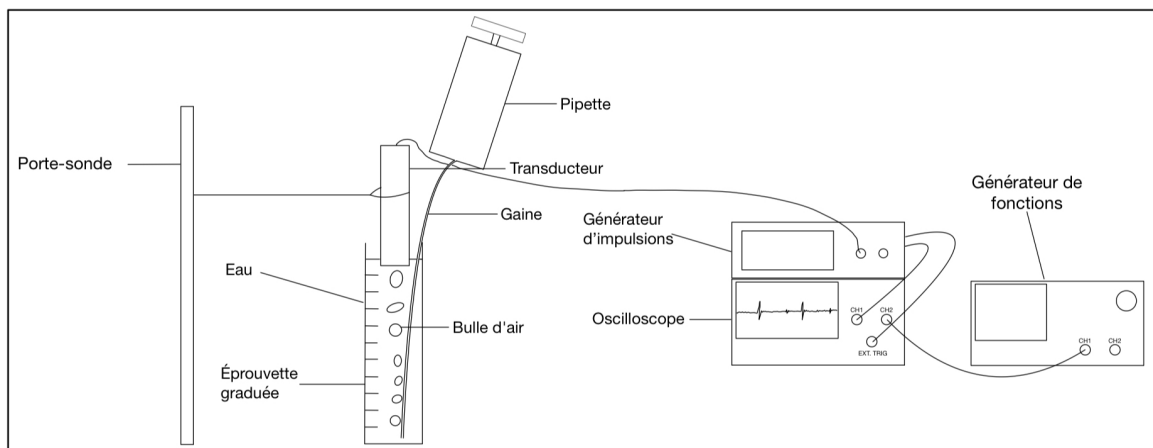


FIGURE 10 – Montage complet utilisé pour mesurer la vitesse de remontée des bulles d'air

Nous allons maintenant détailler plus clairement comment nous utiliserons cette rampe pour retrouver l'échelle temporelle, et plus globalement comment nous avons exploité les valeurs obtenues pendant nos mesures.

5.2 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 acquisitions 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 calcule le temps écoulé entre chaque acquisition grâce à son intensité en une acquisition donnée et la fréquence connue de cette rampe. Cette dernière fonction nous fournit donc un écart temporel entre deux graphes qui correspondent à deux positions successives de la bulle. Ces

positions, elles, sont retrouvées grâce à un curseur qui permet de parcourir les données brutes de chaque graphes affichés. La connaissance du nombre de données ainsi que de la durée d'acquisition, présente dans l'en-tête de chaque fichier *.csv* d'un acquisition OpenWave, nous permet de reconstituer l'écart temporel entre chaque valeurs brute d'un même tracé. Nous pouvons ensuite, grâce à la connaissance de la célérité des ultrasons dans le mélange étudié, retrouver l'écart spatial entre chaque valeur brute et ainsi identifier les position spatiales réelles successives des bulles. Nous obtenons donc finalement leur vitesse. Voici une capture d'écran de l'allure des données brutes d'un échogramme pendant le passage d'une bulle visualisé à l'aide de ce code :

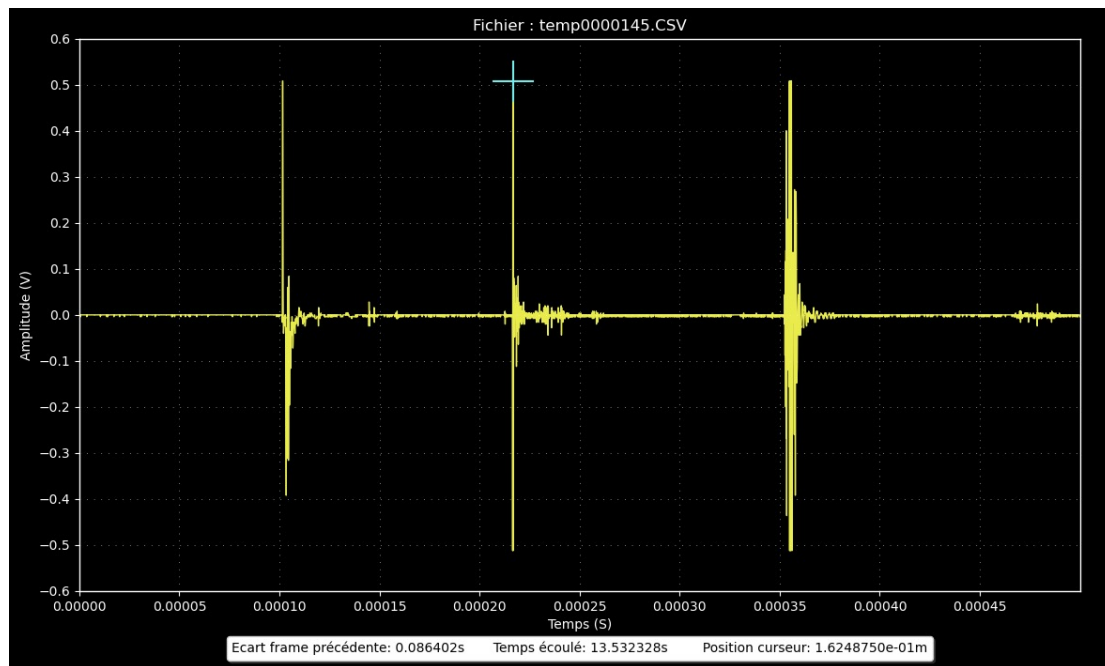


FIGURE 11 – Capture d'écran d'une visualisation d'échogramme à l'aide du code Python, AnimPlot

Apparaît donc sur cette capture comme nous le disions, le nom du fichier actuellement affiché, afin d'en parcourir les données brutes si nécessaire, l'écart de temps avec la frame précédente, ainsi que la position spatiale du curseur calculée à partir de la célérité des ultrasons dans le milieu de mesure. Le déplacement des frames, du curseur ainsi que la lecture se font à l'aide des touches du clavier. Les unités ainsi que les échelles sont reconstituées à partir des données contenues dans l'en-tête des fichiers encore une fois, et adaptées pour reproduire l'allure originale de l'oscilloscope.

Enfin, pour pouvoir relier la taille de chaque bulle avec leur allure sur la trace, nous avons encore une fois synchronisé une vidéo du passage des bulles et de la trace correspondante sur l'oscilloscope. Le code python, en plus de nous fournir l'écart temporel entre les frames, affiche le temps écoulé depuis le début de l'acquisition. Une fois les tailles des bulles mesurées donc, nous pouvons relier leur time-code sur la vidéo à celui des données brutes avec le code, et ainsi relier la vitesse des bulles à leur taille, 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](#) avec les vidéos des acquisitions.

5.3 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} [5], ce protocole nous permet donc de vérifier qu’avec un tel 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 :

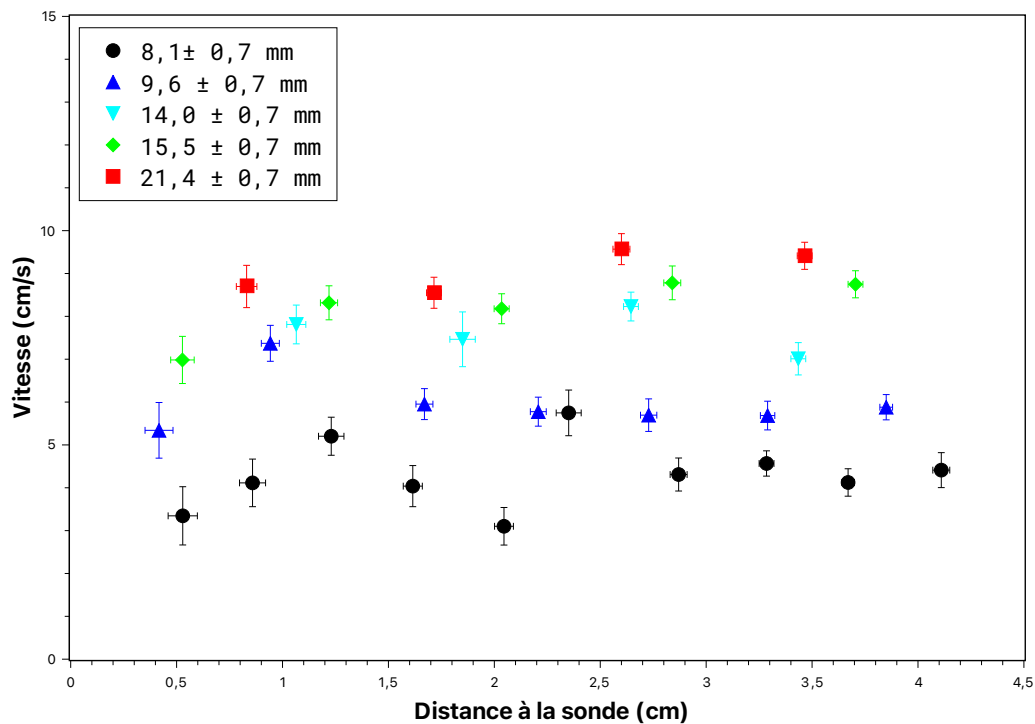


FIGURE 12 – Vitesse de remontée des bulles de différentes tailles en fonction de leur position sur leur trajectoire, glycérol pur

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 :

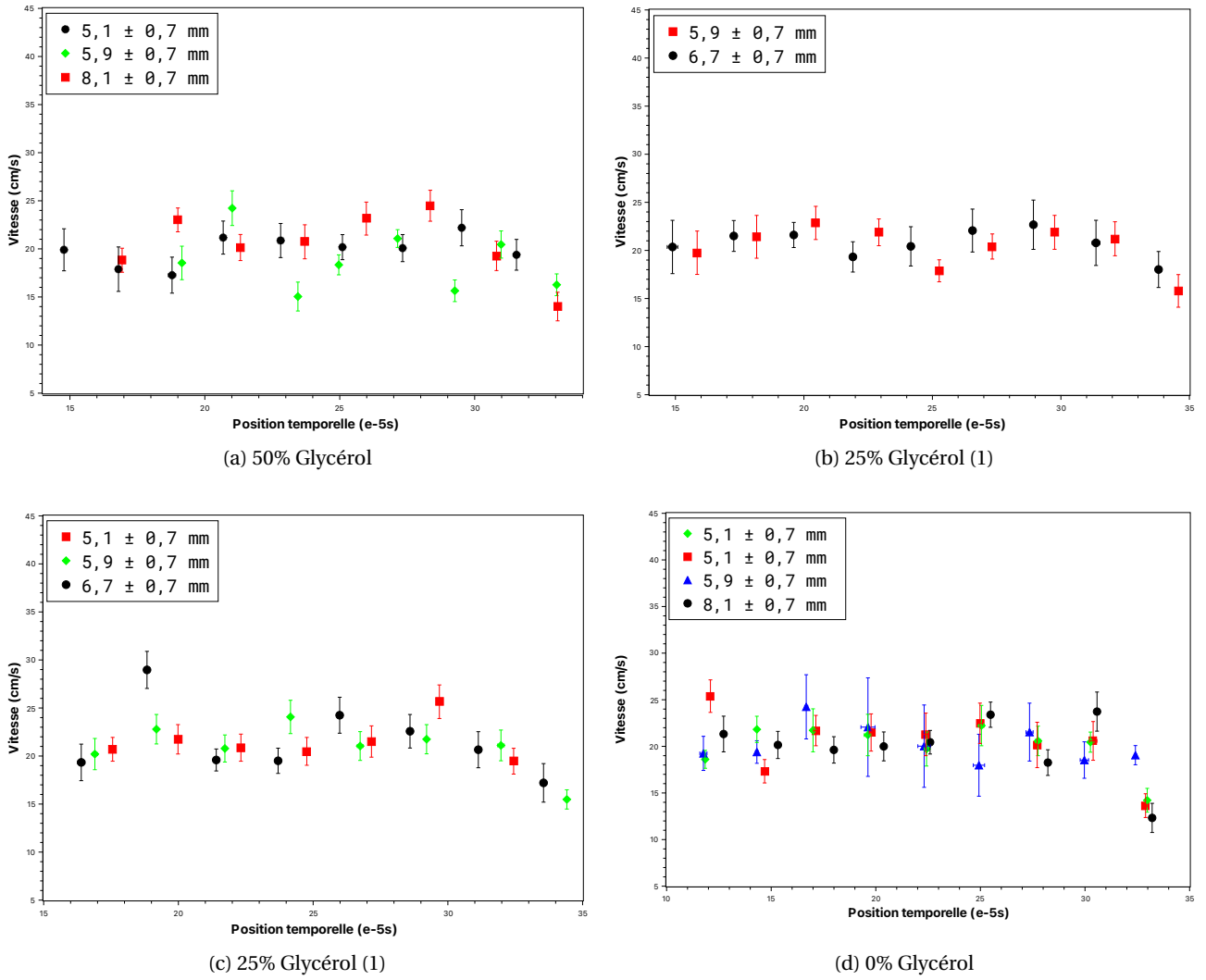


FIGURE 13 – Vitesse de remontée des bulles d'air en fonction de leur position sur leur trajectoire

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 viscosité, mais il n'y a pas de séparation claire entre les différentes viscosités des mélanges. 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 viscosité, 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 le 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 :

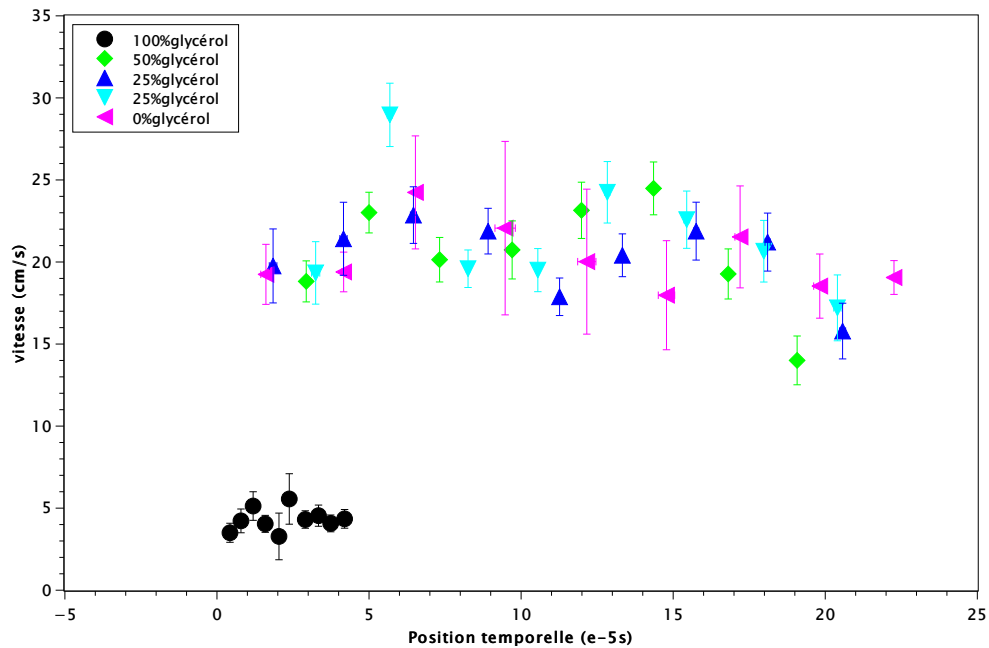
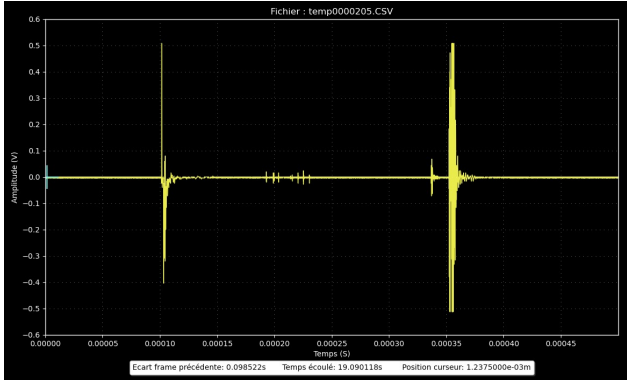


FIGURE 14 – Vitesses mesurées expérimentalement pour des bulles de taille similaire, avec des concentrations en glycérol différentes

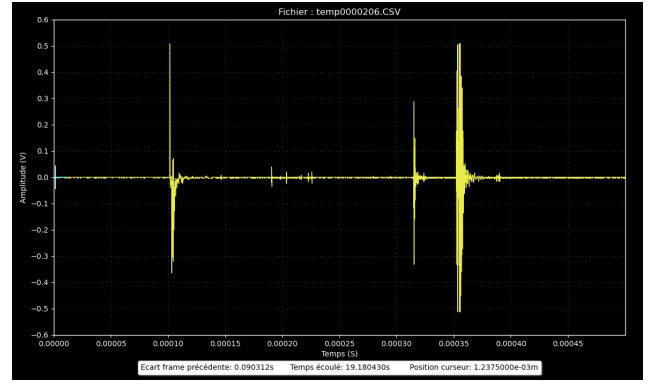
Se confirme donc ici l'absence de tendance claire pour la vitesse d'une bulle de même taille dans différents mélange, malgré une séparation claire entre le glycérol pur et les autres mélanges. Il apparaît également que les vitesses dans le glycérol pur n'ont pas été mesurées sur le même intervalle de temps pendant leur trajectoire par rapport aux autres mélanges. Cela s'explique par une forte atténuation des ultrasons dans le glycérol pur, nous ne pouvions ainsi détecter les échos à la surface des bulles que lorsque celles-ci étaient très proches de notre sonde, ainsi seul la fin de leur trajectoire a pu être évaluée.

Pour revenir à l'absence claire de tendance entre la vitesse des bulles et la concentration en glycérol, 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 position, nous avons donc dû en prendre une valeur assez large pour être sûr de ne pas le couper. Un autre facteur à prendre en compte est encore une fois l'homogénéité de nos mélanges, en effet nous en parlions précédemment pour son impact sur la célérité des ultrasons dans les milieux, mais elle aura également un impact sur la vitesse des bulles d'air. Nous reviendrons plus tard plus en détails sur les interprétations que nous pouvons tirer de ce résultat, et allons maintenant discuter d'un dernier élément que nous avons pu évaluer qualitativement lors de nos mesures : la trajectoire des bulles d'air.

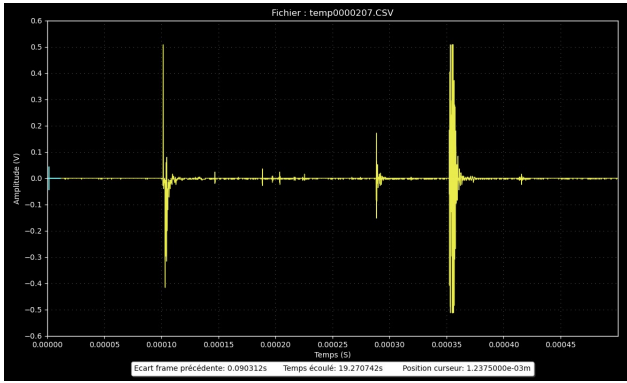
Nous avons en effet constaté, particulièrement dans l'eau, que les bulles d'airs ne suivaient plus une trajectoire rectiligne lorsqu'elles remontent à la surface [Vidéo], notamment contrairement à leur remontée dans le glycérol pur [Vidéo]. En effet, nous pouvons également observer cela sur l'échogramme obtenu pendant leur trajectoire :



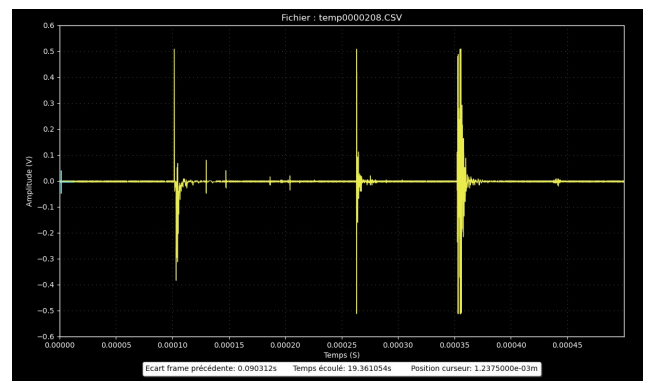
(a) Position 1



(b) Position 2



(c) Position 3



(d) Position 4

FIGURE 15 – Allures successives de l'échogramme d'une bulle d'air remontant dans l'eau

Nous observons ainsi que contrairement au glycérol pur, la réflexion à l'interface de la bulle d'air semble avoir une intensité oscillante. Cela s'explique donc effectivement par une trajectoire non linéaire de la bulle. Au-delà d'un diamètre de 1.8 mm , une bulle d'air dans l'eau va se mettre à remonter en suivant une trajectoire d'ellipse [6], ainsi selon la position de la bulle et la résolution horizontale de notre sonde, celle-ci réfléchira une portion moins importante des ultrasons envoyés par le transducteurs, résultant en une intensité qui oscille étant donné la trajectoire d'hélice, qui suggère une périodicité du phénomène.

6 Discussions sur la cohérence des résultats avec la littérature scientifique

Pour cette dernière partie, nous allons donc tenter de répondre à notre problématique initiale : les résultats obtenus à l'aide de cette méthode de mesure sont-ils cohérents avec ceux obtenus par d'autres moyens dans la littérature ainsi qu'avec ces hypothèses que nous avons formulé en Partie 2 ? Commençons par discuter des vitesses mesurées dans de l'eau "pure". Dans le livre *Bubbles, Drops and Particles*, qui se propose d'établir une liste exhaustive des connaissances sur la physique des bulles et des particules en déplacement dans un liquide [5], on trouve le graphe obtenu à partir de la mesure expérimentale de la vitesse de remontée de bulles de différentes tailles, dans de l'eau pure, à température ambiante :

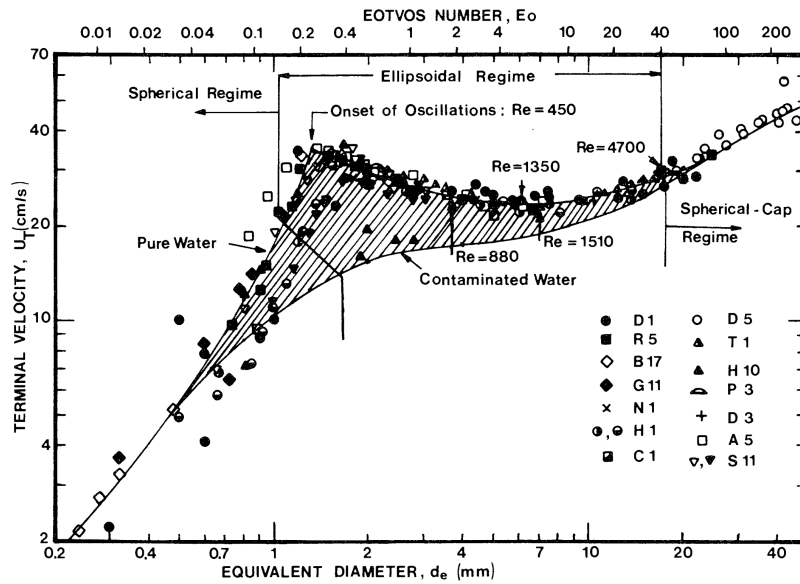


FIGURE 16 – Célérité des bulles d'air dans l'eau à 20 °

Ce graphe nous permet de comprendre pourquoi en Figure 13d, nous n'obtenions pas de tendance claire entre les différentes tailles de nos bulles et leur vitesse. En effet, l'intervalle de taille couvert par nos valeurs correspond à la zone suivante :

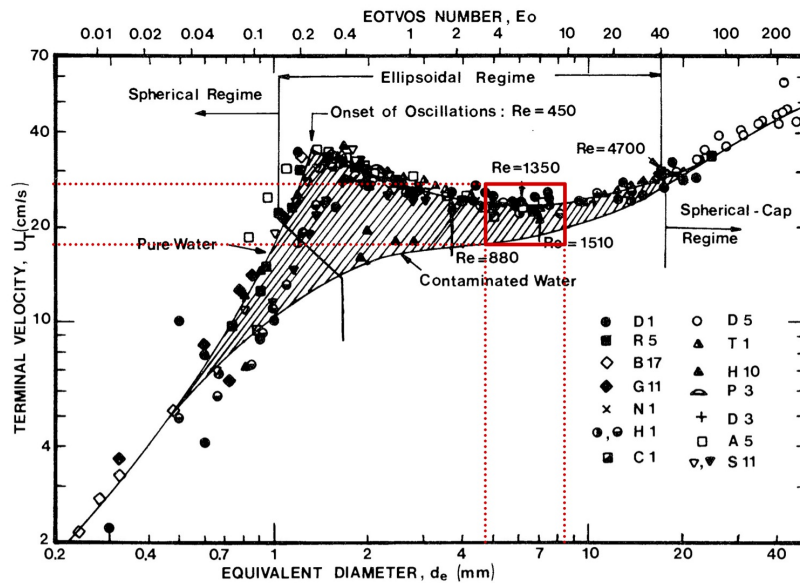


FIGURE 17 – Zone couverte par nos valeurs expérimentales

Nous pouvons observer que le régime couvert par cet intervalle de taille des bulles d'air correspond à des vitesses relativement constantes. Le facteur qu'il devient important de prendre en compte comme on peut ici l'observer est la "pureté" de notre eau. En effet, entre de l'eau distillée et de l'eau du robinet, on obtient comme on l'observe des vitesses différentes dans le régime qui nous concerne, et n'ayant pas pris en compte cela durant nos mesures, le facteur principal de différences entre les vitesses de nos différentes bulles est sûrement celui-ci. En effet, comme discuté dans ce papier de 1922 [7], dans une eau impure, la taille des bulles influe sur leur capacité à entraîner des minéraux présents dans l'eau, et cela modifie ainsi leur vitesse limite. Ces résultats nous indiquent donc que l'absence claire de corrélation entre vitesse des bulles et taille dans notre cas provient d'un choix trop peu varié de tailles de bulles. Notre protocole expérimental

pour générer ces dernières consistant à souffler de l'air dans une gaine souple avec une pipette était en effet trop peu fiable, et le seul réel moyen d'influer sur la taille des bulles était la force que nous utilisions pour actionner la pipette, un paramètre beaucoup trop aléatoire pour nous permettre de choisir les tailles individuellement. Nous avons essayé d'utiliser des gaines de différents diamètres pendant nos mesures pour faire varier la taille des bulles, mais encore une fois ces diamètres ne différaient pas assez pour permettre un résultat concluant. Un protocole plus fiable pour la création de bulle aurait donc été nécessaire pour observer une tendance similaire à celle obtenue dans le glycérol pur dans l'eau, en prenant des tailles beaucoup plus variées.

Regardons maintenant nos résultats pour le glycérol pur, que nous avons obtenus en figure 12. Une étude portant sur le comportement du champ de vitesses de liquides visqueux au passage de bulles d'air en a mesuré la vitesse de remontée pour différentes tailles [8], ces résultats sont référencés ci-dessous :

Solution	N° figure	Volume $\times 10^{-9} \text{ [m}^3\text{]}$	Vitesse $[\text{m/s}]$	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

FIGURE 18 – 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. Cependant, cette source ne précisant que très peu la méthode utilisée pour mesurer la vitesse de la bulle, la position de cette vitesse sur sa trajectoire, ainsi que les incertitudes sur cette mesure nous permettent tout de même de relever la proximité de notre résultat avec ceux obtenus dans ce rapport.

Pour finir nos interprétations, nous allons tenter de comprendre pourquoi en Figure 14, les vitesses des bulles d'air dans les mélanges étaient toutes comparables, quelque soit la concentration de glycérol, à celles dans de l'eau "pure". En effet, cela s'explique simplement par la viscosité du mélange eau-glycérol. Commençons par visualiser un graphe de la viscosité du mélange en fonction de la concentration en glycérol, sur lequel nous avons précisé les valeurs qui correspondent aux mélanges que nous avons choisis :

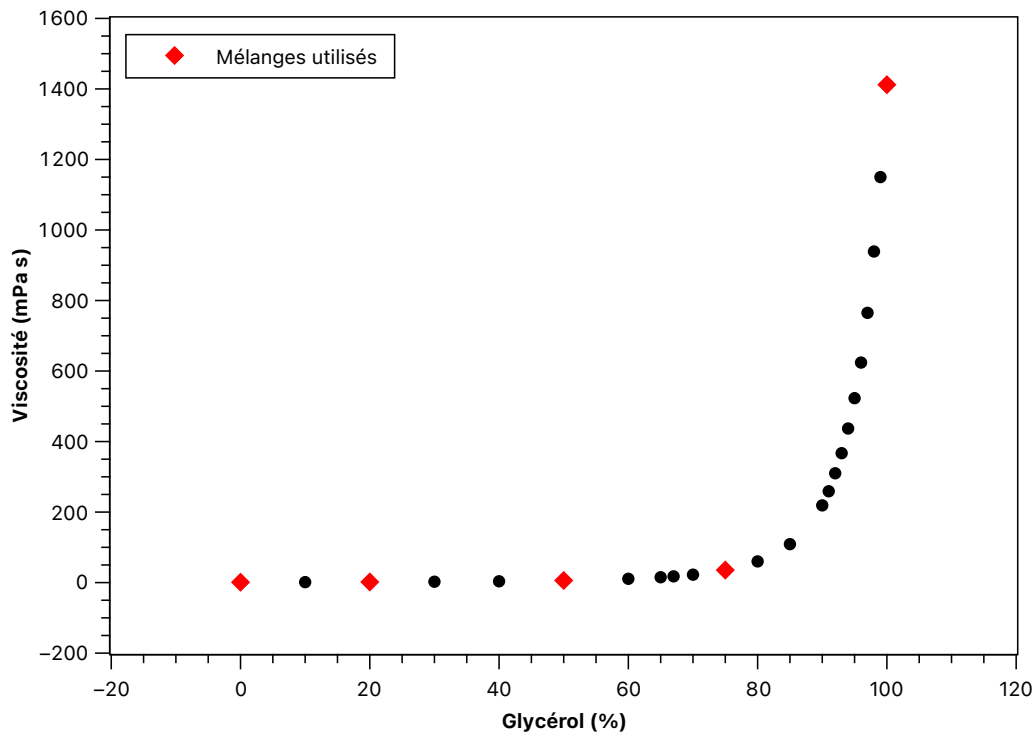


FIGURE 19 – Viscosité du mélange eau-glycérol en fonction de la concentration en glycérol

N'ayant pas pu nous-même mesurer cette viscosité, les valeurs de ce graphes ont été obtenues à partir de celles présentées sur ce papier [9]. Nous observons ici clairement la vitesse à laquelle la viscosité s'effondre en dessous de 80% de glycérol, or tous nos mélanges ont été réalisés en dessous de cette valeur de concentration. Nous avons donc obtenus des mélanges aux propriétés visqueuses quasi-identiques, et les vitesses se sont retrouvées être trop similaires. Pour obtenir une répartition plus homogène des vitesses en fonction de la concentration, nous aurions dû choisir plus judicieusement la concentration de nos mélanges, avec des concentrations entre 80% et 100% de glycérol.

Avec la configuratoin actuelle et comme nous l'avons vu au début de notre rapport, la faible viscosité de nos mélanges impliquent un nombre de Reynolds beaucoup plus grand que du glycérol pur à paramètres équivalents, ainsi le régime turbulent est atteint beaucoup plus rapidement et le terme de viscosité n'intervient plus dans les forces de frottements comme nous l'avons vu, ainsi les bulles remontant à la surface de nos mélanges sont soumises à des forces très similaires.

7 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 viscosité du milieu, même si une séparation claire apparaissait entre le glycérol pur et ses mélanges avec l'eau, et cela s'explique par un mauvais choix de concentrations de glycérol dans nos mélanges. Les sources d'erreurs évidentes ont donc été l'homogénéité des mélanges, et la mesure de la vitesse des ultrasons dans ces mélanges, dont nous n'avons pas pu vérifier la cohérence. 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 avec leur taille, 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 en utilisant des transducteur ultrasonores en immersion, et ce en obtenant des valeurs tout à fait cohérentes avec la littérature scientifique.

Références

- [1] **Ultrasound**. In : **Wikipedia**. Page Version ID: 1264201214. 21 déc. 2024. URL : <https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Ultrasound&oldid=1264201214> (visité le 07/04/2025).
- [2] Bernard CASTAING et Hervé GAYVALLET. **Forces de frottement sur un objet en mouvement dans un fluide**. 10 avr. 2003. URL : <https://culturesciencesphysique.ens-lyon.fr/MecaFlu.xml> (visité le 14/04/2025).
- [3] J. SANTOS et al. "Evaluation of glycerol properties by measuring the speed of sound". In : 2023, p. 4-5. URL : <https://www.semanticscholar.org/paper/Evaluation-of-glycerol-properties-by-measuring-the-Santos-Ferreira/f2961a42f674b32044731ffadef7b072b7c0dcc7> (visité le 07/04/2025).
- [4] Saad BENJELLOUN et Jean-Michel GHIDAGLIA. "On the sound speed in two-fluid mixtures and the implications for CFD model validation". In : **European Journal of Mechanics - B/Fluids** 90 (1^{er} nov. 2021), p. 152-168. ISSN : 0997-7546. DOI : [10.1016/j.euromechflu.2021.09.002](https://doi.org/10.1016/j.euromechflu.2021.09.002). URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0997754621001370> (visité le 13/04/2025).
- [5] Roland CLIFT, J.R. GRACE et M.E. WEBER. **Bubbles, drops, and particles**. Academic Press. 1978.
- [6] Paul BONNEFIS, David FABRE et Jacques MAGNAUDET. "When, how, and why the path of an air bubble rising in pure water becomes unstable". In : **Proceedings of the National Academy of Sciences** 120.11 (14 mars 2023). Publisher: Proceedings of the National Academy of Sciences, e2300897120. DOI : [10.1073/pnas.2300897120](https://doi.org/10.1073/pnas.2300897120). URL : <https://www.pnas.org/doi/10.1073/pnas.2300897120> (visité le 13/04/2025).
- [7] A. M. GAUDIN. **Flotation**. McGraw-Hill Book Company, 1922. 103-104. URL : <http://archive.org/details/in.ernet.dli.2015.150362> (visité le 13/04/2025).
- [8] Denis FUNFSCHILLING. "Dynamique de bulles dans des fluides rhéologiquement complexes". Thèse de doct. Institut National Polytechnique de Lorraine, 30 sept. 1999. URL : <https://hal.univ-lorraine.fr/tel-01749911> (visité le 07/04/2025).
- [9] J. B. SEGUR et Helen E. OBERSTAR. "Viscosity of Glycerol and Its Aqueous Solutions". In : **Industrial & Engineering Chemistry** 43.9 (1^{er} sept. 1951). Publisher: American Chemical Society, p. 2117-2120. ISSN : 0019-7866. DOI : [10.1021/ie50501a040](https://doi.org/10.1021/ie50501a040). URL : <https://doi.org/10.1021/ie50501a040> (visité le 13/04/2025).

A Annexes

Lien contenant toutes les traces, les liens vidéos, ainsi que le code et son code source : [GitHub](#)

Table des figures

1	Exemple d'un échogramme visualisé à l'oscilloscope pour une sonde dans un bocal en verre rempli d'eau	4
2	Schéma du montage simple correspondant à l'échogramme de la Figure 1	5
3	Concept de volume équivalent d'une bulle	7
4	Retard spatial de l'écho en fonction de son retard temporel (eau pure)	9
5	Résultat expérimentaux pour le reste des mélanges eau-glycérol	10
6	Vitesse des ultrasons dans le mélange eau-glycérol en fonction de la concentration en glycérol	11
7	Vitesse des ultrasons dans les mélanges eau-glycérol, valeurs expérimentales et loi de Wood .	12
8	Montage utilisé pour vérifier la faisabilité de la détection de bulles d'air dans les liquides . . .	13
9	Montage utilisé pour améliorer la précision des valeurs mesurées de vitesse	13
10	Montage complet utilisé pour mesurer la vitesse de remontée des bulles d'air	14
11	Capture d'écran d'une visualisation d'échogramme à l'aide du code Python, AnimPlot	15
12	Vitesse de remontée des bulles de différentes tailles en fonction de leur position sur leur trajectoire, glycérol pur	16
13	Vitesse de remontée des bulles d'air en fonction de leur position sur leur trajectoire	17
14	Vitesses mesurées expérimentalement pour des bulles de taille similaire, avec des concentrations en glycérol différentes	18
15	Allures successives de l'échogramme d'une bulle d'air remontant dans l'eau	19
16	Célérité des bulles d'air dans l'eau à 20 °	20
17	Zone couverte par nos valeurs expérimentales	20
18	Caractéristiques des différents champs de vitesse, à température ambiante	21
19	Viscosité du mélange eau-glycérol en fonction de la concentration en glycérol	22

Liste des tableaux

1	Valeurs obtenues expérimentalement pour la célérité des ultrasons dans nos mélanges	10
2	Valeur obtenues pour la vitesse de remontée des bulles d'air, premier protocole	16
3	Valeur obtenues pour la vitesse de remontée des bulles d'air, second protocole	17

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 et de la viscosité du liquide sur cette vitesse. Nous n'avons pas pu observer que la vitesse des bulles dans nos liquides était proportionnelle à la viscosité du liquide, et les diamètres utilisés pour ces mêmes bulles étaient trop proches pour obtenir une relation sur la vitesse. Les concentrations de glycérol dans nos mélanges étaient beaucoup trop faibles pour en observer l'impact sur la répartition des vitesses. 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 thanks to ultrasound. We checked the propagation of ultrasound in each liquid, then we measured the bubbles' speed to determine the link between their diameter, the viscosity of the liquid and the speed. We didn't observe that the bubbles's speed in our liquids were proportional to the liquid's density and the diameter of the bubble. The chosen concentrations of glycerol were way too low to measure its impact on the speed of the bubbles. During our study, we neglected wall effects of our recipients.
