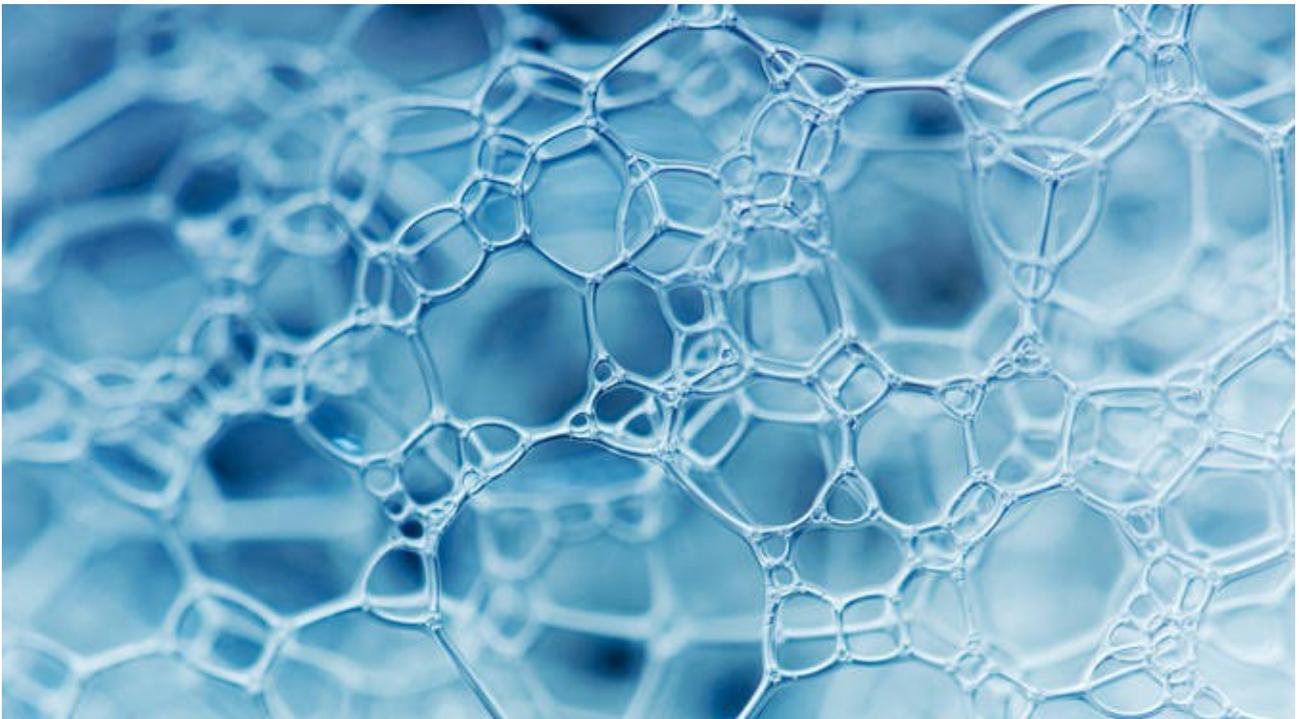


Rapport de Projet Tuteuré
Année 2013-2014
«*Acoustique des mousses liquides*»



Projet réalisé par : *Abir Frikha*
Anissa Hassine

Sous la direction de : *Alexandre COHEN, Christophe RAUFASTE,*
Nathalie FRAYSSE-BALDI
au *LPMC*



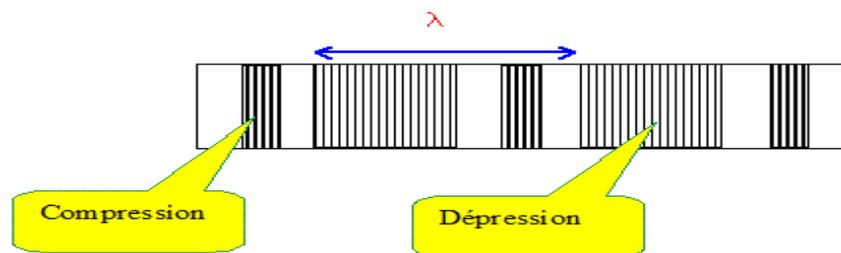
Sommaire

Introduction	3
I-Protocole expérimental.....	6
1-Création du milieu.....	6
2-Montage acoustique.....	7
II-Résultats.....	10
1- Effet des fractions liquides.....	11
2-Effet des tailles des bulles.....	12
III-Discussion.....	13
Conclusion.....	15
Remerciements.....	15
Références.....	15

Introduction

Le sujet de notre projet se porte sur l'acoustique des mousses liquides, qui s'est déroulé au Laboratoire de Physique de la Matière Condensée (LPMC) encadré par : Alexandre COHEN, Christophe RAUFASTE, Nathalie FRAYSSE BALDI.

Étudier l'acoustique nous permettra d'analyser une vibration mécanique qui se propage en déformant le milieu par compression et dépression. Nous parlons dans ce cas de l'onde sonore. Pour se propager, elle a besoin d'un support matériel.



Propagation de l'air par compression et dépression des couches d'air

La vitesse de cette onde est liée à 2 paramètres caractéristiques du milieu où elle se propage: la densité, ρ , et la compressibilité, χ (élasticité du milieu). Plus la densité est grande et plus la vitesse est petite; en effet plus les particules sont lourdes et plus elles auront du mal à se déplacer, le son va donc moins vite. D'autre part, la vitesse diminue avec la compressibilité du milieu; on sait que dans un milieu compressible, les particules sont éloignées les unes des autres, dans ce cas là la distance qu'elles mettent pour heurter leurs voisines est grande (par exemple dans le gaz) donc l'onde ira moins vite.

$$V = \frac{1}{\sqrt{\rho \chi}}$$

La plus part des études acoustiques sont faites dans ce milieu homogène, c'est pour cela nous allons nous intéresser à un milieu hétérogène, mélange d'eau et d'air : la mousse liquide. Effectivement, nous connaissons la vitesse du son dans un milieu homogène comme par exemple dans l'air à environ $340 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ et dans l'eau à $1480 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

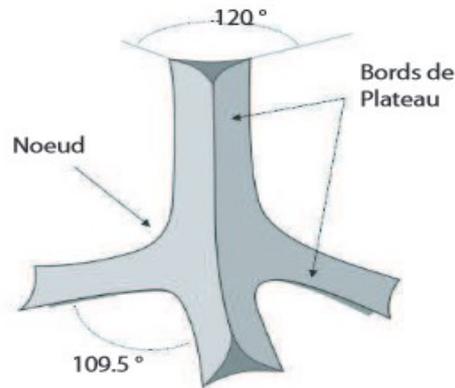
Comment se comportent ces ondes acoustiques dans ce type de milieu diphasique ?

Une mousse est un mélange de liquide et de gaz : le gaz, appelé phase dispersée, qui est sous forme de bulles et le liquide, phase continue, correspondant aux films séparant les bulles. La part liquide constitue une petite partie de la mousse (de $\sim 0,1$ à $0,2\%$) par rapport au gaz (entre 98% et 99%). Lorsque l'on a plusieurs bulles qui entrent en contact, leurs membranes fusionnent et forment un film, de sorte qu'elles s'arrangent suivant une configuration déterminée par Plateau (physicien belge du 19^{ème} siècle).

L'intersection de 3 bulles forme un bord de Plateau (contient le liquide présent dans les mousses) et 4 bords de Plateau forment un vertex (ou un nœud), tout en obéissant aux lois de Plateau (afin de minimiser l'énergie) :

- Les films sont lisses et sont de courbure moyenne constante ;

- 3 surfaces (bord de plateau) se rencontrent avec des angle $2\pi/3$ (120°) et forment une courbe régulière ;
- Les bulles se rejoignent quatre par quatre et prennent alors, au point de rencontre, les quatre directions tétraédriques (angle au sommet $109,6^\circ$).



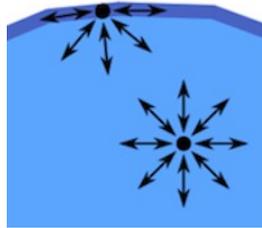
Bord de plateau et vertex (loi de Plateau)

Une bulle est constituée de 2 interfaces, air-eau et eau-air, sous forme de sphère. La création d'une surface entre deux milieux est toujours accompagnée d'une création d'énergie. Pour que le système soit en équilibre, il faut que son énergie soit minimale. Cette énergie est minimale lorsque la bulle a une forme sphérique, dans ce cas le volume d'air, enfermé par le film, a une surface minimale.

Cette énergie de surface est égale à l'aire de la surface multipliée par une quantité appelée tension de surface (ou tension superficielle).

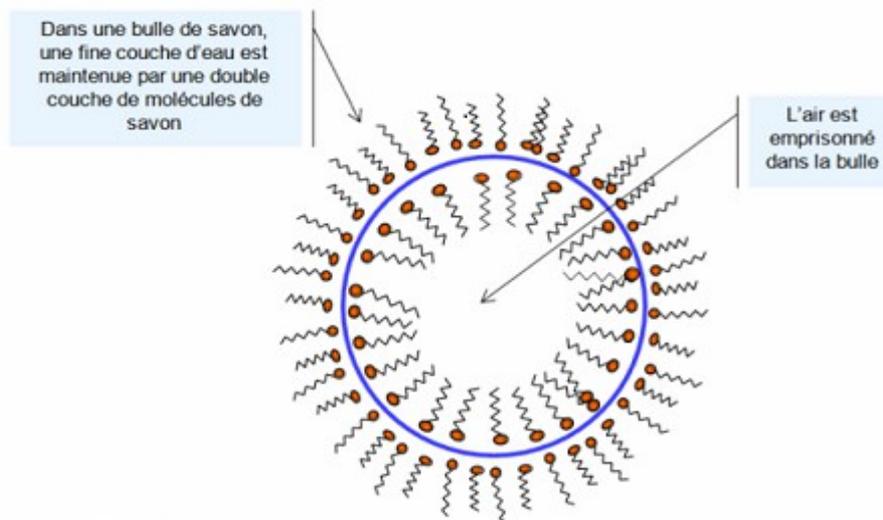
$$E = \gamma S$$

La tension superficielle est une énergie par surface qui existe depuis la création de l'interface. Cette tension est due au fait que les molécules, à la surface, ne sont pas soumises aux mêmes forces de Van der Waals de la part de toutes leurs voisines. En effet, au milieu du liquide, chaque molécule est tirée dans toutes les directions par les molécules voisines de liquide : la résultante des forces est nulle. Alors qu'à la surface du liquide, les molécules sont tirées vers l'intérieur du liquide par les molécules situées sur les côtés et en dessous, mais il n'y a pas de molécules à l'extérieur du liquide pour équilibrer ces forces. La seule force qui s'oppose à cette attraction est la résistance à la compression du liquide.



Différence des attractions moléculaires entre les molécules de la surface et de l'intérieur du liquide entraînant une tension de surface

Pour créer une bulle, on a besoin d'un gaz, d'un liquide et d'un surfactant. Les surfactants sont composés de molécules, tensioactif, qui diminuent la tension de surface. Ces molécules sont constituées de 2 parties : la tête, hydrophile, qui a une affinité avec l'eau et la queue, hydrophobe préférant le contact avec l'air. De cette manière, on a toutes les molécules de tensioactifs qui se lient sur toute la surface de la sphère (toutes les têtes dans l'eau et les queues dans l'air liées ensemble).



Arrangement des tensioactifs autour de la sphère d'une bulle pour diminuer la tension de surface afin de diminuer l'énergie et empêcher l'amincissement du film.

Comme les mousses sont faciles à produire, on peut les utiliser dans différents domaines tel que : extinction d'incendie (propriété d'isolation thermique et d'absorption), insonorisation des pièces à l'aide de mousse solide (elle provient d'une mousse liquide plus ou moins visqueuse obtenue par solidification du liquide), pour le déminage (propriété acoustique d'atténuation du son), diffraction de la lumière ...

L'utilisation des mousses au sein des industries automobiles dans le cadre d'absorption d'énergie lors des crashes et de diminution de l'intensité sonore s'est beaucoup développé ces derniers temps, de même que l'application des mousses en aérospatiale.

I-Protocole expérimentale:

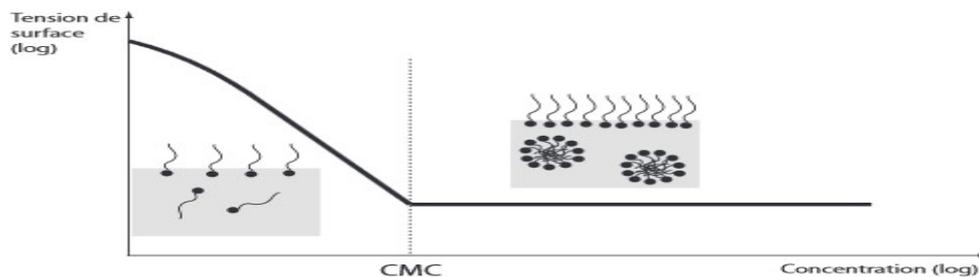
1-Création du milieu :

Tout d'abord, pour notre étude, nous avons besoin d'un milieu diphasique qui est la mousse . Nous pouvons utiliser une mousse industrielle (mousse à raser ,mousse au chocolat...) , mais dans ce cas, nous ne connaissons pas ses caractéristiques (par exemple taille de ses bulles, fraction liquide, qui représente la partie volumique du liquide, ...) et nous ne pouvons pas les contrôler, d'où l'intérêt de créer notre propre mousse.

Pour créer une mousse liquide, nous avons besoin d'un liquide, de gaz et d'un surfactant ; de l'eau distillée, d'air et de liquide vaisselle (Dreft).

L'air sera injecté dans l'eau à l'aide d'un bulleur mais pour que l'air reste piégé par le film d'eau , nous avons besoin des tensioactifs (rôle du liquide vaisselle).

Nous mélangeons une 500mL avec 5mL de liquide vaisselle (quantités qui doivent rester constantes tout au long de notre manipulation). La quantité du surfactant, doit dépasser de peu la Concentration Micellaire Critique (CMC), qui est de 1%. Cette concentration correspond à une quantité de molécules tensioactifs arrangées pour saturer la surface de la bulle; si on la dépasse, les molécules vont rester dans l'eau sans aucune utilité, si on en met moins sans pour autant l'atteindre, les bulles ne seront pas stables (il manque des molécules à la surface).



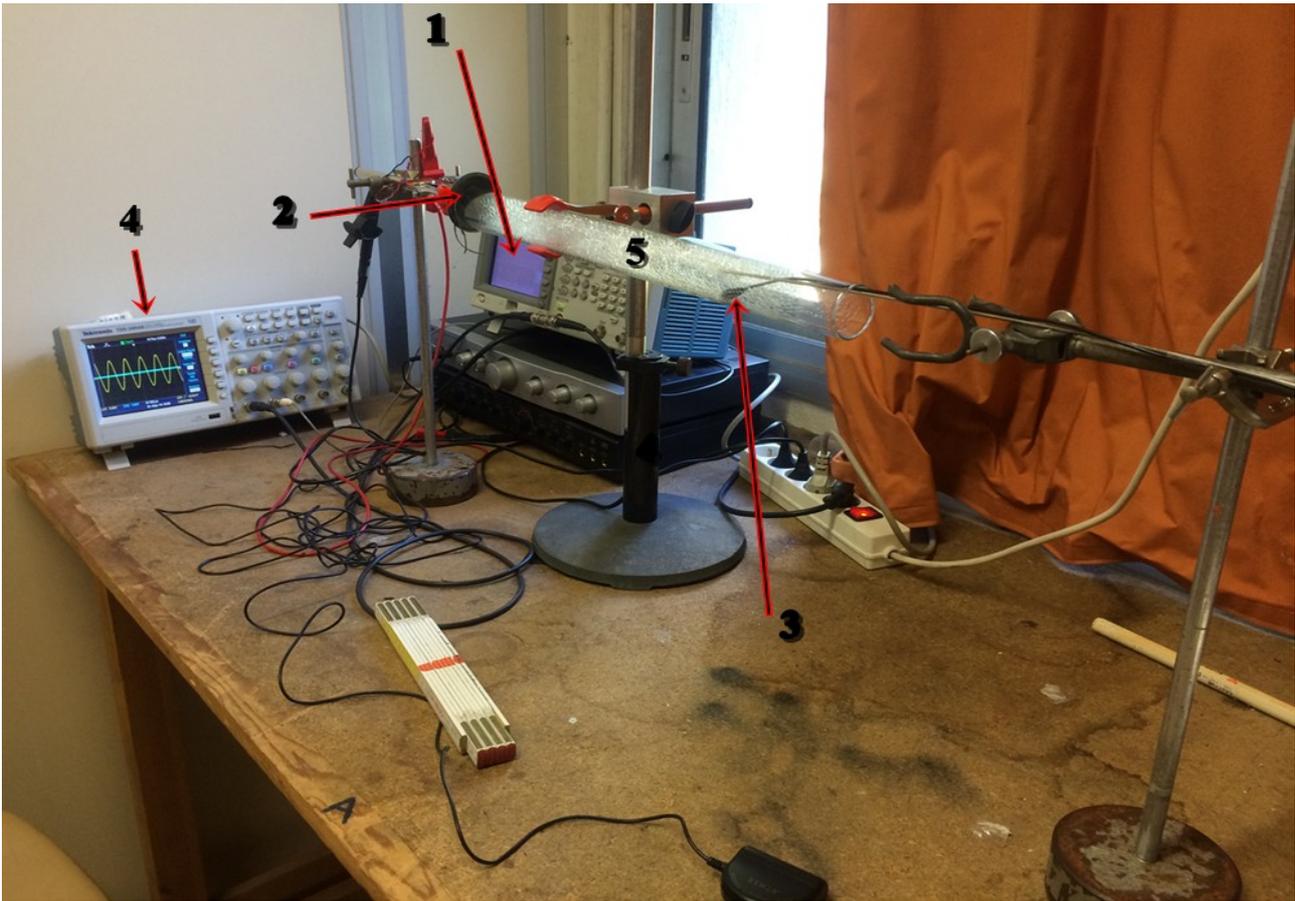
Tension de surface en fonction de la concentration des tensioactifs (du surfactant)

Pour pouvoir contrôler la taille des bulles, nous disposons de différentes seringues avec différents diamètres .

Nos différentes tailles de seringues nous permettent d'explorer une plage de taille de rayon de bulles variant de 1.27 mm à 6.02 mm. La fraction liquide, n'étant pas un paramètre de contrôle, peut varier de 0.120% (de liquide) à 0.279%. Ce paramètre est attribué à la mousse lors de sa création. Vu les plages explorées par les 2 paramètres, on remarque que l'on peut varier la taille des bulles plus que la fraction liquide, c'est pour cela que nous nous y intéressons plus.

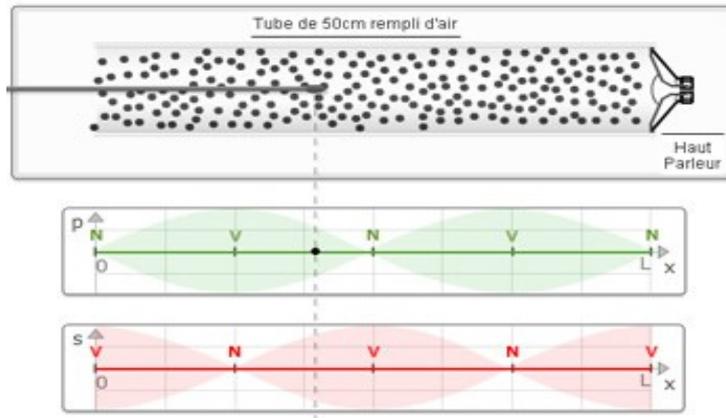
2-Montage acoustique :

Le milieu étant créé, on a besoin, dans un premier temps d'un son : une onde sinusoïdale, envoyée par un GBF (1) et relié à un haut-parleur (2); ensuite, pour étudier ce son, il faut le recevoir, ce sera fait par un microphone (3) puis visualisé par l'oscilloscope (4).



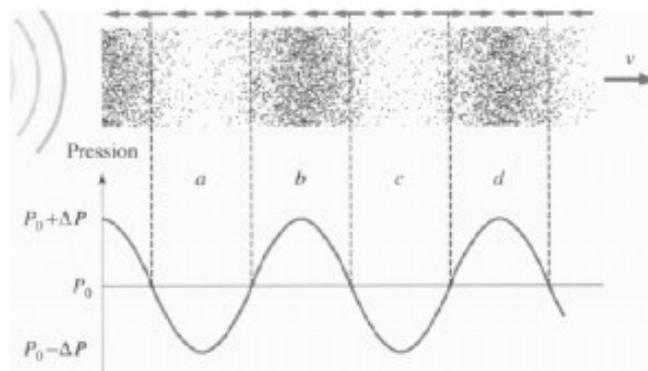
Montage expérimental

Notre support pour l'étude de notre système est le Tube de Kundt (5). C'est un dispositif expérimental, qu'a mis en place August KUNDT, pour pouvoir observer les ondes stationnaires dans un tube cylindrique (plexiglas ou verre) rempli d'air. On peut avoir affaire à un tube ouvert ou bien fermé d'un seul côté. Nous avons utilisé un tube ouvert tout au long de notre stage. On envoie une onde sinusoïdale dans le tube et on y obtient une onde stationnaire, à certaines fréquences (fréquences de résonances). L'onde peut être considérée d'un point de vue de la pression, ou de la vitesse : les nœuds de vitesse représente des ventres de pression et inversement. Quand on a un nœud de vitesse, les particules de l'air sont comprimées entre elles d'où le ventre de pression.



Nœuds et ventres de pression et de vitesse

Pour leurs visualisations respectives, on peut soit les observer sur l'oscilloscope (nœuds et ventres de pression -le micro détecte la différence de pression dans l'air-) soit en utilisant de fines particules avec lesquels on remplit le tube (on observera les nœuds et les ventres de vitesse). Ici, on peut distinguer la différence entre un tube ouvert et tube fermé ; à l'ouverture d'un tube, on observe un ventre de vitesse et lorsque le tube est fermé, on a un noeud de vitesse.



Noeuds et ventres de pression d'une onde

Lorsque la surpression arrive à l'extrémité du tuyau, l'air peut aller dans toutes les directions (le courant n'est plus contraint par le tube). La pression chute donc immédiatement, du coup, la dépression va aspirer de l'air dans le tuyau. On a donc la création d'une nouvelle surpression qui va progresser en sens inverse. En fait, l'onde se réfléchit sur un « mur d'air » à l'extrémité du tuyau. Ainsi est réfléchi l'onde incidente. Les ondes incidentes et réfléchies ne forment pas forcément une onde stationnaire, il faut de plus, que celles-ci soient en phase, cette condition est vérifiée seulement pour les fréquences de résonance ($v = \lambda f$).

Soit l'équation de propagation d'onde : $\frac{\partial^2 \Psi}{\partial x^2} = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 \Psi}{\partial t^2}$ avec v la vitesse du son, d'où

la condition $k = \frac{\omega}{v}$ (relation de dispersion pour $k > 0$)

On sait que mathématiquement une onde sinusoïdale dans l'espace s'écrit :

$$\Psi_i(x) = A e^{i(\omega t + kx)} \quad \text{où } A \text{ est l'amplitude de l'onde.}$$

Cette expression représente celle de l'onde incidente, on sait qu'après avoir parcouru la longueur du tube elle est réfléchiée : $\Psi_r(x) = A r e^{i(\omega t + k(L-x))}$, avec $r=1$ (coefficient de réflexion) pour un tube ouvert (et $r=-1$ pour le fermé).

Dans le tube, on a donc l'onde incidente et réfléchiée qui s'y propage, on les somme et on obtient :

$$\Psi(x, t) = \Psi_i(x) + \Psi_r(x) = A (e^{i(\omega t - kx)} + e^{i(\omega t + k(x-2L))}) ,$$

$$\Psi(x, t) = A e^{i\omega t} (e^{-ikx} + e^{ik(x-2L)})$$

$$\Psi(x, t) = A e^{i\omega t} (e^{-ikx} + e^{ik(x-2L)}) e^{ikL} e^{-ikL}$$

$$\Psi(x, t) = A e^{i(\omega t - kL)} (e^{ik(L-x)} + e^{-ik(L-x)})$$

$$\Psi(x, t) = 2A e^{i(\omega t - kL)} \cos(k(L-x))$$

On retrouve bien l'expression d'une onde stationnaire (le terme de propagation -l'espace x- juste l'amplitude de l'onde dépendant de $x - 2A \cos(k(L-x))$ -).

On a la relation de surpression acoustique $P(x, t) = \frac{-1}{\chi} \frac{\partial \Psi}{\partial x}$, avec χ la compressibilité, qui s'applique dans notre tube.

$$\text{D'où, en l'appliquant, on a : } p(x, t) = \frac{-2A e^{i(\omega t - kL)} \sin(k(L-x))}{\chi}$$

Le tube utilisé étant ouvert des 2 extrémités (à $x=0$ et $x=L$), nous avons ici des ventres de vitesse c'est-à-dire, des nœuds de pression, donc nous avons nos conditions : $p(0,t)=0$ et $p(L,t)=0$. Grâce à ces conditions, on peut déterminer les fréquences de résonance du tube (condition où on obtient une onde stationnaire).

Alors, $p(0,t)=0$ qui nous donne $k = n \frac{\pi}{L}$, avec n , un nombre entier, qui représente le mode de

résonance (car $\sin(kL)=0 \Leftrightarrow kL=n\pi$). Or, on sait que $k = \frac{\omega}{v}$, donc $\frac{\omega}{v} = n \frac{\pi}{L}$, de plus la

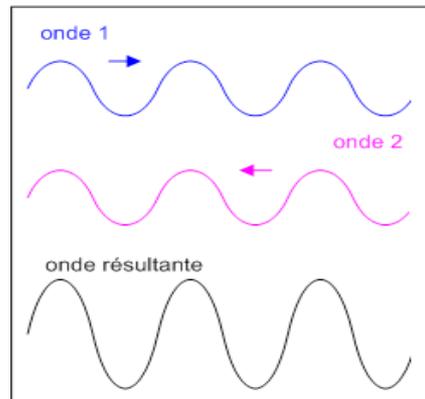
pulsation étant $\omega = 2\pi f$, d'où **Fréquence de résonance** : $f = n \frac{v}{2L}$.

Pour un tube fermé, l'onde incidente parcourt 4 fois L , (après le premier aller-retour, l'onde est réfléchiée avec le signe opposé, et fait un second aller-retour, pour ensuite revenir avec son signe de départ, contrairement à l'onde dans le tube ouvert) la formule des fréquences de résonances

devient : $f = n \frac{V}{4L}$.

Nous pourrions, grâce à cette formule, régler théoriquement la fréquence du signal émis par le générateur, afin d'avoir dans le tube de Kundt, une onde stationnaire. Expérimentalement, nous pourrions être plus précis, en observant le signal reçu par le micro dans le tube, qu'affiche l'oscilloscope, où l'on remarquera une forte augmentation de l'amplitude de celui-ci par rapport à

celle du signal émis (ce qui est du, lorsque l'onde incidente et réfléchiée sont en phase, au phénomène constructif et destructif , c'est-à-dire, par exemple, lorsque l'on a 2 ventres en phase, les 2 amplitudes s'ajoutent)



Onde incidente+réfléchiée=Onde stationnaire

Ensuite, après avoir nos valeurs de fréquences, nous pourrons ainsi grâce au micro détecter les différents ventres et nœuds (leur nombre dépend du mode choisi, soit de la fréquence). On peut définir la longueur d'onde λ , la période spatiale du signal, délimitée par 3 nœuds, 3 ventres, c'est-à-dire 2 motifs. Ainsi, on peut remonter à la vitesse du signal (le son), grâce à la formule $v=\lambda f$.

II-Résultats:

On sait qu'en Physique, les études expérimentales se font en variant un seul paramètre à la fois tout en fixant les autres. Ici les paramètres à varier sont : la fréquence (à une fréquence de résonance), la longueur du tube, la taille des bulles et la fraction liquide.

Tout d'abord, il nous faut trouver les fréquences de résonances pour notre tube (en verre, et ouvert, de longueur $L=45\text{cm}$ et de diamètre d'ouverture $d= 3,5\text{cm}$) :

Mode	Fréquences (Hz)
1	358
2	723
3	1081
4	1446
5	1804
6	2154
7	2520
8	2855
9	3234

Nous avons aussi vérifié que dans l'air la vitesse du son ne dépend pas de la fréquence :

Mode	Fréquences (Hz)		Vitesse (m/s)	
3	1081	± 2	339,1	± 4,9
4	1446	± 2	341	± 3,4
5	1804	± 3	340,2	± 5,9
6	2154	± 3	339,8	± 4,8
7	2520	± 5	345,2	± 5,7
8	2855	± 5	342,6	± 6,3
9	3234	± 5	345,2	± 7,0

Par conséquent, on pourra réaliser nos expériences à une fréquence fixée. On choisit une fréquence qui nous permettra d'observer au moins une longueur d'onde. Cette fréquence ne doit pas être trop élevée car pour notre tube la fréquence de coupure des ondes planes est aux alentours de 4000 Hz (on n'observe plus de nœuds et de ventres).

À fréquence et longueur du tube fixés, il ne nous reste qu'à voir l'effet des 2 paramètres : la fraction liquide et les tailles des bulles.

1-Effet des fractions liquides :

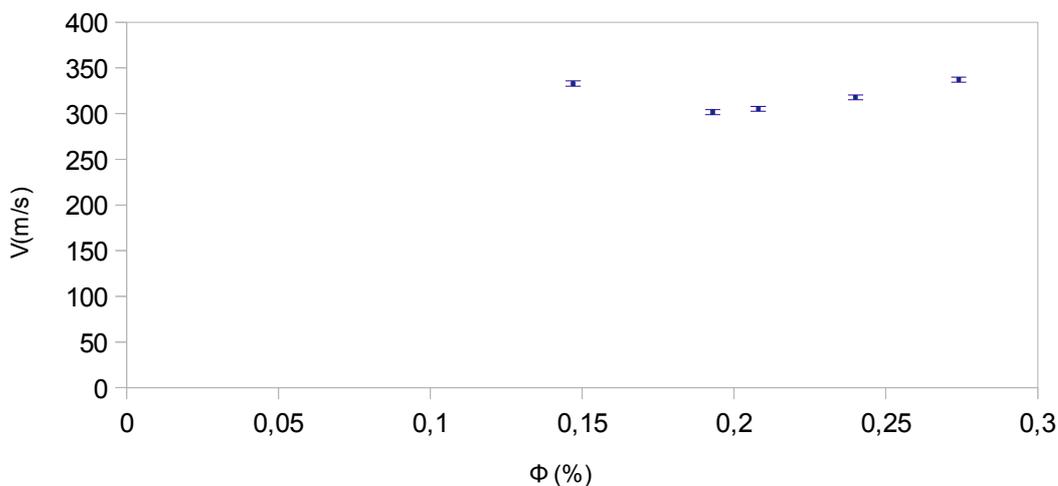
N'étant pas un paramètre de contrôle, il faut observer l'effet de la fraction liquide sur la vitesse, pour cela, nous fixons tout les paramètres. Nous avons aussi vérifié son rôle pour chaque différentes tailles.

Pour chaque mousse qu'on réalise, nous déterminerons sa fraction liquide : après l'avoir pesée, on

trouve que $\Phi = \frac{m(eau)}{\rho(eau) V(tot)}$ avec m(eau) la masse pesée, V(tot) : volume du tube pris

avec la mousse.

$$v = f(\Phi)$$



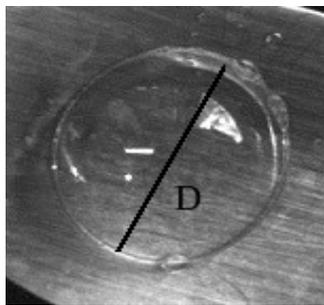
On observe que la fraction liquide peut être considérée comme constante, vu la faible

variation de la vitesse (16 m/s) et tenant compte des incertitudes sur la vitesse (de l'ordre de 3 m/s, que nous avons déterminé expérimentalement, prenant en compte une incertitude sur la position des nœuds observés à l'oscilloscope, ainsi que la précision de l'outil de mesure).
 De plus, la plage explorée par la fraction liquide est faible (de 0,15 à 0,27 %) donc on ne peut pas conclure.

2-Effet des tailles des bulles :

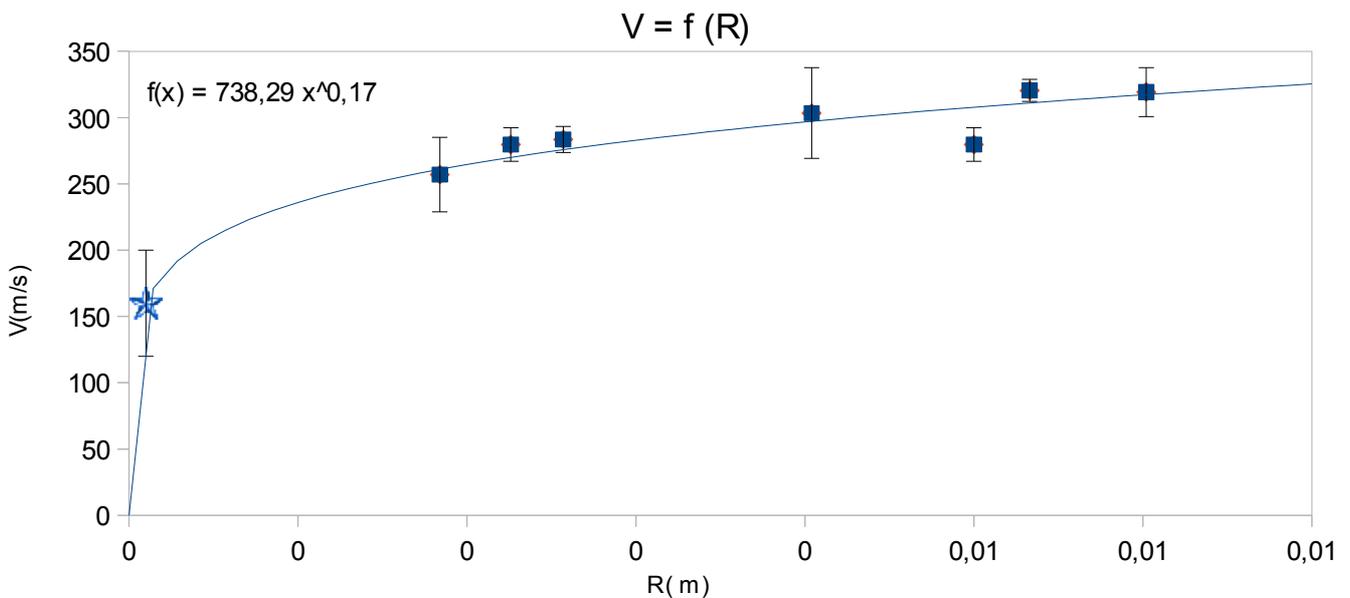
Ensuite, nous allons voir l'allure de la vitesse en fonction de la variation des tailles des bulles de la mousse. Pour cela, il faut, premièrement, quantifier les tailles des bulles, pour chaque seringues.

Sachant qu'une bulle a une forme sphérique, on en isole une, celle-ci étant écrasée sur un support, elle forme alors une demi-sphère. Grâce à une caméra, on prend cette dernière en photo puis on la traite avec un logiciel qui nous donne sa surface dont on déterminera le rayon.



Bulle isolée pour pouvoir ensuite calculer son rayon

Une fois qu'on a déterminé toutes les tailles de nos bulles, on va pouvoir étudier le comportement acoustique dans la mousse en fonction des tailles de ses bulles.



Courbe expérimentale de la vitesse en fonction du rayon des bulles : le carré représentant les bulles des mousses créées et l'étoile, bulles de mousse industrielle (mousse à raser) .

On observe que la vitesse du son augmente avec les tailles de bulles. On peut voir qu'elle adopte un comportement de loi puissance . De plus, on peut remarquer que la vitesse dans une mousse à raser est de l'ordre de 160 m/s et ses bulles ont des tailles entre 10^{-1} et 10^{-2} mm, ce qui est bien en accord avec notre tendance en puissance.

On constate aussi que cette vitesse est inférieure à celle dans l'air et dans l'eau (respectivement 340 m/s et 1480 m/s).

III-Discussion:

La vitesse du son dans la mousse est inférieure à celle dans l'air (et même dans l'eau) ; pour montrer cela :

On sait que la vitesse du son dans un fluide est : $V = \frac{1}{\sqrt{\rho\chi}}$, nous pouvons ainsi remonter à la

vitesse du son dans la mousse avec $\rho(mousse) = \rho(eau)\Phi + \rho(air)(1 - \Phi)$, et

$$\frac{1}{\chi} = \frac{\Phi}{\chi(eau)} + \frac{(1 - \Phi)}{\chi(air)}$$

D'où,
$$v = \frac{1}{\sqrt{\frac{\rho(eau)\Phi + \rho(air)(1 - \Phi)}{\frac{\Phi}{\chi(eau)} + \frac{(1 - \Phi)}{\chi(air)}}}}$$
 , soit

$$V = \frac{1}{\sqrt{\frac{(\rho(eau)\Phi + \rho(air) - \rho(air)\Phi)\chi(eau)\chi(air)}{\Phi\chi(air) + (1 - \Phi)\chi(eau)}}}}$$

$$V = \frac{1}{\sqrt{\frac{\chi(eau)(\Phi(\rho(eau)\chi(air) - \rho(air)\chi(air)) + \rho(air)\chi(air))}{\Phi\chi(air) + (1 - \Phi)\chi(eau)}}}}$$
 , on sait que $\rho(eau) \gg \rho(air)$

donc on néglige $\{\rho(air)\chi(air)\}$ par rapport à $\{\rho(eau)\chi(air)\}$, alors :

$$V = \frac{1}{\sqrt{\frac{\chi(eau)(\Phi\rho(eau)\chi(air) + \rho(air)\chi(air))}{\Phi\chi(air) + (1 - \Phi)\chi(eau)}}}}$$
 , on sait que $\chi(gaz) \gg \chi(liq)$ donc,

on peut négliger : $\{\chi(air)\Phi\}$ par rapport à $\{\chi(eau)\Phi\}$, donc :

$$V = \frac{1}{\sqrt{\frac{\chi(eau)(\Phi\rho(eau)\chi(air) + \rho(air)\chi(air))}{(1 - \Phi)\chi(eau)}}}}$$
 , et
$$V = \frac{1}{\sqrt{\frac{(\Phi\rho(eau)\chi(air) + \rho(air)\chi(air))}{(1 - \Phi)}}}}$$
 ,

comme dans une mousse la fraction liquide $\Phi < 1$ donc on a :

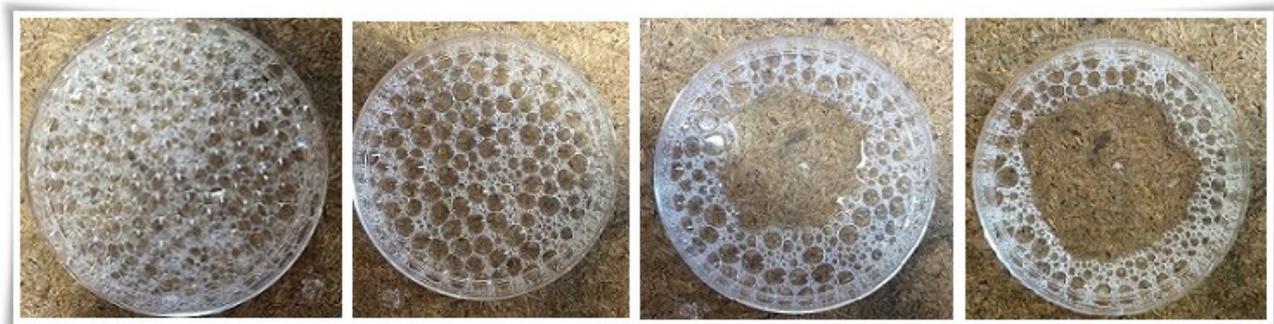
$$V = \frac{1}{\sqrt{(\Phi\rho(eau)\chi(air) + \rho(air)\chi(air))}}$$
 . De plus, on voit que $\Phi\rho(eau)\chi(air) + \rho(air)\chi(air) > \rho(air)\chi(air)$

$$V(mousse) = \frac{1}{\sqrt{(\Phi\rho(eau)\chi(air) + \rho(air)\chi(air))}} < \frac{1}{\sqrt{\rho(air)\chi(air)}} = V(air)$$
 .

Donc, on a bien $V(\text{mousse}) < V(\text{air})$.

En effet, on peut supposer que le fait que le son se propage dans un milieu diphasique (successions de changement de milieu (liquide-gaz-liquide-gaz...)), l'onde perd de l'énergie mécanique d'où sa vitesse qui est inférieure à celle dans les 2 autres milieux. De plus, on a également remarquer que la vitesse augmente avec la taille des bulles, cela va de même que dans ce cas, les bulles étant plus grosses, il y a moins de changement de milieu (moins de films d'eau à traverser par l'onde), donc la vitesse est plus élevée.

Au cours du temps, les bulles grandissent à cause du mûrissement et de la coalescence et la fraction liquide diminue, à cause du drainage. Le mûrissement est induit par les différences de tailles entre les bulles : une bulle de petite taille se vide dans une bulle de taille supérieure. La coalescence, quant à elle, est due à la rupture du film présent entre 2 bulles. Cette rupture, est due au fait que le film s'est aminci. C'est la perte d'eau, par son écoulement à travers les bords de Plateau, qui va être la cause de cet amincissement. Ce phénomène est appelé le drainage gravitaire. L'eau perdue participe à la diminution de la fraction liquide. Au cours du temps, la mousse se dégrade naturellement, ses propriétés évoluent ce qui a pour conséquence un changement dans la dispersion de l'onde sonore, ce qui veut dire qu'on change de vitesse.



Evolution de notre mousse au cours du temps en 15 minutes

Ces 2 phénomènes sont également les causes de l'homogénéité de la mousse ; si elle n'est pas homogène, on distingue des différences de milieux (air et mousse) ce qui modifie la valeur réelle de la vitesse dans la mousse.

Conclusion :

Lors de notre stage, nous avons eu la possibilité d'étudier la vitesse du son (qui est une partie de notre étude acoustique) dans les mousses, un milieu hétérogène. On a pu s'intéresser au comportement de la vitesse en fonction des paramètres du milieu (la mousse), comme sa fraction liquide et les tailles de ses bulles. Nous en avons dégagé, qu'elle évolue comme une loi puissance croissante en fonction de la taille des bulles, et vaguement constante en fonction du second paramètre.

Cependant, l'étude acoustique ne s'arrête pas là, effectivement, on a pu observer une importante propriété de la mousse, qui est l'amortissement du son. En effet, la mousse est beaucoup utilisée pour cette caractéristique d'isolation sonore (on solidifie de la mousse liquide pour insonoriser les salles). D'où l'intérêt de s'intéresser à ce phénomène d'atténuation et de le caractériser.

Remerciements :

Nous remercions nos encadrants de nous avoir guider tout le long de notre stage et de nous avoir appris de nouvelles notions. Nous tenons à les remercier tout particulièrement pour le temps qu'ils nous ont consacré durant cette période .

Références :

- [1] Livre: *Foams structure and dynamics*, d'Isabelle Cantat, et Olivier Pitois,..- Oxford.
- [2] Cours de Monsieur Olivier LEGRAND (*Physique des Instruments*), au LPMC, Université de Nice.
- [3] Thèse sur *Propriétés physico-chimiques des mousses: Etudes approfondies sur des mousses modèles et études exploratoires sur de nouvelles mousse*, de Reine-Marie Guillermic à l'université de Rennes, en 2011.
- [4] Article *Mesurements of Shear Wave Propagation Speed in Gas-Liquid Foam*, Quan Sun et James P.Butler, Béla Suki en 1993.
- [5] Article *Sound Waves in Foams*, de K.B. Kann en 2005.
- [6] Thèse sur *Construction d'hypersurface minimales de type Riemann* d'Antoine Coutant-Lefrançois à l'université Paris Est Créteil.
- [7] <http://laurentdumeix.fr/flash-actionscript-elearning-scorm-lms-poo-interaction-animation-scenarisation-programmation-sonorisation-ergonomie-2>