

Etude du phénomène de Sonoluminescence

I) Introduction

La sonoluminescence est la conversion de "son en lumière". Elle se produit lorsqu'une ou plusieurs bulles, piégées à l'intérieur d'un liquide par un champ acoustique sinusoïdal, sont forcées à osciller pendant les phases de compression et dépression de l'onde acoustique. Le comportement non-linéaire de chaque oscillateur-bulle devient alors très particulier. En effet, quand l'amplitude de la pression acoustique incidente sur la bulle dépasse le bar, on observe alors, après une phase d'expansion de la bulle, une phase de compression très brutale qui conduit à l'effondrement de la bulle au cours duquel des conditions extrêmes de pression et de température sont atteintes à l'intérieur de la bulle. Parmi tous les phénomènes intéressants qui sont alors observés, l'émission de lumière par la bulle est certainement le plus intrigant. Malgré les avancées importantes effectuées sur ce sujet, le mécanisme de production de lumière ainsi que l'estimation de la température atteinte à l'intérieur de cette bulle ne sont pas encore totalement compris et plusieurs théories tentent d'expliquer ce mécanisme.

II) Histoire de la Sonoluminescence

Le phénomène de sonoluminescence apparaît quand une petite bulle de gaz s'effondre rapidement dans un fluide. Il existe deux classifications de la sonoluminescence : la sonoluminescence émise par de multiples bulles (Multiple Bubble SonoLuminescence, MBSL) et la sonoluminescence émise par une seule bulle (Single Bubble Sonoluminescence, SBSL). En 1933, N. Marines et J. J. Trillat ont observés que les plaques photographiques étaient impressionnées par immersion dans un liquide agité par ultrasons, découvrant ainsi la MBSL. En 1934, H. Frenzel et H. Scholtes, de l'université de Cologne, ont écrit qu'ils pouvaient produire de manière reproductible une lumière faible mais visible dans l'eau en utilisant des ultrasons. Il est difficile d'étudier la MBSL car les bulles ne perdurent que durant quelques cycles acoustiques, n'émettent de la lumière que durant quelques nanosecondes et sont en mouvement constant. Ces limitations ont stoppé la recherche sur la sonoluminescence jusqu'à ce qu'on parvienne à produire la SBSL, découverte en 1988 quand H. G. Flynn écrivit une compilation des modèles théoriques du mouvement des bulles mues acoustiquement. A partir de cette information, D. F. Gaitan, alors étudiant en thèse, fut le premier à observer et contrôler le phénomène de sonoluminescence avec une seule bulle qui implosait sans se détruire environ 20 000 fois par seconde sous l'effet d'une onde de pression stationnaire produite par des ultrasons. La SBSL est beaucoup plus facile à étudier car une bulle unique est piégée de manière stationnaire dans une cuve. Cette bulle peut être extrêmement stable et briller pendant plusieurs minutes, rendant possible l'étude de la bulle et de la lumière émise visible à l'œil nu. C'est ce type de sonoluminescence que nous vous proposons de mettre en évidence et d'étudier expérimentalement ici.

III) Ce que l'on sait sur la Sonoluminescence

a) Comportement de la bulle

L'évolution théorique du rayon de la bulle pendant un cycle acoustique (simulation numérique à l'aide des équations de Rayleigh-Plesset [1][2]) est représentée sur la figure 1. L'instant initial ($t=0$), correspond au maximum de la pression acoustique du système, immédiatement après que la bulle ait relaxé de son flash antérieur. A mesure que la pression diminue, la bulle se dilate jusqu'à environ 10 fois son diamètre initial, ce qui correspond à une augmentation de 1000 fois son volume. La bulle cesse de croître au début de la phase de compression de l'onde sonore. La pression interne dans la bulle est alors de seulement 1/1000ème d'atmosphère car il y a très peu d'air qui diffuse à l'intérieur à partir de l'eau environnante. Ceci provoque l'effondrement rapide de la bulle jusqu'à 1% de son diamètre maximum (les forces de répulsion entre les atomes et les molécules de gaz contenus dans la bulle, forces de répulsion de Van der Waals, l'empêchent de rétrécir davantage). La bulle émet alors un flash de lumière de très courte durée (inférieur à 50ps), et oscille doucement autour de son rayon minimum avant de relaxer et que le processus ne recommence.

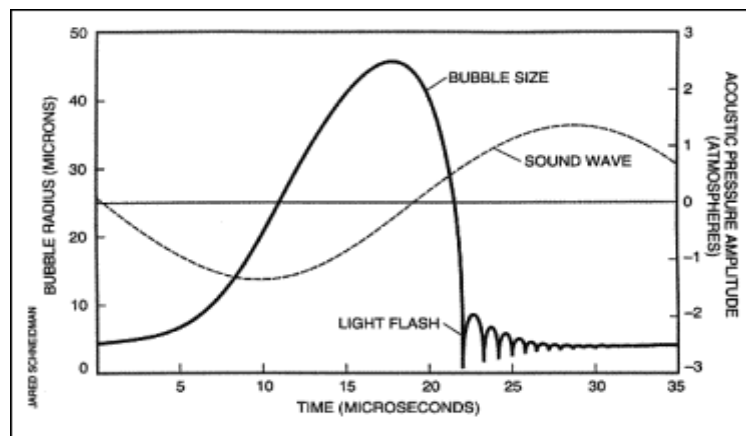


figure 1 : Evolution théorique dans le temps (confirmée expérimentalement) du rayon de la bulle en fonction de la pression acoustique pendant un cycle (équations de Rayleigh-Plesset [1][2]).

La taille de la bulle dépend des gaz dissous dans l'eau, dont une partie sera incorporée dans la bulle. Les gaz diffuseront dans la bulle quand sa taille est maximale en raison de la faible pression à l'intérieur. Ils diffuseront hors de la bulle quand sa taille est minimale. Ces deux flux vont déterminer la taille de la bulle.

b) Spectre émis

Hiller [3,4] a montré en 1992 que le spectre d'un SBSL est continu et ne présente pas de raies caractéristiques (figure 2). La lumière bleutée de cette expérience possède un large spectre qui s'étend de l'infrarouge à l'ultraviolet, jusqu'à des longueurs d'onde de 190 nanomètres (en réalité, ce sont les longueurs d'ondes les plus petites qui peuvent se propager dans l'eau et certains chercheurs tentent de savoir si la sonoluminescence ne pourrait pas produire d'autres longueurs d'onde plus courtes). Il a été aussi montré expérimentalement que la durée du pulse de lumière est identique pour toutes les longueurs d'onde [4].

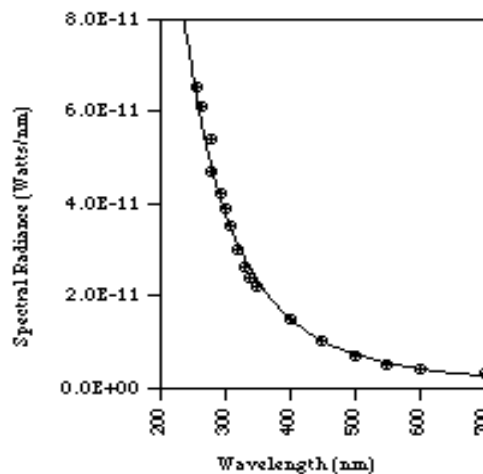


figure 2 : Spectre de sonoluminescence pour une bulle d'air dans l'eau à 22°C [3]

c) Sensibilité aux paramètres

La stabilité et l'intensité du flash sont affectées par de nombreux paramètres : la concentration et le type de gaz dissous ou présent dans la bulle, l'amplitude de la pression acoustique et la température du liquide.

Les gaz rares : L'émission lumineuse dépend très étroitement de la quantité de gaz dissous dans le liquide et du mélange de gaz présent dans la bulle. En particulier l'émission de lumière n'est stable que si ce mélange contient un gaz rare (He, Ne, Ar, Kr, Xe, Ra qui sont présents dans l'air en très faibles proportions, le plus abondant étant l'Argon). Quand la bulle est composée uniquement d'azote et/ou d'oxygène pur, l'émission lumineuse est très faible et instable. La petite proportion de gaz rares et notamment d'Argon présent dans l'air (environ 1%) est nécessaire pour obtenir la stabilité de la sonoluminescence [1].

Effet de la température du liquide : L'intensité lumineuse pour la SBSL croît de plus d'un facteur 200 lorsque la température du liquide décroît de 40°C à 1°C. Aux faibles températures, les bulles sont plus stables et on peut leur appliquer de plus fortes pressions [1].

Pression acoustique et Force de Bjerknes : La géométrie de la cellule contenant le liquide n'est pas cruciale mais la présence d'un gradient spatial de pression $\vec{\nabla}p$ est nécessaire pour pouvoir capturer une bulle d'air. D'une manière générale une bulle d'air de surface S et de volume V subit une poussée d'Archimède \vec{F} résultante des différences de pression appliquées au niveau de sa surface: $\vec{F} = -\iint_S p \vec{dS} = -\iiint_V \vec{\nabla}p dV$. Dans le cas d'un gradient de pression homogène dans tout le volume V l'expression devient simplement: $\vec{F} = -V\vec{\nabla}p$. On retrouve bien entendu le résultat classique de la poussée d'Archimède où le gradient de pression agit en forçant la bulle à se déplacer vers une zone de basse pression.

Dans le cas de la sonoluminescence, le volume de la bulle d'air oscille à la fréquence de l'onde ultrasonore et le gradient de pression s'inverse toutes les demi-périodes. La longueur d'onde acoustique étant très grande devant la taille de la bulle, la force \vec{F} est alors le produit de deux termes oscillants au cours du temps: $\vec{F} = -V(t)\vec{\nabla}p(t)$ connue sous le nom de **force de Bjerknes** qui n'est en fait qu'une poussée d'Archimède généralisée. Dans le régime de fonctionnement qui nous intéresse ici, on peut démontrer que la force moyenne exercée sur la bulle est alors dirigée vers un ventre de pression assurant ainsi la capture de la bulle:

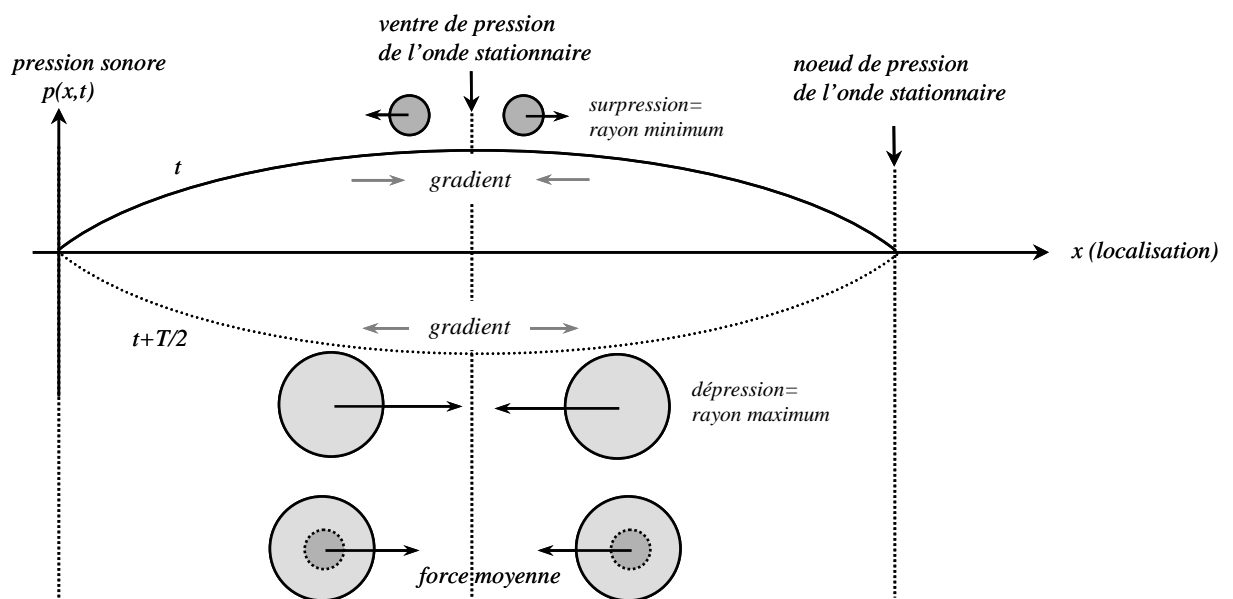


figure 3 : Capture d'une bulle dans un ventre de pression: **force de Bjerknes**

Un faible champ ultrasonore peut piéger la bulle mais les oscillations de cette dernière ne sont pas assez violentes pour produire de la lumière. L'onde stationnaire autour de la bulle, capturée au niveau d'un ventre, a une géométrie quasi-sphérique, et n'excite que des vibrations parfaitement radiales. L'effondrement de la bulle reste donc parfaitement sphérique à chaque cycle.

IV) Théories

Il existe plusieurs théories qui tentent d'expliquer le mécanisme de sonoluminescence avec plus ou moins de succès. Aucune de ces théories n'explique toutes les propriétés de la sonoluminescence.

Le mécanisme physique à l'origine de la SBSL donne lieu à controverse dans la littérature. Mais il y existe un point qui semble généralement accepté. Comme le spectre émis est continu et de large bande, on suppose que la SBSL est émise par un état de plus haute énergie du gaz dans la bulle, à savoir un plasma. Dans cet état, les atomes sont partiellement ionisés et selon la température, le processus d'émission de lumière dominant sera soit la **recombinaison radiative** (les électrons libres sont réabsorbés par les ions), soit le **bremstrahlung thermal** (les électrons sont déviés par les ions ou les atomes neutres). Ces deux phénomènes sont connus en physique des plasmas pour produire un spectre continu.

Malgré l'accord général sur le modèle de plasma parmi les auteurs qui supposent que la bulle demeure sphérique lors de son effondrement, les points de vue divergent sur la manière dont ce plasma se forme. Il existe plusieurs modèles théoriques de l'effondrement de la bulle :

a) Théorie de l'onde de choc : Cette théorie fut d'abord proposée par S. Putterman. Elle repose sur l'hypothèse que la bulle demeure parfaitement sphérique. Quand la bulle s'effondre, la pression interne croît. A son rayon minimum, la pression dans la bulle avoisinerait les 200 Mbar. Dans ces conditions de pression, les forces de Van der Waals dans le gaz deviennent importantes et la bulle cesse de s'effondrer. Les parois de la bulle décélèrent à plus de 10^{11} g si bien qu'une onde de choc est créée et se propage jusqu'au centre entraînant une élévation supplémentaire de la température du gaz au centre de la bulle. Quand l'onde de choc est à sa taille minimale, l'énergie qu'elle contient est concentrée par un facteur 10^{12} et de la lumière est émise.

b) Compression quasi-adiabatique : Dans ce modèle, la température est supposée être uniforme dans la bulle, excepté dans une couche proche des parois de la bulle. La bulle est entièrement chauffée pendant la compression adiabatique par conversion de l'énergie cinétique des gaz quand leur mouvement est stoppé en fin d'effondrement.

c) Ionisation des gaz rares [6]

Les hautes températures atteintes durant l'effondrement normal de la bulle d'air entraînent la dissociation des molécules d'oxygène et d'azote en atomes qui réagissent chimiquement avec la vapeur d'eau présente dans la bulle. Les gaz, O_2 et N_2 , sont donc ainsi progressivement évacués de la bulle [5]. Si une telle bulle renferme donc au départ un mélange de gaz, après plusieurs cycles d'oscillation elle ne contient plus que ceux qui ne se dissocient pas, même à haute température, autrement dit les gaz rares. La bulle d'air initiale est donc rapidement transformée en bulle contenant principalement de l'Argon. De part la compression et

l'échauffement de la bulle, on observe l'ionisation de ces gaz rares: ils perdent un ou plusieurs électrons qui se mettent alors à circuler à grande vitesse et émettent de la lumière par recombinaison radiative ou bremsstrahlung thermal. Les calculs montrent que l'émission que l'on observe lors de la sonoluminescence d'une bulle d'argon est expliquée par l'ionisation de 1% seulement des atomes [6]. La température calculée est de l'ordre de 10 000 K.

Bibliographie

- [1] Sensitivity of Sonoluminescence to Experimental Parameters.
Bradley P. Barber, C. C. Wu, Ritva Löfstedt, Paul H. Roberts, Seth J. Putterman. *Physical Review Letters*, **72**, 1380 (1994).
- [2] Shock-Wave Propagation in a Sonoluminescing Gas Bubble.
C. C. Wu and Paul Roberts. *Physical review letter*, **70**, 3424 (1993)
- [3] Spectrum of Synchronous Picosecond Sonoluminescence.
Robert Hiller, Seth Putterman, and Bradley Barber. *Physical review letter*, **69**, 1182 (1992).
- [4] Resolving sonoluminescence pulse width with time-correlated single photon counting.
B.Gompf et al, *Physical review letter*, **79**, 1405 (1997)
Resolving sonoluminescence pulse shape with a streak camera
R. Pecha, B. Gompf, G. Nick, Z. Q. Wang, and W. Eisenmenger
Phys. Rev. Lett. **81**, 717-720 (1998)
- [5] Inert gas accumulation in sonoluminescing bubbles.
Detlef Lohse, Sasha Hilgenfeldt. *Journal of chemical Physics*, **107**, 6986 (1997).
- [6] La Recherche n°354 Juin 2002 (article détaillé sur les mécanismes de la sonoluminescence).

V) Expérience

a) Ajustement de l'amplitude du générateur de fonction

La fréquence de l'onde ultrasonore est déterminée par une tension sinusoïdale provenant d'un générateur de fonction extérieur. Afin d'obtenir une amplitude maximale des ondes ultrasonores présentes dans la cuve (résonance), la fréquence du GBF doit être réglable assez finement autour de 28 kHz. Avant d'effectuer tout branchement, il est indispensable, pour éviter d'éventuelles détériorations, de déterminer l'amplitude maximale du GBF en entrée de l'amplificateur SL100B (figure 2). Pour cela il suffit de brancher provisoirement la sortie du GBF sur l'entrée notée "Cell transducer- Input" à l'exclusion de tout autre branchement. Le réglage de l'amplitude (crête à crête) du GBF est alors correct lorsque la tension lue sur l'amplificateur SL100B atteint 4 Volts. **L'amplitude du GBF ne devra alors plus être modifiée en aucun cas.**

b) Dégazage de l'eau

L'eau distillée que vous utiliserez pour remplir la cuve en plexiglas doit être impérativement dégazée, au moins partiellement, pour que l'on puisse observer le phénomène de sonoluminescence. Pour cela, il suffit de placer un bécher rempli d'eau distillée à l'intérieur d'une enceinte où l'on va pomper l'air et faire un vide primaire. Cette opération prendra environ 5 à 10 minutes. Le pompage et la remise à l'air se feront très progressivement pour éviter d'endommager la pompe.

c) Montage expérimental et branchements

Les différents montages et branchements sont indiqués ci-dessous ainsi que sur les figures 1,2,3. Ils doivent être effectués lorsque l'appareil SL100B est éteint.

- Remplir délicatement la cuve en plexiglas avec l'eau dégazée à hauteur de 10cm (trait).
- Mettre en place l'émetteur d'ondes ultrasonores qui devra être plongé dans d'environ 1cm d'eau (**attention** : il ne doit pas fonctionner à l'air libre)
- L'émetteur ultrasonore est relié à l'alimentation par un câble TNC bleu branché sur la sortie "Output Horn power" (intercaler la bobine de 3mH pour réaliser une adaptation d'impédance à 28kHz).
- Branchement du GBF sur "Input Func.Gen".
- Branchement du transducteur céramique situé sous la cuve en plexiglas sur l'entrée "Input Cell transducer" (figure 3)
- Branchement de la résistance chauffante "Boiler" qui servira à générer les bulles dans l'eau. Elle sera constamment immergée dans le fond de la cuve (**un fonctionnement à l'air libre détruirait instantanément la résistance**).
- Branchement des sorties "Output Cell transducer" et "Output High freq" sur l'oscilloscope numérique.

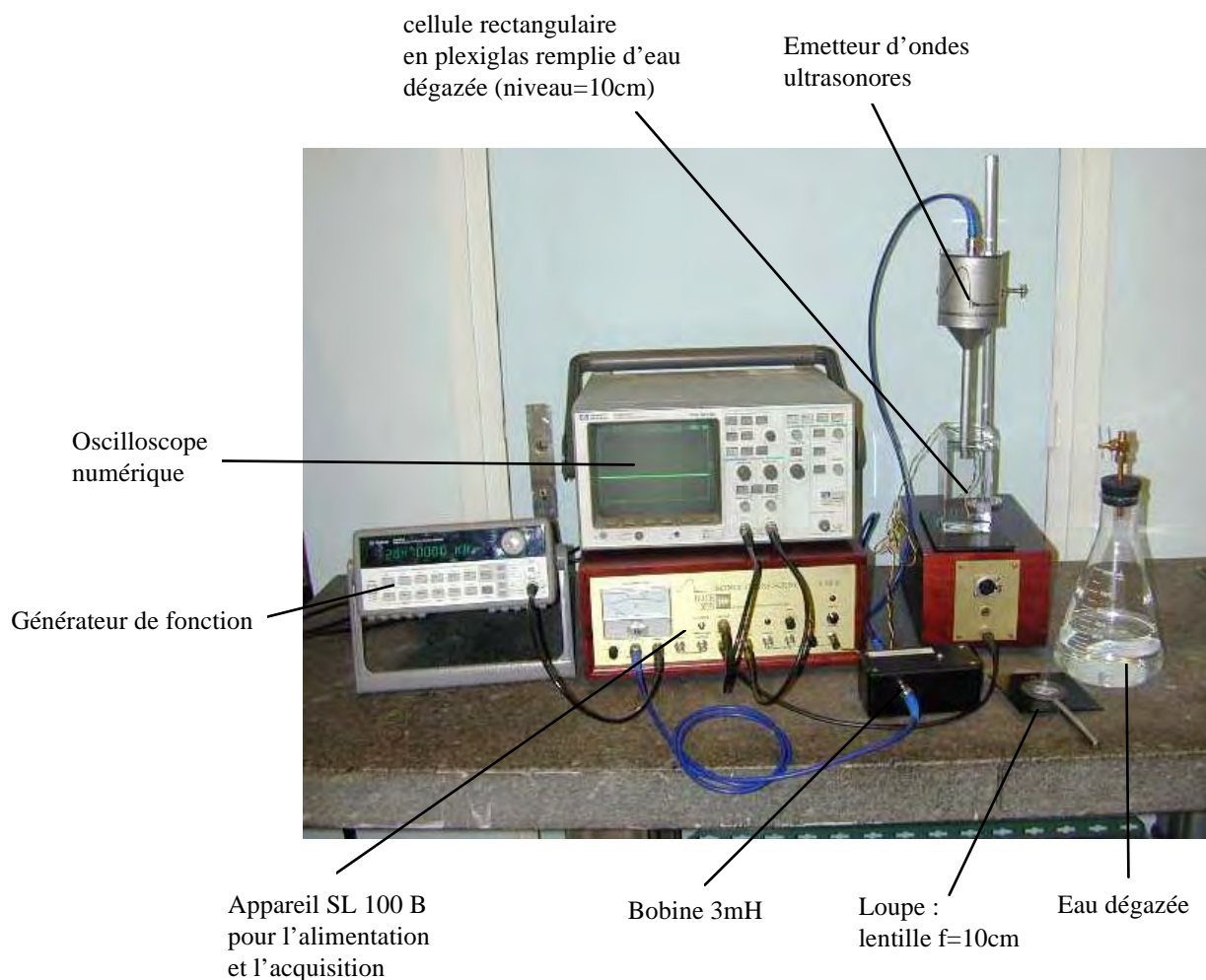


Figure 1: Dispositif expérimental dans son ensemble

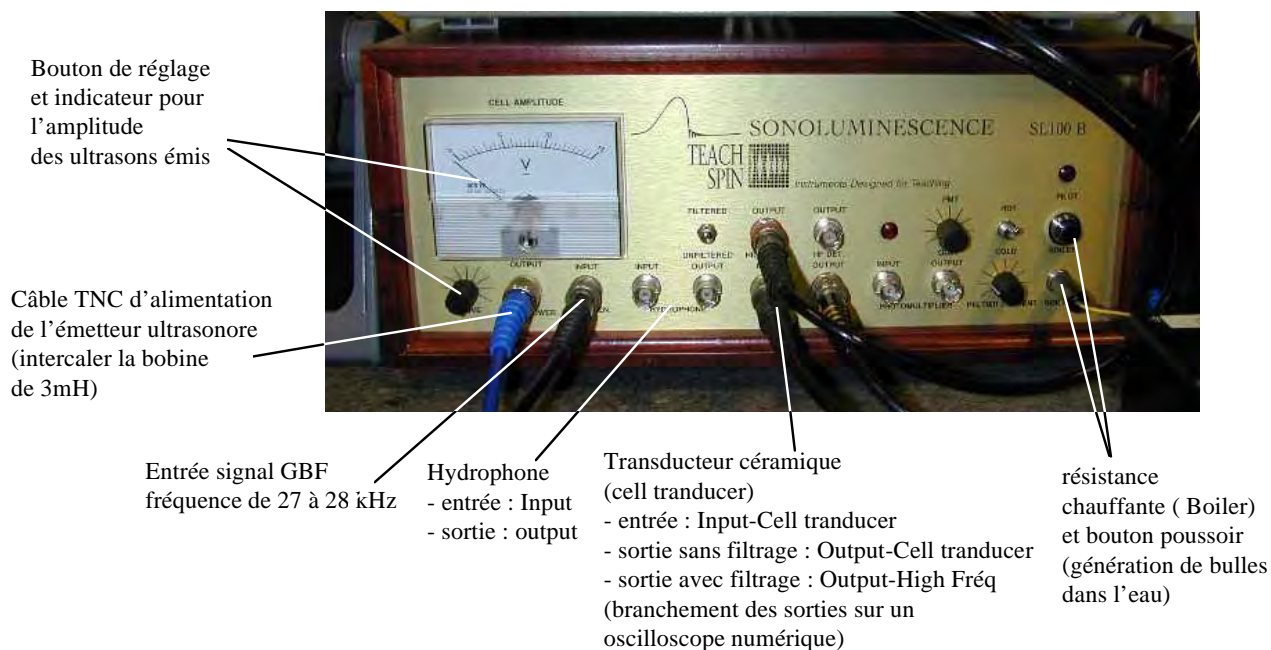


Figure 2: Alimentation et acquisition SL100B

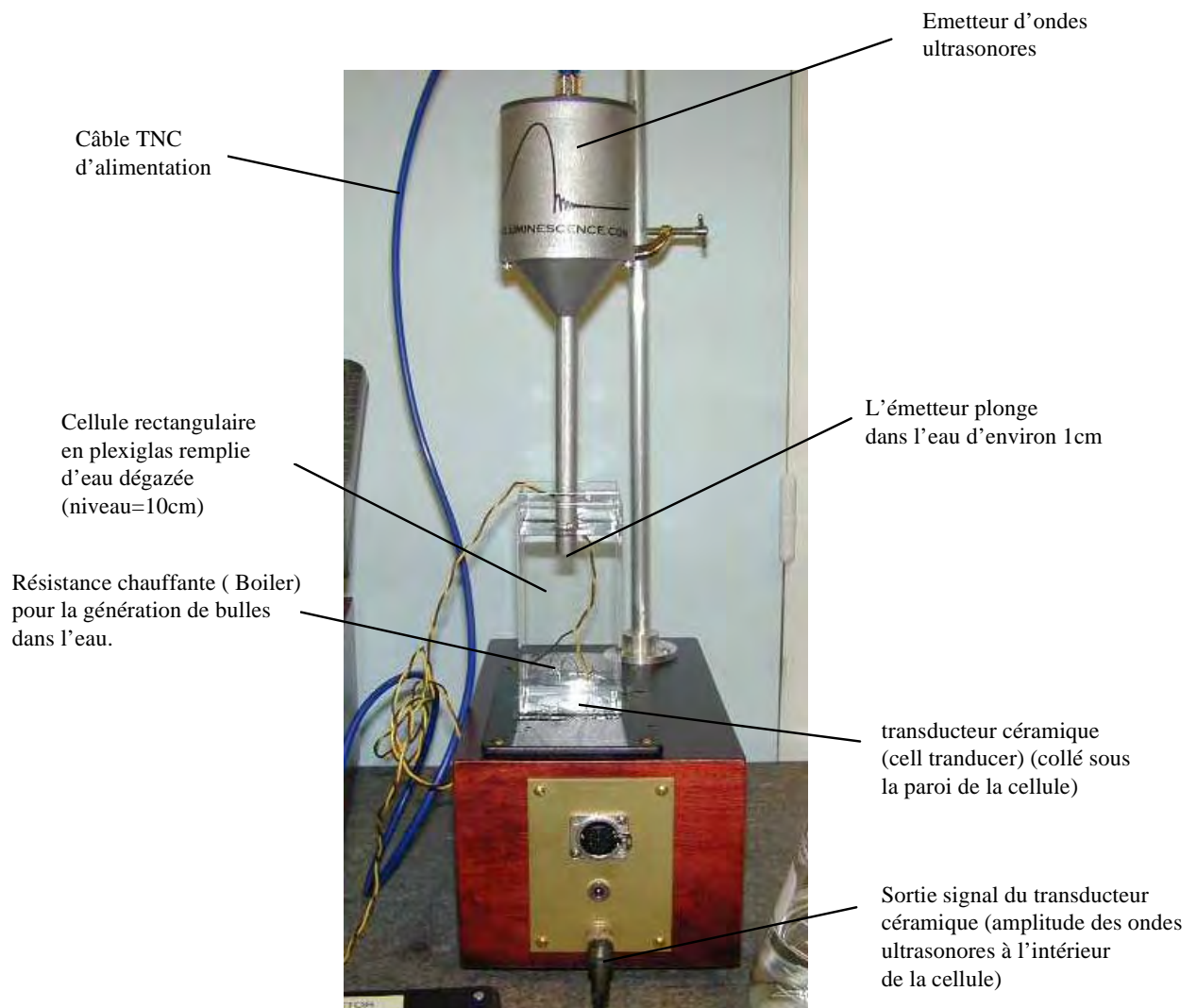


Figure 3: Cellule rectangulaire en plexiglas remplie d'eau dégazée, et émetteur d'ondes ultrasonores.

d) Visualisation sur l'oscilloscope et recherche de la résonance

Sur l'oscilloscope, figure 4a et 4b, nous pouvons observer deux traces simultanément, la première est donnée par la sortie directe non filtrée "Output Cell tranducer" et la deuxième par la sortie filtrée haute fréquence "Output High freq". Avant d'allumer l'alimentation SL100B, s'assurer que le bouton de réglage de l'amplitude des ultrasons (bouton "Drive") est au minimum (tourner à fond vers la gauche). Puis ensuite régler sur une amplitude typique de quelques volts.

- Ajuster finement la fréquence du GBF pour obtenir la résonance. La fréquence de résonance est fonction de la vitesse v de l'onde ultrasonore, et peut donc varier au cours du temps si la température de l'eau change. Il sera donc nécessaire de temps en temps de retoucher au GBF pour se replacer à la résonance.

e) Génération et piégeage d'une bulle. Visualisation de la sonoluminescence.

Pour générer des bulles il suffit d'appuyer **brièvement ($\approx 1s$)** sur le bouton poussoir de la résistance chauffante ("Boiler"). Des bulles microscopiques, remplies de gaz et de vapeur d'eau, sont alors créées au niveau de la résistance chauffante. En s'élevant dans la cuve ces bulles peuvent alors être capturées au niveau des ventres de l'onde stationnaire pour ne former, au final, qu'une seule bulle soumise aux oscillations de l'onde ultrasonore. Si l'on observe une déformation des signaux sur l'oscilloscope conformément à la figure 4b par rapport à la figure 4a, on peut à coup sûr dire si une bulle d'air est capturée d'une manière stable (pour capturer une bulle, il ne faut pas que l'amplitude des ultrasons soit trop faible ou trop importante)

En augmentant doucement l'amplitude de l'onde ultrasonore, on voit progressivement apparaître la lumière émise par la bulle à l'œil nu ou à l'aide d'une loupe. Pour une amplitude bien choisie, il est possible d'observer la sonoluminescence assez longtemps (10-15 minutes) et éventuellement sur plusieurs bulles présentes à différents endroits de la cuve.

- Essayer de faire apparaître une bulle aux trois positions possibles de la cuve (en bas, au milieu et en haut) ?
- Quelle est la couleur des flash de sonoluminescence ? pourquoi ?
- Repérer la position des différentes bulles dans la cuve.

f) Structure de l'onde stationnaire et courbe de résonance

La cuve est une cavité résonante possédant des fréquences propres données par:

$$f = \frac{v}{2} \left[\left(\frac{n_x}{L_x} \right)^2 + \left(\frac{n_y}{L_y} \right)^2 + \left(\frac{n_z}{L_z} \right)^2 \right]^{1/2} \quad P = P_0 \sin\left(\frac{n_x \pi x}{L_x}\right) \sin\left(\frac{n_y \pi y}{L_y}\right) \sin\left(\frac{n_z \pi z}{L_z}\right)$$

n_x , n_y et n_z étant des entiers et L_x , L_y et L_z les dimensions intérieures de la cuve remplie à 10cm d'eau. $v = 1500m/s$. (l'origine en $x=0$, $y=0$, $z=0$ est située sur la paroi en plexiglas au niveau d'un coin de la cuve)

- Déterminer expérimentalement la structure en 3D de l'onde stationnaire en explorant la cuve avec l'Hydrophone (mesure directe de la pression acoustique), et en déduire les valeurs entières (n_x, n_y, n_z) du mode présent dans la cuve.
- Repérer la position des ventres de l'onde stationnaire et montrer que les bulles sont bien capturées au niveau de ces derniers.
- Calculer alors la fréquence de résonance et comparer avec la valeur lue sur le GBF.
- Tracer la courbe de résonance en amplitude et déterminer le coefficient de qualité de la cavité.

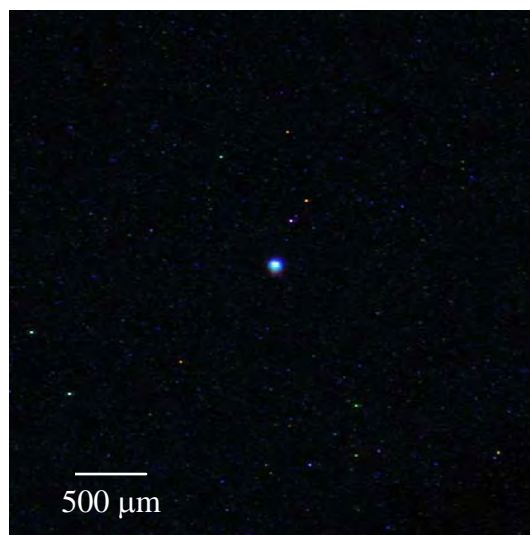
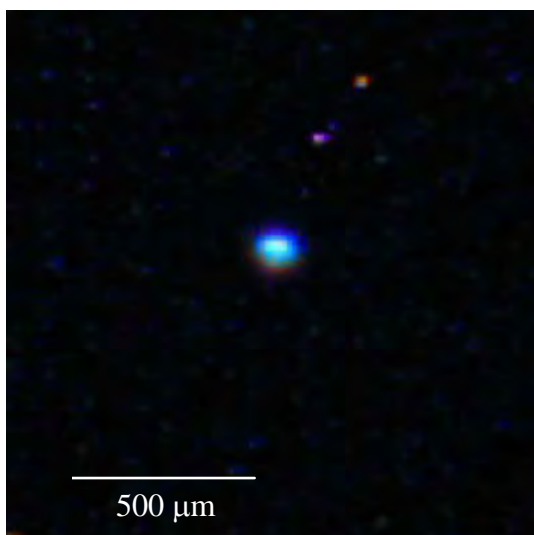
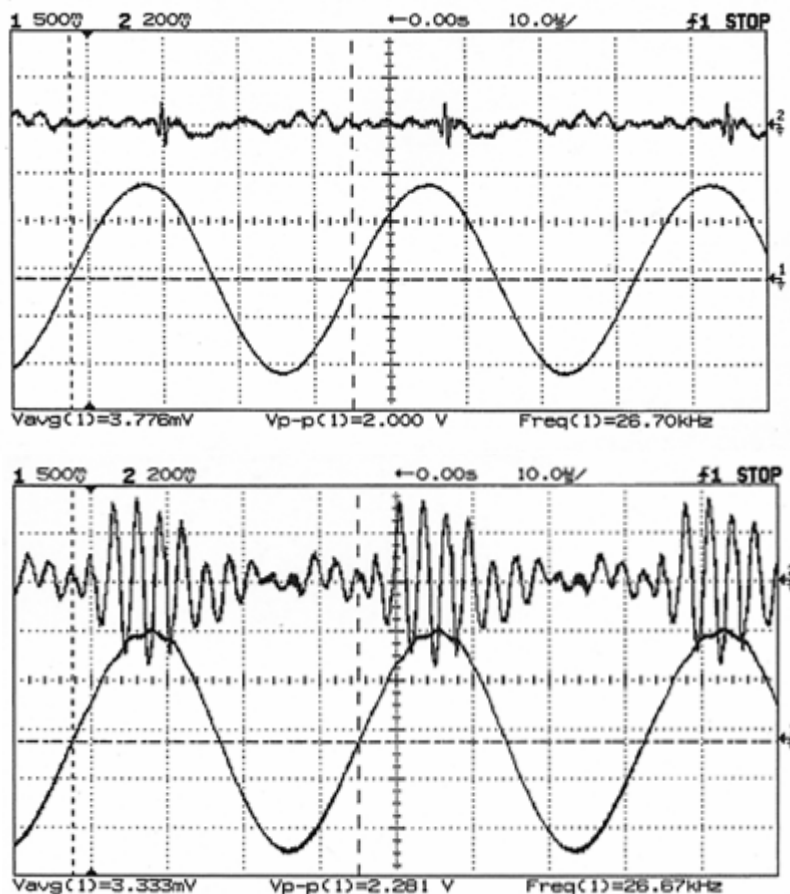


figure 5: Photographie d'une bulle émettant de la lumière de couleur bleue par sonoluminescence (prise derrière le cathétomètre avec un temps de pose de 8 secondes, avec et sans zoom sur un appareil numérique)

Matériel:

- Appareil pour l'étude de la sonoluminescence (alimentation SL100B + émetteur d'ultrasons + cuve sur son support + hydrophone + bobine 3mH + câbles TNC bleus)
- Bêcher rempli d'eau distillée
- Pompe à vide + cloche.
- GBF (Hewlett-Packard avec affichage lumineux).Oscilloscope numérique HP
- Lampe de bureau