

La sonoluminescence

TIPE réalisé par Gautier Lefebvre (PC* 2005-2006)

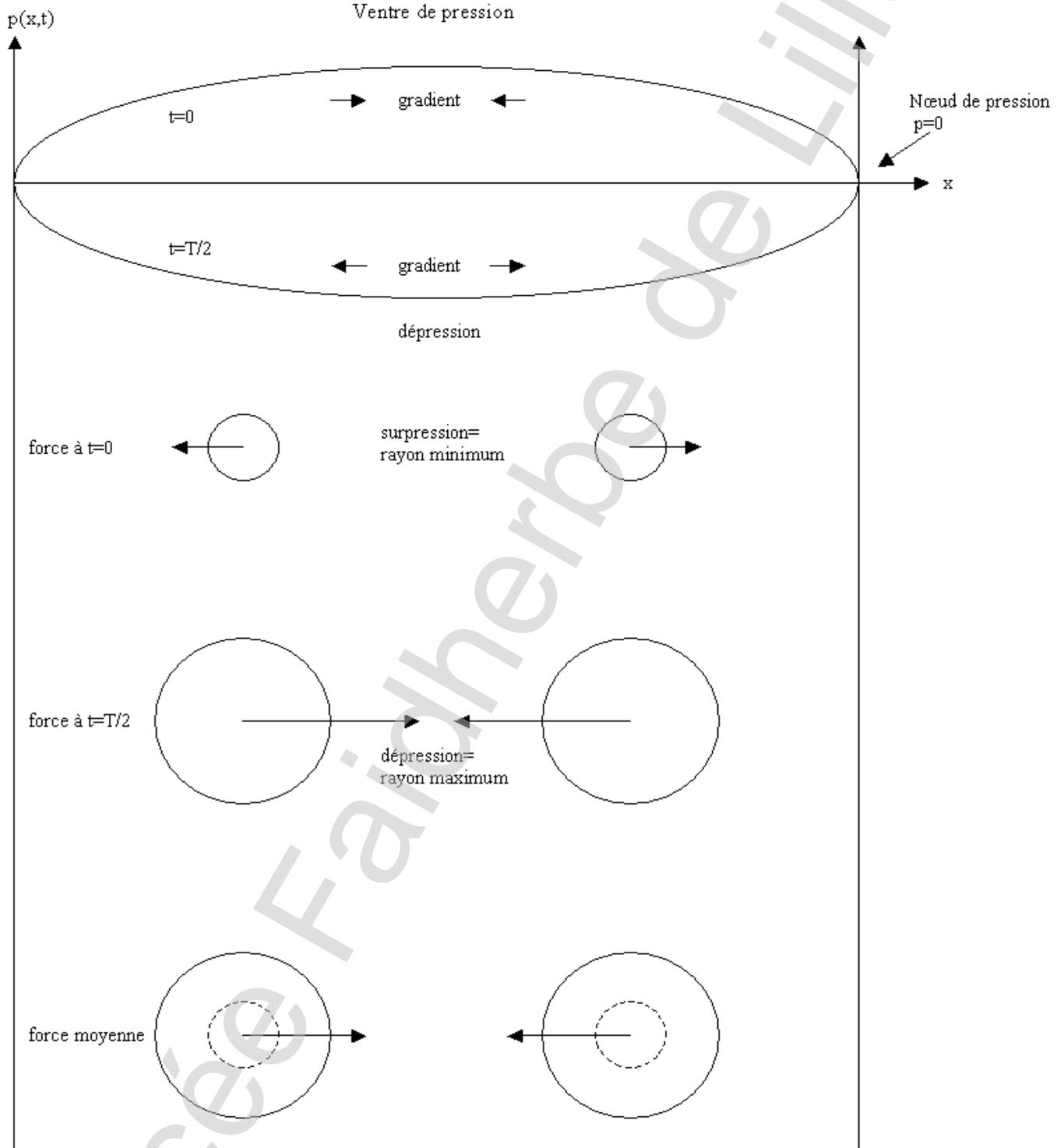
(admis aux ENS de Lyon et Cachan, a intégré l'ENS Cachan en 2006)

La sonoluminescence consiste en la production de lumière à l'aide d'ondes sonores. Cette idée peut paraître surprenante car bien que son et lumière soient tous deux des phénomènes ondulatoires, ils comportent de grandes différences de natures. La première est qu'une onde lumineuse ne nécessite pas de support matériel pour se propager contrairement à une onde acoustique. D'autre part, les ordres de grandeur des paramètres caractéristiques sont également très différents. En effet, la célérité de la lumière dans le vide ou dans l'air est d'environ 300000 km/s alors qu'elle est de 340 m/s à 20°C pour le son. Ceci donne un rapport d'un million. De même pour les longueurs d'onde, on observe un rapport d'au moins mille pour le spectre visible et les fréquences audibles. Enfin, l'écart le plus important est pour la densité d'énergie, qui est mille milliards de fois supérieure pour la lumière.

Malgré ces disparités, et surtout cette énorme différence de densité d'énergie, on parvient à réaliser la production de lumière à partir d'ondes ultrasonores dans certaines conditions. Les premières observations ont eu lieu dans les années trente. En envoyant des ultrasons dans de l'eau, des bulles se formaient par cavitation et émettaient un flash lumineux lors de leur implosion. Ce phénomène de réalisation simple était néanmoins difficile à observer car la lumière était peu intense et les positions des bulles aléatoires ce qui rendait leur étude délicate. C'est pourquoi l'étude sérieuse du phénomène n'a débutée qu'en 1989 avec l'obtention d'une sonoluminescence stable donc plus facile à étudier. Il s'agissait d'une sonoluminescence mono bulle réalisée en capturant une bulle à l'aide d'une onde ultrasonore stationnaire. Dans ce type de systèmes, la bulle est maintenue au niveau d'un ventre de pression par la force de Bjerknes qui correspond à la résultante des forces de pression dans l'onde stationnaire, c'est-à-dire une sorte de poussée d'Archimède généralisée.

Lorsque la pression est maximale, le gradient de pression est dirigé vers le ventre, inversement lorsque la pression est minimale, le gradient est dirigé vers l'extérieur. La valeur moyenne des forces volumiques de pression est donc nulle mais la force exercée sur la bulle dépend aussi de sa surface donc de son rayon. Or le rayon est maximal pour une pression minimale et inversement. La force moyenne résultante est donc dirigée vers le ventre de pression.

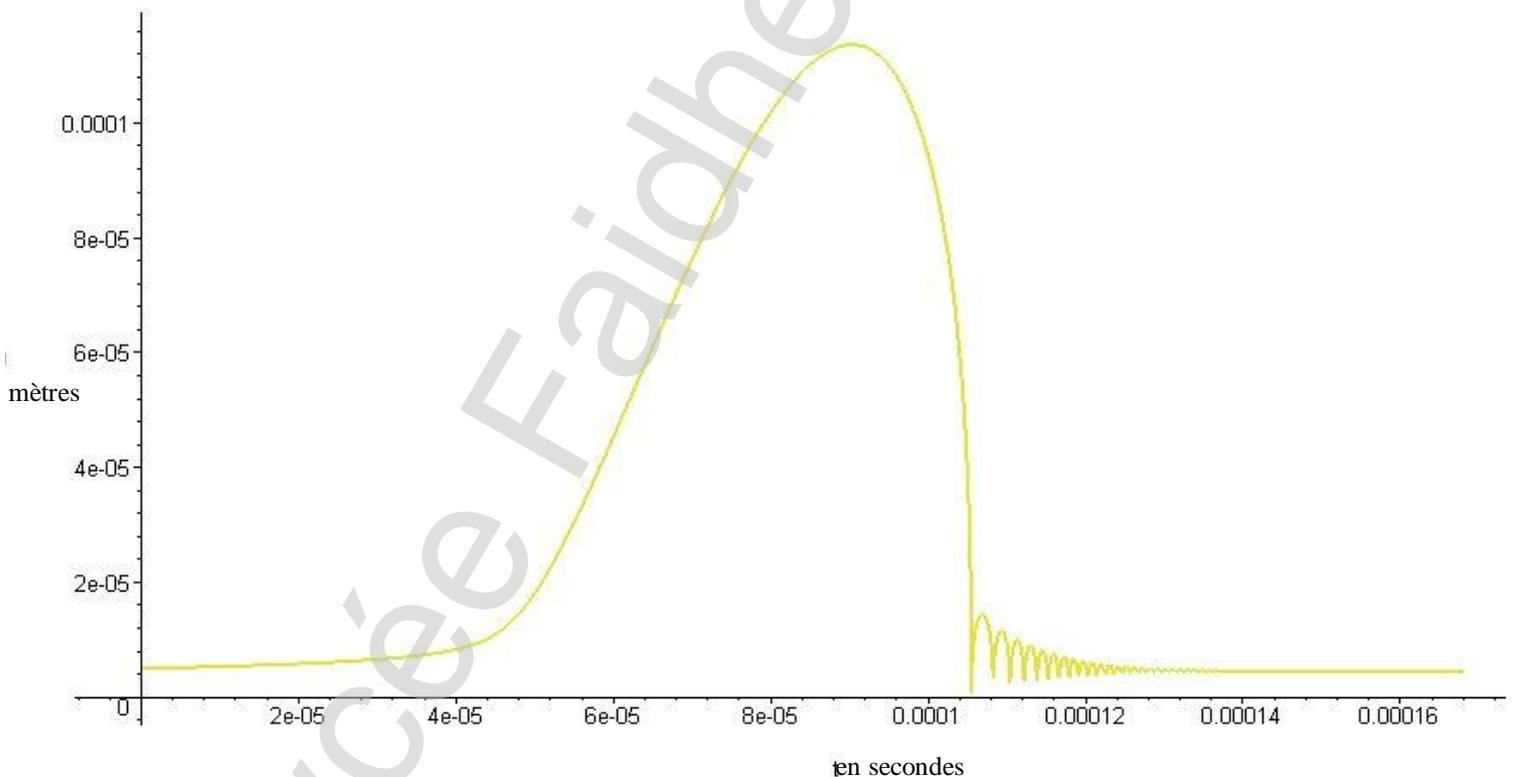
Pression sonore



Force de Bjerknes

La bulle implode en produisant un éclair lumineux mais elle n'est pas détruite. L'implosion a donc lieu à chaque cycle de l'onde ultrasonore à une fréquence de l'ordre de vingt kilohertz ce qui donne une lueur faible mais visible à l'œil nu, semblable à celle d'une étoile dans le ciel.

L'évolution du rayon peut-être suivie en étudiant la diffusion d'un faisceau laser sur la bulle. Celle-ci commence par une phase d'expansion assez longue, lors de la diminution de pression, pendant laquelle le diamètre est multiplié par dix. Au maximum de la croissance, la pression dans la bulle est de seulement un millième d'atmosphère. Ceci provoque une contraction rapide de la bulle jusqu'à 1% de son rayon maximum suivie d'une succession de rebonds pour revenir au rayon d'équilibre ce qui mène au cycle suivant. L'émission de lumière a lieu au moment où la bulle atteint son rayon minimal. La simulation numérique des équations de Rayleigh-Plesset qui régissent la dynamique de la bulle fournissent une bonne modélisation de l'évolution du rayon de la bulle. La courbe que j'ai obtenue ici donne une amplitude de la phase d'expansion trop importante, mais l'allure générale correspond aux mesures expérimentales, notamment avec la succession de rebonds après l'émission du flash. Une modélisation plus précise devrait tenir compte de la diffusion des gaz au cours de l'évolution du rayon de la bulle.



Rayon de la bulle

Cette courbe donne un minimum pour le rayon de $0.707\mu\text{m}$. En considérant la compression de la bulle adiabatique, ce qui est une bonne approximation car elle est très rapide, on peut calculer la température maximale dans la bulle par la formule $TV^{\gamma-1}=\text{constante}$ en prenant $\gamma=5/3$, on obtient alors un maximum de 14650 K. Les valeurs fournies par des modèles plus précis sont du même ordre de grandeur.

La stabilité de la bulle dépend de différents paramètres. Tout d'abord, la présence d'un gaz rare au sein de la bulle est nécessaire, car les températures atteintes sont suffisantes pour dissocier les gaz diatomiques comme le dioxygène ou le diazote, ces derniers sont donc évacués de la bulle après quelques cycles.

La diffusion des gaz dans le liquide tend à faire disparaître la bulle car, à cause de la tension superficielle, la pression est plus grande à l'intérieur de la bulle. Pour une bulle excitée par une variation de pression, cette diffusion est rectifiée car lors de la dilatation, la pression est plus faible dans la bulle et le gaz dissous dans l'eau y pénètre. Le bilan de cette diffusion dépend de l'amplitude de l'onde ultrasonore et de la pression partielle des gaz dissous dans l'eau.

L'émission lumineuse est caractérisée par des éclairs lumineux d'une durée de 100 à 300 picosecondes répétés à chaque cycle, c'est-à-dire environ toutes les 40 microsecondes. Le spectre de la lumière émise est large bande, allant de l'infrarouge à l'ultra violet. La limite inférieure de longueur d'onde à 190 nanomètres est due en réalité au fait que de plus petites longueurs d'onde ne peuvent se propager dans l'eau. Par ailleurs, on observe que la durée du flash lumineux est la même quelle que soit la longueur d'onde.

Les modèles théoriques expliquant cette émission lumineuse s'accordent généralement sur la présence d'un plasma. L'échauffement dû à la compression provoque l'ionisation partielle du gaz contenu dans la bulle. La lumière est ensuite émise par deux mécanismes : la recombinaison radiative, qui est la réabsorption des électrons libres par les ions, ou le bremsstrahlung thermal, c'est-à-dire l'inflexion de la trajectoire des électrons par les ions ou les atomes. Le spectre continu obtenu peut alors faire penser à un corps noir. Cependant bien que le spectre corresponde correctement, ceci n'explique pas la durée identique des flashes suivant la longueur d'onde. En effet, pour un corps noir, la longueur d'onde pour laquelle le rayonnement est maximal ne dépend que de la température. Lorsque la température augmente, ce maximum se déplace du rouge vers le bleu. Or les températures pour lesquelles se produit une émission rouge sont maintenues deux fois plus longtemps, l'impulsion rouge devrait donc être deux fois plus longue, ce qui n'est pas le cas. L'émetteur serait donc plutôt du type volumique.

La formation du plasma n'est pas clairement élucidée. Certains modèles évoquent uniquement la compression du gaz, considérée comme adiabatique. D'autres font appel à une onde de choc qui serait créée par le freinage brutal de la bulle au moment de sa compression maximale. L'onde convergerait jusqu'au centre de la bulle en engendrant un réchauffement supplémentaire.

Certains modèles considérant que l'émetteur est un corps noir donnent une température maximale comprise entre 25000 et un million de Kelvins! Ceci a pu suggérer que la sonoluminescence puisse initier des réactions de fusion nucléaire. Néanmoins, actuellement la plupart des modèles fournissent un maximum de température aux alentours de 10000 Kelvins, ce qui n'est pas suffisant pour déclencher la fusion.

Différents paramètres ont une influence sur l'intensité de l'émission lumineuse. Tout d'abord l'intensité de l'onde acoustique dans la cavité ce qui semble assez intuitif. En effet, quand l'amplitude de pression est plus importante, l'effondrement de la bulle est plus rapide et donc le réchauffement plus important.

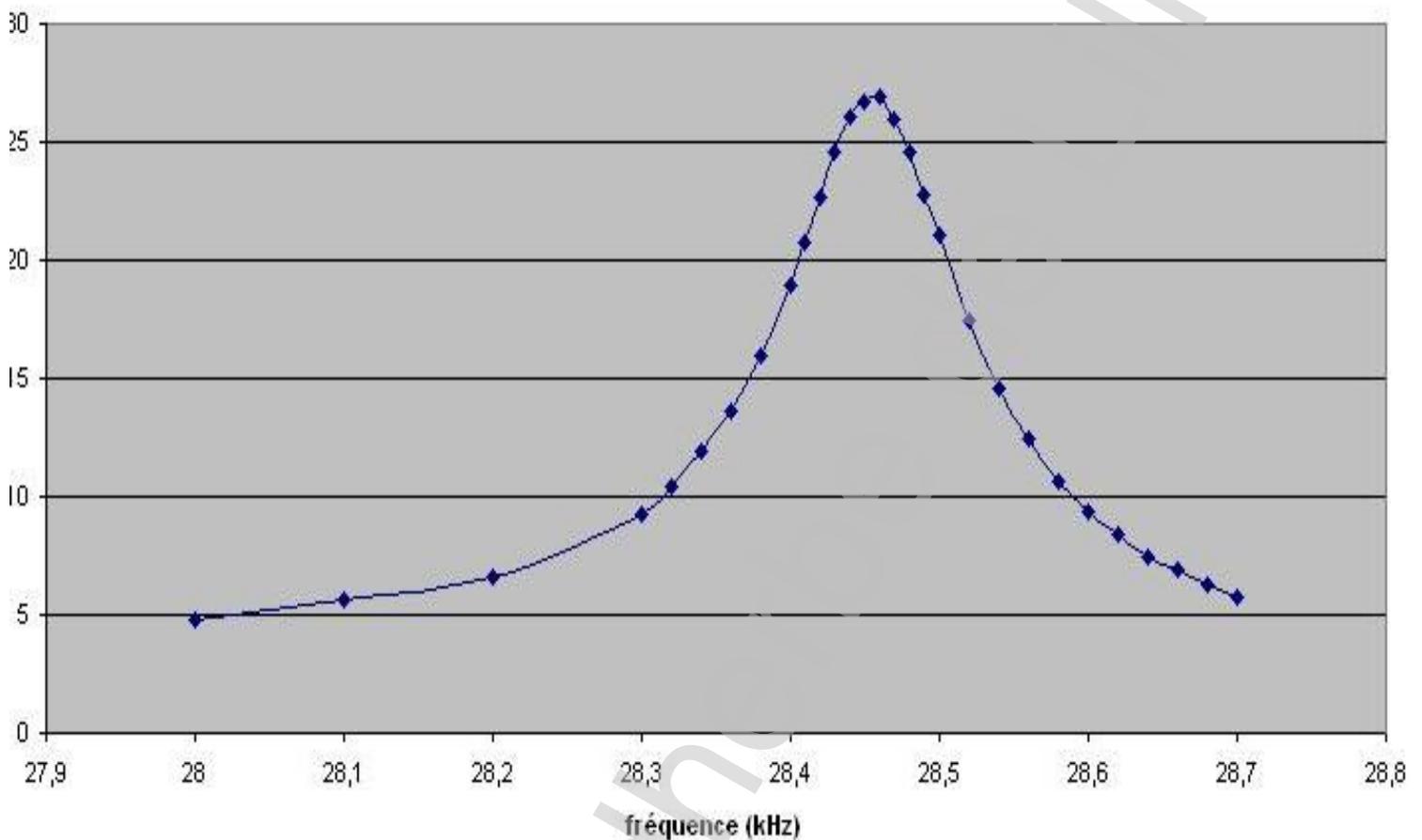
On observe également que l'intensité augmente quand la température de l'eau diminue. Ceci s'explique par les variations de la pression de vapeur saturante. Lorsque la température augmente, la quantité de vapeur d'eau présente dans la bulle augmente également, la température maximale dans la bulle est abaissée, la luminosité est donc plus faible. De plus, la stabilité de la bulle est accrue, on peut donc augmenter l'amplitude de l'onde acoustique.

Dans le cadre de ce TIPE, je me suis rendu à l'ENS de Cachan, où j'ai pu observer le phénomène de sonoluminescence. Il s'agissait de sonoluminescence mono bulle, utilisant une cavité parallélépipédique. Celle-ci était remplie d'eau préalablement dégazée, un émetteur d'onde ultrasonore alimenté par GBF amplifié était placé à la surface de l'eau. Un transducteur collé sous la cellule permettait de visualiser l'amplitude des ondes dans la cavité et également de détecter la capture d'une bulle au niveau d'un ventre de pression, ce qui provoque une déformation des signaux. La bulle était produite par une résistance chauffante au fond de la cellule.



Après avoir ajusté la fréquence de l'onde acoustique de façon à se placer sur une résonance, on a pu visualiser la structure spatiale de l'onde à l'aide d'un hydrophone. Le mode observé était qualifié de (1,1,3), c'est-à-dire avec un seul fuseau dans les deux directions horizontales et trois fuseaux dans la direction verticale. Pour ce mode, la fréquence était de 28459 Hertz. Une fois la bulle capturée, en augmentant progressivement l'amplitude on a pu effectivement observer une faible lueur bleutée au niveau d'un ventre de pression. Les bulles étaient assez stables avec même la possibilité d'en capturer deux à la fois. Néanmoins, cette stabilité a diminué progressivement tandis que l'eau se réchauffait. On peut noter que la cavité possédait un excellent facteur de qualité puisque sa valeur, calculée à partir de la courbe de résonance est de 258.

Courbe de résonance



D'autres résonances étaient observables à des fréquences ne correspondant pas à des modes théoriquement possibles. Ceci montre qu'aux amplitudes utilisées ici, nécessaires pour observer la sonoluminescence, le système n'est plus linéaire.

La combinaison d'une bulle dans système résonant à onde stationnaire permet donc de concentrer l'énergie suffisamment pour convertir le son en lumière. Cette dualité inattendue entre le son et la lumière est sous-tendue par d'autres dualités plus fondamentales entre ondes et particules. A une onde lumineuse on peut associer un ensemble de photons et à une onde acoustique un ensemble de phonons. Par ailleurs, la sonoluminescence fait intervenir différents domaines distincts de la physique notamment par le couplage thermomécanique que l'on rencontre en mécanique des fluides. La sonoluminescence par son caractère intrinsèquement pluridisciplinaire et son aspect expérimental relativement accessible présente un grand intérêt théorique, d'autant plus que tous ses mécanismes ne sont pas élucidés.

Bibliographie

G. Dumas, F. Lienhart, P-Y. Plaçais, *Single Bubble Sonoluminescence*, 2002

F. Moulin, *Etude du phénomène de Sonoluminescence*

S. Hilgenfeldt, D. Lohse, *Comment faire de la lumière avec du son*, La Recherche, 2002

Lycée Faïdherbe de Lille