

physique

La sonoluminescence... ...c'est fou !

Mark Wilsey

Les bulles sont des choses très familières. Qu'il s'agisse de la bulle savonneuse flottant dans l'air ou du pétilllement rafraîchissant d'une boisson gazeuse, il semble y avoir quelque chose de réconfortant dans la simple beauté des bulles. Notre intérêt se porte ici sur une bulle, créée dans un liquide par des ultrasons (sons de fréquences plus élevées que ceux entendus par l'oreille humaine), qui se contracte et émet de la lumière. Ce phénomène de production de lumière à partir du son est appelé sonoluminescence.

Michael Moran, du Laboratoire National Lawrence Livermore, qui fait des recherches sur la sonoluminescence, dit qu'il « s'agit d'un mystère essentiel échappant à tous les efforts » de ceux qui veulent la comprendre. Bien que les ultrasons soient utilisés dans l'industrie et dans la médecine en tant qu'outil de diagnostic, la sonoluminescence est un domaine peu exploré.

Les scientifiques connaissent la sonoluminescence depuis plusieurs décennies. Au milieu des années 30, ils avaient observé que des plaques photographiques plongées dans une solution pouvaient se voiler lorsqu'elles étaient placées dans un champ ultrasonore. Plus tard, il fut établi que les émissions de lumière provenaient de bulles qui s'étaient formées aux nœuds de pression d'ondes acoustiques. Les nœuds sont des lieux où les ondes ultrasonores directes et réfléchies interfèrent de telle manière que soit elles additionnent, soit elles soustraient leurs intensités. Du fait que les ultrasons sont généralement d'une seule fréquence, le champ d'interférence est fixe ou stationnaire.

En fonction de la forme du récipient et de la manière dont le champ ultrasonore est appliqué, un grand nombre de ces nœuds, et donc de ces bulles, peut se former dans le liquide. Ce cas de figure est appelé sonoluminescence multibulle.

L'ultrason produit des lieux de haute et de basse pression. Sous certaines conditions, la pression est suffisamment basse pour permettre la formation d'une bulle à partir des gaz dissous dans le liquide. Lorsque la

pression augmente, la bulle se contracte et le gaz emprisonné se comprime ; si de bonnes conditions sont à nouveau réunies, le gaz dans cette bulle en contraction génère un bref éclair lumineux. Ce cycle de formation et contraction de bulle est très rapide : sa fréquence est celle des ultrasons.

Jusqu'à une date récente, la sonoluminescence multibulle était la seule forme connue. Kenneth Suslick, de l'université de l'Illinois à Urbana-Champaign, expert en ultrason et pionnier de la sonochimie, utilise les effets multibulle des ultrasons pour réaliser de nouveaux produits et augmenter le taux des réactions chimiques dans les solutions.

Pour les chimistes, c'est avantageux, mais pour les physiciens qui essaient d'étudier le phénomène de sonoluminescence, les bulles multiples représentent une difficulté.

Sonoluminescence monobulle

Une percée dans la physique de la sonoluminescence fut réalisée, il y a plusieurs années, par des chercheurs de l'université du Mississippi, Lawrence Crum et son élève pour le doctorat Felipe Gaitan. Crum et Gaitan produisirent de la sonoluminescence dans une bulle isolée au milieu d'un récipient. Fait tout aussi important : ils purent contrôler le phénomène de manière à produire une lueur persistante plutôt qu'un bref éclair. Ainsi les physiciens disposèrent de quelque chose de plus facile à étudier.

Suslick explique que la sonoluminescence monobulle est qualitativement différente du phénomène multibulle : « ce sont des cousins germains mais pas des frères jumeaux ».

Dans la sonoluminescence multibulle, la température à l'intérieur des bulles en contraction atteint plusieurs milliers de degrés. L'émission est produite par des états très excités d'espèces moléculaires telles que le carbone diatomique C_2 (une molécule formée de deux atomes de carbone).

D'après Suslick, « dans le cas de la sonoluminescence monobulle, il s'avère cependant que la contraction est beaucoup plus efficace et génère une onde de choc qui se traduit par des températures plus élevées », « l'émission n'est pas moléculaire mais semble plutôt être d'un certain type de plasma ». On ne sait pas si une onde de choc se produit dans le cas multibulle, bien que cela soit possible.

Depuis la découverte de Crum et Gaitan, d'autres laboratoires ont démarré des recherches sur la sonoluminescence. Le cas le plus remarquable est celui de l'université de Californie de Los Angeles (UCLA) où beaucoup de travaux ont été menés. Les chercheurs y furent les premiers à tenter de mesurer la durée des émissions lumineuses. Leur travail montra que la bulle, dont la brillance est persistante, émet de la lumière à chaque cycle du champ acoustique et que la durée de celui-ci est de l'ordre de la microseconde (10^{-6} s). Par contre, l'éclair lui-même est bien plus court, de l'ordre de la picoseconde (10^{-12} s).

Seth Putterman, chercheur à l'UCLA et son étudiant Bradley Barber découvrirent une autre propriété remarquable de ces éclairs. Ils constatèrent que l'intervalle moyen entre des éclairs issus d'un champ de 33 kHz est de 33 microsecondes avec une fluctuation de seulement 50 picosecondes sur une période de 100.000 cycles. Cette stabilité dépasse largement celle du générateur de fréquence acoustique utilisé.

Imaginez une simple horloge mécanique qui sonnerait un coup par

semaine et pour laquelle l'intervalle séparant deux coups successifs ne varierait pas d'une seconde semaine après semaine pendant 2000 ans. C'est la précision de ces intervalles — une précision qui ferait le bonheur de n'importe quel horloger !

Les mesures sur la sonoluminescence

La Naval Postgraduate School de Monterey en Californie est un autre laboratoire où s'effectuent des recherches en sonoluminescence. Anthony Atchley, qui a passé son doctorat à l'Université du Mississippi et qui y a connu les travaux de Gaitan sur la sonoluminescence monobulle, a invité ce dernier à poursuivre ses recherches à la Postgraduate School.

Atchley et ses collègues travaillent sur trois domaines : les mesures sur le spectre optique de la sonoluminescence, sur la taille de la bulle et sur la durée de l'impulsion.

Sur les mesures spectrales, ils s'intéressèrent à différents liquides sonoluminescents, principalement à l'eau et à des mélanges d'eau et de glycérine. Le spectre mesuré est large et augmente en intensité vers les ultraviolets, ce qui est cohérent avec ce que d'autres chercheurs avaient observé.

Le spectre fut mesuré en plaçant une fibre optique de quartz près de la bulle afin d'essayer d'éliminer l'absorption lumineuse due à l'eau. Cependant, le quartz n'apporta pas un grand avantage. Atchley explique que l'eau absorbe les longueurs d'onde inférieures à 210 ou 200 nanomètres (10^{-9} m) alors que le quartz coupe aux environs de 170 nm. Dans tous les cas, il subsiste un peu d'eau entre l'extrémité de la fibre optique et la bulle.

Selon Atchley, « les expérimentateurs cherchaient à réduire cette distance d'un facteur de 2, afin d'atténuer le moins possible les ultraviolets et de voir ce qui se passe ».

Un autre champ d'expérimentations est la mesure de la taille des

bulles par une technique de dispersion laser. La bulle, qui disperse la lumière, est illuminée par un laser. Deux détecteurs dont la position angulaire est connue avec une grande précision sont utilisés pour mesurer cette dispersion. La mesure ainsi réalisée permet alors de déterminer la taille de la bulle. En se servant d'un laser pulsé, l'équipe de Atchley put observer la bulle à différents moments de son cycle.

Ils parvinrent à mesurer la taille de la bulle dans les 10 nanosecondes qui précèdent la contraction finale et l'émission. Atchley ajoute que « bien sûr c'est à ce moment que se produit ce qui est intéressant ». La bulle a alors un rayon de l'ordre du micron. Plus près de l'émission, la bulle est si petite que son diamètre approche la longueur d'onde du laser et que le signal de dispersion devient très faible.

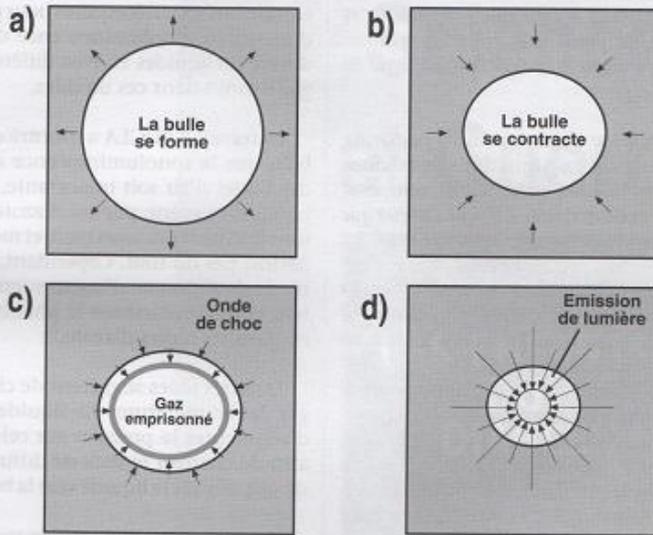
Le troisième champ de recherche concerne la mesure de la durée de l'impulsion. Les chercheurs de la Postgraduate School eurent besoin de l'aide de Michael Moran de Lawrence Livermore pour mesurer le spectre optique de la sonoluminescence et la dépendance temporelle des émissions. Cependant, même avec les caméras ultra-rapides disponibles à Livermore, la durée de l'impulsion ne put être mesurée de manière définitive.

Les résultats indiquèrent que l'impulsion était très rapide, sans doute moins que les 50 picosecondes que d'autres chercheurs avaient mesuré. Moran explique que « l'instrument de mesure était poussé aux limites de ses possibilités, et donc qu'il était impossible d'avoir un résultat très précis ».

Modèles informatiques

Suslick constate que jusqu'à maintenant, il n'existe aucune mesure expérimentale de la température dans la sonoluminescence monobulle. Les températures et pressions rapportées sont basées pour la plupart sur des calculs théoriques. Le problème qu'il

Faire de la lumière à partir du son



a) L'onde sonore crée une zone de basse pression, les molécules d'eau s'écartent, formant une bulle.

b) La pression de l'onde sonore augmente, les gaz sont comprimés au fur et à mesure que la bulle se contracte.

c) La contraction de la bulle s'accélère et génère une onde de choc, ce qui accroît la compression et l'élévation de température du gaz emprisonné.

d) L'onde de choc éclate au centre de la bulle. La température et la pression sont très élevées. De la lumière est émise.

voit est que, bien que les modèles d'ondes de choc conviennent à une échelle macroscopique, ils ne sont pas adaptés pour des dimensions nanométriques, plus particulièrement pour des gaz à des pressions et des températures aussi élevées. « Il y a une raison pour laquelle le département de l'énergie de Livermore et Los Alamos a toujours eu des ordinateurs au niveau de l'état de l'art », explique Suslick, « c'est parce que les codes de calculs des bombes sont parmi les programmes les plus complexes de la planète ».

William Moss de Lawrence Livermore est d'accord avec cet avis. Il est important pour lui qu'en faisant des recherches sur la sonoluminescence, ils puissent utiliser le savoir-faire des programmes d'armes nucléaires, acquis en laboratoire pendant les quarante dernières années. Compte tenu de la compétence théorique, informatique et expérimentale, Livermore est, d'après Moss, « le meilleur endroit pour faire ce travail ».

Moss a fait des calculs, parmi les plus complexes à ce jour, pour dater la croissance et la contraction de la bulle. Il a réalisé des simulations d'hy-

drodynamique non linéaire totalement compressible, qui s'appuient sur les équations d'état des gaz et qui prennent aussi en compte la présence du liquide et même du récipient en verre, ceci dans un effort de se rapprocher le mieux possible de la réalité. Moss a démarré avec un programme d'hydrodynamique standard, mais utilise maintenant des programmes de codes d'armes « qui sont un peu mieux optimisés pour ce genre de problème ».

Ondes de choc

Quand une bulle se contracte, une onde de choc est engendrée, et éclate dans le centre de la bulle. D'après les calculs, le rayon de la bulle est d'un demi-micron. C'est seulement en son centre que la température est vraiment élevée — entre 100.000 et 1.000.000 de degrés, d'après les calculs de Moss — avec des pressions atteignant 100.000.000 d'atmosphères. Ces conditions durent environ 10 picosecondes, temps pendant lequel l'onde de choc percute et se propage.

Moss pense que la rapidité de la propagation est une conséquence du potentiel intermoléculaire ; c'est-à-dire que lorsque les atomes sont poussés très près les uns des autres, les forces de répulsion entre eux deviennent plus importantes, ce qui est aussi la cause de la faible durée du cycle. « Ce dont nous parlons », explique Moss, « ce n'est que de processus mécaniques ».

Moss remarque qu'un moyen de contrôler la température est l'ionisation. L'ionisation déplace des électrons, et donc de l'énergie — qui autrement se transformerait en chaleur. Ainsi un corps qui s'ionise notablement ne s'échauffera pas autant qu'un corps qui s'ionise moins.

Cette constatation conduisit Moss et Moran à s'intéresser au deutérium, un isotope de l'hydrogène : il n'a qu'un seul électron. On pensait qu'une fois l'électron parti, l'énergie élèverait la température en rendant le deutérium plus chaud que l'air.

Malheureusement, il s'avère que le deutérium est beaucoup plus compressible que l'air à haute densité et

donc qu'il est beaucoup plus difficile à échauffer dans les mêmes conditions expérimentales. Les calculs montrent que l'air s'échauffera davantage parce qu'il a un potentiel de répulsion plus élevé.

Moss pense qu'un moyen de s'affranchir de cette limitation est de produire une impulsion sur le générateur acoustique. En produisant une pointe de pression bien synchronisée avec le maximum d'amplitude du champ oscillatoire, on pourrait « donner à la bulle une bonne secousse au bon moment ». Ses calculs ont montré qu'une telle approche produirait beaucoup d'effet, mais ceci reste à réaliser expérimentalement.

Sonofusion ?

Ce processus de recherche les conduisit à lancer des expériences sur le deutérium et à s'intéresser aux possibilités de « fusion éloignée », comme le dit Moss.

En comparant la sonoluminescence et la fusion à confinement inertiel, on trouve certaines similarités, mais aussi de grandes différences. Il y a une énorme quantité de matériel dans une cible à fusion, par rapport à une bulle sonoluminescente. Les températures et densités sont aussi beaucoup plus élevées pour une cible à fusion.

Mais la différence importante, que Moss reconnaît, est que la fusion laser fonctionne : il se produit bel et bien un phénomène de fusion nucléaire. Cependant Moss ajoute :

« Pour être aussi optimiste que nous pouvons l'être et scientifiquement honnête, je dirais que nous pensons avoir montré qu'il n'est pas impossible d'obtenir de la fusion de cette manière » (par sonoluminescence, NdT).

Bien que Moss soit plein d'espoir, il dit que même si la fusion ne pouvait avoir lieu, il y aurait là une mine de richesses pour la physique. « Il me semble que l'on n'y perd rien d'un point de vue scientifique ».

Pour Suslick, la possibilité de fusion à partir de la sonoluminescence reste une question ouverte : « Jusqu'à ce jour, personne n'a détecté de neutrons, personne n'a produit un excès d'énergie par rapport à celle que l'on fournit et donc, je pense que nous en sommes encore à une étape où l'on est tenté de tout espérer ».

Atchley remarque que personne ne connaît les limitations de la sonoluminescence en terme de température et de densité. « Il peut s'avérer que les limitations soient exactement les mêmes que celles sur lesquelles butent les gens qui font des recherches dans la fusion ». Cependant il ajoute qu'« il est possible que les bulles soient un excellent environnement à symétrie sphérique auquel les gens n'ont pas pensé jusqu'alors pour faire ce type de travail ».

D'un point de vue plus large, Atchley note que la sonoluminescence met dans les mains des chercheurs un nouveau domaine, une région qui n'a pas été explorée, en général, à ce jour. « C'est une fenêtre différente sur le monde, et qui sait ce que l'on trouvera avec ça ? ».

L'étape suivante

Dans quelle direction la sonoluminescence s'oriente-t-elle donc ? Il existe un grand nombre d'idées pour renforcer le phénomène afin de mieux l'étudier. Pour réaliser une plus grosse bulle, — avec l'idée qu'une plus grande quantité de gaz produira plus de lumière — Suslick suggère de travailler à des fréquences plus basses. Presque tous les phénomènes de sonoluminescence monobulle ont eu lieu dans la bande 20-40 kHz. L'un des problèmes est que lorsque la bulle devient plus grosse, elle devient plus sujette à des déformations structurelles, ce qui limite la taille pouvant imposer sphériquement.

La limitation actuelle est que la bulle est suffisamment brillante pour être visible à l'œil nu mais trop pâle pour être détectée par certains instruments. Si la bulle était plus brillante,

elle permettrait des mesures plus précises.

Une autre approche proposée par Atchley est de déterminer quelles conditions sont nécessaires pour produire de la sonoluminescence dans différents liquides et avec différents gaz dissous dans ces liquides.

Le travail à l'UCLA a montré que, bien que la sonoluminescence avec des bulles d'air soit importante, des bulles d'oxygène pur ou d'azote ne fonctionnent pas aussi bien, et même parfois pas du tout. Cependant, des traces de xénon ou d'argon augmentent considérablement le phénomène dans les bulles d'azote.

D'autres idées suggèrent de changer la température du liquide ou d'augmenter la pression sur celui-ci afin de changer le taux de diffusion du gaz, depuis le liquide vers la bulle.

Une approche qui semble ne pas fonctionner consisterait simplement à renforcer le champ sonore. Apparemment, il n'existe qu'un champ assez étroit d'amplitudes sonores, pour lequel la bulle est stable. « Si l'amplitude est trop faible, la bulle ne brille pas » dit Atchley et, « si l'amplitude est trop forte, la bulle disparaît ». Ainsi, le problème est le suivant : comment peut-on concentrer plus efficacement de l'énergie dans la bulle ? Moss avec son approche de génération d'impulsions pourrait fournir la solution. ■

Références

- Lawrence A. Crum, « Sonoluminescence », *Physics today*, (sept.) pp22-29, 1994.
- R.A.Hiller et BP Barber, « Producing light from a bubble of air », *Scientific American*, (fév.) pp96-98, 1995.
- Seth J. Putterman, « Sonoluminescence : Sound into light », *Scientific American*, (fév.) pp47-51, 1995.
- Kenneth S. Suslick, ed., *Ultrasound : its chemical, physical and biological effects*, New York : VCH Publishers, 1988.
- Carol White, « Sonoluminescence Sheds New Light on Physics », *21st century*, (Winter) pp26-32, 1991.