

UN RÉFRIGÉRATEUR SONORE

« Lorsque la lumière de ce soleil rouge disparut à l'horizon, Wayne craqua une allumette et titilla la mère de notre petite lampe à pétrole. La lumière éclaboussa la terrasse. Me laissant bercer par la douceur d'une clarté retrouvée, un petit bruit de narine me parvint aux oreilles ; mais Wayne ne dormait pas et se grattait la barbe. Puis s'amplifiant, la note continua quelques minutes, comme sortie d'une flûte de Pan. Pourtant, pas un poncho au fond de ce Far West. Encore un des mystères de l'Ouest. » Encore plus mystérieux est que cette note aurait peut-être pu leur permettre de boire une bière bien fraîche en plein désert. Mais quel rapport entre la mélodie d'une flûte de Pan et une bière bien fraîche ? C'est que rafraîchir une bière avec une flûte de Pan, c'est le Pérou ! Et à l'IPN, nous aimerions y parvenir via la thermoacoustique.

L'adjectif «thermoacoustique» qualifie les phénomènes faisant interagir la propagation d'une onde acoustique et des effets thermiques, c'est-à-dire son et chaleur. C'est le cas par exemple lorsqu'un bruit est généré dans un pot catalytique, peu après le démarrage d'une voiture. Ces effets, souvent gênants peuvent être parfois dévastateurs. Ainsi, dans le domaine de la cryogénie, les ondes dites de Taconis sont engendrées lorsqu'un tube est partiellement immergé dans un bain d'hélium liquide. La différence de température entre la partie immergée dans le liquide (froid) et celle qui reste à «l'hélium libre», produit alors un son dans ce tube. L'aspect néfaste est que cette production de son s'accompagne d'un transport de chaleur en direction du bain. Cet apport peut être important et entraîner une vaporisation désastreuse du bain. Le côté positif est que le son émis peut servir à indiquer la présence du bain d'hélium liquide lorsqu'on y plonge l'extrémité d'un tube. C'est le principe de la sonde de Taconis qui permet d'indiquer un niveau de liquide d'hélium.

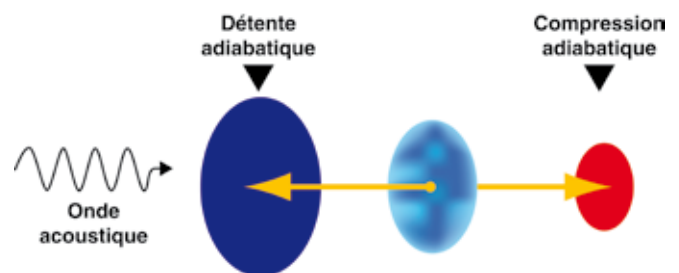
Cet exemple fait apparaître deux comportements thermoacoustiques distincts :

- une différence de température peut engendrer un son
- un son peut servir au transport de chaleur.

Considérer qu'une différence de température puisse servir à transporter de la chaleur n'est pas qu'une association d'idées mais une nouvelle idée ! Il s'agit par exemple de faire du froid avec du chaud via une onde. Vous obtenez alors un réfrigérateur thermoacoustique.

Où sonna l'heure de la thermoacoustique

Une onde sonore, ou son, est formée par de petites fluctuations de pression se déplaçant dans un milieu fluide ou solide. En se déplaçant, la membrane d'un haut-parleur ou un piston actionné par une bielle comprime puis détend un petit volume de fluide (un paquet de molécules de gaz) contre un volume voisin qui à son tour en comprime puis détend un autre... et ainsi de suite jusqu'à nos oreilles. Or un gaz comprimé



Volume de fluide soumis à une onde acoustique. Le fluide s'échauffe lors des phases de compression et se refroidit lors des phases de détente tout en se déplaçant en effectuant de petits allers et retours autour d'une position moyenne.

s'échauffe alors qu'un gaz détendu se refroidit. Chaque compression et détente d'un volume de gaz s'accompagne donc d'une élévation puis d'une baisse de température (illustration ci-dessus).

L'interaction du son et de la chaleur fut montrée pour la première fois il y a moins de deux siècles par le français Simon Laplace (1749-1827). Comprenant que le son en se déplaçant modifiait la température de l'air, il corrigea les calculs de sa vitesse réalisés un siècle auparavant par Isaac Newton (1642-1727). Depuis des siècles, les souffleurs de verre ont pu observer la naissance d'un "chant" au sein des tubes froids dont l'extrémité était chauffée par le verre en fusion. Là se présente l'autre manifestation de la thermoacoustique : la génération d'une onde acoustique au sein d'un résonateur par l'application d'un gradient de température. Ce phénomène fut décrit pour la première fois, et de façon expérimentale, en 1977 par Putman et Denis, grâce à l'excitation d'un tuyau d'orgue (ouvert aux deux bouts), au moyen d'une flamme à hydrogène judicieusement placée à l'intérieur. Mais les études les plus célèbres sont sans doute celles réalisées par Sondhauss, à partir de 1850 et par Rijke (1859), avec un tube résonant quart d'onde (c'est-à-dire une des deux extrémités ouverte), une flamme placée à l'intérieur. Expériences pouvant éclairer le son entendu par Wayne et Chuck...

Où l'homme eut vent de la musique thermoacoustique

La première théorie est attribuée à Lord Rayleigh (1842-1919) qui montra l'importance de l'existence d'un décalage temporel entre la pression et la température, base de l'effet thermoacoustique. Il claironna ainsi haut et fort la possibilité de soutenir un son en plaçant judicieusement une source de chaleur dans un tube. Mais l'ère de la thermoacoustique moderne fut ouverte un siècle plus tard par Nicolas Rott qui le premier mit en équations dans les années soixante le phénomène des ondes de Taconis. Au début des années quatre-vingt, Weathley du Los Alamos Laboratory (E-U) expérimenta le processus inverse : la génération d'une différence de température (un gradient de température) par l'application d'une onde acoustique sur une paroi. Ouvrant la voie vers des systèmes de type pompe à chaleur, ses travaux firent suite aux études menées par Gifford et Longworth (1963) qui employèrent des ondes à très basses fréquences (quelques Hertz) pour la production de froid dans des systèmes nommés tubes à gaz pulsé.

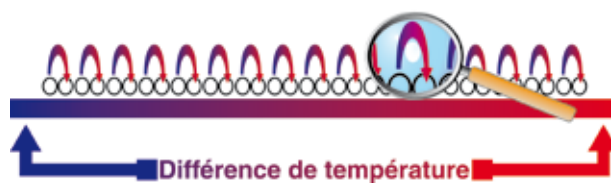
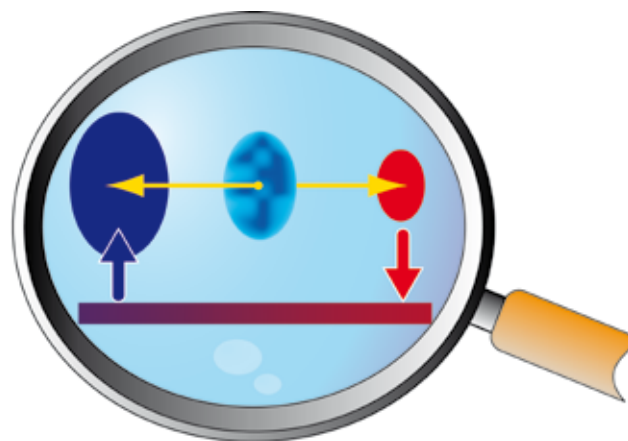
Un nouveau pas fut enfin franchi dans les années quatre-vingt par Hofler de la même équipe de Los Alamos qui réalisa le premier un générateur d'onde thermoacoustique à l'aide d'un tube quart d'onde et de l'emploi d'un solide poreux d'une grande importance : le régénérateur.

Où la musique rafraîchît sa bière

Cette équipe offrit également, par l'intermédiaire d'un de ses membres les plus éminents : Greg Swift, une description détaillée de la thermoacoustique. A travers l'étude d'un réfrigérateur thermoacoustique, le "beercooler", il établit en 1988 une théorie linéaire de ce phénomène, présentant l'importance du rapport des capacités thermiques entre le fluide dans lequel se propage l'onde acoustique et la paroi solide.

Mais comment ça marche ?

Comme nous l'avons dit, une onde de pression comprime des volumes de gaz voisins les uns contre les autres. Elle les fait également osciller autour d'une position moyenne. Ainsi, ils se retrouvent comprimés et chauds d'un côté de cette position à la fin d'une moitié de cycle et détendus et froids de l'autre côté de cette position à la fin du cycle (illustration page précédente). Ceci peut continuer longtemps sans que rien ne se passe. Mais si on introduit un milieu solide, une plaque métallique par exemple, celui-ci va jouer



Propagation d'une onde acoustique le long d'une paroi solide. Lors des phases de compression et de détente, de la chaleur est échangée avec la paroi conduisant à une différence de température aux extrémités de celle-ci.

le rôle d'accumulateur ou de ralentisseur thermique (illustration ci-dessus).

Ainsi à chaque phase de compression, le gaz échauffé donne de la chaleur à la paroi alors que lors des phases de détente il lui en prend. Avec du recul et en considérant l'ensemble de ces petits volumes élémentaires, on voit apparaître un transport de chaleur d'un bout à l'autre de la paroi. C'est ce transport de chaleur qui va créer une différence de température aux extrémités de cette plaque. Il suffit alors de mettre en bout de plaque des échangeurs de chaleur afin de pouvoir prendre de la chaleur d'un milieu donné (bière, sorbet ou gaz) pour le refroidir ou au contraire en donner (air, vapeur d'eau) pour le réchauffer.

Petits gestes grands effets

Reste que si avoir du coffre est un bon début, cela ne suffit pas. Car les fluctuations de pression (quelques dizaines de Pascal) émises par votre voix engendreront des variations de température de l'ordre de quelques dix-millièmes de degrés (0,0001°C) ! Hurler à tue-tête dans votre salon ne vous permettra donc pas de sortir anorak et ski, ambiance *Absolut Vodka*®. Autant dire que les variations de pression doivent être conséquentes ; c'est du gros son qu'il nous faut : de l'ordre du bar (100 000 Pascals). Un tube résonant dans lequel le son

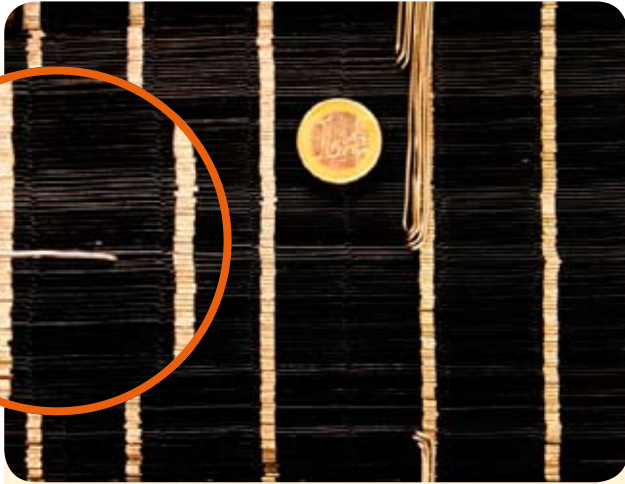
est amplifié est alors nécessaire. Il permet d'accroître les effets acoustiques de la même manière qu'un bruit de bouche est amplifié dans un didgeridoo. Mettre au préalable le gaz sous pression (quelques dizaines de

chaud ou du encore plus chaud avec du déjà chaud. Résumons : une source de chaleur permet de produire une onde qui à son tour va être utilisée pour faire du froid ou du chaud (illustration ci-dessous). Vers le succès on chauffe !

Faites le neuf

Mais rien de nouveau sous le soleil me direz-vous ; tout cela reste du réchauffé. D'une part, la source de chaleur est au libre choix de l'utilisateur : combustion de gaz ou de déchets, rayonnement solaire, etc. D'autre part, le système fonctionne sans aucune pièce mobile. Il est donc d'une manière générale extrêmement fiable et ne nécessite que très peu de maintenance. Autre facteur important en ces temps de prise de conscience de l'environnement, ces systèmes utilisent dans leurs tubes des gaz inertes pour l'environnement tel que l'hélium. Finis donc les affreux CFC polluants. D'autant plus que ces derniers, produisant du froid par changement de phase vapeur-liquide, ne permettaient d'atteindre qu'un seul niveau de température ; la régulation de la température s'effectuant par mise en route ou arrêt du système. Les systèmes thermoacoustiques ont cet avantage que la puissance thermique produite peut être modifiée et régulée en fonction de la puissance mise en entrée pour produire l'onde acoustique. De plus, il est possible de descendre à n'importe quelle température (cela peut nécessiter un ou plusieurs éléments en série) en fonction de la puissance mise en jeu.

in2p3-00274987, version 1 - 22 Apr 2008



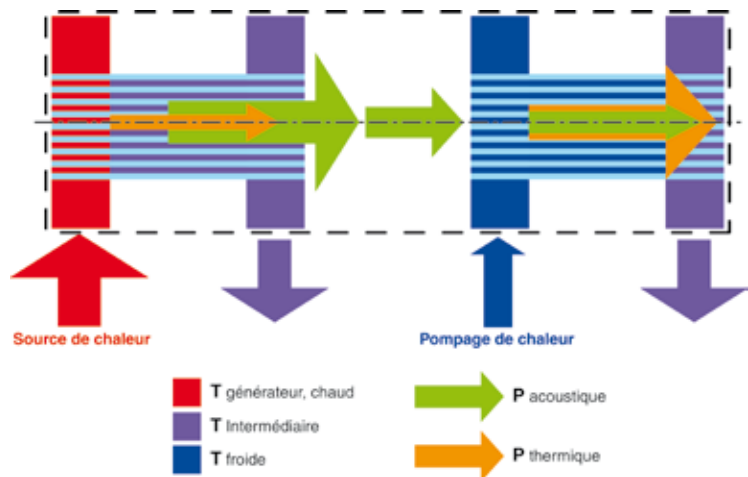
Empilement de plaques planes utilisé dans un système thermoacoustique.

bars) permet de découpler les variations de pression. Enfin, pour augmenter la puissance thermique transportée il faut accroître la surface d'interaction entre le fluide et le solide. Ceci conduit à augmenter le nombre de parois amenant à des empilements de plaques planes parallèles (photo ci-dessus) ou à l'utilisation de milieux poreux.

Couplage : la thermoacoustique sens dessus dessous

Reste que si le principe thermoacoustique est relativement simple, trouver la bonne source sonore reste un problème. Car la technologie actuelle des haut-parleurs n'est pas suffisante pour répondre de manière satisfaisante au besoin de cette technologie. Il faut avoir recours à un système plus puissant comme un moteur à piston, avec les difficultés technologiques que cela implique (non contamination du système par de l'huile, hautes fréquences mécaniques...). Cependant la thermoacoustique trouve là encore une parade puisque ce même principe, appliqué à l'envers, permet de créer une onde à partir d'une source de chaleur.

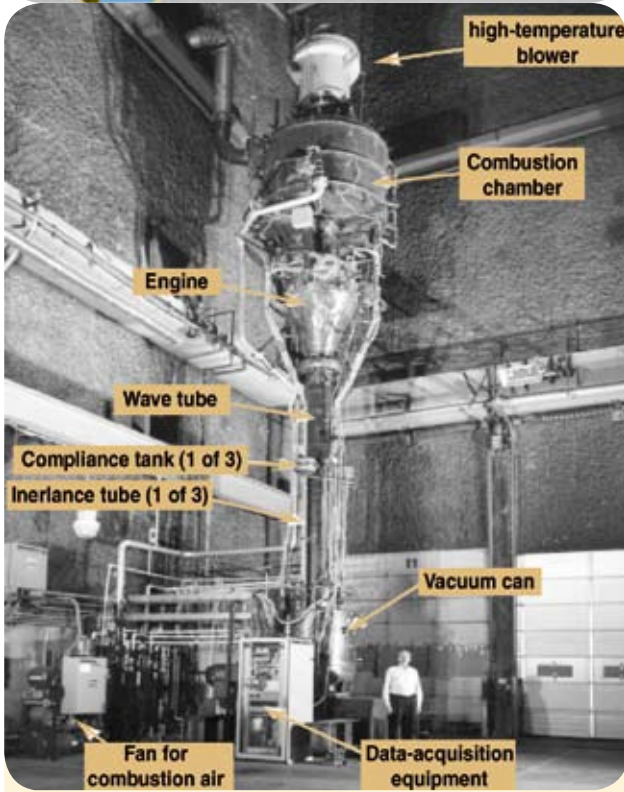
Il devient alors possible, par couplage d'un système de génération d'onde avec un système de pompe à chaleur tous deux thermoacoustiques de faire du froid avec du



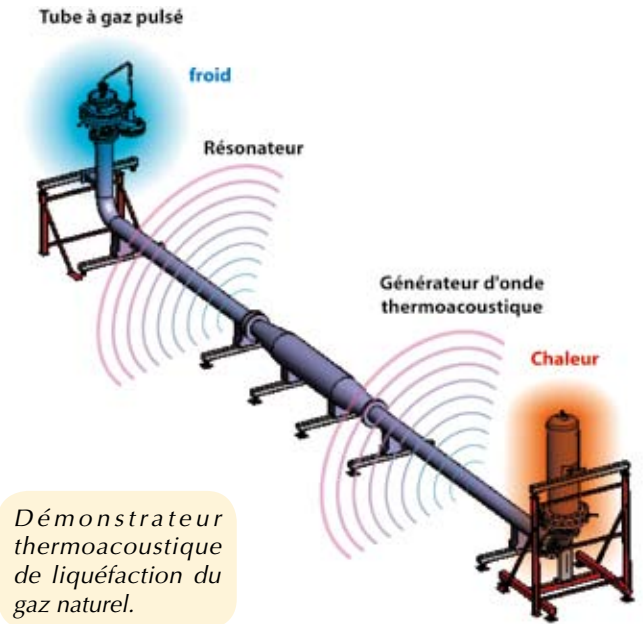
Réfrigérateur thermoacoustique ; un générateur d'onde thermoacoustique (gauche) utilise de la chaleur pour produire une onde qui permettra à son tour de pomper de la chaleur pour faire du froid (droite).

Applications

Aujourd'hui, la reconnaissance des enjeux économiques, écologiques de la thermoacoustique, ainsi que les nouveaux moyens d'analyse liés à l'informatique, font croître très rapidement les investigations dans ce domaine. D'autant que les applications sont nombreuses et portent aussi bien sur des marchés très ouverts que sur des niches technologiques. Ainsi, certains s'intéressent au refroidissement des serveurs utilisés en télécommunication, à celui des détecteurs embarqués dans le domaine spatial. D'autres s'occupent de récupérer et promouvoir la chaleur perdue dans les processus industriels... Et ça n'est pas du pipeau.



Concept américain et prototype d'unités embarquées de production de Gaz Naturel Liquéfié.



Démonstrateur thermoacoustique de liquéfaction du gaz naturel.

L'équipe de Steven Garret de la Penn State University a, par exemple, réalisé en 2003 le premier prototype de congélateur industriel pour la société Ben & Jerry en utilisant un moteur linéaire comme source acoustique.

Le procédé thermoacoustique peut également être utilisé pour la liquéfaction du gaz naturel. L'avantage d'un tel système dans ce domaine est d'utiliser une source de chaleur pour mettre en œuvre un processus de réfrigération. Ainsi, la combustion d'une petite partie du volume de gaz naturel considéré permet de liquéfier ou de maintenir à l'état liquide le reste du volume. Sont donc concernées des applications de plusieurs centaines de kilowatts de chaleur extraite correspondant à des mégawatts de puissance en source chaude. Avec presque trente ans d'expérience dans le domaine et après avoir envoyé un réfrigérateur thermoacoustique dans l'espace en collaboration avec la NASA, l'équipe du Los Alamos laboratory dirigée par Greg Swift tente de développer des systèmes de forte puissance pour des applications gazières. Sur le chemin du succès, cette équipe possède déjà des bancs expérimentaux impressionnants (photos ci-contre)

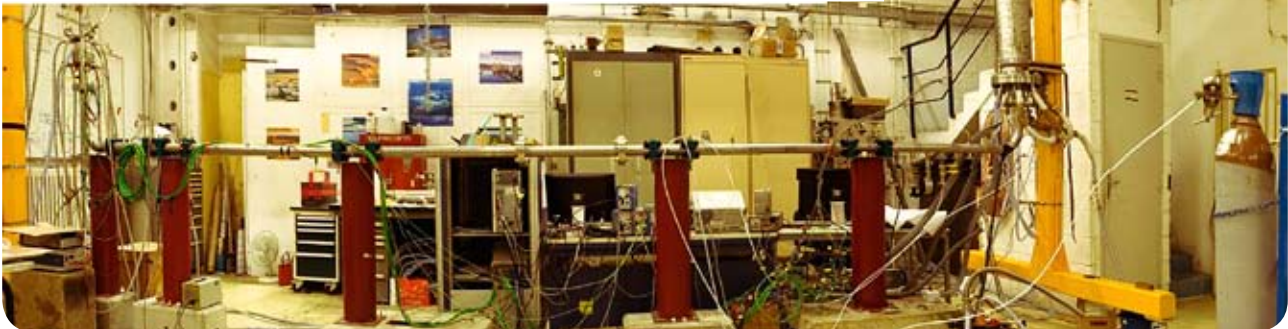
Plus modestement, l'IPN, en collaboration avec le LIMSI qui depuis une dizaine d'années développe des activités de recherche en thermoacoustique, réalise un système destiné à être un démonstrateur de liquéfaction de gaz naturel (photos ci-contre). Financé par le CNRS, le Conseil Général de l'Essonne, Oséo (ANVAR), les Universités de Paris 6 et 11, il doit permettre la démonstration de la faisabilité d'une telle technologie à une échelle intermédiaire entre le banc expérimental de recherche fondamentale et le prototype industriel ; l'objectif de puissance thermique extraite est ici de 2kW à une température de 120K.

Après deux ans de calculs et de fabrication, le générateur thermoacoustique d'onde a été monté au bâtiment 109 fin 2005 et est actuellement en cours d'essai (page suivante, photos en haut).



◀ Générateur thermoacoustique d'onde de l'IPN en cours de montage et installé au bâtiment 109.

Banc d'amplification thermoacoustique d'onde au bâtiment 103.



Par ailleurs, en association avec la société Hekyom et l'Institut Français du Pétrole, l'IPN a développé et réalisé un banc expérimental d'amplification thermoacoustique qui est en service au bâtiment 103 (photo ci-dessus en bas). Son objectif est de générer puis amplifier une onde au moyen de la technologie acoustique afin d'obtenir une source thermique à fort rendement.

Une première étape vient donc d'être franchie en doublant la puissance acoustique produite par un générateur simple en utilisant un deuxième étage amplificateur.

La thermoacoustique pourrait également trouver un avenir commun avec les accélérateurs de nouvelle génération, pour lesquels elle userait de ses talents de fiabilité, de niveau de température variable afin par exemple de refroidir des détecteurs même en environnement contraignant.

De par le monde, de nombreuses équipes se lancent actuellement dans des divers projets, témoignant d'un intérêt croissant pour cette technologie. Les développements sont aussi intéressants que nombreux et la compétition s'accroît. Alors un grand avenir pour la thermoacoustique ? Pour les trente prochaines années nous l'espérons.

Contacts : Patxi Duthil
duthil@ipno.in2p3.fr

in2p3-00274987, version 1 - 22 Apr 2008