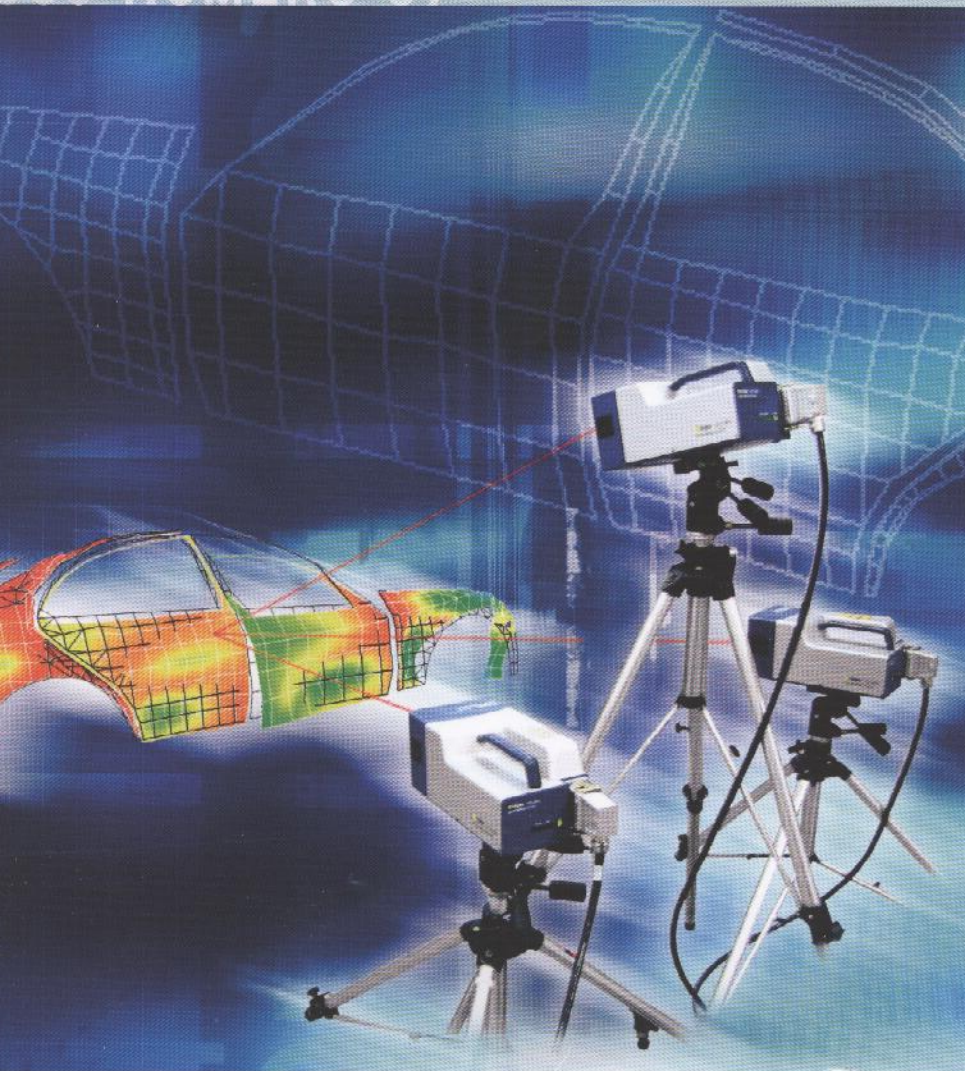


# Acoustique & Techniques

TRIMESTRIEL D'INFORMATION  
DES PROFESSIONNELS DE L'ACOUSTIQUE

09 NUMÉRO 57



## DOSSIER SPÉCIAL : « VIBRATIONS - PARTIE 1 »

Comment capter les vibrations ?

P. Fayet

Capteurs résonants M/NEMS  
et phénomènes non linéaires

N. Kacem et al.

Accélération des essais en environnement  
mécanique. Apports de la simulation  
numérique à l'approche physique

A. Halfpenny et F. Kihm

L'analyse modale expérimentale

J. Lau

Caractérisation dynamique des matériaux  
et réduction des nuisances vibroacoustiques :  
l'apport des vibrations. Partie 1

B. Duperray

Machines thermoacoustiques

G. Penelet et al.

PUBLICATION



Centre d'Information  
et de Documentation  
sur le Bruit



Avec le concours  
de la Société Française  
d'Acoustique

57

NUMÉRO

# Machines thermoacoustiques

**Guillaume Penelet,  
Pierrick Lotton,  
Michel Bruneau**

Laboratoire d'Acoustique de l'Université  
du Maine  
UMR-CNRS 6613  
6087, avenue Olivier Messiaen  
72085 Le Mans CEDEX 09  
E-mail : pierrick.lotton@univ-lemans.fr

**Philippe Blanc-Benon**

Laboratoire de Mécanique des Fluides  
et d'Acoustique, UMR-CNRS 5509  
Ecole Centrale de Lyon  
Centre acoustique  
36, avenue Guy de Conllongue  
69134 Ecully Cedex  
E-mail : philippe.blanc-benon@ec-lyon.fr

**Vitaly Gusev**

Laboratoire de Physique de l'Etat Condensé  
UMR-CNRS 6687  
6087, avenue Olivier Messiaen  
72085 Le Mans CEDEX 09  
E-mail : vitaly.gusev@univ-lemans.fr

## Résumé

L'objet de l'article est de montrer comment les propriétés acoustiques des gaz compressibles, compte tenu de leurs effets de viscosité et de conduction thermique au voisinage des parois de matériaux à pores ouverts (empilements de plaques ou juxtaposition de tubes ouverts par exemple, couramment désignés par l'anglicisme «stack»), peuvent être exploitées en pratique pour réaliser de nouveaux systèmes thermiques : réfrigérateurs, pompes à chaleur et générateurs thermoacoustiques. Les phénomènes physiques qui prennent place dans les couches limites au voisinage des parois du stack sont à l'origine de flux thermiques le long des parois, qui se traduisent par l'établissement et l'accroissement d'un gradient de température au cours de chaque cycle acoustique ; c'est le processus de fonctionnement du réfrigérateur ou de la pompe à chaleur. Si un gradient de température suffisamment élevé est maintenu le long des parois du stack par un couple de sources thermiques (froide et chaude), le flux de chaleur est inversé et la machine devient un générateur thermoacoustique («moteur thermique»), ce qui signifie que le système crée de l'énergie acoustique à partir d'énergie thermique. Ce type de générateur thermoacoustique, alimenté en énergie thermique d'origine quelconque, peut être utilisé pour fournir l'énergie acoustique nécessaire au fonctionnement d'un réfrigérateur thermoacoustique. Quelques systèmes thermoacoustiques et leurs applications possibles commencent à voir le jour, mais leur optimisation soulève encore de nombreux problèmes.



L'objet de cet article est de rappeler certaines propriétés acoustiques des fluides compressibles, en mettant en évidence leurs propriétés réactives et dissipatives liées à la viscosité et surtout à la conduction thermique près des parois, en particulier à l'intérieur de matériaux poreux, et par delà d'expliquer comment faire usage de ces propriétés en pratique pour réaliser des réfrigérateurs, des pompes à chaleur et des générateurs thermoacoustiques.

Chaque particule de fluide (volume élémentaire  $dV$  de gaz) située au voisinage immédiat d'une paroi échange de la chaleur par diffusion thermique avec la paroi du fait que sa température évolue au cours du cycle acoustique (l'écart instantané de température du gaz évolue de concert avec l'écart instantané de pression acoustique). Ce transfert de chaleur (en va et vient entre le gaz et la paroi au cours de chaque cycle) ne prend place que sur une très fine couche de fluide au niveau de la paroi, appelée couche limite thermique dont l'épaisseur, qui dépend de la fréquence, est comprise entre 10 et 100 micromètres dans le domaine des fréquences audibles. Par ailleurs, du fait de la viscosité du gaz, la condition de non glissement des particules de gaz sur la paroi est à l'origine d'une déformation de cisaillement sur une courte distance de la paroi appelée épaisseur de couche limite

visqueuse, qui est très voisine de l'épaisseur de la couche limite thermique mentionnée précédemment.

Les phénomènes thermiques qui prennent place dans les couches limites peuvent être exploités dans des matériaux poreux à pores ouverts (empilements de plaques, tubes capillaires ou autres), désignés ici par l'anglicisme «stack», pour réaliser des réfrigérateurs (ou pompes à chaleur) ou des générateurs thermo-acoustiques («moteurs»). Le transfert de chaleur continu (dans un sens donné) le long d'une paroi du stack (suivant un processus expliqué dans la suite) se traduit par l'établissement puis l'accroissement d'un gradient de température parallèle à la paroi, au cours de chaque cycle acoustique ; c'est le processus qui apparaît dans un réfrigérateur. Par contre, si un gradient de température suffisamment élevé est maintenu le long des parois par un couple de sources froide et chaude placées de part et d'autre du stack, le flux thermique est inversé et la machine thermique fonctionne alors en générateur thermoacoustique («moteur»), créant de l'énergie acoustique à partir d'énergie thermique (la particule voit son volume croître autour du maximum de pression et diminuer autour du minimum de pression) ; ce générateur thermoacoustique peut être utilisé pour créer l'énergie acoustique nécessaire au fonctionnement d'un réfrigérateur thermoacoustique (voir infra).

## Petite histoire

Il y a 140 ans (1868), Gustav Kirchhoff proposait une description complète des phénomènes de propagation acoustique linéaires en fluides au repos et thermo-visqueux (gaz dont les propriétés de viscosité et de conduction thermique sont prises en compte) [1]. Sa théorie repose sur l'équation de Navier-Stokes (qui traduit les effets d'inertie et de viscosité), l'équation de conduction de la chaleur de Fourier (qui remplace l'équation traduisant l'approximation de compressions/détentes adiabatiques au cours du cycle acoustique) et l'équation de conservation de la masse (qui traduit la compressibilité ici non adiabatique du fluide) ; Kirchhoff en donne les solutions en ondes planes et sphériques en milieu infini, faisant notamment apparaître les constantes de propagation, dont le facteur d'atténuation. De surcroît, écrivant que les particules de gaz qui touchent à une paroi doivent rester immobiles (condition de non glissement) et que leur évolution au cours du cycle acoustique reste isotherme (leur température reste celle, quasi invariante, de la paroi au cours du cycle acoustique), Kirchhoff donne les expressions des facteurs d'atténuation des ondes planes dans les tubes d'usage courant (instruments de musique à vent par exemple). Lord Rayleigh a repris en détail cette théorie de Kirchhoff dans son ouvrage «The theory of sound» [2].

En 1948 (80 années plus tard), Lothar Cremer [3] a montré que les effets de viscosité et de conduction thermique en paroi sur la réflexion d'une onde plane harmonique sur une paroi plane rigide infinie peuvent être pris en compte par un coefficient de réflexion complexe du mode de propagation acoustique, coefficient de réflexion qui traduit le déphasage et l'atténuation à la réflexion dus aux phénomènes (cisaillement et échanges thermiques avec la paroi) qui se développent dans les couches limites visqueuses et thermiques (dont les épaisseurs peuvent être considérées comme négligeables en ces circonstances). Par suite, Cremer a proposé de décrire les propriétés de la réflexion d'ondes planes sur des surfaces planes rigides en termes d'impédance de paroi, rapport de la pression acoustique sur la composante normale de la vitesse particulaire acoustique en paroi (non nulle car ne représentant plus la vitesse particulaire totale), qui dépend du coefficient de viscosité de cisaillement et du coefficient de conduction thermique, mais également de l'angle d'incidence (ce qui n'est pas usuel dans la notion d'impédance). L'extension des résultats de Kirchhoff et Cremer à des modes supérieurs dans des tubes et cavités a été donnée par plusieurs auteurs par la suite (voir par exemple [4 à 6]).

Au cours des deux dernières décennies, de nouvelles recherches sur les phénomènes qui se développent dans les couches limites thermo-visqueuses au voisinage de parois ont été menées, avec différents objectifs : la mesure de propriétés physiques de gaz comme constante de Boltzmann (par analyse des champs acoustiques en cavités quasi sphériques) [6], la modélisation d'effets d'inertie sur les couches limites visqueuses pour la mesure des vitesses de rotation (gyromètre acoustique) [7, 8], et l'analyse des phénomènes thermoacoustiques en vue de la réalisation de réfrigérateurs (ou pompes à chaleur) thermoacoustiques et de générateurs thermoacoustiques [9,10], tous les systèmes mentionnés ici ayant déjà fait

l'objet de maquettes et de prototypes (voire d'industrialisation) pour des applications pratiques. Ces phénomènes thermoacoustiques et leurs applications aux machines thermiques sont présentés plus en détail dans les paragraphes qui suivent.

## Thermoacoustique : les phénomènes physiques de base

La présentation des phénomènes thermoacoustiques de base qui suit est purement qualitative et volontairement simplifiée : il convient donc de noter qu'elle est de ce fait réductrice.

Tout repose au départ sur la notion de «particule» (au sens de la mécanique des fluides): une particule est un volume élémentaire de fluide dont les dimensions sont beaucoup plus petites que la plus petite longueur d'onde considérée et, plus généralement beaucoup plus petite que l'ensemble des dimensions caractéristiques qui apparaissent dans le formalisme (dont l'épaisseur des couches limites), mais dont les dimensions sont néanmoins telles que le milieu fluide se comporte comme un milieu continu.

Diminuer le volume de la particule (par effet d'une onde acoustique) se traduit par une augmentation de la pression et corrélativement une augmentation de sa température (loi de Lechâtelier), et inversement, augmenter le volume de la particule se traduit par une diminution de la pression et corrélativement une diminution de sa température. Le changement local de température du gaz provient de la quasi adiabaticité (à distance des parois) des compressions/détentes créées par le champ de pression acoustique. Champ de pression et champ de température (et champ de déplacement bien entendu) oscillent de concert en fonction du point et du temps : pour une transformation adiabatique dans l'air, à une fluctuation de pression  $p$  de 200 Pa (140 dB) est associée une fluctuation de température  $t$  de 0,2 K et un déplacement particulaire  $x$  de 100 mm environ à 1 kHz. En conséquence, des échanges thermiques entre la particule considérée et son environnement prennent place du fait de la conduction thermique (si faible soit-elle).

De surcroît, une particule située au voisinage immédiat d'une paroi (figure 1, page suivante) est le siège d'échanges thermiques cycliques avec la paroi : ces échanges prennent place uniquement au voisinage de la paroi, à l'intérieur de ce qu'il convient d'appeler la couche limite thermique (dont l'épaisseur est approximativement comprise entre 10 et 100 micronmètres dans le domaine de fréquence usuel, l'audible). Par ailleurs, du fait de la viscosité du gaz, la condition de non glissement sur la paroi se traduit par un champ de déformation sur une distance à la paroi très faible appelée épaisseur de la couche limite visqueuse, qui est du même ordre de grandeur que l'épaisseur de la couche limite thermique mentionnée ci-dessus.

Les phénomènes visqueux et thermiques qui prennent place dans les couches limites tirent leur énergie du mouvement acoustique lui-même et donnent naissance à deux nouveaux modes de vitesse particulaire, le mode dit entropique (indice  $h$  sur la figure 1), associé aux phéno-

mènes thermiques et le mode dit de «vorticité» (mode de cisaillement, indice  $v$  sur la figure). Par suite, en particulier, une composante normale de la vitesse particulière apparaît qui provient des processus de diffusions du mouvement thermique et du mouvement de cisaillement qui prennent naissance sur la paroi. Ainsi, par exemple, la composante suivant l'axe « $u$ » normal à la paroi (située en  $u = s$ ) de la vitesse particulière totale  $v_u(u)$  (indice « $n$ » sur la figure) est proportionnelle à la pression acoustique « $p$ » et est donnée par l'équation (1) dans le cas d'un mouvement harmonique :

$$v_u(u) = v_u(s) + \left\{ \frac{k_{0w}^2}{k_v^2} \frac{1}{k_v} [\psi_v(-ik_v u) - \psi_v(-ik_v s)] + \frac{\gamma - 1}{k_h} [\psi_h(-ik_h u) - \psi_h(-ik_h s)] \right\} \frac{\omega}{\rho_0 c_0^2} p \quad (1)$$

où les fonctions  $\psi_v(-ik_v u)$  et  $\psi_h(-ik_h u)$  représentent respectivement le champ de vitesse de vorticité ( $v_v$ ) et le champ de vitesse entropique ( $V_h$ ) qui tendent tous deux vers zéro aux distances respectives

$$\delta_v = \sqrt{2/|k_v|} \quad \text{et} \quad \delta_h = \sqrt{2/|k_h|}$$

de la paroi (épaisseurs des couches limites visqueuse et thermique), et où la somme des fonctions qui dépendent de la coordonnée « $s$ » représente le champ de vitesse particulière associé aux effets de viscosité, de conduction thermique et acoustique sur la paroi (ce dernier  $v_u(s)$  étant nul sur une paroi rigide),  $k_{0w}$  représentant la composante tangentielle à la paroi du nombre d'onde.

$$k_0(k_{0w}^2 = -\Delta_w^2)$$

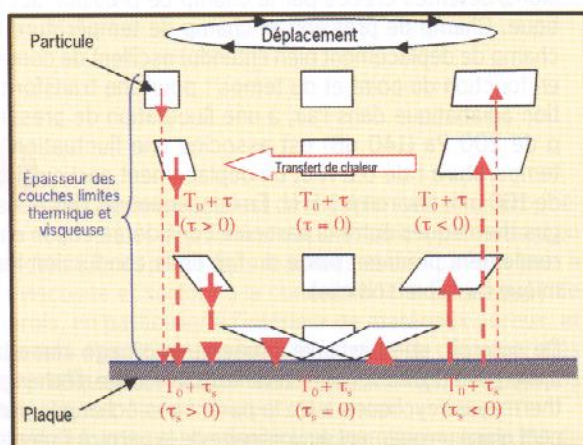


Fig. 1 : Mouvement d'une particule et flux de chaleur (flèches rouges) au voisinage d'une paroi

Comme mentionné précédemment, ces couches limites agissent sur la réflexion du champ de vitesse particulière de la même manière qu'un matériau dissipatif et réactif dont l'impédance serait finie. Mais de surcroît, ces phénomènes qui se développent dans les couches limites visqueuses et thermiques peuvent être exploités pour créer des phénomènes thermoacoustiques conduisant à des applications en termes de machines thermiques, réfrigérateurs, pompes à chaleur et générateurs (moteurs).

## Le phénomène thermoacoustique

De façon classique, il est coutume de penser onde acoustique dans les gaz en termes de déplacement particulière et d'écart instantané de pression couplés l'un à l'autre. Cependant, comme relaté ci-dessus, des oscillations de température accompagnent toujours les oscillations de pression (et de position). La combinaison de toutes ces oscillations, et leur interaction avec les parois rigides, compte tenu des effets visqueux et thermiques, sont à l'origine de divers effets. Bien que ces effets soient trop petits pour être perçus dans les applications courantes, ils peuvent être exploités pour réaliser des machines thermiques (thermoacoustiques) performantes [9-14] ou des systèmes thermoacoustiques utilisés à des fins de métrologie [6-8]. Les applications relevant de la thermoacoustique sont présentées au paragraphe 4 ci-dessous.

Lorsqu'une particule de fluide décrit un mouvement de va-et-vient le long d'une paroi (figure 1), un processus thermoacoustique apparaît. D'abord, quand la particule est dans des positions situées à gauche de sa position d'équilibre (figure 1), un transfert de chaleur allant du gaz vers la paroi apparaît, car la température de la particule de gaz s'est élevée à une valeur supérieure à la température locale de la paroi du fait de la compression quasi adiabatique imposée par l'onde acoustique entretenue en cet endroit. De façon similaire, au cours de la demi-alternance suivante, quand la particule est dans des positions situées à droite de sa position d'équilibre (figure 1), un transfert de chaleur allant en sens inverse (de la paroi vers le gaz) apparaît, car la température de la particule de gaz se trouve abaissée à une valeur inférieure à la température locale de la paroi du fait de la détente quasi adiabatique imposée par l'onde acoustique en cet endroit. De la sorte, au cours d'un cycle, la particule de gaz assure le transport d'une petite quantité de chaleur de la droite vers la gauche le long de la paroi (traduit dans les équations de la chaleur par la dérivée temporelle particulière en représentation d'Euler) ; de la sorte un gradient de température s'établit au cours du temps. C'est le processus qui est mis en œuvre dans un réfrigérateur thermoacoustique, l'énergie nécessaire à l'entretien du phénomène provenant de la source du champ acoustique.

Si un gradient de température élevé est maintenu le long de la paroi (par un couple de sources chaude et froide), les flux de chaleur mentionnés ci-dessus sont inversés et la fonction de la «machine» est inversée : elle passe de la fonction «réfrigérateur» (ou «pompe à chaleur») à la fonction «moteur», c'est-à-dire ici à la fonction «générateur» (création d'un champ acoustique à partir d'énergie thermique). De l'énergie acoustique est créée du fait que la particule est détendue (augmentation de son volume) globalement pendant une phase de surpression (écart instantané de pression positif dû à l'apport de chaleur provenant de la paroi) et comprimée (diminution de son volume) pendant une phase où l'écart instantané de pression est négatif (dû au transfert de chaleur vers la paroi). Pendant la première phase citée elle restitue donc à son environnement plus d'énergie qu'elle en a accumulée pendant la phase de compression qui précédait (il y a donc création d'énergie acoustique à partir de l'énergie thermique fournie par les sources qui maintiennent le gradient de température élevé le long du stack). Cet effet de génération d'un champ acoustique à partir de sources de chaleur (quelle que soit leur origine) peut être exploité pour alimenter en énergie acoustique un réfrigérateur thermoacoustique.

## Application aux machines thermoacoustiques : réfrigérateurs, pompes à chaleur, générateurs acoustiques (moteurs)

Les éléments de base qui constituent les réfrigérateurs ou les générateurs thermoacoustiques (figure 2) sont agencés de manière à réaliser un champ acoustique de niveau élevé, dont la relation de phase entre écart instantané de température et déplacement particulaire est optimale pour favoriser les couplages entre phénomènes acoustiques et thermiques dans les couches limites thermiques au voisinage immédiat de parois solides (figure 3) : une colonne de gaz contenue dans un guide d'onde acoustique est le siège d'une résonance demi onde, un empilement de plaque ou un ensemble de canaux (désignés par l'anglicisme «stack») est placé à l'intérieur du guide dans une zone où pression acoustique et déplacement particulaire acoustique sont importants (donc hors des noeuds de chacun d'eux), deux échangeurs thermiques sont placés aux extrémités du stack, et, dans le cas du réfrigérateur (ou pompe à chaleur), un haut-parleur est placé à une extrémité du tube. Le stack (par exemple une superposition de plaques minces, séparées par une distance de l'ordre de grandeur de l'épaisseur des couches limites thermiques) occupe toute une section du guide sur une longueur inférieure au quart de la longueur d'onde ; il permet d'assurer une surface de contact solide/gaz maximale et par suite d'optimiser le couplage acousto-thermique à l'intérieur des couches limites.

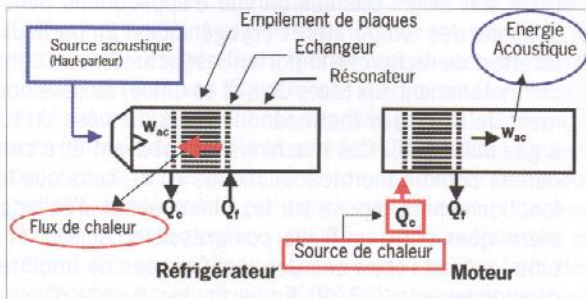


Fig. 2 : Machines thermoacoustiques – schémas de principe

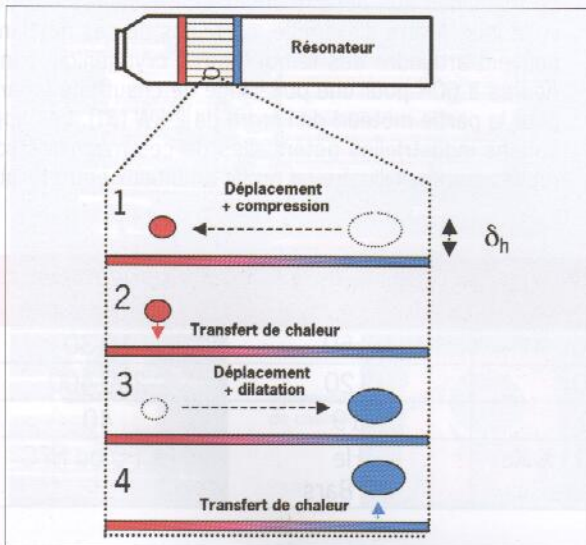


Fig. 3 : Réfrigération thermoacoustique – principe

Les machines thermoacoustiques présentent un certain nombre de caractéristiques qui les rendent intéressantes dans diverses applications, comme leur simplicité de mise en œuvre, leur haute fiabilité, leur efficacité ou leur rendement de bon niveau, leur faible coût à la production, leur neutralité en termes de pollution environnementale, leur compacité possible, etc. En contrepartie, elles impliquent des phénomènes physiques complexes en raison des niveaux acoustiques élevés générés à l'intérieur du résonateur et des couplages avec les phénomènes thermiques qui prennent place. La thermoacoustique possède déjà une longue histoire, mais elle ne concerne les machines thermiques réelles que depuis une vingtaine d'années seulement. C'est ainsi qu'aujourd'hui, pour appréhender les systèmes réels dans toute leur complexité, les études portent sur les interactions entre les ondes acoustiques fortement non linéaires et les ondes de température (elles-mêmes non linéaires), ceci dans les couches limites thermo-visqueuses au niveau des interfaces solide/gaz, aux bords du stack, dans les échangeurs, et dans le résonateur ; autant de phénomènes qui interviennent dans les transports thermiques ou les conversions d'énergie thermique/acoustique recherchés. Plus précisément, ces transports thermiques et conversions d'énergie sont profondément influencés par les phénomènes non linéaires (et leurs interactions), tels les ondes thermiques non linéaires qui accompagnent les ondes acoustiques sinusoïdales [15], les conductivités thermiques augmentées par effets acoustiques [16], les écoulements acoustiques redressés qui modifient profondément les phénomènes dans le résonateur par des mécanismes d'advection hydrodynamique de la chaleur [17], les formations de turbulences au niveau des bords du stack et des échangeurs [18], les apports de chaleur par dissipation visqueuse [19], etc. Les études analytiques, numériques et expérimentales menées de par le monde pour élucider l'ensemble de ces phénomènes physiques ont bien entendu pour objectifs essentiels d'optimiser les systèmes thermoacoustiques réalisés à l'heure actuelle comme ceux du futur. A titre d'exemple, un moteur annulaire instrumenté pour l'étude expérimentale de tous ces phénomènes et pour la validation des modèles analytiques développés corrélativement a été réalisé au LAUM (figure 4).

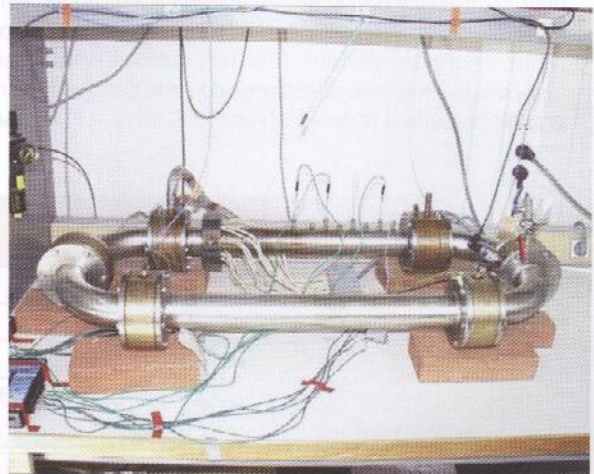


Fig. 4 : Prototype de moteur thermoacoustique annulaire (LAUM)

## Applications industrielles de la thermoacoustique

A ce jour, les quelques réalisations « industrielles » de machines thermoacoustiques restent assez anecdotiques, mais la recherche universitaire en thermoacoustique demeure néanmoins très active de par le monde, car les applications potentielles sont bien réelles, notamment lorsque faible coût et fiabilité sont les critères essentiels.

A titre d'exemple en Europe, plus particulièrement à l'ECN (Energy Centre for Netherlands), des recherches sont actuellement menées en vue de développer des systèmes thermoacoustiques permettant de récupérer la chaleur rejetée à basse température dans l'environnement par certains process industriels pour augmenter la température de cette réserve de chaleur afin de la rendre réutilisable dans ces mêmes process [20]. Seuls les systèmes thermoacoustiques semblent aujourd'hui capables de réaliser cette fonction. Les enjeux sont importants en termes d'économie d'énergie puisque la chaleur rejetée dans l'atmosphère représente environ 10% de l'énergie utilisée.

Les propos qui suivent visent à donner un aperçu sur quelques machines thermoacoustiques réalisées, mais également sur les études menées en vue de l'utilisation future de machines thermoacoustiques à des fins industrielles.

### Quelques exemples de réalisations et leurs performances

Parmi les nombreux prototypes de machines thermoacoustiques « classiques » réalisés à ce jour, les plus remarquables en termes de performances ont été réalisés aux Etats Unis d'Amérique. L'équipe de recherche de l'université de Penn State [21] a conçu plusieurs prototypes performants comme par exemple le «Space ThermoAcoustic Refrigerator» (STAR) [22], inspiré d'une machine antérieure réalisée au Los Alamos National Laboratory [23], qui a été embarqué sur la navette « Discovery STS-42 » en 1992, ou le «ThermoAcoustic for Life Science Refrigerator» (TALSR) qui a été installé dans un navire de guerre américain en 1995 afin de refroidir des ensembles d'appareillages électroniques. Cette dernière machine, qui permet d'extraire plus de 200 W avec une efficacité de 40 % (relativement à l'efficacité de Carnot), est constituée de deux transducteurs électroacoustiques de forte puissance qui excitent un résonateur demi onde comportant deux noyaux thermoacoustiques. Le réfrigérateur développé en 2003 [24] pour l'entreprise Ben & Jerry's est quant à lui un système de faible encombrement destiné au maintien en température de crèmes glacées. Ces trois machines sont, dans leur constitution, peu différentes de celle décrite au paragraphe précédent page 45. Cependant, elles sont le résultat

d'un important travail de développement portant sur chacun des éléments constitutifs de la machine (source, fluide, résonateur, stack, échangeurs) et sur le couplage entre ces éléments. Le tableau 1 présente les principales caractéristiques de ces machines réfrigérantes, en comparaison de celles d'un réfrigérateur domestique.

Concernant les générateurs d'ondes (effet «moteur»), une avancée remarquable dans l'optimisation de la conversion thermoacoustique a été obtenue par l'équipe de recherche du Los Alamos National Laboratory en 1999 : leur prototype, dénommé ThermoAcoustic Stirling Heat Engine (TASHE) [25] est capable de produire une puissance mécanique (acoustique) de 700 W pour un rendement relatif de 41%. Comme son nom l'indique, et à la différence des générateurs classiques dits «à ondes stationnaires», l'idée de base de cette machine repose sur l'utilisation d'un cycle moteur de Stirling, pour lequel la relation de phase entre pression acoustique et déplacement particulière correspond à celle d'une onde acoustique progressive. Ces performances intéressantes permettent d'envisager le développement de machines trithermes performantes et très fiables utilisant une source thermoacoustique pour fournir l'énergie suffisante à l'extraction thermoacoustique de chaleur, dont un exemple bien connu de la communauté des thermoacousticiens est celui du « Beer Cooler » [10].

### Applications en cryogénie. Machines hybrides.

Une part importante des recherches en thermoacoustique suit celles menées en vue d'applications dans le domaine des températures cryogéniques. En particulier, un effort de recherche important est actuellement consacré (notamment aux Etats-Unis et en Chine) au développement de machines thermoacoustiques dérivées du tube à gaz pulsé [26]. Ces machines, qui peuvent être considérées comme thermoacoustiques en ce sens que leur fonctionnement repose sur les phénomènes d'échanges thermiques entre un fluide compressible oscillant et un tube, ont fait l'objet ces dernières années de nombreux développements [27-29]. En particulier, l'usage d'un tube à gaz pulsé couplé à un (ou plusieurs [30]) générateurs d'ondes thermoacoustiques (donc sans aucune partie mobile) est en cours de développement et plusieurs types de machines aux performances intéressantes ont déjà vu le jour. A titre d'exemple, certaines de ces machines peuvent atteindre des températures cryogéniques inférieures à 60K pour une puissance de chauffage (source pour la partie moteur) de l'ordre de 2 kW [31]. Les applications industrielles potentielles de ces machines sont réelles comme l'illustre un projet ambitieux entre le labo-

	STAR	TALSR	Ben & Jerry's	réfrigérateur domestique
$\Delta T$ (K)	<80	<50	<50	10-30
$Q_f$ (W)	<5	260	120	200-400
efficacité (%)	20	40	19	40
fluide	97% He, 3% Ar 10 Bars	89% He, 11% Xe 20 Bars	He 10 Bars	HCFC ou HFC

Tabl. 1 : Exemples de performances de machines thermoacoustiques.  $\Delta T$  désigne la différence de température entre les échangeurs chaud et froid,  $Q_f$  désigne la quantité de chaleur extraite à la source froide.

ratoire de Los Alamos et le gazier Praxair [32], actuellement en cours de développement, qui consiste à mettre au point une machine thermoacoustique d'une puissance réfrigérante de 7 kW embarquée sur les méthanières, qui permettrait de liquéfier le méthane (-164 °C à la pression atmosphérique) en utilisant la combustion d'environ 30% de ce même gaz pour liquéfier les 70 % restants.

### Refroidissement de composants électroniques

Les flux de chaleur qu'il est nécessaire d'extraire de composants électroniques tels que les microprocesseurs peuvent atteindre aujourd'hui 50 W/cm<sup>2</sup> et ne cessent d'augmenter, les densités d'intégration sur puces silicium et les cadences d'horloge des microprocesseurs allant toujours croissant. Les systèmes actuellement utilisés pour assurer cette extraction de chaleur (cellules à effet Peltier, ventilateurs, caloducs, etc.) restent encore de dimensions trop importantes en regard de celles, de plus en plus réduites, des composants à refroidir. La miniaturisation de ces divers systèmes fait donc l'objet de nombreuses études, tant sur le plan fondamental (les systèmes étudiés révélant des comportements non conventionnels au delà d'un certain degré de miniaturisation) que sur le plan technologique (mise au point de processus de fabrication adaptés aux exigences requises par cette extrême miniaturisation).

C'est dans ce contexte que des recherches ont été engagées depuis le début des années 2000 sur la miniaturisation des systèmes thermoacoustiques, notamment aux Etats Unis, en Chine et en France. Quelques prototypes de moteurs ou réfrigérateurs thermoacoustiques de dimensions décimétriques (figure 5) ont été réalisés [13, 33-36], et plusieurs brevets ont été déposés [37, 38]. Ces systèmes fonctionnent pour la plupart à des fréquences élevées, proches de l'ultrasonore, en raison des dimensions réduites des résonateurs. Leur principale faiblesse reste pour l'heure un rendement (ou une efficacité) insuffisant(e) en regard des applications visées. C'est l'un des buts des recherches en cours que d'améliorer les performances de ces systèmes thermoacoustiques miniatures.

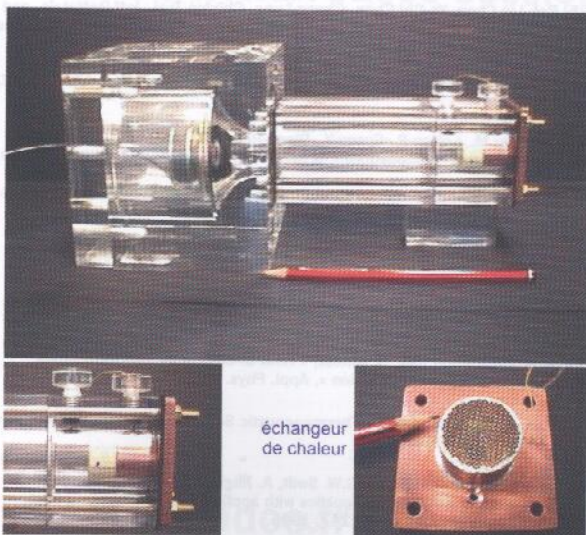


Fig. 5 : Prototype de réfrigérateur thermoacoustique de dimensions réduites (LMFA, ECL)

### Autres applications

Comme les autres types de machines thermiques, les machines thermoacoustiques peuvent être utilisées pour produire de la puissance électrique. Quelques études et prototypes ont ainsi été réalisés en ce sens. Par exemple, un générateur d'ondes thermoacoustique peut être utilisé pour fournir l'énergie mécanique suffisante au mouvement de pistons, qui reliés à un alternateur, permettent de produire un courant électrique alternatif [39]. La production d'énergie électrique peut également être envisagée par l'usage, comme fluide de travail, d'un métal liquide [40], ou bien par l'usage d'un liquide conducteur comme piston oscillant [41], de telle sorte que les oscillations de liquide à travers un transducteur magnétohydrodynamique permettent de produire de l'énergie électrique.

Outre ses applications directes en énergétique, il existe également d'autres utilisations possibles de l'effet thermoacoustique, comme par exemple la séparation d'un mélange de deux composants gazeux de masses molaires significativement différentes [42], ou encore l'utilisation de l'effet thermoacoustique à des fins métrologiques (estimation d'une pression acoustique à partir de la mesure d'un gradient de température [43], estimation de coefficients d'échanges thermiques, etc.)

Enfin, pour terminer cette revue, le lecteur intéressé par les aspects ludique et didactique de ces machines thermiques exotiques pourra se reporter aux références [44] et [45], où les méthodes de réalisation à moindre coût d'un moteur (figure 6) et d'un réfrigérateur (figure 7) thermoacoustiques de démonstration sont décrites.

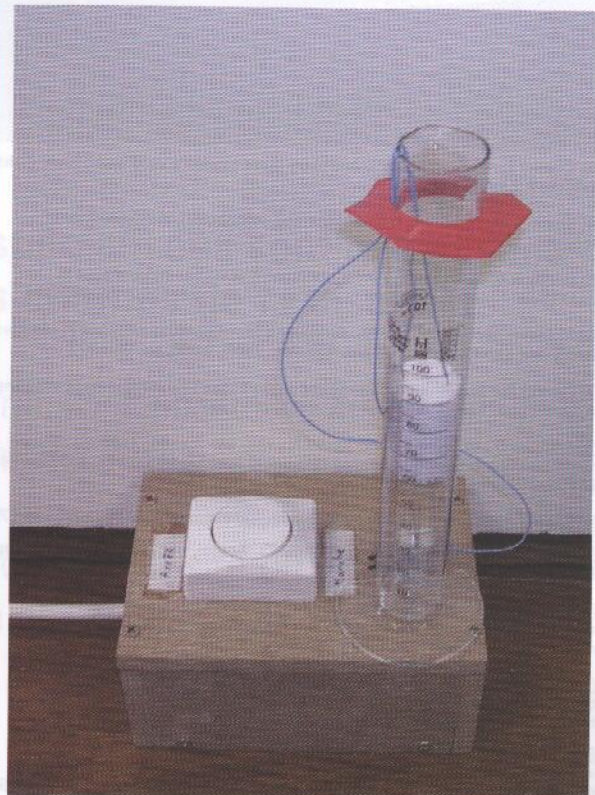


Fig. 6 : Moteur thermoacoustique de démonstration (LAUM)

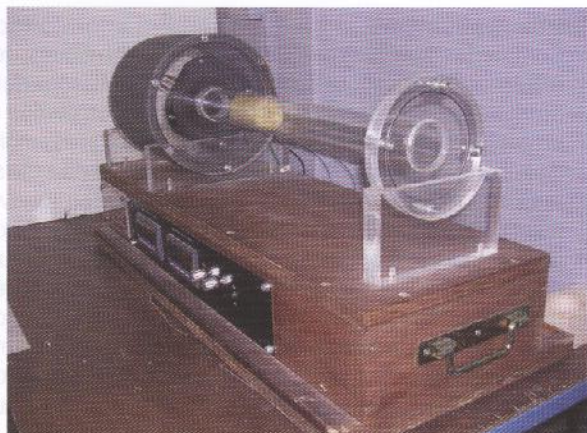


Fig. 7 : Réfrigérateur thermoacoustique de démonstration (LAUM)

En France, des recherches sont menées depuis plus d'une décennie essentiellement dans trois laboratoires: le Laboratoire d'Acoustique de l'Université du Maine (LAUM), le Laboratoire de Mécanique de Fluides et d'Acoustique (LMFA) de l'Ecole Centrale de Lyon et le Laboratoire d'Informatique pour la Mécanique et les Sciences pour l'Ingénieur (LIMSI) d'Orsay. Les chercheurs français disposent de moyens analytiques, numériques et expérimentaux, ainsi que de maquettes de toutes dimensions qui leur permettent aujourd'hui d'aborder tous les aspects de la thermoacoustique, des études fondamentales aux diverses applications.

## Références bibliographiques

- [1] Kirchhoff G., «Ueber die Einfluss der Wärme leitung in einem Gase auf die Schallbewegung» *Annalen der Physik Leipzig* 134, 1868, pp. 177-193 (English translation 1974 in: R. B. Lindsay, ed. *Physical Acoustics*, Dowden, Hutchinson and Ross, Stroudsburg)
- [2] Rayleigh J.W.S., *Theory of Sound*, 1896, Second ed. reprinted by Dover New York (1945)
- [3] Cremer L., «On the acoustic boundary layer outside a rigid wall», *Arch. Elektr. Uebertr.* 2 235, 1948
- [4] Bruneau M. and Scelo T. (translator and contributor), *Fundamentals of Acoustics*, ISTE, UK and USA, 2006
- [5] Beatty R.E. Jr, «Boundary layer attenuation of higher order modes in rectangular and circular tubes», *J. Acoust. Soc. Am.* 22, 1950, pp. 850-854
- [6] Moldover M.R., Mehl J.B. and Greenspan M., «Gas-filled spherical resonators: theory and experiment» *J. Acoust. Soc. Am.* 79(2), 1986, pp. 253-272
- [7] Herzog Ph. and Bruneau M., «Shape perturbation and inertial mode coupling in cavities», *J. Acoust. Soc. Am.* 86, 1989, pp. 2377-2384
- [8] Ecotièrè D., Bruneau M. and Tahani N., «Inertial- and flow-induced acoustic mode coupling in unsteady-rotating cylindrical fluid-filled cavities», *J. Sound Vib.* 252(1), 2002, pp. 37-63
- [9] Rott N., «Thermoacoustics», *Advances in Applied Mechanics* 20, 1980, pp. 135-175
- [10] Swift G.W., «Thermoacoustic engines», *J. Acoust. Soc. Am.* 84(4), 1988, pp. 1145-1180
- [11] Penelet G., Job S., Gusev V., Lotton P. and Bruneau M., «Dependence of sound amplification on temperature distribution in annular thermoacoustic engines», *Acta Acustica* 91, 2005, pp. 567-577
- [12] Penelet G., Gusev V., Lotton P. and Bruneau M., «Experimental and theoretical study of processes leading to steady-state sound in annular thermoacoustic engines», *Phys. Rev. E* 72(2) 016625.1-25.13, 2005
- [13] Symko O.G., Abdel-Rahman E., Kwon Y.S., Emmi M. and Behunin R., «Design and development of high-frequency thermoacoustic engines for thermal management in microelectronics», *Microelectronics Journal* 35, 2004, pp. 185-191
- [14] Abdel-Rahman E., Azenui N.C., Korovyanko I. and Symko O.G., «Size considerations in interfacing thermoacoustic coolers with electronics» *Proc. IThERM'02 the 8th InterSociety Conf. Thermal. Thermomech. Phenom. in Electronic Systems*, 2002, pp. 421-424
- [15] Gusev V., Lotton P., Bailliet H., Job S., Bruneau M., «Thermal waves harmonics generation in the hydrodynamical heat transport in thermoacoustics», *J. Acoust. Soc. Am.* 109 (1), 2001, pp. 84-90
- [16] Yazaki T., Tominaga A., Narahara Y., «Large heat transport due to spontaneous gas oscillation induced in a tube with steep temperature gradients», *J. of Heat Transfer*, 105 (4), 1983, pp. 889-894
- [17] Penelet G., Gusev V., Lotton P., Bruneau M., «Non trivial influence of acoustic streaming on the efficiency of annular thermoacoustic prime movers», *Physics Letters A*, Vol. 351, 2006, pp. 268-273
- [18] Marx D., Blanc-Benon Ph., «Numerical simulation of stack-heat exchangers coupling in a thermoacoustic refrigerator», *AIAA Journal* 42(7), 2004, pp. 1338-1347.
- [19] Lotton P., Blanc-Benon Ph., Bruneau M., Gusev V., Duffourd S., Mironov M., Poignand G., «Transient regime in thermoacoustic refrigerator: mean temperature profile evolution inside the stack», soumis à *Int. J. of Heat and Mass Transfer*.
- [20] Spoelstra S., Tijani M.E.H., «Thermoacoustic heat pumps for energy savings», ECN-RX--05-159; December, 2005; 23 pag. Presented at Grensoverschrijdende akoestiek, Nederlands Akoestisch Genootschap, The Netherlands, 23 November, 2005.
- [21] <http://www.acs.psu.edu/thermoacoustics/>
- [22] S. L. Garrett, J. A. Adeff, and T. J. Hofer, «Thermoacoustic refrigerator for space applications», *J. Thermophysics and Heat Transfer (AIAA)* 7(4), 1993, pp. 595-599.
- [23] T.J. Hofer, «Thermoacoustic refrigerator design and performance», thèse de doctorat, university of california, San Diego, 1986.
- [24] <http://www.acs.psu.edu/thermoacoustics/refrigeration/benandjerrys.htm>
- [25] Backhaus S., Swift G. W., «A thermoacoustic Stirling heat engine», *Nature* 399:335, 1999.
- [26] R. Radebaugh, «Review of pulse tube refrigeration» *Advances in Cryogenic engineering* 35:1191, 1990.
- [27] Liang J., Zhou Y., Zhu W., «Development of a single-stage pulse tube refrigerator capable of reaching 49 K» *Cryogenics* 30, 1990, pp. 49-51.
- [28] D. L. Gardner and G. W. Swift «Use of inductance in orifice pulse tube refrigerators», *Cryogenics* 37, 1997, pp. 117-121.
- [29] Swift G.W., Gardner D.L., Backhaus S., «acoustic recovery of lost power in pulse tube refrigerators», *J. Acoust. Soc. Am.*, 105, 1999.
- [30] D. L. Gardner, G. W. Swift «A cascade thermoacoustic engine» *J. Acoust. Soc. Am.* 114, 2003
- [31] W. Dai, E. Luo, J. Hu, H. Ling, «a heat driven thermoacoustic cooler capable of reaching liquid nitrogen temperature», *Appl. Phys. Lett.* 86, 224103, 2005
- [32] J. Wollan, G. Swift, W. Wijngaarden, «Development of a Thermoacoustic Natural Gas Liquefier», AGA Operations Conference, Denver, CO, Mai 2000.
- [33] O.G. Symko, E. Abdel-Raman, Y.S. Kwon, M. Emmi, R. Behunin, «Design and development of high-frequency thermoacoustic engines for thermal management in microelectronics», *Microelectronics Journal* 35, 2004, pp. 185-191.
- [34] Direk Seyhmus, «Design of a Mini Thermo-Acoustic Refrigerator», Master's thesis, Naval Postgraduate School Monterey Ca, March 2001
- [35] Reh-Lin Chen, Ya-Chi Chen, Chung-Lung, Chialun Tsai, Jeff DeNatale, and Jeff Nelson, «A miniaturized micro-machined thermoacoustic cooler», *J. Acoust. Soc. Am.* 109 (5), 2001, p. 2404
- [36] Hofer, T.J., Adeff, J.A., «An optimized miniature Hofer tube» *ARLO* 2, 2001, p. 37
- [37] Bruneau M., Lotton P., Gusev V., Blanc-Benon P., Gaviot E., Durand S., «Réfrigérateur thermoacoustique», brevet N°120434 déposé à l'INPI (mai 2003).
- [38] Symko OG, Abdel-Rahman E., «High frequency thermoacoustic refrigerator», US patent n° 7 240 495 B2, July 2007
- [39] S. Backhaus, E. Tward, M. Petach, *Appl. Phys. Lett.* 85, 1085, 2004.
- [40] A. Migliori, G. W. Swift, «Liquid Sodium Thermoacoustic engine», *Appl. Phys. Lett.* 53:355, 1988.
- [41] A. A. Castrejón-Pitaa, G. Huelz, «Heat-to-electricity Thermoacoustic Magneto-hydrodynamic conversion», *Appl. Phys. Lett.*, 90:174110, 2007
- [42] P. S. Spoor, G. W. Swift, «Thermoacoustic Separation of a He-Ar Mixture», *Phys. Rev. Lett.*, 85:1646, 2000
- [43] J.C. Wheatley, T.J. Hofer, G.W. Swift, A. Migliori, «Understanding some simple phenomena in thermoacoustics with applications to acoustical heat engines», *Am. Journ. Phys.* 53:147, 1985.
- [44] <http://www.acs.psu.edu/thermoacoustics/refrigeration/laserdemo.htm>
- [45] D.A. Russel, P. Weitbull, «Tabletop thermoacoustic refrigerator for demonstrations», *Am. Journ. Phys.*, 70:1231, 2002.