A new thermodynamic concept : Thermoacoustics. Thermoacoustic refrigeration

George ANDREI, Dan ANDREI.
University "Dunărea de Jos" of Galati, Faculty of Mechanical Engineering,
Department of Thermodynamics and Thermal Engines,
Domnească Street, No. 47, 800008, Galati,
E-mail: george.andrei@ugal.ro, dan.andrei@ugal.ro

Liudmila ȚURCANU
University "Dunărea de Jos" of Galati, Faculty of Mechanical Engineering,
Department de Thermodynamics and Thermal Engines,
Domnească Street, No. 47, 800008, Galati,
E-mail: liudmila.turcanu@ugal.ro

Abstract: *A thermoacoustic system converts some heat from a high-temperature heat source into acoustic power, rejecting waste heat to a low-temperature heat sink if it is a thermoacoustic engine. If is a refrigerator system, it produce refrigeration consuming acoustic power and rejecting waste heat power to a heat sink. In this article we present the travelling wave thermoacoustic refrigerator.*
The pulse-tube refrigerators make part from this family of machines.
Keywords : *Thermoacoustique, Onde progressive, Refrigeration thermoacoustique*

1. Introduction. Qu'est ce que c'est la thermoacoustique ?

La thermoacoustique concerne l'étude de l'interaction entre les ondes sonores et le transfert thermique du fluide avec une paroi solide.

Une onde sonore qui se propage dans un gaz est habituellement considérée comme une combinaison des oscillations de pression et du déplacement du fluide. Il en résulte aussi des oscillations de la température. Quand le son traverse des petits canaux, il y a aussi des décalages de phase entre le flux de chaleur de la paroi vers le gaz et celui du gaz vers la paroi. La combinaison de toutes ces oscillations produit une variété très riche d'effets thermoacoustiques.

La recherche dans la thermoacoustique a commencé avec la simple curiosité des oscillations du transfert de chaleur entre l'onde sonore du gaz et les surfaces solides (tubes de Sondhaus, de Rijde). Ce phenomène aparait entre le gaz traversé des ondes et la paroi du tube qui le contient [8].

Les moteurs et les réfrigérateurs classiques ont des pièces en mouvement (pistons, soupapes, vilebrequins, turbines, etc.). L'intérêt des systèmes thermoacoustiques réside dans la réduction du nombre de pièces mobiles ou même leur élimination.

Dans les systèmes employant les effets thermoacoustiques, es transferts thermiques peuvent amplifier les ondes sonores et inversement les ondes sonores peuvent occasionner des transferts thermiques contre nature, d'un point froid vers un point chaud (fonctionnement réfrigérateur ou pompe à chaleur).

Dans une onde sonore, les particules de gaz subissent des variations de position, de vitesse et de pression, généralement sinusoïdales, en tout cas cycliques. Une onde peut être progressive (en

milieu ouvert) ou stationnaire (en milieu clos). Dans un milieu monodimensionnel, une onde stationnaire résulte de la superposition de deux ondes progressives de sens opposés. Une onde de pression s'exprime $p_a(x,t) = F(x-c.t) + G(x+c.t)$, où x est l'abscisse, t le temps, c la vitesse locale du son, p_a la pression acoustique locale instantanée, F et G des fonctions réelles continues et dérivables presque partout, généralement périodiques de pulsation □ [rad/s] et de longueur d'onde [illegible]

Pour une onde stationnaire $F = G$, et pour une onde progressive $F=0$ ou $G=0$. On voit qu'il existe de nombreuses autres possibilités mais la périodicité du phénomène n'est plus visible: c'est une sorte de clapotis ou de bruit.

2. Réfrigération thermoacoustique

Parmi les systèmes thermoacoustiques on distingue :

Les moteurs à onde stationnaire, [3, 5÷8], [10], [11] et à onde progressive. Les refroidisseurs à onde stationnaire et ceux à onde progressive [8] qui font l'objet du présent travail.

La mise au point de l'un des premiers réfrigérateur thermoacoustique a été réalisée au « Los Alamos National Laboratory » au début des années 1980. Le principe de base pour le réfrigérateur à onde stationnaire a été présenté en [5÷8]. Il prend de chaleur de la source froide en consommant une puissance acoustique et il la rejette à une source chaude.

Dans ce qui suit il sera question des pulse tube que l'on peut ranger dans la catégorie des refroidisseur thermoacoustique à onde progressive.

Peter Ceperley [8] a découvert qu'une onde acoustique progressive qui se propage à travers d'un régénérateur exécute un cycle thermodynamique réversible, proche de celui effectué dans les machines de Stirling [9]. Il s'agit d'un cycle d'Ericsson, (phases 12341 voir figures) semblable à celui que l'on rencontre dans les machines de Gifford-Mac Mahon.

Dans le cas où l'onde est purement progressive, la pression dynamique et le déplacement de la particule fluide sont en quadrature de phase [6] (figure 1). La figure 1 représente une simplification du cycle sinusoïdal de la pression et du déplacement particulaire qui dépendent de t.

Dans ce cas, lorsque la pression est élevée (la phase 2-3) les particules sont en train de se déplacer de la source froide vers la source chaude. Pour que la quantité de chaleur échangée entre le milieu solide et le fluide pendant cette phase soit maximale, il est important que le contact thermique entre ces deux milieux soit extrêmement bon. Dans le cas idéal, la température du gaz reste constamment identique à celle de la partie du régénérateur en regard. Donc, pendant la phase 2-3, celle-ci varie de la température minimale (T_f) à la température maximale (T_c).

Pratiquement, pour obtenir un bon transfert thermique, le régénérateur d'un réfrigérateur à onde progressive doit donc avoir un rayon hydraulique (R_h)

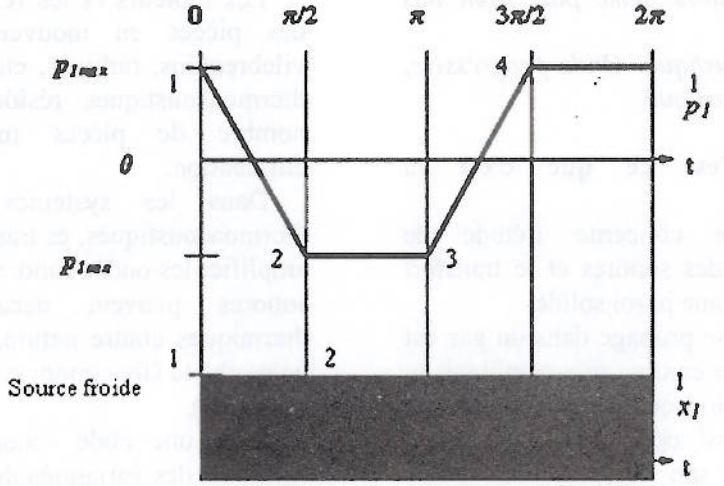

Fig.1 *Onde progressive. Variation de pression et déplacement particulaire pendant une période de l'onde acoustique*

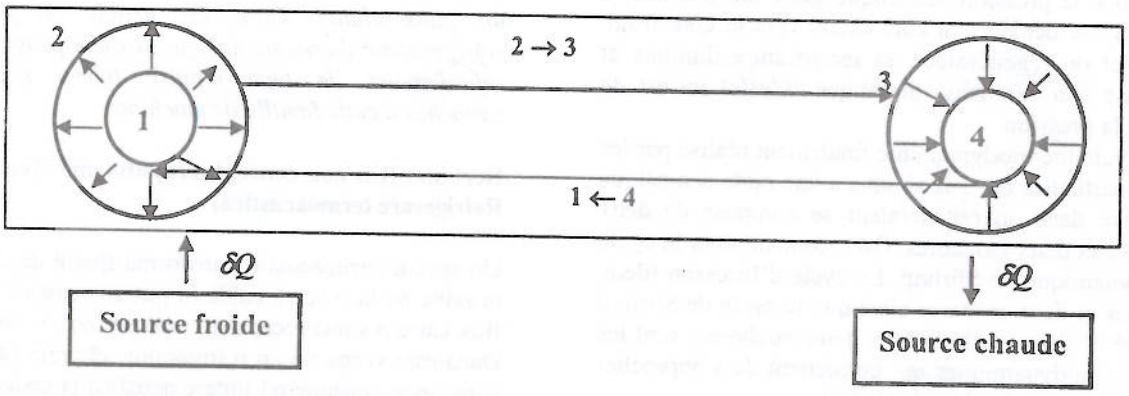

Fig.2. *Représentation du processus. Les étapes par lesquelles passe la particule pour décrire le cycle de Stirling.*

très inférieur à l'épaisseur de la couche thermique du gaz (δ_k) :

$$\frac{R_h}{\delta_k} << 1 \qquad (1)$$

En général, dans la plupart des réfrigérateurs à onde progressive [6], le régénérateur est constitué d'un empilement des grilles. Grâce au faible rayon hydraulique et à la forte capacité thermique du régénérateur, les échanges de chaleur avec le gaz se font instantanément.

La température du gaz est donc constamment identique à celle de la partie correspondante du régénérateur. Les oscillations de température (T_l) d'une particule de gaz ne sont causées que par son déplacement à travers le régénérateur qui possède un gradient thermique adéquat. Toute transformation statique est donc isotherme.

Phase 1-2 : Détente isotherme

La pression diminue pendant que la particule reste immobile du côté froid. La particule se dilate en restant isotherme du fait de l'échange de chaleur parfait. La particule reçoit un flux de chaleur du régénérateur.

Phase 2-3 : Compression isochore

Pendant que la pression est à son minimum, la particule se déplace du côté froid vers le côté chaud. Au contact du régénérateur, sa température augmente et elle réalise sa contraction thermique. L'effet est d'augmenter la pression.

Phase 3-4 : Compression isotherme

La pression augmente pendant que la particule reste immobile qu côté chaud. Cette dernière se contracte et cède la quantité de chaleur reçue lors de la phase 1-2.

Phase 4-1 : Détente isochore

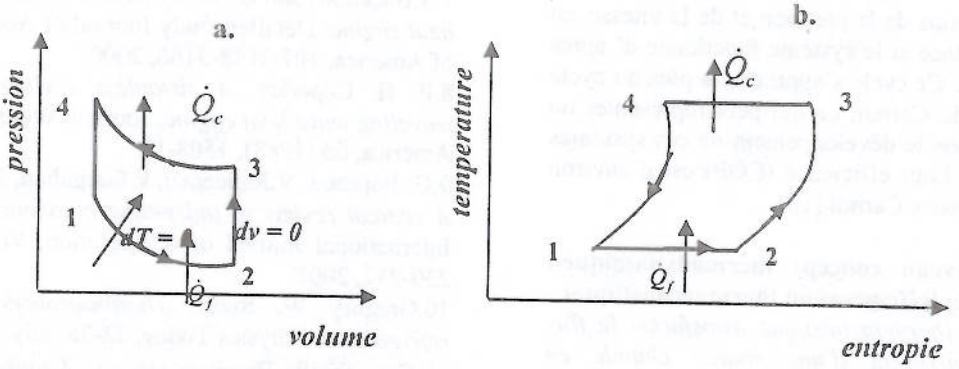

Fig. 3. *Cycle thermodynamique de Stirling a). Diagramme p-v, b). Diagramme T - s*

Pendant que la pression acoustique est à son maximum, la particule se déplace du côté chaud vers le côte froid. Au contact du régénérateur, sa température diminue et elle réalise son extension thermique. L'effet ici est de diminuer la pression.

Le cycle thermodynamique finalement réalisé par les diverses particules de gaz soumis à une onde acoustique progressive dans un régénérateur se compose de deux isothermes et deux isochores. On reconnaît alors le cycle thermodynamique de Stirling. Le cycle d'Ericsson (deux isothermes et deux isobares ainsi que le cycle de Stirling (constitué de deux isothermes et deux isochores) sont les cycles thermodynamiques qui permettent de s'approcher au plus près du cycle idéal de Carnot.

Le coefficient de performance frigorifique pour ces cycles est [1, 2], :

$$COP = \frac{\dot{Q}_f}{|\dot{W}|} = \frac{T_f}{T_c - T_f} \qquad (2)$$

$\dot{W}$ – la puissance acoustique reçue [W] ;

$\dot{Q}_f$ – le flux de chaleur extrait de la source froide[W] ;

T_c – température de la source chaude [K] ;

T_f – température de la source froide [K].

Pour les moteurs, le rendement est:

$$\eta = \frac{|\dot{W}|}{\dot{Q}_c} = 1 - \frac{T_1}{T_3} = 1 - \frac{T_f}{T_c} = \eta_{\max} \qquad (3)$$

$\dot{Q}_c$ – le flux de chaleur reçu de la source chaude [W] ;

5. Conclusions

Dans ce travail on a essayé de donner quelques notions de la thermoacoustique et des phénomènes thermofluidiques. Ce domaine est très intéressant car les systèmes thermoacoustiques (moteurs ou refroidisseurs) utilisent un gaz (He, Ar, Kr, Xe) qui ne polue pas ce qui représente un pas en avant dans la protection de l'environnement.

On n'a e fait ici qu'une très simple présentation du fonctionnement d'un réfrigérateur à onde progressive. La variation dans le temps de la pression et de la vitesse est en quadrature de phase et le système fonctionne d' après un cycle de Stirling. Ce cycle s'approche le plus du cycle thermodynamique de Carnot, ce qui peut représenter un avantage majeur dans le développement de ces systèmes thermoacoustiques. Leur efficience (COP) est d'environ (20…40) de l'efficience Carnot [10].

Résumé **(Un nouveau concept thermodynamique : Thermoacoustique. Réfrigération thermoacoustique)**

Un système thermoacoustique transforme le flux de chaleur qui provient d'une source chaude en puissance acoustique, en rejetant un flux vers un puits froidd s'il est un moteur thermoacoustique. S'il s'agit d'un refroidisseur,il prend de chaleur de la source froide en consommant une puissance acoustique et la rejettea un puits chaud. Dans cet article on présente le réfrigérateur thermoacoustique à onde progressive. Les refoidisseurs de type « pulse tube » peuvent être rattachés à cette famille de machine.

Rezumat (Un nou concept termodinamic:Termoacustica. Refrigerare termoacustică)

Un sistem termoacustic transformă fluxul de căldură care provine de la o sursă caldă în putere acustică, cedând un flux către o sursă rece, dacă este un motor termoacustic. Dacă este vorba de un refrigerator, el preia căldură de la sursa rece consumând putere acustică şi cedează un flux către o sursă caldă. În acest articol se prezintă modul de funcţionare al refrigeratorului cu undă progresivă.
Refrigeratoarele de tip "pulse tube" fac parte din această familie de maşini.

References bibliographiques

1.Adrian Bejan, *Advanced Engineering Thermodynamics*. Wiley, second edition, 1997.

2.Dan Andrei, George Andrei, *Termodinamică tehnică şi transfer de căldură*, Editura Didactică şi Pedagogică, Bucureşti, 2004.

3.Dan ANDREI, George ANDREI, *Thermoacoustic engines*, Congres METIME, Universitatea "Dunărea de Jos", Galaţi, iunie 2005.

4.George ANDREI, Dan ANDREI, *A new thermodynamic concept: thermoacoustic refrigerators*, Congres METIME, Universitatea "Dunărea de Jos", Galaţi, iunie 2005.
National Laboratory, fifth draft, 29 may 2001.

5.George ANDREI, Dan ANDREI, *A new concept: thermoacoustics; thermoacoustic engines*, The 30 th Annual Congres of the American Romanian Academy of Arts and Sciences (ARA), The Academy of Economic Studies of Moldova, Chişinău, July 5-10, pages 475-478, 2005.

6.George ANDREI, *"Sisteme termoacustice utilizate în schimbul de căldură"*, Referatul nr. 1 al Tezei de Doctorat , Universitatea Dunărea de Jos din Galaţi, decembrie 2005.

7.S.Backhaus and G. W. Swift, *A thermoacoustic-Stirling heat engine*: Detailed study.Journal of Acoustical Society of America, 107:3148-3166, 2000.

8.P. H. Ceperley, *A pistonless stirling engine – the traveling wave heat engine*, Journal Acoustical Society of America, 66 (1988), 1508-13.

9.G. Popescu, V.Radcenco, E.Gargalian, P.Ramany Bala, *A critical review of pulse-tube cryogenerator research*, International Journal of refrigeration, Volume 24, no.3, 230-237, 2001.

10.Gregory W. Swift, *Thermoacoustic engines and refrigerators*, Physics Today, 22-25, july 1995.

11.Greg Swift, *Thermoacoustics: A unifying perspective for some engines and refrigerators*, Condensed Matter and Thermal Physics Group, Los Alamos