

# La Réfrigération thermoacoustique

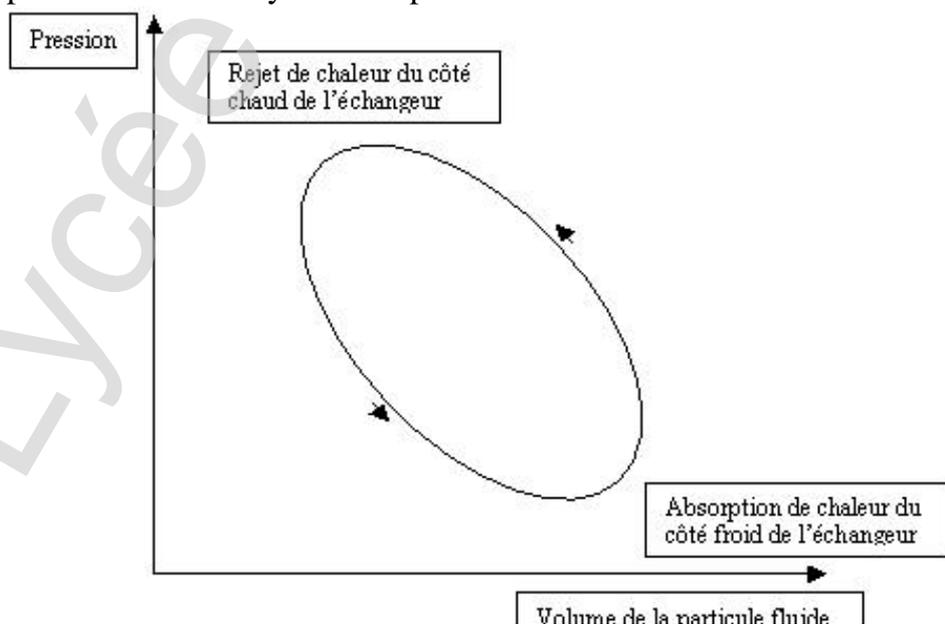
## TIPE réalisé par Gautier Lefebvre (PC\* 2004-2005)

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

Les réfrigérateurs ont toujours utilisé des produits polluants ou nocifs, ce qui pose un problème de recyclage lorsque ces appareils arrivent en fin de vie ou simplement en cas de fuite. Actuellement, la recherche se porte sur de nouveaux types de systèmes basés sur le couplage thermoacoustique qui permettent de refroidir à l'aide d'ondes sonores. Ces systèmes présentent l'avantage de ne comporter aucune pièce mobile ce qui facilite leur maintenance et augmente leur durée de vie, de plus ils n'utilisent pas de gaz réfrigérants. Ces T.I.P.E. m'ont permis d'en étudier le fonctionnement, de réaliser un dispositif thermoacoustique réfrigérant et de mesurer tout l'intérêt de ce type de système.

Une onde acoustique est caractérisée par une surpression. Cette variation de pression est rapide et peut donc être considérée comme adiabatique réversible ; elle engendre ainsi une variation de température. L'idée, dans un réfrigérateur thermoacoustique, est d'exploiter cette variation de température afin de refroidir. Cependant, en acoustique, les variations de pression sont très faibles et les variations de température aussi. Par exemple, la voix crée une surpression relative de l'ordre de 0,000001 qui entraîne une variation de température de dix millièmes de degrés. Typiquement, un réfrigérateur nécessite la mise en œuvre d'une différence de température d'une vingtaine de degrés. Pour réaliser cette différence de température, il faut donc mettre le gaz en contact avec un solide qui sert d'échangeur. Un solide possède une capacité calorifique bien supérieure à celle d'un gaz par unité de volume ; il peut donc échanger de grandes quantités de chaleur sans voir sa température modifiée.

Pour obtenir une onde acoustique d'intensité convenable, il est intéressant de créer une onde stationnaire en produisant une onde dans une cavité finie qui sert de résonateur en sélectionnant des modes et en les amplifiant. Dans ce type d'onde, la pression est déphasée avec la vitesse : les ventres de vibrations sont les nœuds de pression. C'est donc le déplacement de la particule fluide qui est en phase avec la pression. La pression est alors maximale ou minimale lorsque le gaz atteint les zones extrêmes de son déplacement. C'est ainsi que le gaz se réchauffe toujours lorsqu'il se déplace dans la même direction et se refroidit donc un côté du solide, de même pour son refroidissement. On peut représenter ainsi le cycle de la particule fluide :



Afin d'optimiser les échanges, il est préférable d'utiliser un solide de structure poreuse ou lamellaire, où la distance entre lames est deux fois la profondeur de pénétration thermique :  $\delta = \sqrt{\lambda/\rho\omega c}$  issue de l'équation de l'équation de la chaleur.

$\lambda$  est la conductivité thermique,  $\rho$  la masse volumique,  $\omega$  la pulsation de l'onde et  $c$  la capacité calorifique à volume constant ou pression constante suivant le modèle choisi. Ce paramètre est critique dans le choix des dimensions d'un réfrigérateur thermoacoustique car si la distance entre les lames est trop grande devant  $\delta$ , tout le gaz ne participe pas aux échanges, mais si cette distance est trop faible, la propagation de l'onde est entravée par des effets visqueux.

L'autre caractéristique importante dans un réfrigérateur thermoacoustique est le gradient critique de température. En effet, celui-ci détermine le mode de fonctionnement de la machine, soit réfrigérateur soit moteur. Son expression est :  $\text{grad}T = p/\xi\rho c$ .  $p$  et  $\xi$  sont les amplitudes de la surpression et du déplacement du gaz. Il représente le gradient maximal qui peut exister dans l'échangeur lorsque le système fonctionne en réfrigérateur. Au-delà, on obtient un moteur.  $2p/\rho c_p$  est la variation de température due à une compression adiabatique de  $2p$  qui doit être supérieure en valeur absolue à celle observée par déplacement le long de l'échangeur :  $2\xi\text{grad}T$  pour que le système soit un réfrigérateur. Si ce n'est pas le cas, alors la chaleur circule du point le plus chaud vers le gaz, puis du gaz vers le point le plus froid du solide ; l'onde est alors amplifiée. Ce phénomène est notamment observé par les souffleurs de verre qui peuvent parfois entendre un son lorsqu'ils chauffent le verre. Enfin, lorsque le gradient thermique dans le solide est exactement le gradient critique, il n'y a plus de chaleur échangée avec le gaz car les deux éléments sont alors en tous points à la même température.

Au cours de ce T.I.P.E, j'ai pu réaliser un dispositif thermoacoustique réfrigérant de conception assez simple. Le résonateur consistait en un tube cylindrique en verre de 23 centimètres et de 2.2 centimètres de diamètre. La source était un petit haut-parleur de 10 centimètres de diamètre alimenté par un générateur sinusoïdal amplifié. Une plaque en acrylique faisait la jonction entre le haut-parleur et le tube. L'élément le plus complexe, l'échangeur était réalisé avec une pellicule photographique d'un mètre sur laquelle était collée le long du film à intervalles de 5 millimètres des morceaux de fil Nylon afin de maintenir un espace régulier entre chaque tour de pellicule une fois celle-ci enroulée. L'échangeur était ensuite inséré dans le tube à proximité du sommet alors que le haut-parleur était collé en bas du tube. L'extrémité supérieure était fermée par une feuille d'aluminium maintenue par une petite masse marquée afin d'assurer une bonne réflexion et donc un bon taux d'onde stationnaire. La température était mesurée de façon relative au moyen de deux thermocouples cuivre/constantan placés aux deux extrémités de l'échangeur.

Voici une photographie du système réalisé fonctionnant à 375 hertz. Le voltmètre correspondant à la sonde inférieure présente une différence de potentiel de 0.1mV.



Les conditions aux limites imposent un nœud de vitesse au sommet, car l'aluminium est considéré comme fixe, et un nœud de pression à l'extrémité inférieure du tube, car il existe un espace entre la membrane et le bord du tube qui fait office de réservoir de pression où la surpression est donc nulle. On a donc un ventre et un nœud de pression ou de vitesse aux extrémités du tube, ce qui impose une sélection des modes de vibration où les modes propres du résonateur sont donnés par :  $\lambda_n = 4L/(2n+1)$ . En travaillant avec le mode le plus bas, on obtient la fréquence de résonance qui est ici de 375 hertz. On peut alors calculer la profondeur de pénétration thermique qui est 0.2745mm ou 0.3248mm suivant que l'on considère la phase d'échange comme isobare ou isochore. Le fil Nylon utilisé ici avait un diamètre d'environ 0.5mm ce qui représente à peu près deux fois la profondeur de pénétration thermique de telle sorte que l'essentiel du gaz participe à l'échange.

Au cours de la manipulation, une mesure de la fréquence de résonance effective en présence de l'échangeur a d'abord été réalisée, à l'aide d'un micro à électrets placé dans le résonateur relié à un oscilloscope. On a pu observer une résonance pour les fréquences 350 hertz, 375 hertz et 420 hertz, les modes propres supérieurs étant d'amplitude moindre, on s'est restreint à ce domaine pour le fonctionnement du système. Le mode le plus bas présentait donc une résonance comme prévu mais les autres fréquences observées ne correspondent pas à un mode de la cavité. Ceci montre que la présence de l'échangeur perturbe suffisamment l'écoulement du gaz pour engendrer d'autres modes que ceux attendus pour une cavité vide.

En faisant fonctionner le système aux deux fréquences précédemment citées, on a pu observer l'établissement d'un refroidissement d'environ 4 °C au niveau de l'extrémité inférieure de l'échangeur par rapport à la température ambiante. On peut en déduire le

gradient critique du système sachant que la pellicule était large de 35mm :  $\text{grad}T = 110^\circ\text{K/m}$ . Cette différence de température s'établissait de façon quasi instantanée une fois le système placé à la résonance. Cela signifie que la capacité calorifique de l'échangeur utilisé n'était pas très grande devant celle du gaz. Pour augmenter la durée des échanges, il aurait fallu utiliser un matériau de plus grande capacité pour l'échangeur et ensuite relier ses extrémités au volume à refroidir faisant office de source froide et à une source chaude.

Les performances obtenues ici sont bien sur loin d'être suffisantes pour réaliser un véritable réfrigérateur. Une amélioration du système nécessiterait tout d'abord un amplificateur plus puissant, car celui utilisé ici n'avait qu'une puissance de 10 watts. Par ailleurs, les haut-parleurs disponibles dans le commerce sont adaptés à la musique et aux paroles, ils disposent donc d'une large bande passante couvrant la gamme des sons audibles et ne cherchent pas à convertir au mieux l'énergie électrique en énergie acoustique. Alors qu'ici, le son recherché est le plus puissant possible et pour une seule fréquence.

La réfrigération thermoacoustique présente un grand intérêt dans le cadre du développement durable. En effet, même si les réfrigérateurs actuels n'utilisent plus de CFC(chlorofluorocarbones), qui attaquent la couche d'ozone, comme gaz réfrigérant depuis les années 90, ils ont été remplacés par deux nouvelles familles de gaz : les HCFC et les HFC. Cependant, les HCFC sont tout de même destructeurs pour la couche d'ozone, et les HFC sont des gaz à effets de serre extrêmement violents. Une alternative à ce type de gaz est l'utilisation d'hydrocarbures mais ceux-ci présentent des risques d'explosion. Un réfrigérateur thermoacoustique quant à lui peut fonctionner avec de l'hélium sous pression qui est un gaz inoffensif pour l'environnement et non toxique.

Un autre avantage des réfrigérateurs thermoacoustiques est leur plus grande précision, car contrairement à un réfrigérateur classique où le compresseur n'est actionné que lorsque la température descend en dessous d'un certain seuil, un réfrigérateur thermoacoustique fonctionne de manière continue.

La thermoacoustique semble donc être un domaine prometteur en ce qui concerne la réfrigération mais beaucoup de perfectionnements techniques sont encore nécessaires, notamment avec le développement de haut-parleurs plus efficaces. Mais on peut espérer que de tels développements seront réalisés à l'avenir car les intérêts sur le plan environnemental mais aussi sur un plan pratique sont vraiment non négligeables.

### **Bibliographie :**

- "Le son transformé en froid", Steven Garrett et Scott Backhaus, Pour la science.
- [http://www.acs.qc.ca/documents/article\\_raphaelleDerome.pdf](http://www.acs.qc.ca/documents/article_raphaelleDerome.pdf) 2004
- <http://mshades.free.fr/thermoacoustique/thermoacoustique.html> 2004
- <http://ojps.aip.org/ajp/> 2002
- Epreuve de sciences physiques ENS Cachan-Polytechnique PSI 2004