

M.X. François

INTRODUCTION

La thermoacoustique n'est plus une curiosité hybride en marge voire au banc des acousticiens ou des thermodynamiciens et des mécaniciens des fluides. Dans plusieurs laboratoires mondiaux on trouve maintenant soit de petites équipes qui disposent de prototypes de mise en œuvre des phénomènes de base, soit des théoriciens ou numériciens qui s'attaquent résolument aux problèmes de cette acousto – thermique fortement non linéaire avec des échelles temporelles caractéristiques respectives si différentes. Quand on examine la littérature "thermoacoustique", les noms de Greg Swift (Los Alamos) et Nicolas Rott reviennent sans cesse et sont incontournables. Le premier est le grand maître des réalisations de tout type et toute puissance de machines ou systèmes thermoacoustiques. Son avance, grâce tout spécialement à ces réalisations, lui conférait jusqu'à ce jour un rôle de «guide». Le second est l'auteur de la seule théorie hydrodynamique *linéaire* des instabilités thermoacoustiques décrivant la propagation des ondes dans les tubes aux parois chauffées. Ils sont donc souvent pris comme référence. S'il y a cependant peu de laboratoires, excepté celui de Greg Swift largement leader, directement impliqués dans des contrats industriels d'application, on peut penser que la maîtrise des procédés thermoacoustiques s'améliore dans les autres laboratoires au point d'intégrer prochainement des secteurs d'application.

Tout en rappelant les 3 grandes qualités de ce procédé de conversion d'énergie qui sont :

- la fiabilité et le faible coût de fabrication
- la protection de l'environnement
- la possibilité d'utiliser des sources d'énergie renouvelable

il faut cependant souligner que les phénomènes qui prévalent dans le procédé sont limités à des volumes de couches limites fluide et donc d'énergie volumique modeste surtout s'il s'agit de gaz. Les puissances importantes demandées par les applications mettent donc en jeu nécessairement des comportements très complexes en raison du caractère hybride acoustique et thermique.

Le LIMSI dans sa triple tradition énergétique, mécanique et cryogénique s'est investi depuis 7 ans dans ce domaine avec un certain succès. Il fait partie des laboratoires en phase d'approche de l'application et de mise au point de bons modèles descriptifs.

Abordons maintenant la synthèse des actions internes à l'action transversale "Thermoacoustique – Cryogénie", au travers de ses objectifs et ses études.

Les objectifs

Le premier but recherché est la compréhension des phénomènes de base décrits comme une interaction thermique – acoustique de couche limite pour leur modélisation dans des systèmes globaux où ils sont générateurs ou récepteurs (*Etude fondamentale de l'instabilité thermoacoustique*). Les phénomènes sont très différents selon le domaine d'amplitude acoustique et de transfert thermique mis en jeu, mais aussi selon l'architecture acoustique (géométrique) des systèmes physiques (*Les méthodes d'analyse linéaire des systèmes thermoacoustiques complexes*). Le deuxième but recherché est la mise au point de systèmes appliqués à la réfrigération en cryogénie.

La méthode suivie s'appuie sur trois piliers :

- l'étude et la réalisation de stations d'essais très bien instrumentées et accessibles à la modélisation,

- le développement de modèles, et leur validation et amélioration par comparaison avec les résultats expérimentaux,
- le retour vers la réalisation pratique et la recherche technologique permettant l'émergence de meilleures stations donnant des informations plus exactes, plus intrinsèques et pouvant alors orienter les nouveaux développements.

Cette démarche globalisante est complétée, une fois les problèmes bien cernés, par l'étude de problèmes spécifiques et bien localisés, en général par simulation numérique. C'est le cas de l'étude menée depuis 2 ans par I. Delbende pour la simulation 2D d'instabilité linéaire et depuis 6 mois sur l'étude des échanges de chaleur dans le stack et aux interfaces avec P. Duthil et C. Weisman.

L'action transversale est organisée autour de 5 thèmes.

THÈME 1 : GÉNÉRATION D'ONDES ACOUSTIQUES PAR UN PROCÉDÉ THERMOACOUSTIQUE

M.X. François, E. Bretagne, T. Jin⁴, G. Hennegrave⁵

Les générateurs d'ondes thermoacoustiques ont un potentiel d'application important pour des systèmes de réfrigération susceptibles d'utiliser des sources d'énergie telles que "piston fluide" à fort taux de compression. Il est alors nécessaire de rechercher toutes configurations acoustiques ou thermiques conduisant à une augmentation de leur rendement de conversion d'énergie au sens thermodynamique. Grâce à quatre prototypes dont les deux plus récents sont cités ci-après, on a pu progresser considérablement dans la compréhension des phénomènes de base et dans la maîtrise de leur mise en œuvre pour obtenir de manière fiable des niveaux élevés de puissance acoustique. L'une des solutions consiste à réaliser l'échange de chaleur "solide – fluide" sous très faibles ΔT , réduisant de ce fait les irréversibilités.

L'architecture proposée par Swift et Backhaus [1] cherche à remplir cette condition. L'objet de ce travail a été de progresser dans cette voie difficile en s'inspirant de la première version développée à Los Alamos. La mise en œuvre de cet échange de chaleur n'a rien de nouveau et est effectuée depuis près de deux siècles dans les machines inventées par Lord Stirling au sein du régénérateur. Dans celui-ci en effet, l'espacement entre parois solides est très inférieur à l'épaisseur de peau thermique (et visqueuse) et le fluide adhère thermiquement à la paroi supposée de grande capacité thermique. Dans la machine de Stirling, piston et déplaceur assurent les mouvements du fluide de type onde progressive où pression et vitesse acoustique sont en phase. Le point nouveau pour la réalisation du générateur d'ondes thermoacoustiques est donc de réaliser, dans une enceinte globalement fermée, le champ acoustique qui conduit, au moins dans une région, à une onde progressive où pression et vitesse acoustique sont également en phase, et d'y placer le régénérateur associé à ses échangeurs de chaleur.

La conception d'un tel ensemble est complexe et sa mise au point technologique est lourde. Le calcul, le dessin, la réalisation et le montage de l'ensemble reporté figure 4 ont été effectués au sein de l'équipe avec le concours de J. Tao et G. Hennegrave pendant leur séjour au laboratoire. L'étude expérimentale a été réalisée par E. Bretagne. Le résultat le plus important est que l'ensemble fonctionne et constitue un outil remarquable pour l'investigation de ce type de machine dans cette gamme de puissance. Les premiers résultats expérimentaux sur les champs acoustiques et thermiques[2] mettent en évidence un comportement transitoire globalement instable dans la zone proche du seuil d'instabilité et des amplitudes acoustiques stationnaires comparables à celles des autres générateurs mais avec un rendement près de deux fois plus important. L'étude des champs de

4. Cryogenics Laboratory, Zheiyang University, Hangzhou, Chine

5. UTBM - Belfort

température stationnaires dans le régénérateur révèle le caractère tridimensionnel du "streaming" tant redouté dans cette partie du système. L'analyse approfondie de ce générateur est prévue en 2002.

La puissance acoustique délivrée à partir de la puissance thermique est limitée à ce jour à 360Watts par la puissance de l'alimentation électrique de 3000Watts. Les températures des sources chaude et froide sont respectivement de 600°C et 21°C soit pour un rendement de Carnot correspondant de 66,2%, un rendement relatif de 18%. Ce résultat montre bien la qualité des performances expérimentales qui sont principalement le résultat de la progression par "aller et retour" expérience – modélisation.

La mise au point du générateur dit de Swift-Backhaus est également une performance qui ouvre la porte aux générateurs mixtes stationnaire/progressif d'architecture complexe. Ce dispositif, a priori plus performant en rendement, sera complètement étudié et modélisé cette année.

[1] S. Backhaus and G. W. Swift, *A Thermoacoustic Stirling Heat Engine*, Nature, 399, 335-338, 1999.

[2] E. Bretagne, M-X François, T. Jin, *The Swift-Backhaus prime mover built in LIMSI*, First International Workshop on Thermoacoustics, Hertogenbosh, The Netherlands, April 2001.



FIG. 4 – Vue du générateur d'ondes acoustiques de type Swift – Backhaus construit et mis au point au Laboratoire. On distingue la partie linéaire couplée au réservoir en bout et qui assure une résonance de type Helmholtz et la boucle où l'interaction chaleur son se fait dans un transfert de chaleur isotherme au sein du régénérateur.

THÈME 2: MÉTHODES D'ANALYSE LINÉAIRE DES SYSTÈMES THERMOACOUSTIQUES COMPLEXES

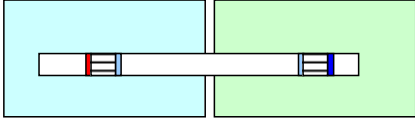

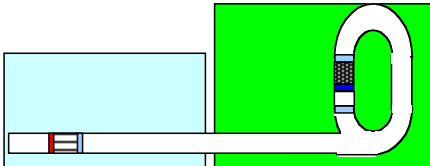
M.-X. François, E. Bretagne

La configuration en termes de taux d'ondes stationnaires du champ acoustique amplifié par l'énergie thermique, joue un rôle central dans le rendement d'un moteur thermoacoustique. On voit cependant sans difficulté que la "lecture acoustique" du système "Swift – Backhaus" n'est pas triviale et que la conception de nouveaux systèmes, avec de nouvelles architectures, diamètre, positionnement du stack, etc., ne relève pas seulement du génie intuitif.

Dans le cadre de la thèse d'E. Bretagne, deux étapes décisives ont été franchies :

- classification des différentes organisations acoustiques et thermoacoustiques des systèmes,
- proposition de méthodes d'analyses linéaires simples de ces systèmes complexes et vérification expérimentale des propositions.

Ces résultats ont été présentés en conférence invitée à ICA2001 à Rome (3-7/09/2001) et sont en cours de rédaction pour une revue. Le tableau ci-dessous donne un résumé des configurations actuellement étudiées dans les différents laboratoires et situe la place du LIMSI.

	Hofler (1984) Yazaki (1998) <i>Limsi 2000</i>	1
	Swift, Ragdebaugh 1995 <i>Limsi 2001</i>	2
	Swift, Cryenco 1998	3

THÈME 3: LA RÉFRIGÉRATION THERMOACOUSTIQUE

*F. Jebali, M.X. François, E. Bretagne, Q. Li*⁶

1^{ère} PARTIE : AGENT FLUIDE GAZ

Le phénomène fondamental de pompage de chaleur par thermoacoustique est à première vue le complémentaire de celui qui conduit au développement de l'instabilité thermoacoustique. Il résulte en effet de la même interaction de couche limite entre le solide et le fluide, engendrée cette fois par la propagation de l'onde acoustique. Il est en outre très attirant aussi bien sur le plan fondamental mésoscopique et macroscopique que sur le plan appliqué où il est considéré comme une alternative prometteuse pour la réfrigération non polluante[1]. Deux configurations sont étudiées :

- La première concerne le réfrigérateur alimenté par une source mécanique (piston)
- La deuxième examine le cas de la source thermoacoustique qui conduit à une machine "tri-therme" entièrement thermique. C'est le HDTAR (Heat Driven Thermoacoustic Refrigerator)

On présente ici l'étude du deuxième type où la source d'énergie est un piston fluide acoustique. On utilise l'un des générateurs d'ondes développés au laboratoire comme source acoustique. La cellule thermoacoustique de réfrigération est soit un stack, empilement de plaques espacées de près de deux épaisseurs de peau thermique, soit des grilles conduisant à la situation opposée de régénérateur. Le générateur d'ondes est structuré géométriquement soit pour réaliser un champ acoustique stationnaire (stack), soit pour assurer approximativement une région de type progressif où est placé le régénérateur.

Pour l'étude de base, comme la plupart des autres groupes de recherche dans le monde, on ne dispose pas d'échangeurs de chaleur aux extrémités du stack ou régénérateur placé donc en

⁶ Cryogenic Laboratory of Chinese Academy of Science, BP 2711, 100080 Beijing, P.R. China

situation quasi adiabatique comme le montre la figure 5. On peut donc simplement, sous cette hypothèse, calculer les champs de température conductifs dans le solide qui représentent directement la puissance calorifique pompée.



FIG. 5 – Réfrigérateur de type HDTAR : On distingue le tube résonnant, la cellule motrice avec ses deux échangeurs à gauche et le régénérateur à droite où se réalise le pompage de chaleur

L'analyse expérimentale très détaillée [2] couvre un domaine de pression acoustique important tant en valeur absolue ($10^3 < p_1 < 10^5 \text{Pa}$) qu'en valeur relative ($10^{-3} < p_1/p_0 < 10^{-1}$). Les résultats montrent deux comportements selon l'amplitude de la pression acoustique. Une étude de reproductibilité révèle cependant que pour les faibles amplitudes (mises en œuvre par la grande majorité [3] des groupes de recherche), les résultats ne sont pas très fiables. Par ailleurs, les résultats pour les pressions acoustiques plus importantes montrent une augmentation du désaccord avec la théorie linéaire de N. Rott, ou les formulations de Weathley [4], sans doute due à la non - prise en compte de l'échange thermique entre le solide et le fluide. Les mesures originales de température figure 6 dans le solide et dans le fluide indiquent en effet que l'hypothèse adoptée par N. Rott d'un échange de chaleur parfait entre ces derniers est rapidement faussée dès que les énergies en jeu sont conséquentes.

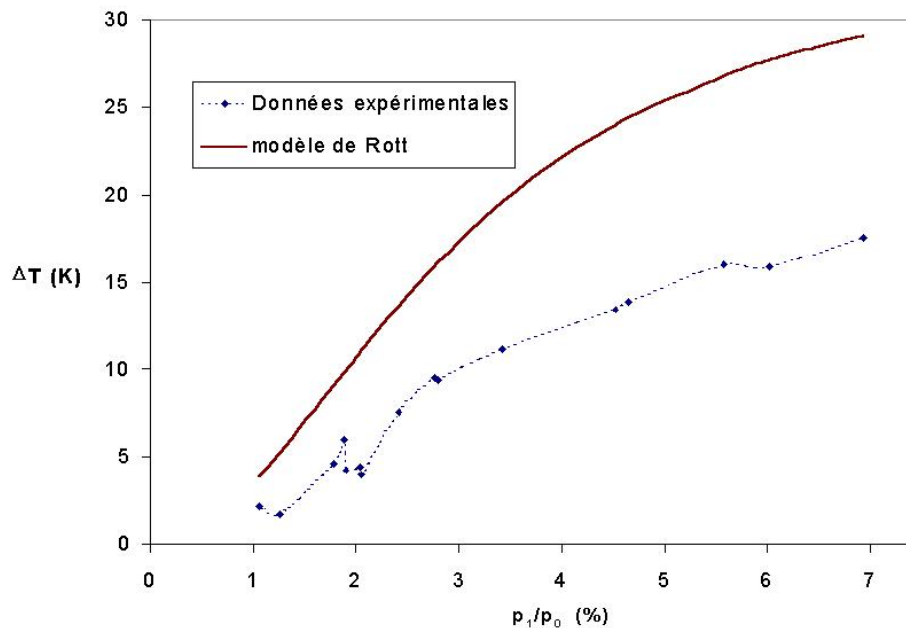


FIG. 6 – Effet de pompage de chaleur dans le régénérateur en fonction du rapport de la pression acoustique p_1 sur la pression moyenne p_0 . Comparaison avec le modèle théorique de N. Rott

Une analyse fine des champs de température est donc indispensable pour progresser dans la compréhension des échanges thermiques solide fluide oscillant et donc la modélisation du phénomène global de réfrigération.

[1] S. L. Garrett, S. Backhaus *The power of sound*, American Scientist, vol. 88, 2000, 516-525

[2] E. Bretagne *Générateurs d'ondes et instabilités thermoacoustiques : Application à la conversion d'énergie*, Thèse de doctorat, Univ. Paris VI, 2001

[3] LMFA, Lyon ; Graduate Program in Acoustics, Applied Research Laboratory, Penn. State University, LAUM, Le Mans, Department of Mechanical Engineering, Kansai University

[4] J. Weathley, T. Hoffer, G. W. Swift and A. Migliori *An intrinsically irreversible thermoacoustic Heat engine*, JASA, 74(1), 153-170, 1983.

2^{ème} PARTIE : AGENT FLUIDE LIQUIDE CRITIQUE

Une limitation du système précédent réside dans la faible valeur de l'énergie volumique et également aux coefficients d'échange de chaleur imposé par l'agent gaz. Pour cette raison, on étudie la possibilité de remplacer le gaz dilatable par un liquide tout aussi dilatable, c'est-à-dire près de son point critique. Dans les conditions de température moyenne ambiante, le R134A, frigorigène bien connu, est un candidat facile d'emploi pour une première étude de faisabilité.

L'étude est menée dans une machine de type Stirling à deux pistons, deux échangeurs et un régénérateur.

La figure 7 représente l'écart de température enregistré à l'aide des thermocouples 1 et 2 pour des fréquences d'onde $f = 1$ Hz, $f = 2$ Hz et $f = 3$ Hz, une pression moyenne de 26 bars et une pression dynamique de ± 12 bars. Comme attendu l'effet est fortement dépendant de la fréquence de l'onde. On note en outre une valeur limite liée à l'amplitude de pression dynamique et à celle des pertes visqueuses ou conductives dans le système. Le résultat met bien en évidence le pompage de chaleur thermoacoustique. Des modifications importantes principalement dans les échangeurs de chaleur sont prévues pour transformer ce qui est actuellement un effet thermoacoustique en machine thermique. On pourra alors conclure sur la faisabilité globale. Des expériences utilisant un espacement plus important entre les plaques du régénérateur et une isolation plus importante de l'ensemble régénérateur - échangeurs sont nécessaires pour confirmer ce point de vue.

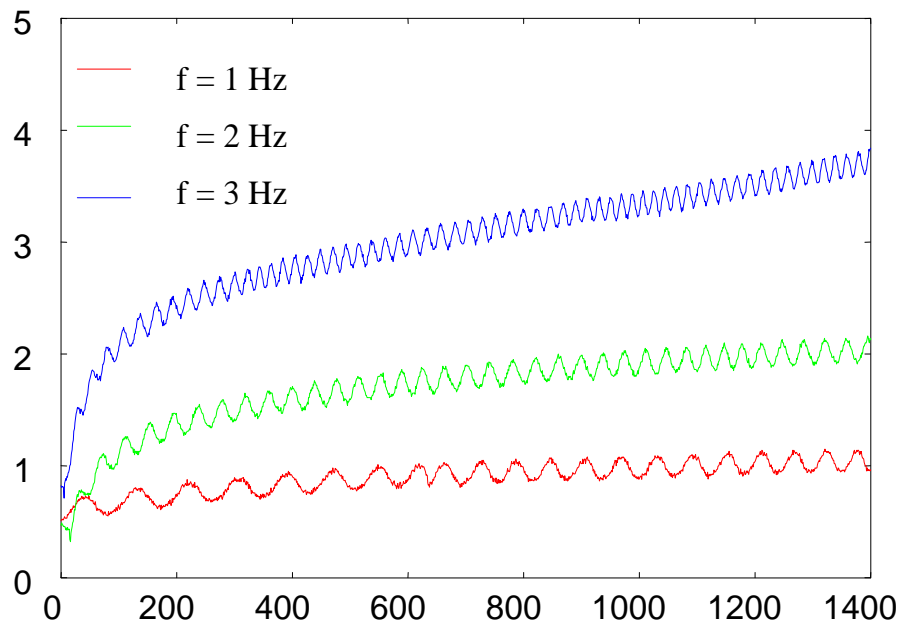


FIG. 7 – Ecart de température entre les extrémités du régénérateur, $T_2 - T_1$ (K), en fonction du temps pour une pression moyenne de 26 bars et pour trois fréquences : 1 Hz, 2 Hz et 3 Hz.

[1] N. Sanchez et B. Paoloni : «Etude d'une machine de réfrigération de type Stirling fonctionnant sur un mode thermoacoustique». Rapport de stage de fin d'études ENSAM-LIMSI, Juin 2000.

THÈME 4 : MESURE DE LA VITESSE ET DE LA PUISSANCE ACOUSTIQUE

F. Jebali, M.X. François, (X. Zhang, F. Guo)⁷, G. Hueltz⁸

L'objectif est de calculer et mesurer la puissance acoustique disponible à l'entrée du stack afin d'en permettre une caractérisation complète de la machine. La puissance acoustique, flux de l'intensité acoustique à travers une section de passage du fluide, peut s'écrire sous la forme :

$$W_{(x)} = \frac{1}{2} |p_1| |q_1| \cos \varphi$$

où p_1 et q_1 désignent la pression et le débit acoustiques, φ est le déphasage entre ces deux paramètres et $||$ désigne le module de ces variables complexes. Les valeurs théoriques de ces trois paramètres sont obtenues en utilisant le modèle linéaire de réseaux [1]. On applique ici la méthode dite de deux capteurs de pression placés en deux positions A et B en amont du stack et séparés d'une distance Δx . Si δ_ν est l'épaisseur de la couche limite visqueuse et r_c le rayon du tube, en effectuant un développement au premier ordre, il vient :

$$W \approx \frac{\pi r_c^2}{2\omega\rho_0\Delta x} \left[\left(1 - \frac{\delta_\nu}{r_c}\right) |P_A| |P_B| \sin \phi_{AB} + \frac{\delta_\nu}{2r_c} (|P_A|^2 - |P_B|^2) \right]$$

Les figures a et b représentent l'amplitude de pression acoustique au niveau des positions A et B. La figure c représente le déphasage entre ces pressions. La comparaison est qualitativement satisfaisante mais il apparaît que l'écart théorie – expérience augmente avec la fréquence, traduisant le fait que le compresseur mécanique à piston est mal modélisé et qu'il faudrait introduire son impédance interne sous forme non linéaire et complexe. La figure d représente la puissance acoustique en fonction de la fréquence. On retrouve les écarts obtenus sur les amplitudes de pression à la résonance et sur le déphasage pour les fréquences supérieures à 46 Hz. Des expériences réalisées avec un taux d'ondes stationnaires moins élevé sont nécessaires afin d'obtenir des valeurs de déphasage plus importantes et par conséquent des mesures de puissance plus précises.

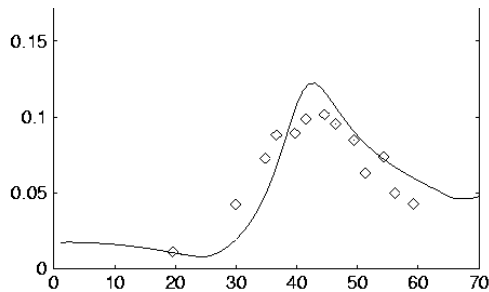


Fig. a : Amplitude de pression (bar) en fonction de la fréquence (Hz) en $x_A=0.215\text{m}$

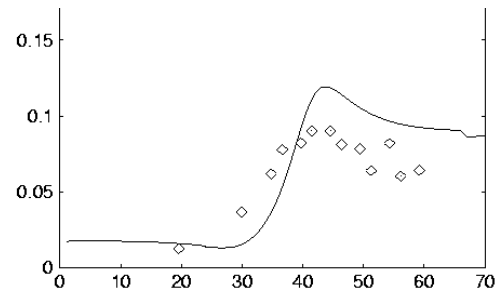


Fig. b : Amplitude de pression en (bar) en fonction de la fréquence (Hz) en $x_B=0.840\text{m}$

7. Huazhong University of Science and Technology, Cryogenic Laboratory, Wuhan, 430074, P.R. China

8. UNAM, Mexico, Institut de investigatione de Energia

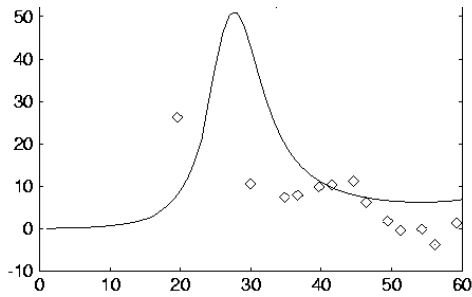


Fig. c : Déphasage entre les pressions (Rad) en fonction de la fréquence (Hz)

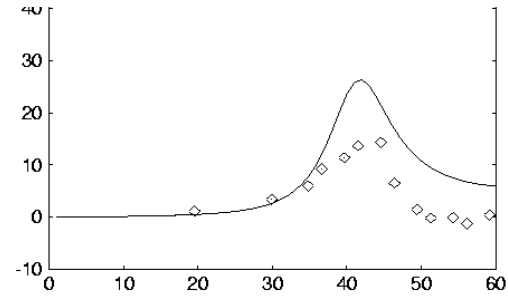


Fig. d : Puissance acoustique (Watts) en fonction de la fréquence (Hz)

[1] Lubiez J.-V. et al. : Experimental investigation of Heat pumping in thermoacoustic refrigerator. *Advances in Cryogenics Engineering*, **45** A, 1999, pp. 143-149.

THÈME 5 : L'APPROCHE NUMÉRIQUE DIRECTE

I. Delbende, P. Duthil, C. Weisman

A l'heure actuelle, les études numériques en thermoacoustique sont très peu nombreuses. L'écueil majeur à éviter est la simulation directe des équations de Navier-Stokes (cf. par exemple Sparrow [1]). En effet, trois échelles de temps très différentes : l'échelle acoustique (de l'ordre de la milliseconde), celle du développement de l'instabilité jusqu'à saturation (de l'ordre de la seconde), et celle de la thermique des plaques (de l'ordre de la minute), rendent le calcul prohibitivement long si l'on veut accéder au régime périodique, même en deux dimensions d'espace. Au laboratoire, nous mettons en œuvre deux approches complémentaires pour résoudre ce problème. La première consiste à effectuer l'analyse linéaire d'instabilité d'un modèle plan de résonateur acoustique. Les équations de Navier-Stokes sont linéarisées au voisinage d'un état de repos présentant un gradient longitudinal de température à l'emplacement du stack ; les propriétés d'instabilité sont données par les modes propres de l'opérateur d'évolution discrétisé. Ceci permet en particulier de prédire le gradient critique de température qu'il faut imposer pour qu'une onde acoustique se développe [2]. Cette approche débouche sur l'étude de l'évolution temporelle des amplitudes des modes dans le cadre faiblement non linéaire, formulation par laquelle on s'affranchit de l'échelle de temps acoustique ; elle est particulièrement adaptée à la modélisation des moteurs thermoacoustiques. La seconde approche, plus récente, consiste (voir ci-après), sur les traces de Worlikar et al. [3], à intégrer les équations de Navier-Stokes dans la formulation faible nombre Mach due à Paolucci [4]. Dans cette approche, la vitesse des ondes acoustiques est ramenée à l'infini, ce qui supprime l'échelle de temps de la propagation acoustique. Il est nécessaire en revanche d'imposer au système la fréquence acoustique par des conditions aux limites oscillantes, ce qui la rend bien adaptée à la modélisation de la réfrigération thermoacoustique. On obtient, pour un temps de calcul modéré, une description instationnaire des champs de vitesse et de température dans la région du stack.

On a réalisé une simulation numérique 2D de l'écoulement et de l'échange de chaleur à proximité et aux alentours de l'empilement de plaques constituant la cellule thermoacoustique. L'amplitude des oscillations de pression acoustique, faible devant la pression moyenne, conduit à des nombre de Mach faible (10^{-3}), ce qui légitime l'utilisation de la formulation "faible Mach".

Une première validation a été menée sur la configuration de Worlikar et al. Les figures ci-après montrent la configuration géométrique (8), les conditions aux limites (9) et l'évolution temporelle (10) du gradient de température qui s'établit le long des plaques. Un maillage régulier a été utilisé et la convergence obtenue à chaque pas de temps en deux ou trois cycles de multigrille. Ce résultat encourageant est encore loin de simuler la configuration expérimentale qui permettra une validation

de la simulation numérique. Le confinement doit être plus grand et le temps de diffusion thermique beaucoup plus long. La suite du travail portera donc sur une étude de convergence, avec utilisation d'un maillage Chebyshev pour une meilleure résolution à proximité des plaques.

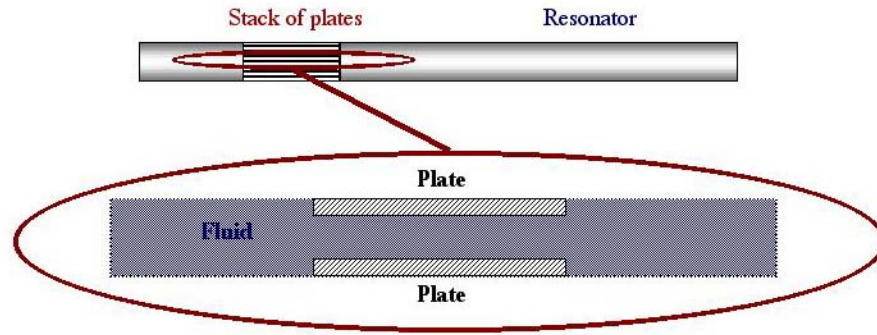


FIG. 8 – *Éléments essentiels d'un système de réfrigération thermoacoustique et domaine de calcul.*

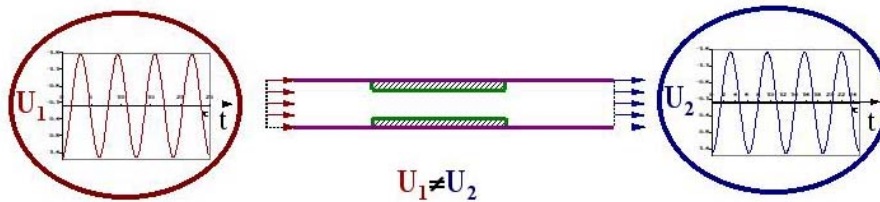


FIG. 9 – *Conditions aux limites imposées: – symétrie sur les frontières inférieure et supérieure – adiabaticité tout autour – profils de vitesses imposés en entrée et en sortie.*

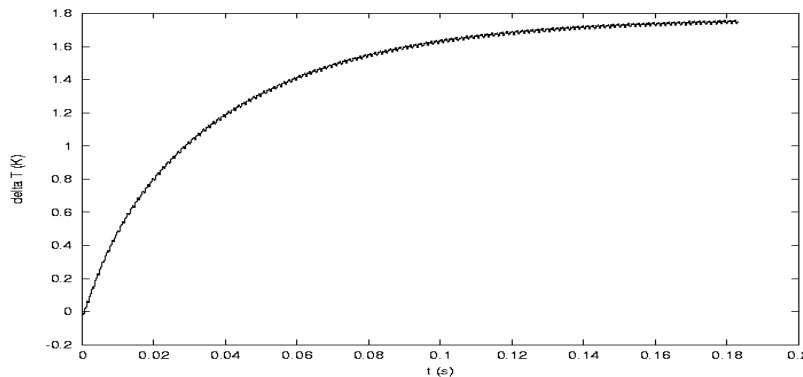


FIG. 10 – *Evolution temporelle du gradient total de température le long des plaques. Configuration de Worlikar et al. [2]*

CONCLUSIONS et PERSPECTIVES

Au travers des quelques résultats présentés ci-dessus, on souhaite montrer qu'après les études de générateur d'ondes et pompe à chaleur conduites séparément, l'action transversale s'oriente vers la réfrigération de puissance aussi bien sur le plan fondamental qu'appliqué. Les méthodes de mesure et qualification sont au point, excepté celle de la vitesse acoustique qui doit être améliorée. Les thèmes 1, 3 et 5 seront privilégiés.

Les travaux s'orientent donc vers l'étude du rôle des harmoniques aussi bien dans les échanges de chaleur que dans le processus thermoacoustique lui-même. Par ailleurs, l'accent est mis sur le processus d'échange de chaleur entre la paroi et le fluide oscillant. La modélisation associée à l'expérimentation encore une fois est le programme prioritaire actuel. Le fait nouveau est son développement également au plan numérique avec de premiers résultats encourageants.

Parmi les perspectives appliquées, il est raisonnable d'espérer en 2002 un premier HDTAR cryogénique d'une centaine de Watts.

RELATIONS INTERNATIONALES

L'équipe collabore principalement avec la Chine : Cryogenics Laboratory, C.A.S., Pékin – Cryogenics Laboratory, HUST, Wuhan – Mechanical Engineering Department, HKUST, Hong Kong.