



# GDR CNRS THERMOACOUSTIQUE

## Systèmes thermoacoustiques

### Les partenaires :

1. **Insitut Pprime** (<http://www.pprime.fr/>) contact : H el ene Baillet
2. **LIMSI** ([www.limsi.fr](http://www.limsi.fr)) contact : Diana Baltean-Carl es
3. **LAUM** ([www.laum.univ-lemans.fr](http://www.laum.univ-lemans.fr)) contact : Pierrick Lotton
4. **LMFA** ([www.acaoustique.ec-lyon.fr](http://www.acaoustique.ec-lyon.fr)) contact: Philippe Blanc-Benon
5. **FEMTSO-ST / ENISYS** ([www.femto-st.fr/](http://www.femto-st.fr/)) contact : Philippe Nika
6. **IPNO** ([www.ipnweb.in2p3.fr/](http://www.ipnweb.in2p3.fr/)) contact Jean-Pierre Thermeau

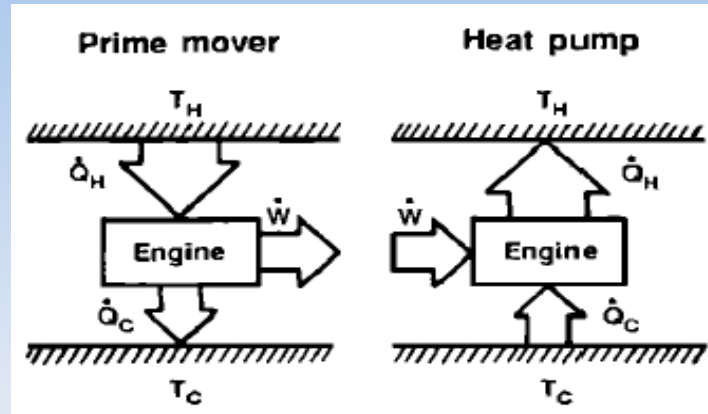
La thermoacoustique ?

Les axes de recherche du GDR

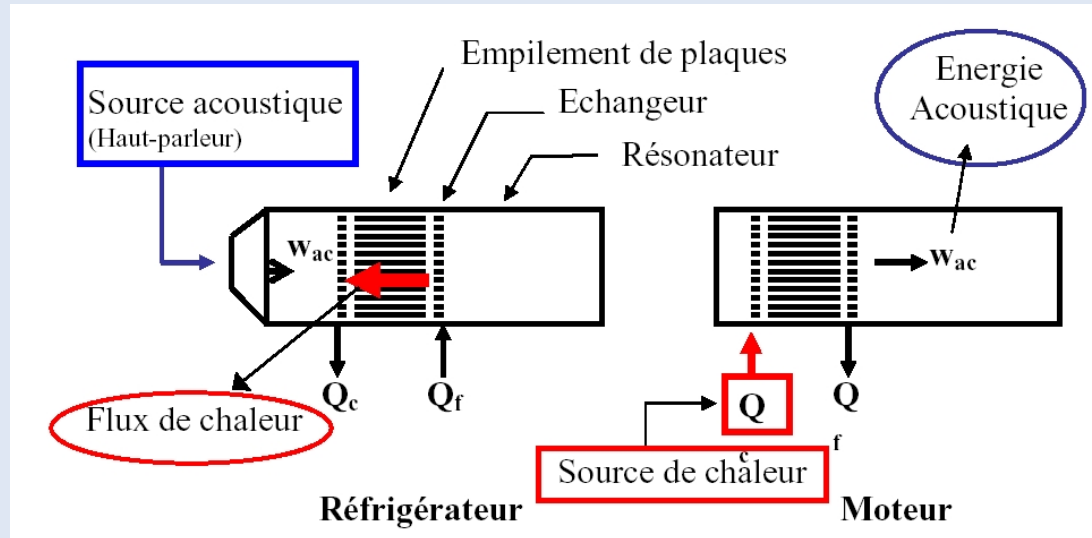
Quelques exemples

# 1.- Introduction à la thermoacoustique

## 1.1.- Généralités



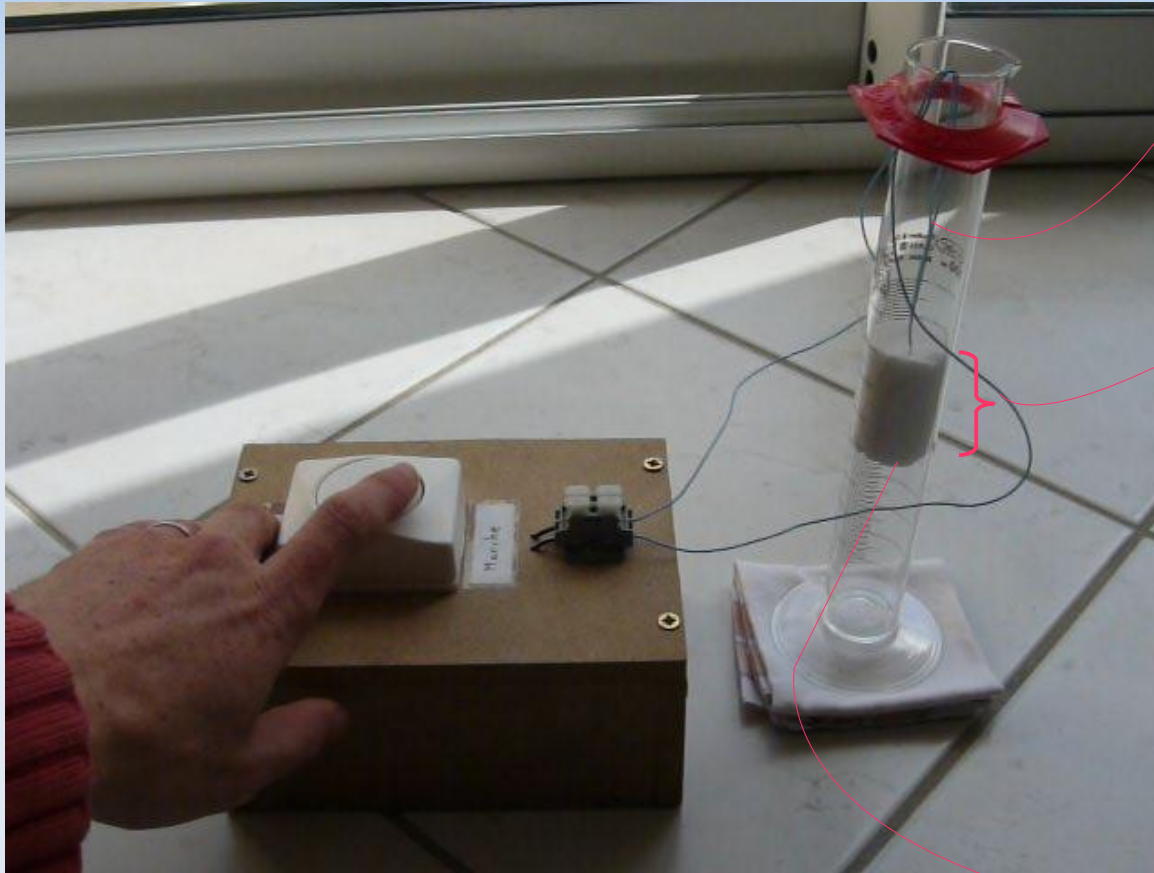
Machine thermodynamique



Machine thermoacoustique (à ondes stationnaires)

# 1.- Introduction à la thermoacoustique

## 1.2.- Exemple du moteur quart d'onde



Acoustic resonator

Stack

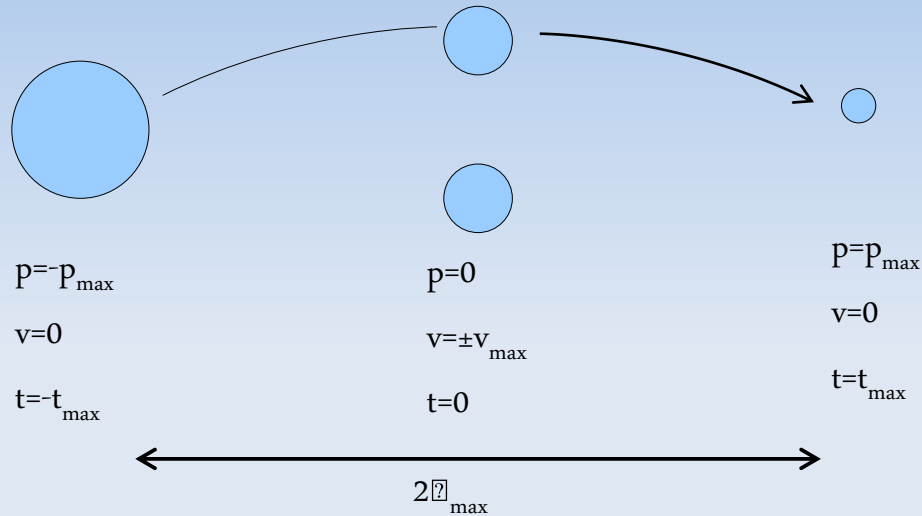


Heating  
(electrical resistance)

# 1.- Introduction à la thermoacoustique

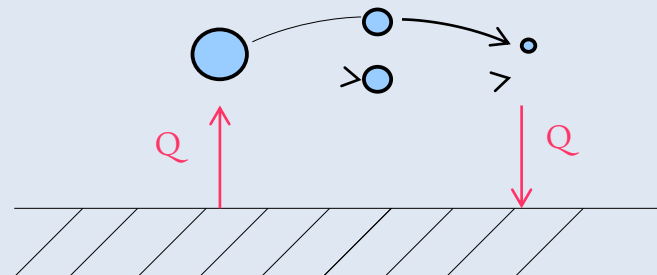
## 1.3.- Effet thermoacoustique (onde stationnaire)

Fluid parcel submitted to an acoustic standing wave in free space



order of magnitudes: at 1kHz and  $L_p = 120$  dB SPL,  $p_{\max} \approx 20$  Pa,  $v_{\max} \approx 5 \cdot 10^{-2}$  m.s<sup>-1</sup>,  $\lambda_{\max} \approx 10^{-5}$  m,  $t_{\max} \approx 2 \cdot 10^{-2}$  K

Adiabatic motion... but what occurs if the parcel oscillates in the vicinity of a stack plate?

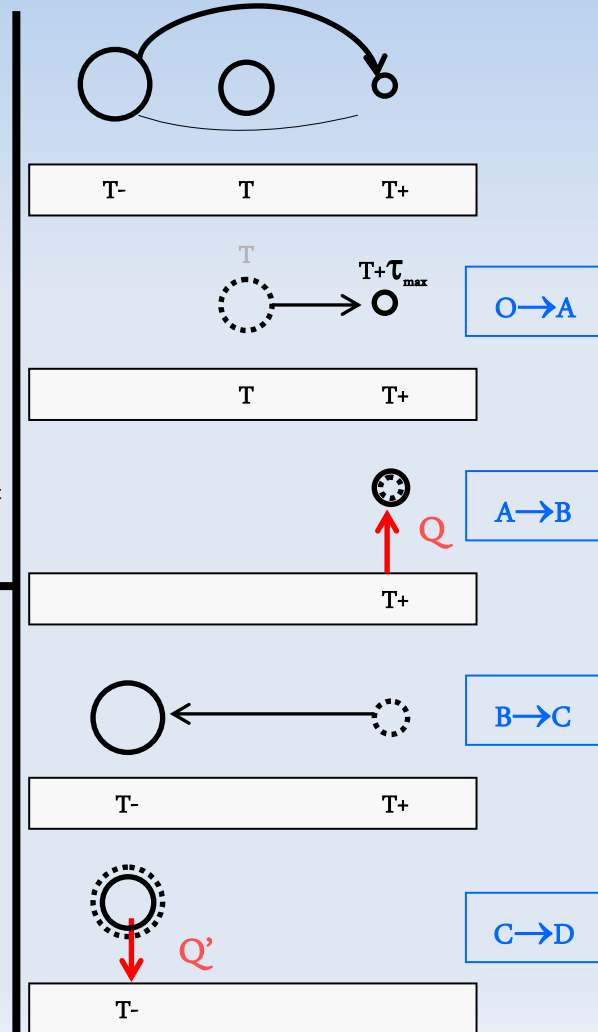
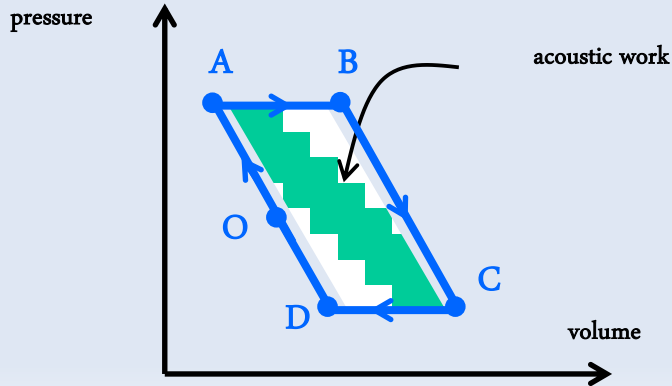
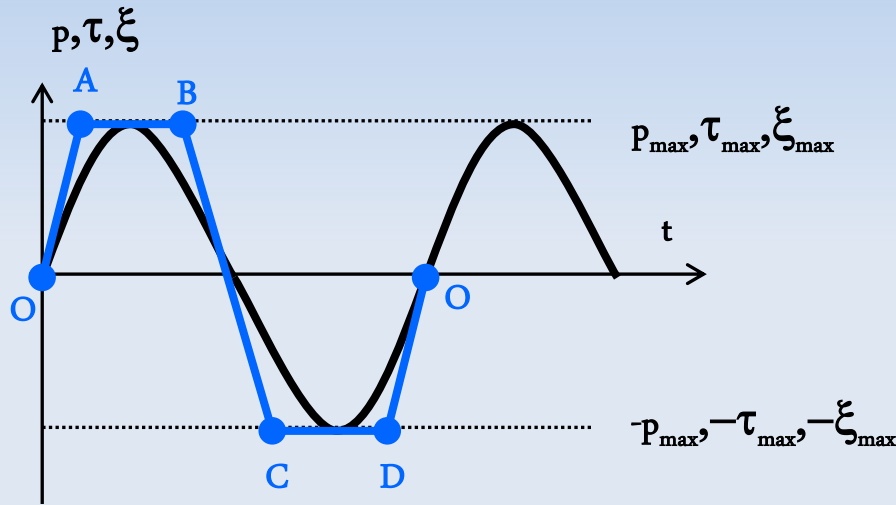


# 1.- Introduction à la thermoacoustique

## 1.3.- Effet thermoacoustique (onde stationnaire)

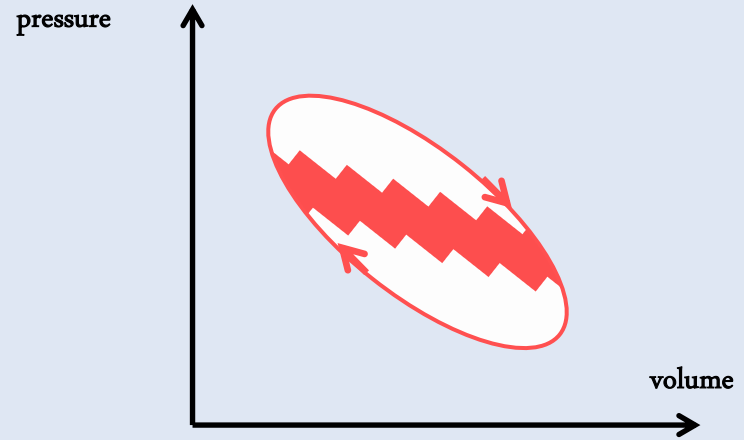
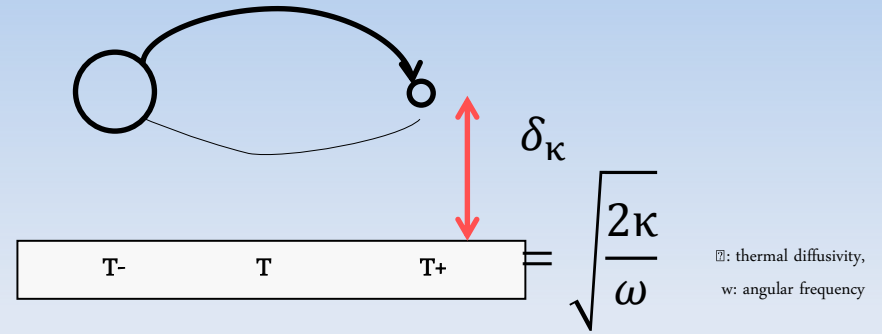
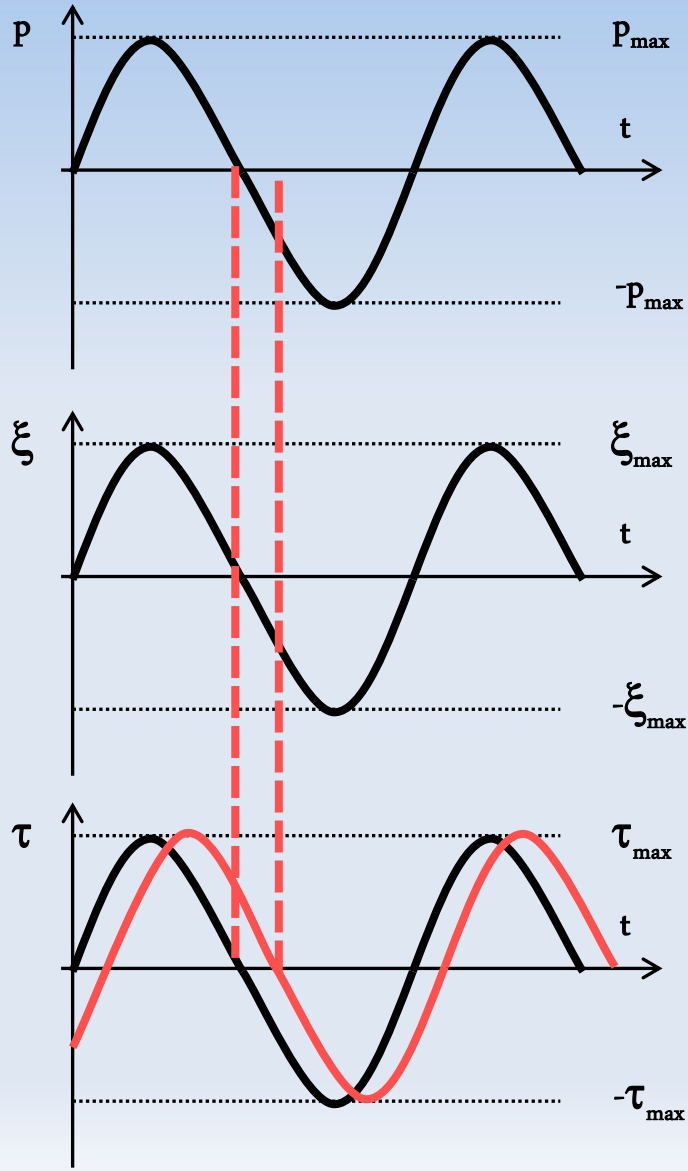


“If heat be given to the air at the moment of greatest condensation [i.e., greatest density] or be taken from it at the moment of greatest rarefaction, the vibration is encouraged.” from *The theory of sound*, Lord Rayleigh



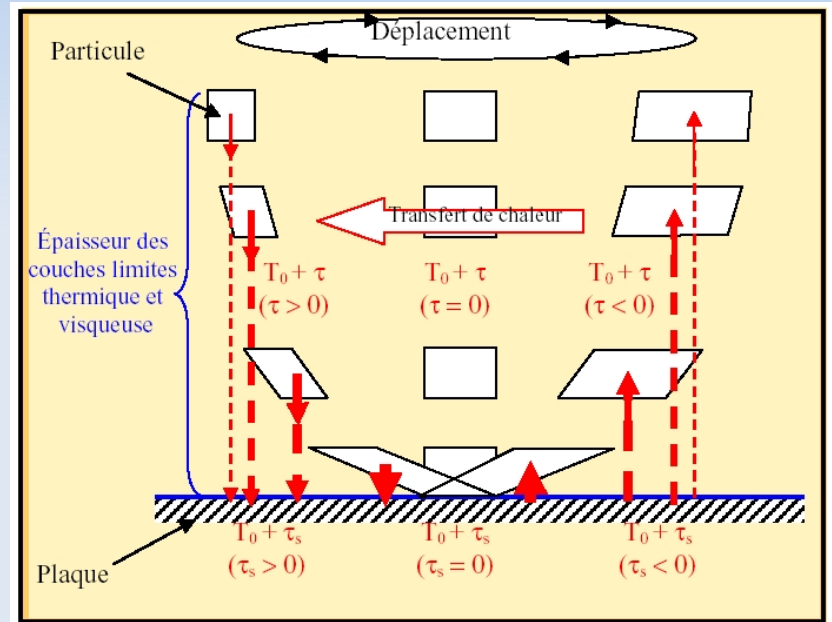
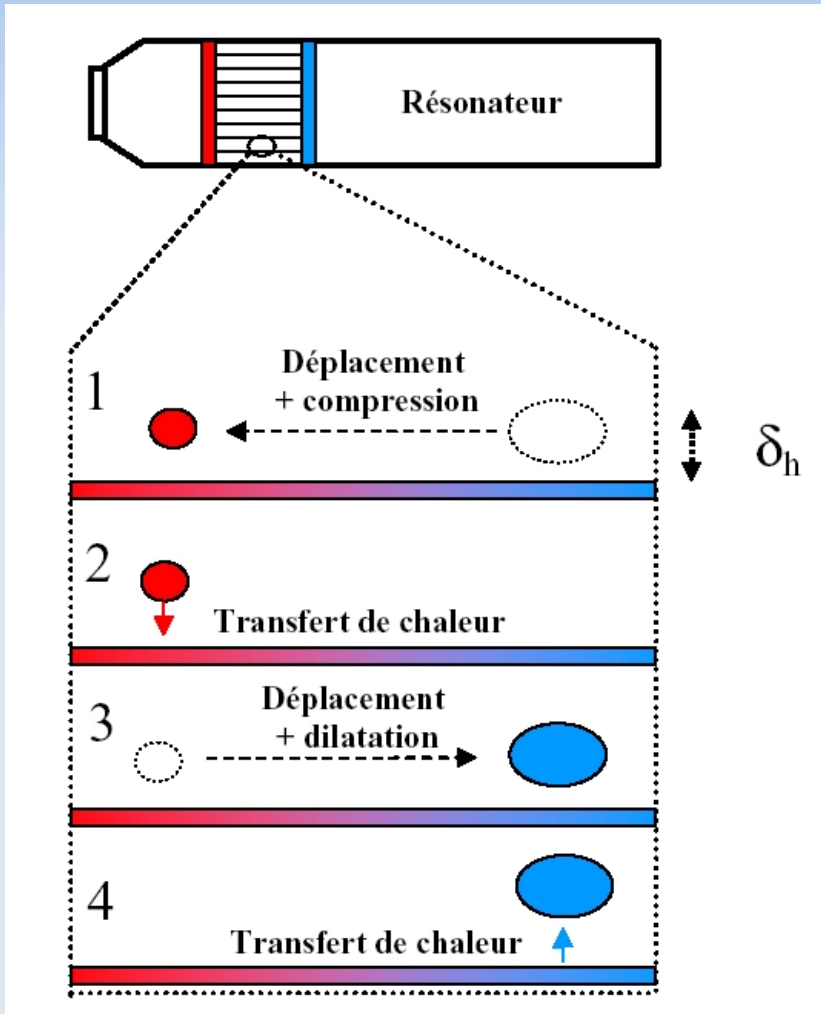
# 1.- Introduction à la thermoacoustique

## 1.3.- Effet thermoacoustique (onde stationnaire)



# 1.- Introduction à la thermoacoustique

## 1.3.- Effet thermoacoustique (onde stationnaire)

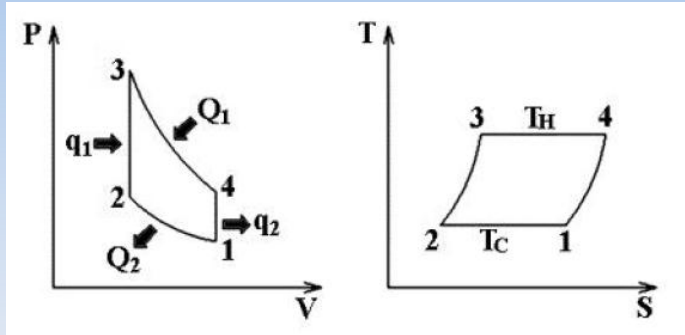




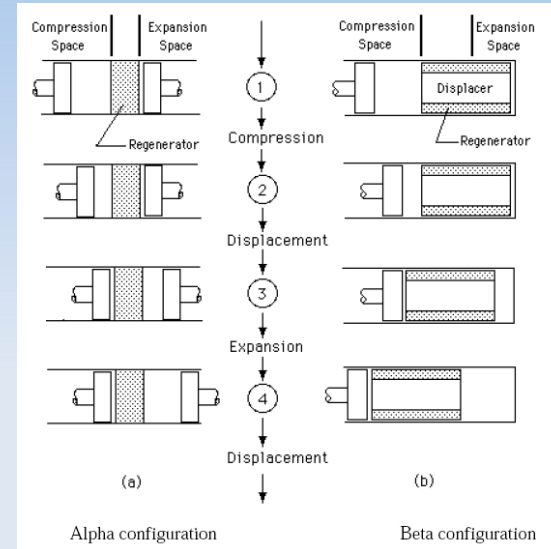
# 1.- Introduction à la thermoacoustique

## 1.4.- Machines thermoacoustique de Stirling (onde progressive)

### • cycle (théoriquement réversible) de Stirling



- 1-2 : compression isotherme
- 2-3 : réchauffement isochore
- 3-4 : détente isotherme
- 4-1 : refroidissement isochore



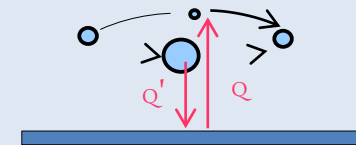
### • cycle de Stirling & thermoacoustique?

Cycle de Stirling => oscillation de pression et de vitesse *en phase*

Or, même relation de phase pour onde acoustique *progressive*

=> *possibilité de dimensionner* une machine thermoacoustique dont le cycle thermique *s'apparente à un cycle de Stirling si:*

- 1.- onde de *nature progressive* (ou du moins,  $p$  &  $v$  en phase localement)
- 2.- compressions/détentes de nature isotherme => emploi d'un **régénérateur**



$$(d_k \gg R)$$

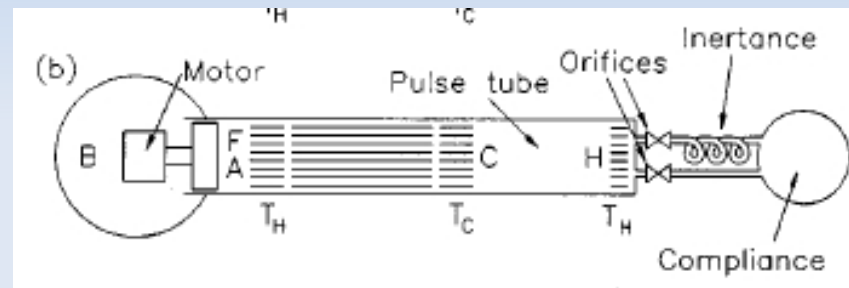
# 1.- Introduction à la thermoacoustique

## 1.4.- Machines thermoacoustique de Stirling (onde progressive)

Comment mettre au point une machine thermoacoustique de Stirling?

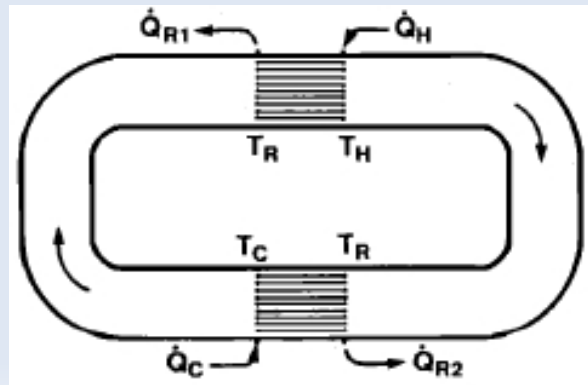
=> 2 solutions

1 => Ajouter des éléments présentant globalement une impédance de charge identique à l'impédance caractéristique en sortie du régénérateur.



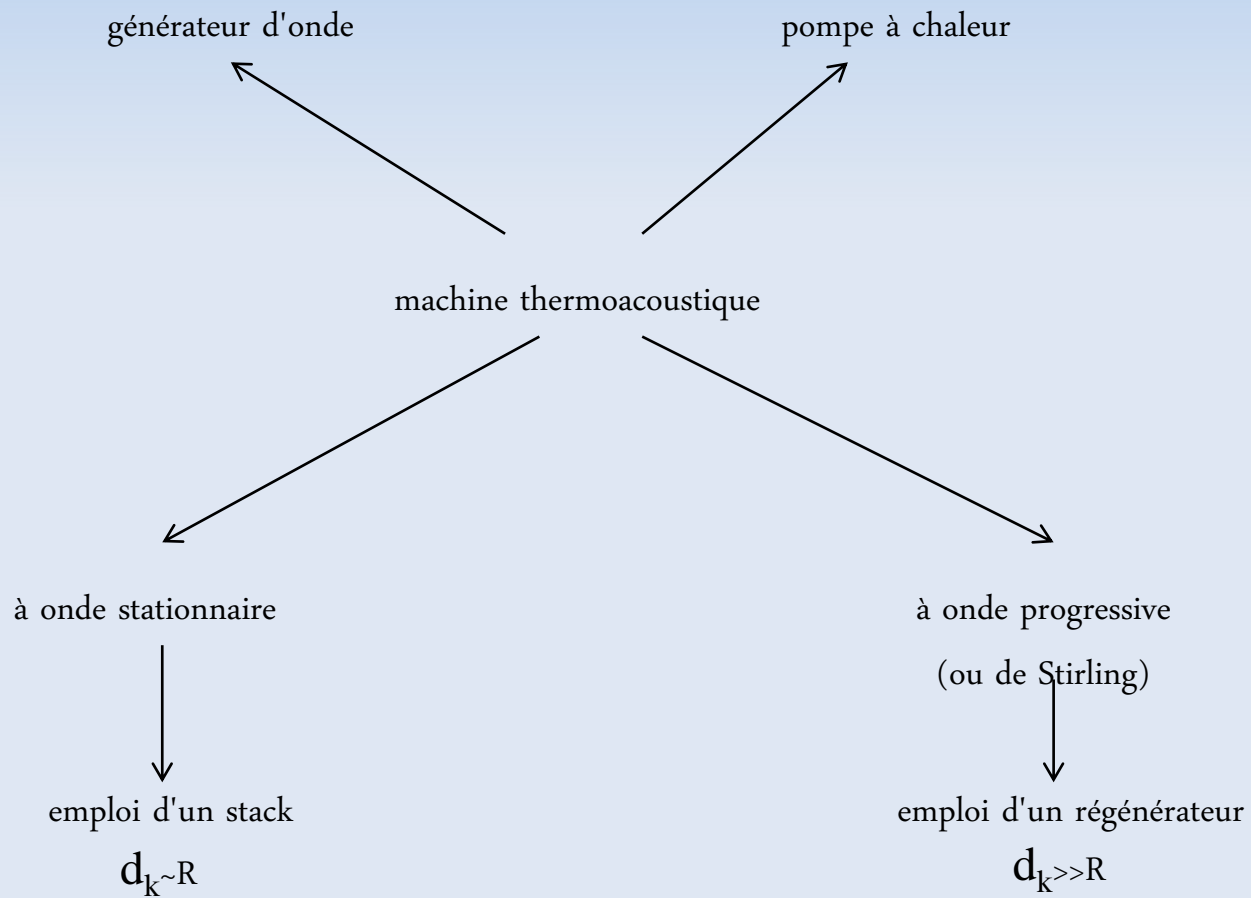
Exemple: tube à gaz pulsé (fonctionnement très basses fréquences)

2 => Utiliser un résonateur « à ondes progressives »



Ceperley, 1979

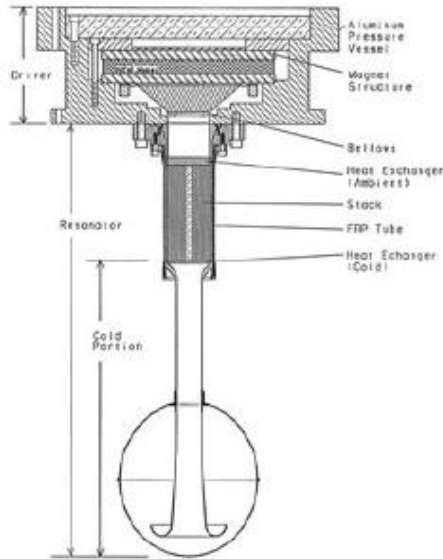
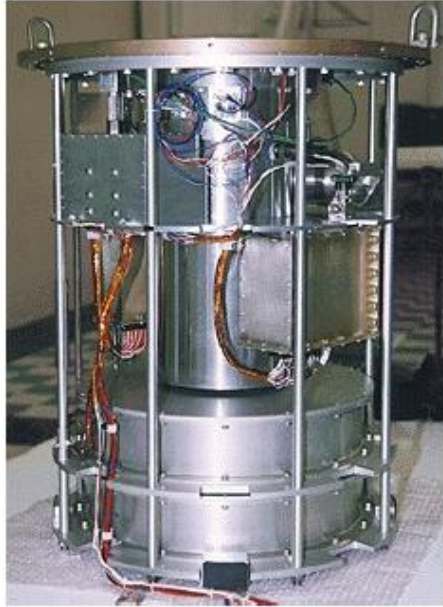
### Bilan



# Machines thermoacoustiques

## Réfrigérateur thermoacoustique : STAR

1992, Garrett, Naval Postgraduate School, United States



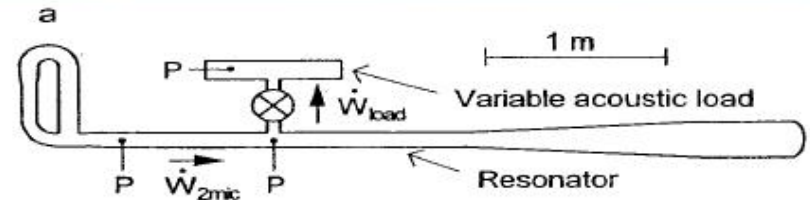
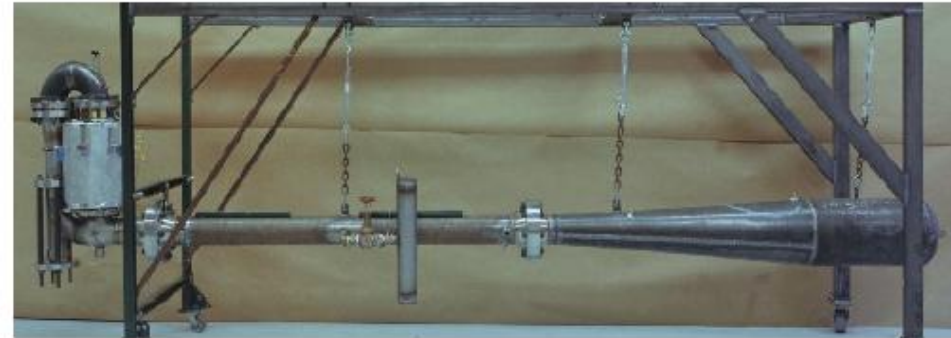
Embarqués sur Discovery (STS-42)

97% He, 3% Ar,  $f = 400$  Hz,  
 $\Delta T \approx 80$  °K,  $Q_f = 5$ W, COPR=20%

S. L. Garrett, J. A. Adeff, and T. J. Hofler, "Thermoacoustic refrigerator for space applications," J. Thermophys. Heat Transfer 7, 595-599 (1993)  
 S. Backhaus and G. W. Swift, "A thermoacoustic-Stirling heat engine: Detailed study," J. Acoust. Soc. Am. Volume 107, Issue 6, pp. 3148-3166 (June 2000)

## Moteur thermoacoustique : TASHE

2000, Backhaus & Swift, Los Alamos National Laboratory, United States



Thermo Acoustic Stirling Heat Engine (NASA)

100% He,  $f \approx 100$  Hz,  $P=30$  bar  
 $\Delta T \approx 700$  °K,  $P_{ac}=700$ W, COPR=40%

## Avantages des systèmes thermoacoustiques :

- Efficacité potentiellement élevée
- Fluides non nocifs pour l'environnement (air, gaz neutre)
- Absences de parties mobiles : robustes et fiables
- Architecture simple : miniaturisation possible
- Couplage possible d'un moteur et d'un réfrigérateur thermoacoustique → recyclage de la chaleur perdue
- Large champ d'applications : refroidissement des composants électroniques, climatisation, récupération de l'énergie solaire pour la convertir en énergie thermique ou énergie électrique...

# Axes de recherches du GDR

**Thème 1 – Phénomènes fondamentaux**

**Thème 2 – Métrologie adaptée à l'étude des systèmes thermoacoustiques**

**Thème 3 – Méthodologies de modélisation**

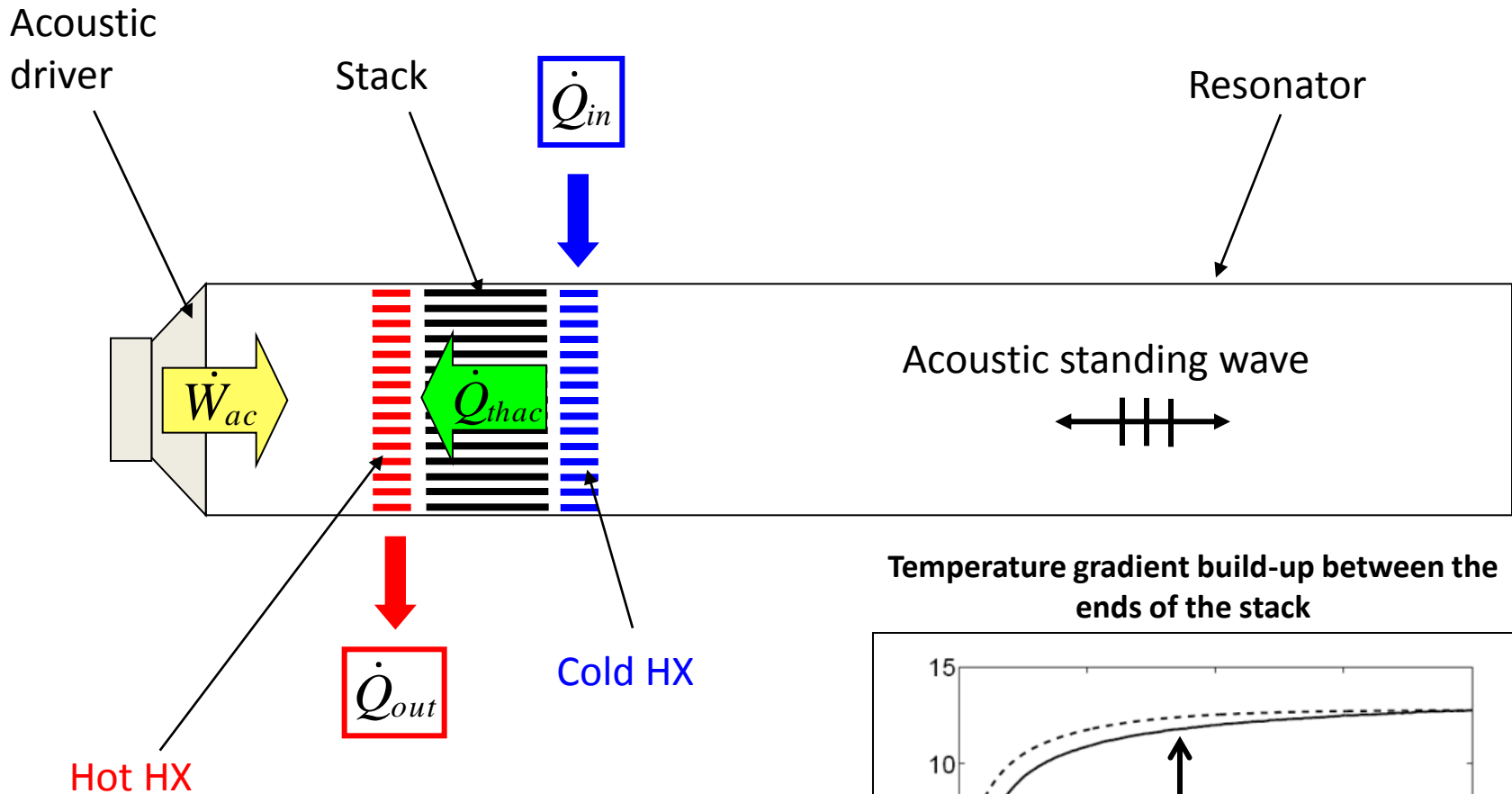
**Thème 4 – Composantes, architectures et systèmes**

## Thème 1 – Phénomènes fondamentaux

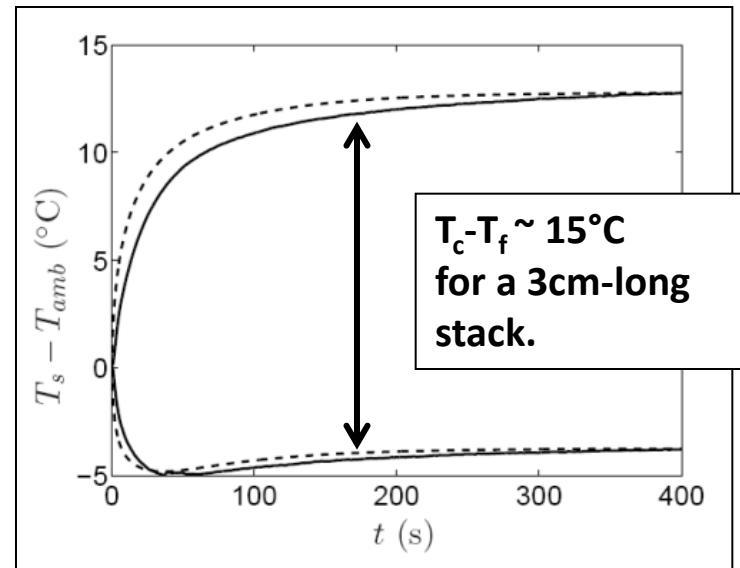
*Objectifs : quantifier les processus non-linéaires et dégager leurs lois de variation dans des gammes de paramètres élargies permettant le passage au changement d'échelle.*

1. Processus non linéaires acoustiques : vers une description des effets de propagation non-linéaire acoustique dans des machines de géométrie complexe.
2. Processus non linéaires thermiques (et non linéarités hydrodynamiques locales) : vers la définition de critères pour le dimensionnement et le placement des échangeurs de chaleur.
3. Non linéarités hydrodynamiques locales : étude des écoulements moyens induits par les pompes à jets ; étude de l'impact des « flow straighteners ».
4. Echanges thermiques en régime instationnaire : vers une description adaptée des échanges de chaleur en fluide oscillant (pour le dimensionnement d'échangeurs de chaleur).
5. Transferts couplés de masse et de chaleur : vers une description précise du vent acoustique et de son couplage avec le champ de température et le champ acoustique

# Standing-wave thermoacoustic refrigerator



Temperature gradient build-up between the ends of the stack



Also: travelling-wave systems,  
thermoacoustic engines, ...



# Écoulements secondaires aux extrémités des empilements

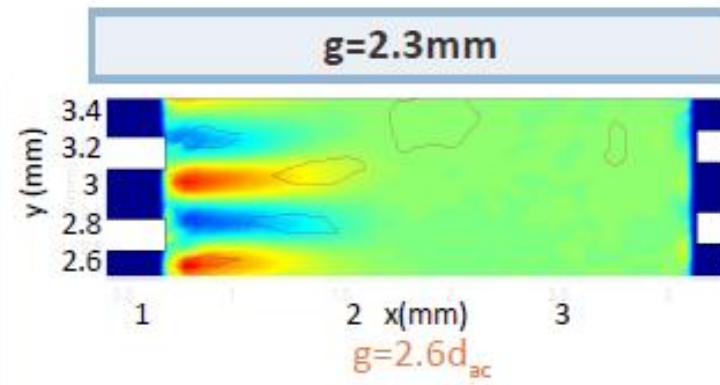
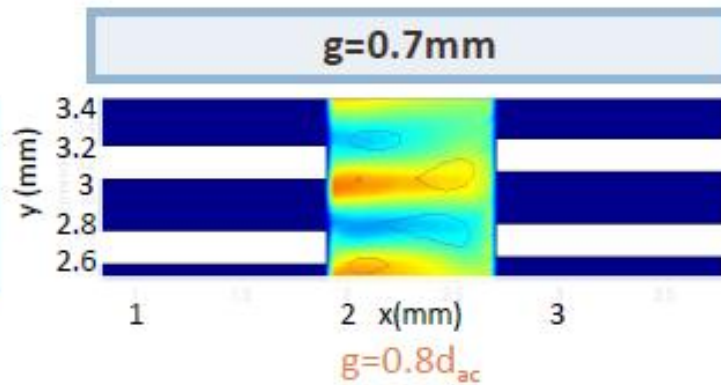
Berson (2007)

Champs de vorticité et contours de  $|\Gamma_s|=2/\pi$

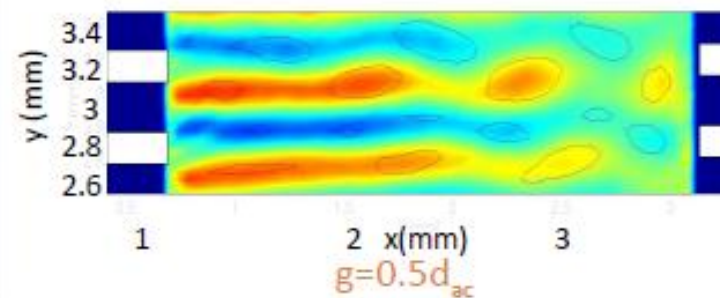
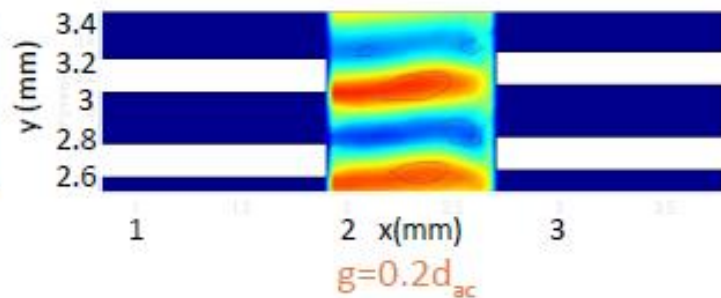
-3000 -2000 -1000 0 1000 2000 3000  $\Omega$  ( $s^{-1}$ )



$p = 1000 \text{ Pa}$   
 $u_{ac} = 1.3 \text{ m.s}^{-1}$



$p = 5000 \text{ Pa}$   
 $u_{ac} = 6.5 \text{ m.s}^{-1}$

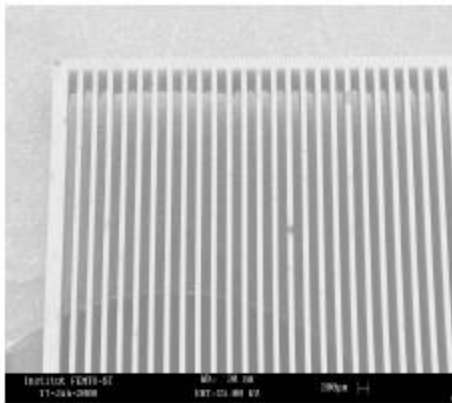
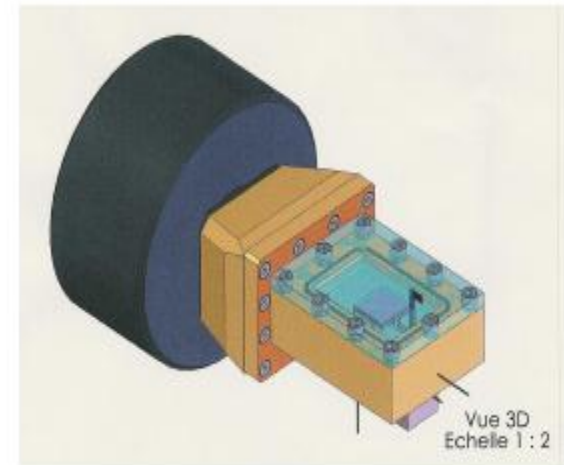
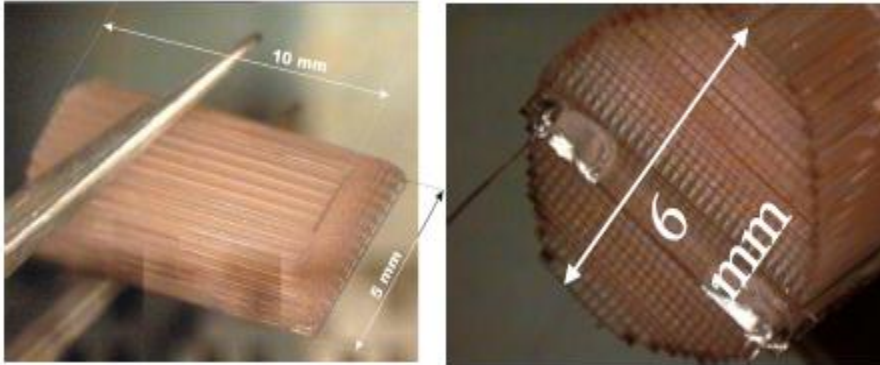


A fort niveau acoustique, les oscillations des couches de cisaillement entre les empilements vont avoir une influence sur le transport de chaleur entre le stack et les échangeurs.

Berson A. (2007), Vers la miniaturisation des réfrigérateurs thermoacoustiques : caractérisation du transport non-linéaire de chaleur et des écoulements secondaires, École centrale de Lyon

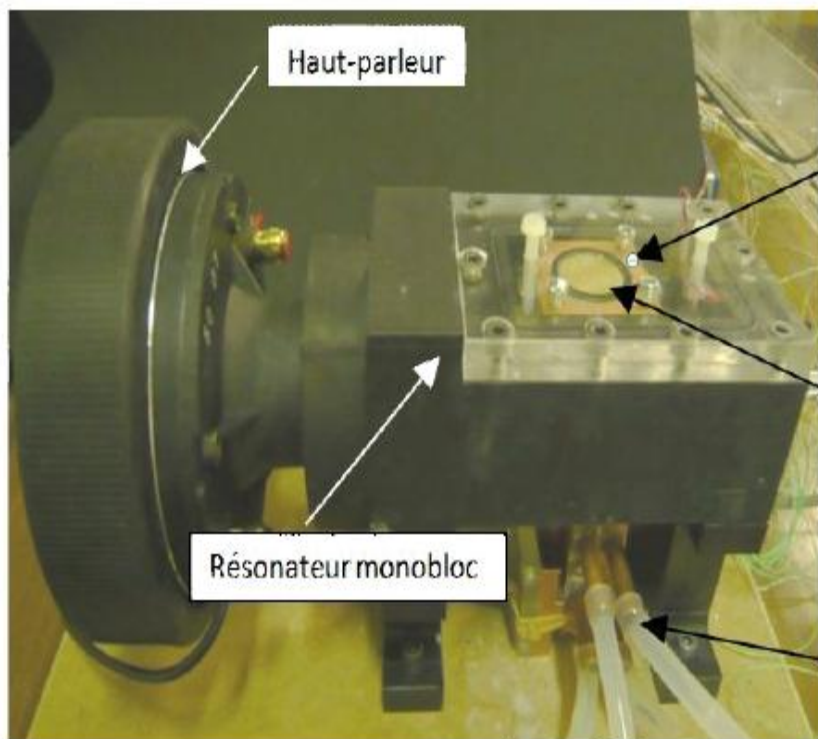
G.Poignand & al. (2009), Mesure de flux de chaleur dans un réfrigérateur thermoacoustique miniature, CFM'09.

# Développement d'architectures adaptées à la miniaturisation



Conception de stack et d'échangeurs de chaleurs par technologie MEMS,

Etude de nouvelles géométries de résonateur de type compact



Haut-parleur

Échangeur de chaleur froid

Cuve instrumentée par un capteur de flux de chaleur

Résonateur monobloc

Échangeur de chaleur ambiant

**Fluide** : air à température ambiante et pression atmosphérique

**Source** : Haut-parleur à chambre de compression  
 $p \leq 5000 \text{ Pa}$   
 $f = 464 \text{ Hz}$

**Résonateur monobloc en plastique ABS (prototypage rapide)**

- Longueur 10.3 cm
- Largeur 3.2 cm
- Hauteur 1 cm

**Stack en kapton**

- Longueur 1 cm
- Largeur 3.2 cm
- Epaisseur des plaques 0.15 mm
- Espacement entre les plaques 0.2 mm

**Echangeurs de chaleur en cuivre**

- Longueur 1 cm
- Largeur 3.2 cm
- Epaisseur des plaques 0.15 mm
- Espacement entre les plaques 0.2 mm

## Thème 2 – Métrologie adaptée à l'étude des systèmes thermoacoustiques

Objectifs : Adaptation et développement des techniques de mesure en thermoacoustique. Ces techniques devront permettre d'accéder à des mesures de champ résolues en temps.

1. Microcapteurs de pression, de température, de flux thermique : vers une implantation de ces capteurs dans les machines thermoacoustiques.
2. Méthodes de mesures optiques : mise en oeuvre de PIV, de PIV résolue en temps, de LDV, d'interférométrie holographique.
3. Méthodes de mesures thermographiques, mesures de température par thermométrie par images de particules PIT.
4. Développement de bancs d'essais pour la caractérisation de sous-éléments : banc de caractérisation des paramètres électromécaniques de moteur et alternateurs électrodynamique linéaires, banc de mesure des propriétés de diffusion acoustique de noyaux thermoacoustiques, banc d'analyse thermodynamique de composants

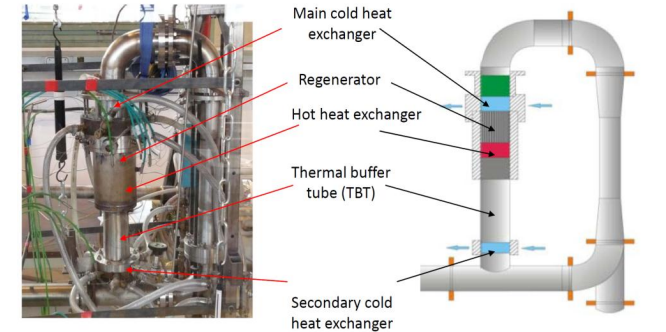
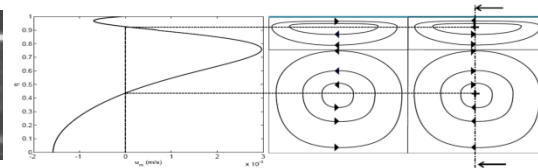
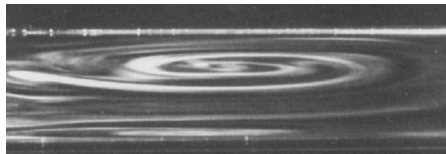
# Experimental investigations of acoustic streaming in a thermoacoustic traveling wave engine using Laser Doppler Velocimetry

R. Paridaens, S. Koudri, F. Jebali-Jerbi (LIMSI)

**Objective : The understanding of the generation mechanism through analytical and experimental Investigations in order to increase the energetic efficiency of thermoacoustic machines**

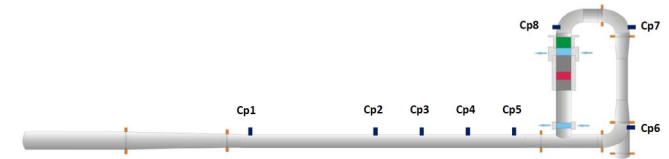
## Acoustic streaming

Acoustic streaming is the generic name of flows at low velocity (one order of magnitude less than the acoustic velocity) generated within acoustic waves developed in configurations such as thermoacoustic stacks, acoustic loops of Stirling-type thermoacoustic machines or simple resonator tubes. As shown on the photograph (Tominaga et al.) and on the figure below, acoustic streaming takes the form of vortex in a resonator.

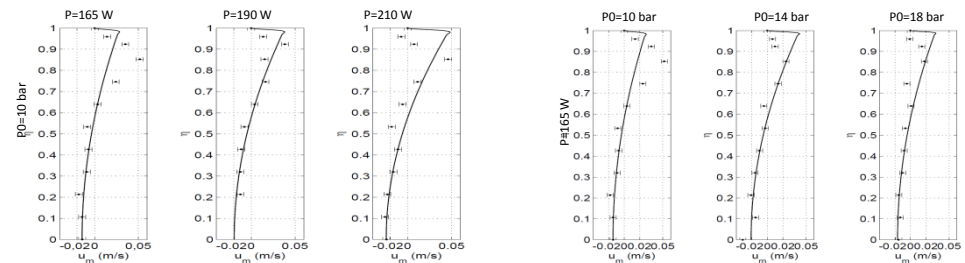
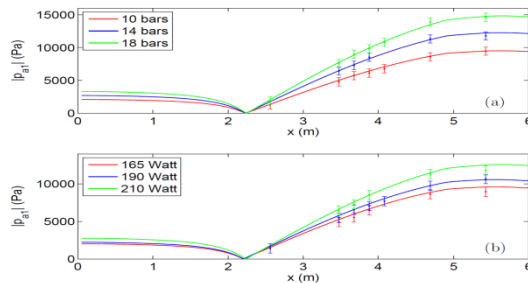


## Experimental setup

The experimental apparatus is composed of a closed loop and a straight resonance tube. The 4.25m-long resonator associated with the closed loop allows the system to work at the frequency of 22 Hz. Kistler piezoelectric pressure sensors were flush mounted along the traveling wave engine. The system can operate up to a mean pressure of 30 bar. Measurements of acoustic and streaming velocities are performed by LDV



## Results



As acoustic streaming is generated by acoustic waves, the acoustic fields are primary investigated. The well agreement between the theoretical acoustic fields and measurements allows to validate the theoretical modeling and particularly the investigation of acoustic streaming.

**Conclusion: Theoretical and experimental results of the acoustic pressure and velocity fields are compared in the case of a thermoacoustic prime mover. The validation of acoustic fields allows investigating acoustic streaming.**



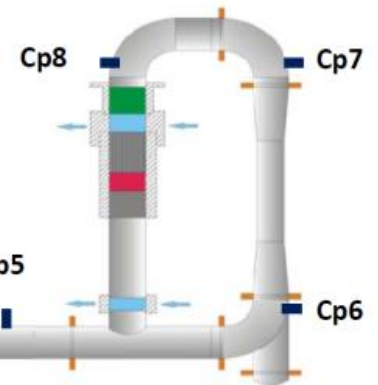
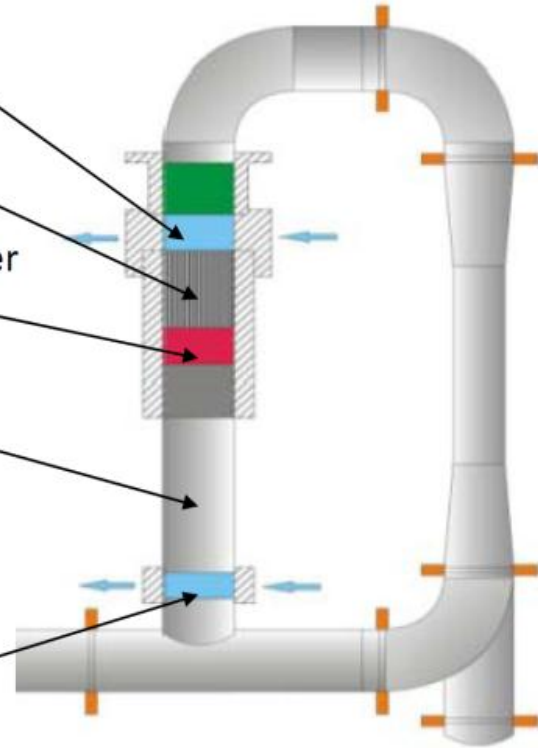
Main cold heat exchanger

Regenerator

Hot heat exchanger

Thermal buffer tube (TBT)

Secondary cold heat exchanger



## Thème 3 – Méthodologies de modélisation

*Objectifs : Analyse et développement des modèles permettant la prise en compte des effets locaux dans un système complet. Mise en œuvre numérique en étroite liaison avec les démarches expérimentales.*

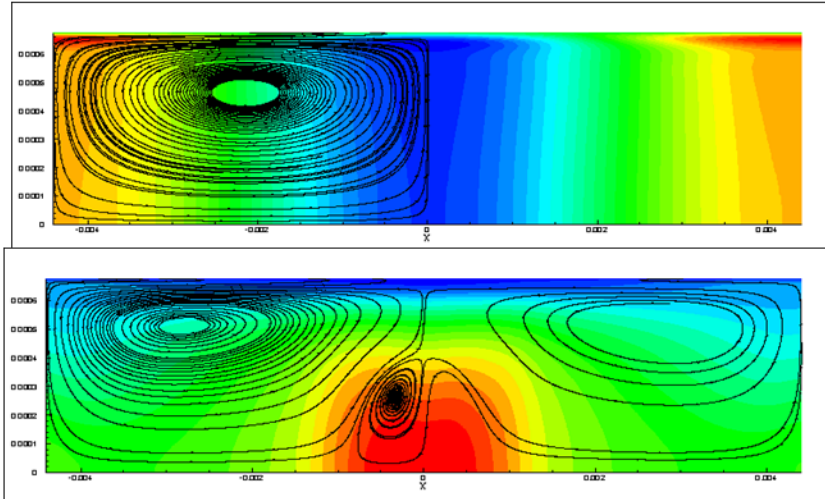
1. Développement de modèles (numériques et analytiques) décrivant des systèmes thermoacoustiques complets et comparaisons à l'expérience pour différentes architectures de machines et différentes plages de paramètres.
2. Complémentarité des différents codes numériques développés : (i) liens entre les codes basés sur des modèles compressibles ou faible Mach ; (ii) liens entre les modèles de champ et les modèles semi empiriques 1D

# Comparaison calcul numérique / résultats expérimentaux pour les écoulements redressés en guide d'onde jusqu'à des amplitudes élevées

D. Baltean-Carlès, C. Weisman, V. Daru (LIMSI),  
I. Reyt (LIMSI, P'), H. Bailliet, J.C. Valière (P')

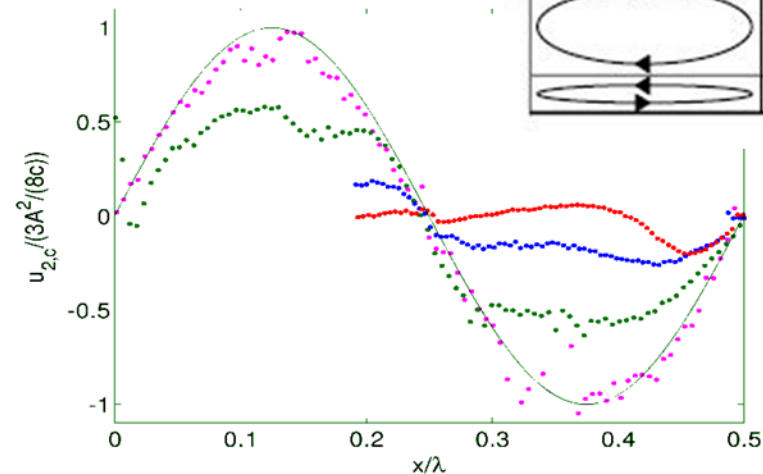
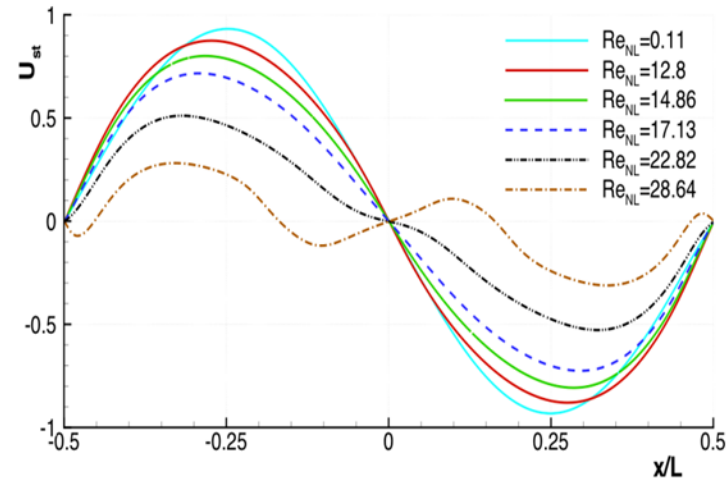
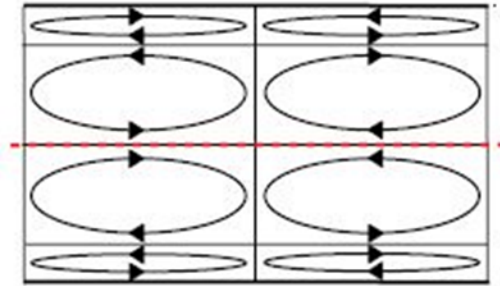
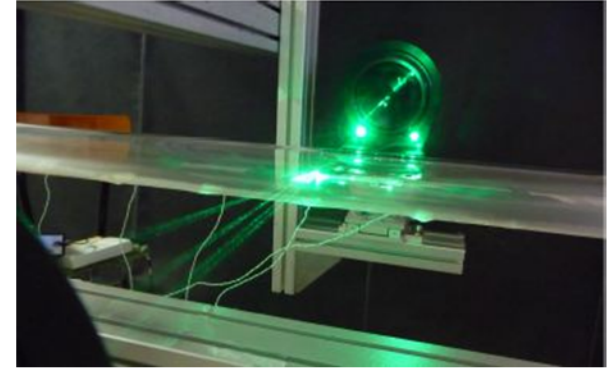
**Simulations** : Navier-Stokes compressible, Schéma d'ordre élevé

**Expérience** : Mesures PIV, LDV



Streaming non linéaire

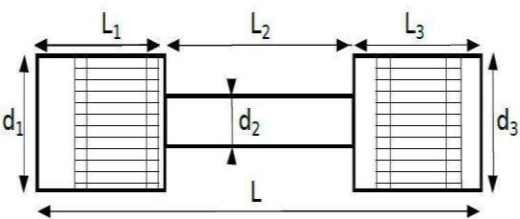
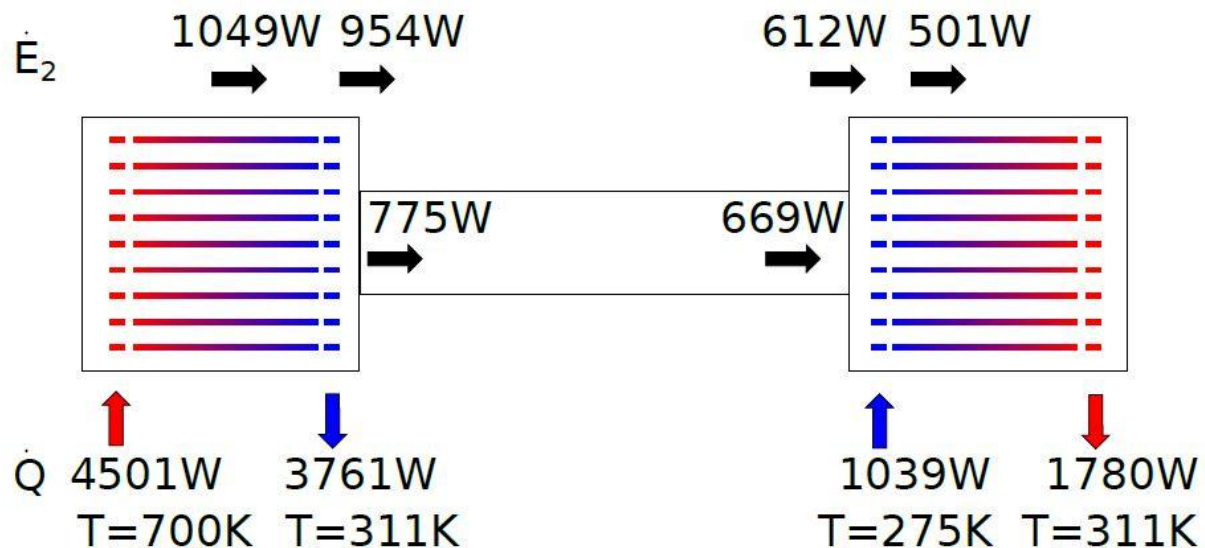
$$Re_{NL} = \left( M \frac{R}{\delta_v} \right)^2 \gg 1$$





## Etude de faisabilité d'un système de climatisation thermoacoustique pour l'automobile

Simulations DeltaEc

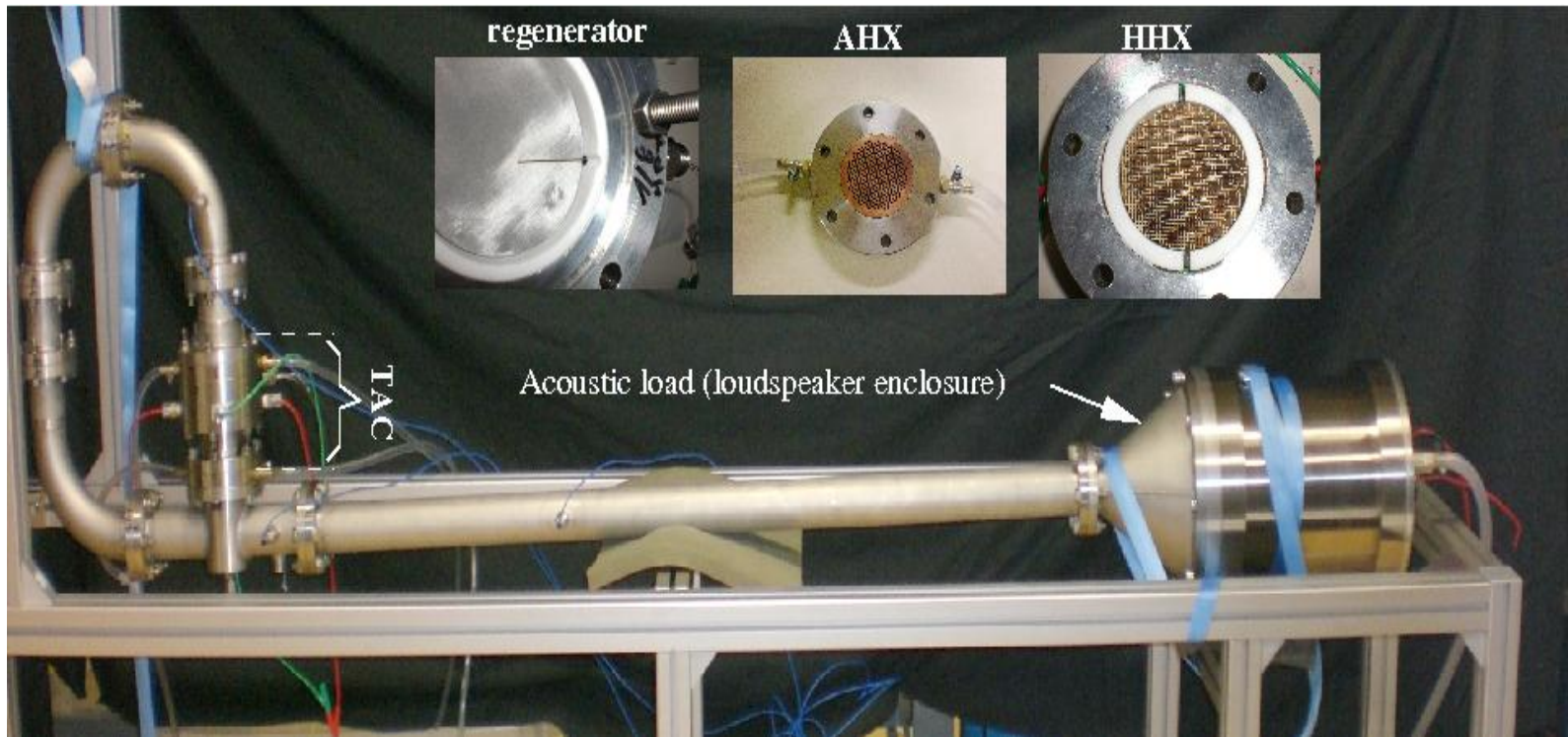


Paramètre	WHDTAR [4]	Dim. prélim. [2]	Système optimisé
$P_m$		1.6 MPa	
$f$	315 Hz	315 Hz	205, 34 Hz
$DR$	0, 050	0, 050	0, 086
$COP_{tri}$	0, 024	0, 087	0, 230
$COP_{tri,r}$	0, 013	0, 048	0, 054
$L$	1, 5 m	1, 54 m	1, 56 m
$L_1$		-	0, 188 m
$L_2$	0, 57 m	-	1, 3 m
$L_3$		-	0, 072 m
$d_1$	0, 155 m	0, 2 m	0, 2 m
$d_2$	0, 1 m	-	0, 08 m
$d_3$	0, 124 m	-	0, 2 m
$L_{s,ref}$	0, 087 m	0, 051 m	0, 1 m
$x_{s,ref}$		0, 053 m	0, 133 m
$T_c$	230 K	230 K	275 K
$T_a$	311 K	311 K	311 K
$Q_c$	135 W	135 W	1038, 9 W
$L_{s,eng}$	0, 084 m	0, 0863 m	0, 028 m
$x_{s,eng}$		0, 079 m	0, 052 m
$T_{h,opt}$	860 K	860 K	698 K
$T_{h,start}$			620 K
$Q_h$	5750 W	1554 W	4501 W

## Thème 4 – Composantes, architectures et systèmes

*Objectifs : Développement des systèmes thermoacoustiques et leurs différents composants pour des applications industrielles.*

1. Transducteurs acoustiques : étude des moteurs/alternateurs électrodynamiques et de leurs couplage avec la machine ; études d'autres modes de transduction et dimensionnement de transducteurs.
2. Echangeurs, stacks, régénérateurs : caractérisation fine (banc d'essais) d'échangeurs de chaleur et de stack/régénérateur de géométrie complexe (empilement de grille, pin-array stacks, mousse de carbone réticulé vitreux etc...)
3. Fluides et matériaux non conventionnels
4. Architectures non conventionnelles : systèmes compacts, systèmes de type co-axiaux, etc...
5. Dimensionnement des systèmes thermoacoustiques et optimisation énergétique.



*Fig. 3: Photograph of the « low-power » thermo-acousto-electric engine at LAUM. The working fluid consists of 6 bars air. The thermoacoustic core (total length = 9.3 cm) consists of two Ambient Heat eXchangers, a regenerator, a Hot Heat eXchanger, and a Thermal Buffer Tube. Acoustic power is provided to a standard loudspeaker which converts mechanical work into electric energy. The AHX consists of copper blocks drilled with many holes, with circulating water around the block. The regenerator (2.3 cm in length) is a pile of stainless steel meshes. The HHX consists of a porous ceramic material inside which a ribbon heater is glued.*

## Quelques constats

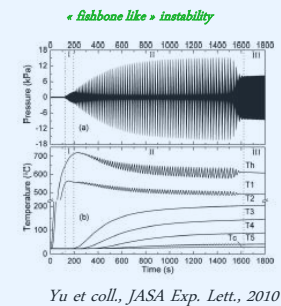
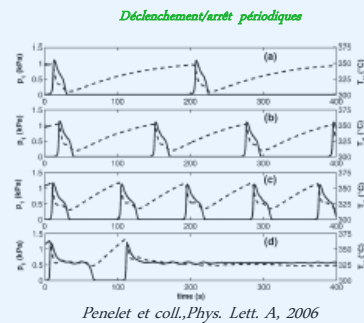
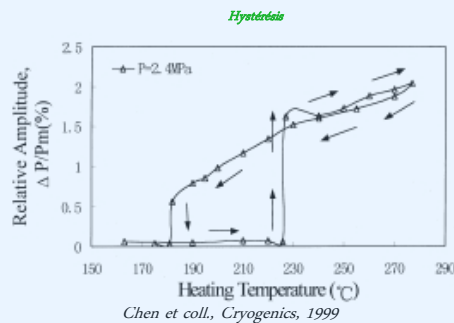
- ✓ Machines *simples* dans leur principe.... *mais complexes* dans leur fonctionnement
- ✓ Logiciels de dimensionnement (DELTA-EC...) basés sur description *linéaire* (ou faiblement NL), *stationnaire* et *1D* des phénomènes alors même que la réalité est toute autre...

## Principales recherches académiques en cours

- ✓ Modélisation fine des *stacks/régénérateurs de géométrie complexe*
- ✓ Modélisation des *échangeurs de chaleur*
- ✓ Description des *couplages* entre les différents éléments
- ✓ Description des *effets non linéaires* (vent acoustique, propa. NL...)
- ✓ Description de certains éléments constitutifs de machine (jet pump, ...)

objectif = diminuer la part d'empirisme lors de la réalisation de machines...

Exemple: Dimensionnement d'un générateur d'onde thermoacoustique sous DeltaEC => prédiction d'un régime stationnaire... *oui, mais lequel?*



- ✓ Problème *plus complexe* car système non linéaire, multistable et parfois même chaotique [Yazaki et coll., *Phys. Rev. Lett.*, 1987] ..
- ✓ Modélisation fine => nécessité de décrire le vent acoustique, les couplages stack-échangeurs, etc...

NB: la dynamique du régime *transitoire* est *riche d'informations...*

## PROJETS SCIENTIFIQUES ET ACTIONS DE R&D

### • Projet TACSOL (ANR PRCODD 2008)

**Objectif :** Développement d'une machine solaire de réfrigération (1kW à -25°C)

### Réalisation (2012) :

- fabrication (et montage) de la machine : moteur + réfrigérateur
- essais préliminaires du réfrigérateur avec une source thermoacoustique

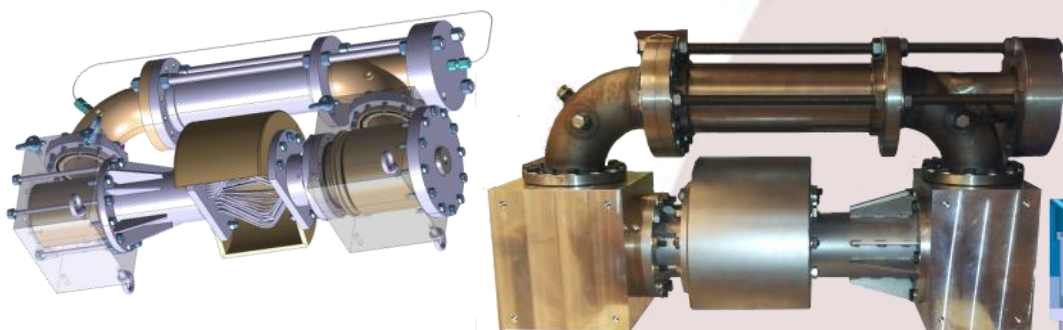
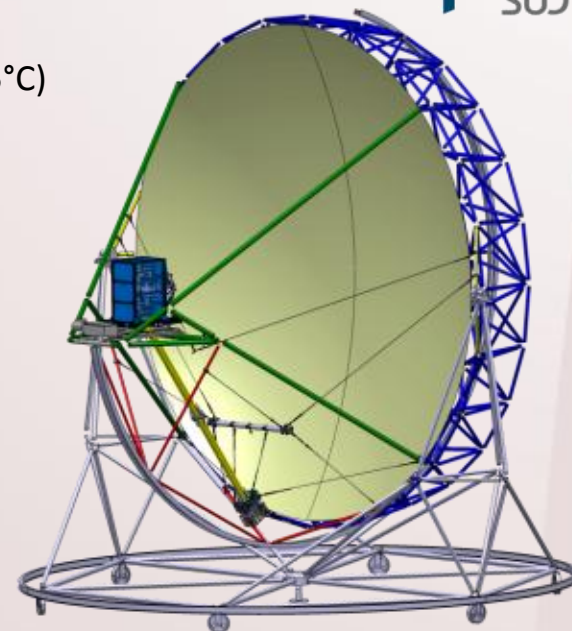
**Fin du projet :** Décembre 2012

Mais retard → Assemblage toujours en cours (jusqu'à mi-Février)

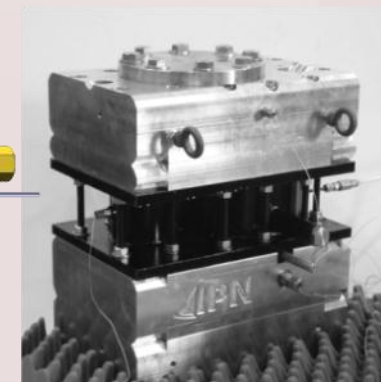
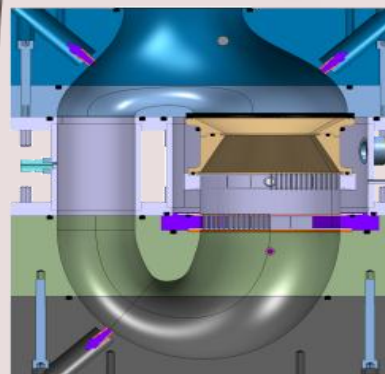
→ Essais prévus à Odeillo (PROMES-CNRS) : Printemps 2013.

### Collaboration :

PROMES-CNRS, LaTEP, Hekyom



*Projet TACSOL - Générateur thermoacoustique d'ondes*

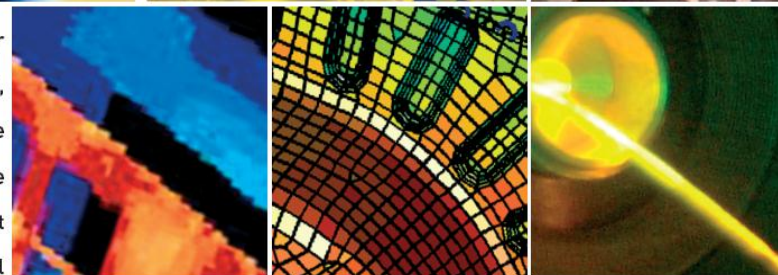


*Projet TACSOL - Réfrigérateur*

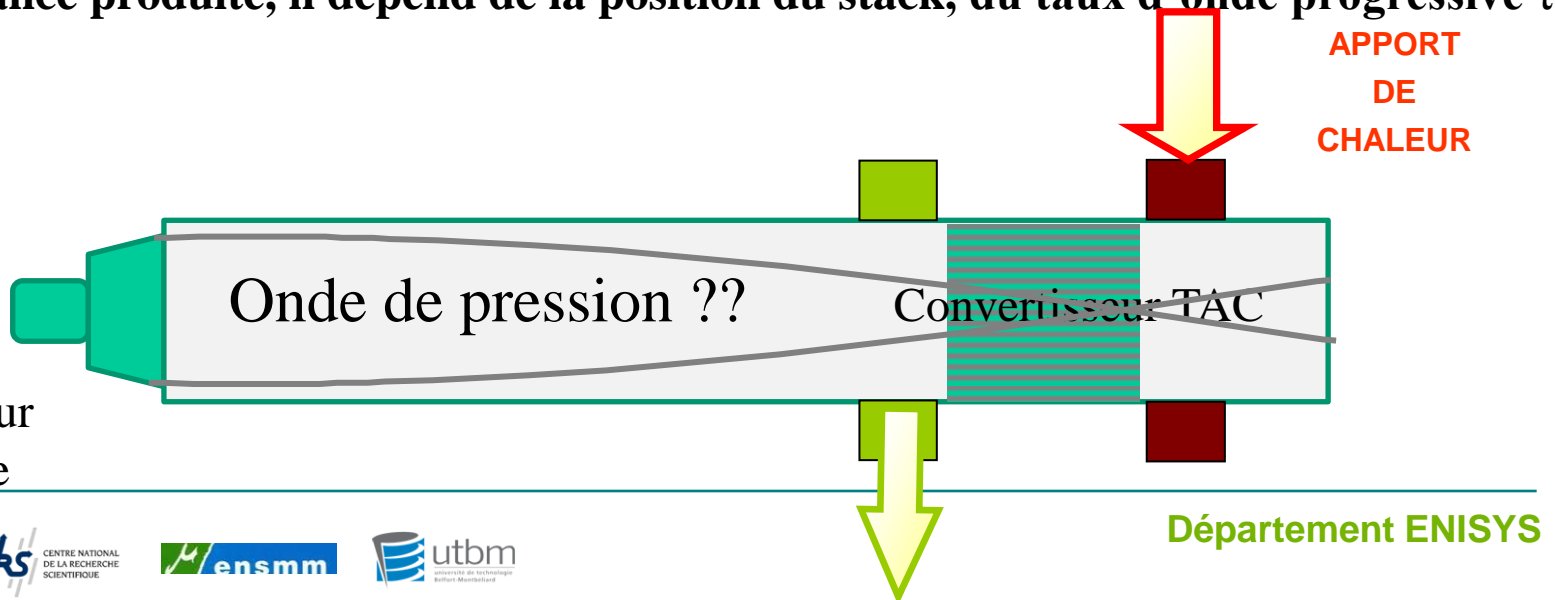
*Thématiques abordées par le groupe thermoacoustique:*

- *Génération d'électricité avec des machines Thermoacoustiques*
- *Outils de modélisation des moteurs Thermoacoustiques*
- *méthodes expérimentales pour l'expertise des écoulements alternés, études des transferts thermiques*

**FEMTO ST**



- La puissance acoustique générée dépend des phases entre pression et débit fluide dans le stack (impédance) : idéal = 0, onde stationnaire =  $\pi/2$  influence des 2 conditions aux limites
- La puissance délivrée sur le piston mobile et convertible en électrique dépend des caractéristiques du générateur (vitesse ou déplacement, fréquence propre, facteur de qualité..)
- Le rendement de conversion n'est pas maximal pour les mêmes conditions que la puissance produite, il dépend de la position du stack, du taux d'onde progressive  $\tau$  etc...



Beneficiary Number *	Beneficiary name	Beneficiary short name	Country
1 (coordinator)	Energy research Centre of the Netherlands	ECN	Netherlands
2	CNRS	CNRS	France
3	School of Mechanical, Aerospace and Civil Engineering University of Manchester	UNIMAN	United Kingdom
4	Aster Thermoakoestische Systemen	Aster	Netherlands
5	Department of Civil Engineering University of Messina	UNIME	Italy
6	HEKYOM	HEKYOM	France
7	Nuclear Research & consultancy Group	NRG	Netherlands

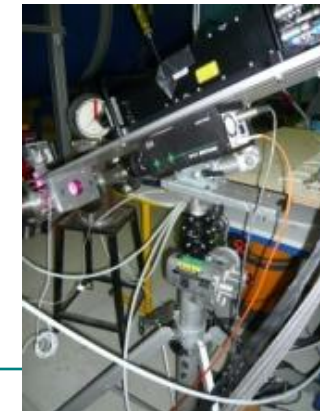
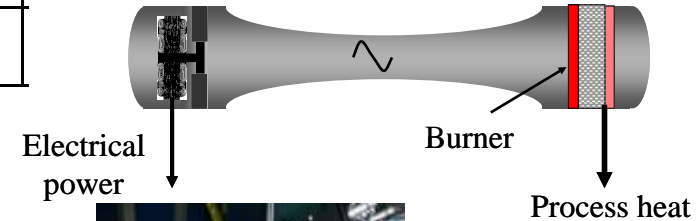
## Objectifs de la tache CNRS/ECN :

1/ mesurer l'écoulement moyen et le champ de vitesse acoustique en présence de **streaming de Rayleigh** dans le buffer tube d'un pulse tube

2 / Valider les modèles de calcul CFD numérique .

Linear motor

TA-Engine



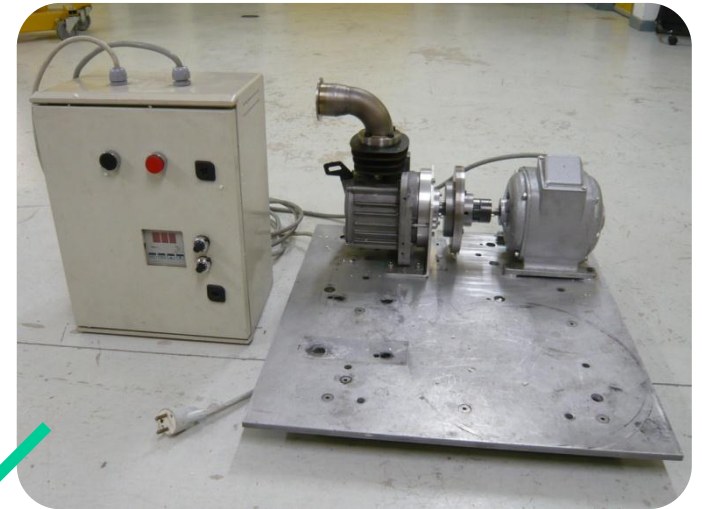
actionneur

PIV instrumentation

Banc

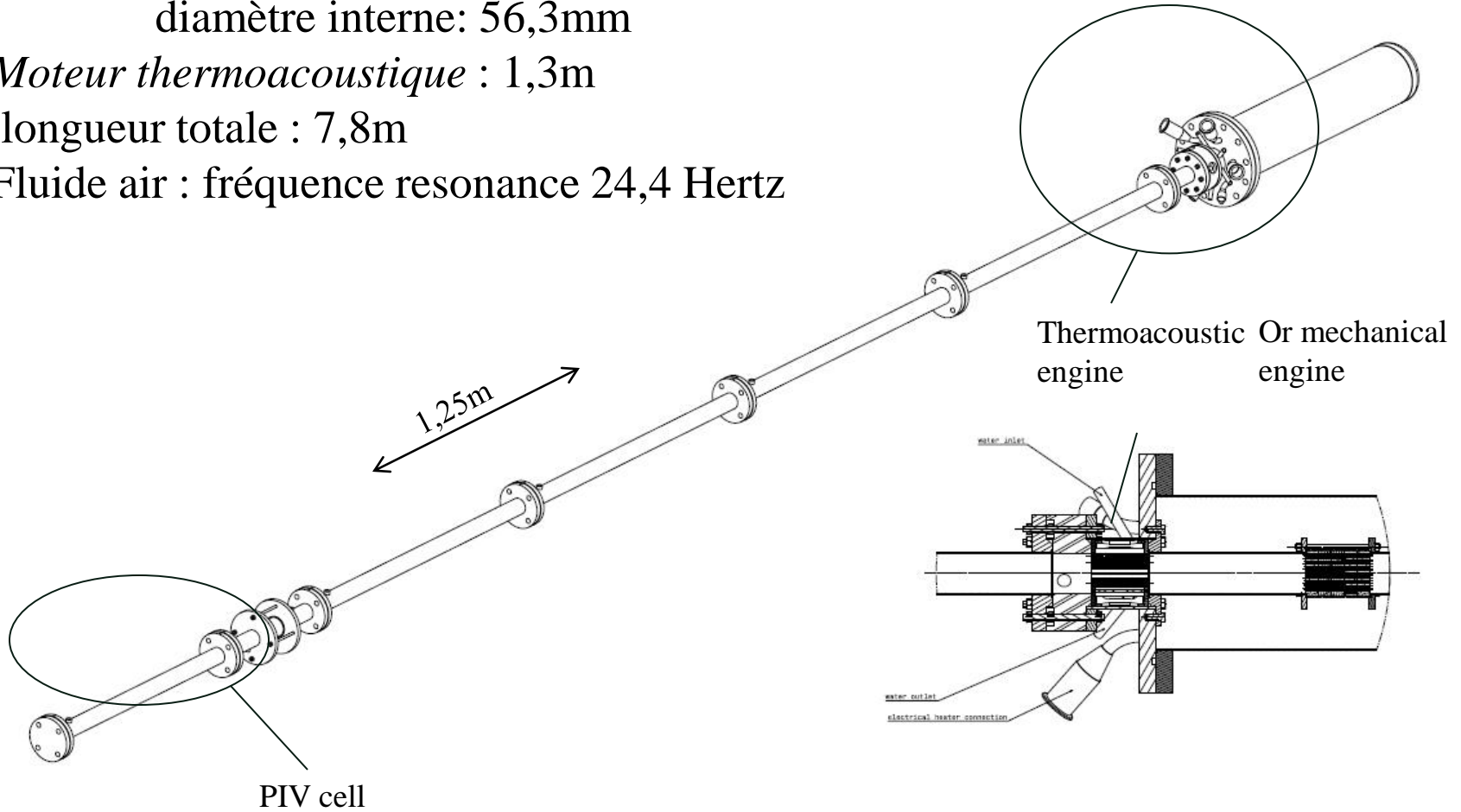






- Piston diameter: 48 mm,
- Frequency range: 5-90 Hz,
- Piston stroke: 40 mm.

*Resonateur en tube d'acier* : 6,5m  
 diamètre interne: 56,3mm  
*Moteur thermoacoustique* : 1,3m  
 longueur totale : 7,8m  
 Fluide air : fréquence resonance 24,4 Hertz



Merci de votre attention

Contact GDR Thermoacoustique

[Philippe.blanc-benon@ec-lyon.fr](mailto:Philippe.blanc-benon@ec-lyon.fr)