

# LAUM

Laboratoire d'Acoustique de l'Université du Maine  
UMR CNRS 6613  
Avenue Olivier Messiaen, 72085 Le Mans cedex 9



## Introduction à la thermoacoustique

G. Pénelet

Laboratoire d'Acoustique de l'Université du Maine, UMR CNRS 6613

*Journée Thématique «Machines thermoacoustiques : contribution au développement durable »  
Paris, 10 Décembre 2010*



# Plan de la présentation

## **1.- Principe de fonctionnement des machines thermoacoustiques**

- 1.1.- Généralités
- 1.2.- Exemple du moteur quart d'onde
- 1.3.- Effet thermoacoustique (onde stationnaire)
- 1.4.- Machine thermoacoustique de Stirling
- 1.5.- Bilan

## **2.- Exemples de machines, applications potentielles**

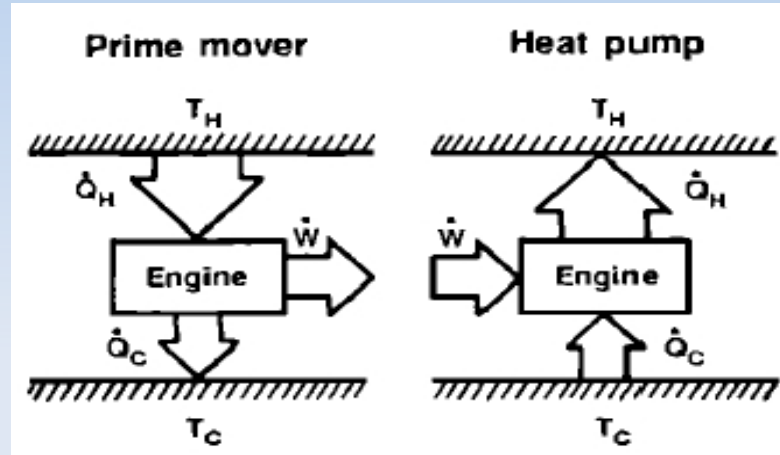
- 2.1.- Réfrigérateurs à ondes stationnaires
- 2.2.- Moteurs thermoacoustiques de Stirling
- 2.3.- Différents éléments des machines thermoacoustiques
- 2.4.- Avantages/inconvénients et applications des machines thermoacoustiques

## **3.- Bref état de l'art sur les recherches en thermoacoustique**

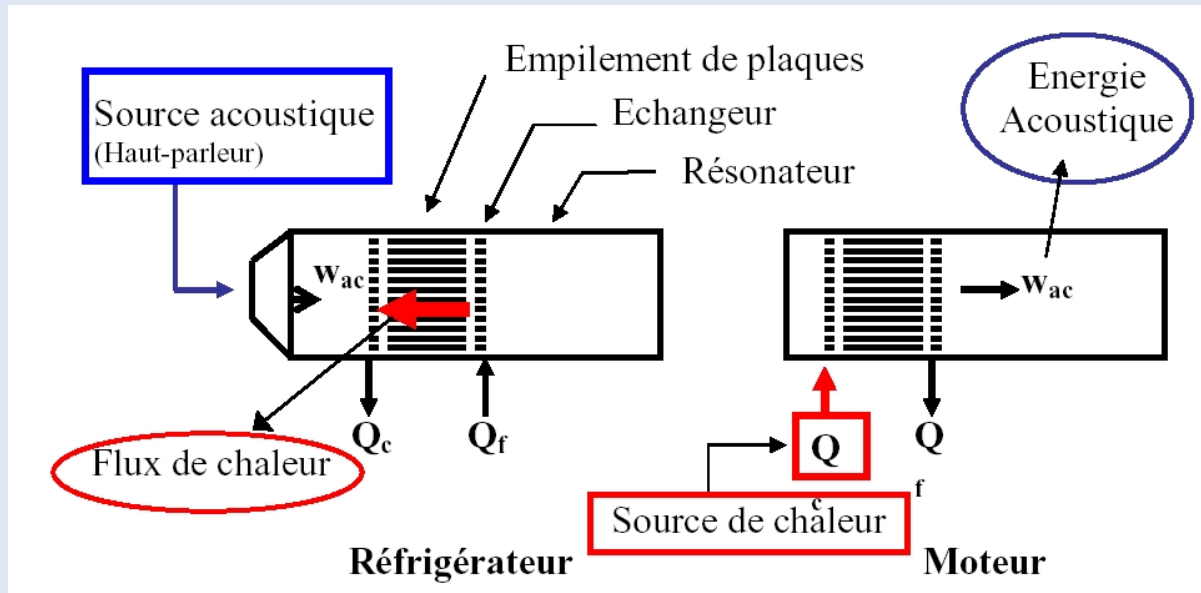
- 3.1.- Panorama de la communauté thermoacoustique
- 3.2.- Panorama (incomplet) des recherches en cours
- 3.3.- un exemple illustratif de verrou à lever

# 1.- Introduction à la thermoacoustique

## 1.1.- Généralités



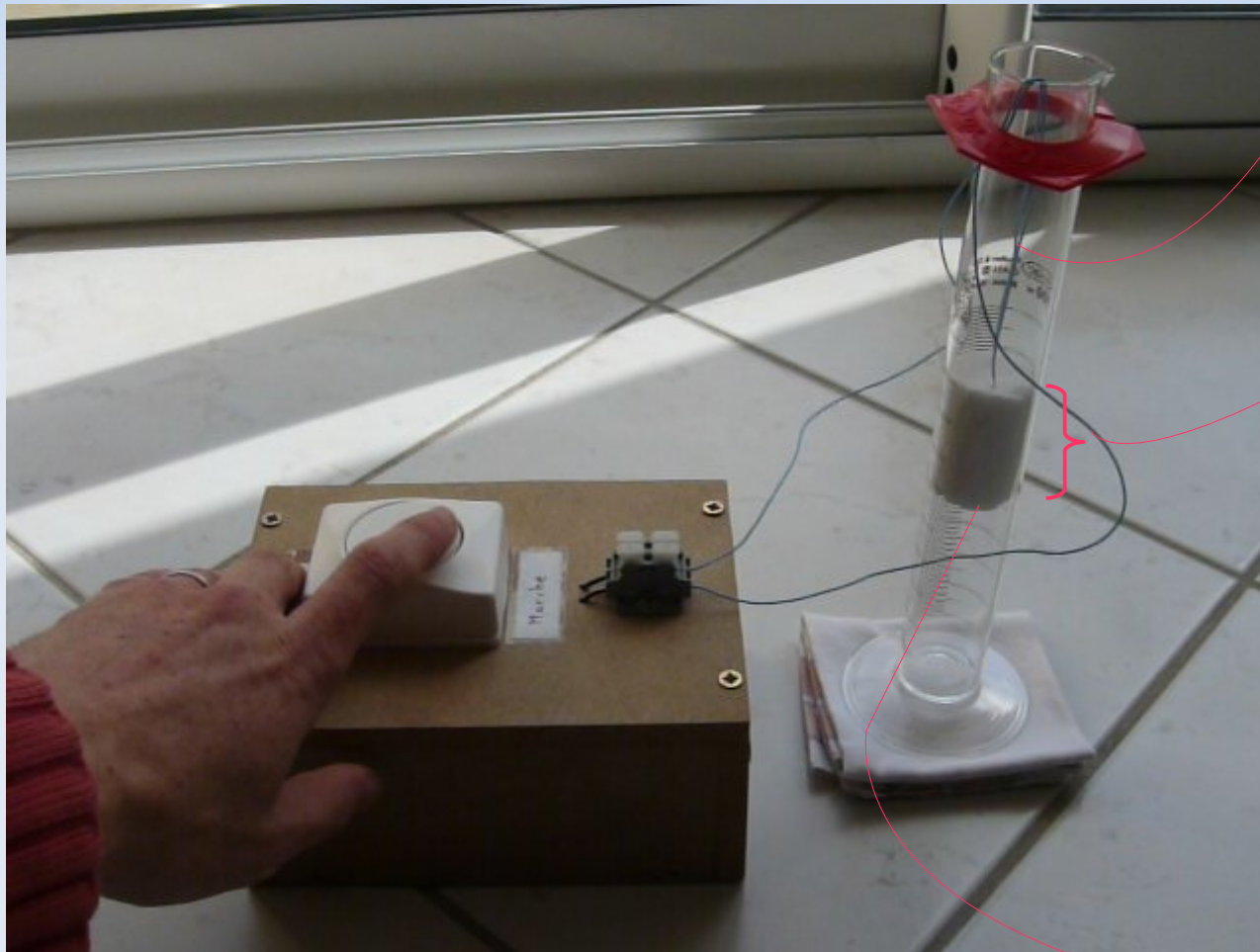
**Machine thermodynamique**



**Machine thermoacoustique (à ondes stationnaires)**

# 1.- Introduction à la thermoacoustique

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



Acoustic resonator

Stack

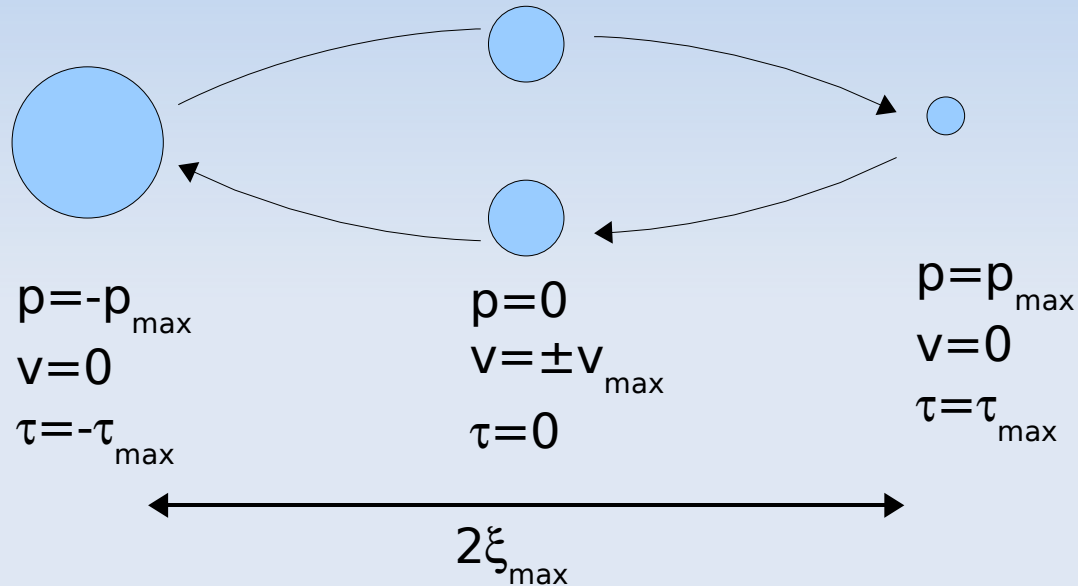


Heating  
(electrical resistance)

# 1.- Introduction à la thermoacoustique

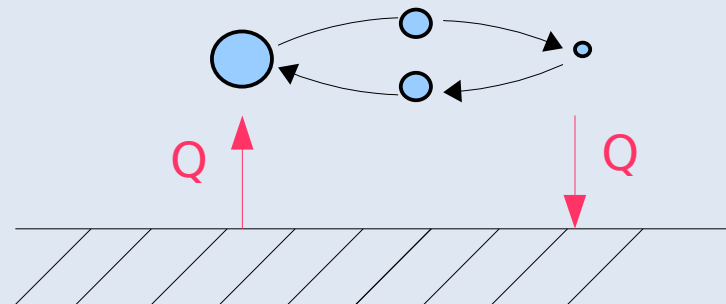
## 1.3.- Effet thermoacoustique (onde stationnaire)

### 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>,  $\xi_{\max} \approx 10^{-5}$  m,  
 $\tau_{\max} \approx 2 \cdot 10^{-2}$  K

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

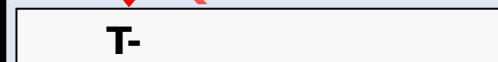
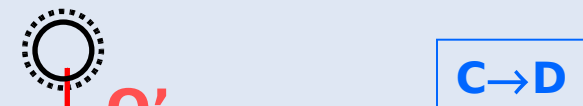
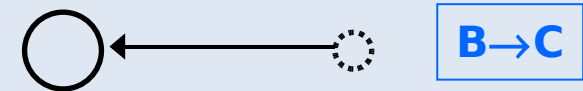
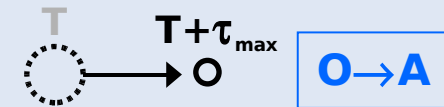
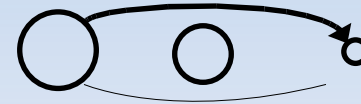
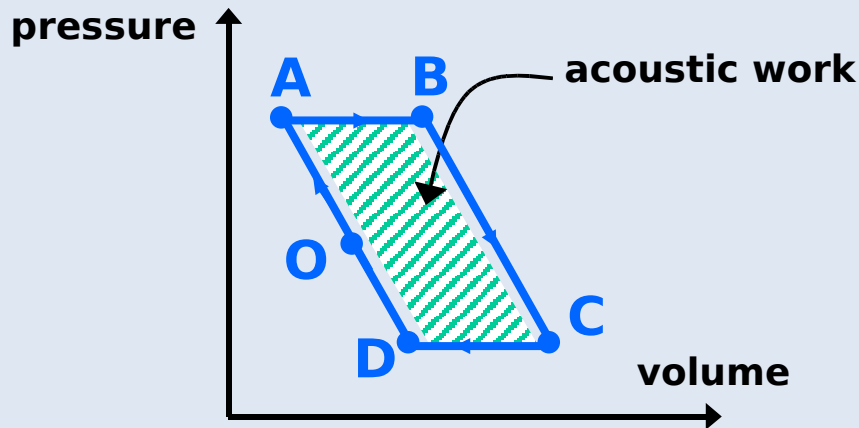
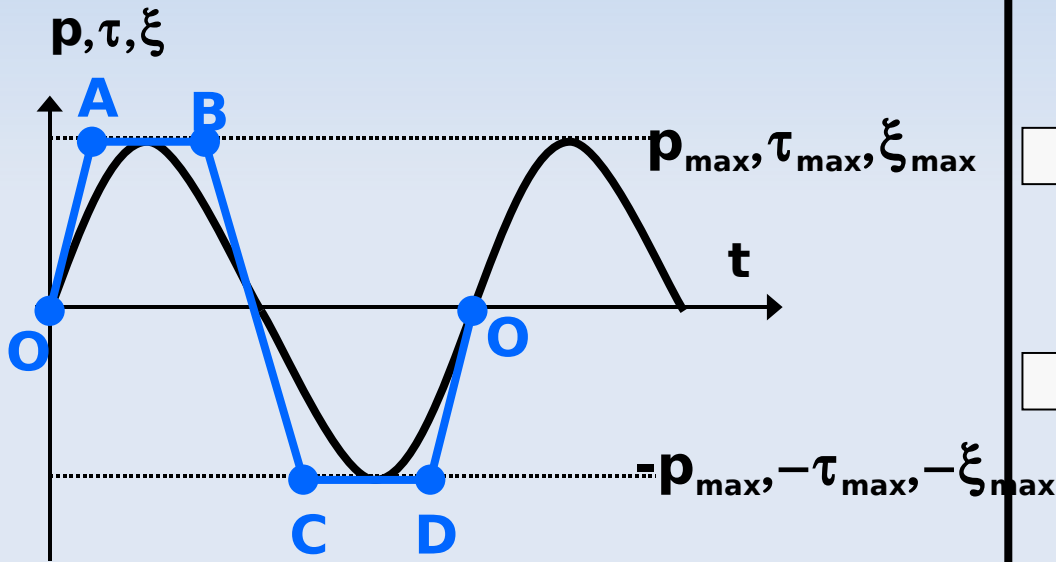


# 1.- Introduction à la thermoacoustique

## 1.3.- Effet thermoacoustique (onde stationnaire)

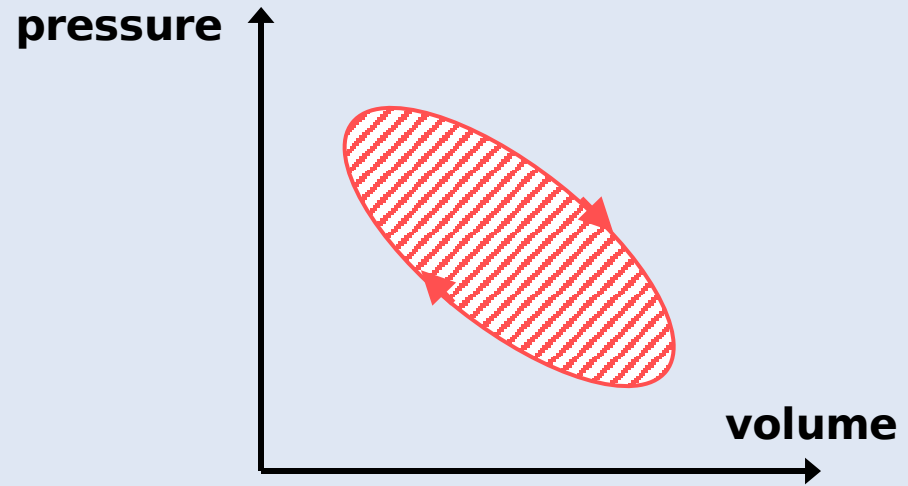
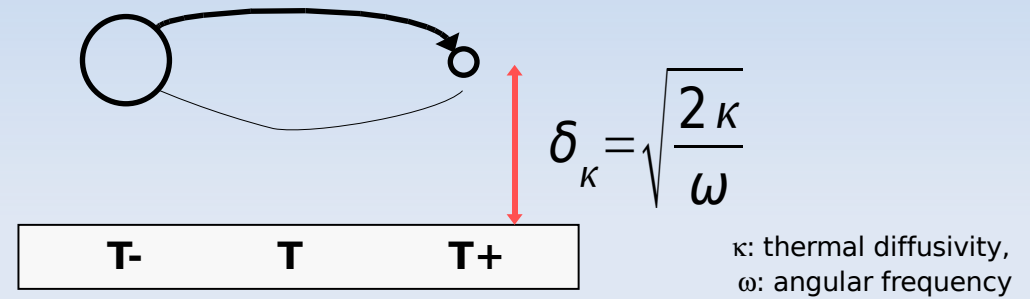
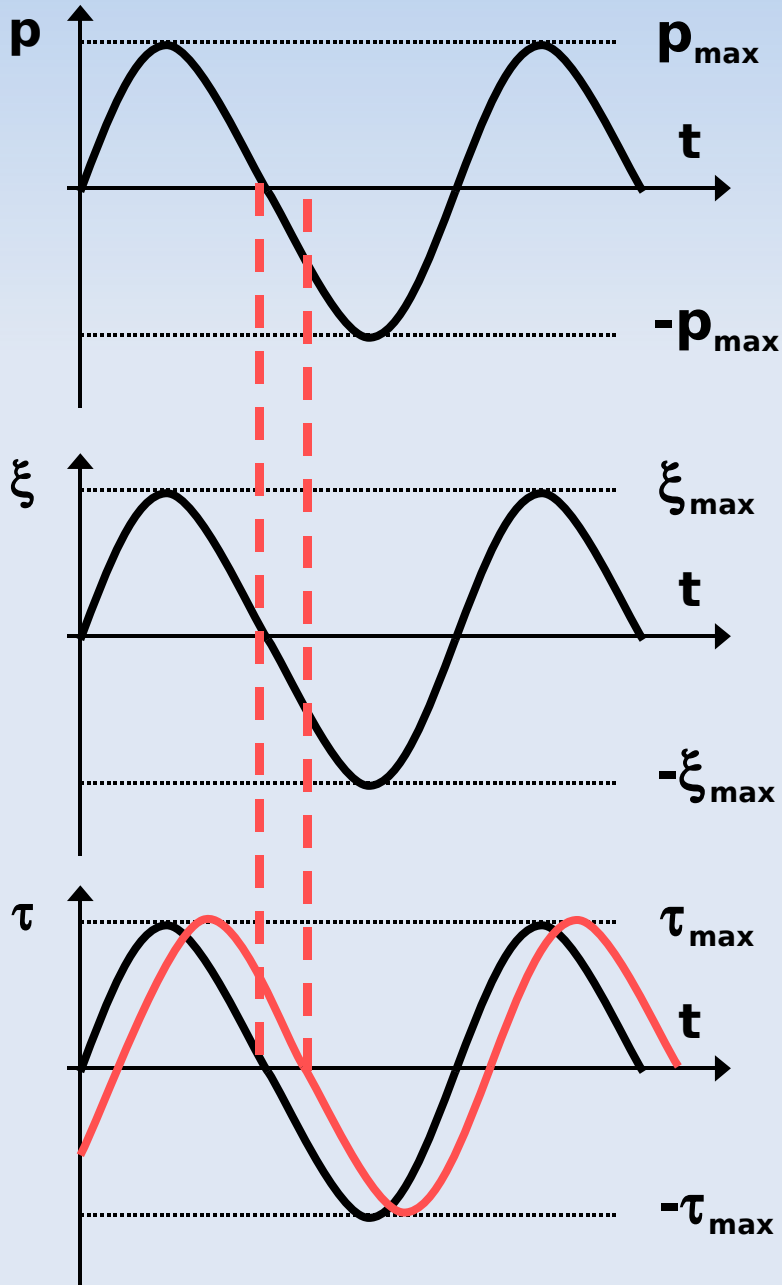


“If heat be given to the air at the moment of greatest condensation [i.e., greatest density] or be taken from it at the moment of greatest rarefaction, the vibration is encouraged.” from *The theory of sound*, Lord Rayleigh



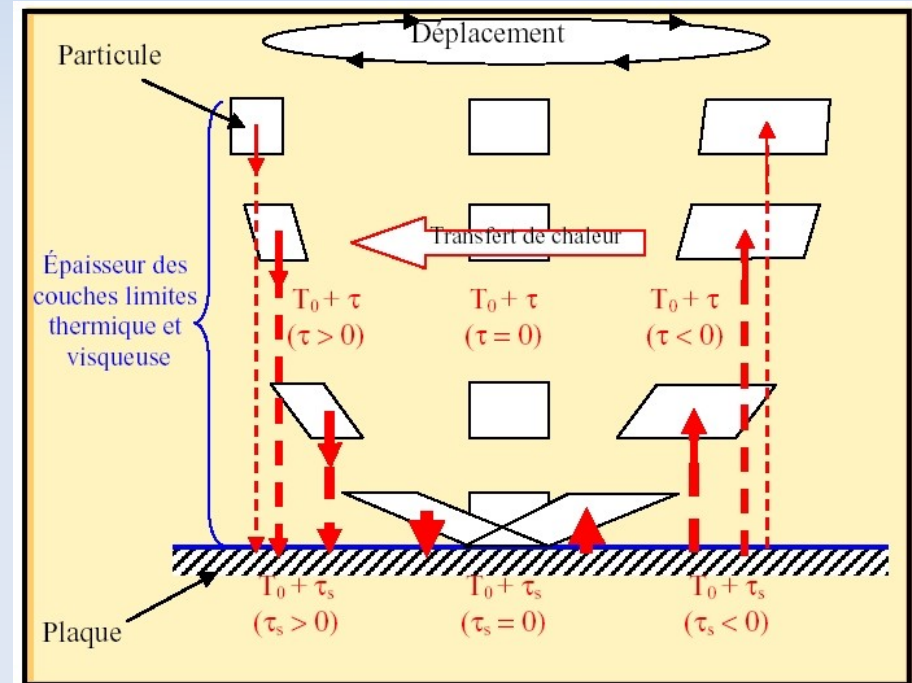
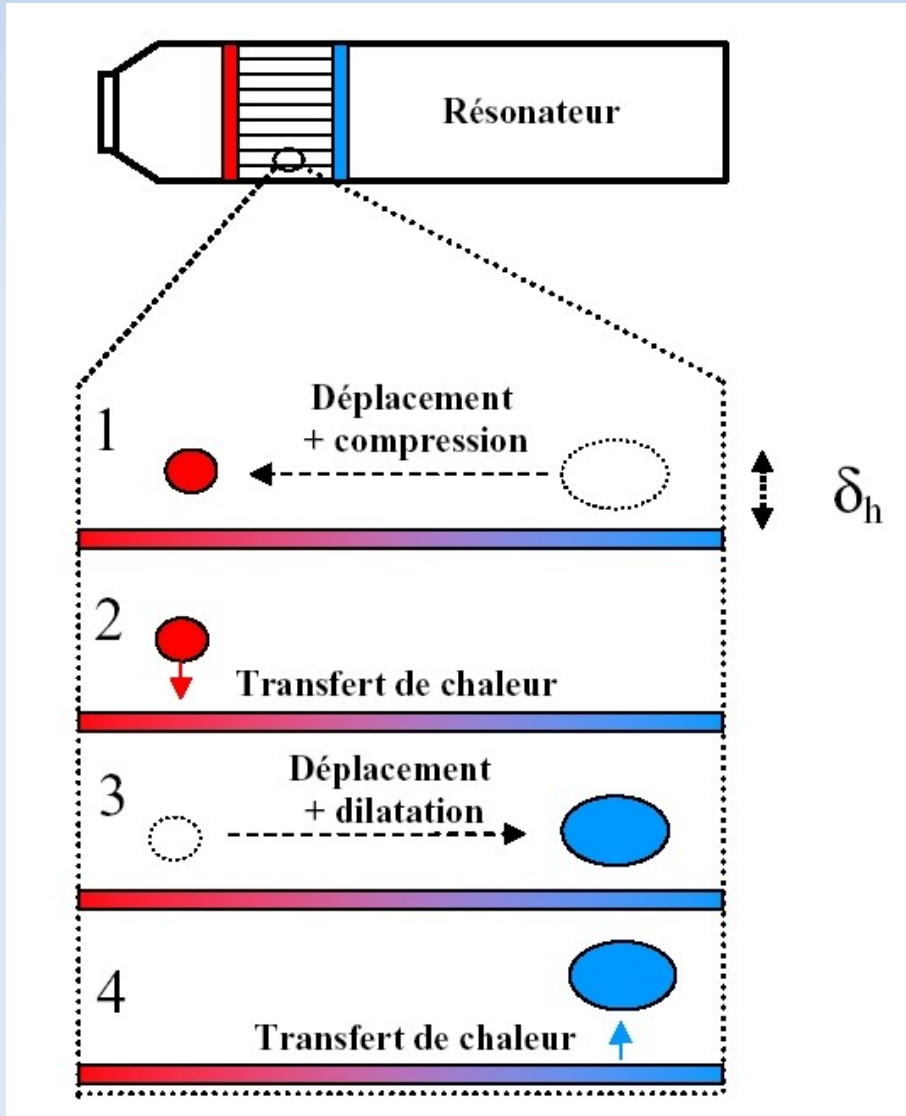
# 1.- Introduction à la thermoacoustique

## 1.3.- Effet thermoacoustique (onde stationnaire)



# 1.- Introduction à la thermoacoustique

## 1.3.- Effet thermoacoustique (onde stationnaire)

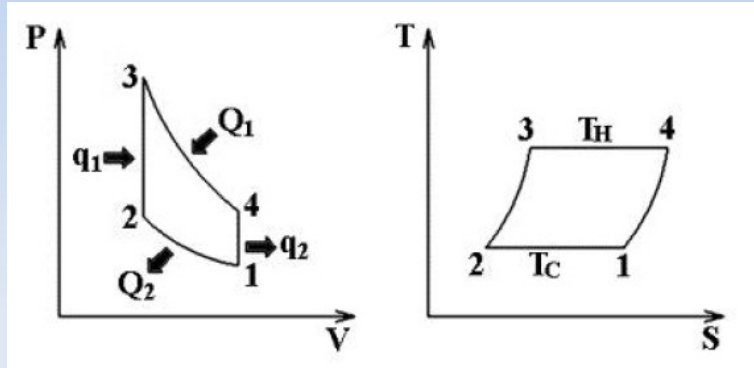




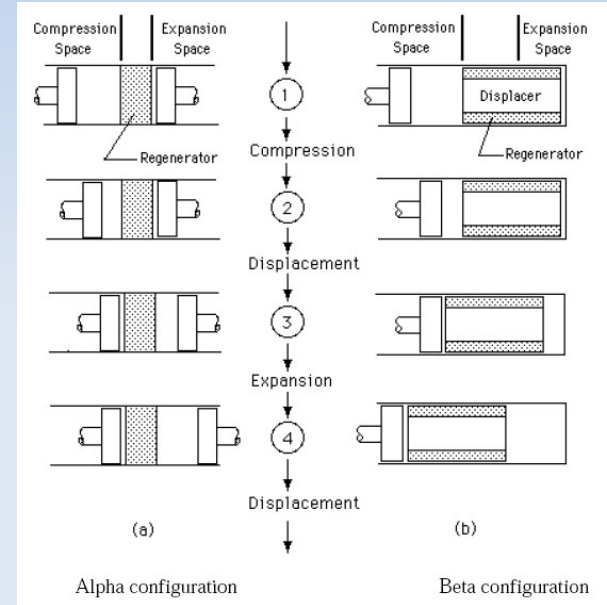
# 1.- Introduction à la thermoacoustique

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

### • cycle (théoriquement réversible) de Stirling

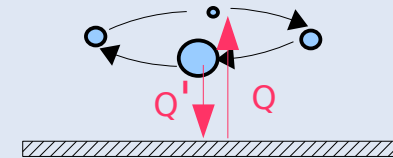


- 1-2 : compression isotherme
- 2-3 : réchauffement isochore
- 3-4 : détente isotherme
- 4-1 : refroidissement isochore



### • 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**:

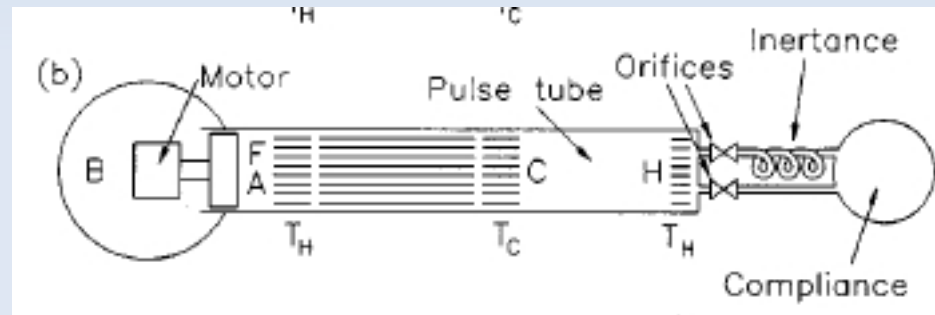
- 1.- onde de **nature progressive** (ou du moins,  $p$  &  $v$  en phase localement)
- 2.- compressions/détentes de nature isotherme => emploi d'un **régénérateur** ( $\delta_\kappa \gg R$ )

# 1.- Introduction à la thermoacoustique

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

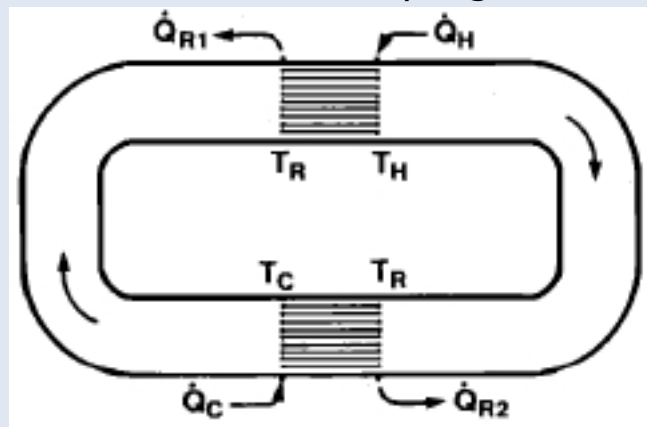
**Comment mettre au point une machine thermoacoustique de Stirling?  
=> 2 solutions**

**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 »

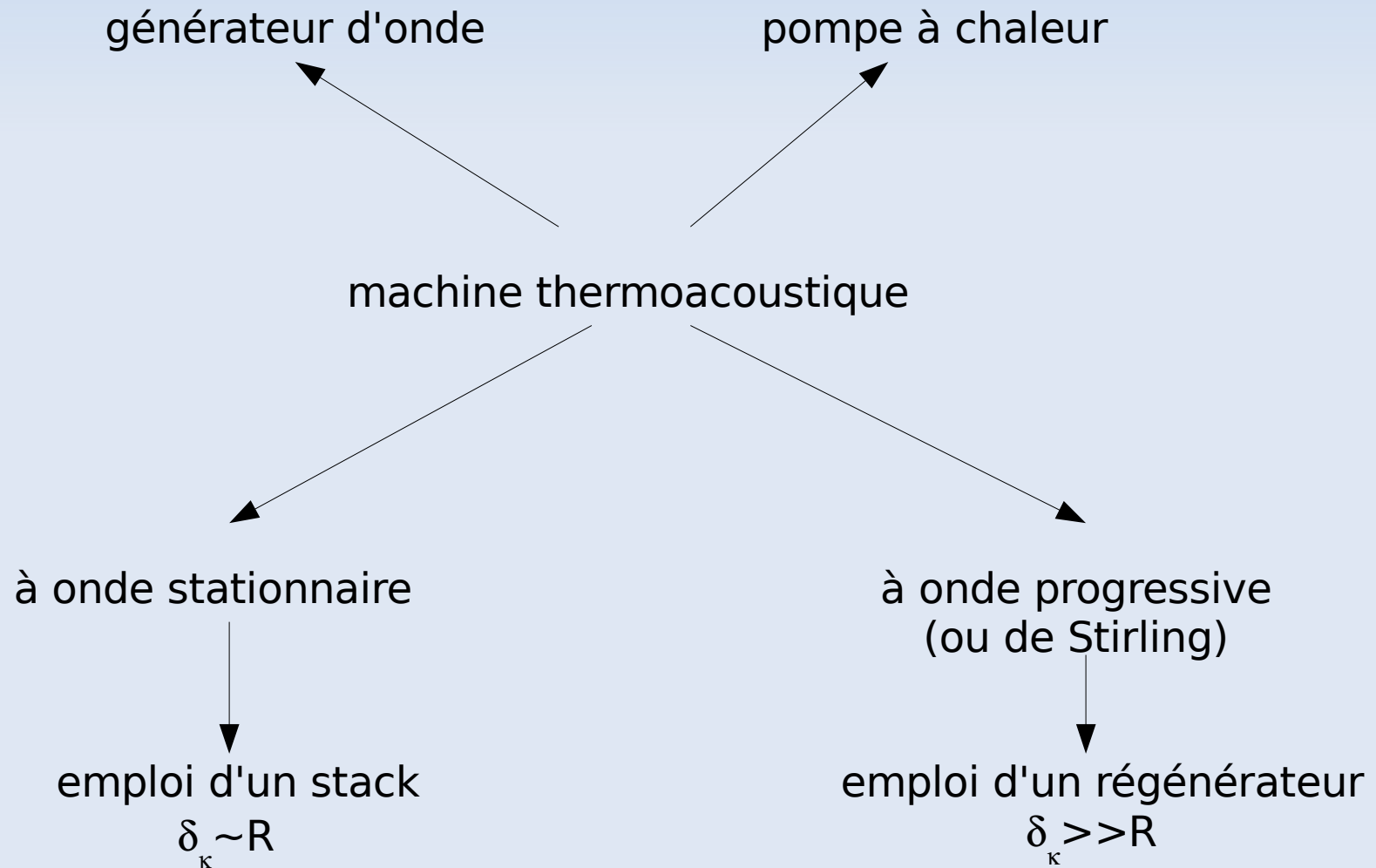


Ceperley, 1979

# 1.- Introduction à la thermoacoustique

## 1.5.- Bilan

### Bilan



# **1.- Principe de fonctionnement des machines thermoacoustiques**

- 1.1.- Généralités
- 1.2.- Exemple du moteur quart d'onde
- 1.3.- Effet thermoacoustique (onde stationnaire)
- 1.4.- Machine thermoacoustique de Stirling
- 1.5.- Bilan

# **2.- Exemples de machines, applications potentielles**

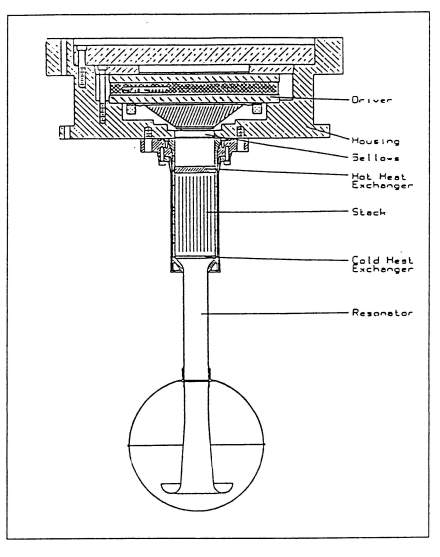
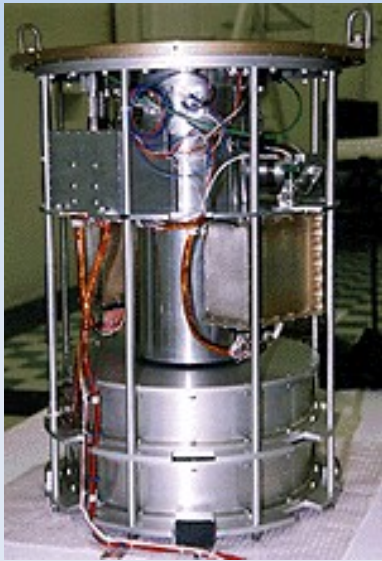
- 2.1.- Réfrigérateurs à ondes stationnaires
- 2.2.- Moteurs thermoacoustiques de Stirling
- 2.3.- Différents éléments des machines thermoacoustiques
- 2.4.- Avantages/inconvénients et applications des machines thermoacoustiques

# **3.- Bref état de l'art sur les recherches en thermoacoustique**

- 3.1.- Panorama de la communauté thermoacoustique
- 3.2.- Panorama (incomplet) des recherches en cours
- 3.3.- un exemple illustratif de verrou à lever

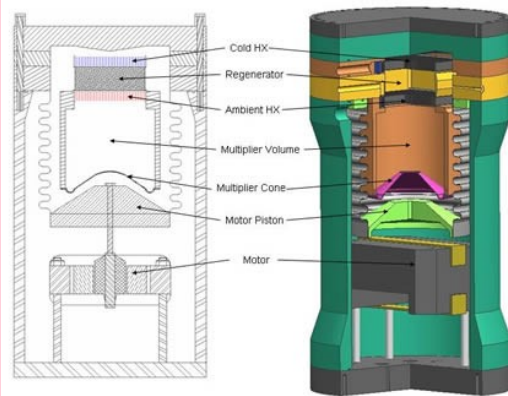
## 2.- Exemples de machines, applications potentielles

### 2.1.- Réfrigérateurs à ondes stationnaires

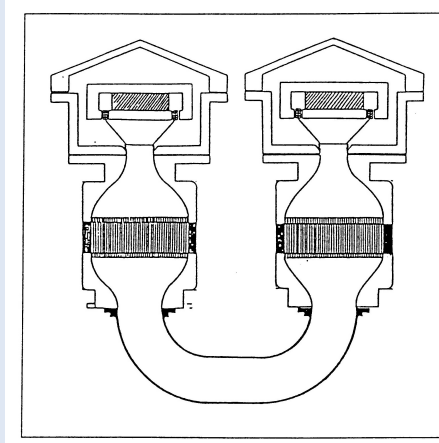


Space thermoacoustic refrigerator

STAR (1992) Penn, State



Schematic diagram of the thermoacoustic chiller developed for Ben & Jerry's® (2003) Penn State



ThermoAcoustic Life Science refrigerator TALSR (1991) Penn, State

## 2.- Exemples de machines, applications potentielles

### 2.1.- Réfrigérateurs à ondes stationnaires

$\Delta T$  : temperature difference between the ends of the stack (°K)

$Q_c$  : heat flow extracted from the cold heat exchanger (W)

**W<sub>ac</sub>** : acoustic power

**COP** =  $Q_c/W_{ac}$  : coefficient of performance (heat pump)

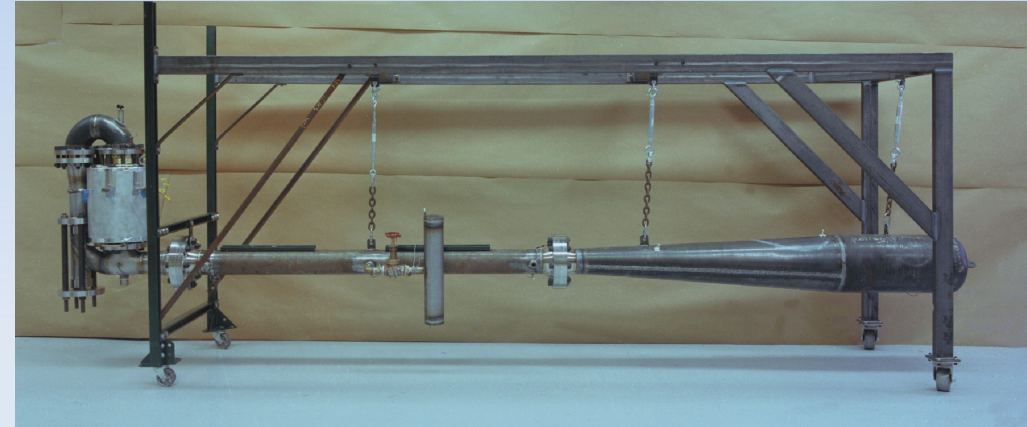
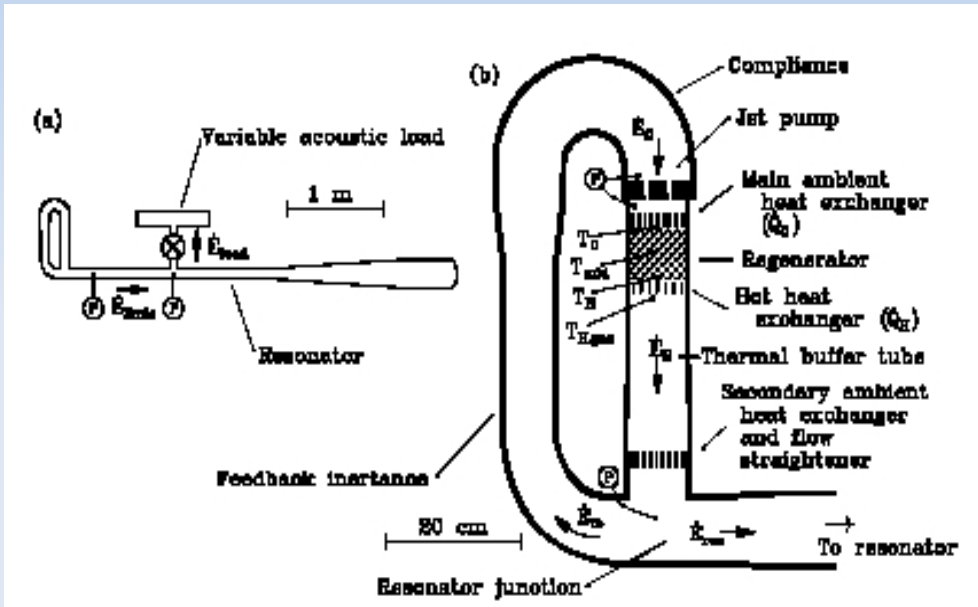
**COPR** = COP relative to Carnot

	S.T.A.R.	T.A.L.S.R	« Ben & Jerry's » Fridge	domestic fridge
$\Delta T$ (K)	<80	<50	<50	10-30
$Q_c$ (W)	<5	260	120	200-400
COPR (%)	20	40	19	40
Working Fluid	97% He, 3% Ar 10 Atm. (1 MPa)	89% He, 11% Xe 20 Atm.	He 10 Atm.	Freon

# 2.- Exemples de machines, applications potentielles

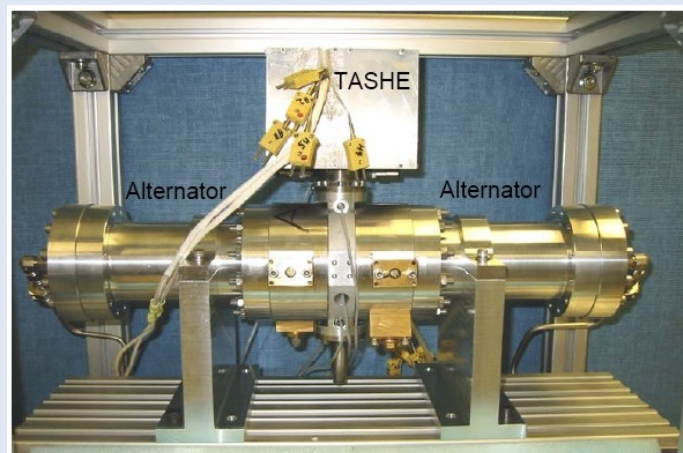
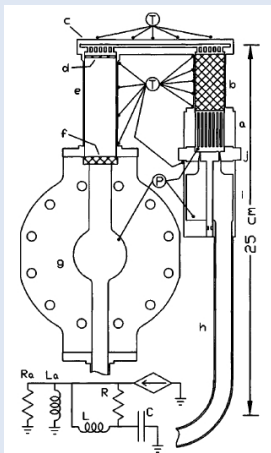
## 2.2.- Générateurs d'ondes de type Stirling

### • Le TASHE (ThermoAcoustic Stirling Heat Engine). [Backhaus & Swift, *Nature*, 1999]



fluid = He (30 bars)  
 $W_{ac} \sim kW,$   
 $\eta = 30\% (\eta_R = 41\%)$

### • Le TASHE appliqué à la transduction thermoélectrique. [Backhaus et al. , *Appl. Phys. Lett.*, 2004]



contexte = contrat NASA pour remplacement de source d'électricité radio-isotopique utilisant des cellules Peltier ( $\eta_{\text{peltier}} \sim 7\%$ )

fluid = He (50 bars)  
 $W_{\text{élec}} \sim 50W,$   
 $\eta_{T \rightarrow A} = 24\%$   
 $\eta_{T \rightarrow A \rightarrow E} = 18\%$

## 2.- Exemples de machines, applications potentielles

### 2.3.- Différents éléments des machines thermoacoustiques

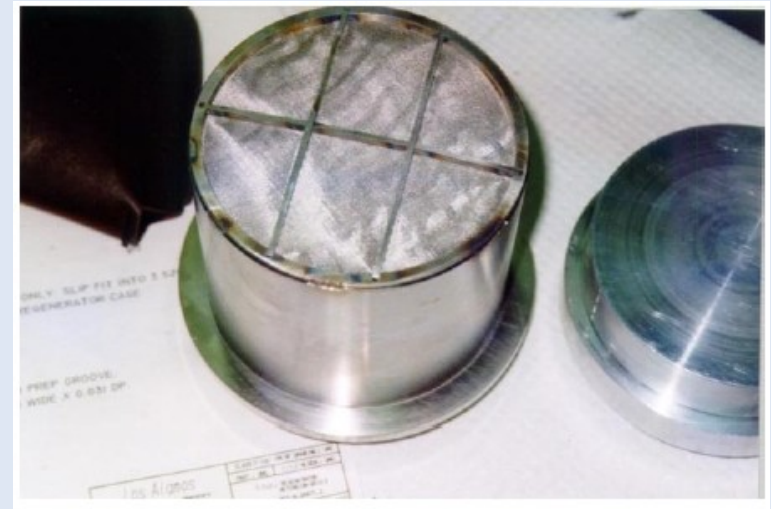
#### 2.3.1.- Le stack/régénérateur

les contraintes auxquelles doivent satisfaire le stack/régénérateur?

- $\rho C_p$  élevé (devant celui du fluide)
- faible conductivité thermique (mais grande en regard de celle du fluide)
- porosité élevée (et surface « mouillée » aussi...)
- rayon géométrique R?
  - \* pour un stack,  $\delta_\kappa/R \sim 1$  (transformation polytropique)
  - \* pour un régénérateur,  $\delta_\kappa/R \gg 1$  (transformation isotherme)



Stack constitué d'un enroulement de ruban d'acier inoxydable distance interplaques de l'ordre de 300  $\mu\text{m}$



Régénérateur constitué d'un empilement de grilles d'acier inoxydable cellules d'une largeur d'environ 50  $\mu\text{m}$

NB: le placement dans le guide d'onde de cet élément doit également être optimisé



## 2.- Exemples de machines, applications potentielles

### 2.3.- Différents éléments des machines thermoacoustiques

#### 2.3.2.- Le fluide

les contraintes auxquelles doivent satisfaire le fluide?

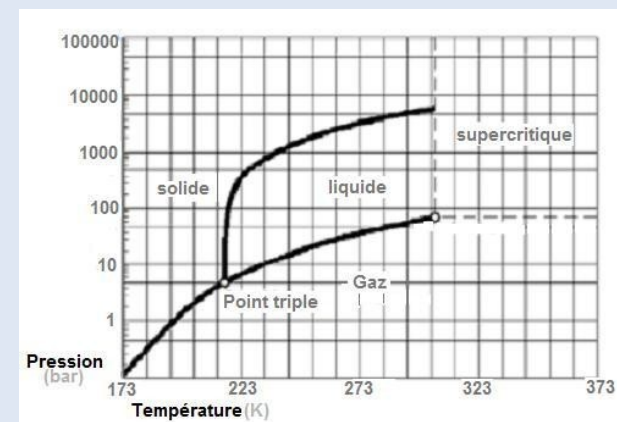
- **nombre de Prandtl faible** ( $\sigma = \nu/\kappa = \text{viscosité}/\text{diffusivité thermique}$ ) pour favoriser les échanges thermiques en limitant les pertes visqueuses
- **coefficient polytropique  $\gamma$  élevé** ( $\gamma - 1 = (\chi_T - \chi_S)/\chi_T \sim \text{mesure du domaine de variation relative de la compressibilité}$ )
- fluide **pressurisé** sous plusieurs dizaines de bars (augmentation de l'énergie acoustique à « drive ratio » constant)

fluides utilisés classiquement:

- \* moteurs => Hélium
- \* réfrigérateurs => mélange de gaz rares (Hélium-Argon, Hélium-Xénon)

Autres fluides envisagés

- \* hydrogène?
- \* fluides proches de leur point critique
- \* sodium liquide



## 2.- Exemples de machines, applications potentielles

### 2.3.- Différents éléments des machines thermoacoustiques

#### 2.3.3.- Les échangeurs de chaleur

Fonction = assurer le transport de chaleur entre les extrémités du stack/régénérateur) et les réservoirs de chaleur.



*Exemple: échangeur de chaleur froid*

Constitue l'un des éléments clés à optimiser dans ces machines...

=> Qu'est ce qu'un bon échangeur de chaleur en écoulement oscillant?

=> Distance optimale stack-échangeur (pour réfrigérateur thermoacoustique) ?

## 2.- Exemples de machines, applications potentielles

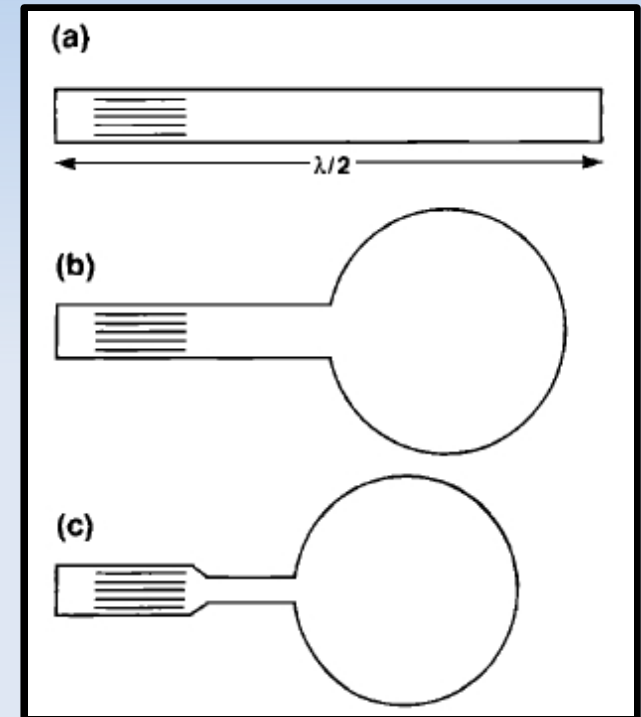
### 2.3.- Différents éléments des machines thermoacoustiques

#### 2.3.4.- Le guide d'onde

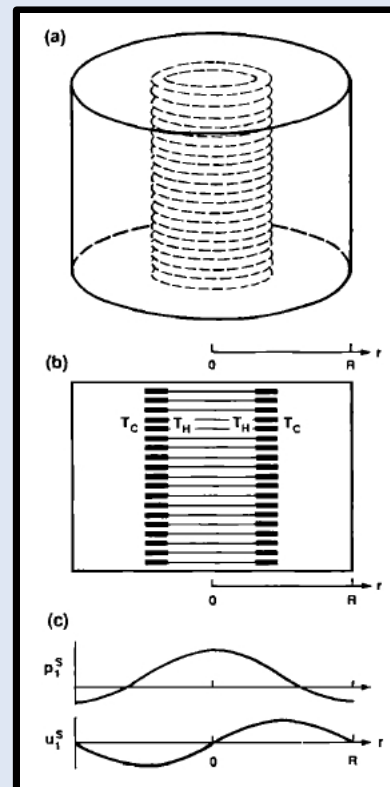
les contraintes auxquelles doivent satisfaire le guide d'onde?

- grand facteur de qualité (NB:  $Q \propto V/S$ )
- favoriser une distribution optimale du champ acoustique à l'endroit du stack/régénérateur.

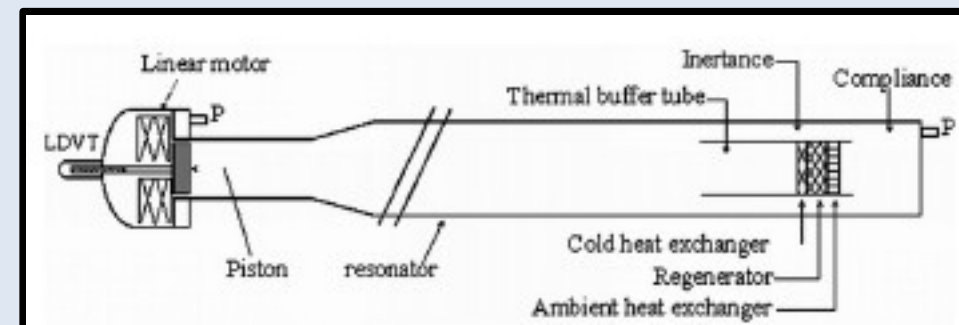
=> géométrie très diverses suivant les machines....



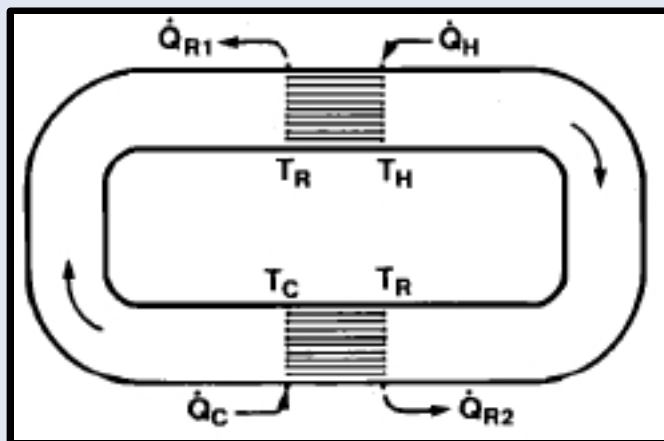
Résonateurs à ondes stationnaires



Machine « radiale »



Résonateur de type « coaxial »



## 2.- Exemples de machines, applications potentielles

### 2.3.- Différents éléments des machines thermoacoustiques

#### 2.3.5.- Source/alternateur (le cas échéant)

Le plus souvent, sources de type électrodynamiques

- **Maquettes d'études (fluide non pressurisé) => Hp électrodynamique à bobine mobile**



	Tannoy K3838
$W_{\text{élec}}$ (W)	50
$BI$ ( $\text{NA}^{-1}$ )	5
$M_m$ (kg)	$6 \cdot 10^{-3}$
$K$ ( $\text{N.m}^{-1}$ )	$1,7 \cdot 10^3$
$R_m$ ( $\text{kg.s}^{-1}$ )	5
$\eta_{\text{max}}$ (%)	40-50

- **Machines => Moteurs/alternateurs électrodynamique linéaires**



	CFIC 1S102M/A	CFIC 1S297M/A
$W_{\text{élec}}$ (W)	100	5000
$BI$ ( $\text{NA}^{-1}$ )	70	60
$M_m$ (kg)	0,45	8
$K$ ( $\text{N.m}^{-1}$ )	$42 \cdot 10^3$	$180 \cdot 10^3$
$R_m$ ( $\text{kg.s}^{-1}$ )	4	40
$\eta_{\text{max}}$ (%)	80-90	



2 moteur/alternateur couplés avec leur enceinte.

## 2.- Exemples de machines, applications potentielles

### 2.4.- Avantages/inconvénients des machines thermoacoustiques

- **Avantages**

- ✓ Fluide de travail respectueux de l'environnement
- ✓ Géométrie simple
  - => facilité et faible coût de production
- ✓ Pas ou peu de pièces mécaniques mobiles
  - => fiabilité
- ✓ Potentiellement miniaturisable
- ✓ Rendement de bon niveau

- **Inconvénients**

- ✓ Puissance limitée
- ✓ Rendement seulement de bon niveau
- ✓ Compréhension/modélisation fine pas encore aboutie
  - => recherche fondamentale encore d'actualité

- **Applications ?**

- ✓ Cryogénérateurs sans pièce mobile (couplage moteur thermoacoustique / TGP)
- ✓ Microcogénération (production eau chaude + électricité)
- ✓ Récupération/mise en valeur de la chaleur perdue
- ✓ Maintien en température de l'électronique
- ✓ ...

## **1.- Principe de fonctionnement des machines thermoacoustiques**

- 1.1.- Généralités
- 1.2.- Exemple du moteur quart d'onde
- 1.3.- Effet thermoacoustique (onde stationnaire)
- 1.4.- Machine thermoacoustique de Stirling
- 1.5.- Bilan

## **2.- Exemples de machines, applications potentielles**

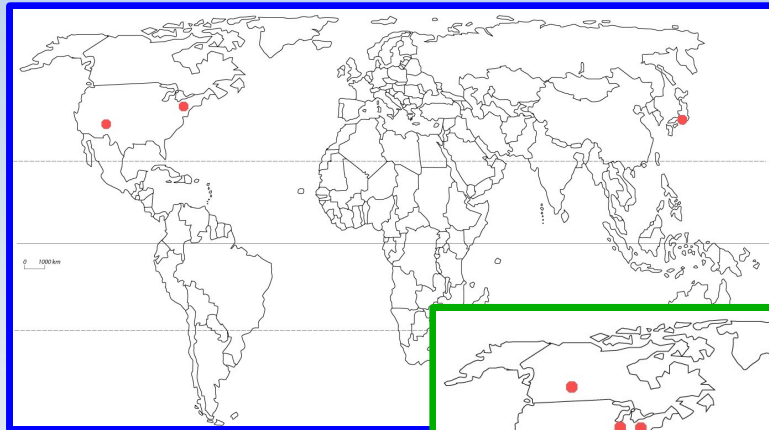
- 2.1.- Réfrigérateurs à ondes stationnaires
- 2.2.- Moteurs thermoacoustiques de Stirling
- 2.3.- Différents éléments des machines thermoacoustiques
- 2.4.- Avantages/inconvénients et applications des machines thermoacoustiques

## **3.- Bref état de l'art sur les recherches en thermoacoustique**

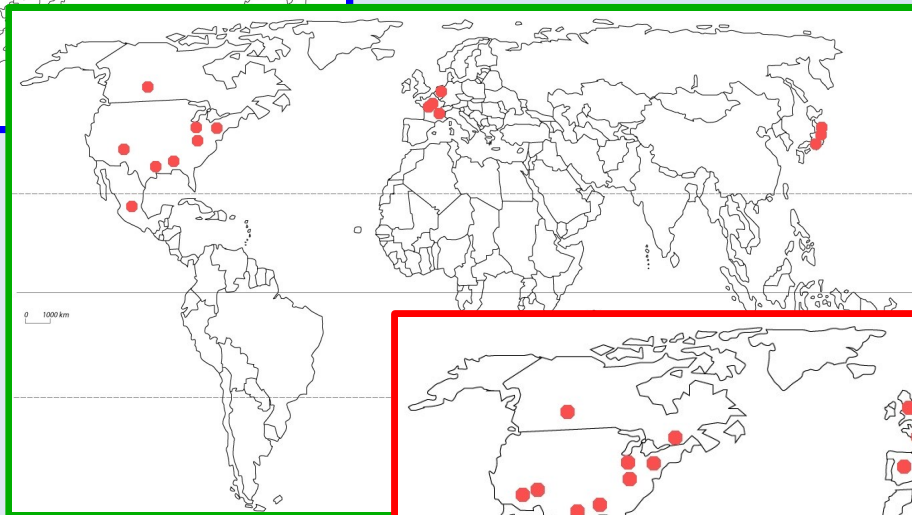
- 3.1.- Panorama de la communauté thermoacoustique
- 3.2.- Panorama (incomplet) des recherches en cours
- 3.3.- un exemple illustratif de verrou à lever

# 3.- Bref état de l'art sur les recherches en thermoacoustique

## 3.1.- Panorama de la communauté thermoacoustique



années 80  
~ 40 articles



années 90  
~ 350 articles



années 2000  
~ 750 articles  
~ 100-500 personnes?

# 3.- Bref état de l'art sur les recherches en thermoacoustique

## 3.2.- Panorama (incomplet) des recherches en cours

### Quelques constats

- machines simples dans leur principe.... mais complexe dans leur fonctionnement
- logiciels de dimensionnement (DELTA-EC, Thermoacoustica, CRISTA, etc...) et d'estimation des performances basés sur description linéaire, stationnaire et 1D des phénomènes alors même que la réalité est tout autre...

### Principales recherches académiques en cours

- Modélisation fine des stack/régénérateurs de géométrie complexe
- Modélisation/optimisation des échangeurs de chaleur
  - ✓ dimensionnement
  - ✓ effets de bords thermiques et aérodynamiques
- Description fine des couplages
  - ✓ couplage source acoustique / guide d'onde
  - ✓ couplage moteur thermoacoustique / alternateur
  - ✓ couplage moteur thermoacoustique / TGP
- Description fine d'effets non linéaire...
  - ✓ vent acoustique, propa NL, turbulences
  - et de certains éléments constitutifs de machine
    - ✓ pompes à jet, T, tube coniques

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



# 3.- Bref état de l'art sur les recherches en thermoacoustique

## 3.3.- Un exemple illustratif de verrou à lever

Modélisation sous Delta-EC (ou équivalent) d'un générateur d'onde => prédiction d'un régime stationnaire  
=> **Oui, mais lequel?**

**hystérésis**

**déclenchement/arrêt  
périodiques**

**« fishbone like »  
instability**

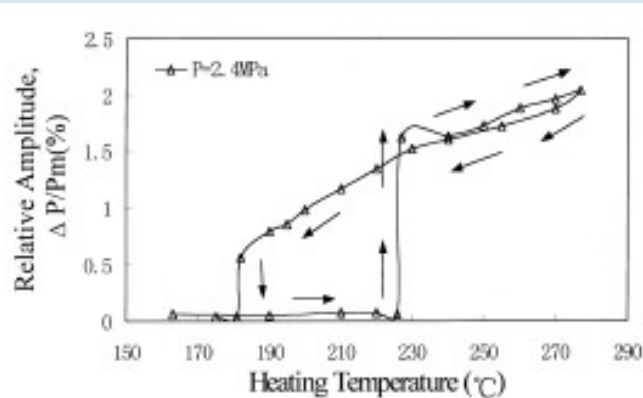


Fig. 2. Relative pressure amplitude versus heating temperature with symmetrical heating.

G.B. Chen et coll., *Cryogenics*, 1999

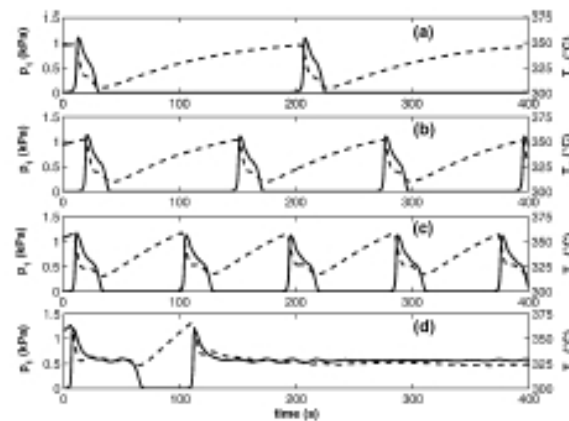
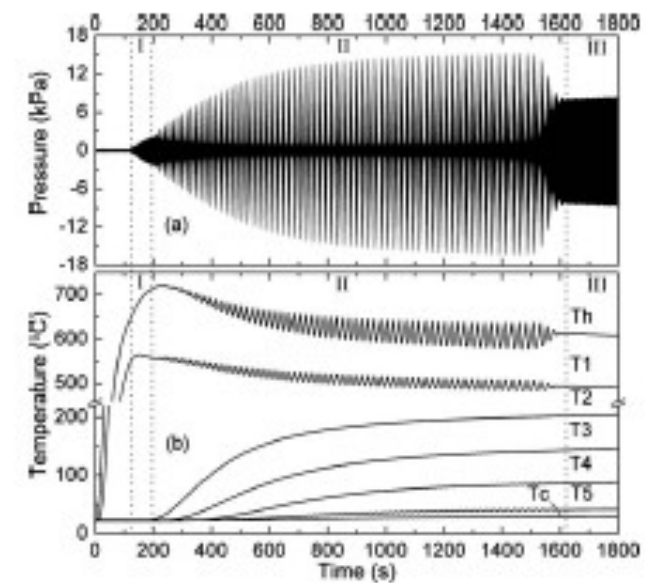


Fig. 2. Gradual evolution of the root mean square amplitude  $p_1$  of acoustic pressure (solid line) and temperature at the hot stack end  $T_H$  (dashed line), when the power increment  $\Delta Q$  above the threshold value  $Q_0$  is increased. (a)  $\Delta Q/Q_0 = 5\%$ ; (b)  $\Delta Q/Q_0 = 10\%$ ; (c)  $\Delta Q/Q_0 = 20\%$ ; (d)  $\Delta Q/Q_0 = 30\%$ .

G. Penelet et coll., *Phys. Lett. A*, 2006



Z. Yu et coll., *JASA Exp. Lett.*, 2010

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...

**Merci de votre attention...**

