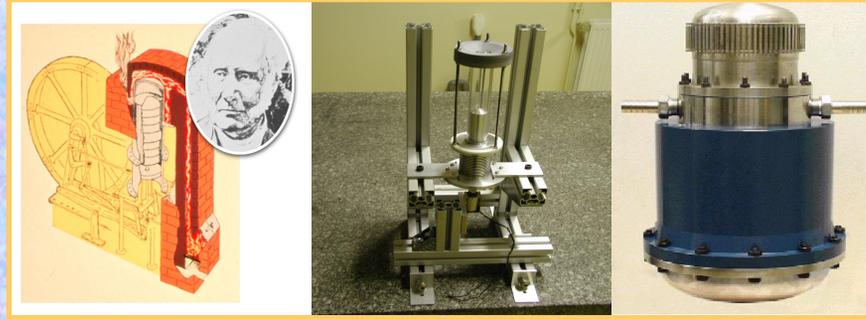


*Journée SFT du 30 mars 2006 : Optimisation énergétique  
des moteurs thermiques : nouveaux défis.*

# Moteurs Stirling Appliqués à la Cogénération

Julien Boucher, François Lanzetta, Philippe Nika

Institut FEMTO-ST, CNRS UMR 6174, Département CREST  
Parc technologique, 2 avenue Jean Moulin, 90000 Belfort  
[julien.boucher@univ-fcomte.fr](mailto:julien.boucher@univ-fcomte.fr)



## Sommaire

### 1) Généralités et principe de fonctionnement

(avantages, inconvénients, géométries Stirling « classiques ».)

### 2) Cogénérateurs Stirling sur le marché

(STC, Sunpower, SES, STM, Solo, Whispergen...)

### 3) Thèse Stirling Pistons libres

(Projets, recherches atypiques, modélisations, étude paramétrique, maquette...)

## Conclusions

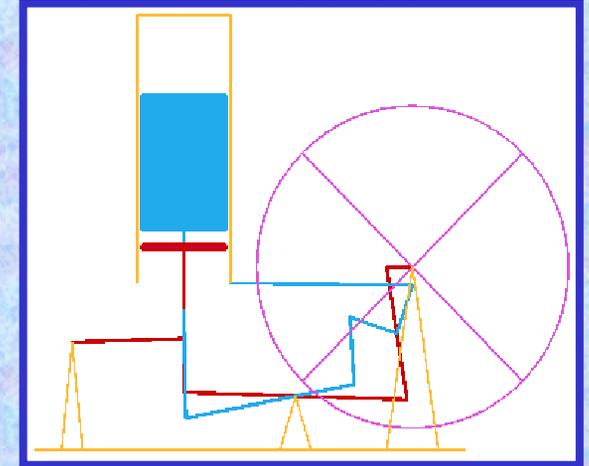
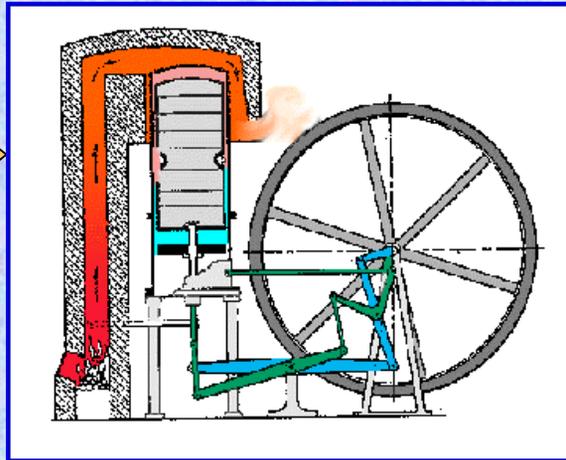
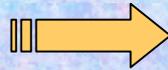
# 1- Généralités et principe de fonctionnement

# Généralités et principe de fonctionnement

Inventeur du moteur Stirling (1816):

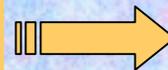
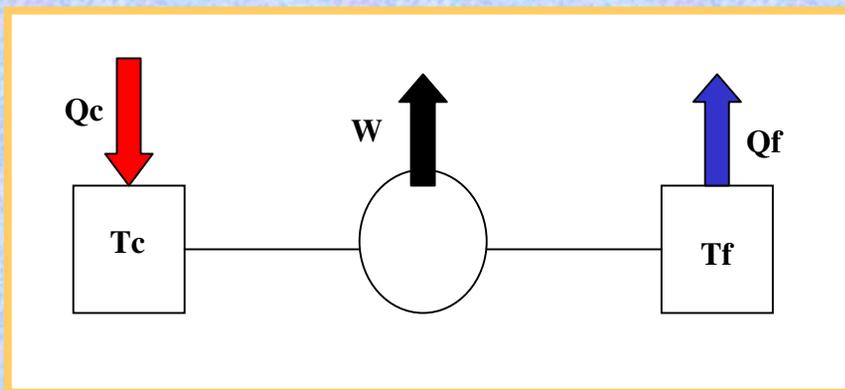


Le Pasteur Robert Stirling



Ce moteur est aussi appelé "moteur à air chaud" ou "moteur à combustion externe".

Machines dithermes à compression de gaz

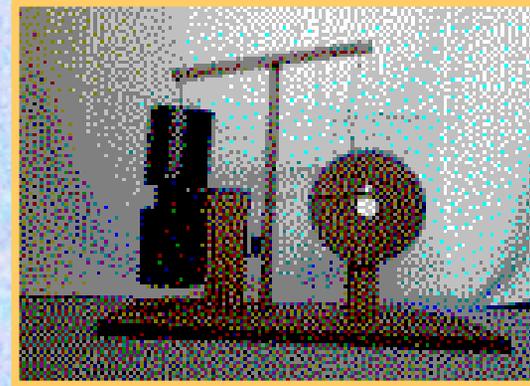


Le principe de fonctionnement est relativement simple :

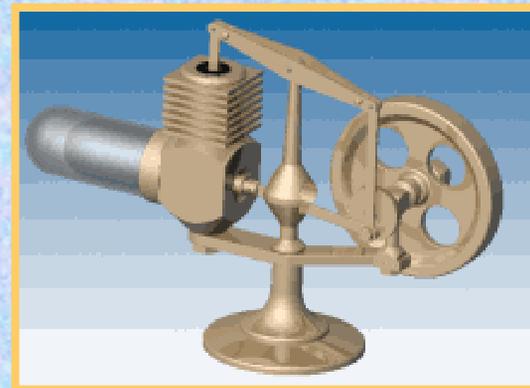
- combustion est **externe**,
- fluide principal : air, faible pression
- 4 transformations : **chauffage**, **détente**, **refroidissement** puis **compression**.

Machine idéale réversible

- 1) **Multitude** de sources chaudes (combustion externe)
- 2) **Fonctionnement** silencieux (pas de détente à l'atmosphère, pas de soupapes d'admission et d'échappement).
- 3) **Aptitude écologique** (répondre aux exigences environnementales, combustion stœchiométrique).
  
- 4) **Rendement élevé** (fonction des températures de la source chaude et du puit froid).
- 5) **Fiabilité et maintenance aisées** (relative à la simplicité technologique),
- 6) **Utilisation flexible** (autonomie et adaptabilité).
- 7) **Durée de vie importante** « rusticité ».



**Stirling est connu dans le monde du maquettisme**

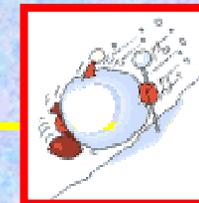
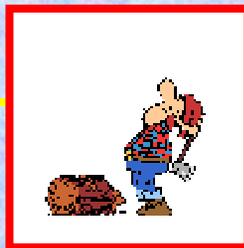


## Techniques:

- 1) **Problème d'étanchéité** (pression et parties tournantes).
- 2) Les **joints d'étanchéité**.
- 3) Le **fluide fugace** utilisé dans le moteur (hélium, hydrogène, air...)
- 4) Les **échangeurs** (refroidisseur, régénérateur, réchauffeur).

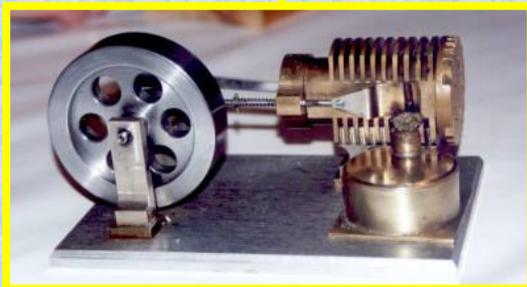


Machine **expresso Stirling**  
(Sunpower)



## Contextuel:

- 1) **Le prix:** (frein à son développement),
- 2) **Méconnaissance** (Stirling, amateurs),
- 3) **Variété des modèles** (empêche une standardisation et par conséquent une baisse des prix)



CS = Volume de compression

ES = Volume de détente

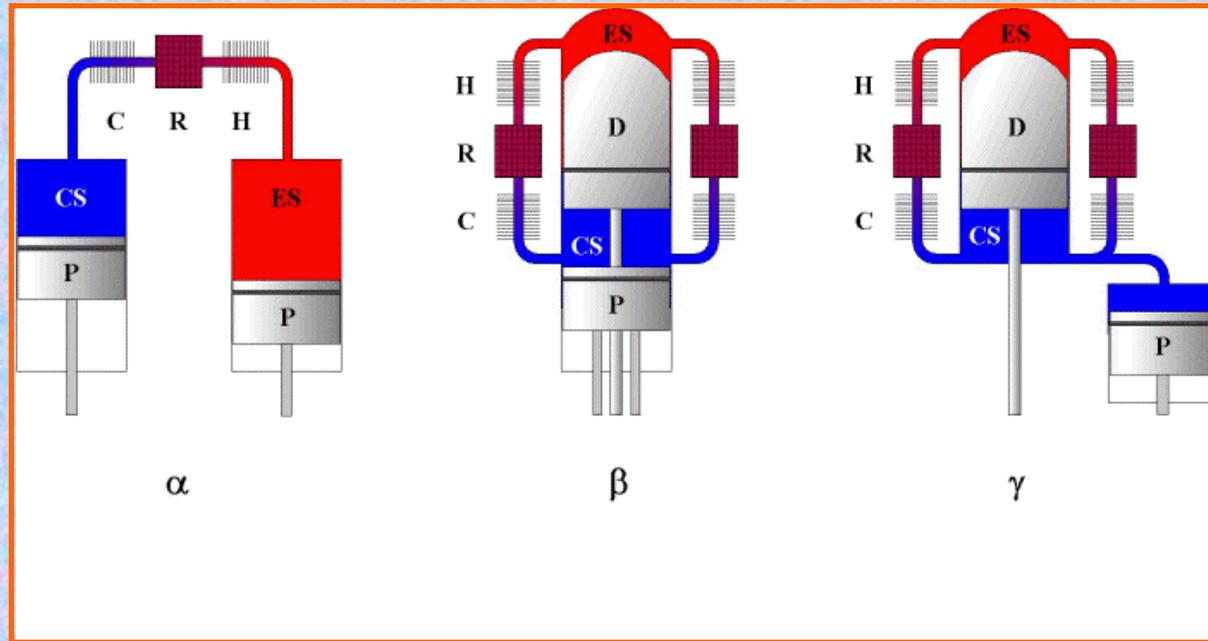
C = Refroidisseur

R = Régénérateur

H = Réchauffeur

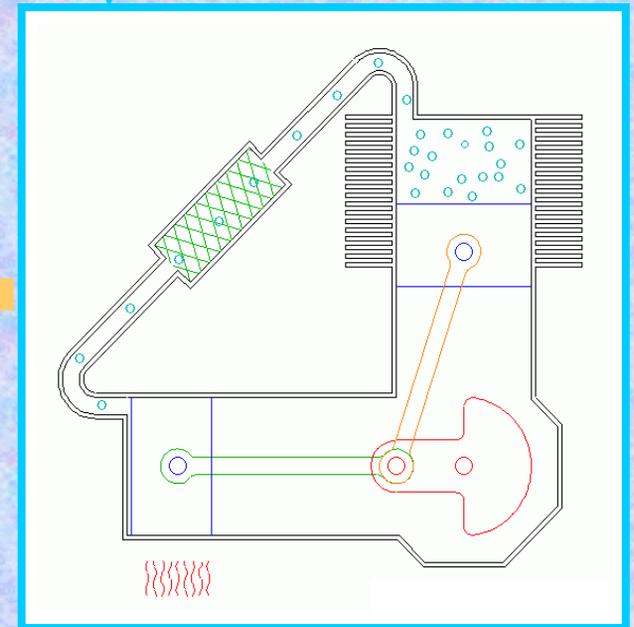
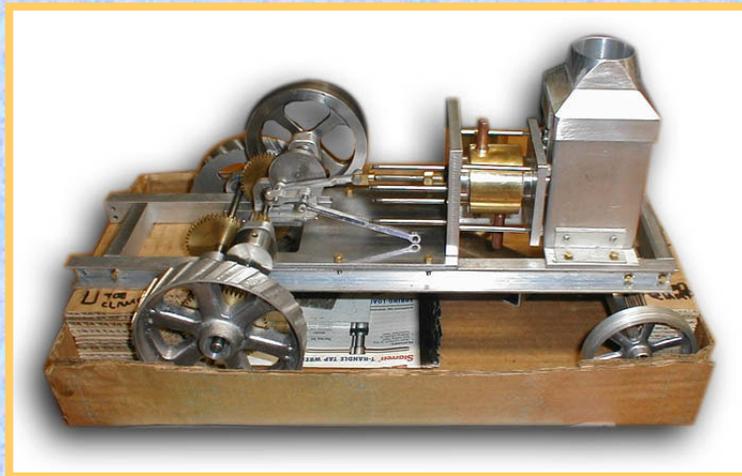
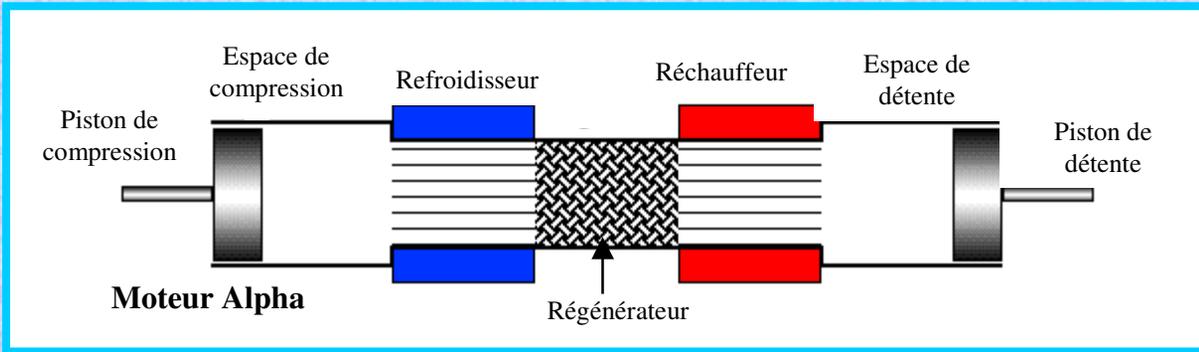
P = Piston

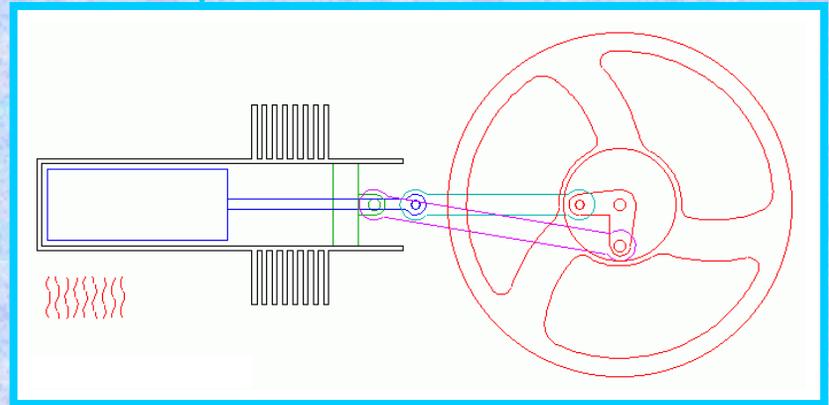
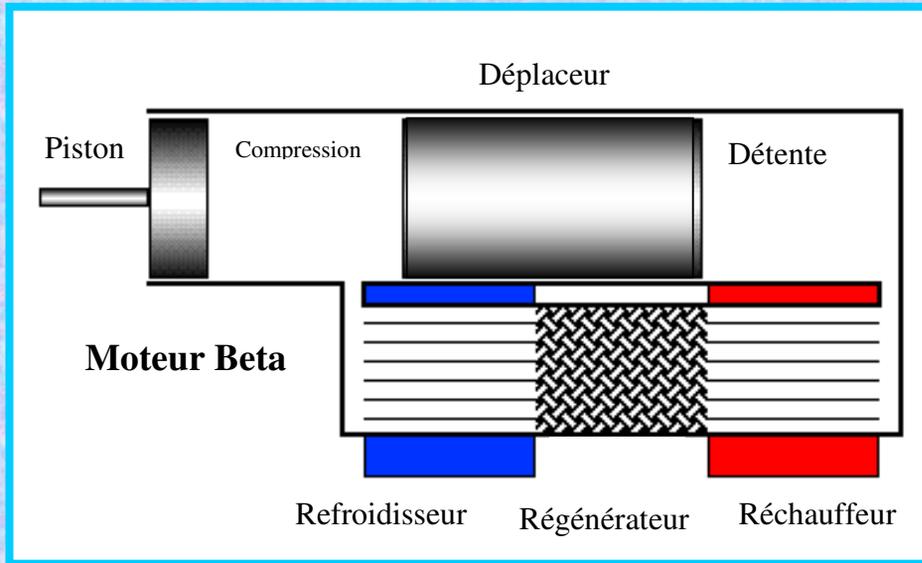
D = Déplaceur

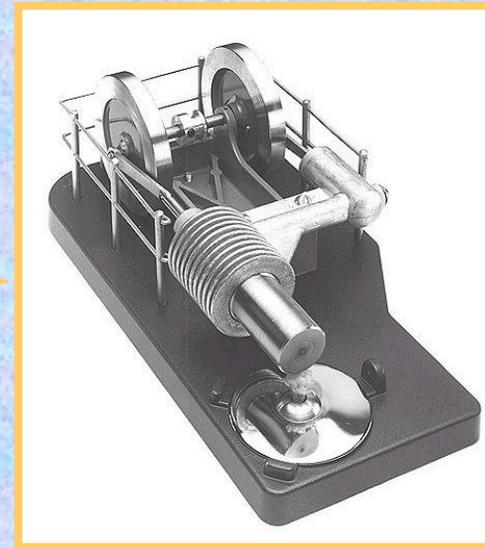
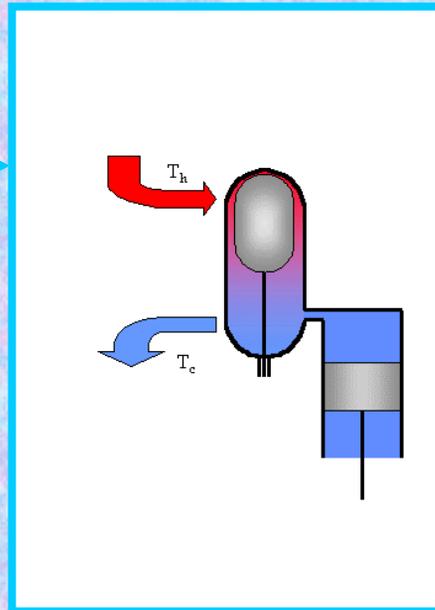
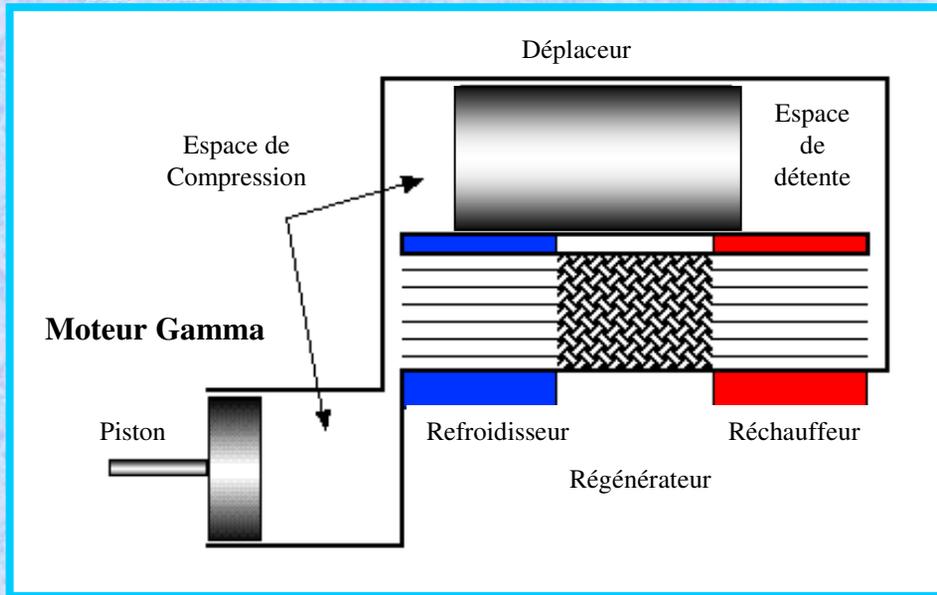


**Mécaniques bielle-manivelle ou swash-plate**  
**Problème étanchéité à l'hélium ou hydrogène**  
**Faible puissance volumique**  
**Durée de vie, maintenance**



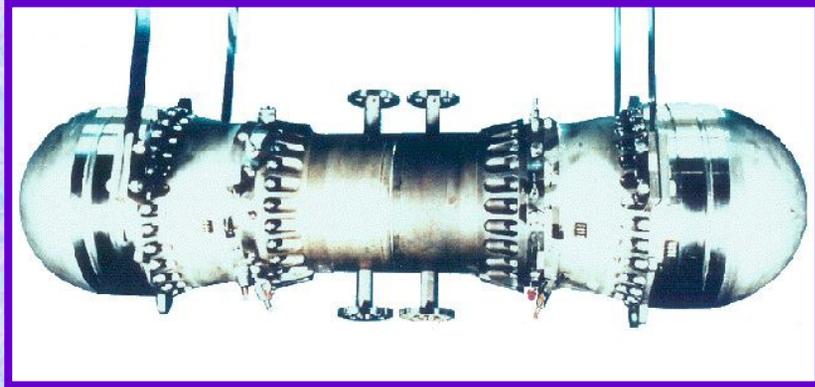






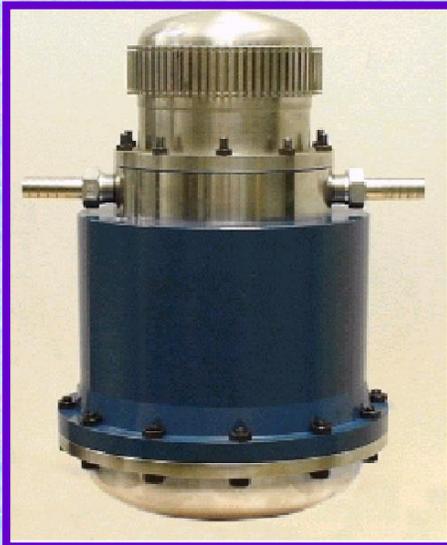
## **2- Cogénérateurs Stirling sur le marché**

## Space Power Demonstrator Engine

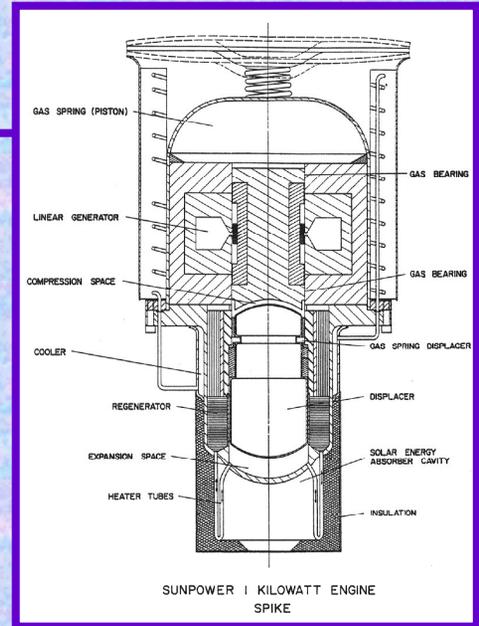


Le **SPDE** est un moteur Stirling à pistons libres couplé à un alternateur linéaire : double cylindre, constitué de **2 pistons** mis en opposition, conçu pour produire **25 kWe** avec un rendement de **25%**.

## The Sunpower EG-1000 free-piston Stirling engine - generator

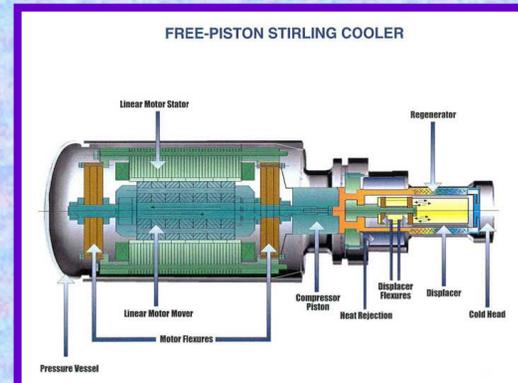


Puissance électrique : **1 kWe**  
sous 240 V, 50 Hz  
Rendement = **90 %**  
Production d'eau chaude à  
50°C.

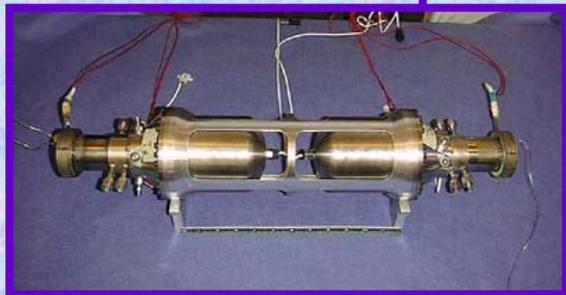




# NASA Glenn Research Center

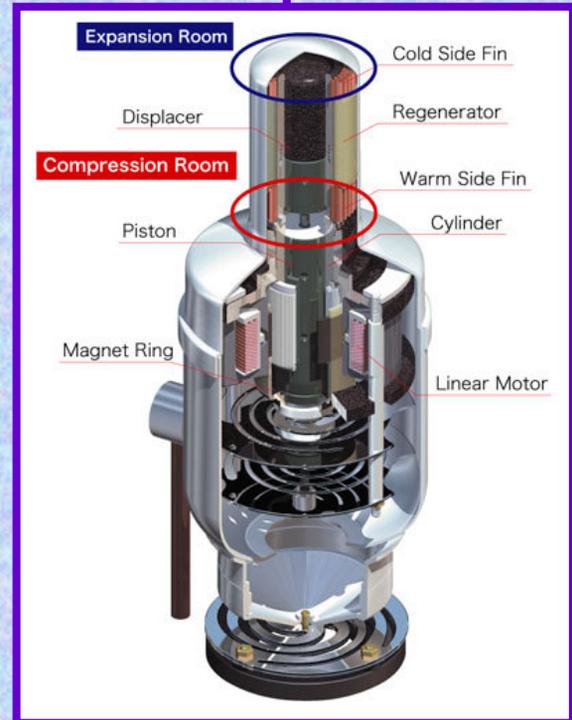


Ce système a été fabriqué par **CRYO** pour l'université de l'Alabama (contrat NASA).



**Free-Piston Stirling 55 W, Stirling Technology Company (STC) de Kennewick (1998)**

**Free-Piston Stirling Converter 10-350 W (1999)**



## SOLO Stirling 161



Gaz naturel ou gaz  
liquide

450 kg

**Biomasse**

Puissance électrique : **2-9.5 kWe**  
sous 400 V, 50 Hz.

Puissance thermique: **8-26 kW**

Efficacité électrique = **22-24%**

Rendement > **90 %**

Production d'eau chaude à **65°C**.



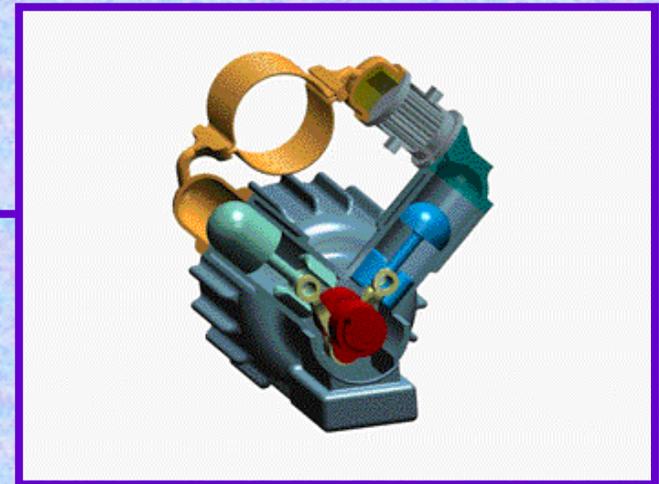
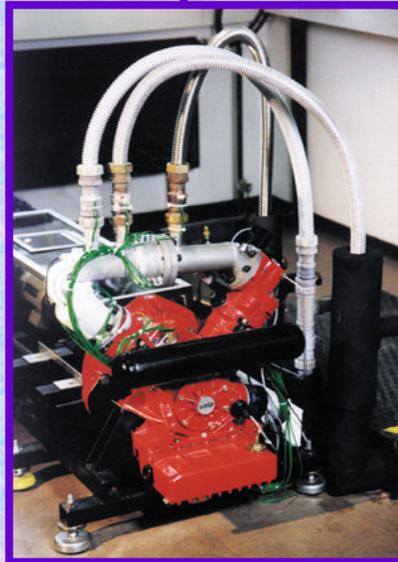
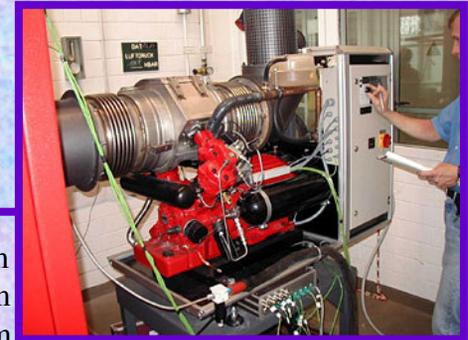
**Solaire**



Longueur: **1280mm**

Base: **700 mm**

Hauteur : **980 mm**



**Cogénérateurs : Réalisations SOLO (GER)**

## STM Power, Inc

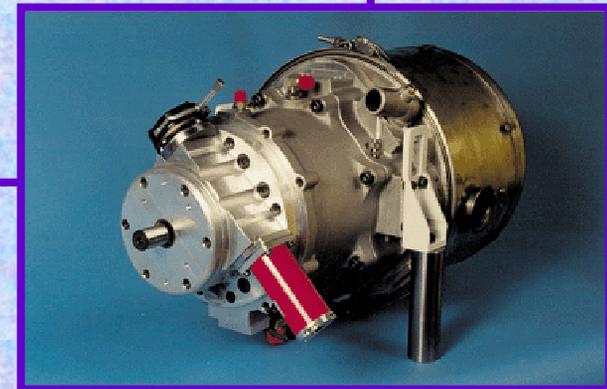
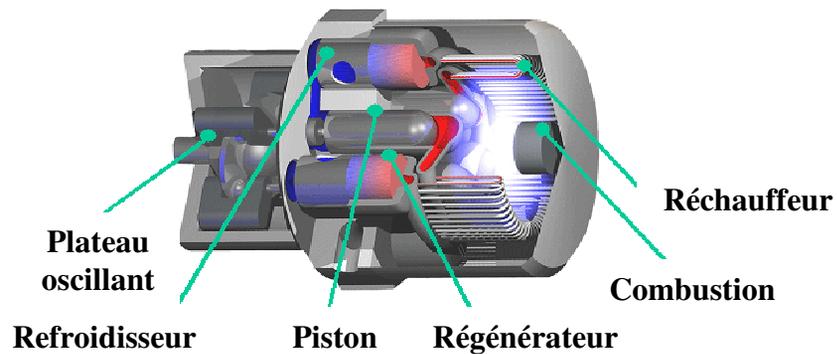
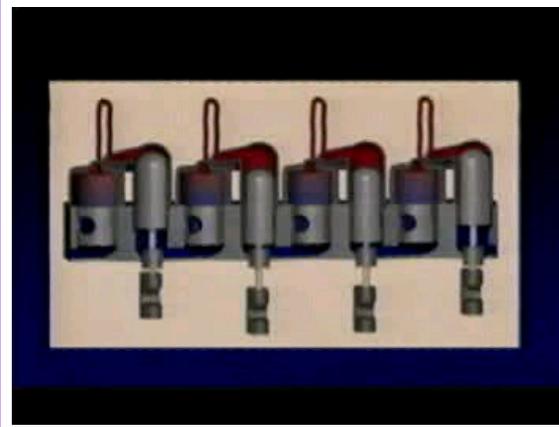
Longueur: 2590 mm  
Base: 1730 mm  
Hauteur : 860 mm



Puissance électrique : **55** kWe  
Efficacité électrique = **30**%  
Pollution sonore: **67** dB



**STM** prend des commandes maintenant pour ses unités évaluées à **55** kWe, pleine production commerciale au troisième trimestre 2005.



Cogénérateurs : STM Power (USA)

## Stirling Technology Company (STC) (1978) devient INFINIA Corporation (2003)



Vue éclaté Moteur Stirling pistons libres



Piston

- 2005 - Infinia fournit des unités énergétiques (55 W générateur radioisotope Stirling) à Lockheed Martin (commence en 2002).
- 2004 - Démonstration du premier Moteur Stirling Piston libres multi-cylindre.
- 2004 - Contrat avec l'armée pour développer des CHP pour équiper les cuisines.
- 2003 - Contrat de 23 millions de dollars afin de développer un moteur Stirling pour la NASA.
- 2000 - Mise en service d'un générateur de 1 kWe utilisant l'énergie solaire pour NREL (National Renewable Energy Laboratory).
- 1999-2002 - Infinia développe un générateur Stirling de 3 kWe pour Pennsylvania State University's Applied Research Laboratory.
- 1999-2001 - Infinia démontre le fonctionnement d'un générateur Stirling utilisant du fuel et de la biomasses pour DOE.
- 1999-2001 - Infinia développe un générateur Stirling 1 kWe pour de la cogénération résidentielle ENATEC's

Générateurs : Infinia (USA)

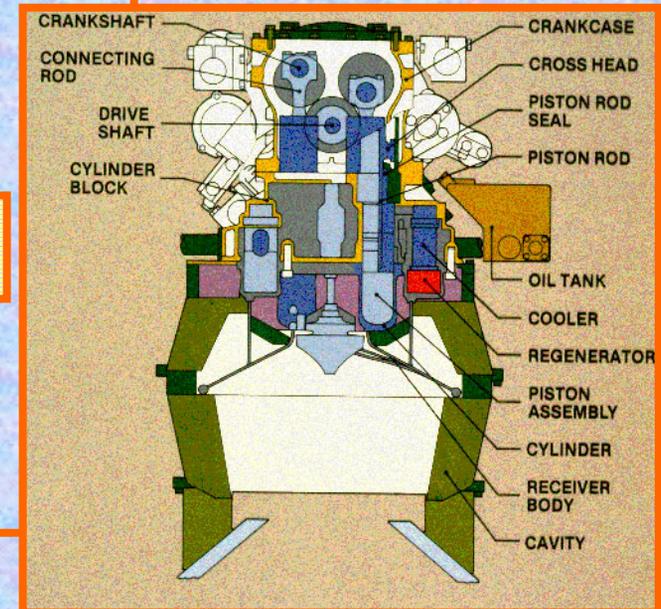
## Stirling Energy Systems (SES), Inc



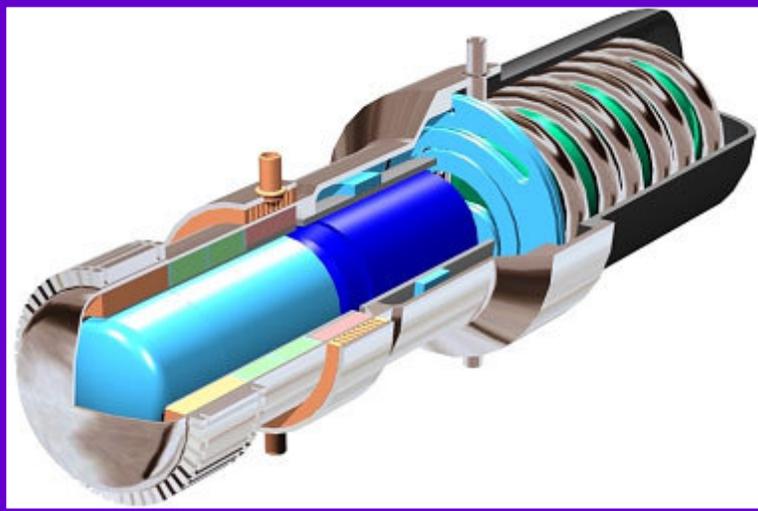
**(SES) Dish Stirling System**, Centre de recherche et développement au service de Boeing situé à Huntington Beach, en Californie.



**Moteur Stirling** transformant l'énergie solaire en puissance mécanique



Générateurs : SES (USA)

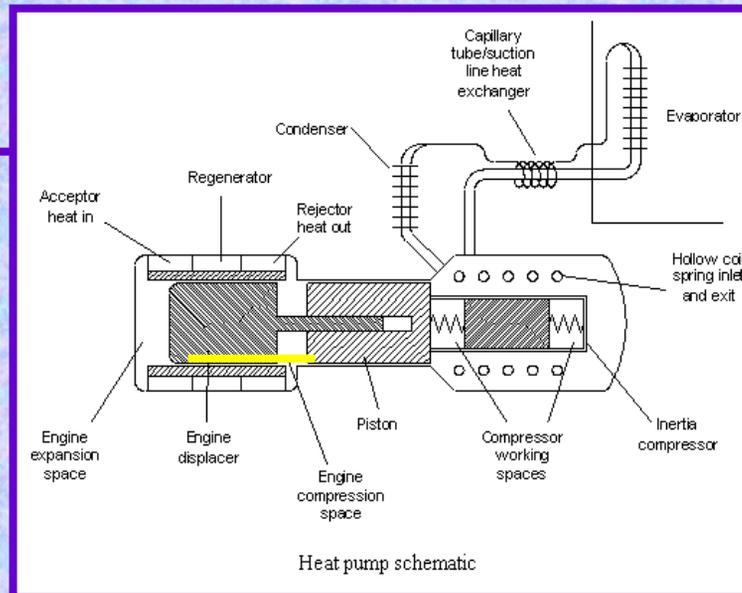


**Système Cryogénique**



**Démonstrateur  
moteur Stirling  
Piston libre Beale  
model B-10B**

**Hauteur: 25cm  
Diamètre de la base: 10 cm  
Diamètre du cylindre: 6 cm  
Puissance mécanique: 1 W**



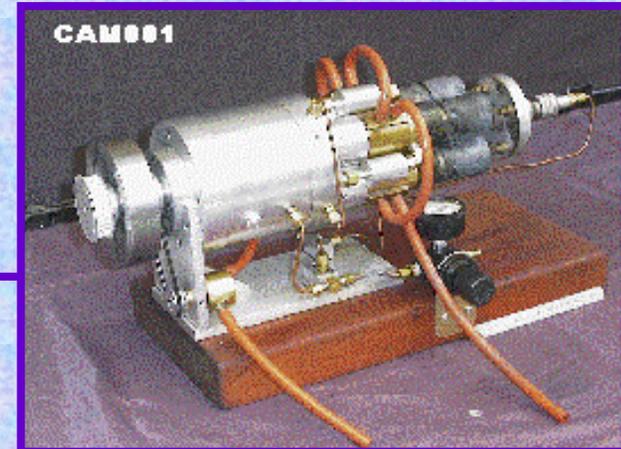
**Sunpower durée de vie  
M223 cooler- 51,429  
heures le 15 September  
2001.**

Créée en **1983** mais commence à avoir une activité commerciale en **2003**.

Moteurs développés:



TESE002 est un moteur Stirling constitué d'un seul cylindre ayant une transmission mécanique de type rhombique

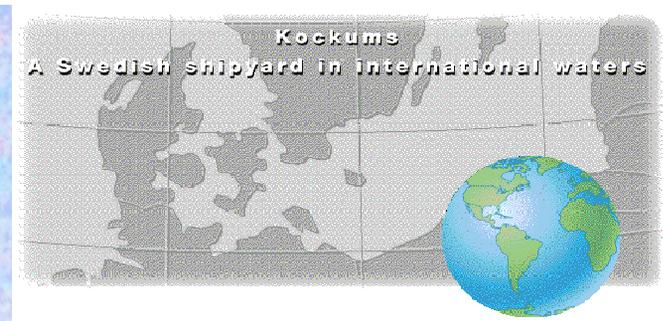


CAM001 est un moteur Stirling constitué de quatre cylindres employant un système de plateau oscillant.



CAM002,  
Générateur

Le Design du nouveau moteur-générateur (CAM002) est présenté. La section chaude se situant sur la gauche de l'illustration, la mécanique d'entraînement est sous la zone nommée Tamin et le générateur est encapsulé du côté droit.



**Kockum** développe depuis plus de 30 ans des moteurs Stirling. Actuellement ils continuent de participer à des projets civils et militaires

- **SAGA (milieu 80), un sous-marin.**
- **En 1988** la marine royale suédoise utilise des moteurs Stirling (sous-marin **Näcken**).
- Évolution du moteur qui est actuellement utilisé par les sous-marins de classe **Gotland**



**Moteur de sous marin**



AC WhisperGen

Dans un marché concurrentiel présenté par Powergen, Whispergen a récupéré un contrat de 550 cogénérateurs résidentiels de type AC.

Powergen : marché de 8 millions de consommateurs

Whispergen a obtenu les droits exclusifs de fournir des cogénérateurs aux consommateurs de WhisperGen.



AC WhisperGen

Juste deux mois après avoir annoncé une affaire de \$300 millions pour fournir les systèmes d'énergie résidentiels au R-U, l'unité 'WhisperGen technologie' a été choisie comme étant **'the world's largest residential 'combined heat and power' installations'**.



DC WhisperGen



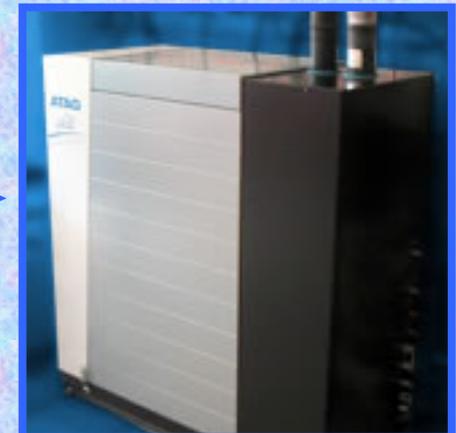
  
stirling systems



DTE



Enatech

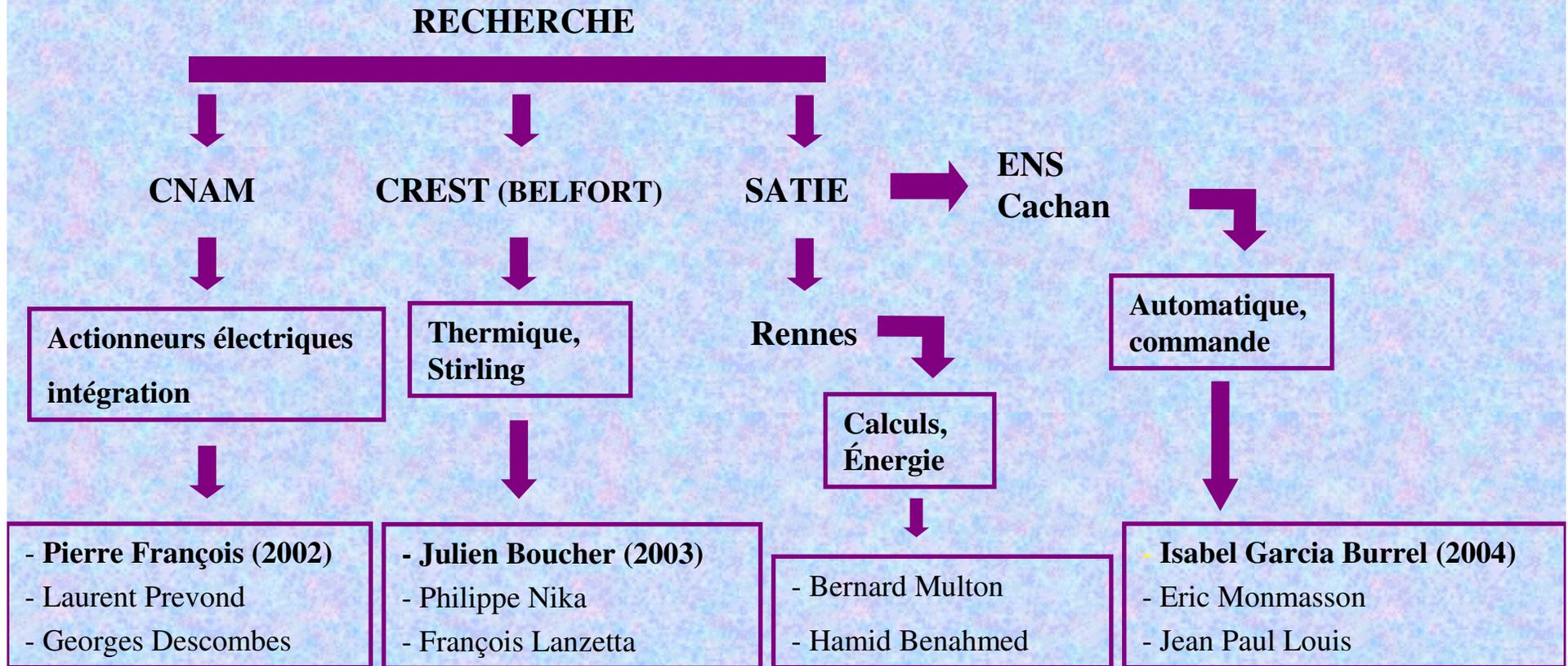


# 3- Thèse Stirling Pistons libres

- Direction : **Philippe NIKA, Professeur des Universités**
- Co direction : **François LANZETTA, Maître de Conférences**
- Doctorant : **Julien BOUCHER (2003 – 2006)**

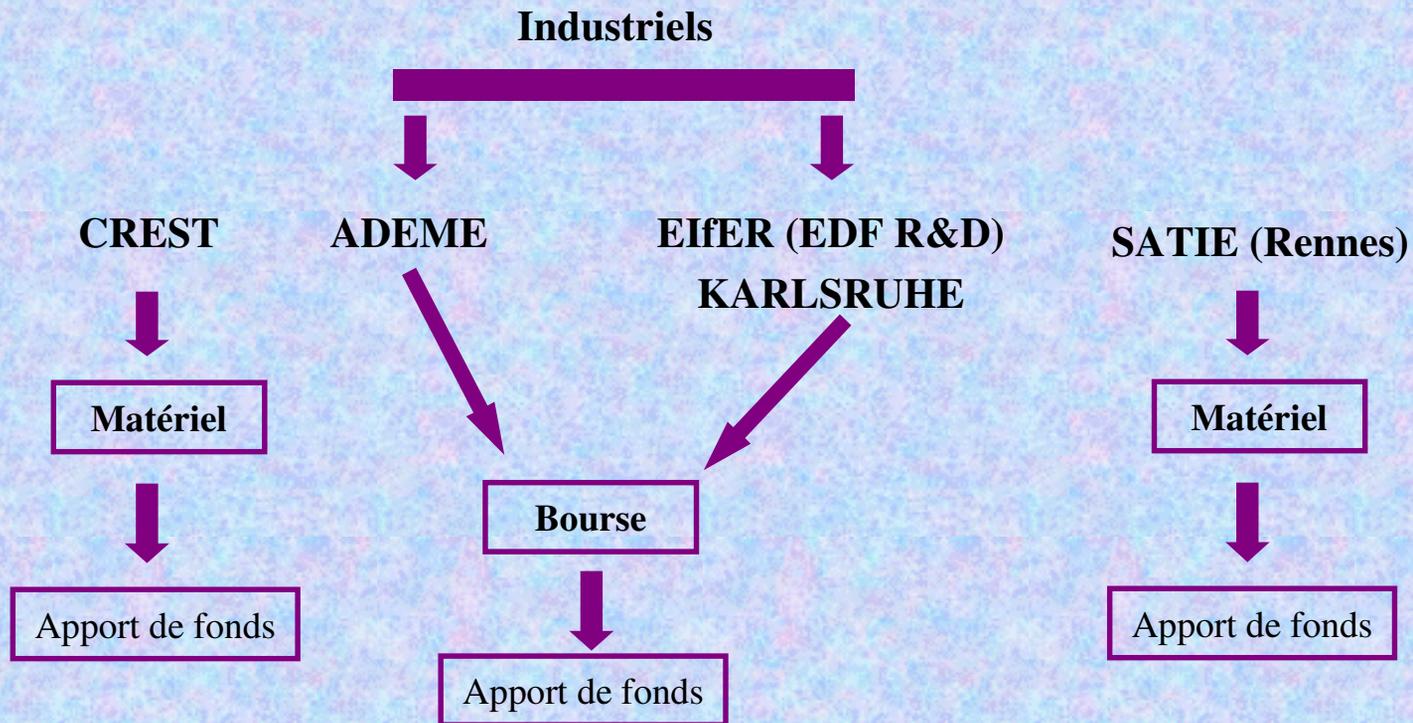
## Cogénérateur Stirling

### Les participants :

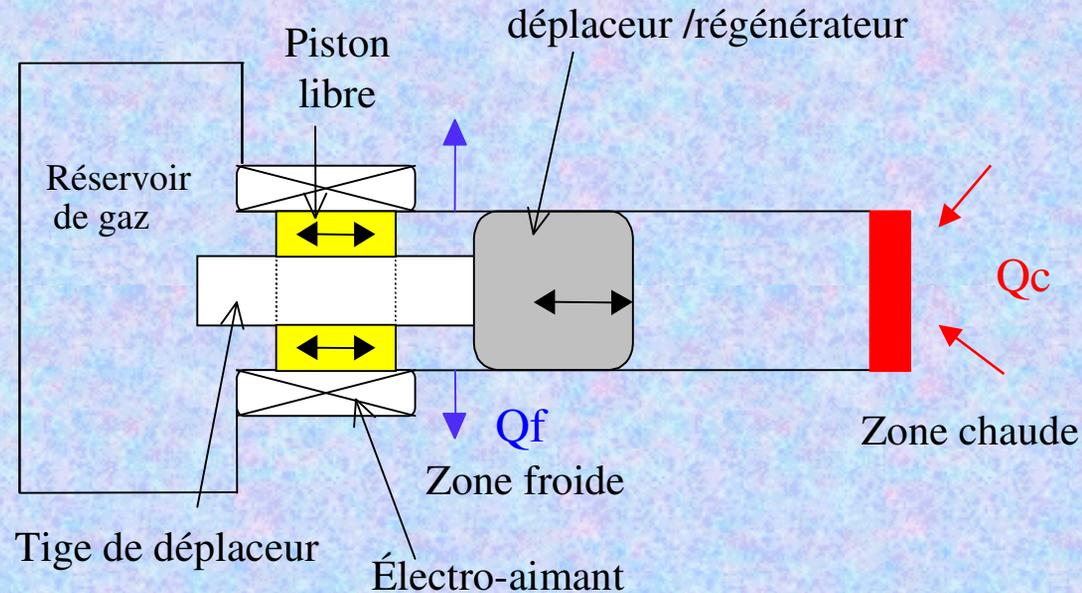


## Cogénérateur Stirling

### Les participants :



## Principe de fonctionnement d'un moteur Stirling à pistons libres



Entièrement **étanche** vis à vis du milieu extérieur

**Simplicité** mécanique : pas de liaisons

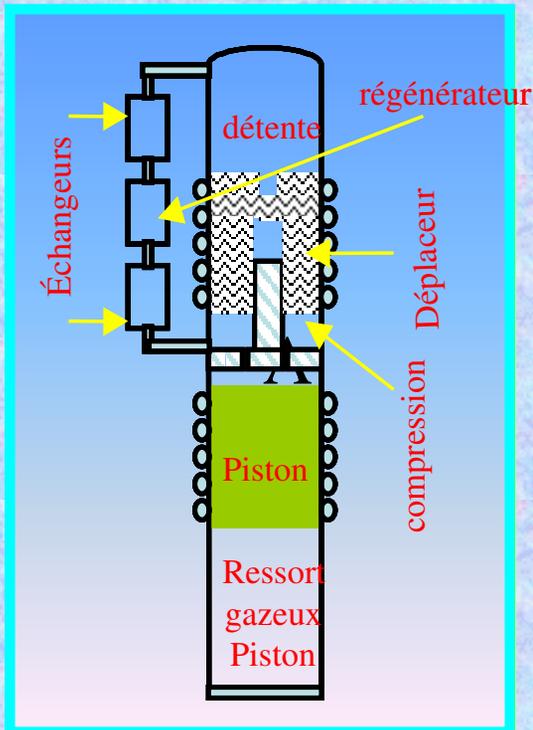
**Adaptation à toutes les sources d'énergie** (Source externe)

**Réglage de la puissance facilité**

**Machine silencieuse, « écologique », miniaturisation, cycle réversible (frigo)**

## Le modèle dynamique (sous forme matricielle) :

Modélisation du comportement dynamique du Moteur de Stirling à Pistons Libres (MSPL) en fonction de la répartition désirée entre la production d'énergie électrique et la production d'énergie thermique.



## Moteurs Stirling pistons libres simple effet

$$[\ddot{y}] = \begin{bmatrix} \ddot{y}_p \\ \ddot{y}_d \end{bmatrix} = [K][y] + [D][\dot{y}]$$

Matrice d'influence:

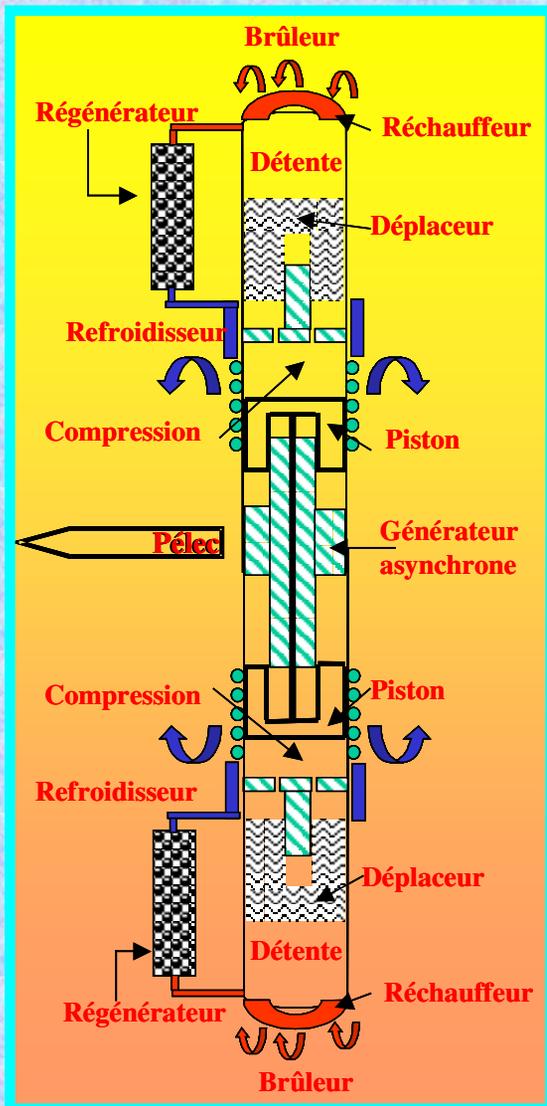
$$[K] = \begin{bmatrix} K_{pp} & K_{pd} \\ K_{dp} & K_{dd} \end{bmatrix}$$

Matrice dissipation:

$$[D] = \begin{bmatrix} D_{pp} & D_{pd} \\ D_{dp} & D_{dd} \end{bmatrix}$$

[K] = Matrice des raideurs équivalentes

[D] = Matrice des coefficients de dissipation visqueuse



## Moteurs Stirling Dual

$$[\ddot{y}] = \begin{bmatrix} \ddot{y}_p \\ \ddot{y}_{d1} \\ \ddot{y}_{d2} \end{bmatrix} = [K][y] + [D][\dot{y}] + [F(t)]$$

Forces externes  
(commande,  
pilotage)

Matrice d'influence:

$$[K] = \begin{bmatrix} K_{pp} & K_{pd1} & K_{pd2} \\ K_{d1p} & K_{d1d1} & K_{d1d2} \\ K_{d2p} & K_{d2d1} & K_{d2d2} \end{bmatrix}$$

Matrice dissipation:

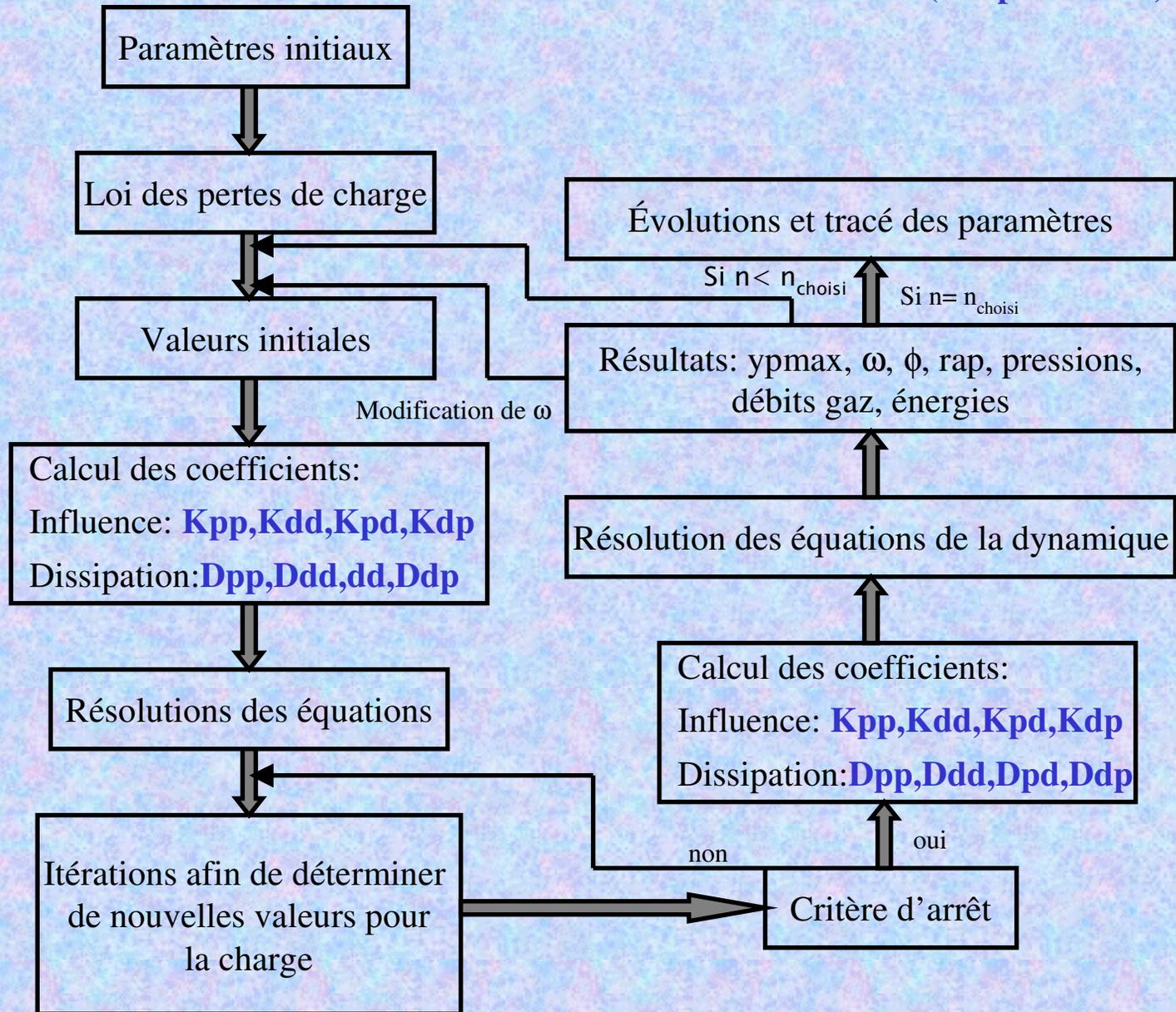
$$[D] = \begin{bmatrix} D_{pp} & D_{pd1} & D_{pd2} \\ D_{d1p} & D_{d1d1} & D_{d1d2} \\ D_{d2p} & D_{d2d1} & D_{d2d2} \end{bmatrix}$$

[K] = Matrice des raideurs équivalentes

[D] = Matrice des coefficients de dissipation visqueuse

*Dispositif de génération électrique avec piston double effet*

# Organigramme de déroulements des Calculs: (Simple et dual)



## Validation de la modélisation : moteur Stirling simple effet

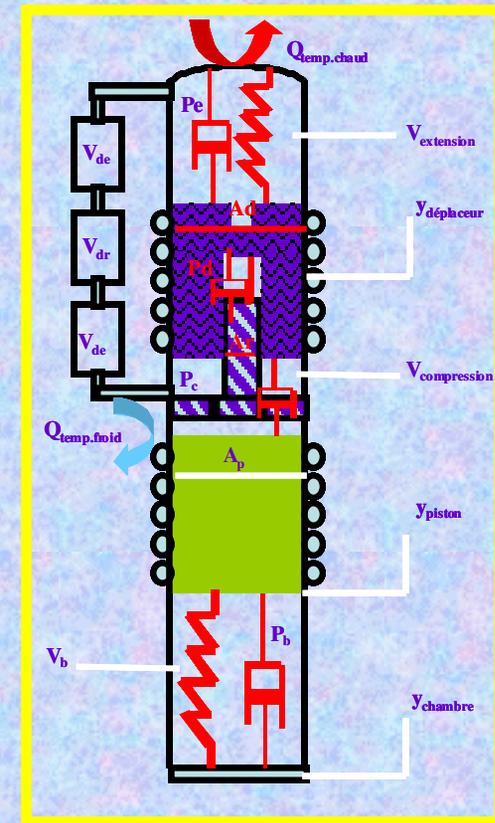
Le moteur Sunpower EG-1000 a été utilisé pour valider le prédimensionnement

Diamètre du piston	$d_p = 57,19$ mm
Diamètre de la tige du ressort gaz du déplaceur	$d_r = 16,645$ mm
Diamètre du déplaceur	$d_d = d_p$
Masse du piston	$m_p = 6,2$ kg
Masse du déplaceur	$m_d = 0,426$ kg
Hauteur de l'espace de compression au repos	$y_{pc} = 18,3$ mm
Hauteur du volume tampon piston au repos	$1,018$ m
	(équivalent pour $d_p$ )
Hauteur de la chambre de détente au repos	$y_{de} = 18,61$ mm

Volume de l'échangeur chaud	$V_h = 27,32$ cm <sup>3</sup>
Volume de l'échangeur froid	$V_k = 20,42$ cm <sup>3</sup>
Volume du régénérateur	$V_{reg} = 56,37$ cm <sup>3</sup>
Porosité du régénérateur	por = 0,65

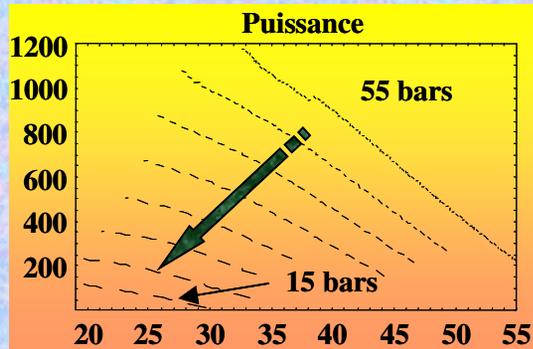
Gaz hélium $r = 2080$ J/kgK	$c_p = 5183$ J/kg.K	$\gamma = 1,667$
	$\mu = 1,8 \cdot 10^{-5}$ Pl	

Pression de gonflage à froid	$P_{gonf} = 47$ bar
Pression moyenne en fonction	$P_i = 71$ bar
Température zone de détente	$T_h = 814$ K
Température zone de compression	$T_k = 323$ K

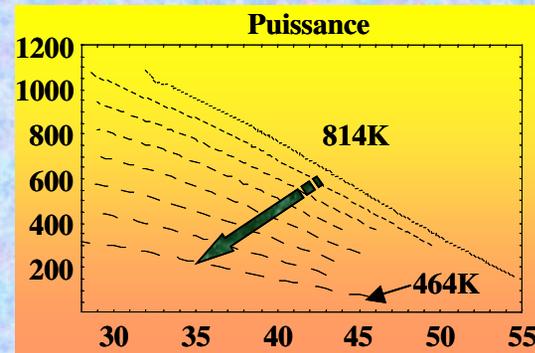


**Modèle  
thermomécanique SPL**

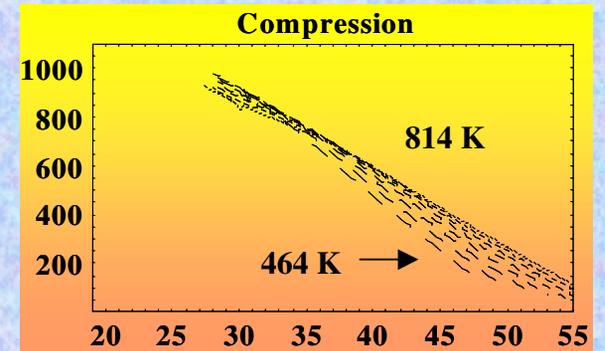
## Étude paramétrique



Influence de la pression de gonflage sur la puissance mécanique [W] en fonction de la fréquence [Hz]



Influence de la température de source chaude (palier 50°C) sur la puissance mécanique [W] en fonction de la fréquence [Hz]



Influence de la température de source chaude (palier 50°C) sur la quantité de chaleur [W] à refroidir par le refroidisseur en fonction de la fréquence [Hz]

- La **pression de gonflage** et la **température** de la source chaude déterminent la **puissance produite**, la **fréquence** de fonctionnement ainsi que la **course des déplaceurs**.
- Le **déphasage** et l'**amplitude de course** dépendent de la **pression**.
- La **production électrique** varie de manière plus ou moins linéaire selon la gamme de **fréquence** choisie.

# Influence de la pression de gonflage sur le déplaceur non piloté et piloté

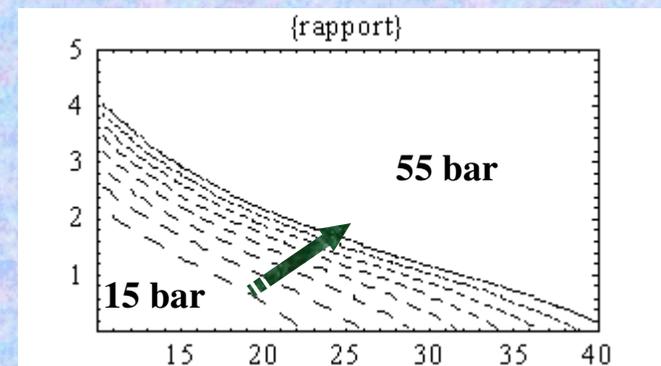
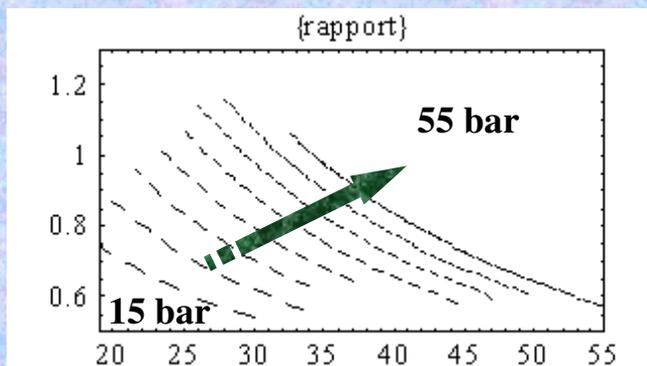
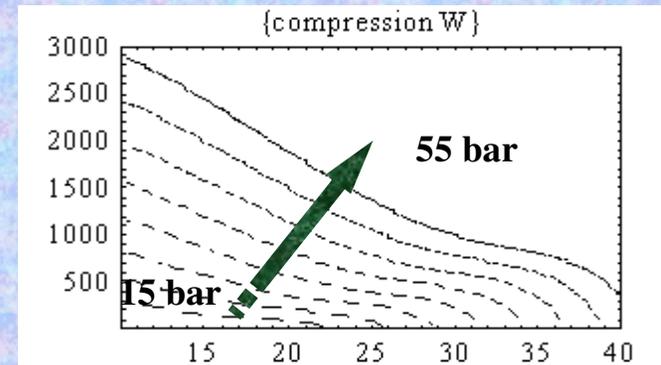
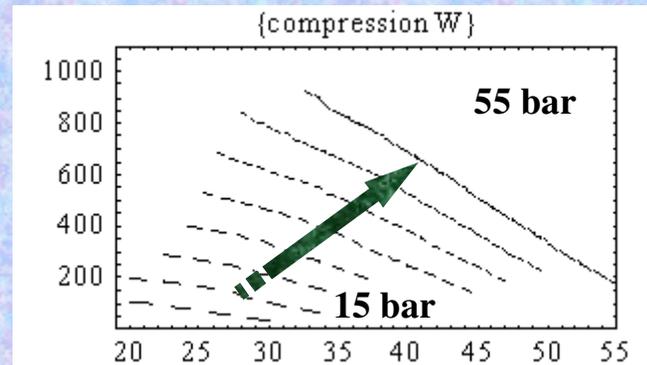
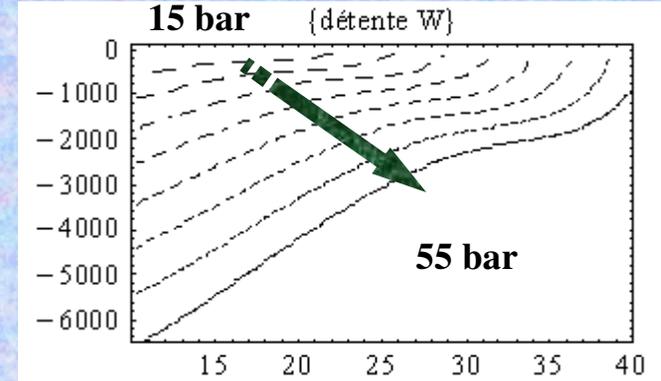
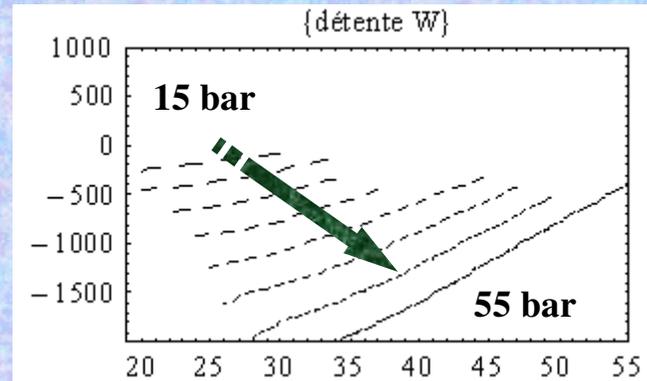
**Non piloté**

**piloté**

Nous avons une fréquence de fonctionnement plus basse

Récupération de la chaleur par la boucle de cogénération

Rapport de déplacement  $y_d/y_p$  se situe entre 0,5 et 2



# Influence de la pression de gonflage sur le déplaceur non piloté et piloté

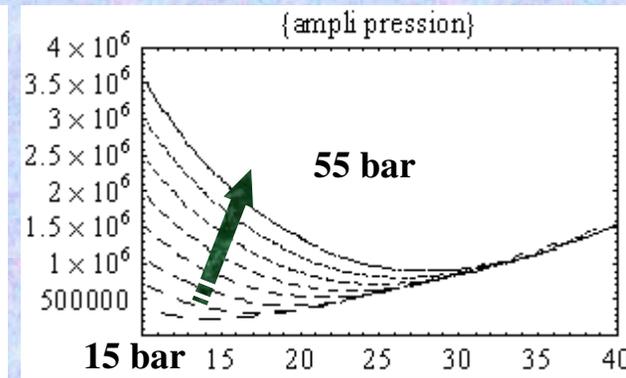
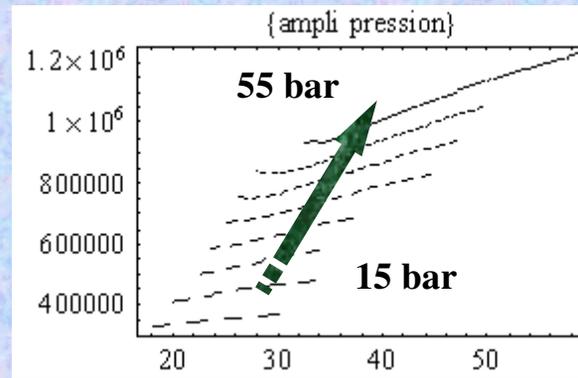
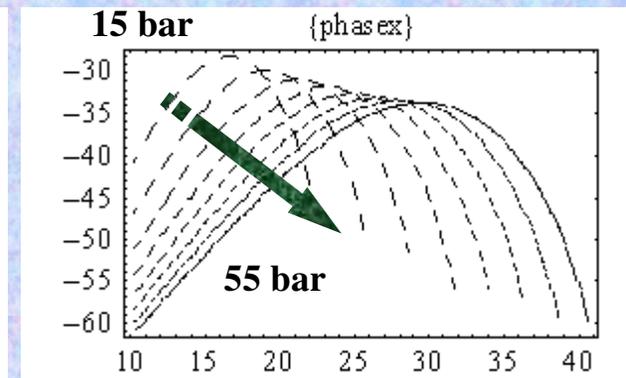
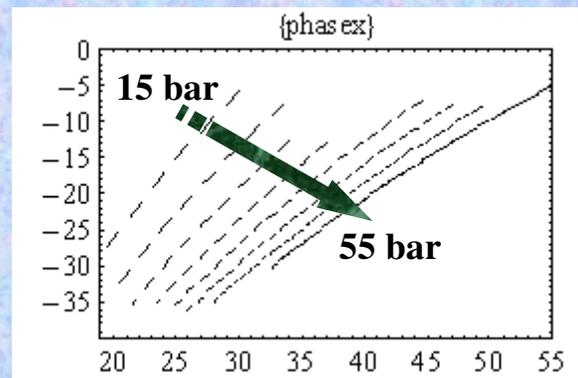
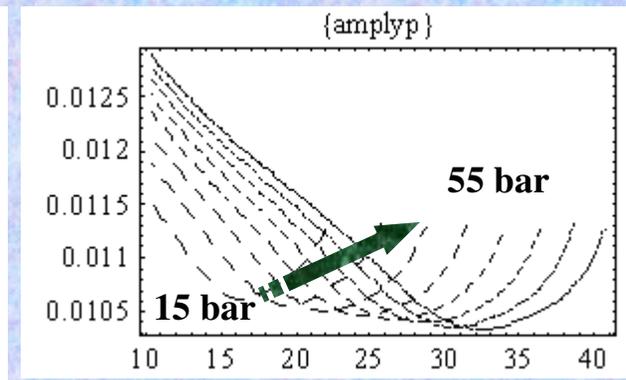
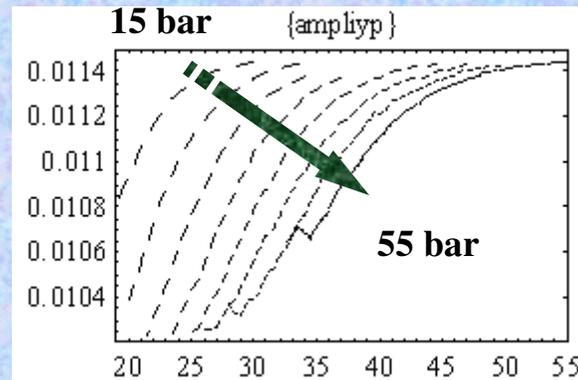
**Non piloté**

**piloté**

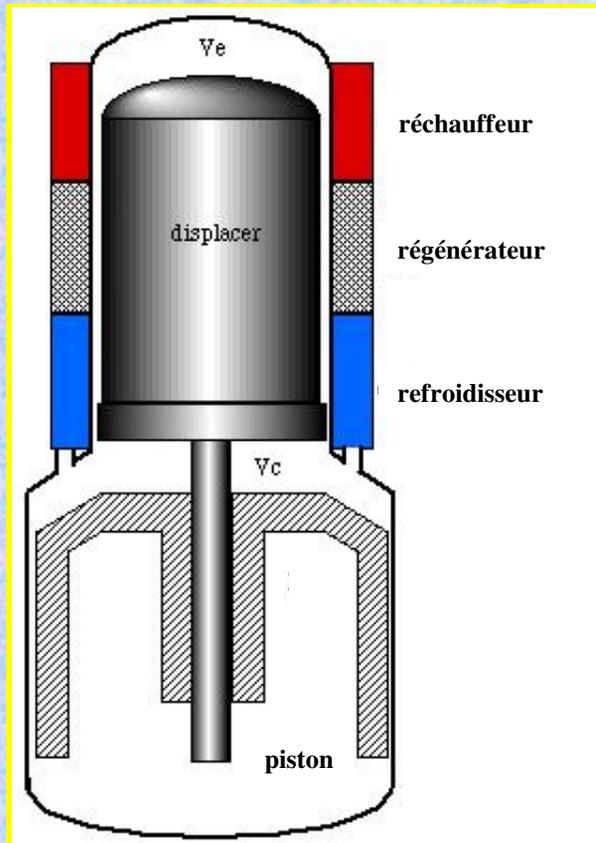
Nous avons une diminution de la fréquence de fonctionnement lorsque le déplaceur est piloté

Rapprochement du déphasage optimum lorsque le déplaceur est piloté

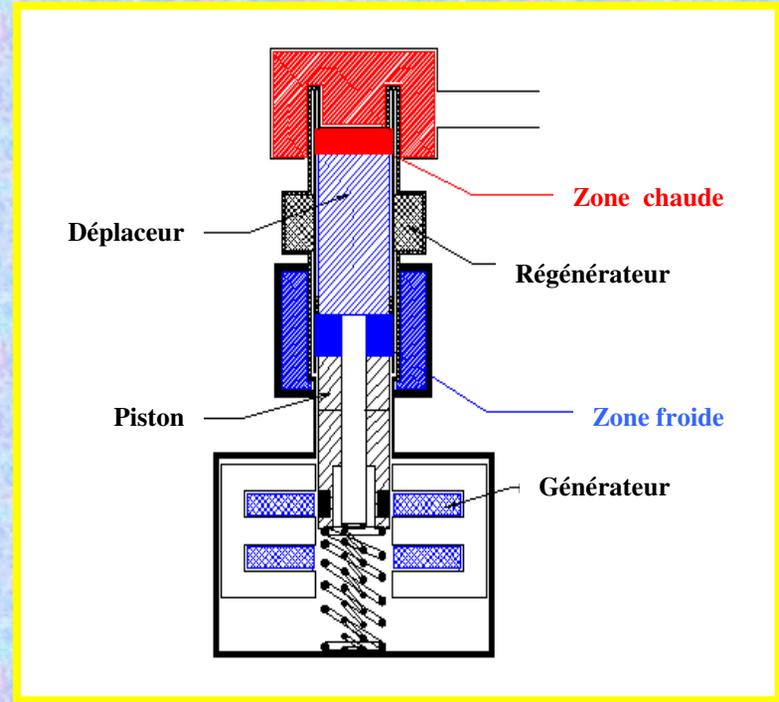
Augmentation de l'amplitude de pression



## Schéma Piston Libre Simple Effet

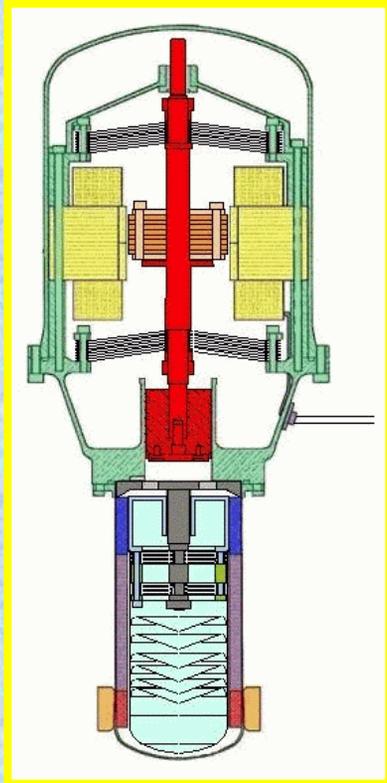


Les joints d'étanchéité permettent de maintenir le piston en lévitation



Ressort gazeux = Ressort mécanique

## Animation Piston Libre Simple Effet



**Moteur Stirling en position  
Horizontal**

## Démonstrateur moteur Stirling Piston libre Beale model B-10B

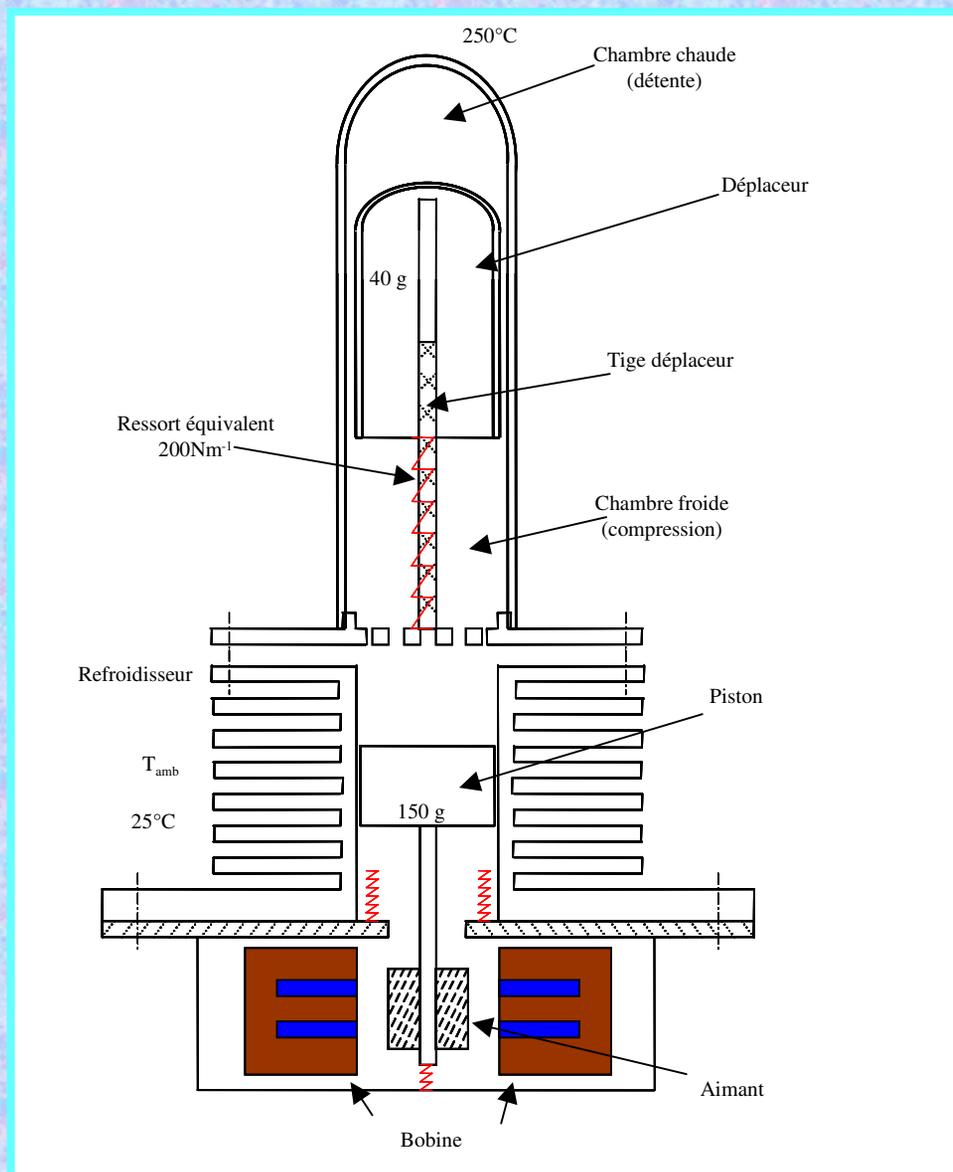


**Hauteur: 25cm**  
**Diamètre de la base: 10 cm**  
**Diamètre du cylindre: 6 cm**  
**Puissance mécanique: 1 W**

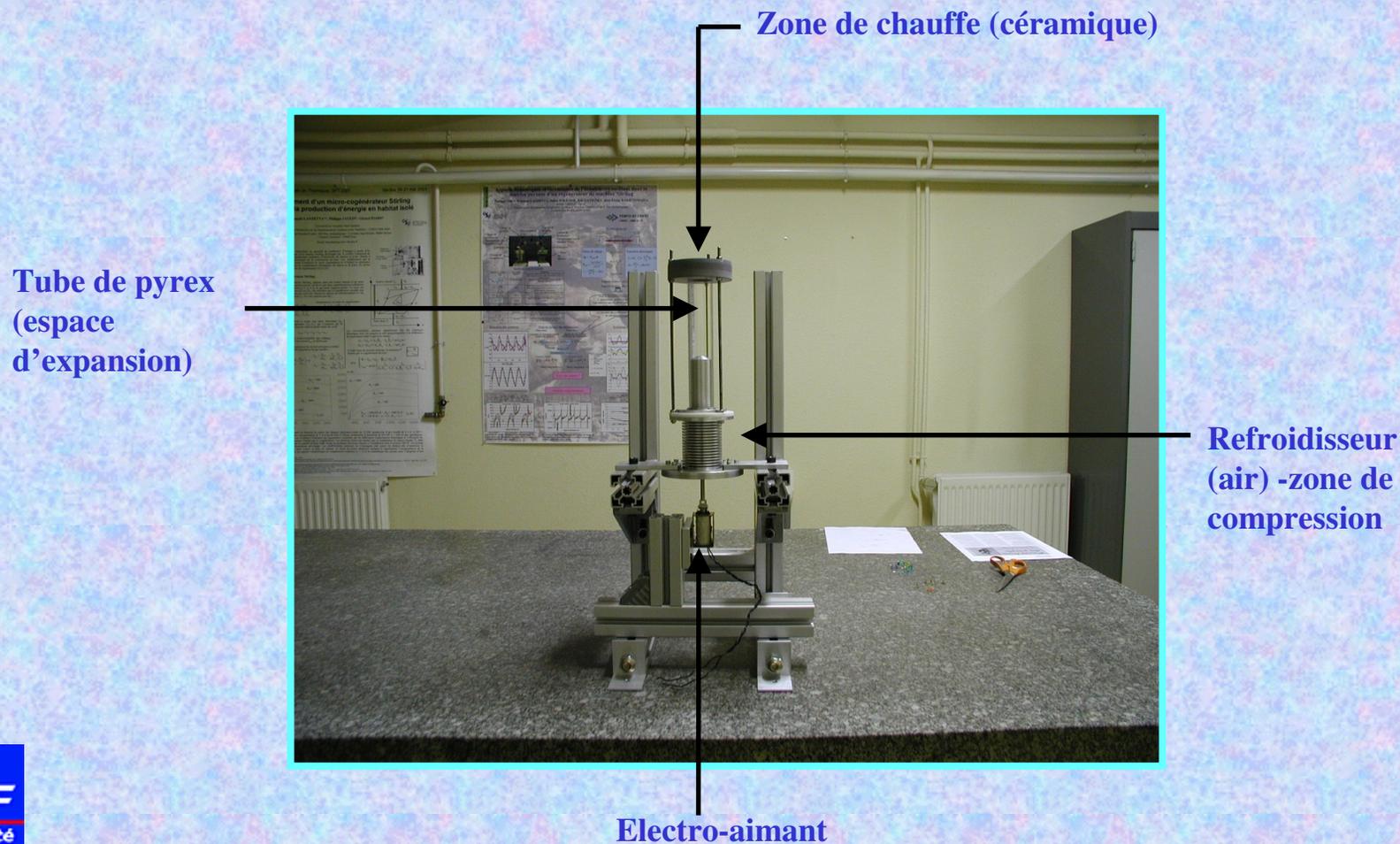
## Plans de la Maquette (100% CREST) moteur Stirling pistons libres simple effet

Diamètre du piston:  $d_p = 30 \text{ mm}$   
Masse du piston  $m_p = 150 \text{ g}$   
Masse du déplaceur  $m_d = 40 \text{ g}$   
Pression de gonflage  $P_g = 101325 \text{ Pa}$   
Température Chaude  $T_c = 650 \text{ K}$   
Température Froide  $T_f = 450 \text{ K}$

Fréquence de fonctionnement: 17 à 19 Hz  
en régime stabilisé

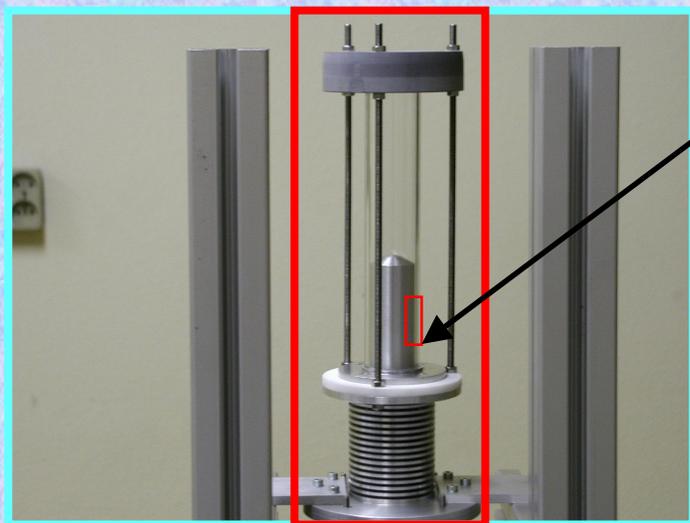


## Maquette (100% CREST) moteur Stirling pistons libres simple effet



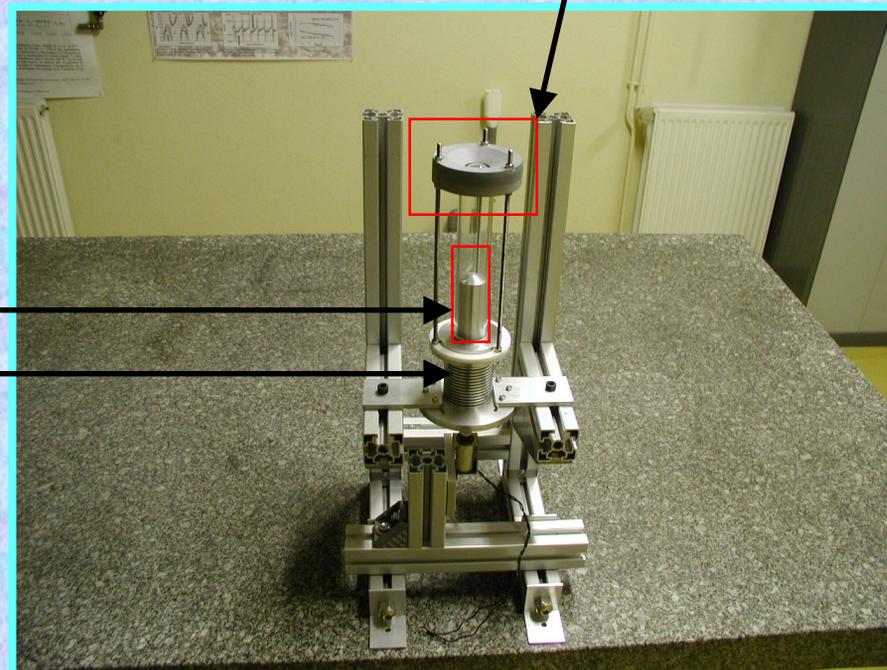


## Maquette (100% CREST) moteur Stirling pistons libres simple effet



Régénérateur (espace vide  
entre paroi pyrex et le déplaceur)

Moteur Stirling pistons libres



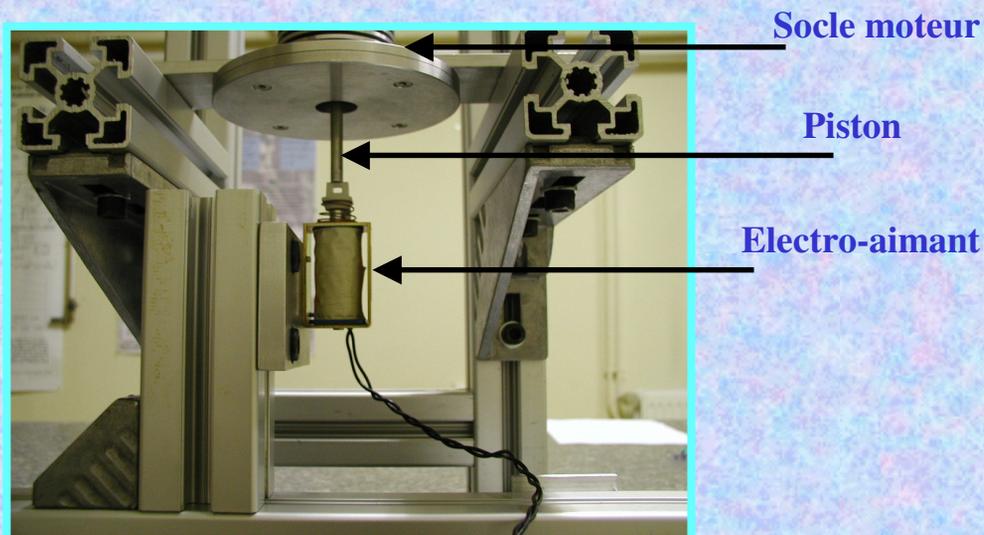
Zone de Chauffe

Déplaceur

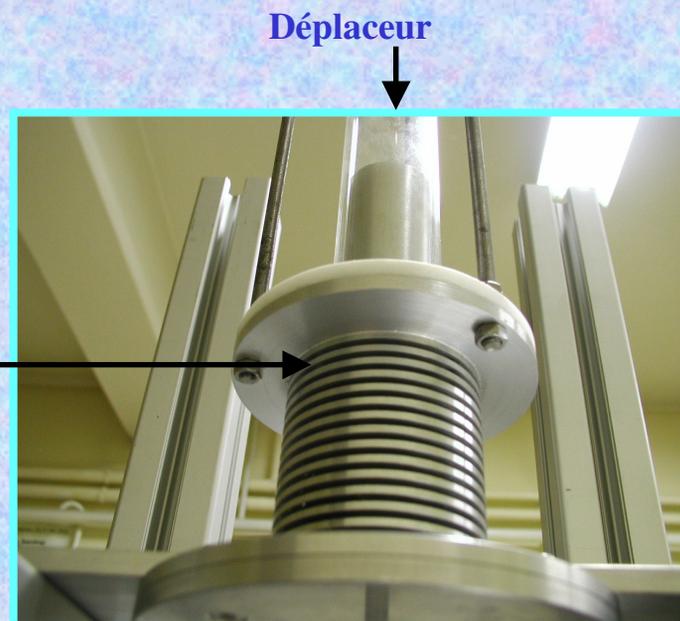
Refroidisseur avec  
piston à l'intérieur



## Maquette (100% CREST) moteur Stirling pistons libres simple effet

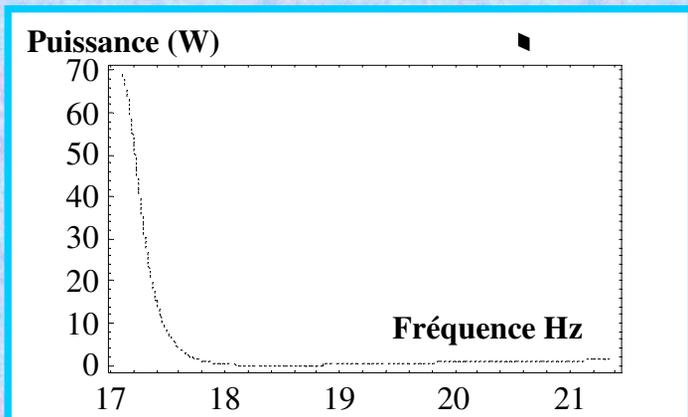


Refroidisseur avec  
piston à l'intérieur

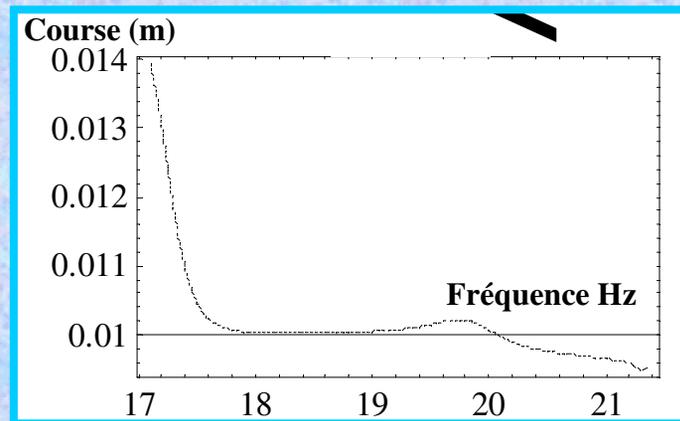


Modélisation maquette (**100% CREST**)  
moteur Stirling pistons libres simple effet

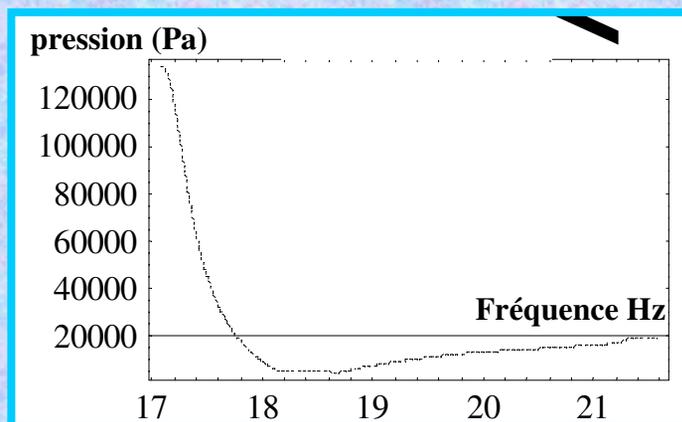
## Résultats



Puissance mécanique fournie (W) en fonction de la fréquence (Hz)



Course du piston (m) en fonction de la fréquence (Hz)



Amplitude de pression (Pa) en fonction de la fréquence (Hz)

**Maquette (100% CREST)**  
**moteur Stirling pistons libres simple effet**



**Fréquence de fonctionnement: 17 à 19 Hz**  
**en régime stabilisé**

## Conclusions

### Contexte économique:

La **cogénération Stirling** est présente aux **États-Unis**, en **Nouvelle Zélande**, au **Japon**, en **Allemagne**, en **Suède**.

Pas de société **Française** qui développe ou commercialise un cogénérateur Stirling.

### Premiers résultats:

- Les premiers essais sont **encourageants**.
- Fréquence de battement de l'électro-aimant (directement lié au piston) **17 Hz à 19 Hz**.
- Puissance électrique de **l'ordre du watt**.

### Phases de la thèse:

- Modélisation de prédimensionnement,
- Calage des modèles à partir des moteurs sur le marché (Sunpower EG-1000)
- Fabrication du prototype A (maquette),
- Mise en place de l'instrumentation (capteurs de pression, microthermocouples....)
- Développement d'une méthode de mesure dynamique de la vitesse des gaz (ASME 2006, Italie),
- Fabrication du prototype B (instrumenté et amélioré),
- Étude expérimentale,
- Comparaisons des résultats expérimentaux avec la modélisation.
- Soutenance (Octobre-Décembre 2006)

**Fin de la présentation**