



# Optimisation d'une motorisation Stirling pour la production d'électricité de faible puissance

**Hakeem Khirzada, Steve Djetel-Gothe, François Lanzetta,  
Didier Chamagne, Philippe Nika, Didier Marquet<sup>1</sup>**

Institut FEMTO-ST, UMR 6174, Département ENERGIE  
2 avenue Jean Moulin 90000 Belfort

<sup>1</sup> ORANGE Labs – IMT/OLN  
38-40, rue du Général-Leclerc 92794 Issy Moulineaux Cedex 9

# Sommaire

- 1 - Introduction
- 2 - Modélisation
- 3 - Conception & Optimisation
- 4 - Expérimentation
- 5 - Conclusion et perspectives

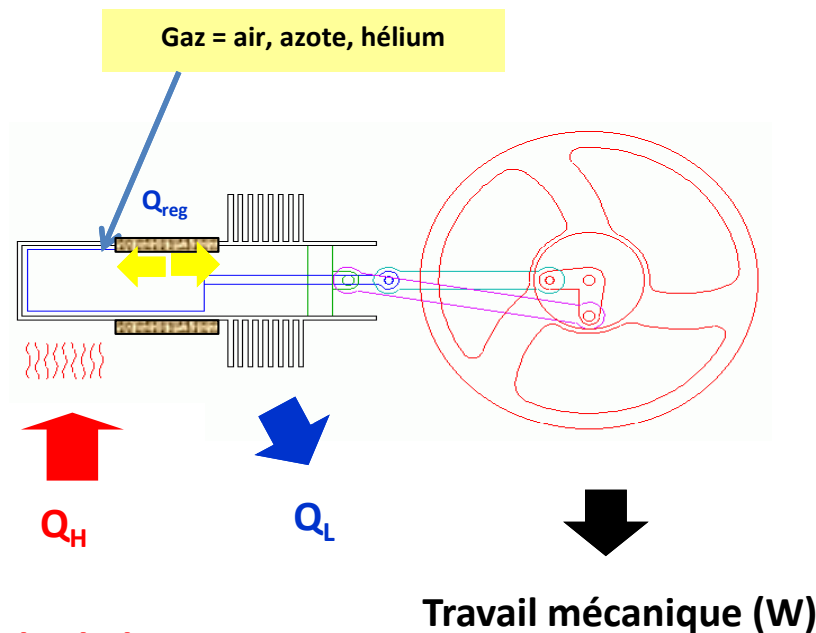


# 1- Introduction

## Moteur Stirling : Objectifs et fonctionnement

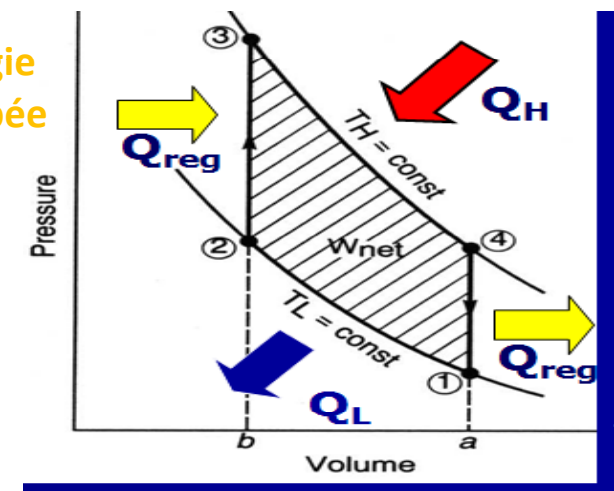
### Objectifs :

- ❑ Caractériser le Moteur Stirling (apport de chaleur externe)
- ❑ Challenge : obtenir une « petite » machine thermique robuste
- ❑ Produire de l'électricité ( quelques dizaines de W → 100W)



Apport de chaleur :  
soleil, gaz, bois ...

l'énergie  
absorbée



l'énergie  
rejetée

$$\eta = 1 - \frac{T_{min}}{T} = \eta_{Carn}$$

T1 : température minimum du cycle  
T3 : température maximum du cycle

## 2- Modélisation : **Modèle- 5 volumes adiabatique**

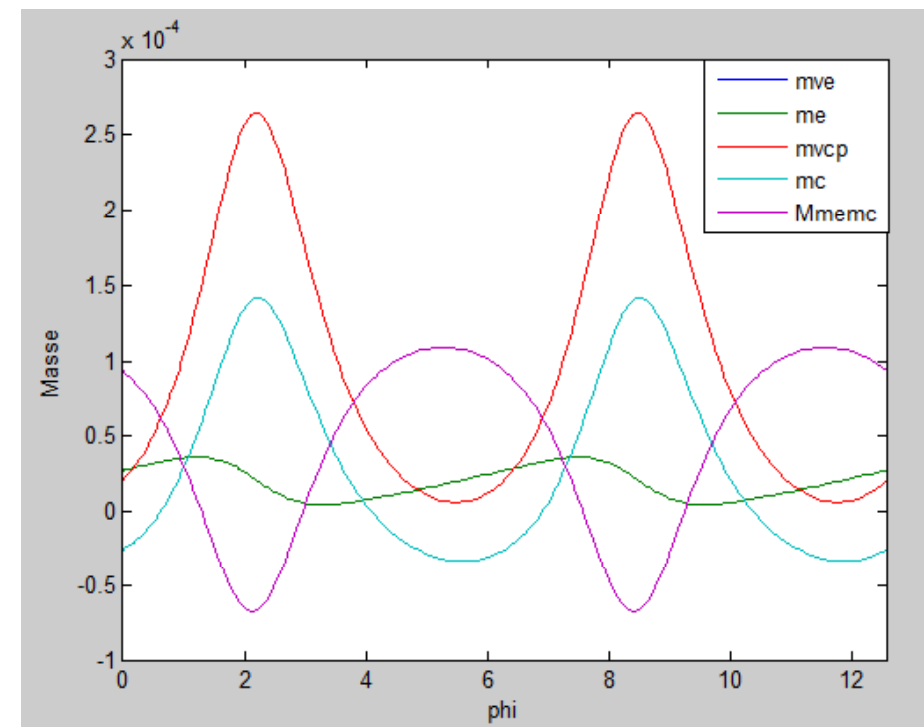
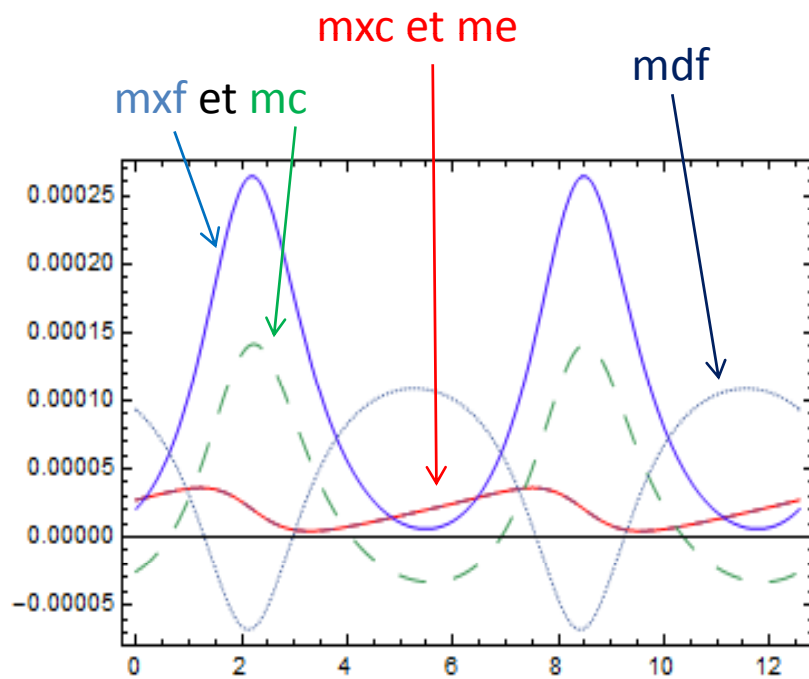
$m_c$  = masse du gaz de travail côté compression

$m_e$  = masse du gaz de travail côté détente

$m_{xc}$  = masse du volume mort côté échangeur chaud ( $m_{ve}$ )

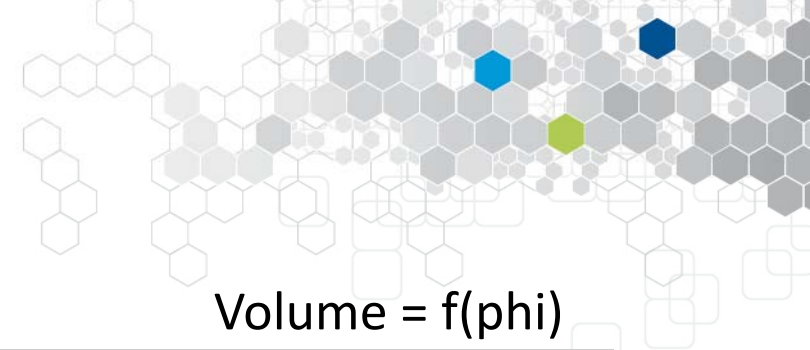
$m_{xf}$  = masse du volume mort côté échangeur froid ( $m_{vcp}$ )

$m_{df}$  = masse totale moins masse de détente et de compression ( $M_{memc}$ )



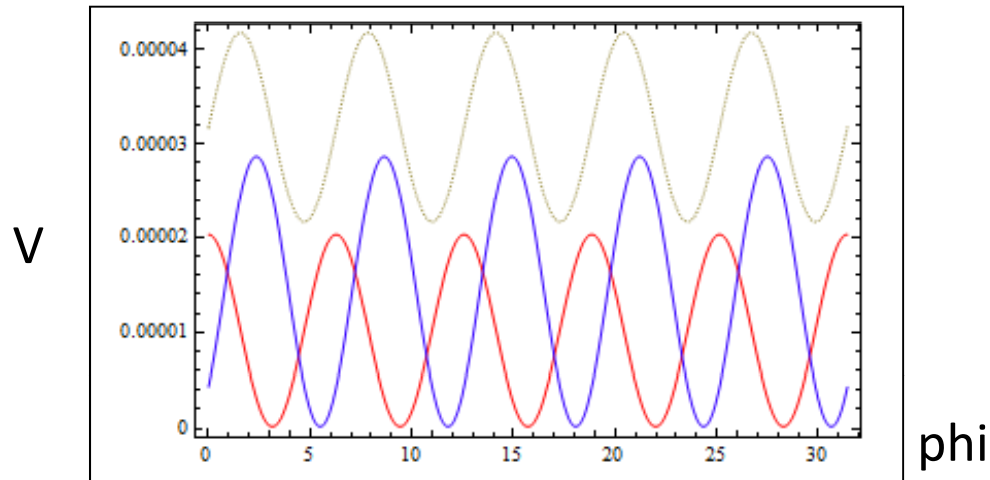
## 2- Résolutions :

## Modèle- 5 volumes adiabatique

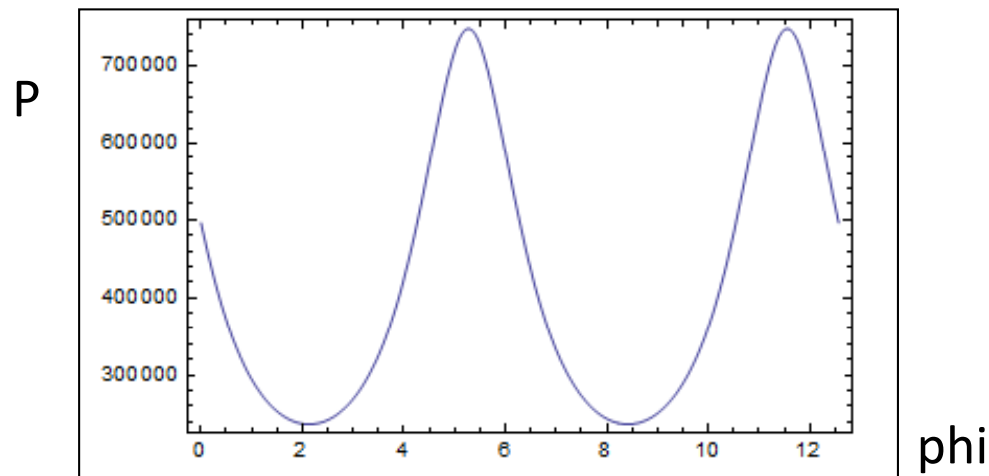


Mathematica

Volume =  $f(\phi)$

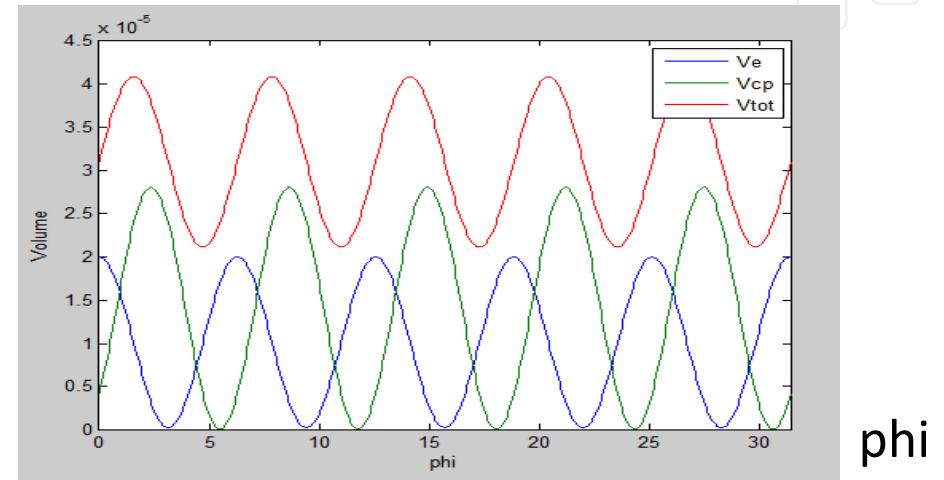


Pression =  $f(\phi)$

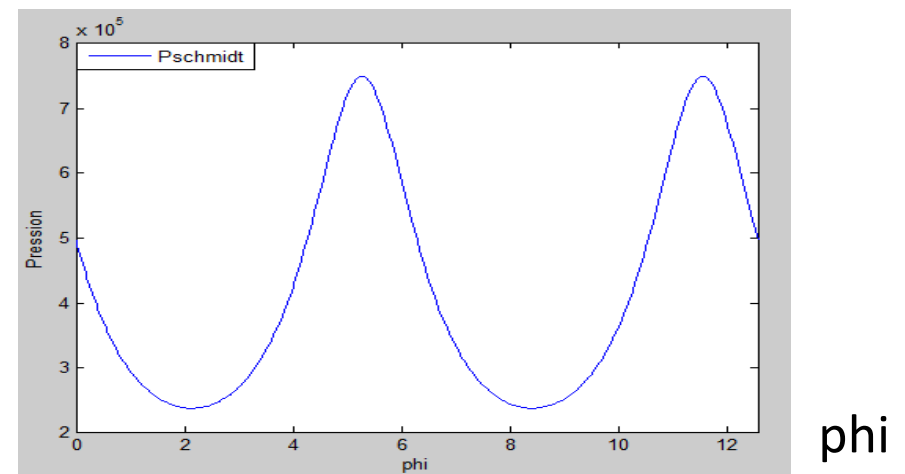


Matlab

Volume =  $f(\phi)$

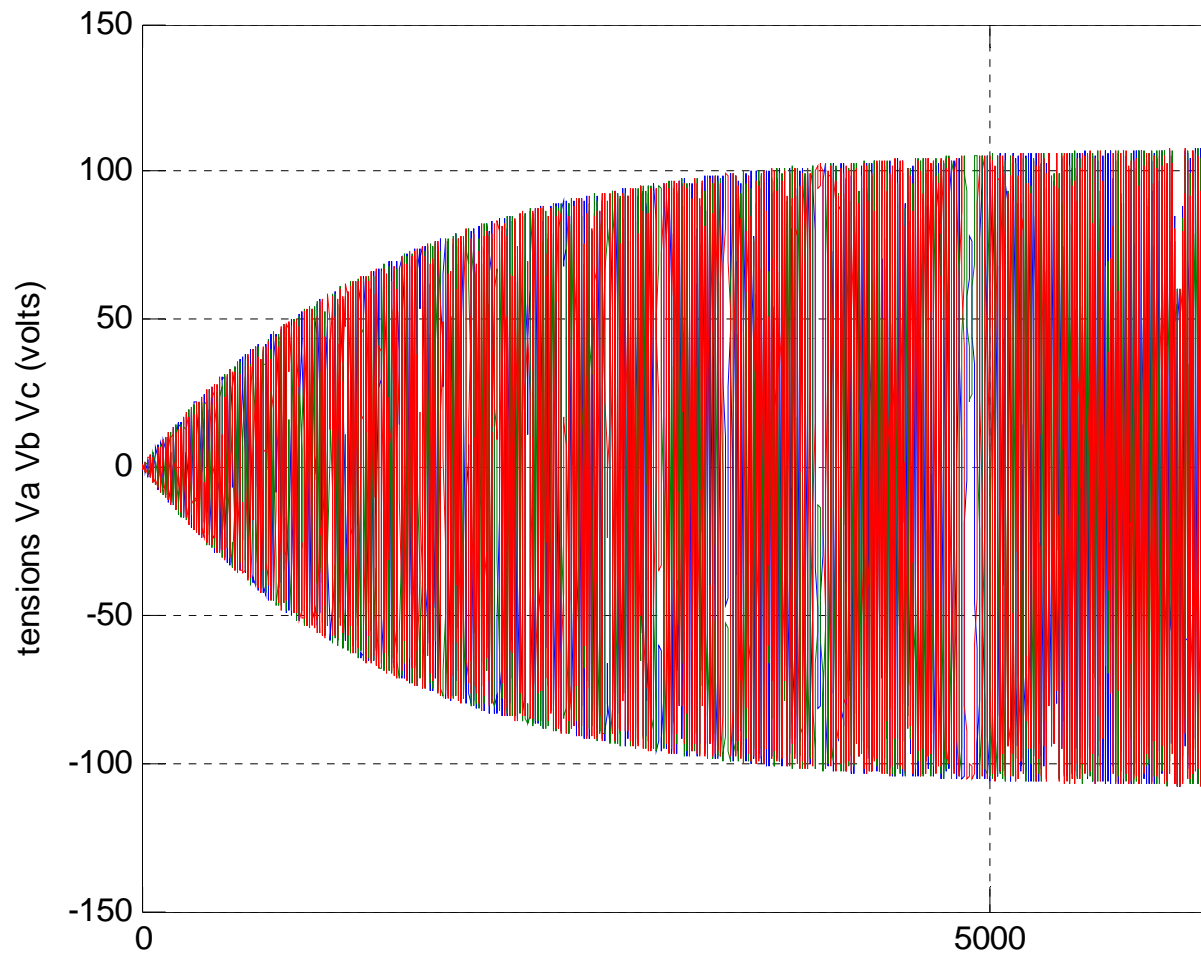


Pression =  $f(\phi)$



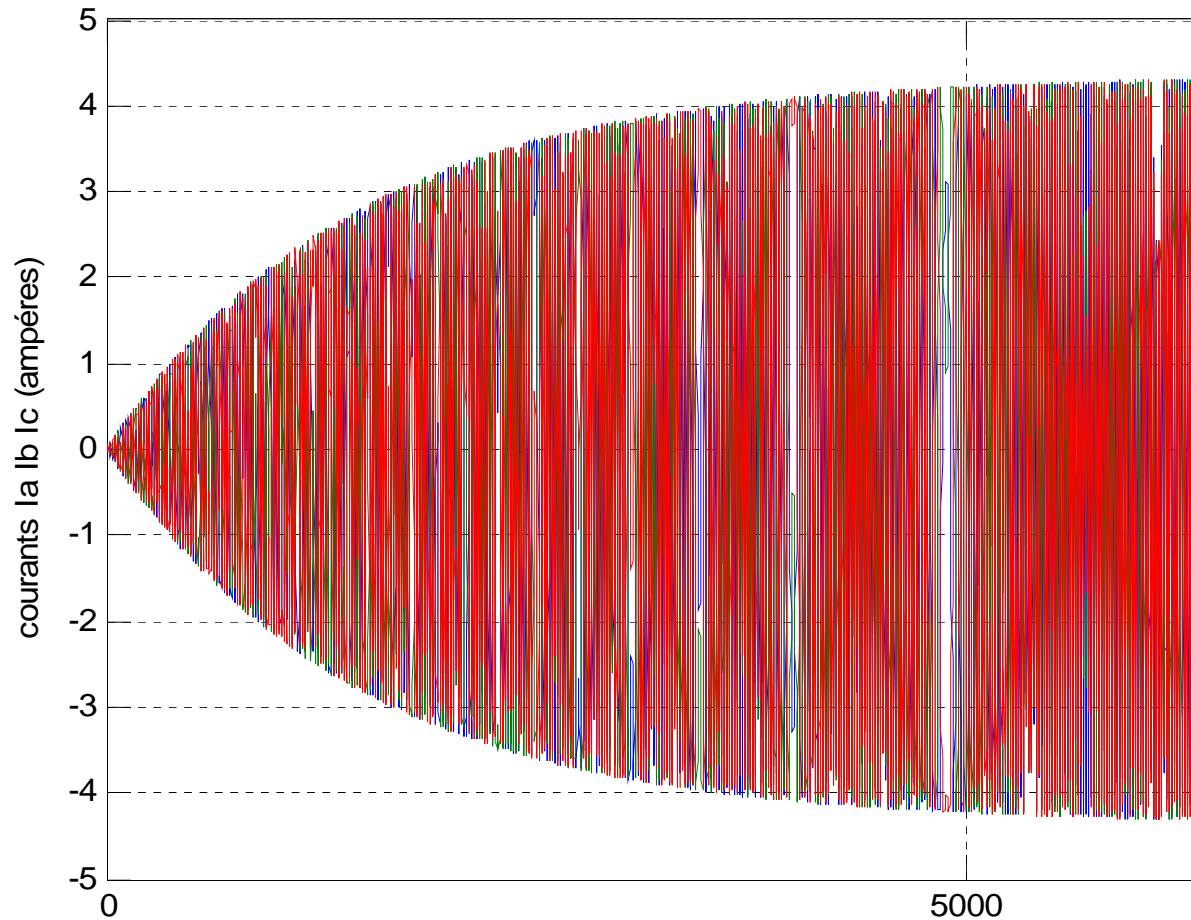
## 2- Modélisation

Fonctionnement génératrice couplée avec moteur Stirling



**(Va Vb Vc) Tension crête = 119 volt**

## 2- Modélisation

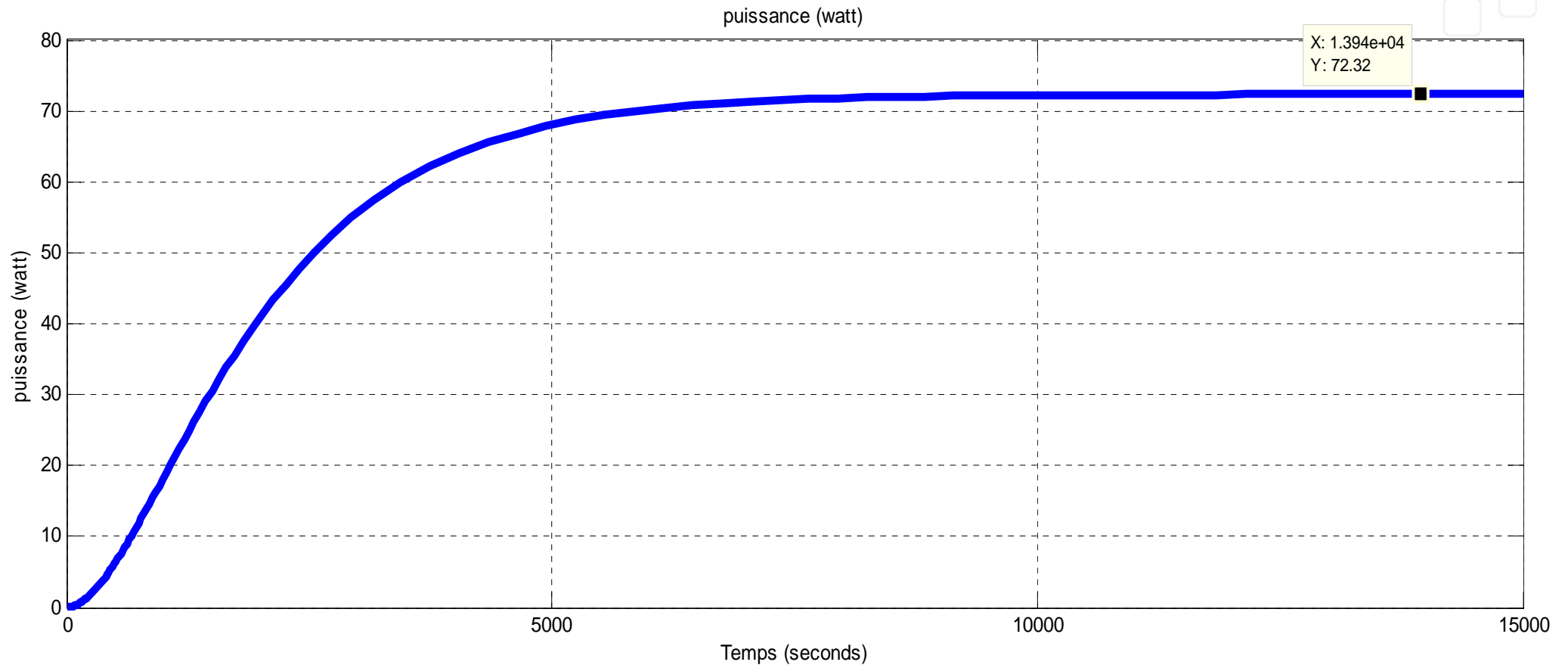


( $I_a$   $I_b$   $I_c$ ) Courants crête = 4.36 Ampères

le moment d'inertie  $J=207.137 \text{ Kg.m}^2$   
Coefficient de frottement  $=0.05 \text{ N.m.s/rad}$



## 2- Modélisation



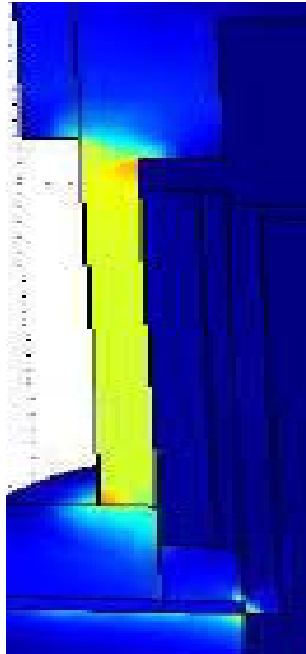
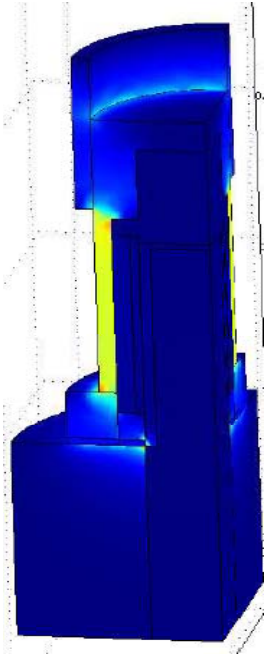
le moment d'inertie  $J=207.137 \text{ Kg.m}^2$   
Coefficient de frottement  $=0.05 \text{ N.m.s/rad}$

**Puissance crête = 72.32 W**

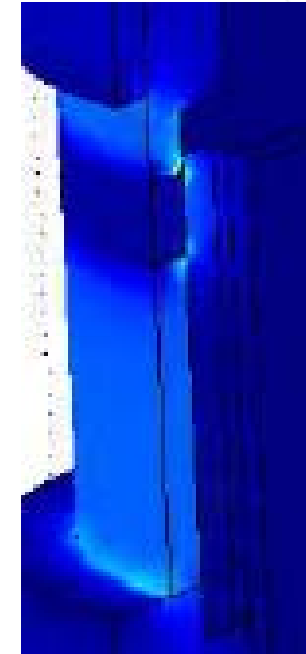
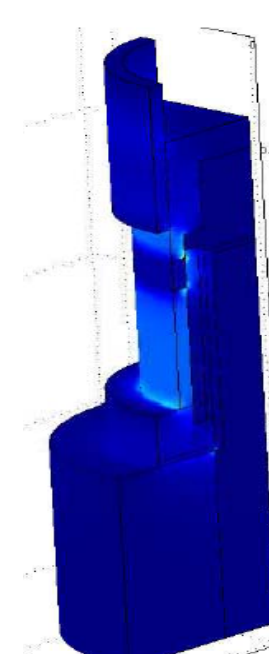


### 3- Conception et optimisation

#### Simulation Comsol - Multiphysics



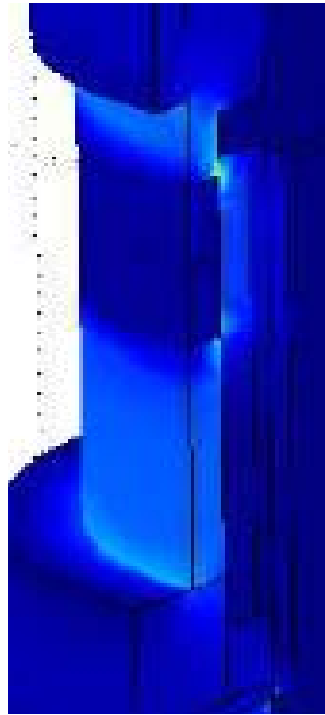
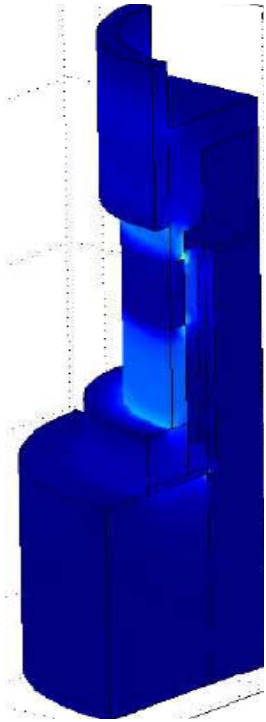
Conduction du flux à travers la paroi en cuivre



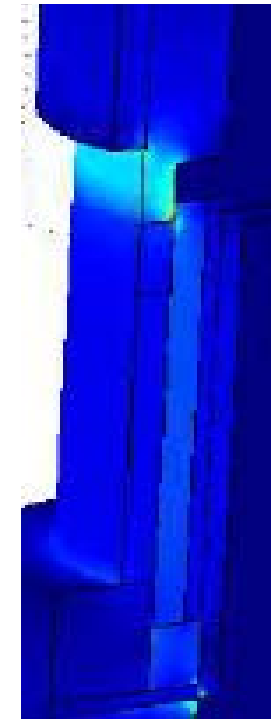
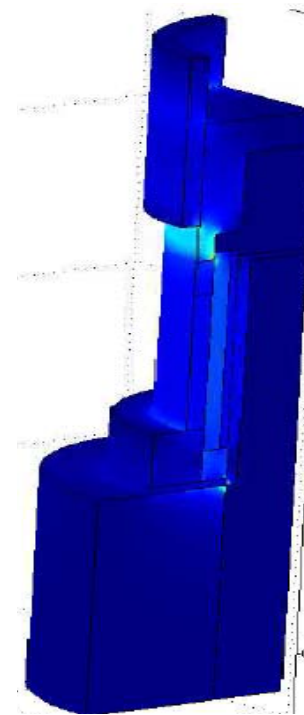
Isolant zircone 1 cm

### 3- Conception et optimisation

#### Simulation Comsol - Multiphysics



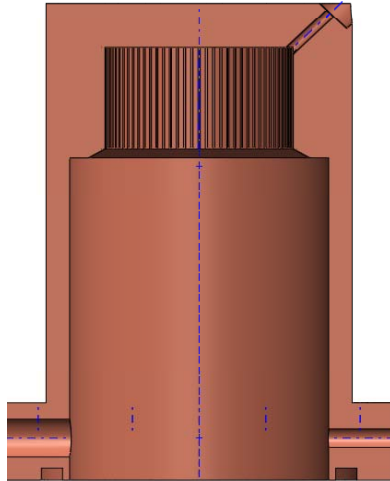
Isolant zircone 2 cm



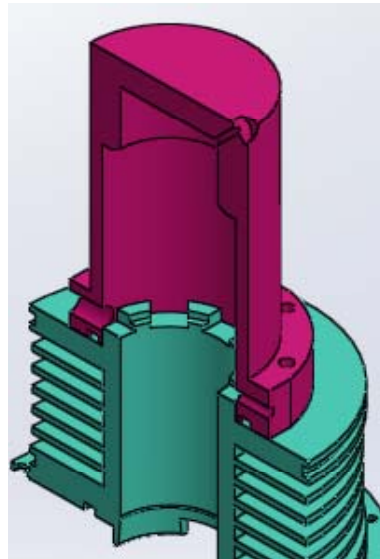
échangeur en 2 matières cuivre-inox

### 3- Conception et optimisation

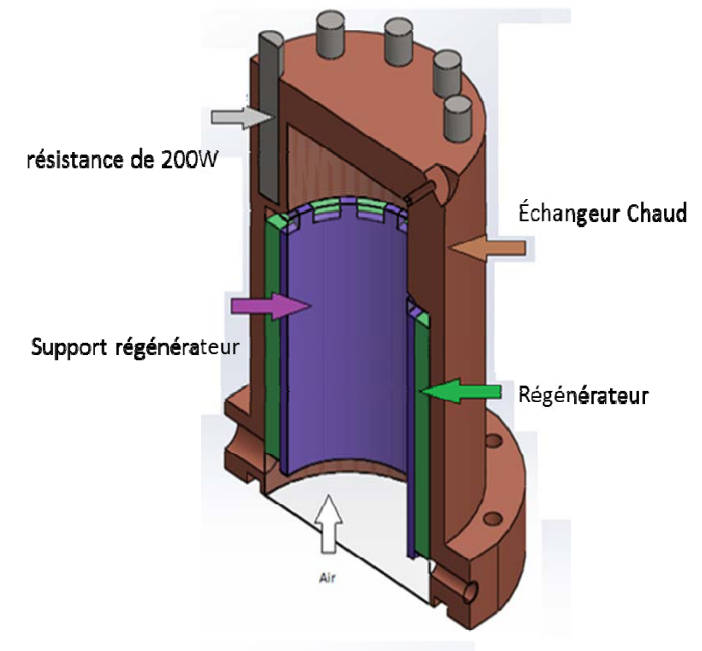
**Solidworks**



augmentation surface par rainurage



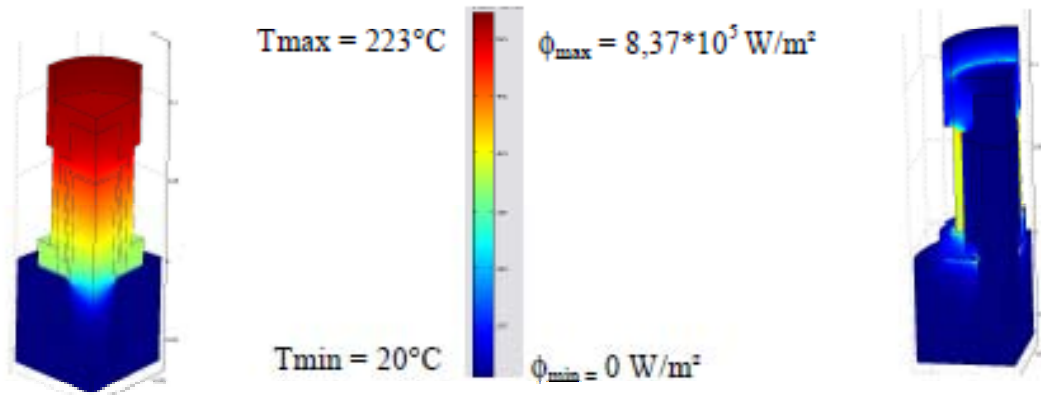
Échangeurs chaud et froid



Implantation de neuf cartouches chauffantes

## 4 - Expérimentation

### Comparaison avec Résultats Multiphysics

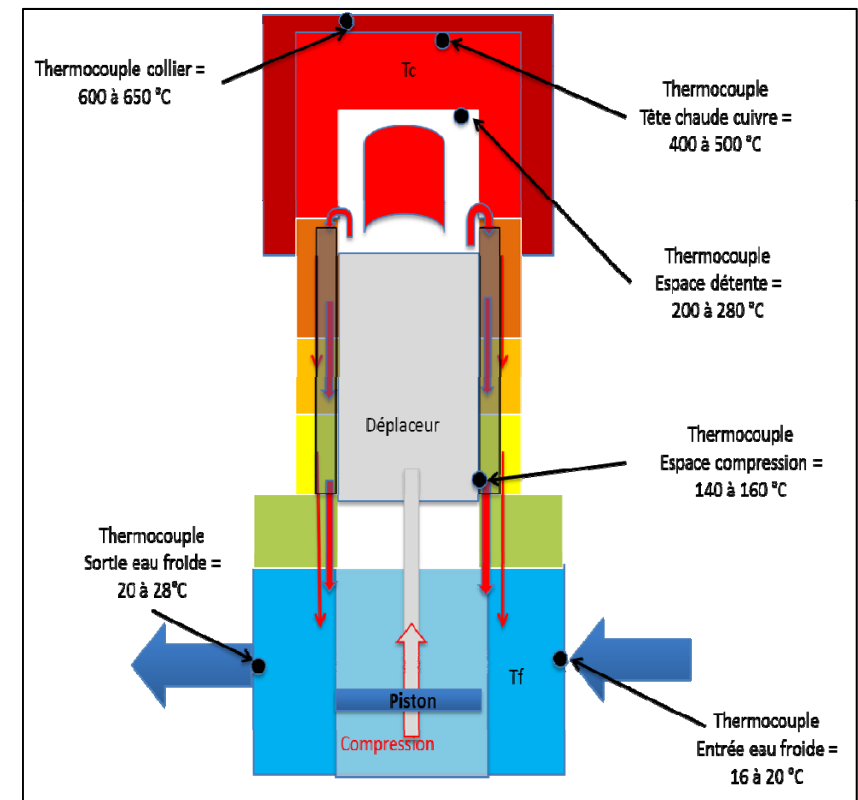


Répartition de la température

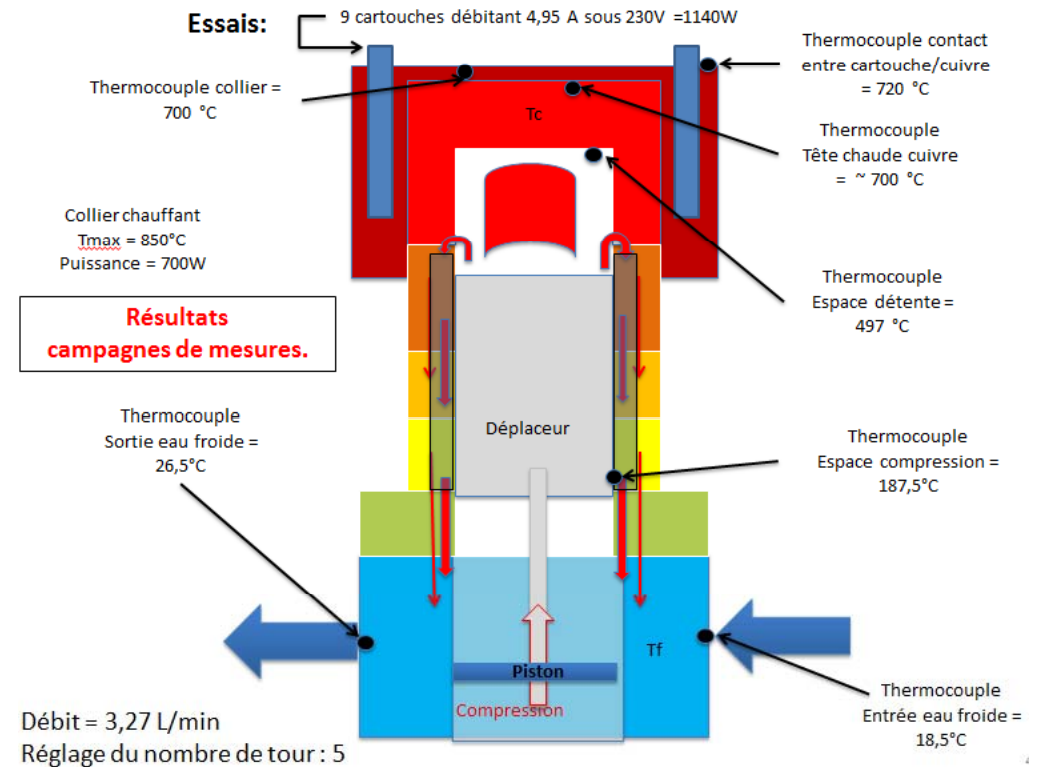
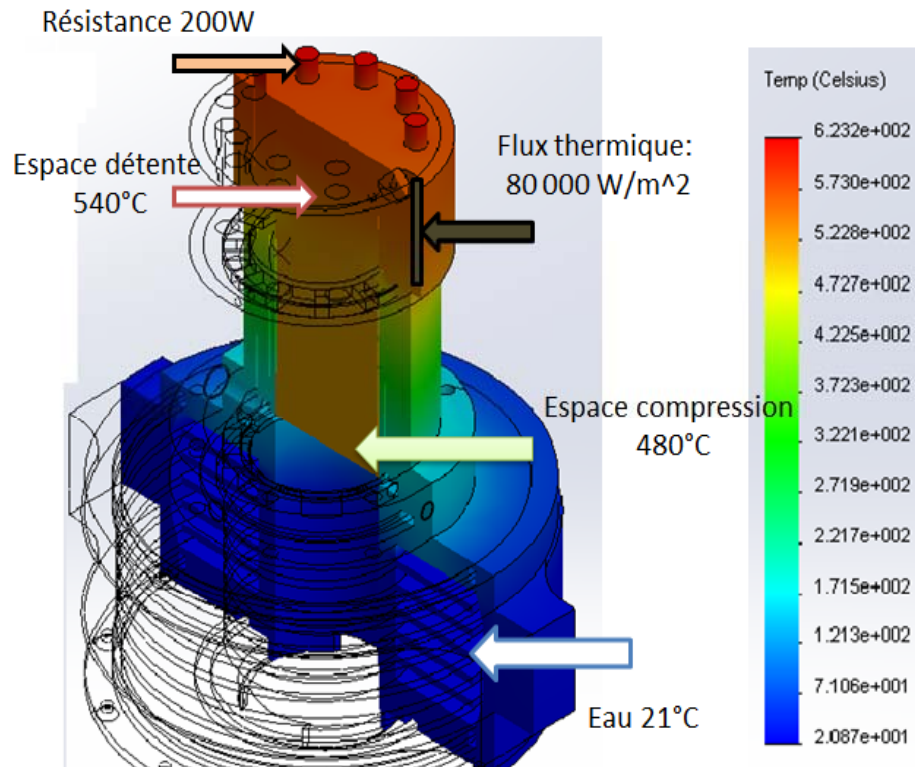
Répartition du flux de chaleur ( $\text{W/m}^2$ )

$T^{\circ}\text{max}$  espace détente =  $215^{\circ}\text{C}$

CONDITIONS : Flux sur collier, Température sur boîte froide		
Position de la mesure	Température Simulation	Température Réelle
1 => Collier	223°C	600°C
2 => Tête Chaude	223°C	450°C
3 => Espace Détente	215°C	250°C
4 => Pied de la Tête Chaude	130°C	140°C
5 => Boîte Froide	20°C	20°C



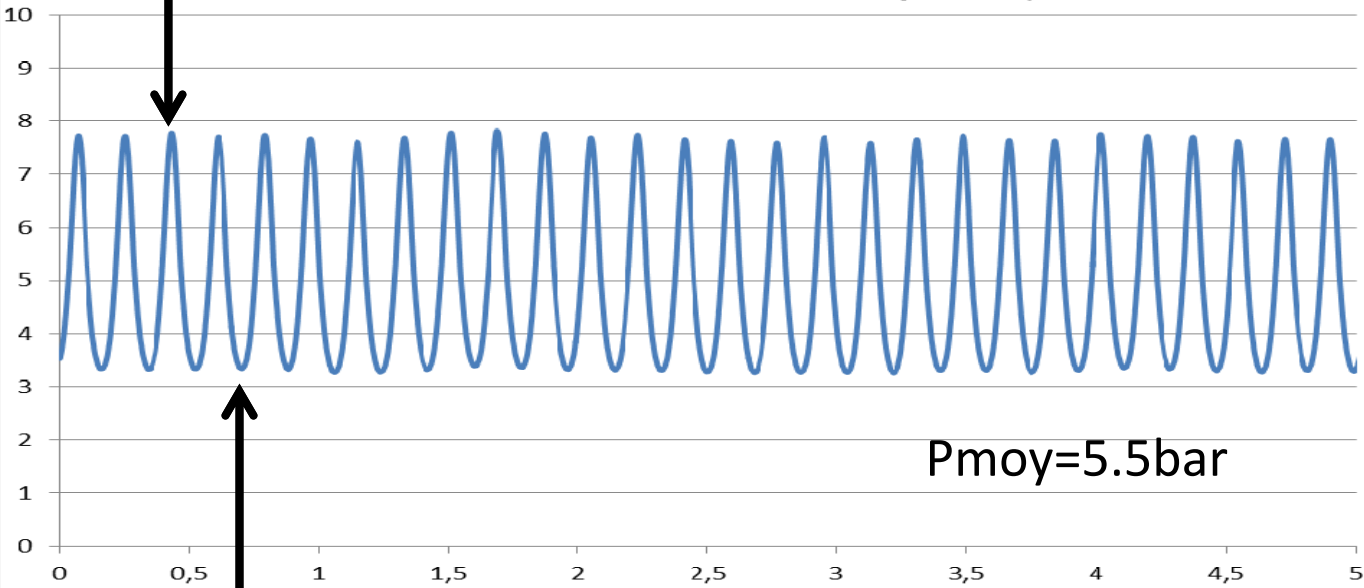
### Comparaison avec Résultats Solidworks





$P_{\max}=7.8 \text{ bar}$

### Pression volume détente (Filtré)



$P_{\text{moy}}=5.5 \text{ bar}$

$P_{\min}=3.2 \text{ bar}$

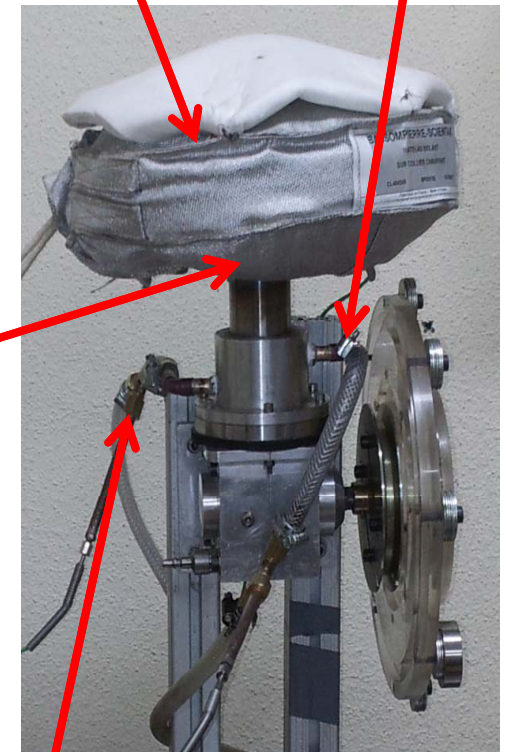
$T_{\text{espace détente}}=705^{\circ}\text{C}$

Debit variable de 1.42 l/min à 1.793 l/min  
soit 0.024 kg/s à 0.03 kg/s

soit une énergie évacuée de 301.32 W à 376.65 W par  
le système de refroidissement

$T_{\text{collier}} = 850^{\circ}\text{C}$

$T_{\text{entrée eau}} = 15^{\circ}\text{C}$



$T_{\text{sortie eau}} = 18^{\circ}\text{C}$

## 5 – Conclusion et Perspectives

### 1/ Premiers Essais

Moteur fonctionnant avec de l'air comme gaz de travail, sous une pression de charge de 5 bar et pour une température de source chaude variant de 500 à 900°C et une vitesse de rotation variant de 0-500tr/min.

### 2/ Essais de caractérisations avec nouvelles configurations

- Nouvelle conception avec régénérateur
- Prise en compte du volume mort
- Adaptation échangeur chaud et froid

### 3/ Intégration du moteur électrique (mini - groupe électrogène)

→ Essai de caractérisation du groupe électrogène

#### Modélisation :

- Optimiser modèle groupe électrogène Simulink-Matlab
- Modèle adiabatique faire le couplage électrique Mathematica

