



**Université de Pau et des Pays de l'Adour France**

**Laboratoire de Génie Electrique (LGE)**

**Laboratoire de Thermique Energétique et Procédés (LaTEP)**

**Equipe « générateurs thermoélectriques »**

# Intégration de modules thermoélectriques : étude expérimentale et étude théorique

**1) Réalisation expérimentale d'un prototype de  
générateur thermoélectrique et son étude théorique**

**ONG 'Planète Bois' Tarbes France**



**CHAMPIER Daniel,**

**BEDECARRATS Jean-Pierre,**

**KOUSKSOU Tarik,**

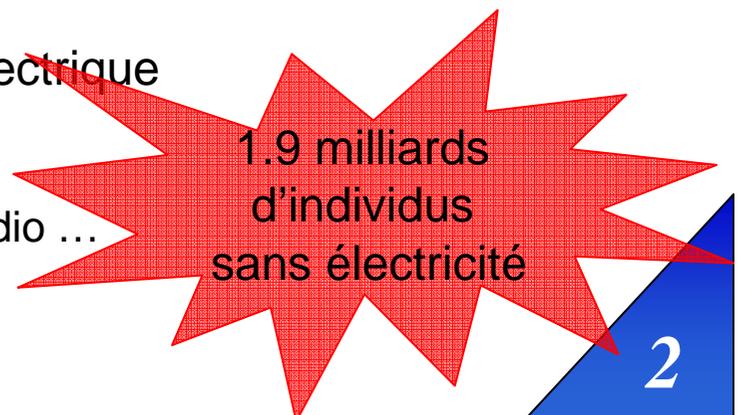
**RIVALETTO Marc**

**PIGNOLET Pascal**

**STRUB Françoise**

# Introduction

- Dans les pays en développement la biomasse représente environ 90% de la production d'énergie.
- La biomasse est brûlée dans des foyers ouverts
  - Efficacité très faible ⇒ destruction des forêts et réchauffement climatique
  - Émission élevée de polluants ⇒ risques sanitaires élevés
- “Planète Bois” développe des cuisinières bois perfectionnées multifonctions basées sur des modèles traditionnels
  - La conception de la chambre de combustion permet une combustion presque totale du bois
  - **un ventilateur est nécessaire pour augmenter le rapport air/ combustible**
  - Le conduit de fumée est horizontal ce qui évite la construction de cheminée
- Etude de la faisabilité d'un générateur thermoelectrique
  - Alimentation du ventilateur
  - Stockage dans une batterie
  - Éclairage, recharge des téléphones portables, radio ...



1.9 milliards  
d'individus  
sans électricité

# Générateurs thermoélectriques (TEG)

Conversion d'une partie de la chaleur qui les traversent en électricité

## Plan

### 1) Générateurs Thermoélectriques

### 2) Revue

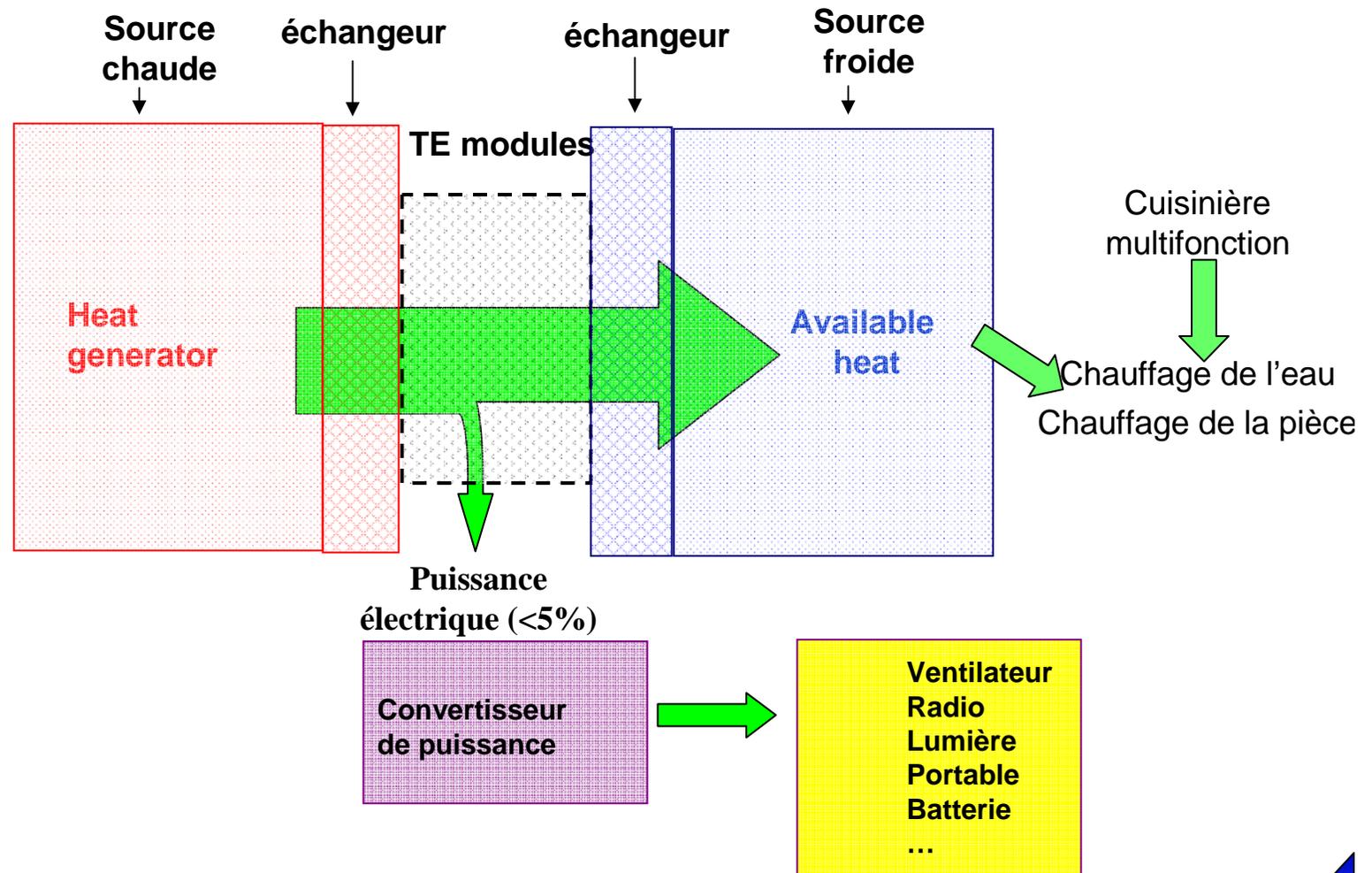
### 3) Cuisinières

### 4) Prototype

- Mécanique et thermique
- Influence de la pression
- Partie électrique
- Étude

### 5) Mesures et discussions.

### 6) Conclusion et futur.



# Revue des générateurs thermoélectriques

## Pour les cuisinières, poêles ...

### Plan

#### 1) Générateurs Thermoélectriques

#### 2) Revue

#### 3) Cuisinières

#### 4) Prototype

- Mécanique et thermique
- Influence de la pression
- Partie électrique
- Étude

#### 5) Mesures et discussions.

#### 6) Conclusion et futur.

Source chaude : gaz de combustion

Tellurure de Bismuth ( $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ )

Auteurs		Source froide	Type de module *	Puissance par module
Nuwayhid	2003	Air ; convection naturelle	Peltier	1W
Nuwayhid	2005	Air ; convection naturelle	Seebeck	4.2W
Nuwayhid	2005	Caloduc	Seebeck	3.4W
Lertsatitthanakorn	2007	Air ; convection naturelle	Seebeck	2.4 W
Mastbergen	2007	Air ; convection forcée (1W)	Seebeck	+ 4W stabilisé
"BioLite"	2009	Air ; convection forcée(1W)	Seebeck	+ 1-2 W
Champier "TEGBioS "	2009	Refroidissement à eau	Seebeck	5W
Rinalde	2010	Refroidissement forcée à eau avec pompe (?W)	Seebeck	10 W

#### \* Peltier :

La température est limitée par le matériau utilisé pour les soudures

La géométrie est étudiée pour la génération extraction de chaleur et non pour la production électrique.

#### \* Seebeck

La face chaude peut travailler à 260°C de façon continue

La géométrie est optimisée pour la production d'électricité

# Cuisinière “Planète Bois”

## CLIP (Combustion Latérale Inversée Performante)

### Plan

1) Générateurs  
Thermoélectriques

2) Revue

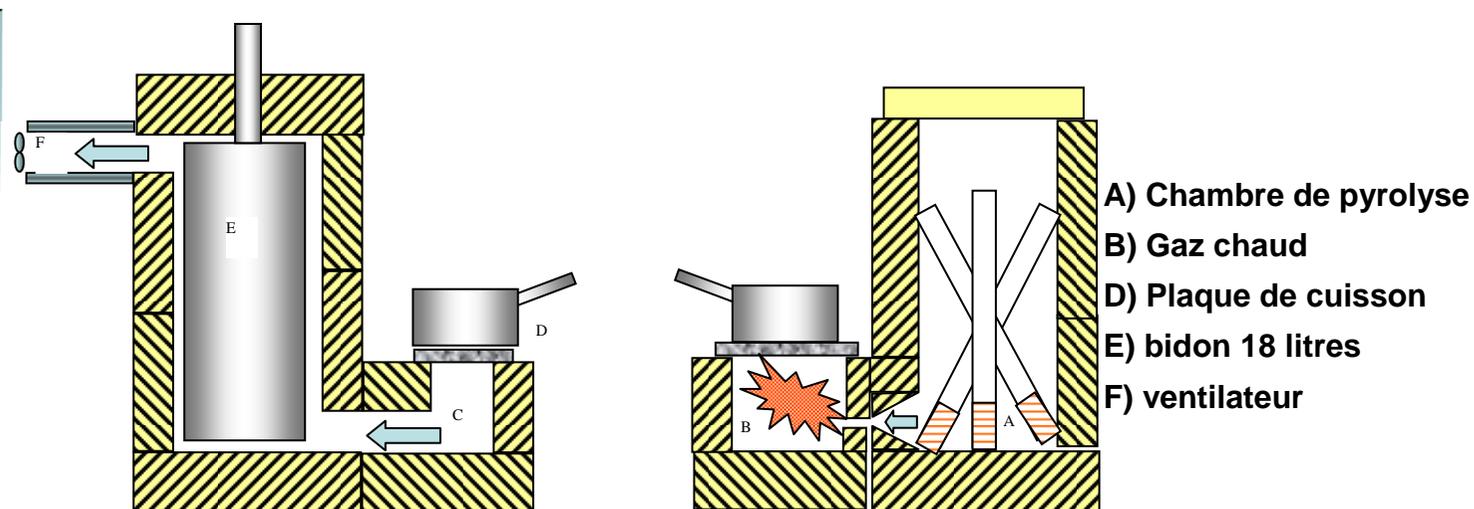
3) Cuisinières

4) Prototype

- Mécanique et thermique
- Influence de la pression
- Partie électrique
- Étude

5) Mesures et discussions.

6) Conclusion et futur.



**10 kW consommation de bois**  
**2.4 kW chauffage de l'eau**  
**4.5 kW chauffage de la pièce et inertie**  
**0.9 kW cuisine**



**Flux entre gaz chauds et eau**  
**flux entre gaz chauds et air**

# “Planète Bois” Cook stoves

## Plan

1) Générateurs  
Thermoélectriques

2) Revue

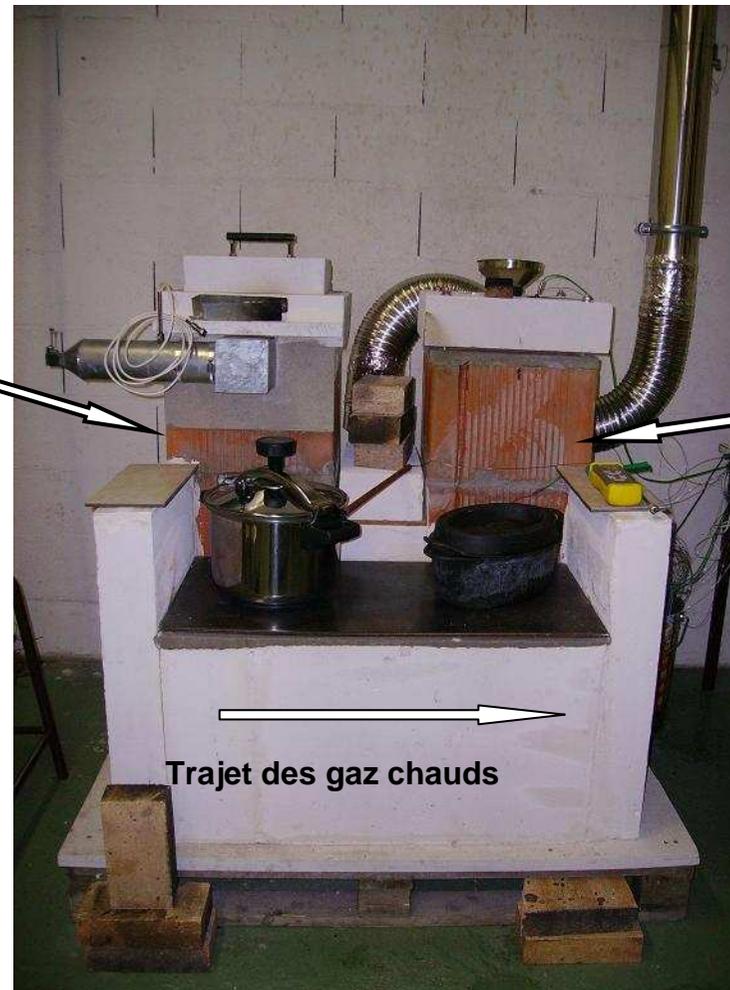
3) Cuisinières

4) Prototype

- Mécanique et thermique
- Influence de la pression
- Partie électrique
- Étude

5) Mesures et discussions.

6) Conclusion et futur.



Chambre de pyrolyse

réservoir 18 litres

Trajet des gaz chauds

# Partie Mécanique et Thermique TEGBioS

## Plan

1) Générateurs  
Thermoélectriques

2) Revue

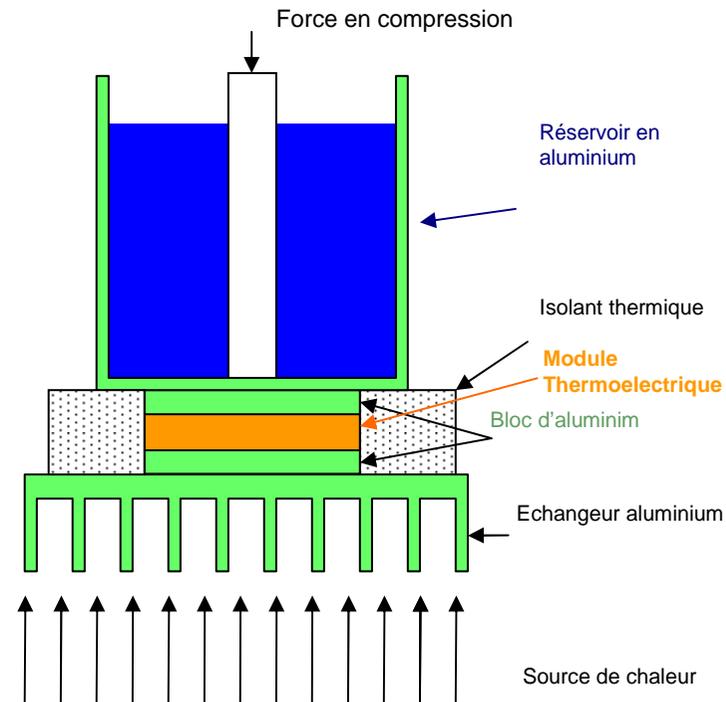
3) Cuisinières

4) **Prototype**

- Mécanique et thermique
- Influence de la pression
- Partie électrique
- Étude

5) Mesures et discussions.

6) Conclusion et futur.

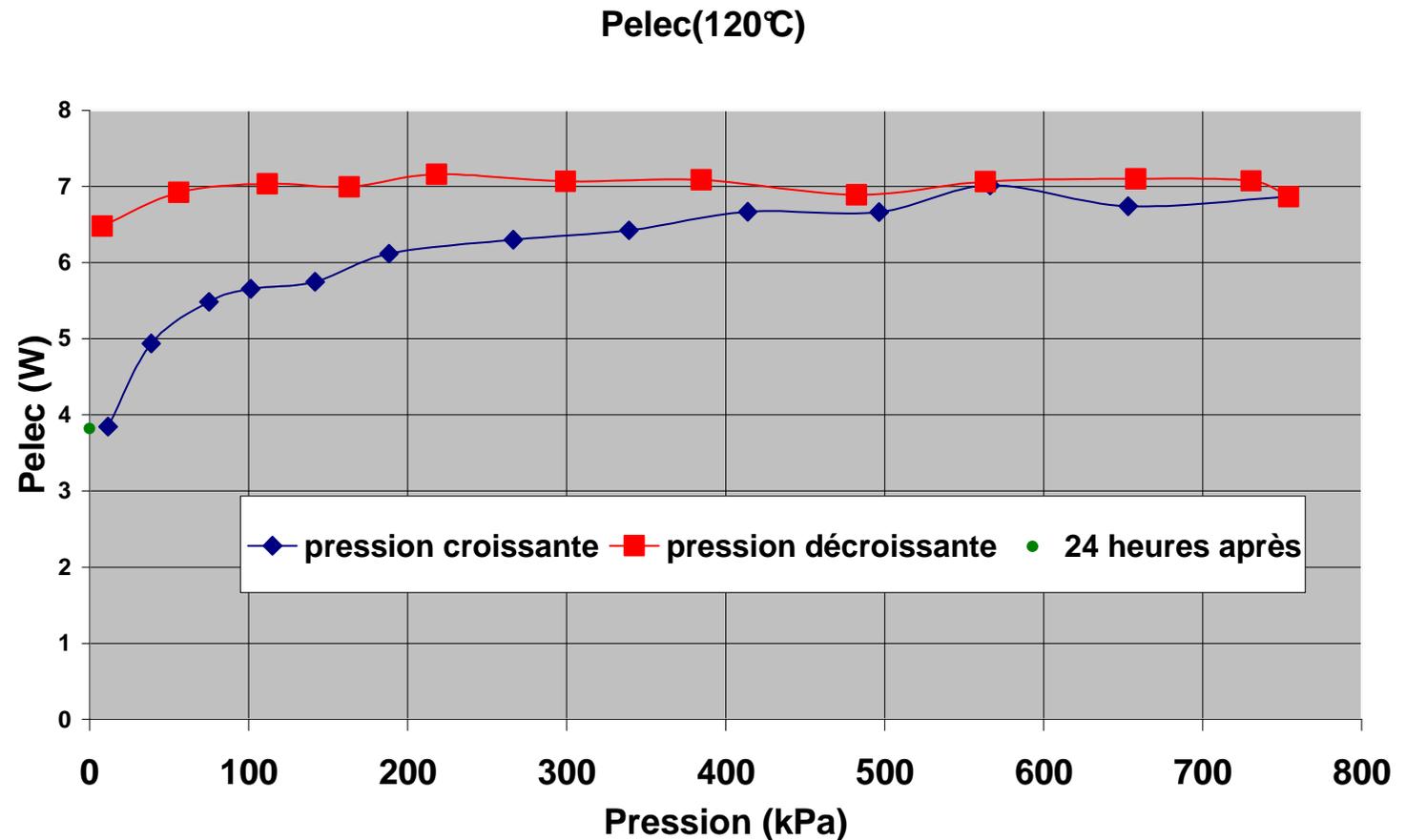


- Une charge est appliquée au centre du réservoir pour diminuer les résistances de contact
- Excellent état de surface ( variation de 25µm pour les échangeurs)
- Dimensionnement avec CATIA pour évaluer la répartition des forces sur la céramique isolante et fragile

# Etude de la puissance générée en fonction de la pression

## Plan

- 1) Générateurs Thermoélectriques
- 2) Revue
- 3) Cuisinières
- 4) Prototypage
  - Mécanique et thermique
  - Influence de la pression
  - Partie électrique
  - Étude
- 5) Mesures et discussions.
- 6) Conclusion et futur.



- $T_C$  et  $T_H$  maintenues à peu près constantes pour limiter l'influence des paramètres thermoélectriques.
- Ecart de température de 120°

$$P_{elec}(120^\circ C) = P_{elec}(DT) \cdot \left(\frac{120}{DT}\right)^2$$

# Partie électrique

Au début de la combustion, les températures sont très basses et le générateur thermoélectrique ne fournit pas d'électricité.

Une batterie est nécessaire

Pour démarrer la combustion

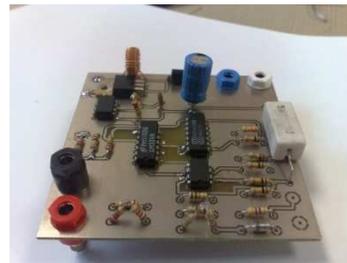
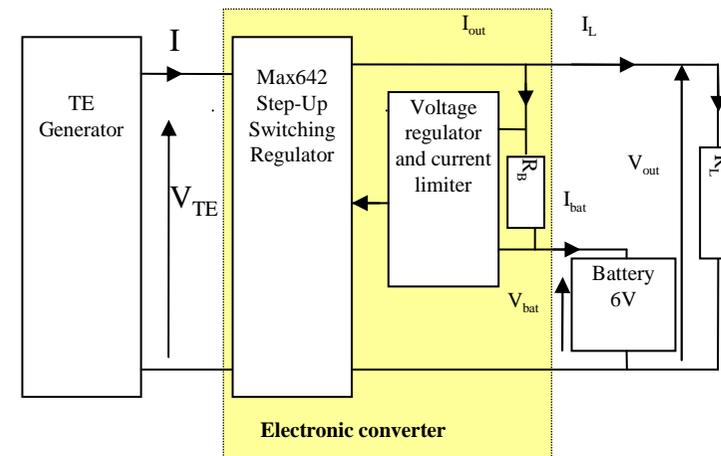
Éclairage, radio ....

Les températures varient

- pendant la combustion,
- soutirage d'eau,
- rajout de bois ...

La tension du TE générateur fluctue beaucoup

Nécessité d'un régulateur DC-DC (élevateur)



## Plan

1) Générateurs Thermoélectriques

2) Revue

3) Cuisinières

4) Prototype

- Mécanique et thermique
- Influence de la pression
- **Partie électrique**
- Étude

5) Mesures et discussions.

6) Conclusion et futur.

# Etude en régime stationnaire à 1 dimension

## Plan

1) Générateurs  
Thermoélectriques

2) Revue

3) Cuisinières

4) Prototype

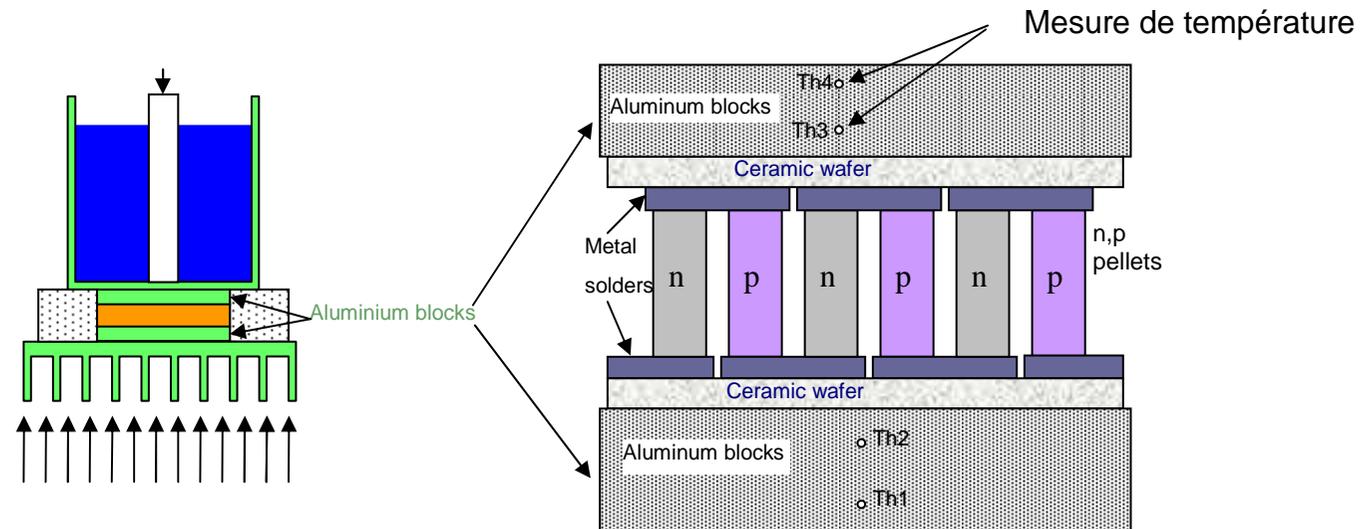
- Mécanique et thermique
- Influence de la pression
- Partie électrique
- Étude

5) Mesures et discussions.

6) Conclusion et futur.

## Objectif :

Vérifier que nous obtenons le maximum de puissance électrique



## Hypothèses

Pas de conduction, pas de convection pas de rayonnement avec le milieu ambiant

→ Toute la chaleur est transférée à travers le matériaux thermoélectrique

# Etude en régime stationnaire à 1 dimension

## Plan

### 1) Générateurs Thermoélectriques

### 2) Revue

### 3) Cuisinières

### 4) Prototype

- Mécanique et thermique
- Influence de la pression
- Partie électrique
- Étude

### 5) Mesures et discussions.

### 6) Conclusion et futur.

## Équation Thermoélectrique

Chaleur absorbée coté chaud

$$q_h = n \cdot \left[ \alpha_{pn} \cdot I \cdot T_h - \frac{R_{pn} \cdot I^2}{2} - K_{pn} \cdot (T_c - T_h) \right]$$

Seebeck     Joule     Conduction

Chaleur évacuée coté froid

$$q_c = n \cdot \left[ \alpha_{pn} \cdot I \cdot T_c + \frac{R_{pn} \cdot I^2}{2} - K_{pn} \cdot (T_c - T_h) \right]$$

Puissance électrique

$$P_{elec} = n \cdot \left[ \alpha_{pn} \cdot I \cdot (T_h - T_c) - R_{pn} \cdot I^2 \right]$$

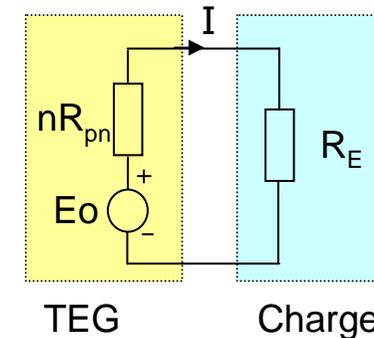
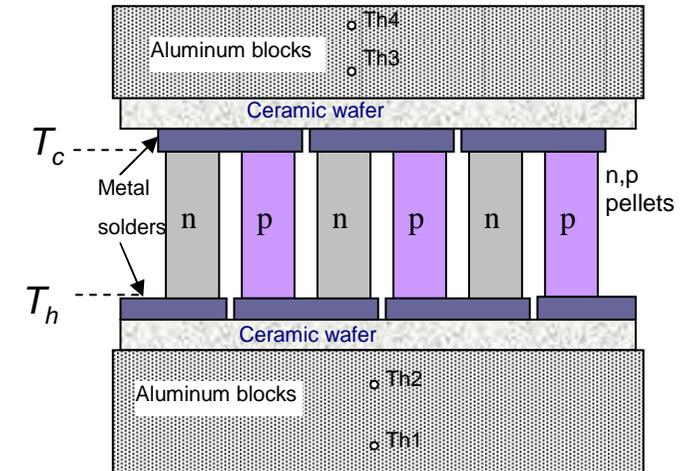
Différence de potentiel en circuit ouvert

$$E_o = n \cdot \alpha_{pn} \cdot (T_h - T_c)$$

Courant

$$I = \frac{E_o}{nR_{pn} + R_E} = \frac{n \cdot \alpha_{pn} \cdot (T_h - T_c)}{nR_{pn} + R_E}$$

La puissance électrique dans la charge est maximum  $P_{elec}^{max}$  pour une charge adaptée:  $nR_{pn} = R_E$ .



## Etude en régime stationnaire à 1 dimension

### Plan

#### 1) Générateurs Thermoélectriques

#### 2) Revue

#### 3) Cuisinières

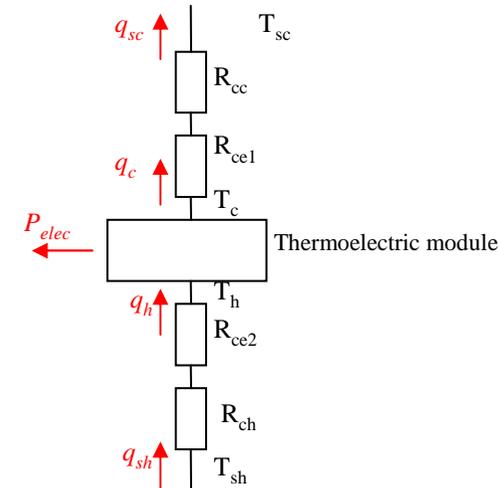
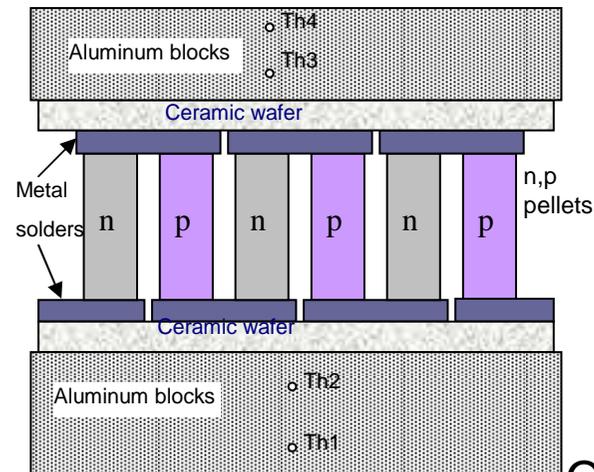
#### 4) Prototype

- Mécanique et thermique
- Influence de la pression
- Partie électrique
- Étude

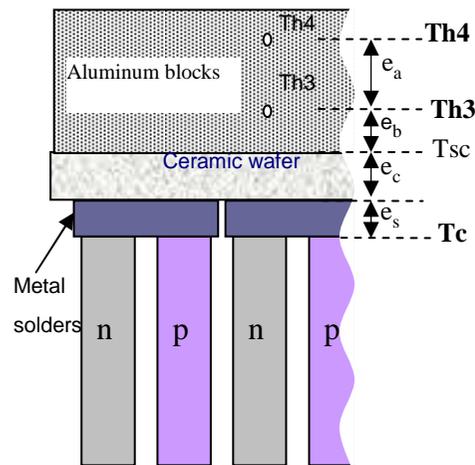
#### 5) Mesures et discussions.

#### 6) Conclusion et futur.

### Modèle avec résistances thermiques



Objectif : déterminer  $T_c$  et  $T_h$



Mesure de  $T_{h4}$  et  $T_{h3}$   $\Rightarrow$  calcul de  $T_c$

$$q_c = \frac{T_{h4} - T_{h3}}{R_{ala}} = \frac{T_{h3} - T_c}{R_{alb} + R}$$

$$R_{ala} = \frac{e_a}{\lambda_{al} \cdot S} \quad R_{alb} = \frac{e_b}{\lambda_{al} \cdot S}$$

$$R = \frac{e_c}{\lambda_{ceram} \cdot S} + \frac{1}{h_{contact} \cdot S} + \frac{e_s}{\lambda_{solder} \cdot S}$$

$$T_c = T_{h3} + \frac{e_b + e_c}{\lambda_{ceram}} + \frac{e_s}{\lambda_{solder}} + \frac{\lambda_{al}}{h_{contact}} (T_{h3} - T_{h4})$$

# Mesures et discussion

## Plan

1) Générateurs  
Thermoélectriques

2) Revue

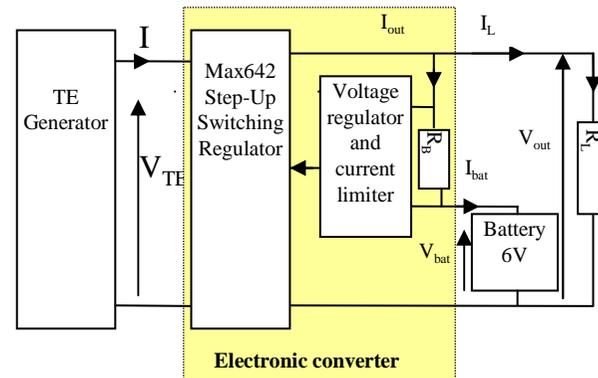
3) Cuisinières

4) Prototype

- Mécanique et thermique
- Influence de la pression
- Partie électrique
- Étude

5) Mesures et discussions.

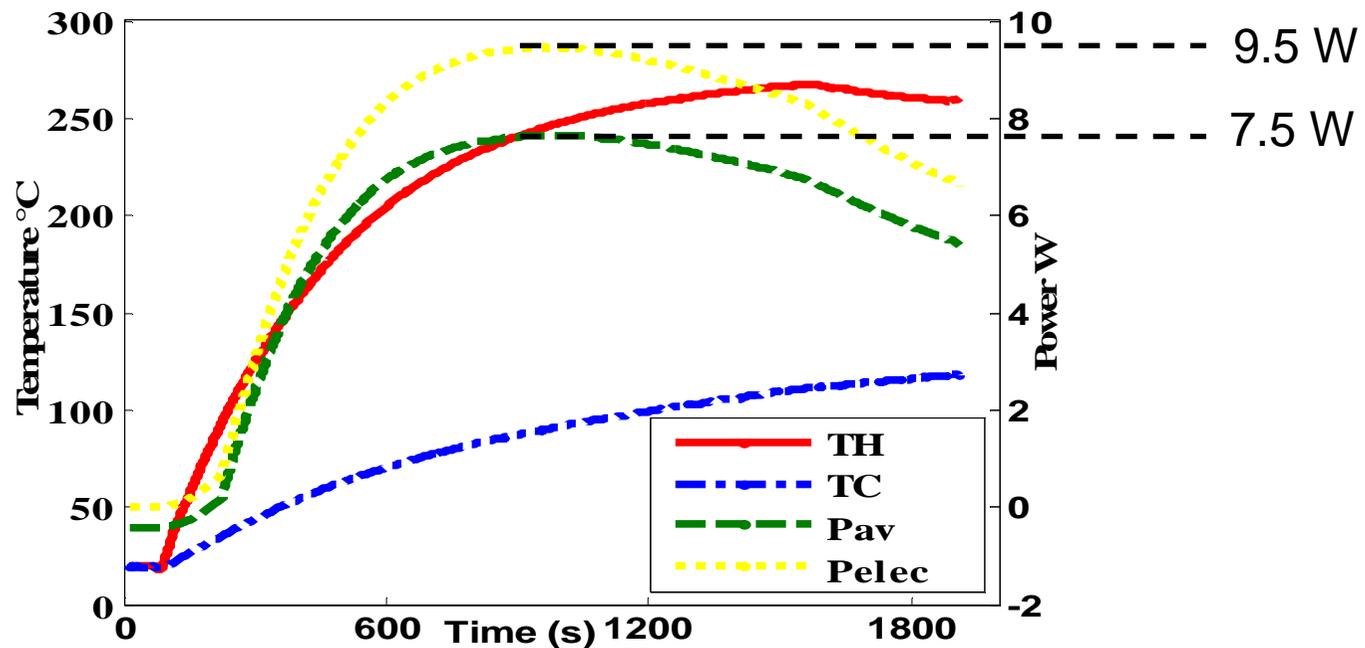
6) Conclusion et futur.



$$P_{elec} = V_{TE} \cdot I$$

Puissance régulée :

$$P_{av} = V_{out} \cdot I_L + V_{bat} \cdot I_{bat}$$



# Mesures et discussion

## Plan

1) Générateurs  
Thermoélectriques

2) Revue

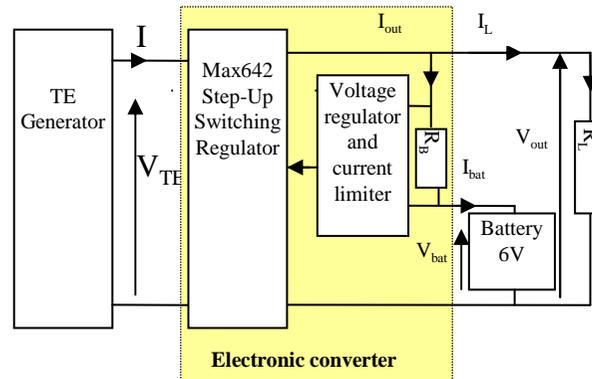
3) Cuisinières

4) Prototype

- Mécanique et thermique
- Influence de la pression
- Partie électrique
- Étude

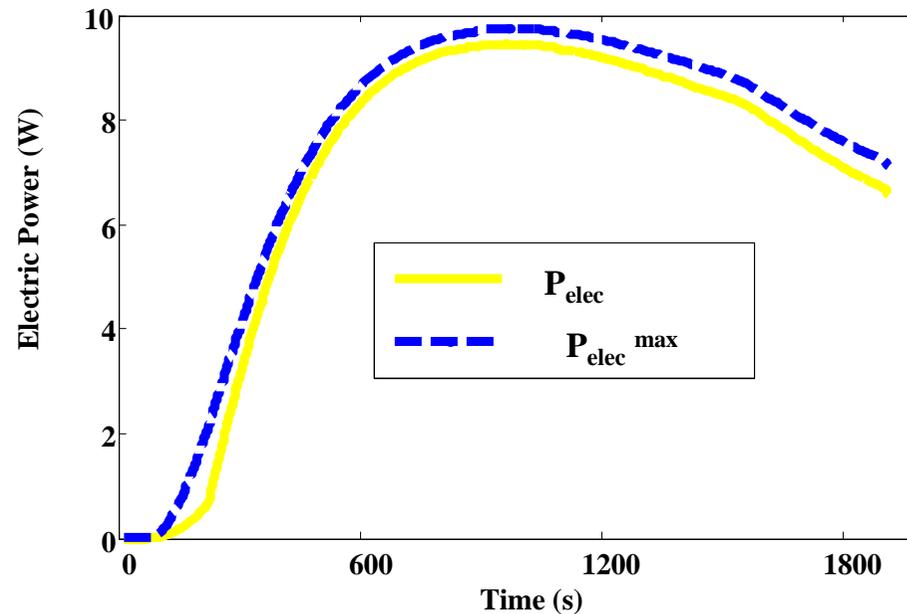
5) Mesures et discussions.

6) Conclusion et futur.



$$R_E = \frac{V_{TE}}{I}$$

$$P_{elec}^{max} = P_{elec} \frac{(R_E + nR_{pn})^2}{4 \cdot nR_{pn} \cdot R_E}$$



→ La charge est presque adaptée

# Mesures et discussion

Comparaison entre le modèle 1D et la mesure

## Plan

1) Générateurs  
Thermoélectriques

2) Revue

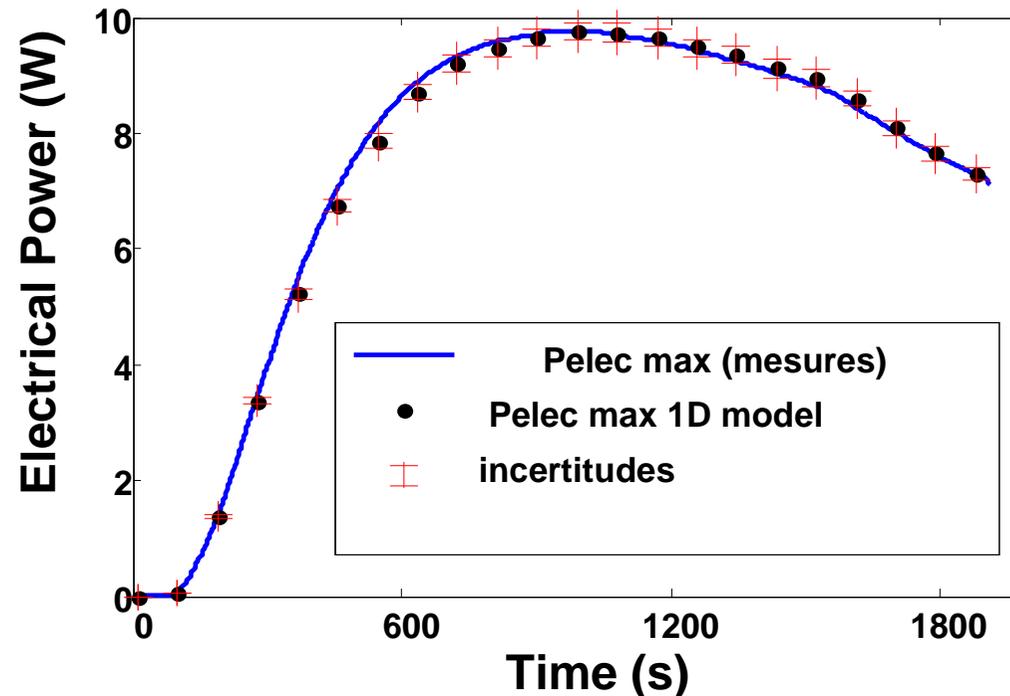
3) Cuisinières

4) Prototype

- Mécanique et thermique
- Influence de la pression
- Partie électrique
- Étude

5) Mesures et discussions.

6) Conclusion et futur.



Ajusté pour un coefficient de transfert

$$h_{contact} = 20000 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$$



Bon contact thermique

# Conclusion

**Le générateur produit une puissance stabilisée de 7,5 W (9.5 W)**

## Plan

### 1) Générateurs Thermoélectriques

### 2) Revue

### 3) Cuisinières

### 4) Prototype

- Mécanique et thermique
- Influence de la pression
- Partie électrique
- Étude

### 5) Mesures et discussions.

### 6) Conclusion et futur.

Les avantages du générateur thermoélectrique sont :

- Pas besoin d'énergie supplémentaire.
  - Le générateur utilise le flux entre les gaz chauds et le bidon d'eau
  - Une petite partie est transformée en énergie électrique
- Le dispositif est intégré à la cuisinière:
  - Pas de liaison électrique avec l'extérieur à la différence des panneaux solaires,
  - pas de manipulation de batterie.
- Maintenance minimale
  - Pas de pièce en mouvement
  - Tout est dans la maison
  - Seul la batterie devra être changée à la fin de son cycle charge décharge
- Le générateur produit dès que la cuisinière est en route, nuit et jour, par beau temps ou par mauvais temps (période de mousson) ≠ solaire
- La batterie n'a pas besoin d'être surdimensionnée : chaque usage de la cuisinière l'a recharge ≠ solaire où il faut stocker pour les jours dans soleil
- le prix par watt est du même ordre que pour le solaire

## Travail futur

- Optimiser l'échangeurs avec les gaz chaud
  - Tester un Maximum Power Point Tracking (MPPT) convertisseur
- Expérimenter le dispositif sur une cuisinière



*Université de Pau et des Pays de l'Adour France*

*Laboratoire de Génie Electrique (LGE)*

*Laboratoire de Thermique Energétique et Procédés (LaTEP)*

*Equipe « générateurs thermoélectriques »*

# **Intégration de modules thermoélectriques : étude expérimentale et étude théorique**

## **2) Modélisation de la génération thermoélectrique pour des applications aéronautiques**

*Turbomeca – Groupe SAFRAN, Bordes, France*

**CHAMPIER Daniel,**

**BEDECARRATS Jean-Pierre,**

**KOUSKSOU Tarik,**

**BRILLET Christophe**

**PIGNOLET Pascal**

# Objectifs

## Plan

### 1) Objectifs

### 2) Système

### 3) Modèle physique et stratégie numérique

### 4) Résultats et discussions

### 5) Conclusions

### 6) Perspectives

La thermoélectricité : une solution pour répondre à la demande croissante en électricité dans l'aéronautique ?

**La thermoélectricité peut contribuer à la production d'électricité en utilisant l'énergie perdue au niveau des tuyères**

Avantages attendus :

- améliorer l'efficacité globale
- pas de carburant supplémentaire, pas de pièce mobile pour produire de l'électricité
- possibilité de fonctionner sur l'ensemble de l'enveloppe de vol
- ne perturbe pas le fonctionnement des moteurs

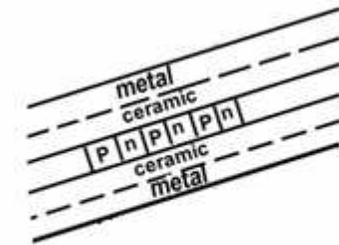
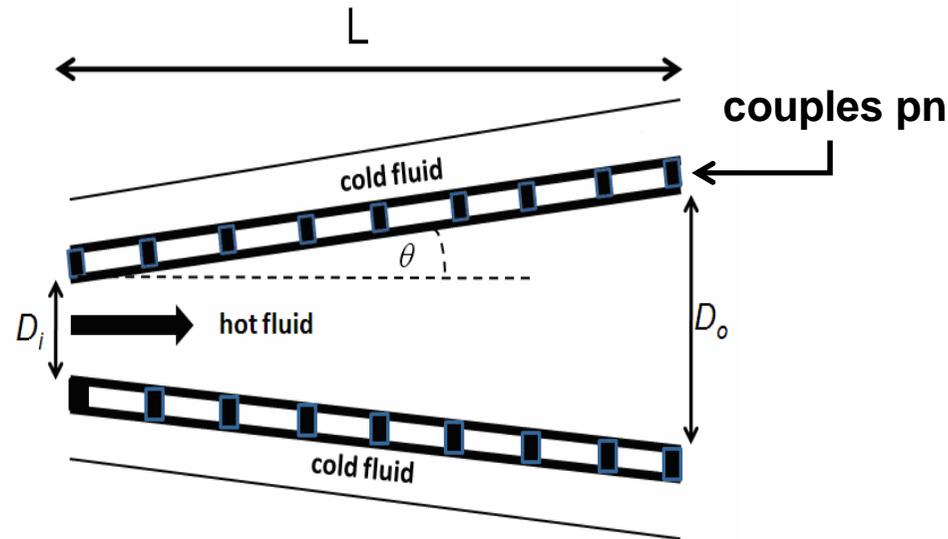
Etude de faisabilité

# Systeme étudié

## Tuyère conique d'une turbine aéronautique

### Plan

- 1) Objectifs
- 2) **Systeme**
- 3) Modèle physique et stratégie numérique
- 4) Résultats et discussions
- 5) Conclusions
- 6) Perspectives



### Rappel : rôle de la tuyère

Pour des écoulements subsoniques, l'utilisation d'une tuyère conique divergente permet de diminuer la vitesse d'éjection des gaz et de minimiser les pertes de charges (réduction de la poussée)

# Modèle physique et stratégie numérique

## Principales hypothèses

### Plan

- 1) Objectifs
- 2) Système
- 3) **Modèle physique et stratégie numérique**
- 4) Résultats et discussions
- 5) Conclusions
- 6) Perspectives

- l'écoulement est unidirectionnel.
- Le fluide chaud est compressible et Newtonien (équation de Navier-Stokes).
- Le fluide froid est incompressible et Newtonien (équation de Navier-Stokes).
- Les modules thermoélectriques sont supposés coniques et constitués d'une seule couche de jonction p-n.
- Les couples sont alignés de façon homogène perpendiculairement à l'écoulement sans espace libre et connectés électriquement en série
- Les résistances de contacts électriques ont été considérées comme négligeables.
- Les propriétés thermoélectriques varient le long de la tuyère en fonction de la température

# Modèle physique et stratégie numérique

## Principales équations

### Plan

- 1) Objectifs
- 2) Système
- 3) **Modèle physique et stratégie numérique**
- 4) Résultats et discussions
- 5) Conclusions
- 6) Perspectives

### Fluide chaud (Hot)

$$\frac{\partial(\rho_H S)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_H u_H S)}{\partial x} = 0$$

$$\frac{\partial(\rho_H u_H S)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_H u_H u_H S)}{\partial x} = -S \frac{\partial p_H}{\partial x}$$

$$\frac{\partial(\rho_H E_H S)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_H u_H H_H S)}{\partial x} = \frac{Q_H}{V_H}$$

Conservation de la masse,  
de la quantité de mouvement  
et de l'énergie

$$P_0 = Q_H - Q_C$$

Puissance électrique

TE  
modèle

### Fluide froid (Cold)

$$\rho_C c_{p,C} \left( \frac{\partial T_C}{\partial t} + u_C \frac{\partial T_C}{\partial x} \right) = \lambda_C \frac{\partial^2 T_C}{\partial x^2} + \frac{Q_C}{V_C}$$

Équation de l'énergie

## conditions initiales et aux limites

### Fluide chaud

Masse volumique et vitesse à l'entrée  
Pression à la sortie

### Fluide froid

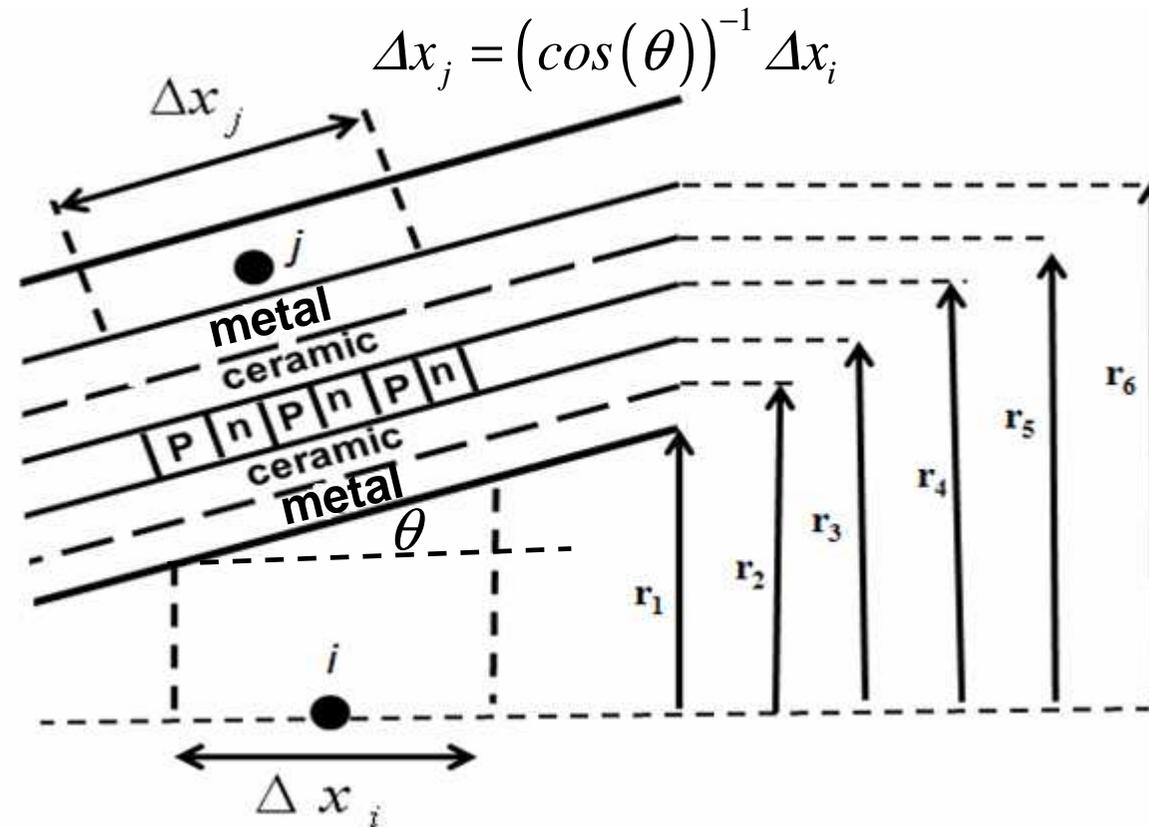
$$T_C(x, 0) = T_{C,in} \quad T_C(0, t) = T_{C,in} \quad \frac{\partial T_C(L, t)}{\partial x} = 0$$

# Stratégie numérique

*volume de contrôle*

## Plan

- 1) Objectifs
- 2) Système
- 3) **Modèle physique et stratégie numérique**
- 4) Résultats et discussions
- 5) Conclusions
- 6) Perspectives



$R_{metal}$   $R_{ceramic}$   $R_{contac}$   $R_{TE}$   $R_H$   $R_C$

corrélations classiques pour déterminer les coefficients d'échange convectif

# Stratégie numérique

## Modèle thermoélectrique

### Plan

1) Objectifs

2) Système

3) **Modèle physique et stratégie numérique**

4) Résultats et discussions

5) Conclusions

6) Perspectives

$$Q_{H,i,j} = n_x n_\varphi n_{TE} \left[ \underbrace{\alpha I T_{H,i,s}}_{\text{Seebeck}} - \underbrace{\frac{R_{elec} I^2}{2}}_{\text{Joule}} + \underbrace{K (T_{H,i,s} - T_{C,j,s})}_{\text{Conduction}} \right]$$

Chaleur absorbée côté chaud

$$Q_{C,i,j} = n_x n_\varphi n_{TE} \left[ \alpha I T_{C,j,s} + \frac{R_{elec} I^2}{2} + K (T_{H,i,s} - T_{C,j,s}) \right]$$

Chaleur restituée côté froid

$$T_{H,i,s} = T_{H,i} - Q_{H,i,j} (R_H + R_{metal} + R_{ceramic} + R_{cont})$$

Température des faces chaudes et froides

$$T_{C,j,s} = T_{C,j} + Q_{C,i,j} (R_C + R_{metal} + R_{ceramic} + R_{cont})$$

$$I = \frac{\sum_{i,j=1}^n \alpha (T_{H,i,s} - T_{C,j,s}) n_{TE} n_x n_\varphi}{R_{load} + \sum_{i,j} (R_{elec} n_{TE} n_x n_\varphi)}$$

courant

$$P_o = \sum_{i,j=1}^n (Q_{H,i} - Q_{C,j})$$

Puissance thermoélectrique

# Résultats et discussions

## Plan

- 1) Objectifs
- 2) Système
- 3) Modèle physique et stratégie numérique
- 4) Résultats et discussions
- 5) Conclusions
- 6) Perspectives

## Paramètres

$\text{Bi}_2\text{Te}_3$  (Tellure de Bismuth)

Tuyère conique		
Longueur		0,32m
Épaisseur		0,002m
Diamètre à l'entrée		0,236m
Diamètre à la sortie		0,306m
Sources d'énergie thermique		
Fluide chaud	Air	$T_H^{in} = 900K, v_H^{in} = 130m.s^{-1}$
Fluide froid	huile	$T_C^{in} = 358K, \dot{m}_c = 0,21kg.s^{-1}$

Conditions réelles  
de fonctionnement

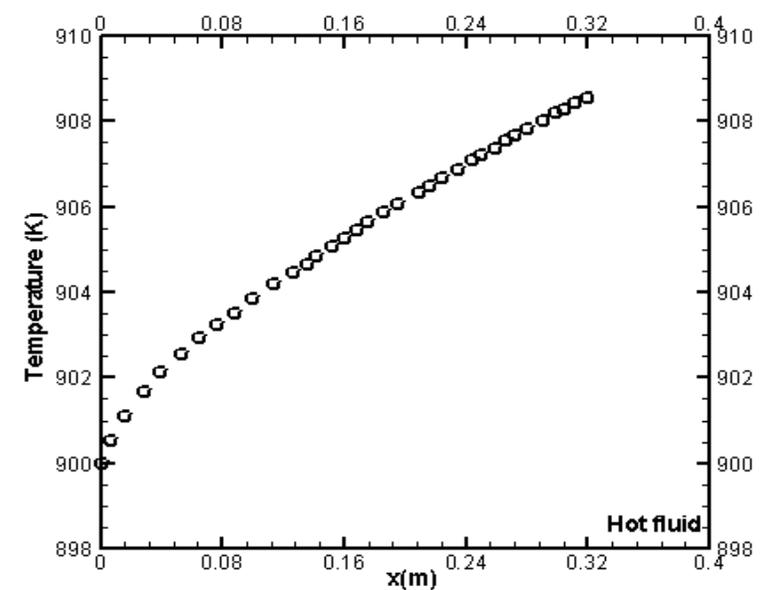
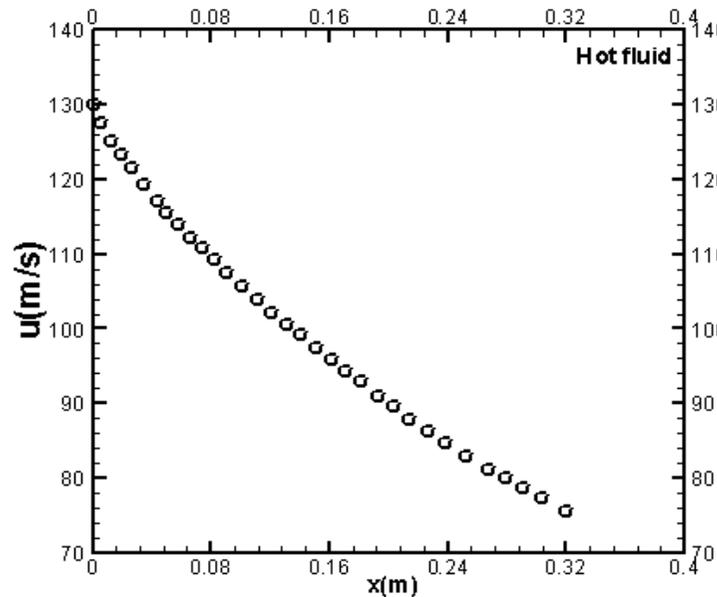
Echangeur à contre-courant

# Résultats et discussions

*Profils de vitesse et de température le long de la tuyère pour les gaz chauds*

## Plan

- 1) Objectifs
- 2) Système
- 3) Modèle physique et stratégie numérique
- 4) Résultats et discussions
- 5) Conclusions
- 6) Perspectives



Pour un écoulement subsonique, augmenter la section fait diminuer la vitesse et augmenter la température



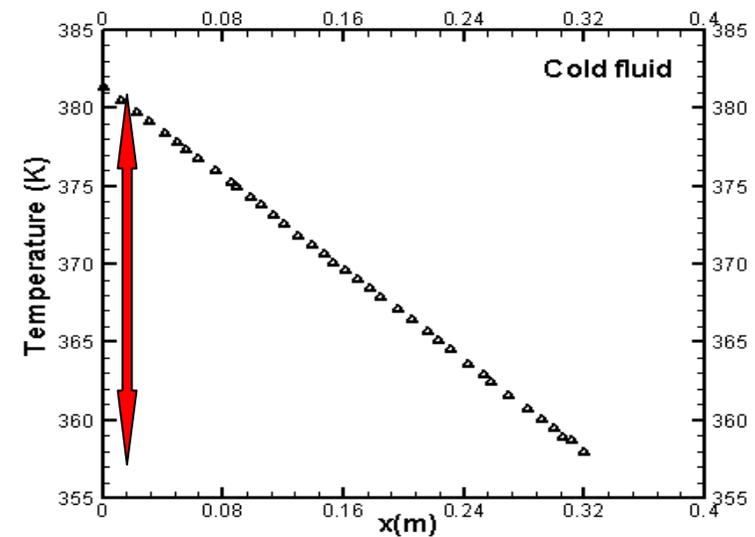
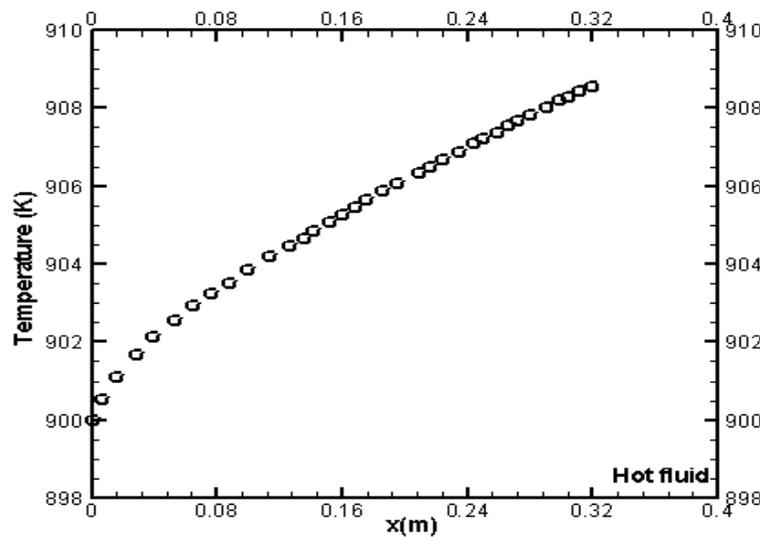
Effet tuyère prépondérant

# Résultats et discussions

## Plan

- 1) Objectifs
- 2) Système
- 3) Modèle physique et stratégie numérique
- 4) Résultats et discussions
- 5) Conclusions
- 6) Perspectives

## *Profils de température le long de la tuyère* Échangeur à contre courant



Direction de l'écoulement

Direction de l'écoulement



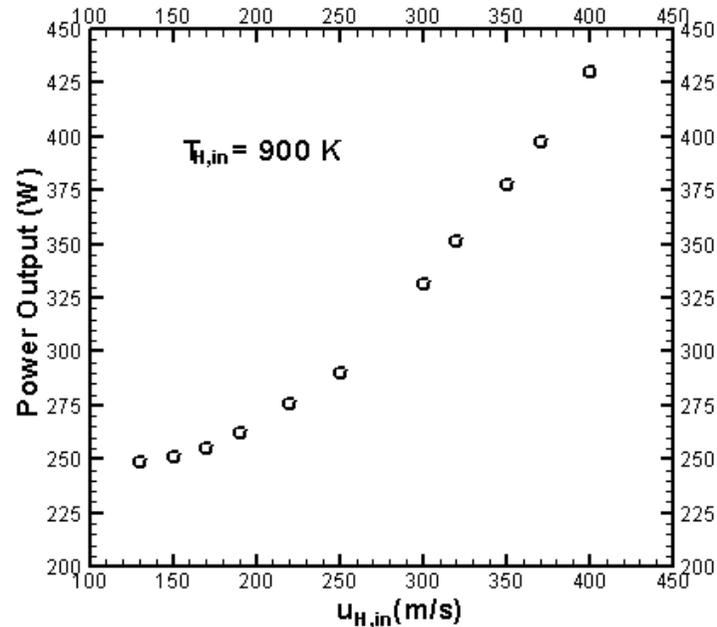
Échauffement du fluide froid

# Résultats et discussions

## *Influence de la vitesse sur la puissance électrique*

### Plan

- 1) Objectifs
- 2) Système
- 3) Modèle physique et stratégie numérique
- 4) Résultats et discussions
- 5) Conclusions
- 6) Perspectives



Amélioration du transfert thermique



Augmentation de la température moyenne des modules thermoélectriques

La vitesse dépend cependant des conditions de fonctionnement optimales du moteur de l'appareil

# Conclusions

## Plan

- 1) Objectifs
- 2) Système
- 3) Modèle physique et stratégie numérique
- 4) Résultats et discussions
- 5) Conclusions**
- 6) Perspectives

Développement d'un modèle numérique pour des modules thermoélectriques plaqués sur une tuyère utilisée en aéronautique.

Modèle basé sur des équations différentielles à une dimension utilisant les équations de conservation du fluide froid incompressible et du fluide chaud compressible et sur les équations de la thermoélectricité.

Le modèle permet de prévoir de façon détaillée les variations de pressions et températures le long de la tuyère.

Les résultats ont montré que la puissance générée dans des conditions réelles est, pour l'instant, insuffisante.

Le rapport puissance poids n'est pas suffisant

# Perspectives -Projets

## Plan

- 1) Objectifs
- 2) Système
- 3) Modèle physique et stratégie numérique
- 4) Résultats et discussions
- 5) Conclusions
- 6) Perspectives

-Validation du modèle au moyen d'un dispositif expérimental.

**Réalisation d'une double boucle instrumentés  
(gaz chaud + fluide froid) pour tester diverses  
configurations de générateurs  
thermoélectriques.**

-Exploration d'autre matériaux pour améliorer la puissance générée.

-Amélioration des échanges

-Étude de la génération électrique sur l'ensemble de l'enveloppe de vol.