

Modélisation et Simulation numérique des transferts thermiques dans les écoulements gazeux compressibles oscillants dans les régénérateurs

Khalil KHELIFI ⁽¹⁾ – Maher RADDAOUI ⁽¹⁾ – François LANZETTA ⁽²⁾

⁽¹⁾ Ecole Nationale d'Ingénieurs de Gafsa, Tunisie

⁽²⁾ François LANZETTA Institut FEMTO-ST-ENERGIE, Belfort, France

Plan

Introduction

**Dispositif
expérimental**

- **Banc d'essai**
- **Instrumentation**

**Outil
numérique**

**Conclusions et
perspectives**

Introduction

➤ Optimisation de « machines alternatives » utilisant des régénérateurs

Machines magnétocaloriques

Machines Stirling



Machines thermoacoustiques



Réduire les consommations d'énergie primaire
Réduire la production de gaz à effet de serre
Améliorer les efficacités de conversion d'énergie (chaleur, froid, électricité)

Introduction

➤ Caractéristiques des régénérateurs

- Composant crucial des machines Stirling, systèmes magnéto-caloriques et thermo-acoustiques



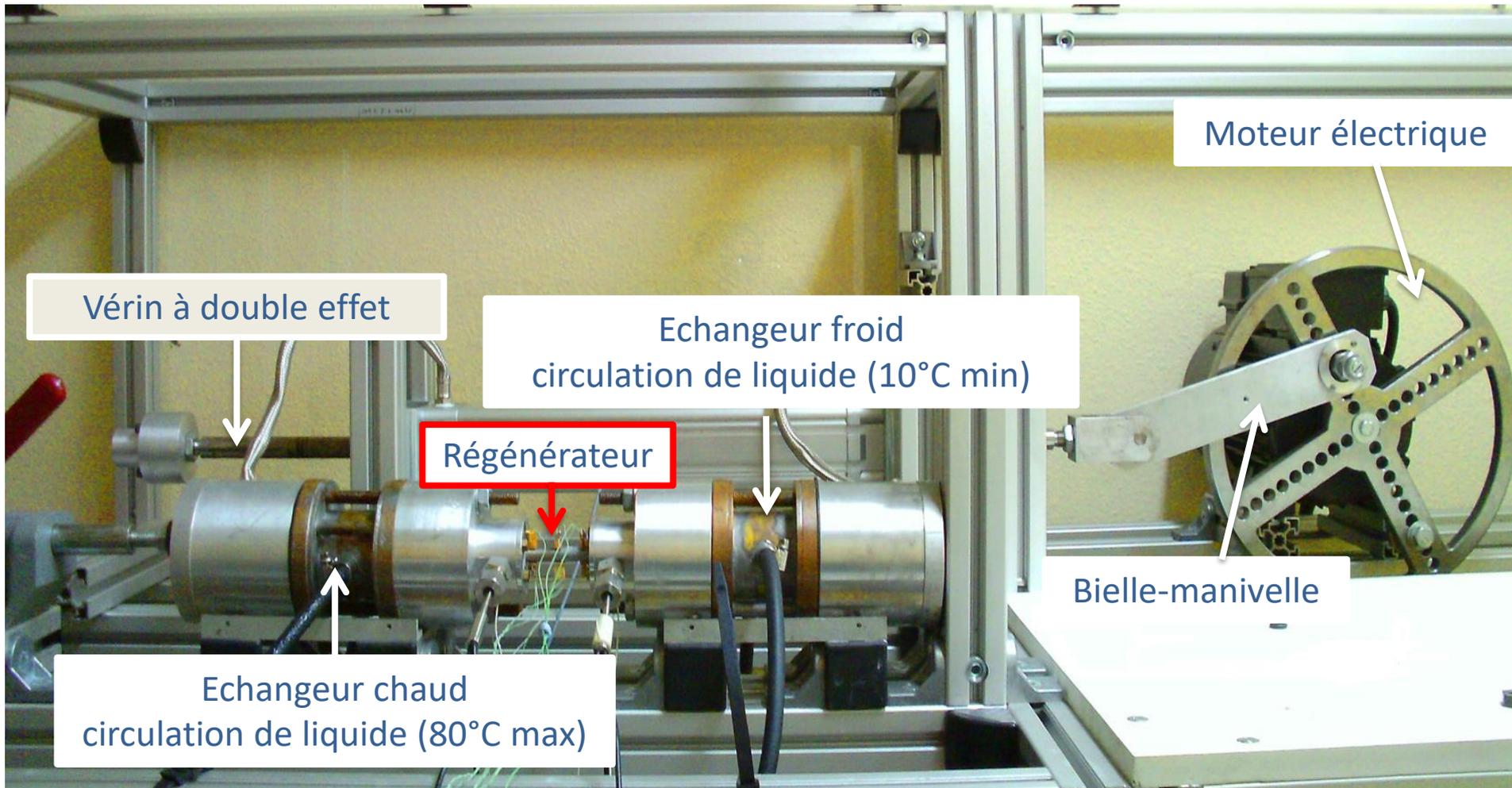
- Accumulation de chaleur dans le régénérateur lors du passage du fluide chaud
- Restitution de chaleur par le régénérateur lors du passage du fluide froid

➤ Objectifs scientifiques

- mesures des grandeurs physiques instationnaires P , V et T
- évolution du coefficient de perte de charge
- évolution de l'échange thermique

Dispositif expérimental

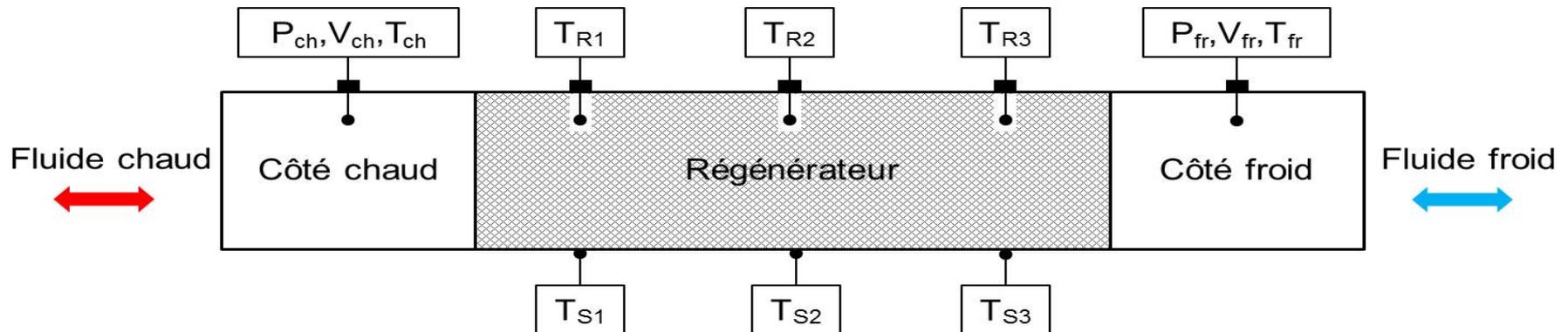
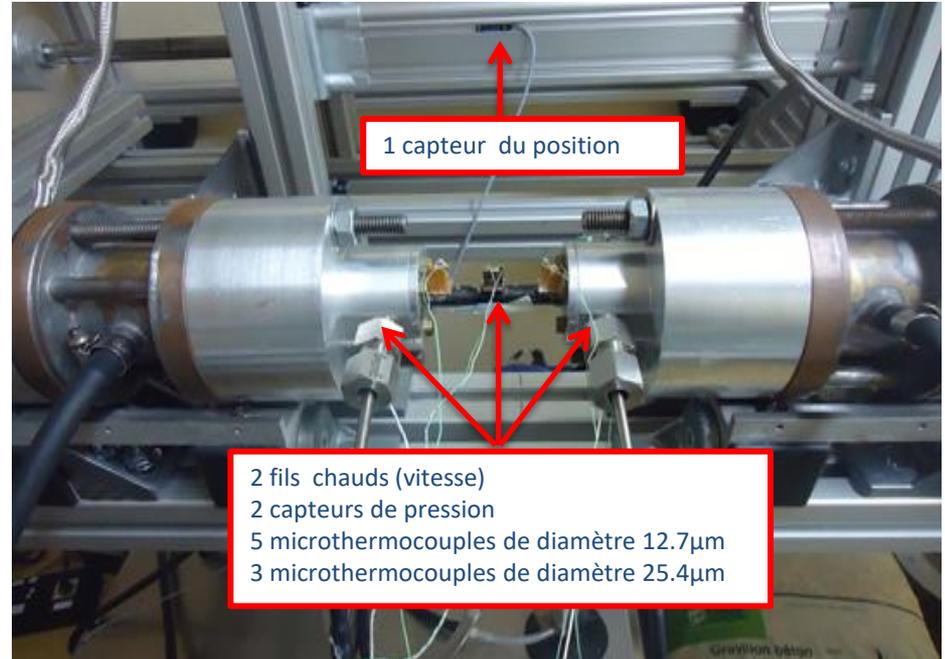
➤ Banc d'essai



Dispositif expérimental

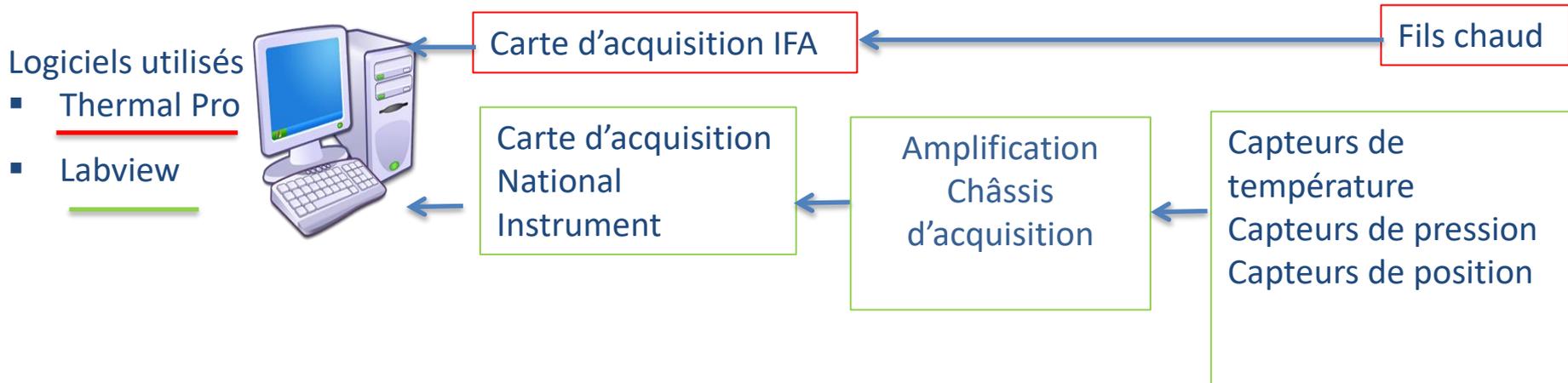
➤ Instrumentation

- Pression : capteurs piézoélectriques
- Vitesse : sondes à fil chaud CTA
- Température : microthermocouples de type K
 - ✓ du gaz
 - ✓ de la matrice solide
- Position du piston : capteur magnétique de proximité



Dispositif expérimental

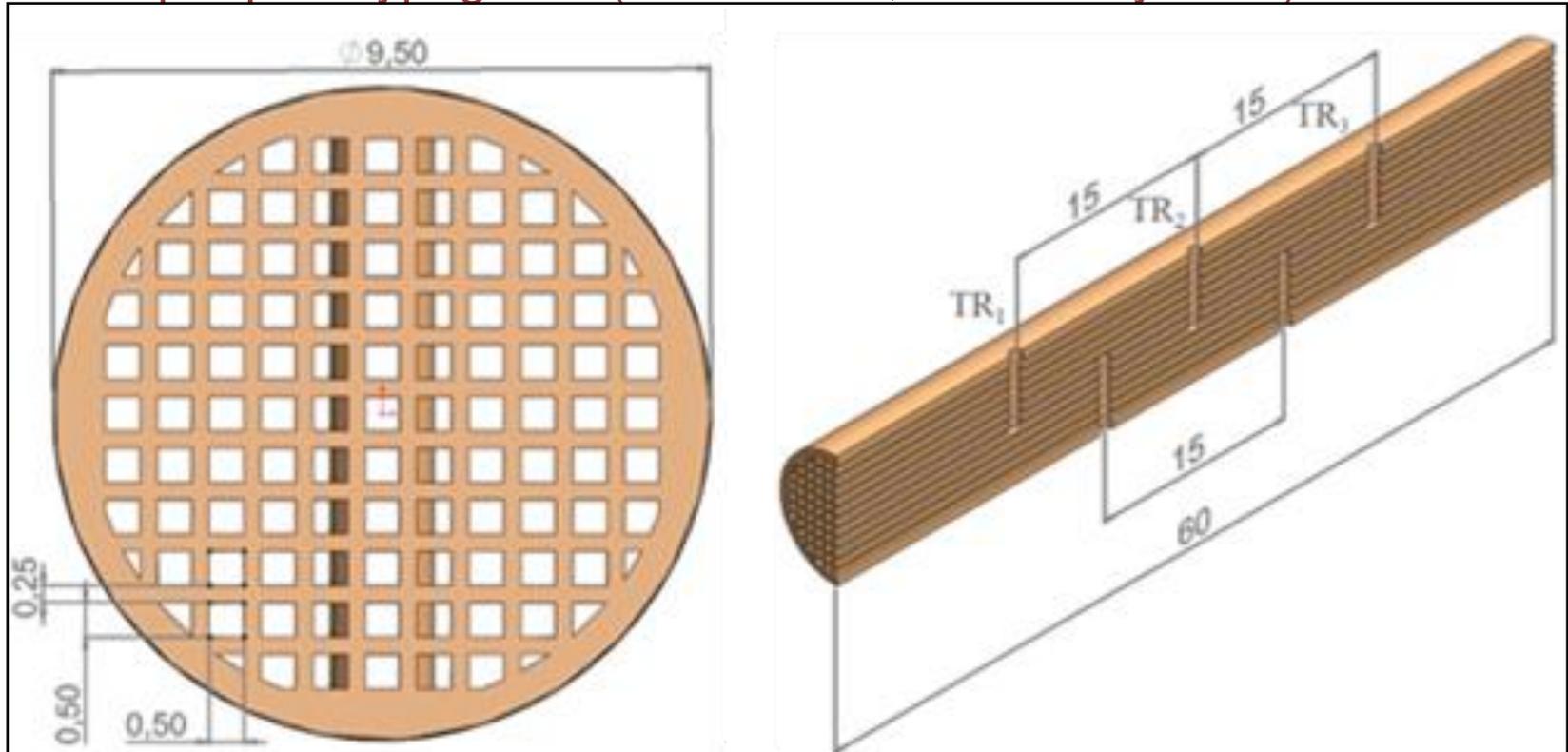
➤ Banc d'essai : deux chaînes d'acquisition de mesures



Dispositif expérimental

➤ Régénérateur

Réalisation par prototypage 3D (fusion laser, acier inoxydable)



Structure : canaux droits

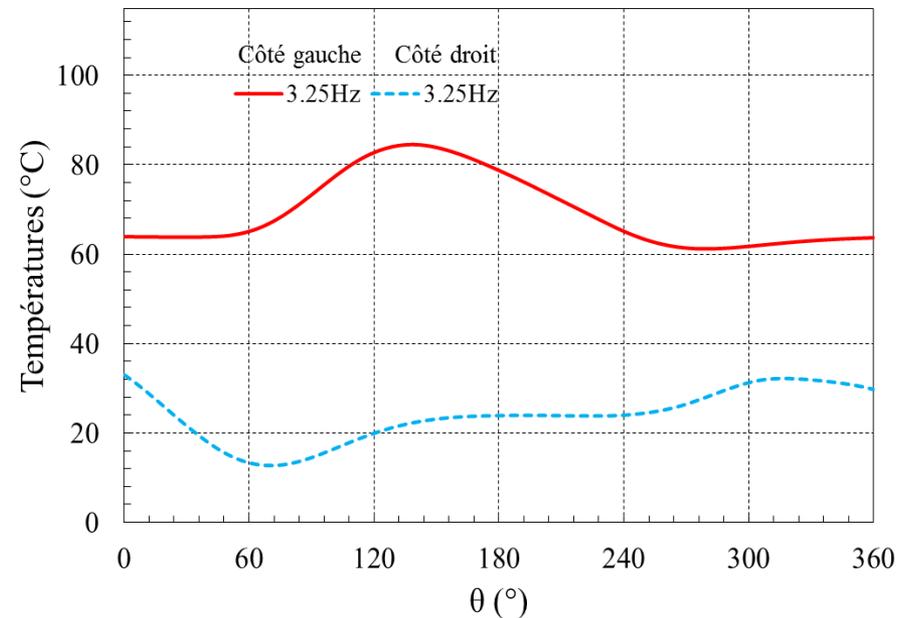
Porosité : 35%

Travaux antérieurs

- ❖ Thèse, Mohamed Saïd KAHALERAS (Étude expérimentale des transferts thermiques et des coefficients de perte de charge pour les écoulements gazeux alternés au sein des régénérateurs)

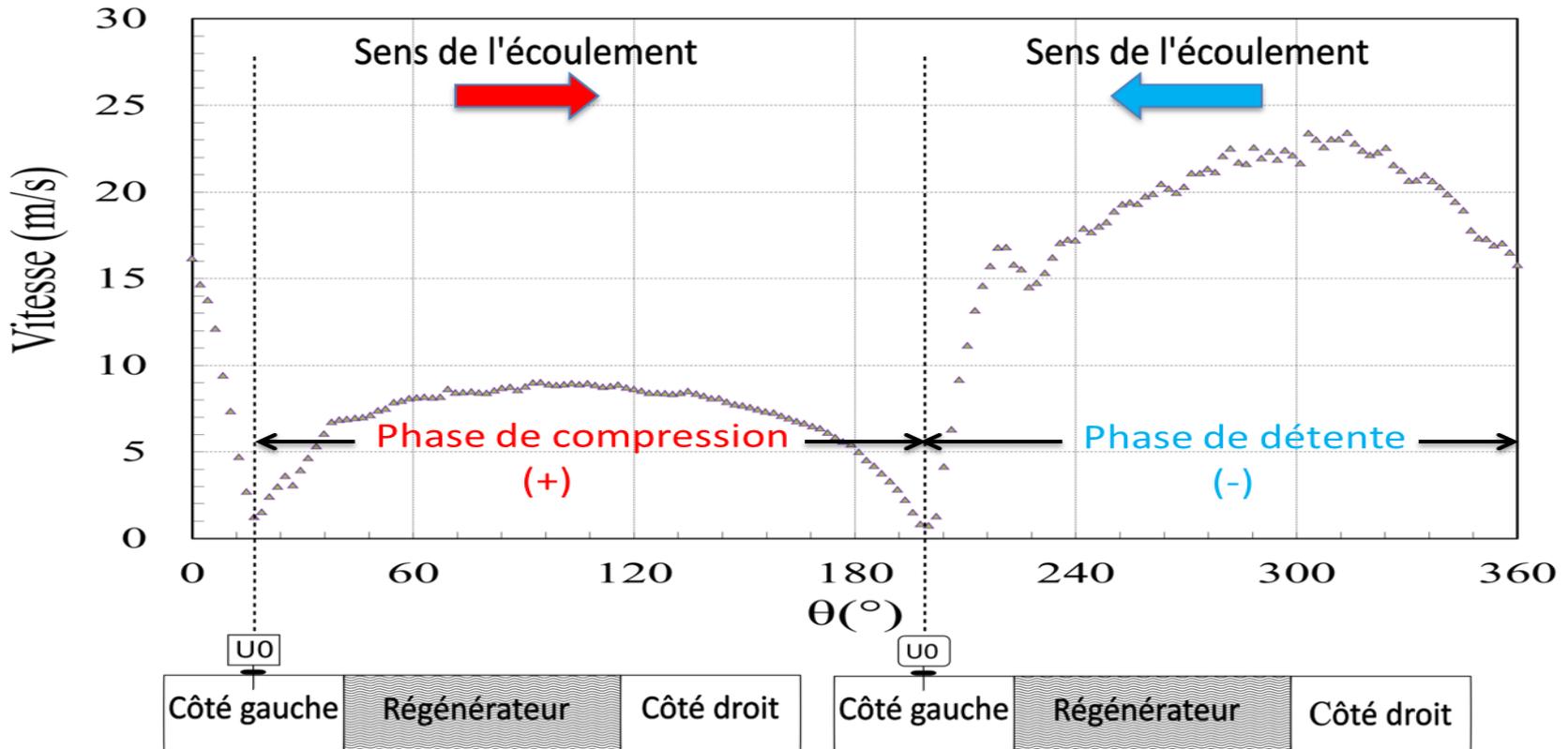
➤ Evolution de la température aux extrémités du régénérateur

- Evolutions dissymétriques
- T chaude moyenne \approx T échangeur chaud
- T froide moyenne $>$ T échangeur froid

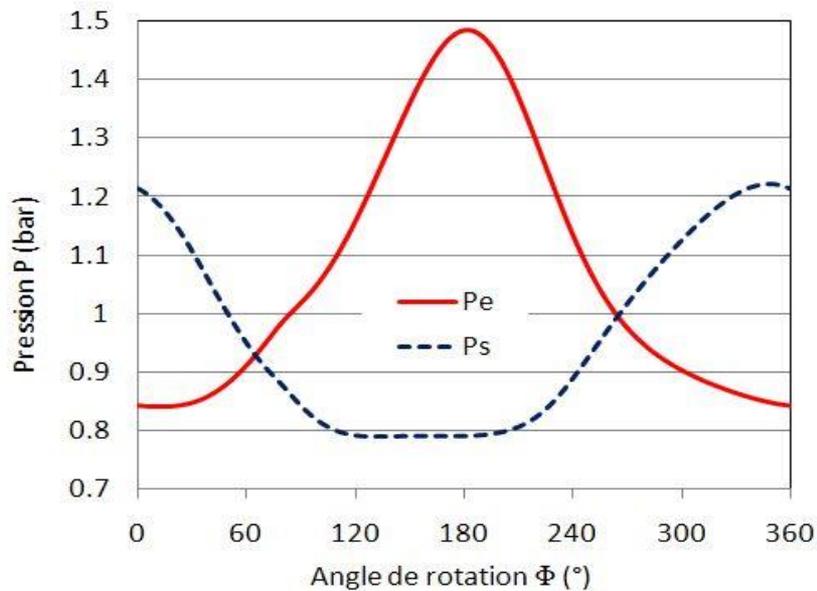


L1=60mm; C1=64.4mm et $\Delta T_2=70^\circ\text{C}/10^\circ\text{C}$

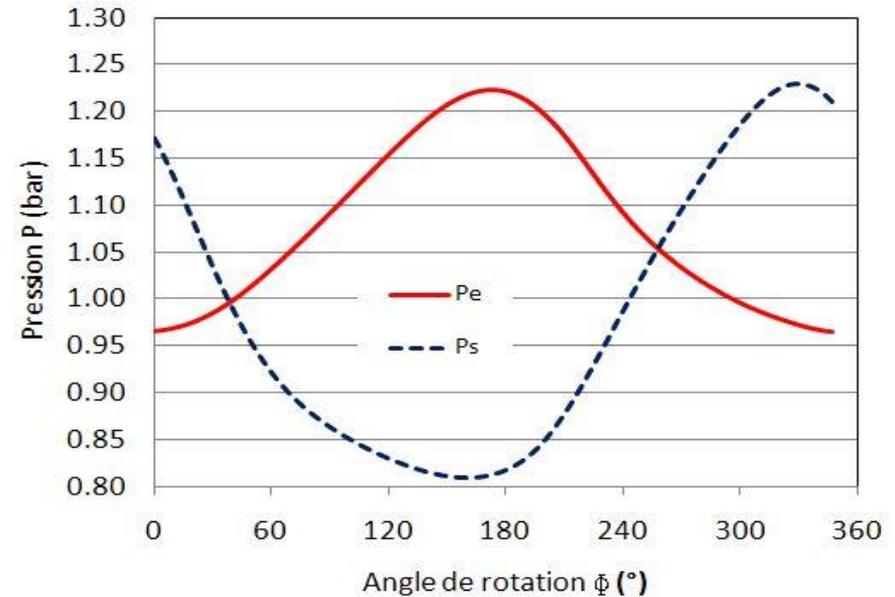
➤ Évolution de la vitesse du fluide durant les phases de compression et de détente



➤ Pressions instantanées aux deux extrémités du régénérateur en fonction de l'angle de rotation

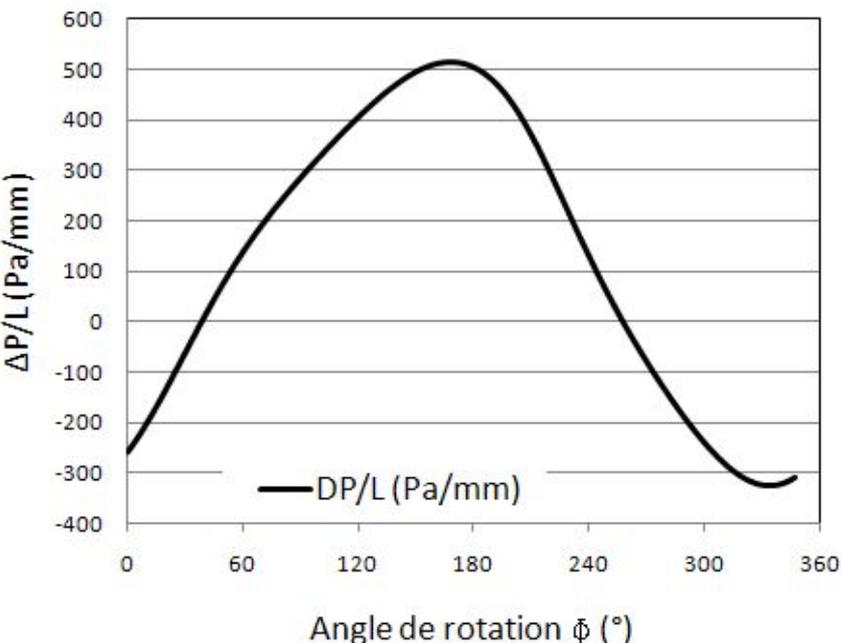


($f = 6$ Hz, $\Delta T = 40^\circ\text{C}$)

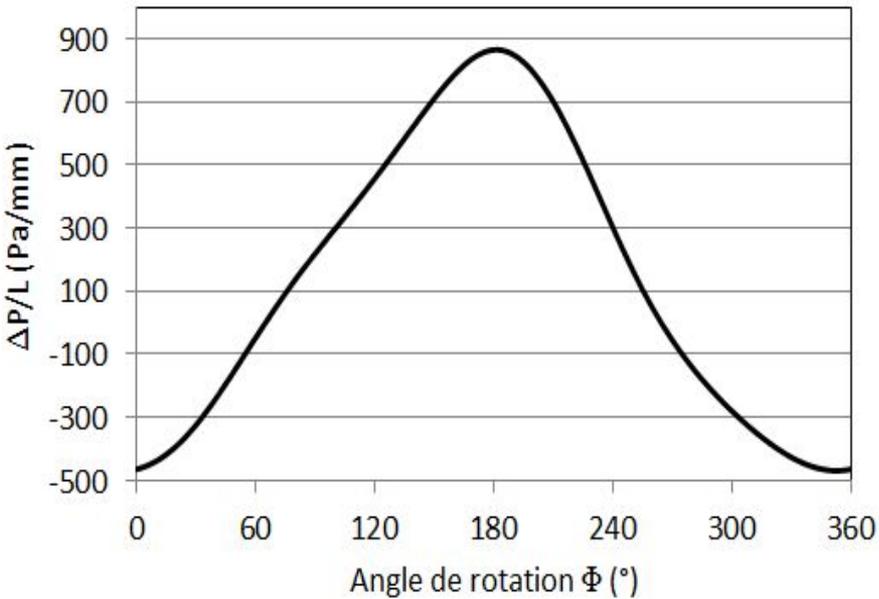


($f = 6$ Hz, $\Delta T = 0^\circ\text{C}$)

➤ Perte de charge linéaire du régénérateur



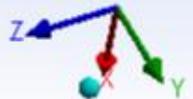
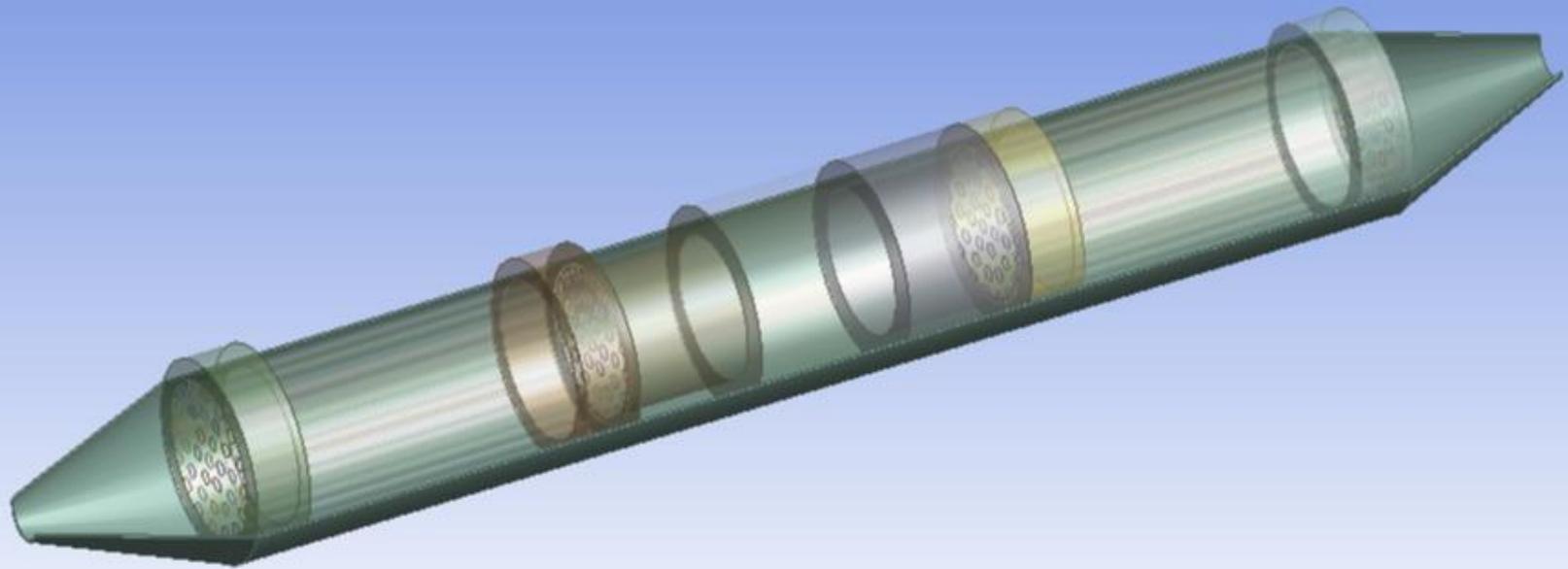
(f = 6 Hz, $\Delta T = 0^\circ$)



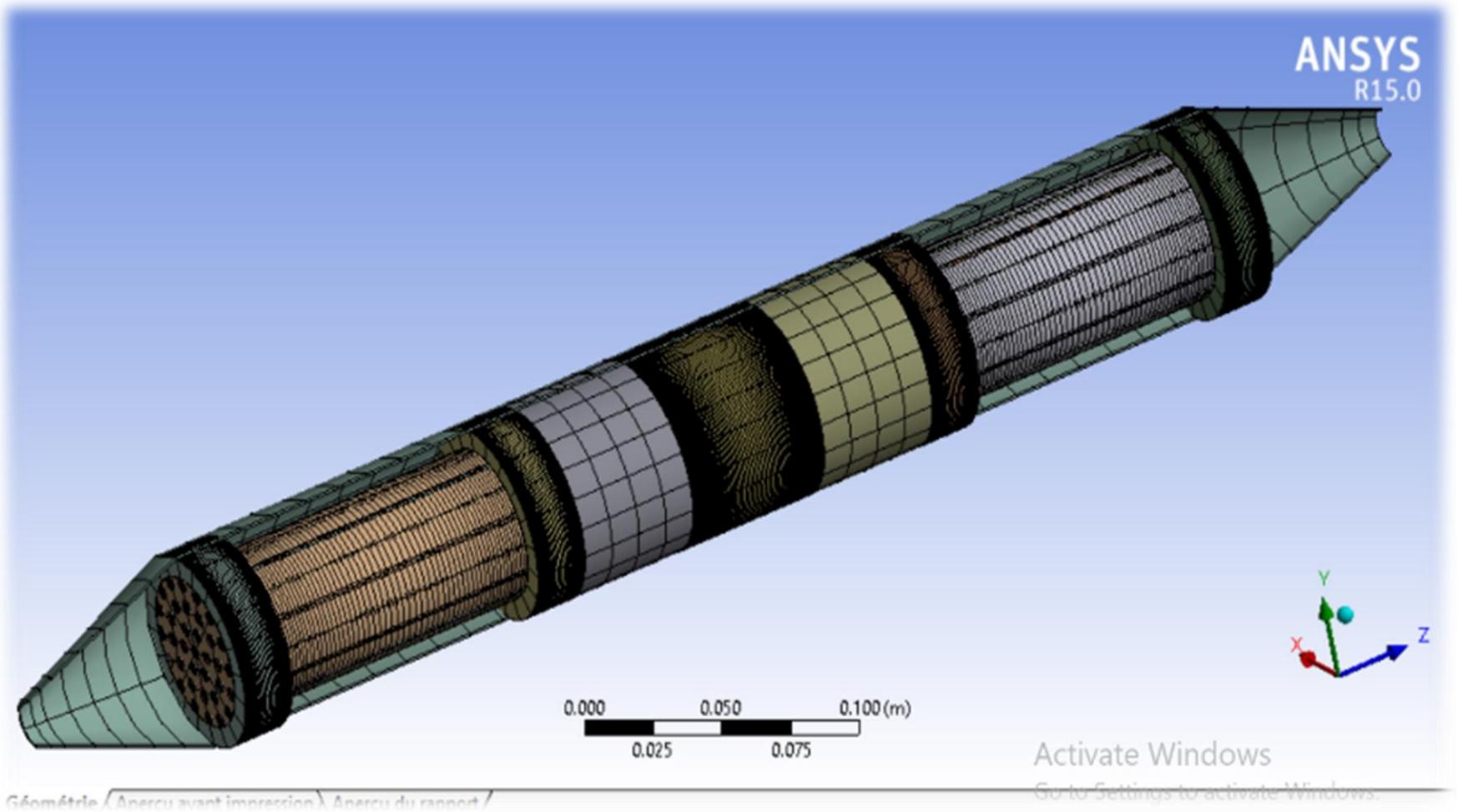
(f = 6 Hz, $\Delta T = 40^\circ\text{C}$)

Modélisation de l'écoulement

ANSYS
R15.0



Maillage



Conditions limites

- Deux cas étudiés avec ou sans échange thermique
- — “Velocity inlet” imposée à l’entrée du domaine fluide. L’amplitude ainsi que la direction de la vitesse sont définies
- — “Wall” avec une condition de non-glissement à la paroi imposée à l’interface fluide/solide, les parois sont considérées adiabatique
- — “Symmetry” est définie pour les plans de symétrie que comporte la géométrie modélisée
- — “Pressure inlet” imposée en sortie pour définir la pression relative statique du fluide sortant du domaine

Modèle utilisé: k-ε

- Équation de conservation de la masse

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0$$

- Équation de conservation de la quantité de mouvement

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial (u_j u_i)}{\partial x_j} = - \frac{1}{\rho_f} \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\nu_f \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right]$$

- Équation de température

$$\rho_f C_{p,f} \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} u_i T \right) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\lambda_f \frac{\partial T}{\partial x_i} \right)$$

Conclusions

- ❑ Mise en œuvre d'un banc d'essai instrumenté de caractérisation des écoulements alternés au sein des régénérateurs
- ❑ La température du gaz dans un régénérateur oscille au cours du temps et ne peut pas être considérée comme linéaire dans la direction de l'écoulement
- ❑ Déphasage de **90°** entre la perte de charge linéaire (valeur maximale à **$\phi=180^\circ$**) et la vitesse (valeurs maximales à **$\phi= 90^\circ$ et $\phi= 270^\circ$**)
- ❑ les énergies stockées et déstockées varient périodiquement au cours d'un cycle sous les effets des variations temporelles déphasées de la vitesse, de la pression et de la température
- ❑ Validation du modèle numérique par comparaison avec les résultats expérimentaux

Perspectives

- ❑ Obtenir et exploiter des résultats expérimentaux pour :
 - de plus hautes fréquences ($6 < Fr < 50$ Hz voir au-delà)
 - différentes porosités d'une même structure de régénérateur ($\varepsilon \rightarrow 0,90$)
 - de plus grands gradients de température ($0 < \Delta T < 800$ °C)

- ❑ Travailler sur des valeurs efficaces des grandeurs thermo-physiques et adimensionnelles

- ❑ Approfondir le travail sur les définitions des coefficients de perte de charge et de transfert de chaleur

Merci pour votre attention