femto-st
sciences & technologies

FC LAB
Systèmes pile à combustible

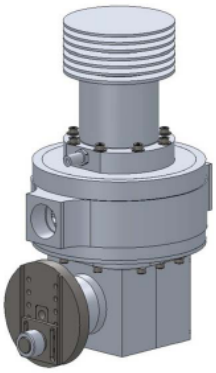
Représentation Énergétique Macroscopique (REM):

Application au Moteur Stirling en vue d'un couplage avec une pile à combustible à oxyde solide

Charly GAY, François LANZETTA, Daniel HISSEL
Université de Franche-Comté, France

Michel FEIDT
Université de Nancy, France

- Présentation de la Représentation Énergétique macroscopique (REM)
- Identification des flux énergétiques au sin du moteur Stirling
- Transcription sous REM
- Premiers résultats de modélisation
- Modélisation REM de la pile SOFC
- Validation expérimentale de la pile SOFC
- Discussion



- Fondements
  - Causalité Intégrale
  - Action / Réaction
  - Échange de Puissance

Puissance	Variable effort	Variable flux
Électrique	Tension [V]	Courant [A]
Mécanique (translation)	Force [N]	Vitesse [$m.s^{-1}$]
Mécanique (rotation)	Couple [$N.m$]	Vitesse angulaire [$rad.s^{-1}$]
Hydraulique	Pression [$N.m^{-2}$]	Débit [$m^3.s^{-1}$]
Thermique	Température [T]	Flux d'entropie [$W.K^{-1}$]
Chimique	Énergie libre [$J.mol^{-1}$]	Débit molaire [$mol.s^{-1}$]

Tableau 1 : *Expression des variables d'effort et de flux pour différents types de puissance*

femto-st
sciences & technologies

Représentation Énergétique Macroscopique (2)

- Représentation

	Source		Conversion multi physique		Inversion d'un élément de conversion
	Conversion mono physique		Couplage multi physique		Inversion d'un élément d'accumulation
	Couplage mono physique		Élément d'accumulation		

- Structure Maximale de Commande (SMC)
  - Inversion des blocs REM
  - Déduction Simple du positionnement des capteurs

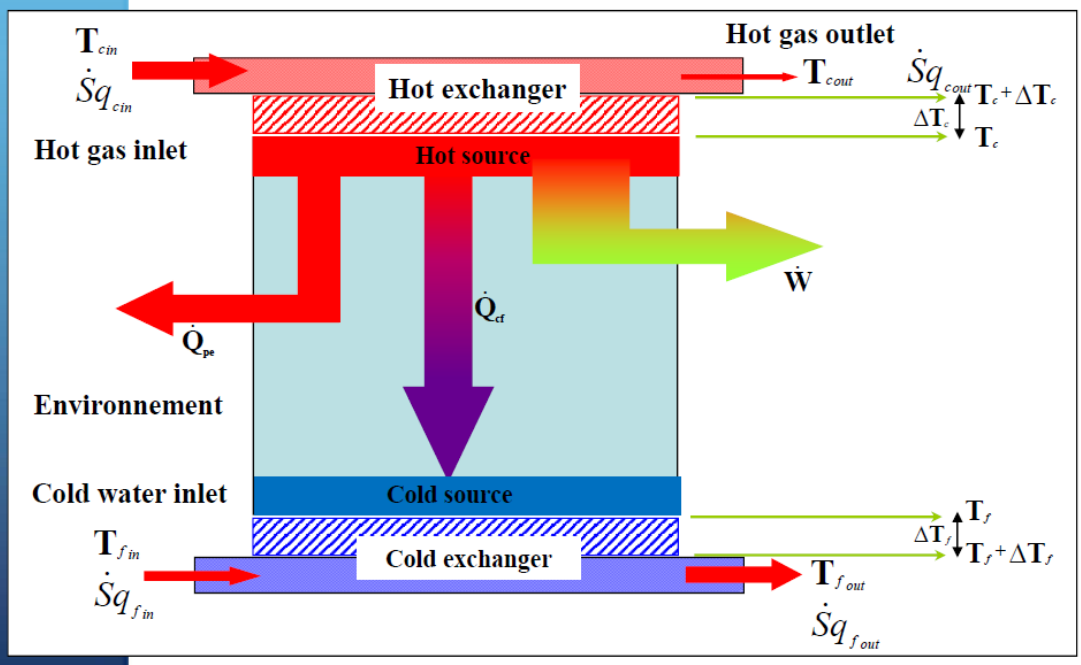
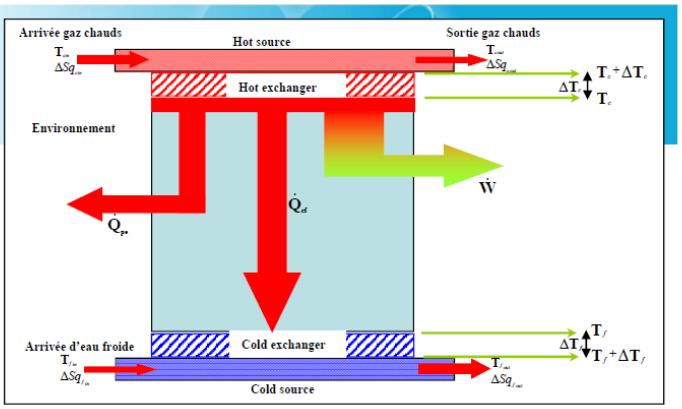


Figure 1 : *Répartition des flux de d'énergie au sein du moteur Stirling*

femto-st
sciences & technologies

Figure 1 : *Répartition des flux de d'énergie au sein du moteur Stirling*



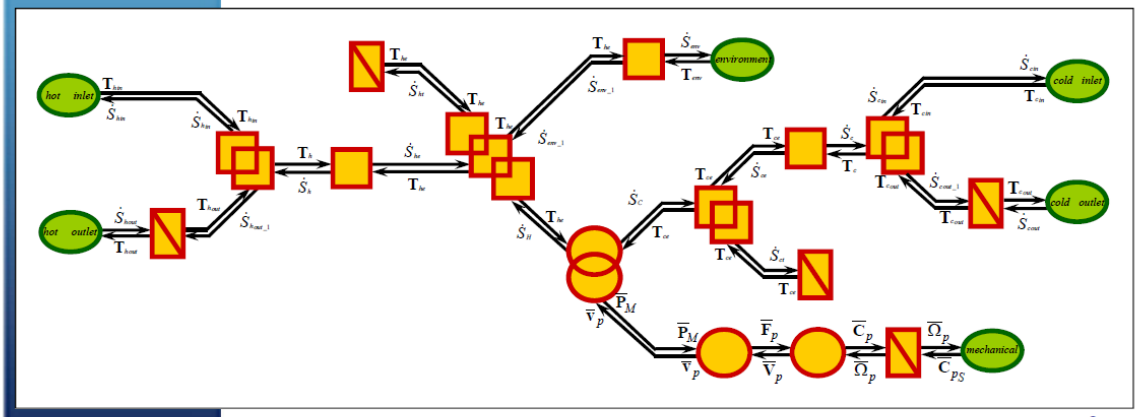
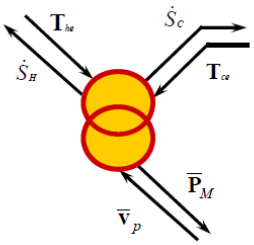


Figure 2 : *REM Globale du moteur Stirling selon l'analyse de Schmidt*

Couplage thermomécanique

Figure 3 :

REM du Couplage thermomécanique



$$\overline{P}_M = \left(\frac{m \cdot R}{V_p}\right) \cdot \left(T_{he} \cdot \ln\left(\frac{V_d + V_p + K \cdot T_{he}}{V_d + K \cdot T_{he}}\right) - T_{ce} \cdot \ln\left(\frac{V_d + V_p + K \cdot T_{ce}}{V_d + K \cdot T_{ce}}\right)\right)$$

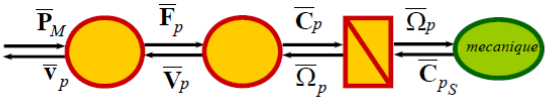
$$K = \frac{V_{Mh}}{T_{he}} + \frac{V_{Mr}}{T_r} + \frac{V_{Mc}}{T_{ce}} \qquad \dot{S}_H = \frac{T_{ce} \cdot \dot{S}_C + \overline{P}_M \overline{v}_p}{T_{he}} \qquad \dot{S}_C = \frac{\sum \dot{Q}}{T_{ce}}$$

- Imperfections (Reader and Hooper)
  - Régénérateur $\dot{Q}_r = \dot{m}_r \cdot C_p \cdot (T_{he} - T_{ce}) \cdot (1 - \varepsilon_r)$ $\quad \varepsilon_r = \dfrac{h_r \cdot S_{er}}{h_r \cdot S_{er} + 2 \cdot \dot{m}_r \cdot C_p}$
  - Conduction $\dot{Q}_{cond,i} = \dfrac{\lambda_i \cdot S_i}{L_i}(T_{he} - T_{ce})$ $\quad \lambda_{42} = \lambda_g \dfrac{\lambda_g \cdot \varepsilon + \lambda_m \cdot (2 - \varepsilon)}{\lambda_g \cdot (2 - \varepsilon) + \lambda_m \cdot \varepsilon}$
  - Navette du piston $\dot{Q}_p = \dfrac{0.4 \cdot c^2 \cdot \lambda_g \cdot D_p \cdot (T_{he} - T_{ce})}{x_g \cdot L_p}$

Bilan mécanique

Figure 4 :

REM du couplage mécanique du moteur Stirling



- Transformations
  - Piston

$$\overline{F}_p = \overline{P}_M \cdot S_p \qquad \overline{v}_p = \overline{V}_p \cdot S_p$$

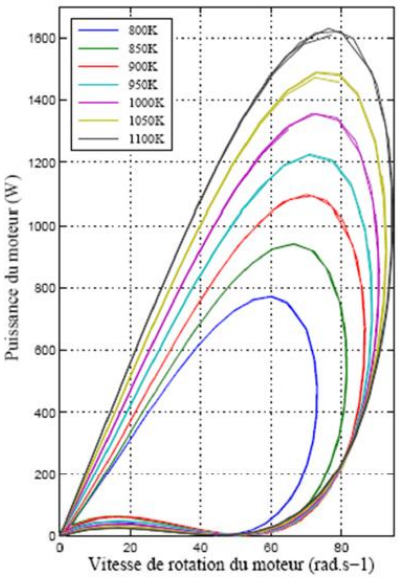
  - Système bielle manivelle

$$\overline{V}_p = 2 \cdot c \cdot \frac{2 \cdot \pi}{60} \cdot \overline{\Omega}_p \qquad \overline{C}_p = 2 \cdot c \cdot \frac{2 \cdot \pi}{60} \cdot \overline{F}_p$$

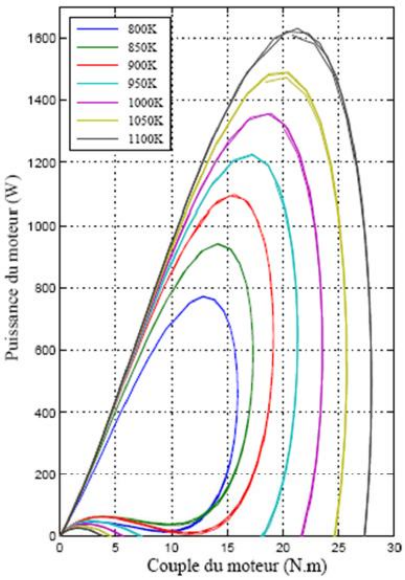
  - Dynamique et frottements mécaniques

$$J_{meca} \cdot \frac{d\overline{\Omega}_p}{dt} + f \cdot \overline{\Omega}_p = C_{ps} - C_p$$

Résultats de simulation: Courbes de puissance



Figures 5 : *Puissance en fonction de la vitesse*



Figures 6 : *Puissance en fonction du couple*

Influence des pertes sur la puissance et l'efficacité du moteur

Température source chaude: 1000 K

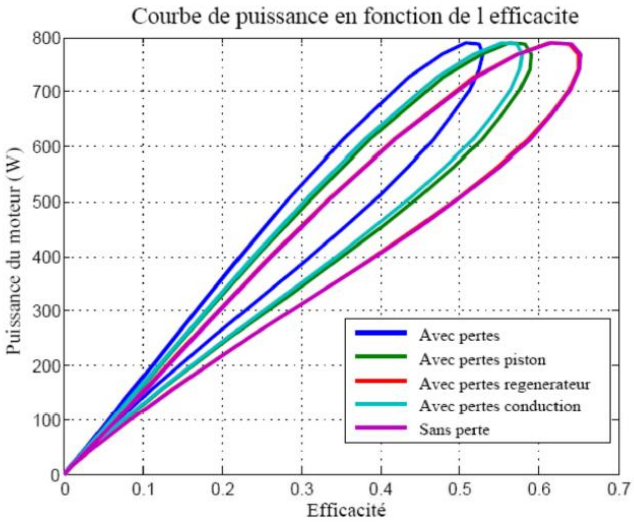


Figure 7 : *Courbes de puissance en fonction de l'efficacité (sans échangeurs)*

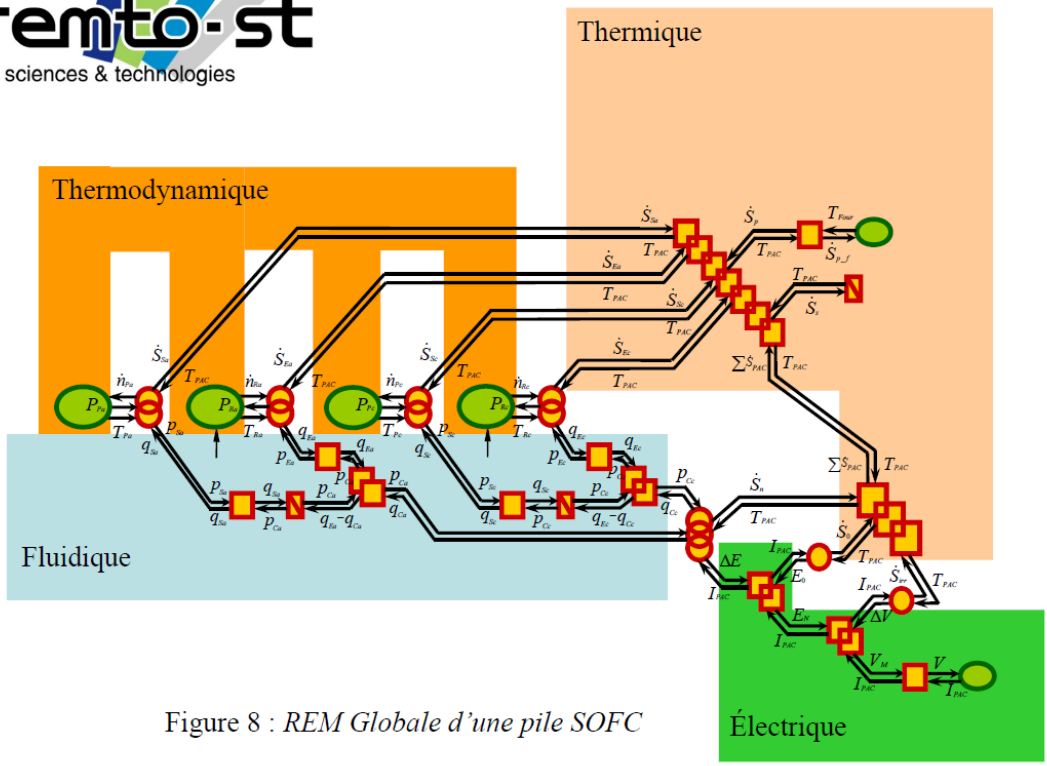
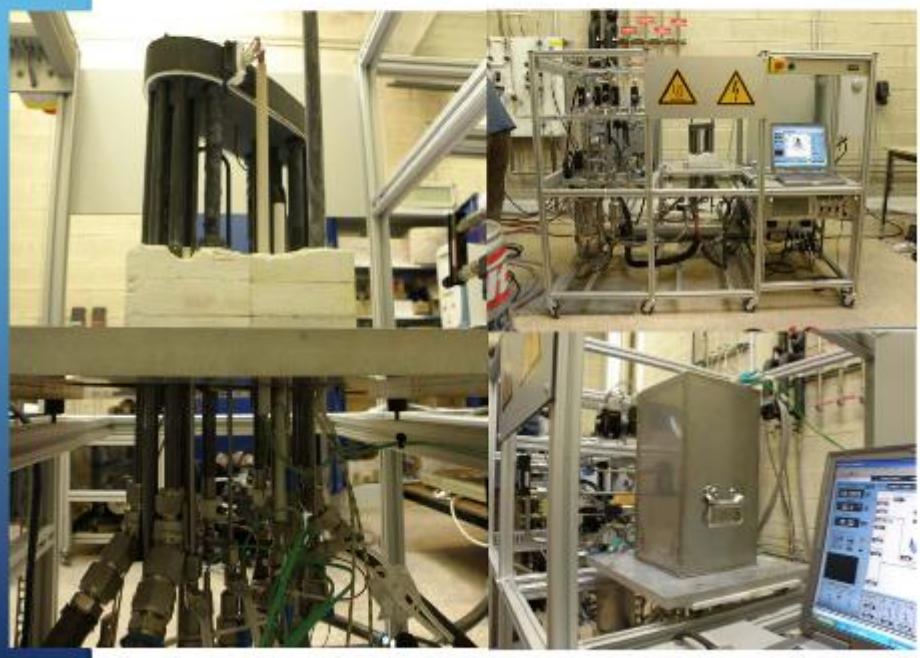


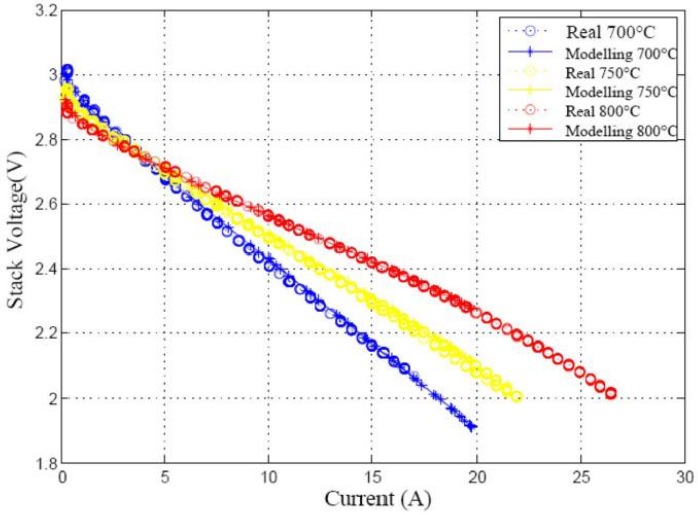
Figure 8 : *REM Globale d'une pile SOFC*

Banc d'essai SOFC



Simulation et résultats expérimentaux

► Validation expérimentale de la partie électrique du modèle REM



Figures 9 : *Courbes de Polarisation pour différentes températures de fonctionnement d'un stack HT Ceramix S-Design (3 Cellules)*

Couplage REM SOFC / Moteur Stirling

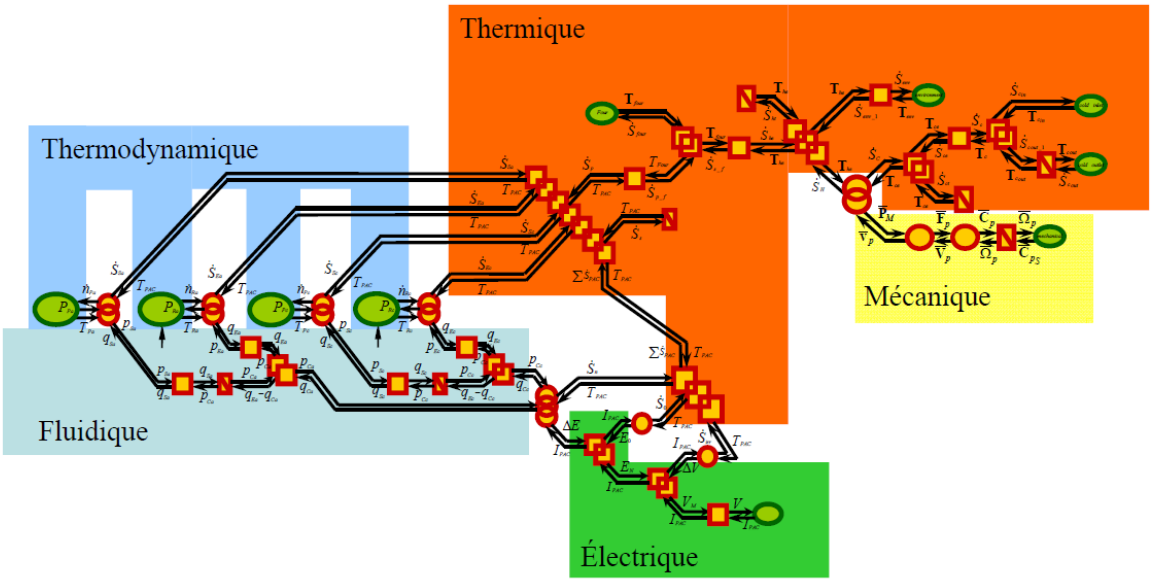


Figure 10 : *REM Globale du couplage SOFC / Moteur Stirling*

Conclusions et perspectives

- Conclusions
  - Intérêts certain de l'utilisation de la REM pour les systèmes multi-physiques complexes
  - Sujet encore peu exploré, mais prometteur
  - Thème Réaliste – nombreuses applications (Stationnaire et gros transport)
- Perspectives
  - Validation expérimentale du modèle Stirling
  - Validation expérimentale de la partie thermique de la pile
  - Déduction de la structure maximale de commande du système
  - Étude des flux d'énergie en vue d'un optimisation du système
  - Intérêt de l'approche REM en vue du contrôle dynamique du moteur Stirling
  - Discussion de l'association REM / exergie

Merci de votre attention