

ETUDE THERMODYNAMIQUE D'UNE PILE A COMBUSTIBLE A OXYDE SOLIDE (SOFC) POUR LES UTILISATIONS STATIONNAIRES

R. Touaibi *¹, N. Ait Messaoudene², B. khelidj¹, M. Tahar Abbas³
¹ Département de génie climatique, Centre universitaire de khemis Miliana, Algérie
² Département de génie Mécanique, Université Saad Dahleb de Blida, Algérie,
³ Département de génie Mécanique, Université de chlef, Algérie
¹ rabahtouaibi2007@yahoo.fr

RESUME

Durant les dernières années, deux nouveaux axes de développement du domaine de la production d'énergie électrique ont pris une grande importance, il s'agit des micro-turbines avancées et des piles à combustible SOFC (solid oxide fuel cell). Le présent travail a pour but de faire une étude du potentiel thermodynamique de l'intégration d'une pile à combustible SOFC avec une turbine à gaz. L'un des résultats recherché est de déterminer les besoins en combustible de la pile SOFC en fonction de l'énergie produite. Les résultats montrent que le rendement du système hybride est nettement meilleur que celui d'une turbine à gaz seule. Toutefois et en raison des pertes électriques, le rendement atteint une valeur limite à partir d'une certaine puissance de la pile à combustible.

NOMENCLATURE

| | | | Indices |
|-----------------|-----------------------------|-------------------|--------------------------|
| A | Surface | (m ²) | |
| W | puissance électrique | (W) | |
| E _{eq} | Force électromotrice | (V) | GT Turbine à gaz |
| F | Constante de faraday | (C) | OHM Ohmique |
| R | Constante molaire des gaz, | (j/mole.k) | ACTIV Activation |
| T | Température thermodynamique | (K) | SOFC Pile à oxyde solide |
| I | Courant | (A) | e: Entrée |
| C _p | Chaleur spécifique | (j/mole.k) | s : sortie |
| <i>m</i> | Débit massique | (kg/s) | |

1. INTRODUCTION

Les besoins énergétiques mondiaux continuent à croître rapidement, en particulier dans les pays en voie de développement, alors que les réserves s'épuisent progressivement ou les statistiques les plus pessimistes prévoient une pénurie certaine vers 2040. L'utilisation des combustibles fossiles donne lieu en outre deux inconvénients majeurs, l'émission de nombreux polluants et de gaz à effet de serre. La pile a combustible se présente comme une source d'énergie électrique alternative, elle met en jeu une réaction électrochimique entre un combustible comme l'hydrogène ou le méthanol et un comburant qui est généralement de l'oxygène pris dans l'air. Dans la pile à combustible la structure (électrode, électrolyte, et sites réactifs) ne réagit pas et reste invariante avec le temps, il reste donc à fournir en permanence des réactifs (combustible et comburant) et à évacuer les produits de la réaction, eau, chaleur et électricité. L'objectif de ce travail est de présenter les perspectives que l'on peut attendre de la technologie d'un système hybride pile à combustible (SOFC) avec turbine à gaz pour les applications stationnaires de production d'électricité.

2. MODELISATION DE LA PILE A OXYDE SOLIDE (SOFC)

Le fonctionnement de la pile est basé sur une oxydoréduction électrochimique du combustible. La technologie la plus utilisée dans le système hybride est celle du type tubulaire [1].

2.1 Bilans massiques et énergétiques

2.1.1 Le mélangeur

Le mélangeur est un éjecteur, où le carburant frais et la fraction recyclée sont mélangés avant d'entrer dans le reformeur [6].

Les équations (1) et (2) expriment la conservation de masse et d'énergie par le processus de mélange.

Bilan massique

$$\begin{cases} CH_4^s = CH_4^e 1 + CH_4^e 2 \\ H_2^s = H_2^e 1 + H_2^e 2 \\ H_2O^s = H_2O^e 1 + H_2O^e 2 \\ CO^s = CO^e 1 + CO^e 2 \\ CO_2^s = CO_2^e 1 + CO_2^e 2 \end{cases} \quad (1)$$

Bilan énergétique

$$\begin{aligned} & (Cp_{CH_4}^e \cdot CH_4^e + Cp_{H_2}^e \cdot H_2^e + Cp_{H_2O}^e \cdot H_2O^e + Cp_{CO}^e \cdot CO^e + Cp_{CO_2}^e \cdot CO_2^e) T^e = \\ & (Cp_{CH_4}^s \cdot CH_4^s + Cp_{H_2}^s \cdot H_2^s + Cp_{H_2O}^s \cdot H_2O^s + Cp_{CO}^s \cdot CO^s + Cp_{CO_2}^s \cdot CO_2^s) T^s \end{aligned} \quad (2)$$

2.1.2 Le reformeur

Dans le reformeur les hydrocarbures sont convertis en mélange de (CO, CO_2, H_2, H_2O, CO) par le vapo-reformage à l'aide de la vapeur contenue dans les gaz d'échappement partiellement recyclé.

Bilan Massique

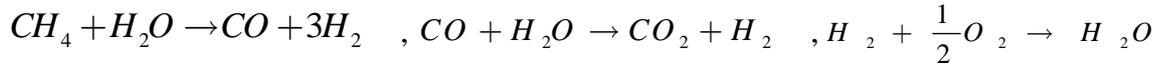
$$\begin{cases} CH_4^s = CH_4^e - X \\ H_2^s = H_2^e + 3X + Y \\ H_2O^s = H_2O^e - X - Y \\ CO^s = CO^e + X - Y \end{cases} \quad (3)$$

Bilan énergétique

$$\begin{aligned} & (Cp_{CH_4}^e \cdot CH_4^e + Cp_{H_2}^e \cdot H_2^e + Cp_{H_2O}^e \cdot H_2O^e + Cp_{CO}^e \cdot CO^e + Cp_{CO_2}^e \cdot CO_2^e) T^e + X (-\Delta H_{ref}) + Y (-\Delta H_{shif}) = \\ & (Cp_{CH_4}^s \cdot CH_4^s + Cp_{H_2}^s \cdot H_2^s + Cp_{H_2O}^s \cdot H_2O^s + Cp_{CO}^s \cdot CO^s + Cp_{CO_2}^s \cdot CO_2^s) T^s \end{aligned} \quad (4)$$

3.1.3 La cellule de combustible

Les réactions considérées à l'intérieur de la cellule de combustible sont [6] :



Le carburant est complètement reformé à l'intérieur de la cellule. Ainsi le nombre de mole de méthane (X) qui réagit dans la réaction précédente est égale au nombre de mole de méthane à l'entrée de la cellule. $X = CH_4^e$.

Bilan massique

$$\begin{cases} CH_4^s = CH_4^e - X \\ H_2^s = H_2^e + 3X + Y - Z \\ H_2O^s = H_2O^e - X - Y + Z \\ CO^s = CO^e + X - Y \\ CO_2^s = CO_2^e + Y \end{cases} \quad (5)$$

Où Z : Nombre de mole de H_2O formé.

Bilan énergétique

Le bilan énergétique inclut la puissance électrique et les changements d'enthalpie des réactions chimique (ΔH_{ref} de reformation, ΔH_{shif} de conversion et ΔH de réaction électrochimique) est permet de calculer la température de sortie des gaz [5].

$$\begin{aligned} & (Cp_{CH_4}^e \cdot CH_4^e + Cp_{H_2}^e \cdot H_2^e + Cp_{CO}^e \cdot CO^e + Cp_{CO_2}^e \cdot CO_2^e + Cp_{O_2}^e \cdot O_2^e + Cp_{N_2}^e \cdot N_2^e) T^e - W_{elec} + X (-\Delta H_{ref}) \\ & + Y (-\Delta H_{shif}) + Z \cdot (-\Delta H) = (Cp_{CH_4}^s \cdot CH_4^s + Cp_{H_2}^s \cdot H_2^s + Cp_{H_2O}^s \cdot H_2O^s + \\ & Cp_{CO}^s \cdot CO^s + Cp_{CO_2}^s \cdot CO_2^s + Cp_{O_2}^s \cdot O_2^s + Cp_{N_2}^s \cdot N_2^s) T^s \end{aligned} \quad (6)$$

3.1.4 Chambre de post combustion

Les deux flux anodique et cathodique se rencontrent à la sortie de la cellule où une réaction de combustion se produise.

Bilan massique

$$\begin{cases} H_2^s = H_2^e - w \\ H_2O^s = H_2O^e + w \\ CO^s = CO^e \\ CO_2^s = CO_2^e \\ N_2^s = N_2^e \\ O_2^e = O_2^i - \frac{w}{2} \end{cases} \quad (7)$$

Bilan énergétique

$$\begin{aligned} & (Cp_{CH_4}^e \cdot CH_4^e + Cp_{H_2}^e \cdot H_2^e + Cp_{CO}^e \cdot CO^e + Cp_{CO_2}^e \cdot CO_2^e + Cp_{O_2}^e \cdot O_2^e + Cp_{N_2}^e \cdot N_2^e) T^e + w (-\Delta H) = \\ & (Cp_{H_2}^s \cdot H_2^s + Cp_{H_2O}^s \cdot H_2O^s + Cp_{CO}^s \cdot CO^s + Cp_{CO_2}^s \cdot CO_2^s + Cp_{O_2}^s \cdot O_2^s + Cp_{N_2}^s \cdot N_2^s) T^s \end{aligned} \quad (8)$$

2.2 La tension et efficacité de la cellule SOFC

Le calcul de la tension de la cellule est effectué par ces corrélations suivantes, elles sont dérivées par l'équation de Nernst [2].

$$V_{OC} = -\frac{\Delta G}{2.F} + \frac{R_G T}{2.F} \ln \frac{P_{H_2} \cdot (P_{O_2})^{0.5}}{P_{H_2O}} \quad (9)$$

3. MODELISATION DU SYSTEME HYBRIDE (TG –SOFC)

Le fonctionnement du système hybride (pile SOFC- turbine à gaz) est représenté dans la Figure 2.

3.1 La puissance de la turbine à gaz

la puissance utile récupérée par la turbine à gaz est écrite comme suit [4].

$$W_{GT} = W_t \cdot \eta_{isen,t} - W_c \cdot \eta_{isen,c} \quad (10)$$

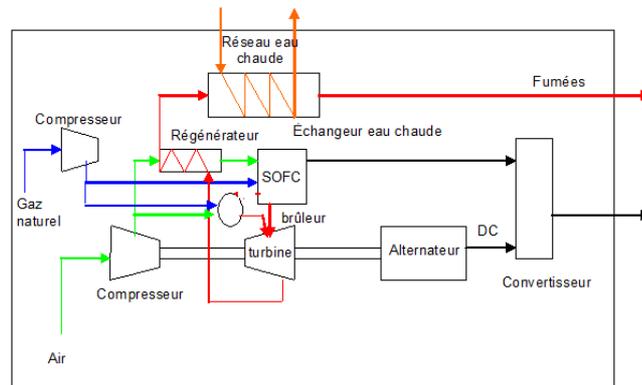


Figure 2 .Schéma de fonctionnement du système hybride SOFC-micro turbine.

3.2. Puissance de la pile SOFC

La puissance délivrée par la pile SOFC est écrite comme suite [4] :

$$W_{SOFC} = V \cdot I \quad (11)$$

3.3 .Rendement global

Le rendement global est le rapport entre la puissance totale et la puissance calorifique du combustible [4] .

$$\eta_{sys} = \frac{W_{GT} + W_{SOFC}}{(\dot{m}_{GT} + \dot{m}_{SOFC}) \cdot P_c} \quad (12)$$

4. RESULTATS ET INTERPRETATIONS

Les calculs effectués sont limités à la détermination des performances nominales. Le but principal recherché est de déterminer l'influence de quelques paramètres de fonctionnement sur le rendement global du système hybride. Il s'agit notamment la variation de la puissance du système en fonction du débit de combustible et la fraction du débit de combustible vers la pile à combustible SOFC. Cette fraction est définie comme étant le rapport entre le débit du combustible qui passe dans la pile SOFC et le débit total de combustible qui est délivré par le compresseur. Le programme de calcul de la pile à combustible SOFC est destiné à :

Calculer la puissance électrique fournie par la pile avec ces conditions de travail (une pression de 1 bar, température de 1000°C,

Composition du combustible utilisé est de 98% CH₄, 1.8 % C₂H₆, 0.1 % C₃H₈, 0.1 % C₄H₁₀, taux d'utilisation du combustible 85%).

Ce programme représente ce que l'on estime nécessaire de traiter le problème des pertes électriques (ohmiques, concentration, activation). La Figure 3 représente l'évolution des pertes électriques totales (ohmiques, activation, concentration) en fonction de la température de la pile SOFC. Les résultats montrent que les pertes électriques diminuent avec l'augmentation de la température de la pile SOFC. Donc pour augmenter l'efficacité de cela, il faut augmenter la température de fonctionnement de la pile SOFC.

Les deux figures 4 et 5 représentent l'influence du débit de combustible sur puissance délivrée par la cellule SOFC et montrent que la puissance de la pile SOFC augmente avec l'augmentation du débit de combustible mais après certains débits la puissance diminue, donc on peut dire que la pile SOFC nécessite un débit de

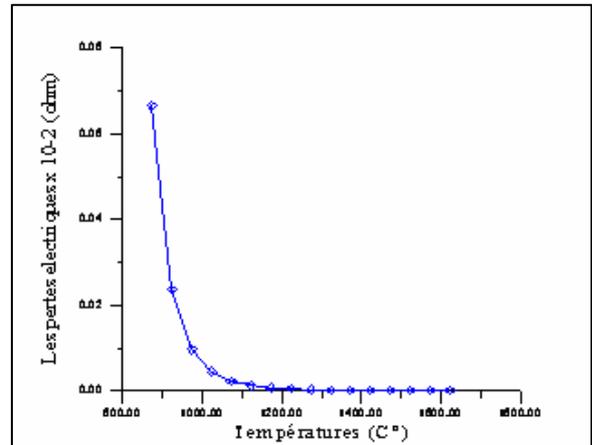


Figure 3 : variation des pertes électriques en fonction de la température de la cellule SOFC.

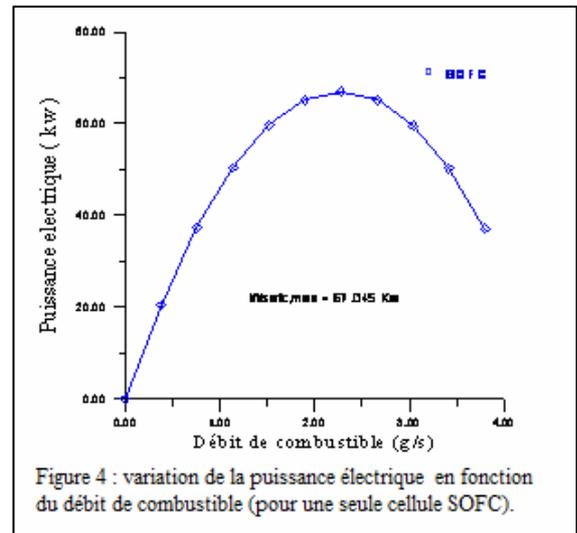


Figure 4 : variation de la puissance électrique en fonction du débit de combustible (pour une seule cellule SOFC).

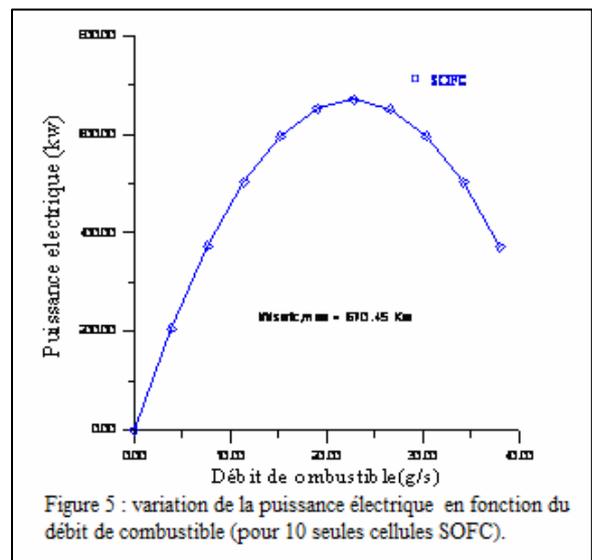
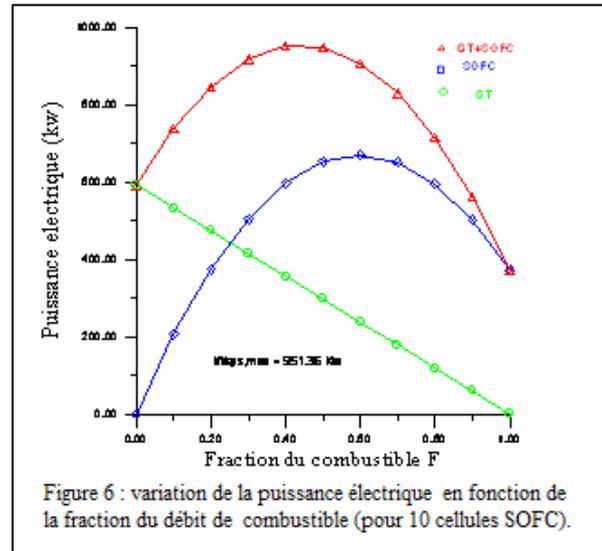


Figure 5 : variation de la puissance électrique en fonction du débit de combustible (pour 10 cellules SOFC).

Combustible bien déterminé pour être efficace.

Les Fig. 6 représente aussi la variation de la puissance électrique en fonction de la fraction du débit de combustible avec un nombre de cellules déférents ce qui nous permet de conclure que la puissance diminuée a partir de certaine fraction de débit de combustible, 60% pour la pile SOFC et 40% pour le système hybride (GT-SOFC).



5. CONCLUSION

Le système GT-SOFC est un système relativement plus simple est utilisé pour la production de l'énergie électrique, notamment dans la configuration ou la SOFC remplace la chambre de combustion du cycle de la micro turbine à gaz, donc cette étude nous a permis de noter les conclusions suivantes :

Le fonctionnement optimal de la pile SOFC est étroitement lié aux pertes électriques (ohmiques, concentration, diffusion) ce qui nécessite l'emplacement de la pile SOFC dans une température de fonctionnement plus élevée pour minimiser les pertes électriques et augmenter la puissance électrique.

L'efficacité du système hybride (GT-SOFC) est améliorée par l'augmentation de la température de fonctionnement de la pile SOFC.

Pour augmenter la puissance du système il faut augmenter le nombre de cellules de la pile SOFC.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1. S.Campanari, E Macchi., 2004, Thermodynamic analysis of advanced power cycles based upon.
2. solid oxide fuel cells, gas turbines and rankine bottoming cycles, *ASME paper 98-GT-585*.
3. Z.Federico, 2001, A tubular solid oxide fuel cell model, *Master Thesis*.
4. S.Campanari, , 2001, Thermodynamic model and parametric analysis of a tubular SOFC module, *Journal of Power Sources*, Vol. 92, 26-34.
5. K.Shinji, Performance evaluation of gas turbine-Fuel cell hybrid micro generation system, *ASME paper GT-2002-30111*.
6. S.Campanari, Potential of solid oxide Fuel cells (SOFC) based. Cycles in low-CO₂ Emission Power Generation, *ASME paper 2000-GT-580*.
7. A.Appleby, 1989, *Fuel Cell handbook*, New York.
8. B.Jean-Jacques, Systèmes de piles à combustible pour la cogénération, Rapport réalisé pour le compte de l'ADEME, 1998.