

Modélisation d'un générateur pile à combustible à électrolyte polymère

Moussa CHNANI

L2ES – UTBM, bâtiment F ; Rue Thierry Mieg ; F 90010 BELFORT Cedex ;Email : moussa.chnani@utbm.fr

Résumé— La pile à combustible est une technologie alternative pour la propulsion des véhicules électriques. Elle est entourée par des auxiliaires (échangeurs, moto-compresseur, condenseur, humidificateur...) pour assurer l'alimentation et la gestion de l'hydrogène et de l'air.

Un modèle du générateur à pile à combustible a été développé. La réponse électrique est modélisée avec une approche semi empirique. Le comportement fluidique des lignes de gaz (air + H₂) est basé sur une analogie électrique. Les lignes sont représentées par des circuits RC simple.

Les paramètres du modèle sont identifiés en utilisant des mesures expérimentales.

Le modèle du générateur a été validé sur un profil de courant constant et un profil de courant standard utilisé dans les applications transport.

I. INTRODUCTION

La pile à combustible (PAC) est un générateur de courant qui transforme l'énergie d'une réaction chimique en énergie électrique.

La pile à combustible PEFC (à électrolyte polymère) répond en tension avec sa dynamique propre à une sollicitation en courant. Celle-ci est liée aux réactions électrochimiques se déroulant aux interfaces électrode – électrolyte de la pile, à sa capacité de double couche, aux phénomènes de diffusion (fig.1).

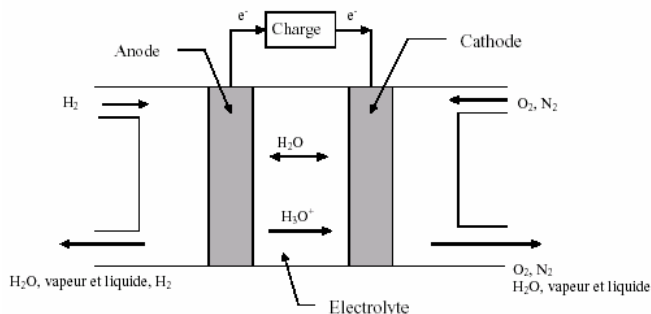


Fig. 1. Principe de fonctionnement d'une PAC [1]

Dans les applications transport, le générateur de PEFC doit être compact, de faible poids et de faible coût. Pour atteindre ce but, le système complet doit être pris en considération, non seulement le stack, mais également les auxiliaires des circuit d'alimentation en gaz (humidificateur, détendeur, moto-compresseur...) [2].

Une architecture simplifiée du générateur à PAC a été adoptée, afin de calculer la consommation des réactifs dans le cas des applications transport.

Le comportement fluidique de chaque élément du générateur à été modélisé par une analogie électrique-fluidique [3].

La réponse électrique du stack est basée sur une approche semi empirique.

Finalement, le modèle est validé avec des profils de courants (une charge constante de 40A et un cycle de charge variable issu du profil de mission véhicule normalisé J227).

Les deux tests choisis ont été réalisés sur un banc de test d'une puissance inférieure à 1kW.

II. MODELISATION DES COMPOSANTS DU GENERATEUR A PAC

A. Structure du générateur à PAC

Un générateur à PAC embarqué doit contenir le moins d'éléments, possibles tout en garantissant de bonnes performances.

La figure 2 montre un exemple de structure simplifiée d'un générateur à PAC.

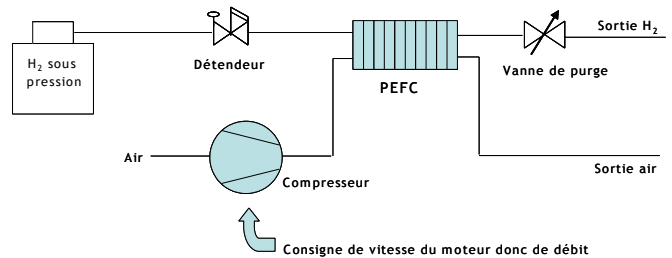


Fig. 2. Exemple de structure simplifiée d'un générateur PAC

L'hydrogène est stocké dans un réservoir haute pression. Un détendeur limite la pression à l'entrée de la pile à 1500mbars. En fonctionnement normal, la vanne de sortie de la ligne hydrogène est fermée. Cependant l'eau et l'azote qui traversent la membrane électrolytique s'accumulent dans le compartiment anodique et font chuter la tension de pile. Lorsque la tension atteint un seuil minimum, le contrôle-commande du système provoque l'ouverture de la vanne de sortie pour purger le circuit hydrogène.

L'air est fourni par un compresseur et le débit est commandé par la vitesse du moteur.

hal-00582370, version 1 - 1 Apr 2011

B. Modélisation de la réponse électrique de la pile

La courbe de polarisation de la pile est modélisée par l'équation (1), en fonction des pressions d'air et d'hydrogène [4]

$$U_{pol} = U_0 + aT \ln P_{air} + bT \ln P_{H_2} + cT \ln I - rI \quad (1)$$

- I : Le courant dans la pile [A]
- U_{pol} : La tension de la pile [V]
- r : La résistance de la pile [Ohm]
- U_0, a, b et c : Coefficients à ajuster

Cette expression de la tension est utilisée pour fixer la tension à l'instant initial et à l'issue d'une purge. Elle est définie à partir d'un courant minimal (à cause du terme logarithmique) en dessous duquel la tension est fixée à la valeur de U_0 . La chute de la tension normalisée de la pile liée au fonctionnement en mode fermé est modélisée par la fonction exponentielle (2) [5]. Elle dépend de la valeur moyenne glissante, calculée à partir de la purge précédente, afin de tenir compte de l'effet d'accumulation de vapeur d'eau et d'azote, dont la quantité entrant dans la pile est liée au courant débité par la loi de Faraday.

$$\delta u(t, I) = d(\hat{I}) + e(\hat{I}) \cdot \exp(-f(\hat{I}) \cdot t) \quad (2)$$

\hat{I} : valeur moyenne du courant de fonctionnement de la pile. Les constantes e, d et f sont à ajuster. D'après la relation (1) et (2), la tension de la pile peut s'écrire de la façon suivante :

$$U_{pile} = U_{pot} \cdot \delta u(t) \quad (3)$$

C. Modélisation des lignes de gaz par une analogie électrique

Le comportement fluide des lignes de gaz a été modélisé à l'aide d'une analogie électrique, afin de faciliter l'implantation sur Matlab/Simulink®.

Chaque composant (vanne, compresseur...) de volume V et de résistance fluide R_f est représenté par un circuit électrique RC simple.

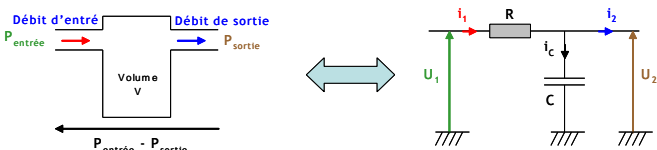


Fig. 3. Principe de l'analogie électrique

Le tableau suivant illustre les équations utilisées dans l'analogie électrique-fluide :

Electrique	Fluidique
(i, V)	(F, P)
$\Delta V = R \cdot i$	$\Delta P = R_f \cdot F$
$U = \frac{1}{C} \int i \cdot dt$	$P = \frac{RT}{V} \cdot n = \frac{RT}{V} \int F \cdot dt$

Tableau 1. Équations utilisées dans l'analogie électrique

Une telle représentation électrique permet d'appliquer des méthodes de l'électricité et de l'automatique (compensation des pôles par exemple pour les régulations des débits de gaz).

Les figures 4 et 5 justifient le choix d'une telle cellule RC. Sur le banc d'essai de 1 kW développé au laboratoire et présenté plus en détail dans le paragraphe suivant, un relevé de la pression et du débit sur la ligne d'air a été fait. La pile ne débite aucun courant. Le débit d'entrée (DeAir) est régulé en amont du stack. Le débit de sortie (DsAir) est mesuré en aval du stack.

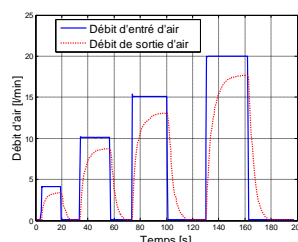


Fig. 4. Débit expérimental d'air

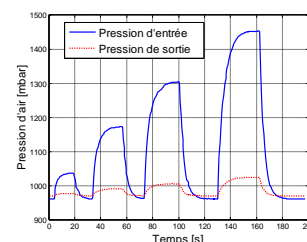


Fig. 5. Pression expérimentale d'air

On observe que la réponse du débit de sortie (DsAir) possède une allure similaire à la tension d'un circuit RC électrique soumis à des créneaux de courant.

Les figures 6 et 7 montrent les deux modèles adoptés pour les lignes de gaz hydrogène et air à la sortie du compresseur.

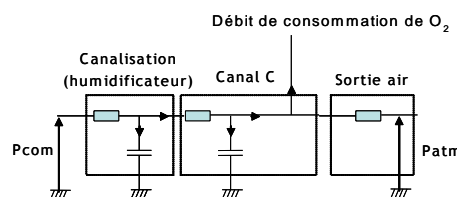


Fig. 6. Modèle électrique de la ligne d'air

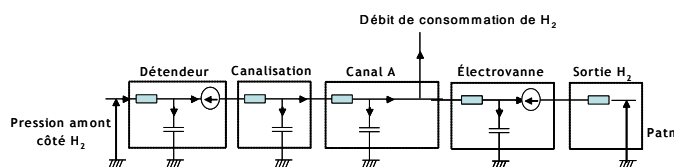


Fig. 7. Modèle électrique de la ligne d'hydrogène

III. IDENTIFICATION DES COMPOSANTS DU GENERATEUR PAC

A. Structure du banc de test

L'identification des éléments du générateur à PAC est basée sur des essais réalisés sur le banc de test d'une puissance inférieure à 1kW, développé au sein de L2ES [6] dont la structure est présentée sur la figure 8. L'air est fourni par le circuit général du bâtiment et non à partir de l'alimentation directe d'un compresseur. L'identification du groupe moto-compresseur est présentée ultérieurement.

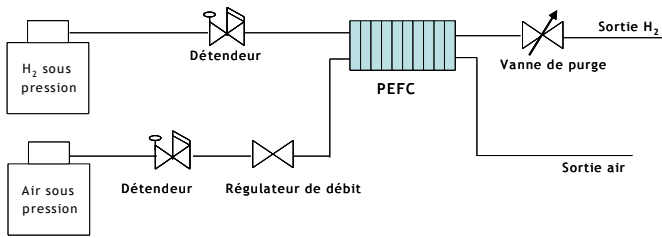


Fig. 8. Schéma du banc de test

L'identification de chaque élément des lignes air et hydrogène se base sur des calculs analytiques en statique et en dynamique.

En statique, comme en électricité, on fait un premier calage des résistances.

En dynamique, en identifiant sur des essais la constante de temps RC (et en connaissant aussi le volume de chaque organe par l'intégration de débit volumique), on peut calculer les capacités C.

Deux types de profil de courant ont été employés pour identifier les paramètres du modèle et pour valider les résultats de simulation : un profil de courant constant ($I=40A$) et un profil standard de transport (J227).

B. Profil de courant constant ($I=40A$)

La ligne d'hydrogène fonctionne en mode fermé et à l'aide de la vanne placée à la sortie de la pile, on réalise des purges périodiques.

La ligne d'air est en mode ouvert.

La température de la pile est maintenue constante à 58°C.

Les figures 9-13 permettent la comparaison des résultats de simulation et de l'expérimentation:

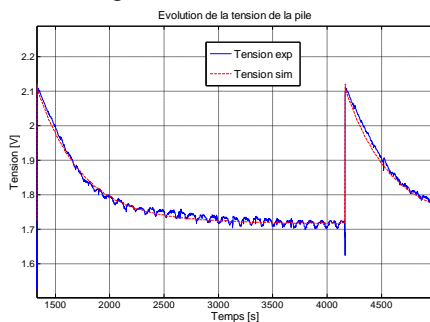


Fig. 9. Évolution de la tension de la pile

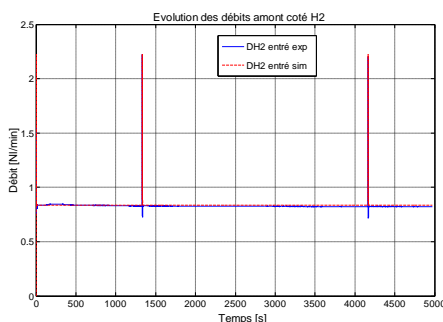


Fig. 10. Évolution des débits en amont côté hydrogène

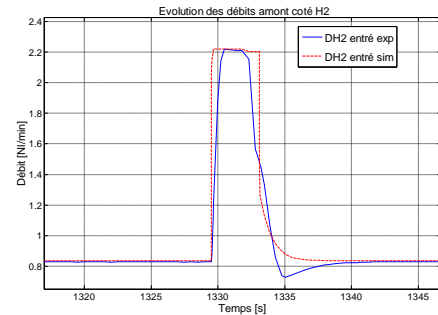


Fig. 11. Zoom - débits en amont côté hydrogène pendant une purge

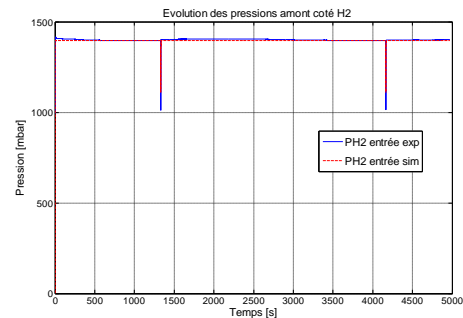


Fig. 12. Évolution des pressions en amont côté hydrogène

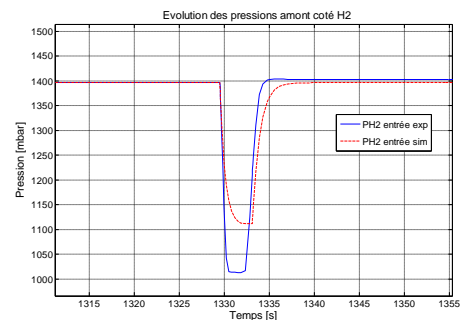


Fig. 13. Zoom – pressions en amont côté hydrogène pendant une purge

Le calage des constantes permet d'obtenir un calcul correct du débit d'hydrogène, pendant et en dehors des purges, paramètre particulièrement important pour le calcul de la consommation en combustible du générateur. Il permet également de rendre compte correctement de la pression d'hydrogène entre deux purges. Cependant, au cours de la purge, le débit d'hydrogène augmente fortement. L'hypothèse de linéarité de la perte de charge en fonction du débit, admissible autour d'un point de fonctionnement, n'est plus correcte, ce qui explique l'écart observé entre la simulation et les mesures. Cependant, par souci de simplicité, la résistance fluidique est considérée comme constante, quel que soit le débit.

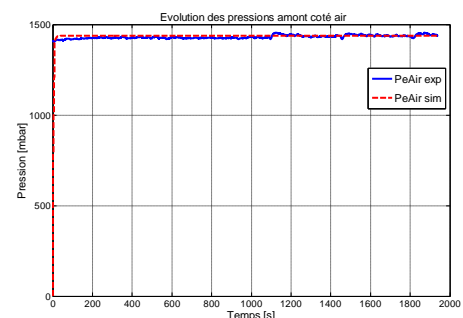


Fig. 14. Évolution des pressions en amont côté air

La pression amont côté air est maintenue constante à 1350mbar. A l'aide du régulateur de débit en amont de la pile, le débit d'air a été réglé à 10.1NI/min.

C. Profil standard de courant (J227)

Le modèle des lignes de gaz, pour la structure du banc de test (hors présence du compresseur) présentée à la figure 8, a été validé sur un profil de courant variable (Fig.15). Ce profil (temps-courant) a été défini à partir d'un profil de mission véhicule standard (J227). La demande de courant du moteur de traction pour suivre un tel profil de vitesse (comportant des phases d'accélération, de stabilisation et de décélération) a été obtenue par simulation, par un logiciel développé au sein de l'Institut National de Recherche sur les Transports et leur Sécurité (INRETS LTE) pour une voiture particulière. La demande de puissance a ensuite été ramenée dans la gamme du stack utilisé (100W). Le débit d'air est maintenu constant, à une valeur nécessaire pour passer la valeur maximale de courant du cycle.

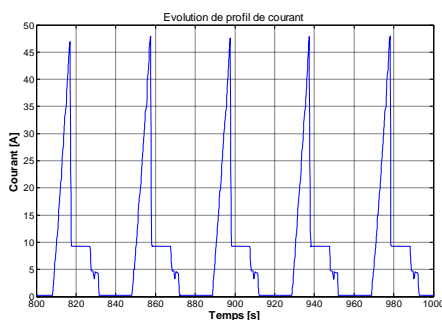


Fig. 15. Profil de courant

Les résultats de simulation sont représentés dans les figures 16-18.

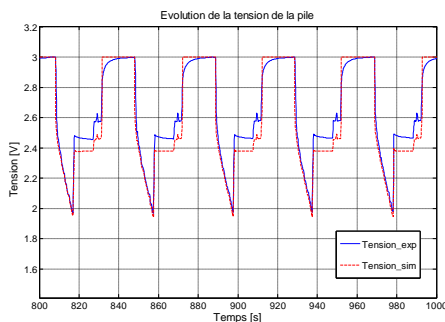


Fig. 16. Évolution de la tension pile

A courant nul, la tension de simulation ne suit pas la courbure de la tension expérimentale. Parce que notre modèle de tension ne prend pas en compte l'effet dynamique à courant nul et ne donne que la tension à vide (3V).

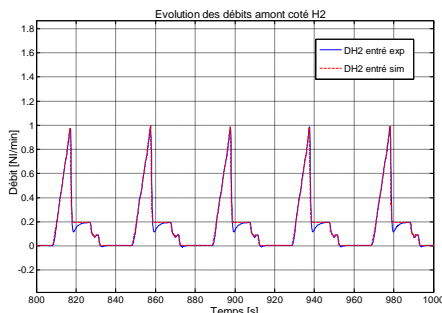


Fig. 17. Évolution des débits amont côté hydrogène

La simulation reproduit parfaitement les courbes expérimentales sauf dans les zones où la variation du courant est trop forte. Les débits dans la pile sortent alors de la zone de validité du modèle par résistance fluide constante.

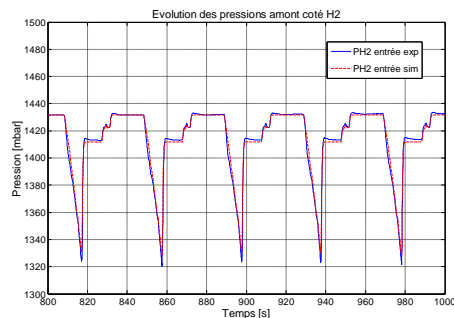


Fig. 18. Évolution des pressions en amont côté hydrogène

La pression en amont d'air est réglée à 1436.7mbar. Le débit amont côté air a été réglé à 12.58NI/min.

Les débits et les pressions expérimentales en aval de la pile sont proches aux résultats de simulation.

D. Identification du moto-compresseur

Le choix du type du moto-compresseur dépend de la pression du refoulement et des besoins en air qui déterminent une capacité de production et aussi la qualité d'air recherché. Le choix du compresseur se fait en fonction de la gamme de puissance de la PAC et aussi sur la plage de fonctionnement (plage de pression et débit) [7]. Le choix s'est porté sur un moteur d'entraînement synchrone à aimant permanent (MSAP) et une tête de compression à palette.

1) Bloc du moteur d'entraînement (MSAP)

On réalise la régulation de vitesse du moteur en variant le courant I_q avec $I_d=0$, les équations du moteur s'écrivent de la façon suivante :

➤ Le couple moteur

$$C_m = \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot p \cdot I_q \cdot \Phi \quad (4)$$

Φ : Le flux engendré par les aimants [Wb]

p : Nombre de paires de pôles

➤ Le couple de charge

$$C_r = \frac{P_c}{\omega} \quad (5)$$

Avec P_c : La puissance mécanique consommée [W]

ω : La vitesse angulaire [rad/s]

➤ L'équation mécanique du MSAP

$$C_m - C_r = J \cdot \ddot{\theta} + f \cdot \dot{\theta} \quad (6)$$

$J = J_{mot} + J_{comp}$: L'inertie totale du moteur + compresseur [kgm²]

➤ La vitesse du moteur

$$\omega = \frac{d\theta}{dt} = \dot{\theta} \quad (7)$$

➤ La puissance électrique consommée par le moteur

$$P_{elec} = K_{phi} \cdot I_q \cdot \omega \quad (8)$$

I_q : Le courant de Park qui sert à réguler la vitesse du moteur

2) Bloc du compresseur (compresseur à palettes)

Lors de travaux précédents au laboratoire, M. Tekin [7] a développé un modèle approfondi d'une tête de compression, ainsi que de ses lois de commande. Ce travail a été validé sur un banc expérimental. Cette modélisation nous a servi de référence pour l'identification de notre modèle. Le compresseur étant élément de la chaîne, il est modélisé dans le travail présenté ici de la même manière que les autres composants du système (sur le principe d'une cellule RC) par une simple fonction de transfert du premier ordre.

La figure 19 montre le schéma de simulation sous Matlab/Simulink® de l'ensemble moto-compresseur et pile :

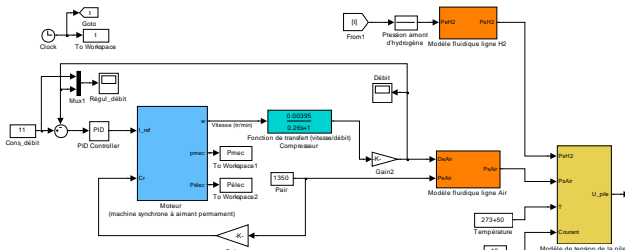


Fig. 19. Schéma de simulation de l'ensemble moto-compresseur/ pile

E. Résultats de simulation du générateur à PAC

La simulation du générateur PAC (groupe moto-compresseur /stack/alimentation hydrogène) est menée en reprenant les deux cas présentés dans le cas de la structure type banc de test (sans compresseur).

➤ Résultats de simulation avec un courant constant

Pour une pile à trois cellules, le moteur consomme 14.5W de puissance pour le courant $I=40A$ en mode fermé.

En régime permanent le moteur tourne à une vitesse constante de 55.11tr/min.

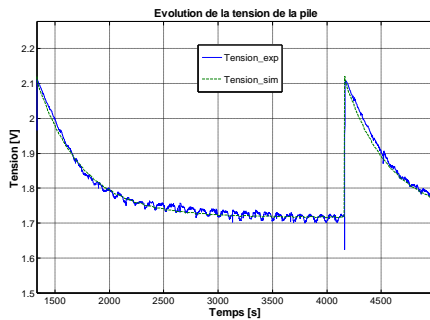


Fig. 20. La tension de la pile

La tension de la pile n'a pas changé par rapport au modèle où on utilise un détendeur et un régulateur de débit en amont

de la pile, puisque la pression d'air est maintenue constante par le compresseur.

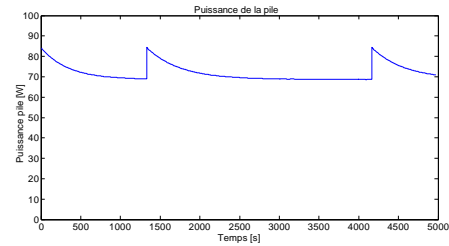


Fig. 21. La puissance fournie par la pile

Pour un courant constant ($I=40A$) la consommation du moto-compresseur est à environ 20% de la puissance fournie par la pile.

➤ Résultats de simulation avec un profil de courant

La stratégie d'alimentation en air appliquée dans le cas du test sur banc n'est pas viable pour une application réelle. Certes elle garantit que la quantité de comburant est toujours suffisante mais le bilan énergétique du système complet s'avère alors déficitaire (la pile ne fournit pas la puissance suffisante pour alimenter ses propres auxiliaires). Dans cette simulation, on applique à la sortie de la pile le même profil de courant que dans la figure 15 mais la vitesse du compresseur est régulée de manière à avoir un débit d'air variable, tel qu'il assure une stoechiométrie constante en air alimentant la pile (5 pour respecter les spécifications du fournisseur de la pile).

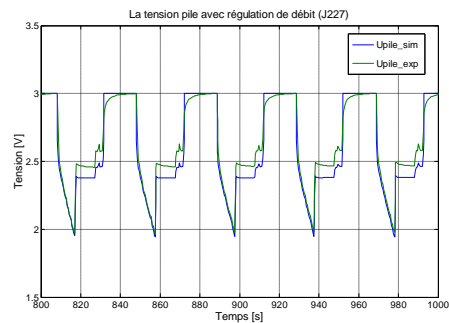


Fig. 22. La tension de la pile

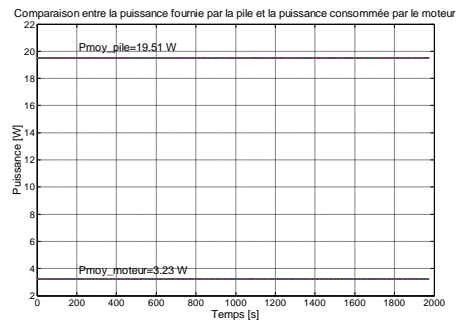


Fig. 23. Comparaison entre la puissance moyenne fournie par la pile et celle du moteur

La figure 22 montre la tension à la sortie de la pile. Elle évolue peu entre les deux stratégies d'alimentation en air puisque la pression d'air reste sensiblement la même. On calcule la puissance moyenne délivrée par la pile et la puissance absorbée par le groupe moto-compresseur (fig.23). Le moteur consomme 16.5% de la puissance de la pile. En

négligeant la consommation des autres auxiliaires, on constante puissance électrique moyenne nette à la sortie d'un tel générateur est de 16.28 W.

Conclusion :

Le générateur de PEFC est une technologie prometteuse pour les applications transport. Le système entier (stack et auxiliaires) doit être pris en considération, pour contrôler la gestion d'alimentation en gaz de la pile.

Le modèle proposé est basé sur une approche homogène des composants du système, du point de vue fluidique. Il est fondé sur une analogie électrique, pour faciliter l'implantation sur un logiciel du génie électrique et aussi pour ajouter aisément un éventuel moteur de traction ou des convertisseurs électriques.

Les paramètres du modèle ont été calculés autour d'un point nominal de fonctionnement.

Des améliorations sur le modèle seront étudiées, et concernent principalement deux aspects :

- Une meilleure prise en compte de la loi de variation de la résistance de polarisation.
- L'introduction de résistance fluidique variables avec le débit.

REFERENCES

- [1] M. Chnani, "*Etude des actionneurs conditionnant les fluides dans un générateur pile à combustible*", Master Degree, Université de Franche-Comté, 2004.
- [2] Luc Gerbaux, "Modélisation d'une pile à combustible de type hydrogène/air et validation expérimentale", [thèse INPG] novembre 1996
- [3] Moussa CHNANI, Hattab MAKER, Marie-Cécile PÉRA, Denis CANDUSSO, Daniel HISSEL "Modelling of a PEFC Generator", EVS21 Monaco Avril 2005
- [4] H. Maker, "*Modélisation d'une pile à combustible de type PEM*", Master Degree, Université de Franche-Comté, 2004
- [5] J.C. Amphlet and al., "*Performance modelling of the Ballard Mark IV Solid Polymer Electrolyte Fuel Cell*", J. Electrochem. Soc., Vol.142, N°1, 1995, pp. 1-8
- [6] X. François, M.C.Péra, D.Hissel, J.M.Kauffmann, "Design of a test bench for a low power PEMFC", EPEFC forum, Lucerne, Switzerland, July 2001, pp.491-499
- [7] Mestan TEKIN "Contribution à l'optimisation énergétique d'un système pile à combustible embarqué", [thèse L2ES] décembre 2004