

ETUDE DES PERFORMANCES D'UNE PEMFC SOUS DES CONDITIONS D'INONDATION PARTIELLE DE LA CATHODE

H. ABDI¹, N. AIT MESSAOUDENE^{1,2}, M.W. NACEUR¹

1. Laboratoire des Applications Energétiques de l'Hydrogène (LApEH), Université de Blida 1, BP. 270, Blida, Algérie
e-mail: abdi1@yahoo.fr

2. Moallem Binladin Research Chair on Quality and Productivity Improvement in the Construction Industry, University of Hail, Saudi Arabia

Résumé

Parmi les facteurs causant le comportement non linéaire d'une pile à combustible PEM est la distribution non uniforme de la densité du courant qui a comme conséquence la surchauffe locale, le vieillissement accéléré, une baisse de puissance et de performances. Ce résultat est très critique quand la cellule à combustible subit une inondation en eau liquide. Dans cette étude un modèle bidimensionnelle de gestion de l'eau et de la chaleur est proposé. Les résultats du modèle montrent que, l'augmentation de la température d'humidification et l'injection de l'eau liquide dans le mélange gazeux à l'anode ont des effets importants sur les caractéristiques de transport de l'eau et les performances de la PEMFC.

Mots clefs : PEMFC; inondation; I-V; courant ; tension.

1. Introduction

Plusieurs travaux de recherche ont été consacrés au développement de la technologie des piles à combustible à membrane échangeuse de protons PEMFC. Toutefois, il reste d'importants défis qui doivent être surmontés, en particulier dans la prolongation de leur durée de vie [1]. Une telle issue est la distribution non uniforme du courant dans la cellule qui a comme conséquence la surchauffe locale, le vieillissement accéléré, l'abaissement du rendement et de la puissance. Dans la littérature, le phénomène d'inondation en eau dans les PEMFC concentre une part importante de recherches [2]. Alors que peu de travaux de recherche qui ont été intéressés à l'étude de l'effet de l'inondation en eau sur les variations de la densité de courant local dans les PEMFC.

Notre travail consiste à étudier les performances d'une PEMFC sous des états d'inondation de la cathode. Un modèle quasi-stationnaire, bidimensionnelle de gestion de l'eau et de la chaleur est proposé. Le modèle est utilisé pour l'examinations des performances en terme de densité de courant locale et moyenne.

2. Modélisation Mathématique

2.1 Description du modèle

La figure 1 montre le schéma d'une cellule de pile à combustible PEM.

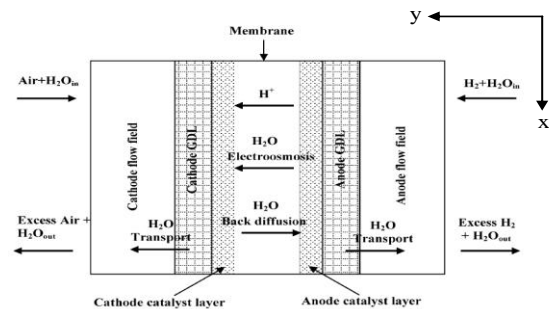


Figure 1 : Schéma d'une PEMFC.

Le modèle est basé sur les hypothèses suivantes :

- La réduction d'oxygène se produit dans la couche catalytique ayant une épaisseur négligeable.
- La température est supposée uniforme et constante dans les composants de la cellule
- Le régime d'écoulement est complètement établi.
- On suppose que le mélange gazeux est un gaz parfait.
- On suppose qu'il n'y a aucune chute de tension le long des canaux d'écoulements

2.2 Bilan massique

Les équations des débits molaires pour diverses espèces ainsi que pour la vapeur d'eau le long des canaux d'écoulements sont donnés comme suit [3]:

$$\frac{dN_i(x)}{dx} = \zeta_i \frac{w I(x)}{4F} \quad (1)$$

Où N_i flux molaires des gaz, ζ_i coefficient stœchiométrique, w largeur du canal, I et F sont respectivement la densité du courant et la constante de Faraday.

La quantité de l'eau liquide dans la cellule et l'état d'inondation dépend de la différence entre la pression partielle de la vapeur d'eau et la pression de saturation.

$$\frac{dN_{w,k}^l(x)}{dx} = \left(\frac{k_c h w}{R(T_k(x) + 273)} \right) (P_{w,k}^v(x) - P_{w,k}^{sat}(x)) \quad (2)$$

$$\frac{dN_{w,a}^v(x)}{dx} = -\left(\frac{dN_{w,a}^l(x)}{dx}\right) - \frac{w \alpha I(x)}{F} \quad (3)$$

$$\frac{dN_{w,c}^v(x)}{dx} = -\left(\frac{dN_{w,c}^l(x)}{dx}\right) + \frac{w I(x) (1 + 2\alpha)}{2F} \quad (4)$$

N^l et N^v sont les flux molaires de l'eau et la de vapeur d'eau, k_c constante du débit d'eau due à la condensation ou à l'évaporation de l'eau et R constante des gaz parfait. h hauteur du canal, $P_{w,k}^v$ et P_w^{sat} sont respectivement la pression de la vapeur d'eau et pression de saturation. L'indice k désigne l'anode ou la cathode, α représente le flux net des molécules d'eau par proton [4].

2.3 Bilan énergétique

La température locale dans les canaux d'écoulements de l'anode et la cathode est affectée par la chaleur latente ainsi que, le transfert de chaleur entre la surface solide et les gaz en écoulement [4].

$$\sum_i (N_i(x) C_{p,i}) \frac{dT_k(x)}{dx} = (H_{w,k}^v - H_{w,k}^l) \frac{dN_{w,k}^l(x)}{dx} + U a (T_s - T_k(x)) \quad (5)$$

$H_{w,k}^v$, $H_{w,k}^l$ enthalpie de la vapeur d'eau et de l'eau liquide.

$C_{p,i}$: chaleurs spécifiques des gaz.

T_s : température des composants de la cellule.

U et a sont respectivement coefficient d'échange de chaleur global et surface d'échange par unité de longueur.

2.4. Electrochimie

Le potentiel d'une cellule peut être calculé à partir de la tension à circuit ouvert E_{oc} , la résistance de la membrane et la résistance due à la polarisation d'activation [4] :

$$E_{cell} = E_{oc} - \eta_{act}(x) - \eta_{ohm}(x) \quad (6)$$

La polarisation d'activation peut être calculée par [3]:

$$\eta_{act}(x) = \frac{R(273 + T_s)}{0.5 F} \ln \left(\frac{I(x)}{I^0 P_{O_2}^{act}(x)} \right) \quad (7)$$

$P_{O_2}^{act}(x)$ est la pression partielle de l'oxygène à l'interface catalyseur couche de diffusion des gaz (GDL).

$$P_{O_2}^{act}(x) = C_{O_2}^{act}(x) R (T_c(x) + 273) \quad (8)$$

$C_{O_2}^{act}(x)$ concentration d' O_2 à la surface du catalyseur [3].

$$C_{O_2}^{act}(x) = C_{O_2}^{bulk}(x) - \frac{I(x)}{4F} \left(\frac{1}{h_{O_2}} + \frac{t_{GDL}}{D_{O_2-g} [(1-s)\phi]^{3/2}} \right) \quad (9)$$

h_{O_2} coefficient de transfert de masse, D_{O_2-g} coefficient de diffusion et (s) saturation en eau liquide. t_{GDL} et ϕ sont respectivement l'épaisseur et la porosité du GDL.

La polarisation ohmique est donnée par [4] :

$$\eta_{ohm}(x) = \frac{I(x) t_m}{\sigma_m(x)} \quad (10)$$

σ_m , t_m : conductivité et épaisseur de la membrane.

La densité de courant moyenne est calculée par :

$$I_{avg} = \frac{1}{L} \int_0^L I(x) dx \quad (11)$$

Tableau 1 : paramètres utilisés dans les calculs

paramètre	valeur	paramètre	valeur
w	0.1 cm	k_c	1.0 (1/s)
h	0.1 cm	t_{GDL}	250 10^{-4} cm
L	100 cm	t_m	220 10^{-4} cm
E_{cell}	0.5 V	I^0	0.01 A/(cm ²)
T_s	80°C	U	0.0025 J/(s cm ² °C)
ϕ	60%	F	96485 C/ mol

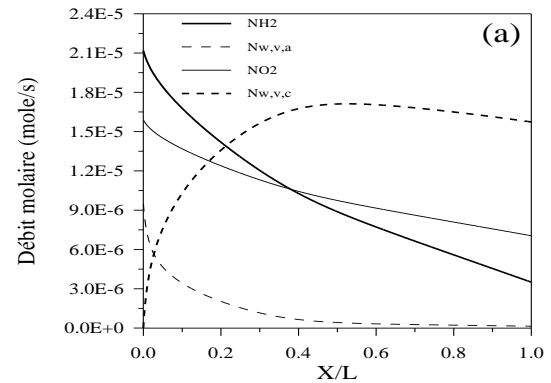
3. Résultats et Interprétations

3.1. Cas de base

Le cas de base correspond à une PEMFC qui fonctionne avec de l'hydrogène pur et de l'oxygène introduits en excès ($S_a = 1.2$, $S_c = 1.8$), la pression est de 1.5 atm, la température est de 80°C et une tension de 0.5V. Le mélange gazeux à l'entrée de l'anode est saturé. La température des gaz à l'admission est identique à celle de la PEMFC.

La figure 2(a) illustre la variation du débit molaire de la vapeur d'eau, de l'hydrogène et de l'oxygène. On constate une diminution des débits molaires de l'hydrogène et de l'oxygène le long des canaux d'écoulement. Ceci est expliqué par la consommation des ces derniers. La diminution du débit molaire de la vapeur d'eau à l'anode est due au transport de l'eau du côté anode vers la cathode sous l'effet électro-osmotique. Alors que l'augmentation du débit molaire de la vapeur d'eau à la cathode est causée par le transfert d'eau de l'anode vers la cathode et à l'eau produite par la réaction de l'oxygène et l'hydrogène.

La Figure 2(b) montre la condensation d'eau survenant dans la cathode lorsque la pression partielle de la vapeur d'eau dépasse la pression de saturation. La quantité d'eau liquide augmente, car il y a de l'eau qui est générée à partir de la réaction d'oxygène et celui transportée de l'anode. On note également l'augmentation de la température du mélange gazeux dans la cathode. Ceci est dû à la chaleur latente de condensation de l'eau. La température du mélange gazeux dans l'anode est maintenue constante, car aucun changement de phase ne s'est produit.



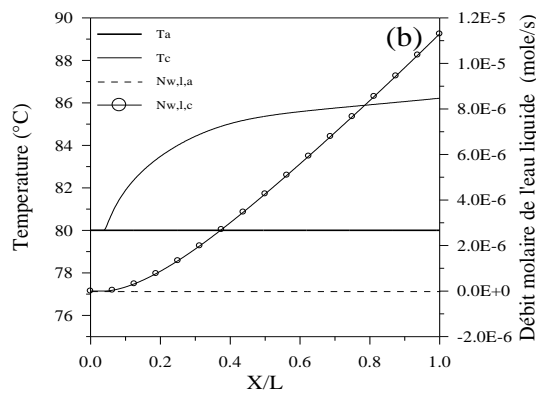


Fig.2 : Variation du : (a) débit molaire de la vapeur d'eau, de l'hydrogène et de l'oxygène, (b) débit molaire de l'eau liquide et température du mélange gazeux le long des canaux d'écoulements. $T_a^{in} = T_c^{in} = 80^\circ\text{C}$, $RH_a^{in} = 100\%$, $RH_c^{in} = 0\%$, $P_a^{in} = P_c^{in} = 1.5 \text{ atm}$, $S_a = 1.2$, $S_c = 1.8$

3.2 Effet de l'utilisation d'une température d'humidification

L'une des méthodes souvent utilisée afin d'éviter l'assèchement de la membrane PEM c'est d'augmenter la température d'humidification de 10 à 15°C au dessus de la température de la pile à combustible [4]. On utilise ici une température de 95 °C à l'entrée de l'anode. Les autres conditions sont similaires au cas de base.

3.3. Humidification par l'injection de l'eau liquide

Dans ce cas, le mélange gazeux est saturé par la vapeur d'eau, et entre dans l'anode à la même température que celle de la cellule 80°C. Une quantité additionnelle d'eau sous forme de gouttelettes pulvérisées à 80 °C équivalente à 25% de la quantité d'hydrogène dans le mélange gazeux à l'entrée est injectée dans la PEMFC.

La figure 3 (a et b) montre la saturation en eau liquide et la distribution de la densité du courant pour les trois cas. On remarque que la saturation en eau liquide est nulle au voisinage de l'entrée. Pour la première moitié du canal la saturation en eau pour le cas d'injection de l'eau liquide est moins importante par rapport aux autres cas. L'inondation de la cathode est plus importante pour le cas d'une température d'humidification de 95°C. Sur la figure 3(b) On constate que la densité du courant est maximale à l'entrée où les quantités des réactifs sont extrêmes. Ensuite elle chute le long des canaux d'écoulements lorsque les réactifs se consomment et la pression locale est diminuée. L'inondation de la cathode commence à l'interface membrane/catalyseur et se développe à l'intérieur du GDL provoquant ainsi une faible densité de courant. On note aussi que, la distribution du courant est non-uniforme pour le cas de base suivie par le cas d'humidification par injection de vapeur puis le cas d'injection de l'eau liquide.

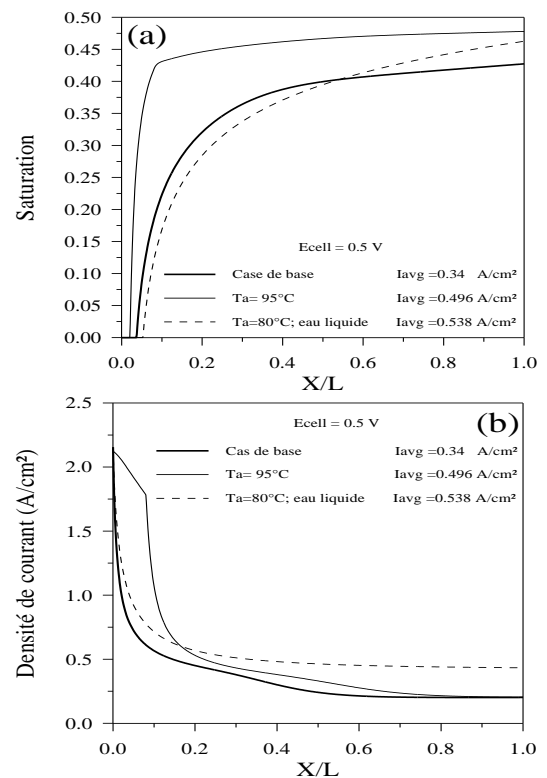


Fig.3 : Variation de la saturation en eau liquide (a) et de la densité de courant local (b) pour les trois conceptions.

4. Conclusion

Dans cette étude, les performances d'une PEMFC sont étudiées sous des conditions d'inondation de la cathode. L'analyse de résultats montre que, le transport d'eau par diffusion de la cathode vers l'anode est insuffisant pour maintenir la membrane hydratée pour des densités de courant élevées. L'augmentation de la température d'humidification de l'anode de 80 à 95°C permet une meilleure hydratation de la membrane, ayant pour résultat une conductivité ionique et une densité de courant plus élevées. On note qu'avec l'injection de l'eau liquide dans le mélange gazeux à l'anode on obtient une meilleure densité de courant moyenne et une distribution plus uniforme.

Références

- [1] Hwang, J.J., Wang, D.Y. and Shih, N.C., *Development of a Lightweight Fuel Cell Vehicle*, *J. Power Sources* 141(2005).108-115.
- [2] Debenjak, A. et al., *Detection of Flooding and Drying Inside a PEM Fuel Cell Stack*, *Stroj. Vestn.-J. Mech. E.* 59 (2013) 56-64.
- [3] Jamekhorshid, A., Karimi, G. and Noshadi, I., *Current Distribution and Cathode Flooding Prediction in a PEM Fuel Cell*, *J. Taiwan Inst. Chem. E.* 42 (2011) 622-631.
- [4] Nguyen, T.V. and White, R. E., *A Water and Heat Management Model for Proton-Exchange-Membrane Fuel Cells*, *J. Electrochem. Soc.* 140 (1993) 2178-2186.