

Contribution à l'étude d'une pile à combustible de type PEMFC utilisée pour la production d'énergie électrique verte

M. Belatel *, F.Z. Aissous et F. Ferhat

Laboratoire d'Electrotechnique de Constantine, 'LEC'
Faculté des Sciences de l'Ingénieur, Université Mentouri
Route Ain El Bey, Constantine, Algérie

(reçu le 05 Octobre 2010 – accepté le 28 Mars 2012)

Résumé - *La recherche de nouvelles sources d'énergie sera probablement la préoccupation majeure des chercheurs dans le futur. Dans ce contexte, notre étude porte essentiellement sur la modélisation en 2D/3D d'une pile à combustible à membrane échangeuse de protons PEMFC utilisée pour la production d'énergie électrique verte. Un modèle électrochimique stationnaire avec une géométrie plane est adopté. Le système d'équations obtenu est résolu et le programme numérique est réalisé sous Matlab®. En vue de fournir les résultats les plus objectifs possibles, nous avons recensées les différentes sources d'incertitudes expérimentales dans l'analyse des données. Des interactions entre facteurs sont aussi décelées, tel que l'influence de la température, la pression sur la tension, le rendement et la puissance.*

Abstract - *The search for new sources of energy will be probably the major concern of researchers in the future. In this way, our study concentrates on 2D/3D modeling of a fuel cell proton exchange membrane PEMFC used for the production of green electricity. The system of equations is solved and the numerical program was made with Matlab® software. To provide the most objective results possible, we have identified the different sources of uncertainty, experimental and data analysis. Interactions between factors were also detected, as the influence of temperature, pressure on the voltage, the efficiency and the power.*

Mots clés: Pile à combustible 'PEMFC' - Energie électrique verte.

1. INTRODUCTION

L'énergie a une importance telle que nous en sommes devenus dépendants. L'économie de plusieurs pays producteurs de pétrole est basée sur les hydrocarbures, alors que ceux-ci tendent à disparaître. Il est donc devenu indispensable de trouver une source d'énergie alternative.

Mais comment remplacer cette source d'énergie fossile par une nouvelle plus propre et plus efficace ? Parmi les solutions: l'énergie solaire (thermique et photovoltaïque), l'énergie éolienne, l'énergie hydraulique, l'énergie de la biomasse, la géothermie et vu les préoccupations liées à la consommation globale d'énergie, électrique en particulier, et aux contraintes environnementales, une nouvelle méthode de conversion d'énergie s'impose: la pile à combustible.

Elle apparaît comme l'un des moyens de production d'énergie pour le futur, appropriée aux énergies renouvelables, parce qu'elle ne produit pas de polluants lorsqu'elle est alimentée par de l'hydrogène pur. Les recherches sont essentiellement

* belatelmimi2002@yahoo.fr

concentrées sur le développement de nouveaux matériaux et pour une moindre part, sur des études de modélisation et de développement de systèmes complets [1].

Les piles à combustible, plus généralement, la filière hydrogène, est un moyen intéressant de valoriser l'énergie chimique contenue dans divers combustibles, avec un très bon rendement, sous la forme noble d'énergie électrique. Aujourd'hui, la pile à combustible a atteint une maturité technique la rendant opérationnelle dans deux domaines d'applications: les transports où elle permet des autonomies de plusieurs centaines de kilomètres et la production combinée d'électricité et de chaleur, encore appelée cogénération [2].

2. AVENTURE DES PILES A COMBUSTIBLE

Les chercheurs parlent souvent des piles à combustible comme étant une technologie nouvelle, mais d'après [3], son invention remonte au XIX^{ème} siècle et généralement attribuée à Sir William Grove. Celui-ci a expérimenté une cellule hydrogène – oxygène (Fig. 1) constituée d'électrodes de platine et d'un électrolyte d'acide sulfurique.

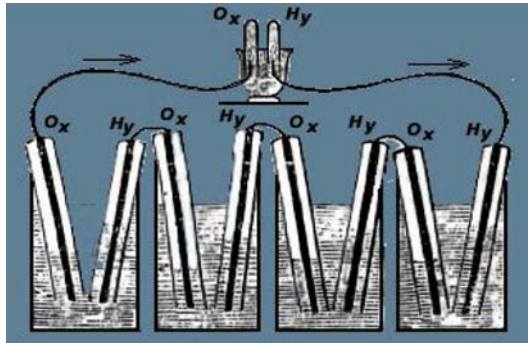


Fig. 1: Expérience de Sir W. Grove en 1839

Ce fut cependant Christian Friedrich Schönbein qui observe le principe des piles à combustible en travaillant sur l'électrolyse. Dans son expérience, il utilisait un tube en U avec deux électrodes en platine. Grâce à un courant électrique, il parvient à obtenir de l'hydrogène et de l'oxygène. En coupant ce courant, il constata que ces gaz donnaient lieu à un courant électrique de sens inverse.

Le principe de l'électrolyse quant à lui, ayant été découvert dès 1806 par Sir Humphry Davy, obtenant de l'hydrogène et de l'oxygène à partir d'eau distillée dans des appareils en argent. Après quelques améliorations apportées à cette expérience, celle-ci tombe presque dans l'oubli dans cette période au profit des machines thermiques, des accumulateurs et des piles électriques.

En 1889, avec L. Mond et C. Langer, des perfectionnements notamment avec l'introduction de catalyseurs en platine ou d'électrolytes pouvant être contenus dans des matrices poreuses en plâtre et en amiante, ils baptisent cette technologie: pile à combustible.

En 1921, E. Baur met en évidence l'importance de la cinétique, il met au point une cellule fonctionnant à haute température (1000 °C), avec une anode de carbone, de l'oxyde de fer comme cathode, et des carbonates alcalins comme électrolytes. Mais c'est en 1956 que F.T. Bacon et J.S. Frost démontrent la faisabilité d'un groupe de

puissance de 6 kW qui engendre une certaine effervescence surtout dans le secteur de la recherche spatiale, où des réalisations technologiques des piles sont effectuées par la NASA.

Des applications dans des programmes de la marine ont aussi vu le jour où une pile de 20 kW fut utilisée dans un sous-marin au milieu des années 60. Les premiers pas dans des applications embarquées des piles à combustible dans des véhicules furent réalisés aux Etats Unis grâce à la construction d'un tracteur électrique avec une pile de type AFC de 15 kW en 1960, et puis en 1966, avec une pile de type AFC de 6 kW.

La décennie 70 a essentiellement vu le développement et l'amélioration des différents composants constituant la pile à combustible et ses périphériques. De nombreux travaux sont alors menés pour l'emploi du méthanol, de l'essence, du gaz naturel et de l'éthanol comme combustible pour les véhicules à pile embarqués, ainsi que du charbon, d'hydrocarbures légers pour la fabrication d'hydrogène par reformatage pour des applications stationnaires.

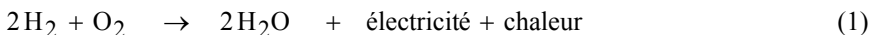
En 1977, une installation de 01 MW est mise en place à New York. La décennie 80 a vu s'intensifier une activité de recherche et de développement où la firme Canadienne Ballard a été créée en 1987. Cette dernière, ayant fortement contribué au développement des piles PEM, est aujourd'hui leader dans le domaine de la pile à combustible. Parallèlement en Europe, on n'y croit pas trop et les travaux de recherches ralentissent.

C'est vers le début des années 90 que renaît l'intérêt pour les piles à combustible. Plusieurs prototypes de véhicules électriques et installations stationnaires voient le jour. Aujourd'hui les industriels considèrent la pile à combustible comme une alternative attrayante aux sources d'énergies classiques. En effet, plusieurs études technico-économiques ont apporté des éclairages sur le potentiel de chacune des techniques de piles à combustible comparées aux moyens classiques que sont les moteurs thermiques et les turbines à gaz en cogénération.

Au terme de ces études, il se confirme principalement que l'hypothèse qui pèse sur l'avenir des piles à combustible est la capacité des constructeurs à baisser les coûts de production et à améliorer leur durée de vie.

3. PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT

Le principe de la pile à combustible a été démontré par l'Anglais William Grove, en 1839, le processus peut être décrit comme l'inverse de l'électrolyse de l'eau. En fait, il s'agit d'une combustion électrochimique contrôlée d'hydrogène et d'oxygène, avec production simultanée d'électricité, d'eau et de chaleur, selon une réaction chimique globale:



Une PAC est un assemblage de cellules élémentaires, comprenant deux électrodes (l'anode et la cathode) chargées en catalyseur (le plus souvent du platine), séparées par un électrolyte, dont le rôle est de permettre la migration des ions d'une électrode à l'autre, sous l'effet du champ électrique créé.

- L'anode: (où se passe l'oxydation) est alimentée en combustible (H_2 , CH_3OH ,...), selon la réaction d'oxydation suivante:



- La cathode: (où se passe la réduction) est alimentée en comburant (O_2 , air,...), selon la réaction de réduction suivante:



- Le catalyseur: pour que les deux demi-réactions soient possibles, il faut un catalyseur (c'est-à-dire un composé capable d'augmenter la vitesse de réaction, sans être consommé par lui-même). Afin que le catalyseur puisse travailler efficacement, la création de zones actives doit être assurée. Ces zones mettent en présence à la fois le gaz réactif, les électrons, les protons et le catalyseur, cela se réalise au niveau de l'interface électrode-électrolyte.

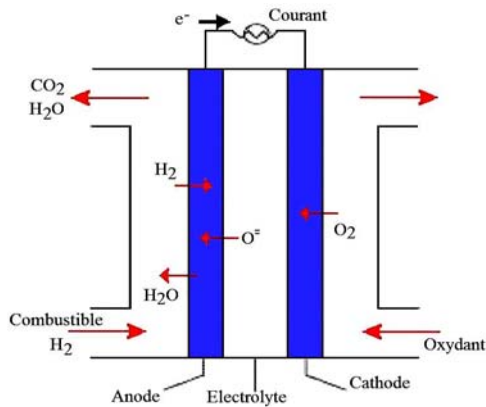


Fig. 2: Principe de fonctionnement d'une pile à combustible

La pile à combustible (PAC) est un système de production d'énergie renouvelable qui possède de nombreux avantages. Par exemple, une pile à combustible à membrane échangeuse de proton (PEMFC) ou pile à hydrogène qui utilise de l'hydrogène comme combustible, et de l'oxygène comme comburant, le déchet obtenu est de l'eau [4].

Tableau 1: Différentes technologies des piles à combustible

Description	PEMFC	SOFC	MCFC	AFC	PAFC	DMFC
Gaz à l'anode	Hydrogène	H_2 , CH_4 , Gaz de synthèse	H_2 , CH_4 , Gaz de synthèse	Hydrogène	Hydrogène	Méthanol
Gaz à la cathode	Oxygène	Oxygène	Oxygène	Oxygène	Oxygène	Oxygène
Electrolyte	Membrane polymère	Céramique	Carbonate de métaux alcalins	Hydroxyde de potassium	Acide phosphorique	Membrane polymère
Température de fonctionnement	70–200°C	800–1050°C	environ 650°C	60 – 90°C	environ 200°C	90–120°C
Puissance	1W à 10 MW	Jusqu'à 100 MW	Jusqu'à 100 MW	10 à 100 kW	Jusqu'à 10 MW	Jusqu'à 100 kW

Rendement électrique	Stack: 50–70% Système: 30%	Stack: 60–65% Système: 55%	Stack: 55% Système: 40%	Stack: 60–70% Système: 62 %	Stack: 55% Système: 40%	Stack: 20% Système 30%
Champs application	Portable, transport, stationnaire	Stationnaire	Stationnaire	Portable, transport	Transport, Stationnaire	Transport, stationnaire

4. MODELISATION DES PILES A COMBUSTIBLE

Les travaux de modélisations des piles à combustible ont commencé en 1999 au LEEI en collaboration avec le Laboratoire de Génie Chimique de Toulouse (LGC). Plusieurs modèles peuvent être développés selon l'objectif recherché [3, 5-23].

L'intégration d'une pile à combustible dans un environnement électrique nécessite la connaissance de son modèle électrique. Un modèle de la pile à combustible permet de satisfaire deux besoins d'un point de vue utilisateur.

Premièrement, le fonctionnement interne avec ses effets physiques doit être mieux compris afin d'optimiser les points de fonctionnement. Deuxièmement, on cherche à prédire le comportement de la pile en fonction de ses conditions de fonctionnement, et de celles de la charge.

La modélisation en statique d'une pile à combustible PEM est basée sur l'expression de la tension en fonction du courant débité. Partant de la tension idéale issue de l'équation de Nernst où apparaissent les conditions de fonctionnement en température, pression et composition du gaz.

$$E_{Nernst} = 1.229 - 0.85 \times 10^{-3} \times (T - 298.15) + 4.31 \times 10^{-5} \times \left[\ln(P_{H_2}^*) + \frac{1}{2} \ln(P_{O_2}^*) \right] \quad (4)$$

Le potentiel thermodynamique théorique de la pile à combustible PEMFC H₂/O₂ à 25 °C et à 1 atm., est de l'ordre de 1.23 V, mais le potentiel réel (E_{PAC}) de la cellule décroît par rapport au potentiel thermodynamique d'équilibre quand le courant débite, cette déviation à la valeur du potentiel de Nernst, est due aux pertes irréversibles appelées polarisations η (surtension) qui sont: la polarisation d'activation, la polarisation ohmique, la polarisation de concentration. Par conséquent, l'expression de la tension d'une cellule s'exprime comme suit:

$$U_{PAC} = E_{Nernst} - V_{act} - V_{ohmt} - V_{conc} \quad (5)$$

Les pertes d'activations sont dues au démarrage des réactions chimiques à l'anode et à la cathode. Une partie de l'énergie disponible est utilisée pour briser et reformer les liaisons chimiques aux électrodes. Si ces pertes interviennent aux deux électrodes, la réaction d'oxydation de l'hydrogène à l'anode est beaucoup plus rapide que la réduction de l'oxygène à la cathode.

Il s'ensuit que les pertes d'activations sont essentiellement dues aux réactions cathodiques.

La relation entre les pertes d'activations et la densité de courant est exprimée dans l'équation suivante:

$$V_{act} = \xi_1 + \xi_2 \times T + \xi_3 \times T \times \ln(C_{O_2}^*) + \xi_4 \times T \times \ln(I_{PAC}) \quad (6)$$

où I_{PAC} est le courant de fonctionnement de la pile et ξ_1 , ξ_2 , ξ_3 et ξ_4 sont des coefficients paramétriques appropriés à chaque modèle physique de la pile à combustible PEMFC, dont leurs valeurs dans les équations empiriques sont données dans le **Tableau 2**.

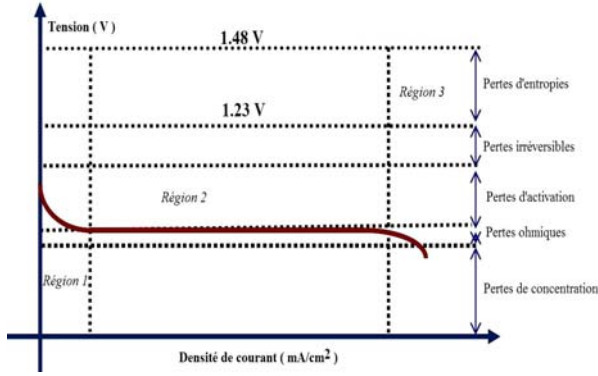


Fig. 3: Courbe tension-courant typique d'une pile à combustible

$C_{O_2}^*$ représente les concentrations de l'oxygène (mol/cm^3) dissout dans un film d'eau à l'interface de la membrane gaz/liquide sur la surface catalytique de la cathode, elle est exprimée en fonction de sa pression par la loi de Henry.

$$C_{O_2}^* = \frac{P_{O_2}^*}{5.08 \times 10^6 \times e^{-(498/T)}} \quad (7)$$

Etant donné qu'on utilise de l'oxygène pur, donc:

$$P_{O_2}^* = P_{\text{cath}} \times \left(1 - \chi_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{sat}}\right) \quad (8)$$

P_{cath} est la pression de l'oxygène à la cathode, $\chi_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{sat}}$ la fraction molaire de saturation de l'eau dans le gaz humidifié et supposée \approx à 50 %, on obtient alors:

$$P_{O_2}^* = \frac{1}{2} \times P_{\text{cath}} \quad (9)$$

A l'anode, on utilise de l'hydrogène pur, qui ne contient pas du monoxyde de carbone:

$$P_{\text{H}_2}^* = P_{\text{anode}} \times \left(1 - \frac{1}{2} \times \chi_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{sat}}\right) \quad (10)$$

P_{anode} est la pression de l'hydrogène à l'anode, et à $\chi_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{sat}} = 0.5$.

Les pertes ohmiques sont dues à la résistance qu'opposent les électrodes et les plaques bipolaires à la circulation des électrons et l'électrolyte au passage des protons. La chute de tension correspondante s'écrit:

$$V_{ohm} = I_{PAC} \times (R_M + R_C) \quad (11)$$

R_C est la résistance équivalente de contact à la conduction des électrons, R_M est la résistance équivalente de la membrane à la conduction des protons, elle est calculée à partir de la relation suivante:

$$R_M = \frac{l \times r_M}{A} \quad (12)$$

Où l est l'épaisseur de la membrane (μm), r_M est la résistance spécifique de la membrane, obtenue par la relation suivante:

$$r_M = \frac{181.6 \times \left[1 + 0.03 \times \left(\frac{I_{PAC}}{A} \right) + 0.062 \times \left(\frac{T}{303} \right)^2 \times \left(\frac{I_{PAC}}{A} \right)^{2.5} \right]}{\left[\lambda_{\text{H}_2\text{O}/\text{SO}_3^-} - 0.634 - 3 \times \left(\frac{I_{PAC}}{A} \right) \right] \times \exp \left[4.18 \times \left(\frac{T - 303}{T} \right) \right]} \quad (13)$$

Le terme $\frac{181.6}{\left(\lambda_{\text{H}_2\text{O}/\text{SO}_3^-} - 0.634 \right)}$ représente la résistance spécifique de la membrane

($\Omega \cdot \text{cm}$) à $I_{PAC} = 0$ et à une température de 30°C ($T = 303\text{ K}$). Le terme exponentiel au dénominateur est le facteur de correction de la température si cette dernière n'est pas à 30°C .

$\lambda_{\text{H}_2\text{O}/\text{SO}_3^-}$ est la teneur en eau dans la membrane, admettant une valeur minimale et maximale respectivement de 0 et de 22. A est la surface active de la pile (cm^2).

En remplaçant les relations (12) et (13) dans l'équation (11), l'expression de la polarisation ohmique devient:

$$V_{ohm} = \frac{I_{PAC}}{A} \left[\frac{181.6 \times \left[1 + 0.03 \times \left(\frac{I_{PAC}}{A} \right) + 0.062 \times \left(\frac{T}{303} \right)^2 \times \left(\frac{I_{PAC}}{A} \right)^{2.5} \right]}{\left[\lambda_{\text{H}_2\text{O}/\text{SO}_3^-} - 0.634 - 3 \times \left(\frac{I_{PAC}}{A} \right) \right] \times \exp \left[4.18 \times \left(\frac{T - 303}{T} \right) \right]} \times 1 + A \times R_C \right] \quad (14)$$

La consommation des gaz appauvrit les mélanges gazeux et diminue la pression partielle des gaz. Cette réduction de pression dépend du courant délivré et des caractéristiques des circuits de gaz. Cette chute de tension s'exprime en fonction d'un courant limite i_L , pour lequel tout le combustible étant utilisé sa pression tomberait à zéro, et d'une constante B appelée constante de transport ou de transfert de masse:

$$V_{conc} = -B \times \left(1 - \frac{J}{J_{max}} \right) \quad (15)$$

Par conséquent, la tension (E_S) de (n) piles unitaires reliées en série formant un assemblage:

$$E_S = n \times E_{PAC} \quad (16)$$

On remplace les expressions des pertes dans l'équation (5), et on obtient le potentiel réel global de la pile à combustible PEMFC, par l'équation suivante [14-16]:

$$U_{PAC} = 0.2817 - 0.85 \times 10^{-3} (T - 298.15) + 4.308 \times T \left[\ln \left(\frac{3}{4} P_{\text{anode}} \right) + \frac{1}{2} \ln \left(\frac{1}{2} P_{\text{cath}} \right) \right] + \quad (17)$$

$$\left[2.86 \times 10^{-3} + 2 \times 10^{-4} \ln(A) + 4.3 \times 10^{-5} \ln \left(\frac{0.75 P_{\text{anode}}}{1.091 \times 10^6 \times \exp \left(\frac{77}{T} \right)} \right) \right] T + 7.6 \times 10^{-5} \ln \left(\frac{0.5 P_{\text{cath}}}{5.08 \times 10^6 \times \exp \left(-\frac{498}{T} \right)} \right)$$

$$- 1.93 \times 10^{-4} T \times \ln(I_{PAC}) - I_{PAC} \left[\frac{181.6 \left[1 + 0.03 \left(\frac{I_{PAC}}{A} \right) + 0.062 \left(\frac{T}{303} \right)^2 \left(\frac{I_{PAC}}{A} \right)^{2.5} \right]}{A \left[\lambda_{\text{H}_2\text{O}/\text{SO}_3^-} - 0.0634 - 3 \left(\frac{I_{PAC}}{A} \right) \right] \exp \left[4.18 \left(\frac{T-303}{T} \right) \right]} + R_c \right] + B \left(1 + \frac{J}{J_{\text{max}}} \right)$$

Tableau 2: Valeurs des paramètres du modèle électrochimique [14]

Paramètres physiques	Description	Valeurs
A	Surface active de la pile	16 cm ²
l	Epaisseur de la membrane	280 μm
T	Température opératoire absolue de la pile	298.15 K
P _{anode}	Pression partielle de l'hydrogène	0.01 atm
P _{cath}	Pression partielle de l'oxygène	0.02 atm
R _C	Résistance équivalente de contact à la conduction des électrons	0.0003 Ω
B	Constante empirique qui dépend du type de pile et de son fonctionnement	0.016 V
ζ ₁	Coefficients paramétriques pour chaque modèle de pile	0.9514
ζ ₂	Coefficients paramétriques pour chaque modèle de pile	3.12 10 ⁻³
ζ ₃	Coefficients paramétriques pour chaque modèle de pile	1.96 10 ⁻⁴
ζ ₄	Coefficients paramétriques pour chaque modèle de pile	1.87 10 ⁻⁴
λ _{H₂O/SO₃⁻}	Teneur de l'eau dans la membrane	14 molH ₂ O/molSO ₃
J _{max}	Densité de courant maximale	0,04934375 A/cm ²

On a utilisé le modèle explicité précédemment représenté par l'équation (17), avec les valeurs des coefficients paramétriques du **Tableau 2**.

Nous avons tracé la courbe caractéristique $U = f(J)$ représentée sur la figure 4, et qui donne la variation du potentiel réel global de la pile à combustible PEMFC en fonction de la densité de courant.

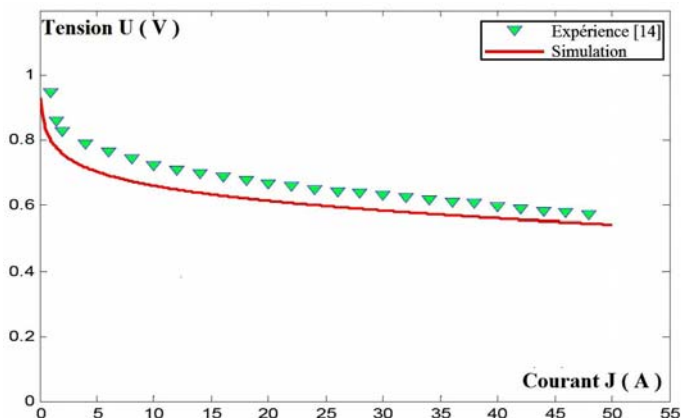


Fig. 4: Courbe de polarisation tension-courant $U = f(J)$

On constate que la courbe obtenue par simulation est conforme à la courbe de la pile unitaire obtenue expérimentalement de la littérature, représentée dans la même figure 4.

On peut remarquer aussi sur cette caractéristique que l'on a, à vide, une tension plus faible que la valeur théorique (1.23 V), puis une chute de tension rapide à faible valeur de courant, ensuite une zone de décroissance linéaire et enfin une chute rapide de la tension à fort courant.

La caractéristique principale d'une pile à combustible est de transformer directement l'énergie chimique d'une réaction en énergie électrique, le complément étant perdu sous forme de chaleur.

Le travail électrique $W_{\text{élec}}$ fourni par la pile correspond au déplacement des charges électriques (ions et électrons) entre les deux niveaux de potentiel auxquels se situent les électrodes. Il est égal à la variation d'enthalpie libre ΔG au cours de la réaction chimique:

$$W_{\text{élec}} = -\Delta G \quad (18)$$

Si l'anode est au potentiel E_a et la cathode au potentiel E_c , et si la réaction produit (n) électrons par mole de combustible oxydé, ce travail s'exprime par:

$$W_{\text{élec}} = n \times F \times (E_a - E_c) \quad (19)$$

En théorie, le travail maximum W_{max} que la pile peut fournir est donc:

$$W_{\text{max}} = -nG = n \times F \times (E_a - E_c)_{\text{max}} \quad (20)$$

Ceci signifie que la tension maximale de la pile en circuit ouvert vaut:

$$(E_a - E_c)_{\text{max}} = -\frac{\Delta G}{n \times F} \quad (21)$$

Dans une pile fonctionnant en hydrogène et en oxygène, l'enthalpie libre de la réaction à 25 °C est de -237 kJ/mol d'hydrogène, si l'eau est obtenue sous forme

liquide; elle est de -229 kJ/mol d'hydrogène, si l'eau est sous forme vapeur, dans un état fictif à 25 °C sous 1 atm.

La tension maximale est donc respectivement de 1.23 V et 1.18 V. A noter que comme la variation d'enthalpie libre diminue en valeur absolue quand la température augmente, la tension maximale diminue également.

Si l'eau est produite sous forme gazeuse, on passe de 1.18 V vers 25 °C, à 1.02 V vers 650 °C et à 0.92 V vers 1000 °C. Pour augmenter la tension disponible, difficilement valorisable dans le cas d'une cellule unique.

Le rendement électrique $\eta_{\text{élec}}$ d'une pile à combustible est défini comme le rapport entre l'énergie électrique produite $W_{\text{élec}}$ et l'énergie chimique apportée par les réactifs, c'est-à-dire l'énergie thermique ΔH qui serait libérée par la réaction:

$$\eta_{\text{élec}} = \frac{W_{\text{élec}}}{\Delta H} \quad (22)$$

Le rendement énergétique maximal est le rapport entre le travail maximal théorique W_{max} fourni par une pile (c'est-à-dire qui fonctionnerait de manière réversible) et la variation d'enthalpie au cours de la réaction:

$$\eta_{\text{rév}} = -\frac{W_{\text{max}}}{\Delta H} = \frac{\Delta G}{\Delta H} \quad (23)$$

Pour une pile à combustible fonctionnant en hydrogène et oxygène, les enthalpies de formation de l'eau à 25 °C sont de -285 kJ/mol d'hydrogène et -242 kJ/mol d'hydrogène, selon que l'eau est formée respectivement sous forme liquide ou gazeuse.

Le rendement théorique maximal, à 25 °C, est donc de 83 % si l'eau formée est liquide et de 95 % dans le cas de vapeur d'eau.

En pratique, la tension U_{PAC} de la pile est inférieure à la valeur maximale, à cause de l'irréversibilité des réactions, de la chute ohmique et de la diffusion des réactifs jusqu'aux sites catalytiques. Le rendement électrique réel $\eta_{\text{élec}}$ peut s'écrire en fonction de la tension U :

$$\eta_{\text{élec}} = -\frac{n \times F U_{\text{PAC}}}{\Delta H} \quad (24)$$

Cette expression peut se ramener à un rapport de tension, par exemple, à 25 °C:

$$\begin{aligned} \eta_{\text{élec}} &= \frac{U_{\text{PAC}}}{1.48} && \text{(eau liquide)} \\ \eta_{\text{élec}} &= \frac{U_{\text{PAC}}}{1.25} && \text{(vapeur d'eau)} \end{aligned} \quad (25)$$

où 1.48 V et 1.23 V correspondent aux tensions qui devraient être obtenues si le système était efficace à 100 %. Ainsi, plus la tension de la pile est élevée, le rendement est meilleur en électricité. Comme toute l'énergie non convertie en électricité est perdue sous forme de chaleur.

A l'inverse, plus la tension de la pile est basse, plus la pile produit de la chaleur. Ceci pose de nombreux problèmes pour la conception des 'stacks', puisqu'il est nécessaire d'évacuer une grande quantité de chaleur dans un système que l'on souhaite le plus compact possible.

La puissance P_{PAC} délivrée par la pile, s'exprimant comme le produit de la tension de pile U_{PAC} et du courant de pile I_{PAC} [12, 16]:

$$P_{PAC} = U_{PAC} \times I_{PAC} \tag{26}$$

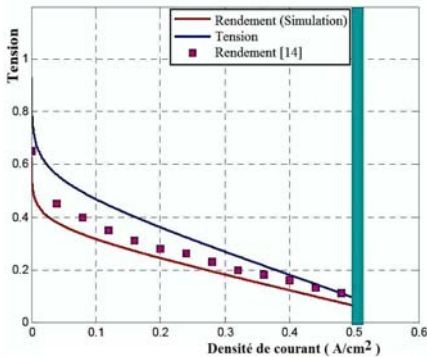


Fig. 5: Allure générale du rendement et de la tension électrique associée

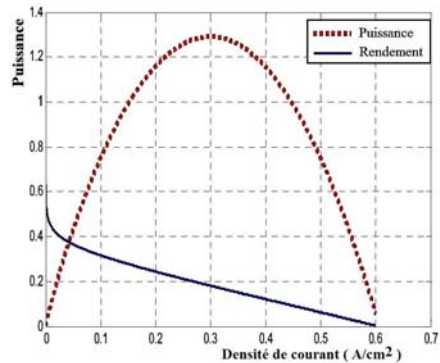


Fig. 6: Allure générale du rendement et de la puissance électrique associée

On constate que la courbe du rendement obtenue par simulation est semblable à la courbe de la pile unitaire obtenue expérimentalement de la littérature [14].

On constate également que les rendements électriques les plus élevés sont obtenus pour une densité de courant nulle, et donc pour une puissance électrique nulle. Ceci n'a aucun intérêt pratique, et pour obtenir des rendements électriques les plus élevés, il faudrait travailler à des densités de courant plus grandes (typiquement 0,3 A/cm²) au détriment du rendement électrique.

Pour obtenir les meilleures performances, en termes de puissance et de rendement électrique, les surtensions (écarts entre le potentiel d'équilibre et le potentiel réel) doivent être minimisées.

Ces dernières ont trois origines principales qui permettent le découpage des courbes de performance en trois zones.

5. INFLUENCE DES PARAMETRES SUR LES PILES A COMBUSTIBLE

Les performances de la pile sont influencées par des paramètres de fonctionnement (température, pression, composition de gaz, densité de courant), ainsi que par d'autres facteurs (impuretés de gaz et état de vieillissement de la pile).

Ces paramètres influencent directement la tension idéale de la pile et sur les surtensions [16].

5.1 Influence de la température en 2D/3D

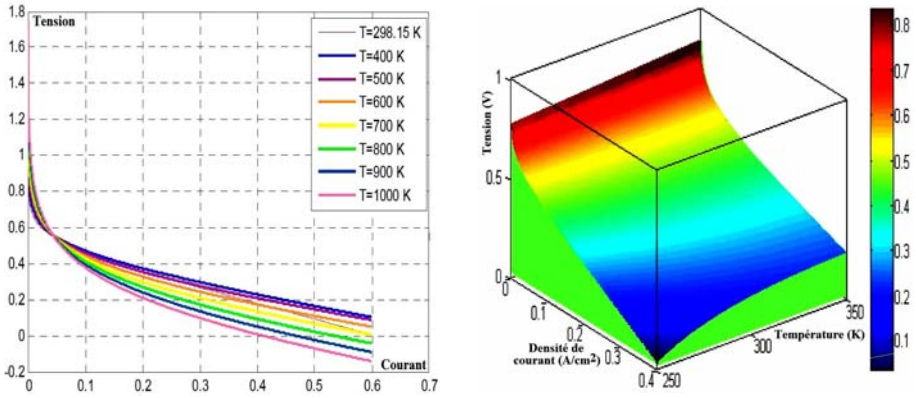


Fig. 7: Courbe de polarisation à différentes températures de $U = f(J)$ en 2D/3D

L'effet de l'augmentation de la température est:

- de diminuer la pente de la partie linéaire de la courbe de polarisation;
- de diminuer la perte en tension aux faibles densités de courant (les surtensions ohmiques diminuent).
- de repousser le courant limite vers des plus fortes valeurs.

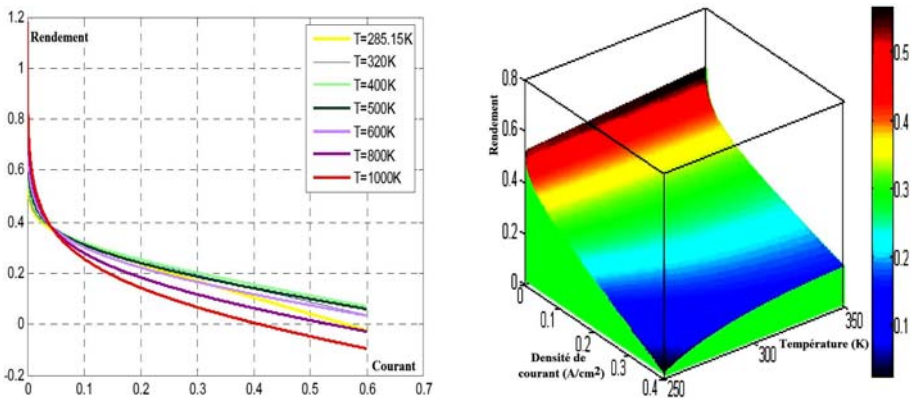


Fig. 8: Influence de la température sur le rendement de la pile en 2D/3D

Dans les courbes de la tension et du rendement, on constate qu'elles ont la même dynamique avec une petite différence en ordre de grandeur.

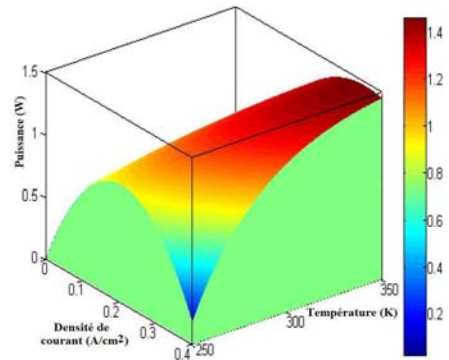
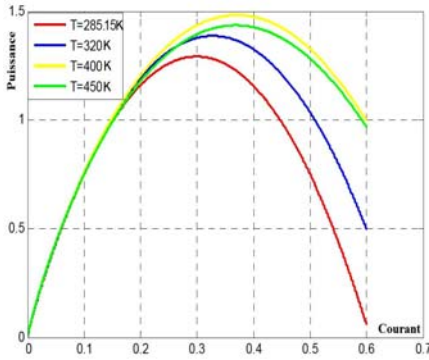


Fig. 9: Influence de la température sur la puissance de la pile en 2D/3D

Le rayon de parabole de puissance augmente avec la température, ce qui a pour effet de prolonger le point de fonctionnement de la pile vers les courants les plus élevés.

5.2 Influence de la pression en 2D/3D

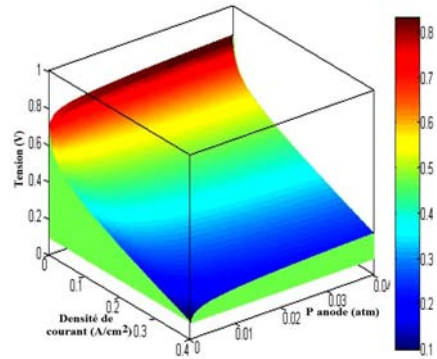
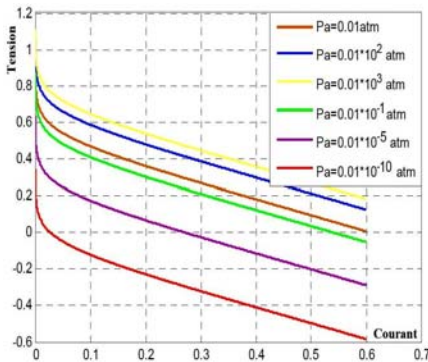


Fig. 10: Influence de la pression sur la tension de la pile en 2D/3D

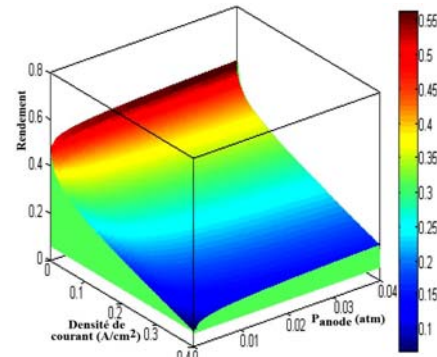
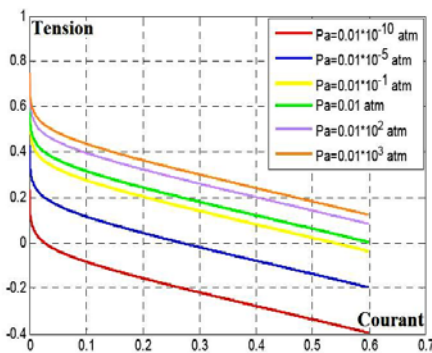


Fig. 11: Influence de la pression sur le rendement de la pile en 2D/3D

Comme les autres piles, la pression influe directement sur les performances de la pile. Lorsque la pression de la cellule augmente, la tension de la cellule augmente.

Pour certaines piles, l'augmentation de la pression provoque une détérioration des joints d'étanchéités et par conséquent les performances de la pile diminuent.

La courbe du rendement est semblable de la courbe de tension, lorsque la pression de la cellule augmente, le rendement de la cellule augmente.

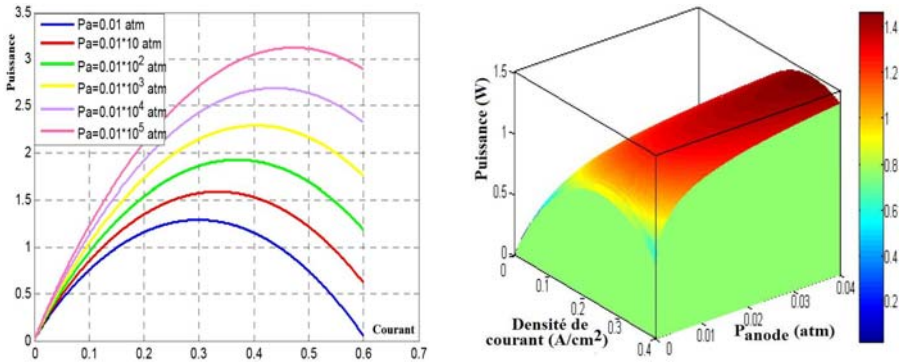


Fig. 12: Influence de la pression sur la puissance de la Pile en en 2D/3D

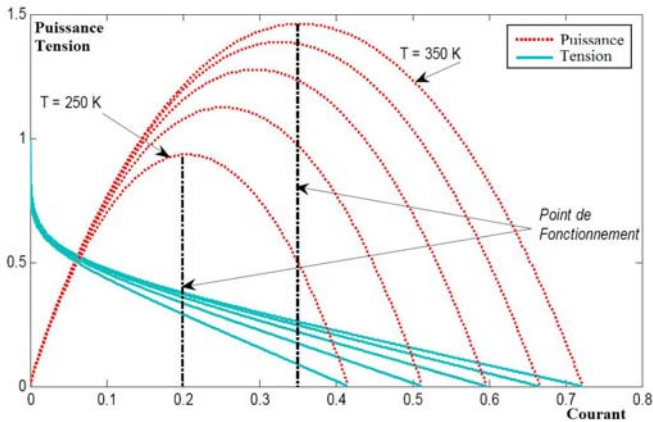


Fig. 13: Influence de la température sur les performances de la pile en 2D et détermination du point de fonctionnement

Sur cette figure, on peut mentionner deux principales remarques:

Premièrement, la dynamique de la puissance suit la variation de la température, sauf pour les faibles courants, où elle est presque invariable.

Deuxièmement, le rayon de paradoxe de puissance augmente avec la température, ce qui a pour effet de prolonger le point de fonctionnement de la pile vers les courants les plus élevés.

6. CONCLUSION

Les recherches scientifiques et techniques ont contribué à faire largement apparaître les piles à combustible comme une solution prometteuse aux problèmes de l'énergie et de la pollution.

Des applications potentielles ont été imaginées dans de nombreux secteurs: le transport, la production décentralisée d'électricité et la cogénération, les appareils nomades (téléphone, ordinateurs portables, etc...). Dans ce contexte nous nous sommes intéressés dans ce travail qu'aux piles à membranes polymères échangeuses de protons PEM (*Proton Exchange Membrane*).

Cette technologie semble effectivement être la plus mûre et la plus proche du stade commercial. Elle est considérée actuellement comme étant la mieux adaptée pour le secteur d'automobile.

REFERENCES

- [1] H. Benmoussa, '*Piles à Combustible: PEMFC et SOFC*', Workshop National sur l'Hydrogène, Université Kasdi Merbah, Ouargla, 2009.
- [2] W. Bendaikha, K. Touafek et L. Serir, '*Etude d'une Installation à base d'une Pile à Combustible pour l'Alimentation en Energie d'une Habitation*', Revue des Energies Renouvelables, ICPWE, pp. 79 – 81, 2003.
- [3] A. Lachichi, '*Modélisation et Stabilité d'un Régulateur Hybride de Courant - Application aux Convertisseurs pour Pile à Combustible*', Thèse de Doctorat, Université de Franche Comté, Nancy, 2005.
- [4] Site internet: www.ulb.ac.be/infosciences/files/piles.pdf, '*Les Piles à Combustible*'.
- [5] M. Uzunoglu, and M.S. Alam, '*Dynamic Modeling, Design and Simulation of a PEM Fuel Cell/Ultra-Capacitor Hybrid System for Vehicular Applications*', Journal of Energy Conversion and Management, Vol. 48, N°5, pp. 1544 – 1553, 2007.
- [6] W. Caisheng, M.H. Nehrir and S.R. Shaw, '*Dynamic Models and Model Validation for PEM Fuel Cells using Electrical Circuits*', IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 20, N°2, pp. 442 – 451, 2005.
- [7] I. Sadli, '*Modélisation par Impédance d'une Pile à Combustible PEM pour Utilisation en Electronique de Puissance*', Thèse de Doctorat de l'INPL, France, 2006.
- [8] Y.C. Lu, B. Diong and R.S. Gemmen, '*An Improved Small-Signal Model of the Dynamic Behavior of PEM Fuel Cells*', IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 40, N°4, pp. 970 – 977, 2004.
- [9] W. Friede, S. Rael and B. Davat, '*Mathematical Model and Characterization of the Transient Behavior of a PEM Fuel Cell*', IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 19, N°5, pp. 1234 – 1241, 2004.
- [10] J.M. Correa, F.A. Farret, L.N. Canha and M.G. Simoes, '*An Electrochemical-Based Fuel-Cell Model Suitable for Electrical Engineering Automation Approach*', IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 51, N°5, pp. 1103 – 1112, 2004.
- [11] D.Yu and S. Yuvarajan, '*A Novel Circuit Model for PEM Fuel Cells*', Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2004. Nineteenth Annual IEEE, APEC'04, Vol. 1, pp. 362 – 366, 2004.

- [12] M. Boillot, '*Validation Expérimentale d'Outils de Modélisation d'une Pile à Combustible de Type PEM*', Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Lorraine, France, 2005.
- [13] W. Turner, M. Parten, D. Vines, J. Jones and T. Maxwell, '*Modeling a PEM Fuel Cell for Use in a Hybrid Electric Vehicle*', 49th IEEE Vehicular Technology Conference, Vol. 2, pp. 1385 – 1388, 1999.
- [14] F. Amrouche, B. Mahmah, M. Belhamel et H. Benmoussa, '*Modélisation d'une Pile à Combustible PEMFC Alimentée Directement en Hydrogène-Oxygène et Validation Expérimentale*', Revue des Energies Renouvelables, Vol. 8, N°2, pp. 109 – 120, 2005.
- [15] M. Cirrincione, M. Pucci, G. Cirrincione and M.G. Simoes, '*A Neural Non-Linear Predictive Control for PEM-FC*', Journal of Electrical Systems, Vol. 1-2, pp. 1 – 18, 2005.
- [16] F. Z. Aissous et F. Ferhat, '*Etude d'une Pile à Combustible de Type PEM Utilisée pour la Production d'Energie Electrique Verte*', Université Mentouri de Constantine, Algérie, 2010.
- [17] S. Didierjean, O. Lottin, G. Maranzana1, S. Chupin and T. Geneston, '*PEM Fuel Cell Voltage Transient Response to a Thermal Perturbation*', 5th European Thermal-Sciences Conference, The Netherlands, 2008.
- [18] S. Rabih, '*Contribution à la Modélisation de Systèmes Réversibles de Types Electrolyseur et Pile à Hydrogène en Vue de leur Couplage aux Générateurs Photovoltaïques*', Thèse de Doctorat, Université de Toulouse, France, 2008.
- [19] P. Shott and L. Nicod, '*Modelling and Control of a Fuel Cell System and Storage Elements in Transport Applications*', Journal of Process Control, Vol. 15, N°4, pp. 481 – 491, 2005.
- [20] M. Uzunoglu and M.S. Alam, '*Dynamic Modeling, Design, and Simulation of a Combined PEM Fuel Cell and Ultracapacitor System for Stand-Alone Residential Applications*', IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 21, N°3, pp. 767 – 775, 2006.
- [21] M.Y. El-Sharkh, A. Rahman, M.S. Alam, P.C. Byrne, A.A. Sakla and T. Thomas, '*A Dynamic Model for a Stand-Alone PEM Fuel Cell Power Plant for Residential Applications*', Journal of Power Sources, Vol. 138, N°1-2, pp. 199 - 204, 2004.
- [22] J. Garnier, M.C. Pera, D. Hissel, F. Harel, D. Candusso, N. Glandut, J.P. Diard, A. De Bernardinis, J.M. Kauffmann and G. Coquery, '*Dynamic PEM Fuel Cell Modeling for Automotive Applications*', Vehicule Technology Conference, VTC'03-Fall. IEEE 58t, Vol. 5, 2003, pp. 3284 – 3288, 6-9 Oct. 2003.
- [23] W. Friede, '*Modélisation et Caractérisation d'une Pile à Combustible du type PEM*', Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Lorraine, France, 2003.