

Modélisation d'une électrolyse d'eau à membrane polymère pour la production d'hydrogène

B. Soldi¹*, I. Gökalp², A. Zeroual¹* et A. Aymard²

¹ Département de Physique, Faculté des Sciences Semlalia, Université Cadi Ayyad
B.P. 2390, Marrakech, 40000, Maroc

² Institut de Combustion, Aérothermique, Réactivité et Environnement
UPR3021, Centre National de Recherche Technologique
1c, Avenue de la Recherche Scientifique, 45071 Orléans cedex 2, France

(reçu le 28 Mars 2009 - accepté le 21 Juin 2009)

Résumé - La simulation numérique permet de réduire le coût de développement d'un nouveau matériel. L'objectif de notre travail est de créer un modèle numérique représentatif du fonctionnement d'une cellule d'électrolyse à membrane polymère PEM. Nous avons utilisé un prototype expérimental pour déterminer certains paramètres de ce modèle. L'influence de la température de la cellule sur les performances électriques est aussi être étudiée, afin de connaître les performances de la cellule dans la gamme de température d'utilisation. Pour améliorer les performances de l'électrolyse, nous avons étudié l'influence des différents paramètres sur le comportement de l'électrolyse.

Abstract - In order to reduce the development's cost of a new equipment, numerical simulation is a good tool in many studies. The point of our work is to create a numerical model which consists in a realistic tool to predict an electrolysis cell functioning (PEM). An experimental prototype was used to determine some parameters of this model. The cell's temperature influence on the electrical rendering is also studied in order to know cell's performance in or temperature range. Furthermore, we studied the performance influence of different parameters on the electrolysis behaviour.

Mots clés: Electrolyseur - Modélisation - Hydrogène.

1. INTRODUCTION

Parmi les stratégies actuelles qui cherchent à réduire l'émission de polluants et des autres gaz à effet de serre dans l'atmosphère par des moteurs et des turbines à gaz, une stratégie efficace consiste à réaliser une combustion dite en 'mélange pauvre'. Ce mode de combustion nécessite la maîtrise des instabilités qui peuvent conduire à l'extinction des flammes.

L'ajout d'hydrogène est l'une des pistes étudiées à l'Institut de Combustion, Aérothermique, Réactivité et Environnement (ICARE), comme des flammes de méthane-hydrogène-air ($\text{CH}_4\text{-H}_2\text{-air}$) et de monoxyde-de carbone-hydrogène-air ($\text{CO-H}_2\text{-Air}$).

Des installations spécifiques ont été développées à l'ICARE pour réaliser ces études. L'hydrogène est le combustible du futur. Sa production est actuellement assurée principalement par reformage du gaz naturel [1]. L'électrolyse de l'eau est aussi bien connue, mais elle ne peut être rentable sur le plan économique que si l'électricité

* soldibouchra@gmail.com , gokalp@cnrs-orleans.fr

* zeroual@ucam.ac.ma , aymard@cnrs-orleans.fr

nécessaire est d'origine renouvelable (solaire, éolien, ...) [2]. Certains envisagent aussi sa production grâce à l'électricité nucléaire durant les heures creuses; c'est donc une sorte de stockage de l'énergie.

Plusieurs études ont été faites sur des installations de production d'hydrogène à partir des énergies renouvelables [3-10]. Quant à son usage, il peut être soit comme combustible pour les moteurs thermiques, soit pour produire l'électricité par les piles à combustible. Ces derniers auront un rôle à jouer dans les transports futurs suite à l'épuisement du pétrole.

Pour ces raisons, l'ICARE cherche à produire sur place l'hydrogène à partir des sources et ressources renouvelables. Pour étudier un système de production d'hydrogène propre, l'institut a acquis un prototype de production d'hydrogène par un électrolyseur mono-cellule d'eau à membrane polymère (surface de la membrane égale à 0.250 m²), alimenté par module photovoltaïque (surface de module photovoltaïque égale à 0,87 m²).

L'objectif de notre travail est de créer un modèle numérique représentatif du fonctionnement d'une cellule d'électrolyse à membrane polymère PEM.

Le prototype expérimental, nous a permis de déterminer les paramètres pour valider le modèle de l'électrolyse à membrane polymère.

Le modèle sera créé dans l'environnement de TRNSYS. Ce dernier est un outil qui utilise plus d'une centaine des composants regroupés dans une bibliothèque et modélisés en termes électriques et thermiques. Chacun de ces composants possède des variables d'entrées modifiables. Dans la bibliothèque des composants, on ne trouve que des types d'électrolyse alcaline.

Ce dernier point nous empêche d'utiliser ce logiciel, tel quel pour le travail de modélisation. Les paramètres électriques définis dans le cas d'un électrolyseur alcalin ne nous permettent pas de concevoir une simulation de notre électrolyseur PEM. De plus chaque élément électrochimique possède ses propres composantes électriques, influencées par le mode de fabrication et l'environnement de son utilisation.

2. DESCRIPTION DU MODELE DE L'ELECTROLYSEUR

Un électrolyseur alcalin fonctionne avec un électrolyte liquide, alors que notre électrolyseur PEM possède un électrolyte solide polymère à base de Nafion.

La création du nouveau modèle d'électrolyseur PEM nécessite les étapes suivantes:

- i. Définir les modèles de la composante
- ii. Déterminer les paramètres, les variables d'entrée et de la sortie des composantes
- iii. Déterminer les paramètres pour ajuster la composante modélisée avec la composante de prototype
- iv. Créer la nouvelle composante
- v. Créer un code source en Fortran la converger
- vi. Compiler avec la composante

1.1 Modèle thermodynamique

Ce modèle sert à calculer deux variables:

- ✓ La tension de décomposition réversible, définie par l'équation de Nernst, est exprimée sous la forme:

$$U_{\text{rev}} = U_0 + \frac{R \cdot T}{2 \cdot F} \cdot \text{Ln} \frac{P_{\text{H}_2} \cdot P_{\text{O}_2}^{1/2}}{P_{\text{H}_2\text{O}}} \quad (1)$$

Où

R : Constante molaire des gaz (8,314 4 J.mol⁻¹.K⁻¹)

T (K) : Température de la cellule

F : Constante de Faraday (96 487 °C.mol⁻¹)

U₀ (V) : Tension de décomposition réversible dans les conditions normales (25°C, pression atmosphérique)

P_{H₂}, P_{O₂} et P_{H₂O} (Pa) : Pressions de fonctionnement de l'électrolyseur.

Un accroissement de la température entraîne une diminution de U_{rev} qui se répercute alors aux bornes de l'électrolyseur.

Cette tension de décomposition réversible s'établit à 0,229 V dans les conditions normales.

Le fonctionnement irréversible des électrolyseurs industriels a pour effet de réduire la tension de la cellule effective à densité de courant et température constantes lorsque la pression augmente [11].

✓ On définit également la tension thermo-neutre qui correspond à un fonctionnement isotherme d'un électrolyseur par:

$$U_{\text{th}} = \frac{\Delta H}{\nu_e F} \quad (2)$$

Où

F : Constante de Faraday (96 487 °C.mol⁻¹)

ν_e : Coefficient stoechiométrique

ΔH : Enthalpie de réaction

$$\Delta H = \Delta H_{\text{H}_2} + 0.5 \Delta H_{\text{O}_2} - \Delta H_{\text{H}_2\text{O}} \quad (3)$$

La tension thermo-neutre est appliquée dans le but de réaliser un procédé d'électrolyse dans des conditions adiabatiques sans changement de température de l'électrolyte, U_{th} étant la tension imposée à la cellule [12].

1.2 Modèle thermique

La plupart des modèles proposés dans des anciens travaux [13-16] sont adaptés pour l'électrolyse alcaline.

Nous avons utilisé un modèle qui se base sur le bilan énergétique total d'un électrolyseur et qui s'exprime par l'équation:

$$C_t \cdot \frac{dT}{dt} = \dot{Q}_{\text{th}} - \dot{Q}_{\text{loss}} - \dot{Q}_{\text{eau}} \quad (4)$$

Avec

Q̇_{th} : Puissance thermique dégagée par la réaction, (W)

$$\dot{Q}_{th} = N_s \times (U_{cell} - U_{th}) \times I \quad (5)$$

\dot{Q}_{loss} : Flux échangé avec l'extérieur, (W)

$$\dot{Q}_{loss} = \frac{1}{R_t} \times (T - T_a) \quad (6)$$

\dot{Q}_{eau} : Flux échangé avec l'eau d'alimentation, (W)

$$\dot{Q}_{eau} = h_e \times (T - T_{eau}) \quad (7)$$

Où

C_t : Capacité thermique de l'appareil, (J.K⁻¹)

T : Température de l'électrolyse, (°C)

T_a : Température ambiante, (°C)

T_{eau} : Température de l'eau, (°C)

N_s : Nombre des cellules

U_{cell} : Tension d'une cellule, (V)

U_{th} : Tension thermo-neutre d'une cellule, (V)

I : Intensité (A)

R_t : Résistance thermique

h_e : Coefficient d'échange

Calcul de la température avec le modèle thermique statique:

$$T = T_{ini} + \frac{\Delta t}{C_t} \times (\dot{Q}_{th} - \dot{Q}_{loss} - \dot{Q}_{eau}) \quad (8)$$

T_{ini} : Température initiale (K); Δt : Intervalle de temps (s).

Les trois paramètres mentionnés ci-après doivent être déterminé expérimentalement. Il s'agit de la capacité thermique de l'appareil, de la résistance thermique et du coefficient d'échange.

1.3 Modèle électrochimique

La tension de cellule d'un électrolyseur s'exprime en fonction de quatre termes:

$$U_c = U_{rev} + \eta_a - \eta_c + R_{SPE} \quad (9)$$

Où

η_a : Surtension anodique (V)

η_c : Surtension cathodique (V)

R_{SPE} : Résistance globale ($\Omega \cdot \text{cm}^2$).

Le schéma électrique équivalent de l'électrolyseur utilisé pour le modèle électrochimique se représente sous la forme suivante:

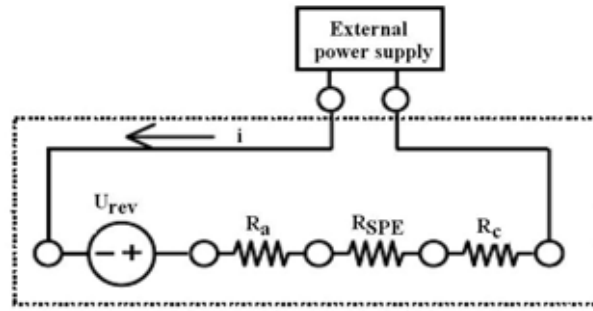


Fig. 1: Schéma électrique équivalent de l'électrolyseur le modèle électrochimique

La densité de courant traversant une électrode se superpose au courant dû à la réaction $Ox + n_e e^- \rightleftharpoons red$, que l'on peut calculer par la relation de Butler-Volmer.

Alors, on aura l'intensité en fonction de la surtension et l'intensité à l'anode:

$$I = I_0 \times \left[\exp\left(\frac{\alpha v_e F \eta}{RT}\right) - \exp\left(-\frac{(1 - \alpha_a) v_e F \eta}{RT}\right) \right] \quad (10)$$

Où

I : Intensité (A)

I_0 : Intensité aux électrodes (A)

α : Coefficient de transfert de charge 0,5 [17]

v_e : Coefficient stœchiométrique à l'anode $v_e = 2$ et à la cathode $v_e = -2$ [17]

η : Surtension (V)

Alors les surtensions à l'anode et à la cathode s'expriment:

$$\text{Anode} \quad \eta_a = \frac{R \cdot T}{F} \sinh^{-1}\left(\frac{I}{2I_{0A}}\right) \quad (11)$$

$$\text{Cathode} \quad \eta_c = -\frac{R \cdot T}{F} \sinh^{-1}\left(\frac{I}{2I_{0C}}\right) \quad (12)$$

Suivant la loi de Tafel, la tension de cellule s'exprime en fonction de la densité de courant par:

$$E = a + b \times \log(I) + c \times I \quad (13)$$

Trois (3) paramètres sont à déterminer

On peut déterminer les paramètres a , b et c pour une cellule d'électrolyseur définie (géométrie, membrane, écoulement, matériaux, température, pression) par une régression linéaire portant sur la variable I .

Les 3 paramètres a , b et c sont déterminés à partir de résultats expérimentaux et un sous programme que nous avons développé. Ces paramètres dépendent de la température T et de la pression partielle en oxygène P_{O_2} .

Dans notre cas, le prototype fonctionne à pression atmosphérique que l'on ne peut pas faire varier. Les paramètres ne sont donc déterminés qu'en fonction de la température.

3. RESULTATS ET DISCUSSIONS

3.1 Déterminer les paramètres pour ajuster la composante modélisée avec l'électrolyse de prototype

3.1.1 Paramètres du modèle thermique

Pour déterminer les trois paramètres du modèle thermique, on a utilisé un sous programme. De nombreux ajustements ont été effectués donnant des résultats variables selon les échelles des paramètres.

La meilleure simulation est obtenue, lorsque la capacité thermique de 22 kW/K, le coefficient d'échange avec l'extérieur est alors de 1,56 K/W et le coefficient d'échange avec l'eau d'entrée 3,4 K/W.

3.1.2 Paramètres du modèle électrique

Un sous programme permet la détermination des coefficients du modèle.

Huit couples (I , U_{cell}) à différentes températures ont été utilisés pour déterminer les coefficients a , b et c de l'équation (13)

Dans le **Tableau 2**, on décrit les 3 paramètres du modèle en fonction de quatre températures d'électrolyse différentes. Les autres valeurs seront utilisées pour déterminer les équations:

$$a = f(T) \quad (14)$$

$$b = f(T) \quad (15)$$

$$c = f(T) \quad (16)$$

Tableau 2: Variables des modèles électriques de l'électrolyseur à différentes températures

T (°C)	a	b	c
23	0.766	0.198	0.299
30	0.598	0.125	0.272
50	0.497	0.096	0.196
75	0.456	0.089	0.01

Si on trace ces coefficients en fonction de la température, on obtient les courbes suivantes.

D'après le graphe ci-dessous, les coefficients a , b et c s'expriment en fonction de la température par les équations suivantes:

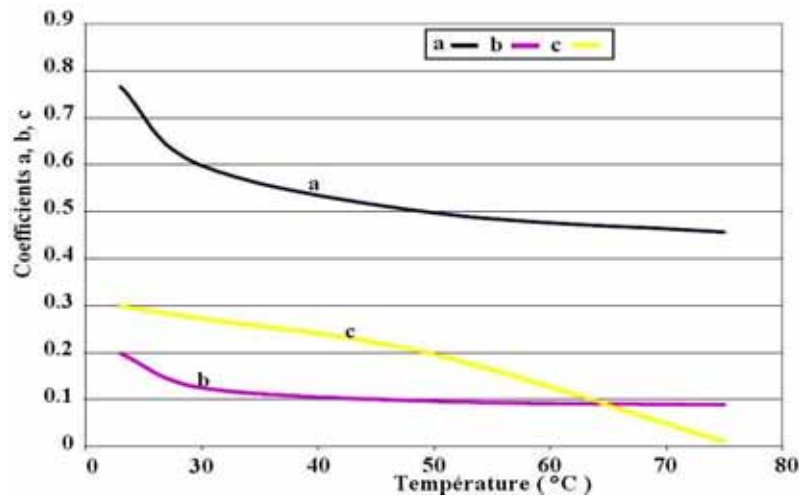


Fig. 2: Evolution des paramètres du modèle électrique en fonction de la température de fonctionnement

$$a = a_1 + \frac{a_2}{T} + \frac{a_3}{T^2} \quad (17)$$

$$b = b_1 + \frac{b_2}{T} + \frac{b_3}{T^2} \quad (18)$$

$$c = c_1 + \frac{c_2}{T} + \frac{c_3}{T^2} \quad (19)$$

On obtient l'équation (13) sous la forme:

$$E = \left(a_1 + \frac{a_2}{T} + \frac{a_3}{T^2} \right) + \left(b_1 + \frac{b_2}{T} + \frac{b_3}{T^2} \right) \times \log(I) + \left(c_1 + \frac{c_2}{T} + \frac{c_3}{T^2} \right) \times I \quad (20)$$

Les 9 constantes du modèle sont obtenues par un petit sous programme. Elles sont décrites au **Tableau 3**.

Tableau 3: Constantes des modèles électriques de l'électrolyseur

a	0.04604289	16.557727	0.02959231
b	-0.11485625	7.1956669	0.00061695
c	0.04604289	16.557727	0.02959231

Les deux graphes suivants visualisent la différence entre les valeurs expérimentales (bleu) et celles obtenues par la simulation (rose) de la courbe courant - tension, ainsi que la production d'hydrogène de notre électrolyse.

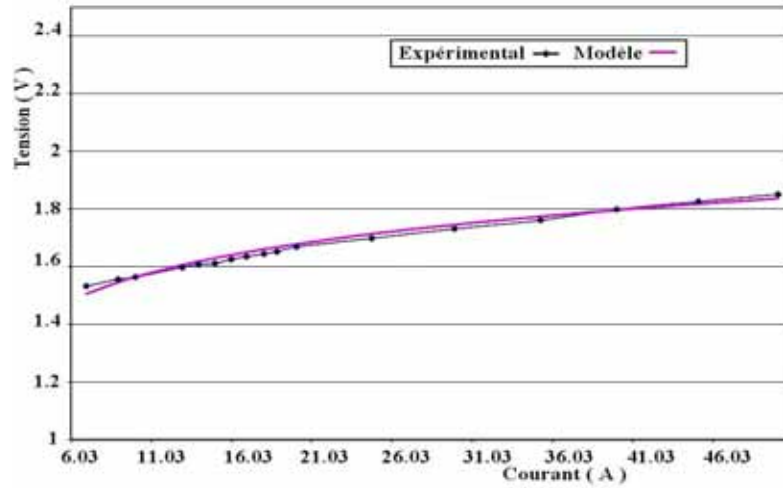


Fig. 3: Evolution de la tension en fonction de l'intensité de courant

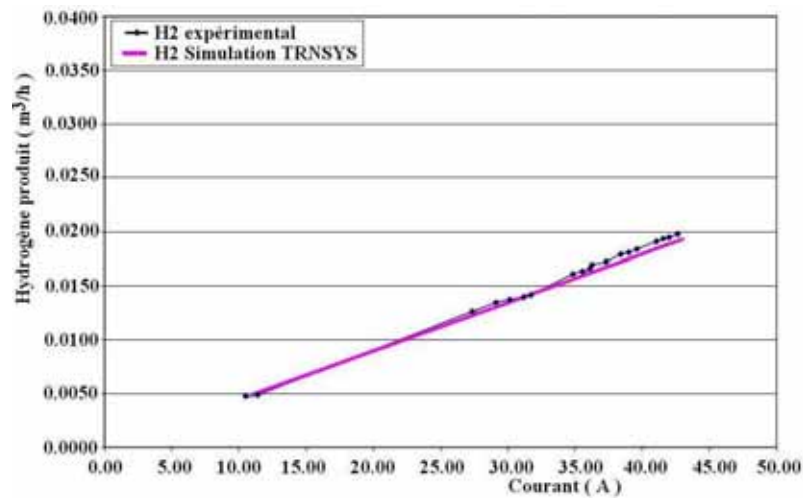


Fig. 4: Evolution de débit d'hydrogène produit en fonction de l'intensité de courant

Un électrolyseur consomme un courant, qui dépend de la tension à ses bornes comme le montre la figure 3, et qui a été effectué à l'aide d'une alimentation électrique de tension au laboratoire.

On observe qu'à 1,5 volt, l'électrolyse débute avec une consommation électrique croissante. De même pour un électrolyseur, le débit d'hydrogène est directement proportionnel au courant, et donc à la tension entre ses bornes (Fig. 4).

Les figures 4 et 5 montrent que la différence entre les résultats expérimentaux et la simulation est négligeable, nous pouvons donc valider le modèle.

3.1.3 Conclusion

Le modèle développé est simple et performant. L'architecture modulaire facilite l'ajustement des paramètres des modèles. De nombreux paramètres sont modifiables, ce

qui permet de prendre en compte les modifications du système. Cette composante permet d'estimer les performances d'un système dans des conditions réelles de fonctionnement et d'évaluer l'influence des paramètres de ce système.

3.2 Paramètres influençant l'électrolyseur

De nombreux travaux [18, 19] ont montré que le rendement d'un électrolyseur est influencé par la température, la pression, les matériaux de la cellule, ainsi que sa surface.

La pression a une influence [15] légère sur les performances d'un électrolyseur. nous ne pouvons pas simuler cette influence puisqu'on travaille à la pression atmosphérique, alors on n'a pas ajusté les modèles sur la variation de pression. Pour les matériaux de la cellule, on va changer le métal de l'électrode anodique.

3.2.1 Température

D'après les modèles thermique, thermodynamique et électrochimique, le paramètre qui varie les performances de la cellule d'électrolyseur est la température.

L'influence de la température de l'électrolyseur, de la température ambiante et de la température de l'eau d'alimentation sont présentées sur les courbes suivantes (Fig. 6, Fig. 7 et Fig. 8), et cela après simulation.

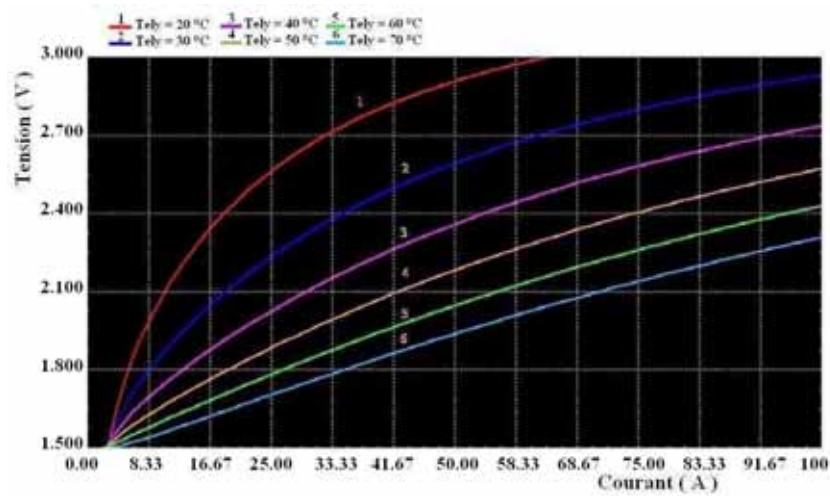


Fig. 5: Influence de la température de la cellule sur les points de fonctionnement de l'électrolyseur ($T_{eau} = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$, $T_{room} = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$)

La figure 5 montre qu'avec une augmentation de la température des cellules de $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ à $70\text{ }^{\circ}\text{C}$, la tension a été diminuée, passant de $2,58\text{ V}$ à $1,71\text{ V}$ pour une densité de courant de $0,1\text{ Acm}^{-2}$. Alors, il est assuré que le fonctionnement à haute température est avantageux pour l'électrolyse de l'eau.

Toutefois, compte tenu de la stabilité thermique de la membrane (Nafion), la température optimale de cellules a été sélectionnée à $80\text{ }^{\circ}\text{C}$.

On remarque dans les figures 6 et 7 que l'augmentation de la température extérieure ainsi que la température de l'eau d'alimentation diminue la tension à intensité constante. Cette influence diminue pour les faibles intensités.

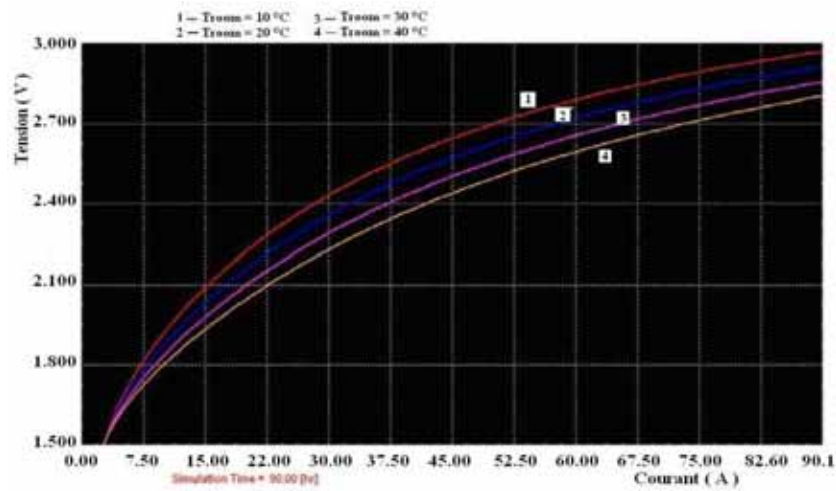


Fig. 6: Influence de la température ambiante sur les points de fonctionnement de l'électrolyseur ($T_{eau} = 20\text{ °C}$, $T_{ely} = 30\text{ °C}$)

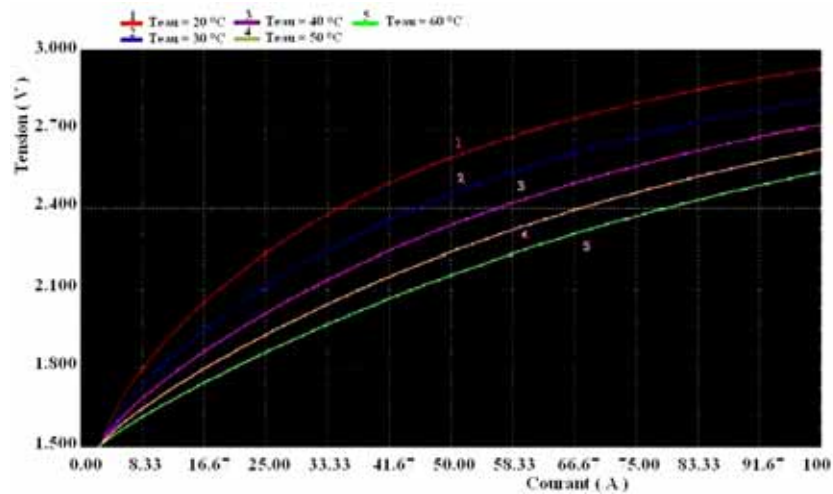


Fig. 7: Influence de la température de l'eau d'alimentation sur les points de fonctionnement de l'électrolyseur ($T_{room} = 25\text{ °C}$, $T_{ely} = 30\text{ °C}$)

Pour la même tension, le courant est doublé quand la température de l'eau passe de 20 °C à 50 °C et l'accroissement est encore plus rapide aux températures supérieures, ce qui fait doubler aussi la production d'hydrogène.

La température de fonctionnement augmente avec l'augmentation de l'intensité, alors plus que l'écart entre cette température et la température ambiante ou la température de l'eau d'alimentation est grande plus que la tension entre les bornes de la cellule est grande.

3.2.2 Influence du métal de l'électrode anodique

Selon le procédé de l'invention, les électrodes des compartiments anodique et cathodique peuvent être constituées d'un métal choisi dans le groupe comprenant le platine, un alliage de platine/iridium ou un alliage platine/rhodium. se sont des éléments qui coûtent très cher.

La figure 9 présente la courbe I - V de l'électrolyse pour deux cas:

- L'électrode anodique est en Platine
- L'électrode anodique est en Platine Iridié [17]

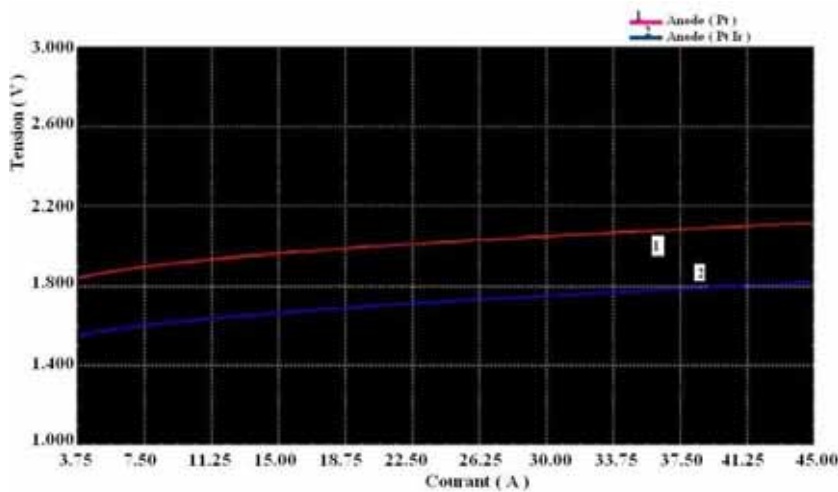


Fig. 8: Influence du métal de l'électrode anodique
Points de fonctionnement de l'électrolyseur

D'après la figure 8, on trouve que pour une intensité de courant constante, la tension dans le cas d'une électrode anodique en Platine est supérieure à celui dans le cas d'une électrode anodique en Platine Iridié.

L'influence de type de métal au niveau des électrodes est remarquable [20, 21].

Parmi les objectifs de développement de la technologie d'électrolyseur, l'amélioration des matériaux des électrodes en veillant sur les préférences et le coût de l'électrolyseur. Il est nécessaire de déposer 20 à 50 g de Pt/Ir par m² de membrane polymère acide.

Pour réaliser un électrolyseur d'une capacité de production de 1 Nm³/h d'hydrogène [22], il faut une surface totale de membrane polymère acide de 0,5 m².

Dans l'état de l'art antérieur, la quantité nécessaire de Pt/Ir était de 25 g, correspondant à un coût de 800 €.

CETH a développé un procédé de dépôt électrolytique pulsé où la consommation de Pt/Ir est abaissée à 2,5 g correspondant à un coût de 80 €. En Australie, une autre équipe de l'Université à Clayton mettent au point un catalyseur en plastique. Ils ont remplacé le platine par un polymère avec une faible quantité d'or pour remplacer le platine [23].

4. CONCLUSION

Les simulations réalisées permettent une première analyse du fonctionnement d'un électrolyseur à membrane polymère et l'influence des différents paramètres sur les performances de cette technologie.

Pour améliorer le rendement d'un électrolyseur, il faut travailler sur l'échange thermique entre la cellule et son environnement en veillant sur l'augmentation de la température de fonctionnement, car une température trop élevée peut causer des dégâts.

Il faut aussi jouer sur les caractéristiques du groupe (anode, membrane et cathode) en veillant aussi sur la rentabilité de l'investissement.

NOMENCLATURE

U_{rev} : Tension de décomposition réversible, V	U_0 : Tension de décomposition réversible, dans les conditions standards (25°C, 1atm), V
U_{cell} : Tension d'une cellule, V	U_{ely} : Tension de l'électrolyseur, V
U_{th} : Tension thermo-neutre d'une cellule, V	R : Constante gaz parfait (8,314 J.mol ⁻¹ .K ⁻¹)
η : Surtension, V	η_a : Surtension anodique, V
η_b : Surtension cathodique, V	T_{ely} : Température de l'électrolyseur, °C
T : Température de la cellule, °C	T_{elyin} : Température initiale, °C
T_{ini} : Température initiale, °C	T_{room} : Température ambiante, °C
T_{eau} : Température de l'eau, °C	I : Intensité, A
I_0 : Intensité aux électrodes, A	N_s : Nombre des cellules
F : Constante de Faraday	ν_e : Coefficient stœchiométrique
ΔH : Enthalpie de la réaction chimique, W	Q_{loss} : Flux échangé avec l'extérieur, W
Q_{eau} : Flux échangé avec l'eau d'alimentation, W	Q_{th} : Puissance thermique dégagée par la réaction, W
C_t : Capacité thermique de l'appareil, J.K ⁻¹	R_t : Résistance thermique, K/W
Δt : Intervalle de temps, s	R_{SPE} : Résistance globale, $\Omega.cm^2$
h_e : Coefficient d'échange, W/K	A_{ERA} : Surface de la membrane, m ²
A : Coefficient de transfert de charge	N_{stacks} : Nombre d'électrolyseurs
γ : Coefficient stœchiométrique à l'anode	I_{ely_I} : Courant, A
P_{ely} : Pression, bar	I_{ely_O} : Courant, A
V_{H_2} : Volume hydrogène produit, Nm ³ /h	V_{O_2} : Volume oxygène produit, Nm ³ /h
P : Puissance utilisée par l'électrolyseur, W	P_{O_2} : Pression-fonction. Electrolyseur, Pa
P_{H_2} : Pression-fonction. Electrolyseur, Pa	P_{H_2O} : Pression-fonction. Electrolyseur, Pa

REFERENCES

- [1] W. Hartumut et K. Gerhard, '*Génie Electrochimie - Principe et Procédure*', Ed. Dunod, 1999.
 [2] <http://monjuju.chez-alice.fr/electrochimie.htm>

- [3] E. Skolnik and V. Putsche, 'Analysis Tools: IEA Final Task Report, IEA Agreement on the Production and Utilization of Hydrogen', International Energy Agency, 2001.
- [4] M.K. Mann, P.L. Spath and W.A. Amos, 'Hydrogen Program Review 1998', US Department of Energy, Washington, DC (USA), Proceedings of the 1998 U.S. DOE, 1998.
- [5] C.E.G. Padr'o and V. Putsche, 'Survey of the Economics of Hydrogen Technologies', NREL/TP- 570-27079, National Renewable Energy Laboratory Golden, USA, 1999.
- [6] H. Steeb and H. Aba Oud, 'Hysolar: Solar Hydrogen Energy, German-Saudi Joint Program on Solar Hydrogen Production and Utilisation, Phase II 1992–1995, 1995.
- [7] M. Santarelli, S. Macagno and M. Cali'Quaglia, 'Hydrogen as an Energy Carrier in Stand-Alone Energy Systems based on Renewable Sources: PV-H2 (SHES) vs PV- μ Hydro-H2(S μ HHES)', Energy International Journal, Vol. 29, N°8, pp. 1159 – 1182, 2004.
- [8] K. Agbossou, R. Chahine, J. Hamelin, F. Laurencelle, A. Anouar, J.M. St-Arnaud and T.K. Bose, 'Renewable Energy Systems Based on Hydrogen for Remote Applications', Journal of Power Sources, Vol. 96, N°1, pp. 168 - 172, 2001.
- [9] P.C. Ghosh, B. Emonts, H. Janssen, J. Mergel and D. Stolten, 'Ten Years of Operational Experience with a Hydrogen-Based Renewable Energy Supply System', Solar Energy, Vol. 75, N°6, pp. 469 - 478, 2003.
- [10] L. Degiorgis, M. Santarelli and M. Cali, 'Hydrogen from Renewable Energy: A Pilot Plant for Thermal Production and Mobility', Journal of Power Sources, Vol. 171, N°1, pp. 469 – 478, 2007.
- [11] A. Damien, 'Hydrogène par Electrolyse de l'Eau', Techniques de l'Ingénieur, J6366, Opérations Unitaires, Génie de la Réaction Chimique, 1992.
- [12] H. Vendt and G. Kreysa, 'Génie Electrochimique, Principes et Propriétés', Ed. Dunod, 2001.
- [13] Ø. Ulleberg and S.O. Morner, 'TRNSYS Simulation Models for Solar-Hydrogen Systems', Solar Energy, Vol. 59, N°4-6, pp. 271 – 279, 1997.
- [14] Ø. Ulleberg, 'Modelling of Advanced Alkaline Electrolyzers: A System Simulation Approach', International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 28, N°1, pp. 21 – 33, 2003.
- [15] S. Busquet, C.E. Hubert, J. Labbé, D. Mayer and R. Metkemeijer, 'A New Approach to Empirical Electrical Modelling of Fuel Cell, an Electrolyzer or a Regenerative Fuel Cell', Journal of Power Sources, Vol. 134, N°1, pp. 41 – 48, 2004.
- [16] E.I. Zoulias and N. Lymberopoulos, 'Techno-Economic Analysis of the Integration of Hydrogen Energy Technologies in Renewable Energy-Based Stand-Alone Power Systems', Renewable Energy, Vol. 32, N°4, pp. 680 – 696, 2007.
- [17] P.H. Choi, D.G. Bessarabov and R. Datta, 'A Simple Model for Solid Polymer Electrolyte (SPE) Water Electrolysis', Solid State Ionics, Vol. 175, N°1-4, pp. 535 – 539, 2004.
- [18] G. Peharz, F. Dimroth and U. Wittstadt, 'Solar Hydrogen Production by Water Splitting with a Conversion Efficiency of 18 %', International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 32, N°15, pp. 3248 – 3252, 2007.
- [19] M. Park, D.H. Lee and I.K. Yu, 'PSCAD/EMTDC Modelling and Simulation of Solar-Powered Hydrogen Production System', Renewable Energy, Vol. 31, N°14, pp. 2342 – 2355, 2006.

- [20] A. Marshall, B. Borresen, G. Hagen, M. Tsykin and R. Tunold, '*Hydrogen Production by Advanced Proton Exchange Membrane (PEM) Water Electrolysers - Reduced Energy Consumption by Improved Electro catalysis*', Energy, Vol. 32, N°4, pp. 431 – 436, 2005.
- [21] P. Millet, T. Alleau and R. Durand, '*Characterization of Membrane-Electrode Assemblies for Solid Polymer Electrolyte Water Electrolysis*', Journal of Applied Electrochemistry, Vol. 23, N°4, pp. 322 – 331, 1993.
- [22] <http://www.ceth.fr/>
- [23] <http://www.journalcitoyen.org/article-21717804.html>