

Conception et réalisation d'un système de production d'hydrogène à l'aide d'un dispositif de catalyse

B. Soldi^{1,2*}, I. Gökalp^{2†}, A. Zeroual¹, M. Aït Lachgar² et A. Aymard²

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

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

(reçu le 28 Février 2009 - accepté le 28 Mars 2009)

Résumé - Il apparaît urgent de réaliser des études globales sur chaque filière de production et de stockage d'énergie permettant de définir le rendement global prenant en compte la fabrication, l'entretien et le recyclage des installations, la disponibilité des ressources et des matériaux de fabrication et enfin, l'impact sur notre environnement. Ces données permettront de sélectionner les filières les plus justifiées pour notre avenir énergétique et celui des générations futures. Le couplage d'un panneau photovoltaïque (PV) et un électrolyseur à membrane polymère (PEM) est une méthode stockage et de transport d'électricité produite. Afin de rendre ce système plus compétitif sur le plan technique, un prototype est mis en place de production d'hydrogène par un électrolyseur monocellule d'eau à membrane polymère (surface de membrane: 0.250 m²), dont la source énergétique est solaire par un panneau photovoltaïque (surface de capteur: 0.87 m²). Pour optimiser le rendement de l'électrolyse, nous avons étudié l'influence de son environnement sur la consommation énergétique en variant la température de l'eau d'alimentation (entre 20 °C et 40 °C) et la température du locale (entre 20 °C et 45 °C).

Abstract - In front of the climatic change and the respect of the environment, global studies on both production and energy stocking appears urgent, especially in a new way which not include the use of fossil energies, but by using renewable energies. Datas obtain will allow to choose courses of study most justified for our energy future and that of the future generations. The coupling of a photovoltaic panel (PV) and an electrolyser with polymeric membrane (PEM) is a good method to stocks and transports the electricity produced. In order to have a more competitive system – on a technical way –, a prototype is developed for the production of hydrogen by using a monocell electrolyser of water (equipped by a polymeric membrane with a surface 0.250 m²). The solar energy is converted in electricity by using a photovoltaic panel (surface of sensor: 0.87 m²). To optimize the electrolysis's output we have study the influence of its environment on energy consumption by varying the temperature of the feeding water (range between 20 °C to 40 °C) and the room's temperature (range between 20 °C to 45 °C).

Mots clé: Cellule photovoltaïque - Electrolyseur - Hydrogène - Energies renouvelables.

1. INTRODUCTION

Aujourd'hui, l'énergie utilisée par nos sociétés est issue à 80 % des énergies fossiles (gaz naturel, pétrole, charbon) et 20 % dans les énergies dites renouvelables (biomasse, nucléaire, hydraulique, et dans une moindre mesure renouvelable de type solaire ou

* soldibouchra@gmail.com _ zeroual@ucam.ac.ma

† gokalp@cnrs-orleans.fr _ mohamedait@yahoo.fr _ aymard@cnrs-orleans.fr

éolienne [1]). A moins de modifier ses comportements de production et de consommation d'énergie, le développement et la pérennité des sociétés humaines à long terme s'avère délicate.

Déjà, pour l'horizon 2020, la montée des eaux des océans due à un apport d'eau douce issue des glaces des Pôles devrait modifier le paysage côtier d'un grand nombre de pays (Europe, Asie, Amérique). Outre ces modifications des paysages, l'eau deviendra plus rare, les cataclysmes seront plus fréquents et d'un impact plus important tant pour les populations que pour les états qui les subiront.

Enfin, les ressources en énergies fossiles s'épuisent inexorablement (par exemple, le pic de pétrole, qui représente un équilibre entre les découvertes de gisement et la demande a décliné depuis 2002). Tous ces phénomènes annoncés d'épuisement des ressources fossiles, d'augmentation de la pollution et de la température globale du climat obligent l'ensemble des institutions politiques, économiques et scientifiques à travailler dans le sens du développement à long terme des ressources d'énergies dites renouvelables.

Plusieurs études ont été faites sur des installations de production d'hydrogène à partir des énergies renouvelables [1-10]. C'est dans ce contexte de crise annoncée que les ressources renouvelables, variées et inépuisables, peuvent devenir une alternative aux ressources fossiles. Leur conversion en énergie thermique, chimique ou électrique ne présente pas de danger vis-à-vis des humains, pas plus que de danger écologique. La production d'énergie peut être centralisée ou décentralisée, ce qui permet de développer localement un tissu économique. Ces énergies ne pouvant être stockées directement, il est nécessaire de mettre au point un nouveau vecteur énergétique, tel que l'hydrogène, qui doit favoriser le développement des sources primaires renouvelables, telles que le solaire, l'éolien et l'hydraulique.

L'hydrogène photovoltaïque est une source renouvelable pour produire du carburant et de l'électricité propre [11]. Plusieurs installations PV-hydrogène sont exploitées dans divers pays comme la Finlande [12, 13], l'Allemagne [14-18], l'Italie [19], le Japon [20], l'Espagne [21], l'Arabie Saoudite [22], la Suisse [23] et les Etats-Unis [24, 25]. La plupart de ces installations sont des unités de démonstration qui sont gérées par des organismes publics.

Le but de cette étude a été la conception d'un prototype de production d'hydrogène à l'aide d'un dispositif de catalyse, celui-ci étant alimenté en énergie par celle issue d'un module solaire photovoltaïque. Le fonctionnement du système a été évalué dans son ensemble (la corrélation du rendement et des paramètres qui l'influencent, l'évaluation des flux d'énergie et de matière, etc.). Cette étude systémique devait permettre, outre une détermination et une compréhension complète des éléments en jeu, de caractériser le potentiel annuel de la production d'hydrogène.

2. DESCRIPTION DU PROTOTYPE

2.1 Principe

Le principe du système réalisé est illustré dans la figure 1. L'énergie solaire, ou radiation solaire, est transformée par le champ de modules photovoltaïques en énergie électrique. Conditionnée par un convertisseur AC/DC, celle-ci est convertie en hydrogène via l'électrolyseur. Au cours de la mise en place du prototype, un important

travail a été fourni au niveau du couplage des sous-systèmes les uns aux autres et de leur adaptation à la dynamique solaire.

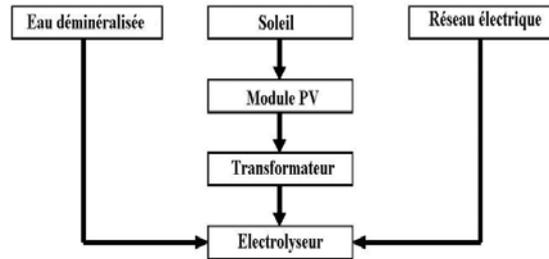


Fig. 1: Principe du système avec flux d'énergie et matière

2.2 Partie alimentation électrique

La partie alimentation électrique est composée principalement des éléments suivants:

- Un module solaire photovoltaïque (type multicristallin) de 120 W_c, sortie 18 V_{DC}, l'intensité à puissance maximale 7,3 A, taille 156 × 156 cm². Le panneau est installé sur le toit du laboratoire avec la possibilité d'une modification de l'inclinaison d'environ +/- 10° par rapport à l'inclinaison optimale pour la région (32 °C par rapport à l'azimut).
- Un convertisseur de puissance DC/DC (Sortie: U = 2,5 V et I_{max} = 50 A_{DC})
- Un Convertisseur AC/DC (220 V_{AC} à 110 A_{DC}) pour l'alimentation électrique de l'électrolyseur (secteur vers électrolyseur),
- Un pyranomètre mesure la puissance du rayonnement solaire et fournit une tension de sortie 0 – 10 V_{DC} que nous utilisons pour l'afficheur.

2.3 Partie production

La conversion de l'énergie électrique en hydrogène utilisée est un électrolyse d'eau modèle GenHy ONE à membrane échangeuse de proton de type PEM (Proton Exchange Membrane) (Fig. 2) développé par la Compagnie Européenne des Technologies de l'Hydrogène (CETH). GenHy ONE permet de voir directement la production d'hydrogène et d'oxygène à travers un système totalement transparent en plexiglas.

Le système comprend essentiellement:

- Une monocellule d'électrolyse de type PEM (de 250 cm² de surface active).
- Deux réservoirs séparateurs transparents pour d'une part, séparer l'eau et les gaz par gravité (la monocellule produit un mélange biphasique) et d'autre part, voir les bulles de gaz en sortie de la monocellule. Les réservoirs sont physiquement connectés, via leur partie inférieure par des tubes souples transparents, à la monocellule pour alimenter en eau cette dernière et récupérer les gaz produits par la monocellule.

Les caractéristiques techniques de GenHy ONE électrolyseur monocellule à membrane échangeuse de protons (PEM) sont comme suit: - Pureté de l'hydrogène: > 99,99 %; - Pureté de l'oxygène: > 99,8; - Production d'hydrogène: max 0,04 Nm³/h; -

Production d'oxygène: $0,02 \text{ Nm}^3/\text{h}$; - Surface active: 250 cm^2 ; - Pression atmosphérique; - Puissance: max 125 W ; - Rendement $> 75 \%$.

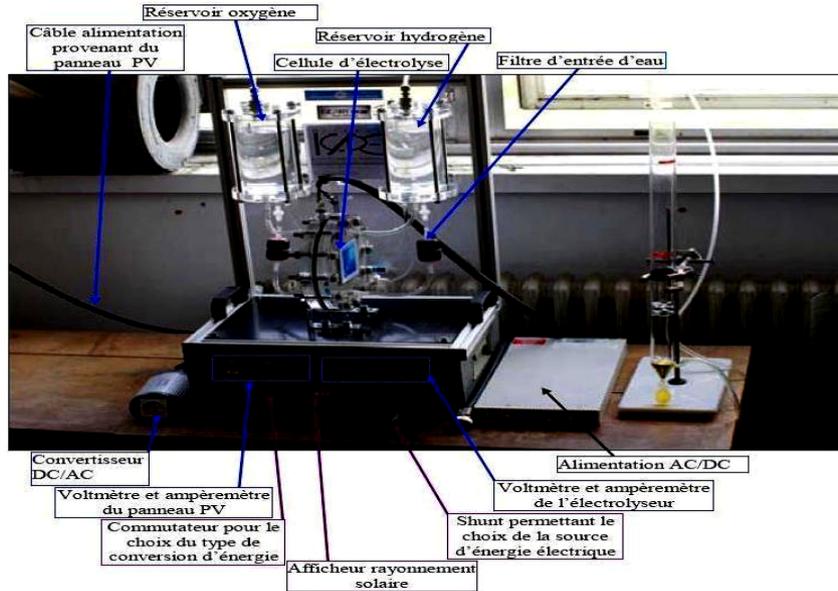
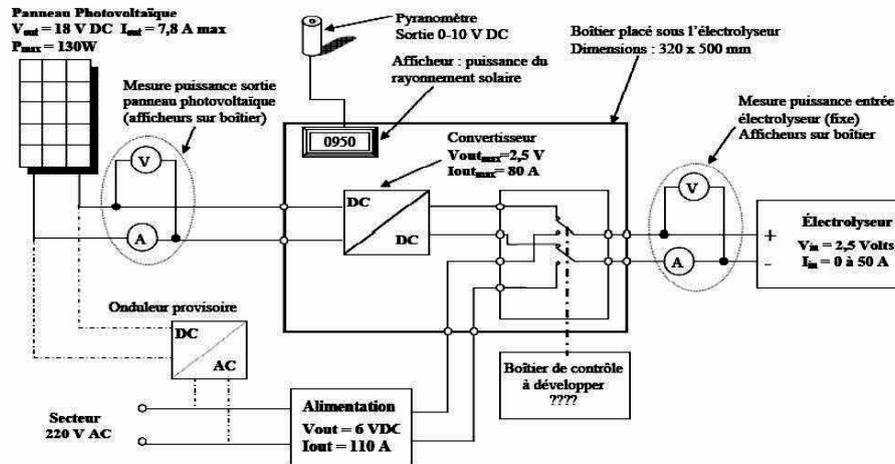


Fig. 2 : Electrolyseur de type PEM modèle GenHy ONE développé par CETH

2.4 Raccordement électrique

Un boîtier de raccordement incluant les appareils de mesures a été réalisé par les électroniciens du laboratoire. Une étude du système de câblage a été faite pour permettre d'effectuer les différents branchements possibles, compte tenu du matériel réceptionné (Fig. 3).



Aïr Iachgar Mohamed (C127)
Bouchra Soldi (C124) Réalisé le 06 mars 2007

Fig. 3: Câblage des branchements sur les divers matériels

Afin de réaliser le branchement des éléments de connexion et des mesures, un schéma électrique a été effectué. Il accueille le matériel nécessaire pour les mesures de puissances. Sur le schéma de principe, l'électrolyseur fonctionne sous deux alimentations: soit par alimentation du photovoltaïque (Fig. 4), soit par alimentation stabilisée variable reliée au réseau électrique (Fig. 5) qui est utilisé pour étudier les caractéristiques de l'électrolyseur et l'optimisation des performances de l'électrolyse.

En attendant le développement du boîtier du contrôle automatique des deux sources d'alimentation, le mode de sélection s'effectue manuellement par modification des prises de connexions.

L'électrolyseur est alimenté en énergie électrique par le module solaire via un redresseur DC/DC qui régule la puissance de sortie en fournissant la tension d'alimentation requise par l'électrolyseur ($U_{el} = 2,5$ Volts).

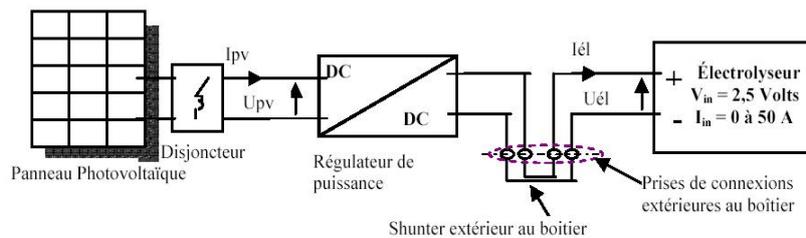


Fig. 4: Principe de l'alimentation de l'électrolyseur par photovoltaïque

Le choix de l'alimentation de l'électrolyseur par le module photovoltaïque, via un redresseur DC/DC qui régule la puissance de sortie en fournissant la tension d'alimentation requise par l'électrolyseur ($U_{el} = 2,5$ Volts), s'effectue par la mise en place du shunt entre les bornes de connexions de la sortie du régulateur de puissance et ceux de l'entrée de l'électrolyseur (Fig. 4).

La puissance maximale fournie par le PV s'élève à 130 Watts-crête avec une tension de sortie en charge entre 16 et 18 V_{DC} et un courant maximal de 7,8 A. Le régulateur de puissance adapte la tension fournie par le PV (entre 16 et 18 V_{DC} en charge) à la tension d'alimentation de l'électrolyseur (2,5 V).

Lorsque la puissance du rayonnement solaire ne permet pas au photovoltaïque de fournir la puissance nécessaire au fonctionnement de l'électrolyseur (à déterminer précisément lors des essais), une alimentation reliée au secteur 230 V_{AC} (Fig. 5) prend le relais et alimente l'électrolyseur. Cette alimentation fournit une tension de sortie variable jusqu'à 6 V_{DC} et un courant maximal de 110 A. Pour l'utilisation de cette alimentation dans notre système, on limite le courant maximal de sortie à 50 A en manipulant le potentiomètre de courant.

Le branchement de l'alimentation s'effectue manuellement (hors charge) par modification des prises de connexions. L'alimentation stabilisée est branchée directement sur le secteur et ses bornes de sortie se connectent sur la prise du boîtier liée à l'électrolyseur (Fig. 5).

Lors de la mise en fonctionnement de ce montage, nous avons mesuré une tension de $U_{el} = 2,4$ V_{DC} et un courant de $I_{el} = 5,3$ A à l'entrée de l'électrolyseur et nous observons la formation de bulles de gaz (O_2 et H_2) dans chacun des réservoirs de l'électrolyseur (Vue 2). Tout ceci indique donc que le dispositif fonctionne donc

correctement sur toute la chaîne, de la transformation de la radiation solaire jusqu'à la production d'hydrogène à l'aide de l'électrolyse.

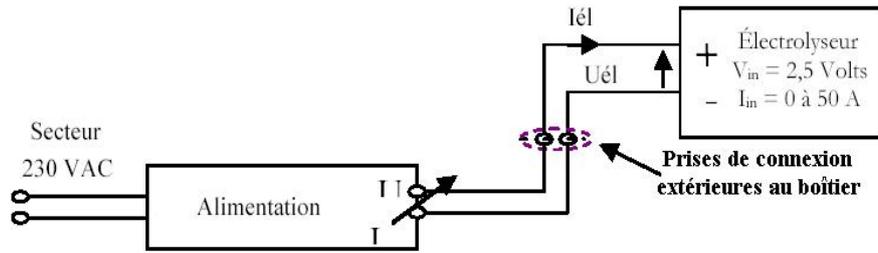


Fig. 5: Montage de fonctionnement

3. RESULTATS ET DISCUSSIONS

3.1 Caractérisation du panneau photovoltaïque

La courbe $I_{PV} = f(V_{PV})$ du module photovoltaïque reflète son comportement énergétique sous l'influence du rayonnement incident, de la température des cellules et de sa charge. L'expérimentation se réalise sous les conditions dites 'naturelles' à savoir: le rayonnement solaire direct et non sous lampe halogène à puissance variable. Pour les premières mesures, le module est fixé dans cette position avec une orientation de 10° Sud-Est et une inclinaison de 35° par rapport à l'horizontale.

Les variations inévitables du rayonnement solaire pendant la durée des mesures (75mn) nous conduisent à réaliser plusieurs relevés (entre 3 et 6 pour chaque puissance de rayonnement dans notre cas). Nous choisissons parmi les mesures réalisées lors d'une variation maximale du rayonnement solaire de $\pm 2\%$.

La figure 6 illustre les différentes courbes caractéristiques du module photovoltaïque mesurées pour des puissances de rayonnement différentes.

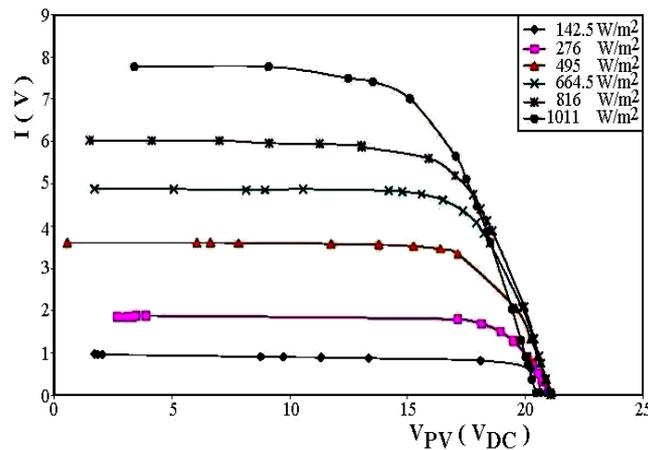


Fig. 6: Caractéristiques $I_{PV} = f(V_{PV})$ du module photovoltaïque pour les différentes puissances incidentes du rayonnement solaire

Nous remarquons que lorsque la puissance de la charge est nulle, le courant délivré par le champ PV est aussi nul. Et la tension de circuit ouvert est comprise entre 20 V et 23 V. L'ensoleillement a une très faible influence sur cette tension.

Lorsque la puissance demandée augmente, le courant délivré augmente. La tension diminue jusqu'au point de fonctionnement qui correspond au point de puissance maximale (MPP) qui dépend de l'ensoleillement.

La charge totale n'est pas délivrée par le champ. Ce protocole expérimental ne permet pas d'obtenir la totalité de la courbe caractéristique qui peut être obtenue par prolongement.

Le courant de court-circuit varie selon l'ensoleillement. L'ensoleillement est un paramètre beaucoup plus important: le courant délivré par le module est proportionnel à l'éclairement reçu par la surface de module.

3.2 Caractéristique de l'électrolyseur

La courbe caractéristique de l'électrolyseur permet de déterminer la valeur de la tension à vide V_{CO} (tension d'équilibre) afin de démarrer l'électrolyse. En théorie, elle vaut 1,23 V. Plus l'intensité dans l'électrolyseur augmente, plus les pertes s'élèvent, ce qui entraîne un accroissement de la tension.

Le constructeur préconise une tension maximale de 3 V aux bornes de la cellule. Nous limiterons donc nos mesures à une tension maximale de 2,7 V_{DC}.

Cette courbe, déterminée par la technologie de la cellule, varie suivant le nombre de cellules en série, ainsi que de leur surface. Dans notre expérimentation, l'électrolyseur possède une seule cellule d'une surface de 250 cm².

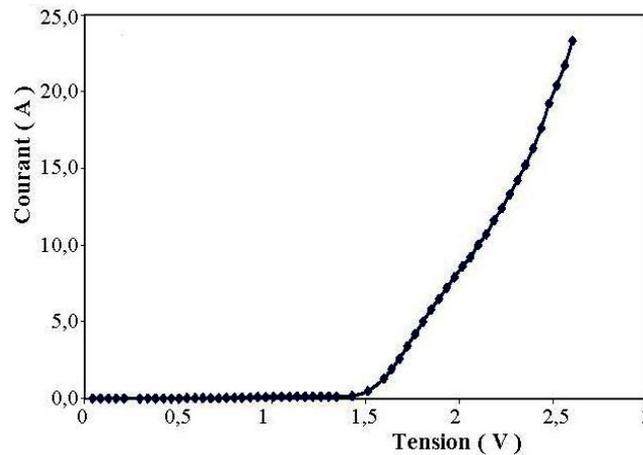


Fig. 7: Evolution de l'intensité d'entrée dans l'électrolyseur en fonction de la tension

Les relevés effectués nous indiquent que la tension de déclenchement de l'électrolyseur vaut dans notre cas:

$$V_{CO} = 1,51 \text{ V}_{DC} \text{ (pour un courant de } 0,47 \text{ A).}$$

Cette référence nous permet de déterminer pour la modélisation, la puissance minimale requise par l'électrolyseur: $P_{\min} = 0,7 \text{ W}$ pour un électrolyseur PEM possédant une surface de membrane de 250 cm².

3.3 Efficacité de l'électrolyseur

Le calcul de l'efficacité énergétique d'électrolyseur correspond à la formule suivante:

$$\varepsilon = \frac{V_{H_2} \text{ (mesuré)}}{V_{H_2} \text{ (calculé)}}$$

$$\text{Avec } V_{H_2} \text{ (calculé)} = \frac{R \cdot I \cdot T \cdot t}{F \cdot p \cdot z}$$

Dans la figure 8, nous donnons l'efficacité de l'électrolyseur (volume de H₂ mesuré en fonction du volume de H₂ calculé) pour le prototype réalisé.

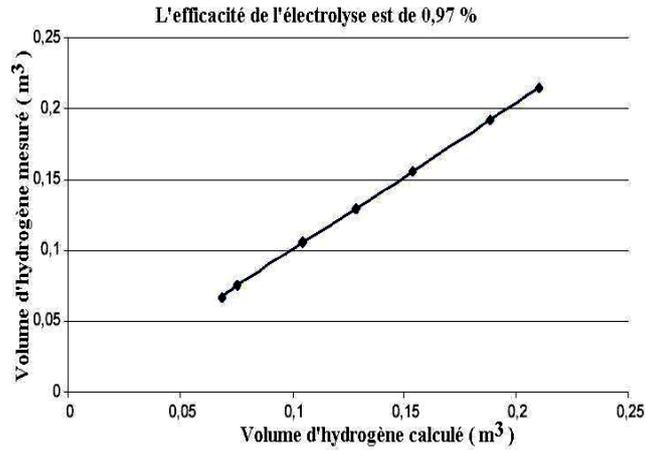


Fig. 8: Efficacité de l'électrolyse

3.4 Rendement global du système

Après des essais, on établit le bilan énergétique global du système pour les conditions suivantes: Température extérieure = 20 °C, Puissance de rayonnement solaire de référence (à 2% près) $P_{RS} = 980 \text{ W/m}^2$, Puissance Calorifique Supérieure de l'hydrogène (PCS_{H_2}), volume de gaz H₂ de référence: $V_{H_2} = 20 \times 10^{-5} \text{ m}^3$.

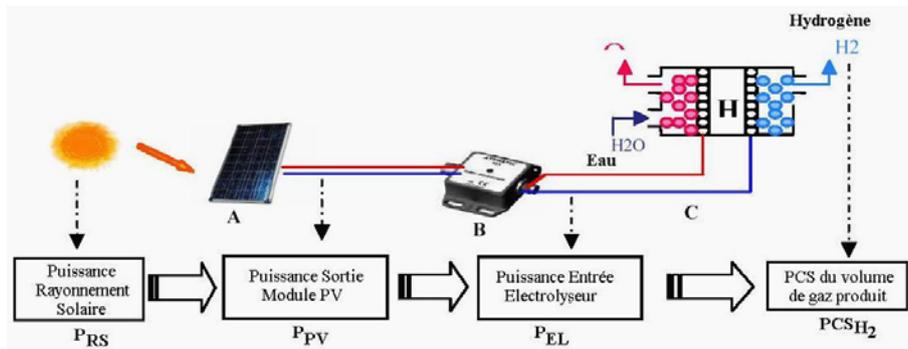


Fig. 9: Principe pour le calcul du bilan énergétique du système global

Tableau 1: Valeurs des différentes puissances et rendements correspondants du système global

P_{RS} (W/m ²)	P_{PV} (W)	η_{PV} (%)	P_{EL} (W)	η_{CP} (%)	PCS_{H_2} (Wh/m ³)	η_{PEM} (%)	η_G (%)
981	77,26	8,99	52,59	68,06	2549	77,77	4,76
978	78,85	9,20	54,85	69,56	2549	68,05	4,36
979,5	75,30	8,87	51,12	67,89	2549	83,72	4,99
978	73,99	8,63	50,72	68,55	2549	77,06	4,56
982,5	72,93	8,47	49,95	68,49	2549	85,02	4,93

P_{RS} : Puissance du rayonnement solaire; P_{PV} : Puissance de sortie du module; P_{EL} : Puissance d'entrée électrolyseur; PCS_{H_2} : Puissance calorifique supérieure de l'hydrogène; η_{PV} : Rendement PV; η_{CP} : Rendement convertisseur; η_{PEM} : Rendement électrolyseur; η_G : Rendement global.

Ces valeurs représentent les capacités des composantes pour convertir la puissance d'une forme à une autre. Le rendement d'électrolyse est le rapport du potentiel d'hydrogène (le volume d'hydrogène produit multiplié par le PCS_{H_2}) divisé par l'énergie électrique consommé par l'électrolyse.

Nous constatons sur ces premières mesures:

Le rendement du système complet est le rapport entre l'énergie consommée par la source (ici solaire) et l'énergie fournie par le volume d'hydrogène produit. Il est évalué à 4,5 % dans notre prototype.

Ce rendement est trop bas, les pertes sont concentrées au niveau de module solaire, essentiellement plus que 91 %.

Nous notons que pour notre prototype, le rendement de l'électrolyseur obtenu est 78 %. Ce rendement est faible par rapport à une électrolyse alcaline, qui est de l'ordre de 80 %, mais sa grande compacité, sa faible consommation intrinsèque, la simplicité de son périphérique lui font que cette technologie a été préférée.

Pour le module photovoltaïque et le convertisseur, les rendements sont très faibles par rapport aux autres systèmes qui existent [26].

Le gaz sort à une température 70 °C, si nous récupérons cette chaleur pour l'utiliser ultérieurement, le rendement du système global est augmenté [27].

3.5 Comportement thermique de l'électrolyse

Influence de la température de la cellule

La température de la cellule et la pression de la dissociation d'eau sont les paramètres qui influencent le rendement d'une électrolyse d'eau [28-30]. Dans notre étude, nous travaillons à la pression atmosphérique, alors que nous pouvons donc uniquement travailler sur le deuxième paramètre.

La figure 10 montre qu'avec une augmentation la température des cellules de 23 °C à 50 °C, la tension est diminuée, passant de 2,7 V à 2,1V pour une densité de courant de 0,05 A cm⁻². Alors, il est assuré que les performances de l'électrolyse sont fonction de la température qui augmente la conductivité de la membrane, ce qui fait diminuer les surtensions au niveau des électrodes.

Par conséquent, la tension des cellules diminue et ainsi le rendement potentiel sera alors amélioré. Toutefois, compte tenu de la stabilité thermique de la membrane (Nafion), la température optimale de cellules a été sélectionnée à 80 °C.

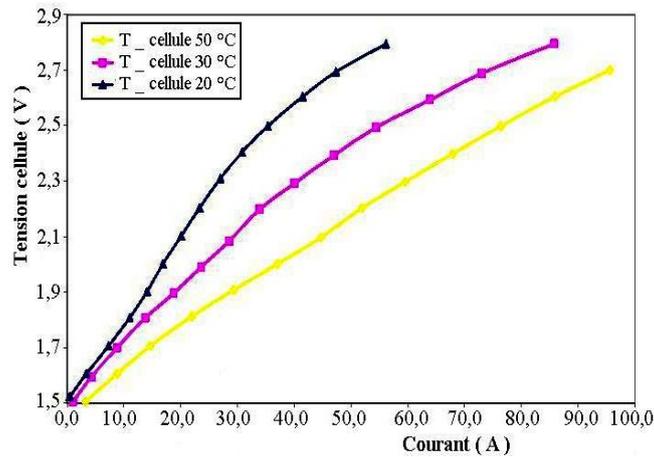


Fig. 10: Evolution de la tension aux bornes d'électrolyse en fonction du courant

Influence de la température de l'extérieur et la température de l'eau d'alimentation

De nombreux travaux [28, 30], ont montré que la température de la cellule est un paramètre très important, qui influence le rendement d'un électrolyseur. Dans notre travail, nous avons étudié aussi l'influence de la température de l'eau d'alimentation et la température ambiante.

Pour étudier ces paramètres, nous avons modifié le prototype. Dans le réservoir d'oxygène, nous avons ajouté une résistance pour chauffer l'eau avec un thermostat pour contrôler la température.

Nous avons utilisé un séchoir pour chauffer l'air jusqu'à une température 30 °C. On contrôle la température ambiante avec un thermostat, (Fig. 11).

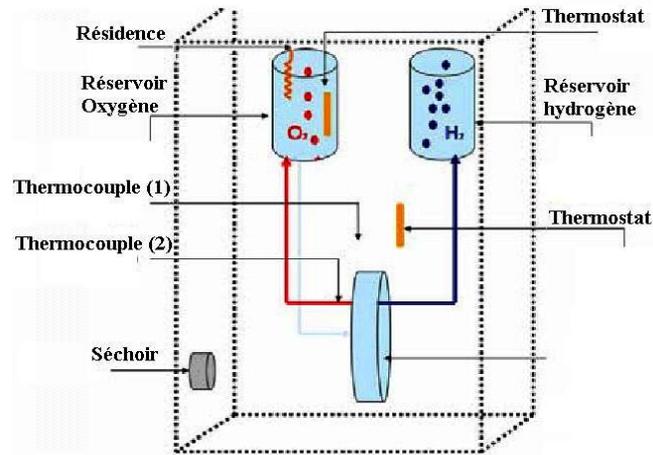


Fig. 11: Modification du prototype

L'influence de la température ambiante et de la température de l'eau d'alimentation sont présentées dans les figures suivantes, (Fig. 12, Fig. 13).

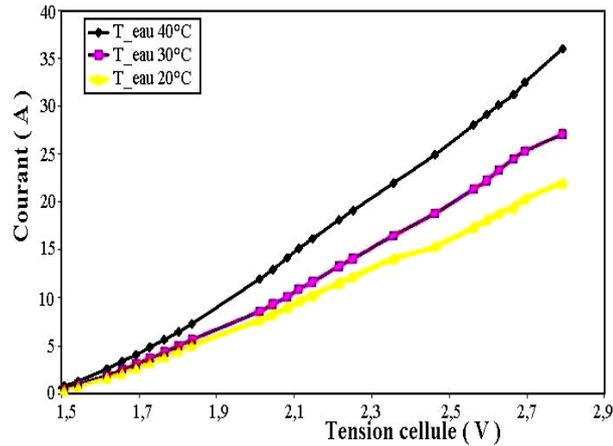


Fig. 12: Evolution de l'intensité en fonction de la tension aux bornes de l'électrolyseur et la température de l'eau d'alimentation

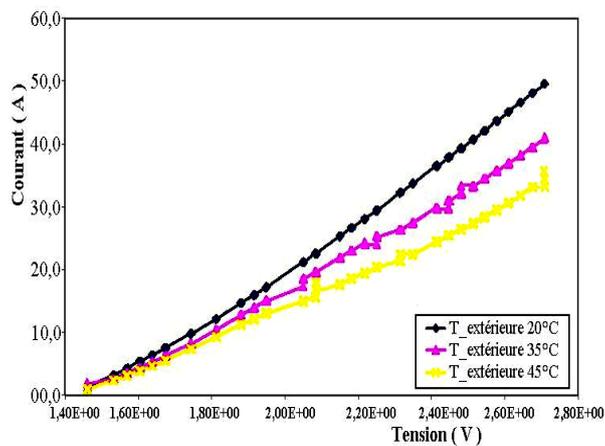


Fig. 13: Evolution de l'intensité en fonction de la tension aux bornes de l'électrolyseur et la température du local

On remarque sur les figures 12 et 13, 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.

La température de fonctionnement augmente avec l'augmentation de l'intensité, alors plus 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 élevée.

Pour augmenter le rendement d'un électrolyseur en diminuant la consommation d'énergie, il faut diminuer les pertes de chaleur vers l'extérieur et l'eau d'alimentation.

Une température supérieure à 45°C endommage la membrane, ce qui diminue fortement les performances de la cellule, (Fig. 14). Alors pour diminuer les pertes vers l'extérieure sans augmenter la température ambiante, nous pouvons calorifier la cellule par exemple.

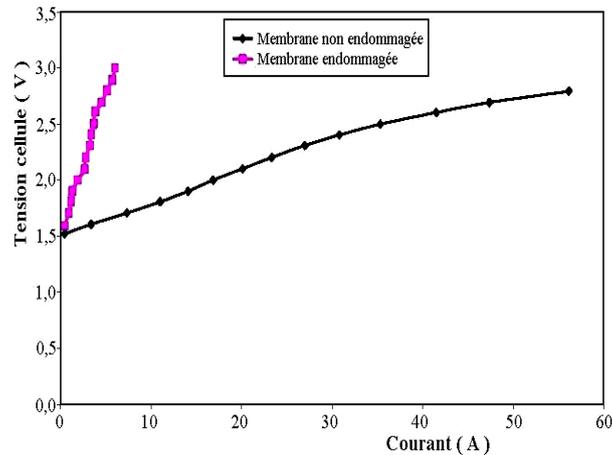


Fig. 14: Evolution de l'intensité en fonction de la tension aux bornes de l'électrolyseur

4. CONCLUSION

Une étude systématique et relativement fouillée de chacun des deux composants de notre prototype a permis d'en acquérir une très bonne compréhension. Ceci a permis d'établir le potentiel annuel de production, dans l'hypothèse d'une utilisation de l'énergie photovoltaïque prioritairement destinée à la production d'hydrogène. Cette production pourrait ainsi s'élever à un total de quasiment 160 MJ/m²/an (16 Nm³/m².an). Ce taux de stockage du flux solaire est environ 30 à 100 fois supérieur à celui de la photosynthèse.

Les expériences ont permis de déterminer les paramètres à optimiser pour des meilleures performances: il s'agit de 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 caractéristique du groupe (anode, membrane et cathode) en veillant aussi sur la rentabilité de l'investissement.

L'hydrogène, en tant qu'élément de stockage et en tant que combustible pour la fusion thermonucléaire, offre une solution concrète à l'intermittence et aux coupures intempestives des énergies renouvelables, ainsi qu'à l'épuisement des ressources fossiles.

Ceci, tout en respectant l'environnement.

NOMENCLATURE

U_{el} : Tension d'alimentation requise par l'électrolyseur, V

V_{H_2} : Volume d'hydrogène

I_{el} : Courant d'entrée de l'électrolyseur, A

t : Temps, s

I_{PV} : Courant de sortie du module PV, A	T_a : Température ambiante, °C
V_{PV} : Tension de sortie du module photovoltaïque, V	P : Constante de Faraday (96485 C/mol (1 C = 1 As))
MPP : Maximum Power Point (Point de Puissance Maximum)	P : Pression atmosphérique
$P_{PV\ max}$: Puissance maximale fournie par le module, W	Z : Nombre d'électrons ($Z(H_2) = 2$)
$\eta_{PV\ max}$: Rendement maximal du module Photovoltaïque	P_{RS} : Constante de gaz parfait (8,314 J/mol.K)
V_{CO} : Tension de circuit ouvert du module photovoltaïque, V	PCS_{H_2} : Pouvoir calorifique supérieur de l'hydrogène
P_{min} : Puissance minimale requise par l'électrolyseur, W	η_{PEM} : Surtension au niveau de la membrane PEM, V
ε : Efficacité énergétique de l'électrolyseur	

REFERENCES

- [1] E. Skolnik and V. Putsche, 'Analysis Tools: IEA Final Task Report, IEA Agreement on the Production and Utilization of Hydrogen', International Energy Agency, 2001.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 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($S\mu$ HHES)', Energy Law Journal, Vol. 29, N°8, pp. 1159 – 1182, 2004.
- [5] M. Santarelli, M. Cal'Quaglia and S. Macagno, 'Design and Analysis of the Operation of Stand-Alone Energy Systems based on Integration of Different Renewable Sources and a Hydrogen Plant', International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 29, N°15, pp. 1571 – 1586, 2004.
- [6] 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. 237 - 246, 2007.
- [7] 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.
- [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] Ø. Ulleberg and S.O. Morner, 'Trnsys Simulation Models for Solar-Hydrogen Systems', Solar Energy, Vol. 59, N°4-6, pp. 271 - 279, 1997.
- [10] 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.
- [11] J.M. Ogden and J. Nitsch, 'Solar hydrogen', In: T.B. Johansson, H. Kelly, A.K.N. Reddy and R.H. Williams, Editors. Renewable Energy, Sources for Fuel and Electricity. Washington DC, Island Press, (Chap. 22), 1993.

- [12] P.S. Kauranen, P.D. Lund and J.P. Vanhanen, 'Development of a Self-Sufficient-Solar-Hydrogen Energy System', International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 19, N°1, pp. 99 - 106, 1994.
- [13] J.P. Vanhanen, P.S. Kauranen and P.D. Lund, 'Operating Experiences of a Phosphoric Acid Fuel Cell in a Solar Hydrogen Energy System', International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 22, N°7, pp: 707 - 713, 1997.
- [14] A. Szyszka, 'Neunburg vorm Wald - Test Centre for Solar Hydrogen Technology', International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 19, N°10, pp. 823 - 841, 1994.
- [15] H. Steeb, W. Seeger and H. Aba Oud, 'Hysolar: An Overview on the German - Saudi Arabian Programme on Solar Hydrogen', International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 19, N°8, pp. 683 - 686, 1994.
- [16] K. Voss, A. Goetzberger, G. Bopp, A. Häberle, A. Heinzl and A. Lehmborg, 'The Self-Sufficient Solar House in Freiburg - Results of 3 Years of Operation', Solar Energy, Vol. 58, N°1-3, pp. 17 - 23, 1996.
- [17] H. Barthels, W.A. Brocke, K. Bonhoff, H.G. Groehn, G. Heuts, M. Lennartz, H. Mai, J. Mergel, L. Schmid and P. Ritzenhoff, 'Phoebus-Jülich: An Autonomous Energy Supply System Comprising Photovoltaics, Electrolytic Hydrogen, Fuel Cell', International Journal Hydrogen Energy, Vol. 23, N°4, pp. 295 - 301, 1998.
- [18] A. Szyska, 'Ten Years of Solar Hydrogen Demonstration Project at Neunburg vorm Wald, Germany', International Journal Hydrogen Energy, Vol. 23, N°10, pp. 849 - 860, 1998.
- [19] S. Galli and M. Stefanoni, 'Development of a Solar-Hydrogen Cycle in Italy', International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 22, N°5, pp. 453 - 458, 1997.
- [20] Y.C Huang, H. Goto, A. Sato, T. Hayashi and H. Uchida, 'Solar Energy Storage by Metal Hydride', Z f Physik Chem. NF, Vol. 164, pp. 1391 - 1396, 1989.
- [21] A.G. Garcia-Conde and F. Rosa, 'Solar Hydrogen Production: a Spanish Experience', International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 18, N°12, 995 - 1000, 1993.
- [22] M.A. Daous, M.D. Bashir and M.M.A. El-Naggar, 'Experiences with the Safe Operation of a 2 kW Solar Hydrogen Plant', International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 19, N°5, pp. 441 - 445, 1994.
- [23] Hydrosol, 'Production Solaire d'Hydrogène', ISM Payenne, Neff Project N°596; Zwischenbericht Mai, Neff, Pflugässlein 2, CH-4001 Basel; Ewi AG, CH- 8034 Zürich 1995.
- [24] P.A. Lehman, C.E. Chamberlin, G. Pauletto and M.A. Rocheleau, 'Operating Experience with a Photovoltaic-Hydrogen Energy System', International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 22, N°5, pp. 465 - 470, 1997.
- [25] J.W. Hollenberg, E.N. Chen, K. Lakeram and D. Modroukas, 'Development of a Photovoltaic Energy Conversion System with Hydrogen Energy Storage', International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 20, N°3, pp. 239 - 243, 1995.
- [26] S.R. Vosen and J.O. Keller, 'Hybrid Energy Storage Systems for Stand-Alone Electric Power Systems: Optimization of System Performance and Cost through Control Strategies', International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 24, N°12, pp. 1139 -1156, 1999.
- [27] M. Saxe and P. Alvfors, 'Advantages of Integration with Industry for Electrolytic Hydrogen Production', Energy, Vol. 32, N°1, pp. 42 - 50, 2007.
- [28] 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.
- [29] M. Park, D.H. Lee and I.K. Yu, 'PSCAD/EMTDC Modeling and Simulation of Solar-Powered Hydrogen Production System', Renewable Energy, Vol. 31, N°14, pp. 2342 - 2355, 2006.
- [30] S. Busquet, C.E. Hubert, J. Labbé, D. Mayer and R. Metkemeijer, 'A New Approach to Empirical Electrical Modelling of a Fuel Cell, an Electrolyser or a Regenerative Fuel Cell'. Journal of Power Sources, Vol. 134, N°1, pp. 41 - 48, 2004.