

**Énergies renouvelables et pile à combustible
dans l'enseignement pratique du génie électrique**

R. Saïssset, G. Fontes, C. Turpin et S. Astier

Laboratoire d'Électronique et d'Électrotechnique Industrielle
Unité Mixte de Recherche INPT-ENSEEIH/CNRS
BP 7122
2 rue Camichel
F-31071 Toulouse CEDEX 7, France

ENERGIES RENOUVELABLES ET PILE A COMBUSTIBLE DANS L'ENSEIGNEMENT PRATIQUE DU GENIE ELECTRIQUE

R. Saisset, G. Fontes, C. Turpin, S. Astier,

Laboratoire d'Electronique et d'Electrotechnique Industrielle, Unité Mixte de Recherche INPT-
ENSEEIH / CNRS - BP 7122 - 2 rue Camichel 31071 TOULOUSE Cedex 7 - France.
nom@leei.enseeih.fr

Résumé :

Les auteurs décrivent une manipulation introduite en première année du cycle de formation d'ingénieur et destinée à sensibiliser les étudiants à la problématique actuelle et future de l'énergie. Trois points fondamentaux et représentatifs des mutations énergétiques en cours sont abordés : l'utilisation rationnelle et le stockage des énergies renouvelables (ici l'énergie solaire), la production d'hydrogène par électrolyse de l'eau et son stockage, la production d'électricité par pile à combustible à partir de l'hydrogène et de l'oxygène (air). La maquette étudiée est constituée de la chaîne suivante : générateur photovoltaïque, électrolyseur, réservoir pour stocker l'hydrogène à pression atmosphérique, pile à combustible et ventilateur (charge). Les étudiants caractérisent successivement chacun des éléments (caractéristiques statiques, puissances) puis réfléchissent à leur association. Un développement est consacré à la validation des phénomènes observés sur la maquette de TP par comparaison à ceux observés sur des générateurs de plus grandes puissances étudiés au LEEI.

Mots clés : énergies renouvelables, énergie solaire, générateur photovoltaïque, électrolyseur, stockage, pile à combustible, électricité, facteur d'échelle.

1 INTRODUCTION

La consommation mondiale d'énergie va augmenter dans les prochaines décennies, même s'il est difficile de prédire et de quantifier cet accroissement. La réduction de la pollution à court terme et la raréfaction à long terme des énergies fossiles, essentiellement exploitées aujourd'hui, rendent incontournable une mutation énergétique profonde. Les énergies renouvelables ne représentent à ce jour que 19% de la consommation énergétique mondiale annuelle évaluée à 140 millions de GWh en 2000 (dont 2.9 millions pour la France). Les ressources en énergies renouvelables sont pourtant très importantes et variées ; énergie :

- géothermique estimée à $0,025 \cdot 10^9$ GWh par an
- des marées estimée à $0,0005 \cdot 10^9$ GWh par an
- hydraulique estimée à $0,025 \cdot 10^9$ GWh par an
- de la biomasse estimée à $0,058 \cdot 10^9$ GWh par an
- éolienne estimée à $1 \cdot 10^9$ GWh par an
- des rayons solaires estimée à $26 \cdot 10^9$ GWh par an.

Cependant, les sources d'énergies renouvelables sont par nature dispersées et leur disponibilité est irrégulière. Ces spécificités et la répartition géographique des lieux de consommation posent le problème du stockage et du transport de l'énergie. Par exemple, comment valoriser l'énergie des rayons solaires au Sahara ?

Deux vecteurs énergétiques complémentaires s'affirment pour permettre de les exploiter plus

souplement : l'électricité et l'hydrogène. Le stockage de l'électricité reste un problème entier (le transport dans une moindre mesure) mais ses qualités sont indéniables (peu polluante, utilisation avec de hauts rendements). L'hydrogène, avec 30 kWh par kg, offre des perspectives de stockage et de transport très intéressantes. Le développement de ce vecteur énergétique ne prend pleinement son sens qu'en le couplant avec celui des piles à combustible (PAC) qui permettent de créer de l'énergie électrique en le combinant avec de l'oxygène (ressource primaire très abondante). Fait remarquable, les sous-produits de cette réaction, eau et chaleur, sont non polluants et peuvent même être valorisés.

Le stockage des énergies renouvelables par l'hydrogène pourrait ainsi s'effectuer lors de sa synthèse : soit par électrolyse de l'eau (ressource primaire très abondante) à partir d'énergie électrique d'origine éolienne, solaire, ..., soit en transformant la biomasse (bactéries...). Précisons que l'hydrogène n'existe pas à l'état naturel sur notre planète et que d'importants travaux sont encore à mener pour maîtriser un stockage efficace à pression ambiante (nanotubes de carbone...) et à haute pression.

Ce bilan énergétique, même dressé succinctement, permet de mettre en exergue tous les enjeux énergétiques sous-entendus derrière le TP (Travail Pratique) que nous décrivons dans cet article. Ce TP a été introduit depuis deux ans en première année du cycle de formation d'ingénieur. Nous allons nous attacher à décrire toute sa pertinence par une

confrontation des phénomènes observés à ceux de dispositifs de plus fortes puissances.

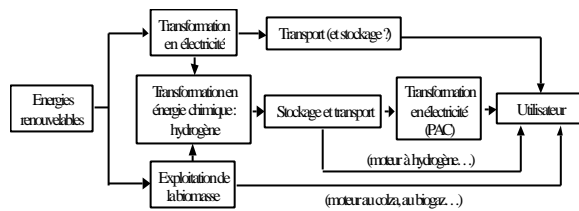


fig 1 : exploitations futures des énergies renouvelables ?

2 PRESENTATION DE LA MAQUETTE

Cette manipulation porte sur l'étude d'une chaîne propre de production d'énergie qui exploite l'énergie solaire, l'hydrogène et l'électricité (figure 2). La démarche consiste à caractériser successivement un générateur photovoltaïque, une cellule d'électrolyse et une pile à combustible de type PEM puis à réfléchir à leur association. Sont étudiées, entre autres, les puissances délivrées par ces éléments. Enfin, un exercice d'application propose de dimensionner une installation réelle par extrapolation.

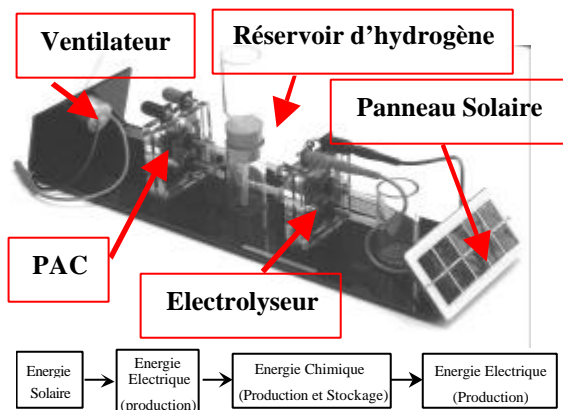


fig 2 : description de la maquette du TP

2.1 Cellule photovoltaïque

L'énergie solaire est la plus importante des énergies renouvelables, mais elle n'est pas utilisable dans sa totalité. En effet, 30% des rayons solaires sont réfléchis vers l'espace, 45% sont transformés en chaleur rayonnée dans l'infrarouge et 25%, dont 6.5% sont estimés exploitables par l'homme, sont convertis à la surface de la terre.

Le rayonnement solaire est constitué de photons transportant une énergie. Dans un générateur photovoltaïque constitué de semi-conducteurs, les photons sont absorbés par le matériau en transmettant leur énergie aux électrons. Si cette énergie est suffisante, c'est-à-dire supérieure à E_g

(énergie de gap ou largeur de bande interdite eV) alors l'électron excité peut passer de la bande de valence à la bande de conduction. L'électron et le trou ainsi libérés doivent rapidement être collectés pour participer ensuite à la conduction électrique avant leur recombinaison.

Dans le cas d'une cellule photovoltaïque idéale, on fait les hypothèses suivantes :

- tout photon d'énergie inférieure à E_g n'est pas absorbé et traverse le matériau sans transmettre d'énergie.
- tout photon d'énergie supérieure à E_g est totalement absorbé et crée une paire d'électron-trou.
- il n'y a pas de recombinaison.

Sur la figure 3 sont représentées différentes caractéristiques statiques d'une cellule photovoltaïque pour différents éclairagements. Le système fonctionne en générateur dans le quadrant IV, c'est-à-dire que le produit $V \cdot I$ (puissance) est négatif. On obtient alors un générateur photovoltaïque à jonction PN.

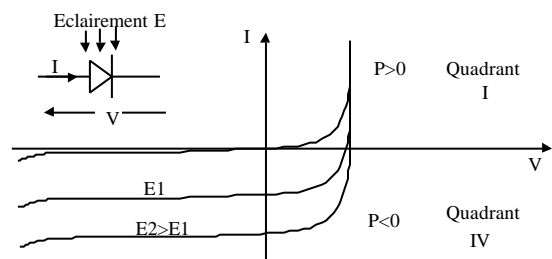
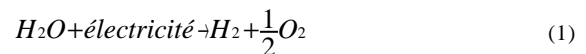


fig 3 : fonctionnement d'un générateur photovoltaïque

2.2 Cellule d'électrolyse

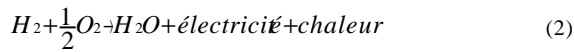
Au sein de cette cellule, on décompose l'eau suivant l'équation suivante grâce à un courant électrique qui circule entre deux électrodes :



Le stockage de H_2 s'effectue très simplement à pression atmosphérique dans un réservoir rempli d'eau (figure 2). Le gaz produit vient chasser l'eau et s'accumuler sous le liquide. Le dioxygène produit est quant à lui rejeté dans l'air.

2.3 Cellule de pile à combustible

La pile à combustible repose sur l'exploitation de la réaction inverse de l'électrolyse de l'eau à savoir la réaction d'oxydoréduction suivante :



On fait réagir l'hydrogène et l'oxygène, la réaction fournissant de l'énergie électrique, de la chaleur et de l'eau. L'oxygène est généralement issu de l'air ambiant (cas du TP), mais il peut s'agir éventuellement d'oxygène pur. Chaque gaz (combustible et comburant) est dissocié sur une électrode (en graphite généralement), dans laquelle des catalyseurs en platine (pour les piles basse température) ont été dispersés. Ces électrodes sont séparées par un électrolyte, isolant électronique et conducteur ionique.

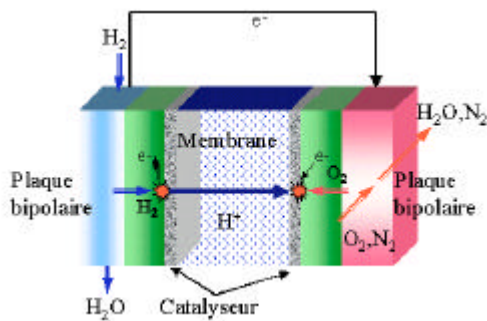


fig 4 : principe de la PAC (exemple d'une PEM) [8]

La tension maximale théorique E° (1.23V) n'est jamais atteinte aux bornes d'une PAC. Lorsque la pile débite, la tension qu'elle délivre chute à cause de divers phénomènes physico-chimiques (figure 8) :

$$E(I) = E^\circ - RI - h_a - |h_c| \quad (3)$$

- h_a , h_c : chutes de tension dues aux réactions chimiques à l'anode et à la cathode.
- RI : chutes ohmiques, principalement dans la membrane.

3 DESCRIPTION DE LA MANIPULATION

Le TP se décompose en deux parties. Dans un premier temps, il s'agit de caractériser chaque élément de la chaîne de conversion. Dans un second temps, il est proposé de dimensionner un système réel d'alimentation en site isolé.

L'objectif de ces manipulations est de permettre aux étudiants de se familiariser avec des générateurs particuliers qui peuvent, par exemple pour le générateur photovoltaïque, fonctionner aussi bien en court-circuit qu'en circuit ouvert. De même, l'étude d'une cellule PEM en fonctionnement récepteur (électrolyseur) et en fonctionnement générateur (pile à combustible) permet de comprendre son fonctionnement théoriquement réversible. En effet, l'électrolyseur et la pile à combustible sont réalisés

par deux éléments sensiblement identiques sur la maquette.

3.1 Le panneau solaire

Le tracé de la caractéristique statique (figure 6) du panneau solaire permet de mettre en évidence le point de puissance maximum et de sensibiliser des étudiants au problème de l'adaptation d'impédance (figure 5) (principe des techniques de Maximum Power Point Tracking).

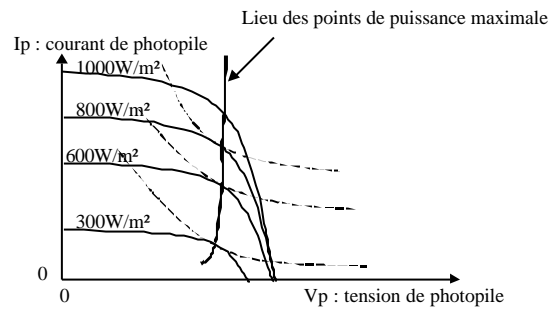


fig 5 : lieu théorique des points de puissance maximum pour différents éclairements du panneau

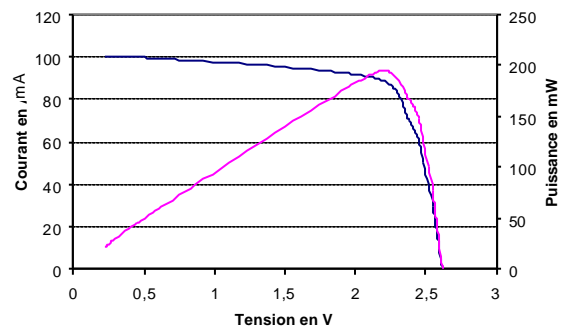


fig 6 : résultats expérimentaux sur le panneau solaire

3.2. L'électrolyseur

Après avoir tracé la caractéristique statique de l'électrolyseur (figure 7), les étudiants mettent en évidence la proportionnalité entre le courant (nombre d'électrons) circulant dans l'électrolyseur et le nombre de moles de dihydrogène créées :



Le stockage du dihydrogène est réalisé sous forme gazeuse à la pression atmosphérique. Sur la maquette, nous pouvons stocker jusqu'à 30 cm³ de dihydrogène. Cela correspond à :

$$n = \frac{PV}{RT} = \frac{10^5 * 30 \cdot 10^{-6}}{8.314 * 300} = 1,2 \cdot 10^{-3} \text{ moles} \quad (5)$$

Au point de puissance maximum, la pile à combustible consomme 90 mA (figure 8). On peut donc la faire fonctionner pendant :

$$t = \frac{2nF}{I} = \frac{2 * 1,2 * 10^{-3} * 96493}{90 \cdot 10^{-3}} = 2573 \text{ s} \quad (6)$$

Ce temps est largement suffisant pour le TP, mais il est important de montrer aux étudiants que pour un véhicule électrique par exemple, un stockage à pression atmosphérique n'est pas viable. En effet, une voiture électrique consomme pour 500 km à 100 km/h environ 2500 moles de dihydrogène, soit 5 kg ou encore une énergie théorique de 150 kWh. Pour stocker cet hydrogène, il faudrait un volume de :

$$V = \frac{nRT}{P} = \frac{2500 * 8.1314 * 300}{10^5} = 61 \text{ m}^3 \quad (7)$$

Soit un volume de 61000 litres de dihydrogène ! Ce résultat illustre bien à lui seul toute la problématique actuelle sur le stockage du dihydrogène.

3.3 La pile à combustible

Le tracé de la caractéristique permet de mettre en évidence les différentes chutes de tension dans une cellule élémentaire. La partie linéaire permet en outre de mesurer, avec une grossière approximation, la résistance de la membrane :

$$E(I) = E^o - RI - h_a - |h_c| \quad (8)$$

La valeur de résistance (figure 8) est à comparer avec celle de la membrane de l'électrolyseur. La différence constatée met en lumière la variation de la conductivité de la membrane en fonction de son taux d'humidification. En effet, dans l'électrolyseur, la membrane est noyée dans le réactif (l'eau) et la résistance est donc plus faible. Le noyage de la pile à combustible permettrait aussi de diminuer la résistance, mais on empêcherait ainsi les gaz d'arriver aux sites réactifs sur les électrodes.

3.4 Exercice d'application

Les étudiants dimensionnent (par extrapolation) un dispositif réel: un appareillage électronique autonome (balise...) nécessite une puissance de 100W sous une tension de 10V. Il doit fonctionner 24h/24h. Le jour, les panneaux solaires alimentent l'installation électrique et l'électrolyseur pour synthétiser l'hydrogène. Pour fonctionner la nuit, on

couple le système à une pile à combustible alimentée en hydrogène.

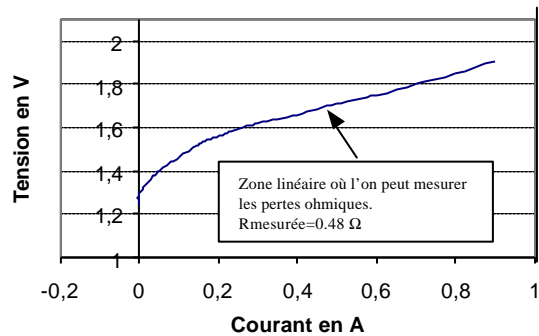


fig 7 : relevé expérimental de la caractéristique statique de l'électrolyseur

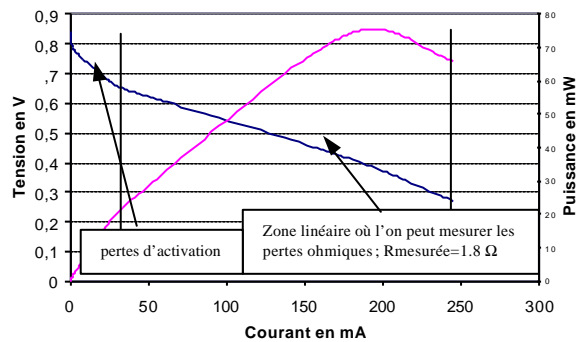


fig 8 : relevés expérimentaux sur la pile à combustible

4 VALIDATION DES PHENOMENES OBSERVES

Le LEEI, laboratoire associé au département GEA de l'ENSEEIH, possédant une pile PEM d'une puissance de 200 W ainsi que des panneaux solaires, nous avons pu valider la pertinence des phénomènes physiques observés sur la maquette de TP. L'hypothèse initiale est de considérer qu'ils ne sont pas affectés par l'effet d'échelle. Nous définissons le facteur d'échelle comme une homothétie de la caractéristique statique de la maquette. Une augmentation de la tension nominale correspond à une mise en série de cellules élémentaires. De même, une augmentation du courant nominal correspond, à densité de courant donnée, à une augmentation de la surface d'une cellule.

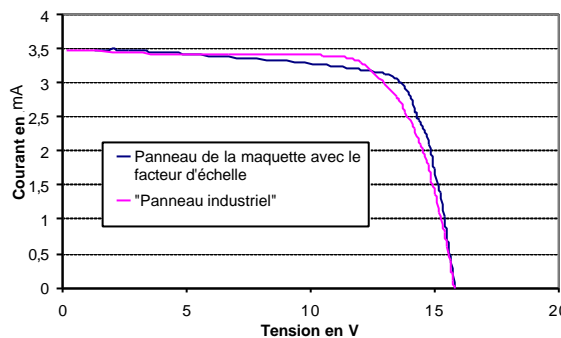


fig 9 : comparaison entre le générateur photovoltaïque du LEEI et celui extrapolé à partir du panneau du TP

Les courbes (figures 9 et 10) confirment la cohérence de la démarche. On observe toutefois que la résistance de la cellule de la pile de 200 W est moins grande que celle de la maquette de TP.

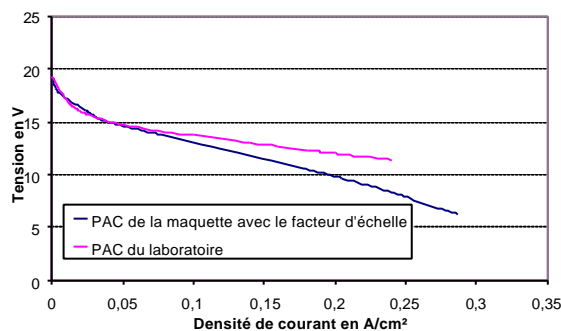


fig 10 : comparaison entre la PAC du LEEI et celle extrapolée à partir de la cellule PAC du TP

5 CONCLUSION

Ce TP permet une bonne sensibilisation des étudiants aux énergies nouvelles. Ils y sont très réceptifs et cela vient même modifier leur perception

du Génie Electrique. De plus, l'exercice d'application permet une véritable étude d'ingénierie pertinente avec des dispositifs de plus grandes puissances. Ce travail est poursuivi en 3^{ème} année du cycle d'ingénieur par un cours sur les énergies renouvelables. Ce TP sera très certainement enrichi par une observation plus précise des phénomènes chimiques, comme la capacité de double couche.

Ce « nouveau » domaine qui comporte aussi bien de la chimie, de l'électrotechnique, mais également de la thermique (et de l'hydraulique, même si cela n'est pas souligné dans ce TP), est une source de motivation supplémentaire pour les étudiants et doit permettre un renouveau de l'enseignement de notre discipline.

Bibliographie

1. L. Protin, S. Astier, « Convertisseurs Photovoltaïques », *Techniques de l'ingénieur D3360*
2. P. Stevens, F. Novel-Cattin, C. Lamy, A. Hammou, M. Cassir, « Piles à combustible », *Techniques de l'ingénieur D3340*.
3. B. Dessus, « Atlas des énergies pour un monde vivable », *Syros 1994*.
4. B. Lafage, « TP pile à combustible H₂/O₂ », Université Paul Sabatier, *TOULOUSE*.
5. Maquette expérimentale PEMPower1-Eco, H-TEC Wasserstoff-Energie-Systeme GmbH, Lindenstasse 48a, 23558 Lübeck.
6. B. Multon, « Production d'énergie électrique par sources renouvelables », *Techniques de l'ingénieur D4005*.
7. www.h-tec.com
8. www.annso.freesurf.fr/bases.html.