

Dimensionnement optimal d'un système photovoltaïque pour la production d'hydrogène pour usage en mélange avec le gaz naturel comprimé dans les véhicules

H. Tebibel^{*}, B. Mahmah et W. Bendaïkha[†]

Division Hydrogène et Energie Renouvelables
Centre de Développement des Energies Renouvelables, CDER
B.P. 62, Route de l'Observatoire, Bouzaréah, Alger, Algérie

(reçu le 19 Septembre 2012 – accepté le 29 Décembre 2012)

Résumé - *A moyen terme, le mélange gaz naturel comprimé et hydrogène 'HCNG' peut être utilisé en Algérie pour surpasser la forte consommation en carburant ces dernières années. La production du mélange 'HCNG' nécessite des systèmes de production d'hydrogène. L'actuel article présente la méthodologie pour un dimensionnement optimal d'un système photovoltaïque pour la production d'hydrogène 'PV-H₂' qui sera utilisé en mélange avec le gaz naturel comprimé pour les véhicules. Une étude de cas appliquée sur le parc d'automobile type GNC de Sonelgaz est présentée. Le dimensionnement effectué, lors de cette étude, est réalisé sur deux systèmes 'PV-H₂' correspondant à l'enrichissement du GNC par l'hydrogène à 8 % et 20 % par volume. La capacité du générateur photovoltaïque et de l'électrolyseur constituant le système à 8 %: 152 kWc et 148 kW et le système à 20 %: 480 kWc et 470 kW respectivement. Le premier système (PV-H₂-8%) génère entre 0.31 et 1.07 MWh d'électricité PV utilisé pour produire entre 5.2 et 17.7 kg d'hydrogène. La capacité du second système (PV-H₂-20%) lui permet de générer entre 0.78 et 2.68 MWh d'électricité pour produire entre 13.02 et 44.3 kg d'hydrogène.*

Abstract - *In the medium term, the mixture of compressed natural gas and hydrogen 'HCNG' can be used in Algeria as fuel to surpass the high consumption in last years. The production of 'HCNG' requires hydrogen production systems. This paper presents a methodology for optimal design and sizing of photovoltaic system for hydrogen production 'PV-H₂' to be used in mixture with compressed natural gas in vehicles. A case study applied to the GNC fleet of Sonelgaz is presented. Sizing performed in this study is carried out on two PV-H₂ systems corresponding to the hydrogen enrichment with 8 % and 20% by volume. Capacities of the PV generator and electrolyzer system components are for 8 %: 152 kWp and 148 kW, and for 20 %: 480 kWp and 470 kW respectively. The first system (PV-H₂-8%) generates between 0.31 and 1.07 MWh of PV electricity used to produce between 5.2 and 17.7 kg of hydrogen. The capacity of the second system 'PV-H₂-20%) allows generating between 0.78 and 2.68 MWh of electricity used to produce between 13.02 and 44.3 kg of hydrogen.*

Mots clés: Dimensionnement optimal - Système photovoltaïque - Production d'hydrogène - Mélange hydrogène gaz naturel comprimé 'HCNG' - HCNG carburant.

1. INTRODUCTION

L'hydrogène constitue l'élément le plus présent dans l'univers et le composant principal des étoiles. Néanmoins, cet élément est peu présent en forme indépendante et

^{*} tebibel.hammou@cder.dz , mah2bouziane@gmail.com

[†] w_bendaïkha@yahoo.com

en grande quantité sur la Terre, raison pour laquelle, il est produit pour satisfaire les besoins industriels.

Il est employé dans une grande variété d'applications: fabrication d'ammoniac et d'engrais, production de poly-silicium, fabrication de margarine, refroidissement des centrales électriques, etc. [1]. Le secteur des transports est aussi un des domaines d'utilisation de l'hydrogène en tant que vecteur énergétique et cela à travers les véhicules électriques alimentés par des piles à combustible [2] ou directement en mélange avec le gaz naturel comprimé 'GNC' [3].

Ces dernières années en Algérie, la consommation énergétique du secteur des transports a connu une croissance de 2,8 % pour atteindre 5,845 millions de TEP en 2005 [4], cela est dû à la forte expansion que connaît le parc automobile où 4 171 827 véhicules immatriculés sont recensés fin 2009 [5, 6]. Cette croissance accentue la dépendance du pays en ressources fossiles pétrolières et augmente les émissions de CO₂. En plus des effets néfastes causés par la combustion des hydrocarbures, sans oublier l'épuisement des énergies fossiles [7], cette situation révèle un besoin pressant à la conversion vers des combustibles plus propres et économiquement viables.

Par conséquent, l'hydrogène mélangé au gaz naturel comprimé 'HCNG' est le plus envisageable et crédible combustible actuellement étant donné les grandes réserves et capacités de production en gaz naturel estimée à 4.52×10^{12} et 86.5×10^9 m³ respectivement [8], et les grandes potentialités de production d'hydrogène que disposent l'Algérie [9].

D'autre part, l'hydrogène peut être obtenu essentiellement par reformage ou gazéification du combustible fossile, ou bien par électrolyse de l'eau. Le projet Medhysol [10] dans sa partie Hysolthane qui vise à inciter l'introduction du combustible 'HCNG' dans le secteur automobile en Algérie, projette l'utilisation de l'hydrogène électrolytique produit via l'électricité d'origine solaire photovoltaïque 'PV' à un taux de 8 % en mélange avec le 'GNC' [3]. La partie amont du mélangeur dans le système du projet représente un système de production et de stockage d'hydrogène par voie photovoltaïque PV-H₂.

Avant de mettre en place un tel système, le recours à un dimensionnement des différents composants du système est indispensable. Plusieurs études ont été établies dans l'objectif de modéliser et de dimensionner des systèmes autonomes photovoltaïques à stockage d'hydrogène [11-15], mais peu d'études ont abordé les systèmes photovoltaïques, spécialement pour la production d'hydrogène.

2. CONTEXTE DE L'ETUDE

L'introduction du combustible 'HCNG' dans le secteur de l'automobile en Algérie peut se faire dans un premier temps en équipant les stations de service actuelles par des distributeurs du combustible 'HCNG', et par la suite la création de nouvelles stations spécialisées en HCNG.

La production du combustible HCNG peut se faire d'une manière centralisée pour approvisionner les stations par les moyens actuels, ou bien au niveau de chaque station. Dans les deux cas, le système de production de l'hydrogène solaire doit être dimensionné sur la base des statistiques de consommation, les données météorologiques du site de production et le rendement de chaque élément du système. Pour que le combustible HCNG puisse être utilisé dans les véhicules de technologies actuelles,

c'est-à-dire dans les moteurs à combustion pauvre, l'enrichissement du GNC avec l'hydrogène ne doit pas dépasser les 20 % en volume [16].

L'objectif de ce travail consiste à étudier le dimensionnement optimal d'un système photovoltaïque pour la production et le stockage de l'hydrogène afin de l'utiliser dans le mélange HGNC à différents taux d'enrichissement, de 8 % jusqu'à 20 % de H₂.

Comme présenté sur la figure 1, le système photovoltaïque pour la production de l'hydrogène 'PV-H₂' est constitué d'un générateur photovoltaïque associé à un convertisseur MPPT, un électrolyseur avec convertisseur DC/DC, compresseur et des bouteilles de stockage.

Le générateur PV convertit l'énergie solaire du rayonnement en énergie électrique. Puisque l'efficacité de conversion des plus répandus générateurs photovoltaïques en silicium n'excède pas les 24 %, le convertisseur DC/DC avec MPPT, permettant à ces générateurs de fonctionner au point de puissance maximum, est employé pour assurer l'augmentation de l'efficacité globale du système dans les conditions de fortes fluctuations.

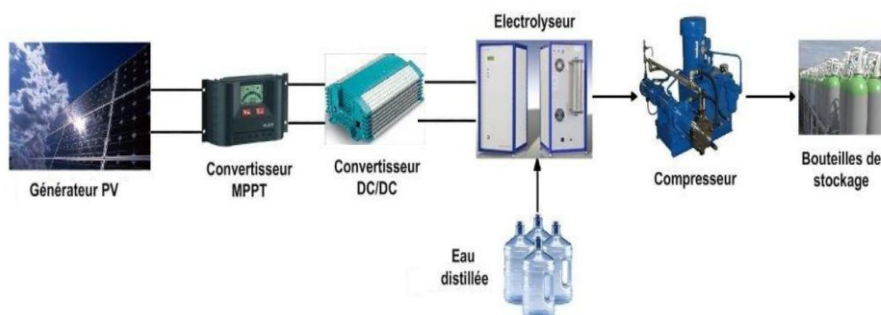


Fig.1: Système photovoltaïque de production d'hydrogène

L'électrolyseur dissocie l'eau en hydrogène et oxygène en utilisant l'électricité fournie par le générateur photovoltaïque à travers le convertisseur DC/DC. Pour assurer une grande densité de stockage, l'hydrogène produit est comprimé avant d'être stocké dans les bouteilles d'hydrogène.

3. METHODOLOGIE

3.1 Dimensionnement des besoins en hydrogène

C'est la première étape dans le dimensionnement du système. Dépendamment du taux d'hydrogène dans le mélange du 'HCNG', les besoins journaliers d'une station de service en hydrogène peuvent être quantifiés par:

$$m_{H_2,j} = M \times V_{H_2} \times V_{HCNG,j} \times x \quad (1)$$

Où, $m_{H_2,j}$ représentent les besoins journaliers en hydrogène; $M \times V_{H_2}$, la masse volumique de l'hydrogène; $V_{HCNG,j}$, le volume du combustible 'HCNG' servi par la station par jour et x , le taux d'hydrogène dans le mélange 'HCNG'.

Les besoins annuels d'une station de service en hydrogène peuvent être quantifiés par:

$$m_{H_2,a} = \sum_{j=1}^{365} m_{H_2,j} \quad (2)$$

3.2 Dimensionnement de l'énergie consommée par l'électrolyseur

En utilisant l'électricité fournie par le générateur photovoltaïque, l'électrolyseur assure les besoins en hydrogène en consommant une quantité annuelle d'énergie qui peut être estimée par la relation suivante:

$$E_{el,a} = \frac{m_{H_2,a} \times HHV}{\eta_{el}} \quad (3)$$

Où, HHV est le pouvoir calorifique supérieur de l'hydrogène (HHV=39.44 Wh/kg) et η_{el} le rendement de l'électrolyseur.

3.3 Dimensionnement de l'énergie fournie par le générateur photovoltaïque

La production de l'hydrogène par l'électrolyseur nécessite que le générateur photovoltaïque fournisse une quantité annuelle d'énergie estimé par:

$$E_{pv,a} = \frac{m_{H_2,a} \times HHV}{\eta_{mp} \times \eta_{dc} \times \eta_{el}} \quad (4)$$

Où, η_{mp} , représente le rendement du convertisseur DC/DC avec MPPT, et η_{dc} le rendement du convertisseur DC/DC simple.

3.4 Dimensionnement de la puissance du générateur photovoltaïque

La quantité annuelle d'énergie fournie par le générateur photovoltaïque à l'électrolyseur dépend de la puissance crête du générateur PV et de l'irradiation solaire annuelle du site. La puissance crête du générateur peut être calculé par:

$$P_{pv} = \frac{M_{pv} \times m_{H_2,a} \times HHV}{\eta_{mp} \times \eta_{dc} \times \eta_{el} \times SPH} \quad (5)$$

où, M_{pv} représente le coefficient de marge, qui est généralement supérieur ou égal à 1.1 pour assurer une capacité suffisante du générateur PV et la durabilité du système global. SPH, est le nombre d'heure annuelle durant lesquelles le générateur PV est capable de recevoir une irradiation de 1kW/m^2 au site de l'installation du système.

3.5 Dimensionnement de l'électrolyseur

La puissance nominale de l'électrolyseur peut être calculée par:

$$P_{el} = I_{s\max} \times A_{pv} \times \eta_{pv} \times \eta_{mp} \times \eta_{dc} \quad (6)$$

Où $I_{s\max}$, est la valeur maximale de l'irradiance durant l'année, A_{pv} , la surface du générateur photovoltaïque, η_{pv} est le rendement du générateur solaire.

4. CAS D'ETUDE

Deux des trois paramètres nécessaires pour le dimensionnement d'un système de production d'hydrogène par voie photovoltaïque varient avec la localisation du site du système: la consommation en 'HCNG' et l'irradiation solaire. Alger, la capitale de l'Algérie compte plus d'un million de véhicules, est la ville qui possède le plus grand parc d'automobile en Algérie.

D'autre part, la situation géographique de la wilaya d'Alger (latitude: 36.8N et longitude: 3.1E) lui permet de recevoir en moyenne annuelle une irradiation solaire horizontale d'environ 4.69 kWh/m² [17]. En plus de l'abondance des ressources en eau, ces critères les qualifient à être parmi les régions les plus favorable pour la production d'hydrogène solaire en Algérie.

Notre étude a pour objectif d'évaluer dans un premier temps, les dimensions des principaux composants du système 'PV-H₂' pour assurer l'approvisionnement du mélange 'HCNG' au taux de 8 %, 12 %, 16 % et 20 % en hydrogène et aux différents nombres de véhicules simulés pour la région d'Alger.

La capacité de réservoir du véhicule type utilisé dans la simulation est de 20 kg. Les rendements de conversion électrique du générateur PV, de l'électrolyseur, du convertisseur MPPT et du convertisseur DC/DC utilisés dans la simulation sont respectivement de 14 %, 70 %, 98 % et 95 %. Les résultats de simulation d'un système type de production d'hydrogène solaire sont présentés dans un second temps.

Les figures 2 et 3 présentent la variation des dimensions du générateur PV et de l'électrolyseur nécessaire pour assurer la contribution de l'hydrogène dans des mélanges de 8 %, 12 %, 16 % et 20 % du HCNG avec le nombre de véhicules approvisionnés.

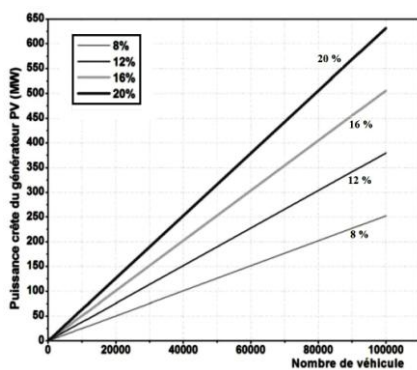


Fig. 2: Puissance crête du générateur photovoltaïque en fonction du nombre de véhicules

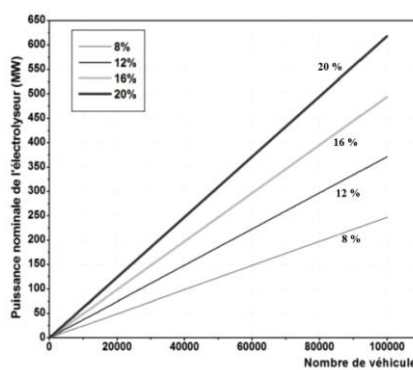


Fig. 3: Puissance nominale de l'électrolyseur en fonction du nombre de véhicules

Au taux de 8 % en volume d'hydrogène, une station, à fréquence de 100 véhicules par jour, devrait être dotée d'un système 'PV-H₂' dont la puissance crête du générateur PV est de 252.7 kWc et un ensemble d'électrolyseur de puissance de 247 kW, alors que si on augmente l'enrichissement du GNC par hydrogène à 20 % en volume, les capacités du générateur et de l'électrolyseur doit être de 631.8 kWc et 617.6 kW, respectivement.

La production centralisée du 'HCNG' au taux de 8 % pour approvisionner 80000 véhicules nécessite un système 'PV-H₂' dont la puissance du générateur PV est de 227 MW_c et de l'électrolyseur de 222 MW.

A 20 % en volume d'hydrogène, les capacités du générateur et de l'électrolyseur devraient être de 569 MW_c et 556 MW, respectivement.

Pour le cas pratique, l'estimation de l'énergie produite par le générateur photovoltaïque et consommée par l'électrolyseur pour assurer durant une année des taux de 8 % et 20 % en volume d'hydrogène est réalisée sur une quantité du 'HCNG' de 1200 kg, c'est la capacité globale des réservoirs de 05 autobus et de 50 véhicules, le parc automobile de Sonelgaz roulant au GNC.

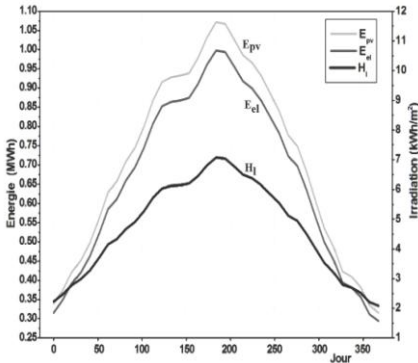


Fig. 4: Energie produite par le générateur PV et consommée par l'électrolyseur pour produire 8% en volume d'hydrogène durant une année

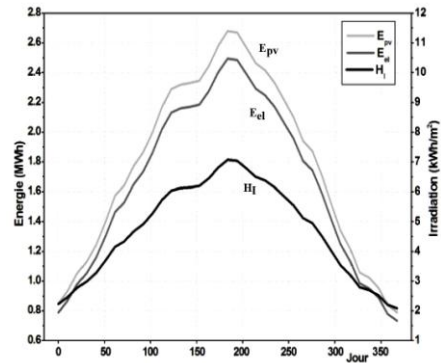


Fig. 5: Energie produite par le générateur PV et consommée par l'électrolyseur pour produire 20% en volume d'hydrogène durant une année

L'enrichissement du GNC avec de l'hydrogène à 8 % en volume pour approvisionner le parc de Sonelgaz nécessite un système PV-H₂ 'PV-H₂-8%' dont la puissance crête du générateur PV est de 152 kW_c et un électrolyseur de puissance nominale de 148 kW.

Par contre, si le mélange 'HCNG' doit être préparé au taux de 20 % en volume, le générateur PV et l'électrolyseur constituant le système PV-H₂ 'PV-H₂-20%' devraient avoir les puissances de 380 kW_c et 370 kW, respectivement.

D'après le bilan annuel de la simulation, l'énergie journalière produite par le générateur PV du système 'PV-H₂-8%' varie au cours de l'année 315 kWh à un maximum de 1072 kWh, alors que la consommation journalière en énergie de l'électrolyseur varie entre 294-998 kWh. Les valeurs moyennes annuelles de l'énergie produite par le générateur photovoltaïque et consommée par l'électrolyseur sont de 698 et 650 kWh respectivement.

Cependant, le générateur PV du second système 'PV-H₂-20%' produit durant une année entre 788 et 2680 kWh, en conséquence l'électrolyseur consomme durant l'année entre 734 et 2495 kWh. La production moyenne annuelle du générateur photovoltaïque est estimée à 1745 kWh. L'électrolyseur consomme en moyenne annuelle presque 93 % de l'énergie délivrée par le générateur PV, où l'étape de conversion cause près de 7 % de pertes.

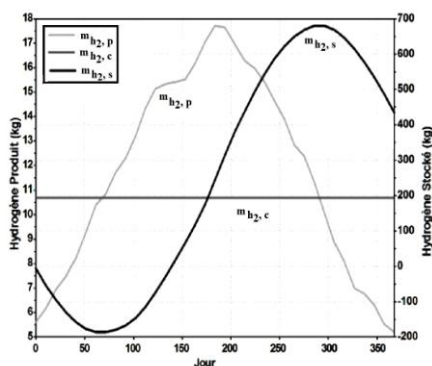


Fig. 6: Hydrogène produit par le système 'PV-H₂-8%' et stocké sur une année

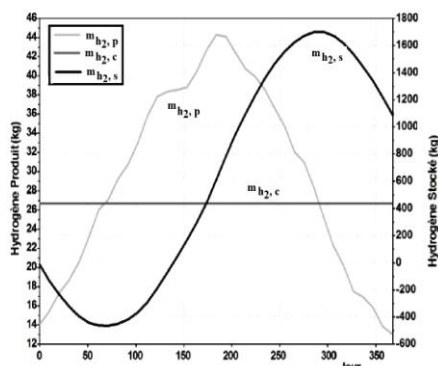


Fig. 7: Hydrogène produit par le système 'PV-H₂-20%' et stocké sur une année

Les quantités journalières d'hydrogène $m_{H_2,c}$ nécessaires pour la préparation de 1200 kg du mélange 'HCNG' à 8% et 20% par volume sont de 10.68 et 26.7 kg, respectivement. Selon les conditions d'irradiation d'Alger, les deux systèmes 'PV-H₂-8%' et 'PV-H₂-20%' peuvent assurer la demande en 'HCNG', dès le début de l'année que s'ils disposent préalablement d'une réserve d'hydrogène de 190 et 470 kg, respectivement.

Dans le cas contraire, les deux systèmes ne seront pas en mesure d'assurer la demande en 'HCNG' qu'à partir du début du mois de Mars en raison d'un déficit dans la production d'hydrogène pouvant atteindre les 5.1 et 12.7 kg en début de l'année.

Le système 'PV-H₂-8%' produit sur une année entre 5.2 et 17.7 kg, tandis que le système 'PV-H₂-20%' en produit entre 13.02 et 44.3 kg. La capacité de stockage de l'hydrogène nécessaire pour chaque système est de 680 et 1700 kg respectivement.

5. CONCLUSION

Dans cet article, la méthodologie du dimensionnement optimal d'un système de production d'hydrogène par voie photovoltaïque intégré au système de production du 'HCNG' est présentée.

Un cas d'étude sur l'éventualité de transformer le parc automobile GNC de la Sonelgaz en 'HCNG' est effectué par le dimensionnement et l'illustration des performances du système 'PV-H₂'. Le parc est constitué de 05 bus et 50 véhicules, ce qui implique une consommation journalière de 1200 kg du 'HGNC'.

Pour un fonctionnement optimal, un tel système doit être équipé d'un générateur PV et d'un électrolyseur de puissance de 152 kWc et 148 kW pour pouvoir approvisionner sur toute l'année, le parc avec du 'HCNG' enrichi à 8% en volume. Cependant, l'enrichissement du GNC à 20% en volume exige un système 'PV-H₂' dont la puissance du générateur PV et de l'électrolyseur sont de 480 kWc et 470 kW respectivement. Les deux systèmes doivent aussi disposer d'une capacité de stockage d'hydrogène respectivement de 680 et 1700 kg.

Le système 'PV-H₂-8%' reçoit quotidiennement une irradiation qui varie entre 2.02 et 7.07 kWh/m² convertie au niveau du générateur PV en électricité dont les quantités varient entre 0.31 et 1.07 MWh utilisé pour produire entre 5.2 et 17.7 kg d'hydrogène.

La capacité du système 'PV-H₂-20%' lui permet de générer entre 0.78 et 2.68 MWh d'électricité pour produire entre 13.02 et 44.3 kg d'hydrogène.

REFERENCES

- [1] K. Rajeshwar, R. McConnell and S. Licht, '*Solar Hydrogen Generation: Toward a Renewable Energy Future*', New York, NY: Springer, 2008: ISBN: 978-0-387-72809-4.
- [2] N.A. Kelly, T.L. Gibson and D.B. Ouwerkerk, '*Generation of High-Pressure Hydrogen for Fuel Cell Electric Vehicles Using Photovoltaic-Powered Water Electrolysis*', International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 36, N°24, pp. 15803 – 15825, 2011.
- [3] F. Amrouche, A. Benzaoui, P. Erickson, B. Mahmah, F. Herouadi and M. Belhamel, '*Toward Hydrogen Enriched Natural Gas 'HCNG' Fuel on the Algerian Road*', International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 36, N°6, pp. 4094 – 4102, 2011.
- [4] C. Hamouda et A. Malek, '*Analyse Théorique et Expérimentale de la Consommation d'Énergie d'une Habitation Individuelle dans la Ville de Batna*', Revue des Énergies Renouvelables, Vol. 9, N°3, pp. 211 - 228, 2006.
- [5] F. Amrouche, A. Benzaoui, F. Harouadi, B. Mahmah and M. Belhamel, '*Compressed Natural Gas: The New Alternative Fuel for the Algerian Transportation Sector*', Procedia Engineering, Vol. 33, pp. 102 – 110, 2012.
- [6] <http://www.ons.dz/-AU-31-12-2009-.html>
- [7] F. Yettou, A. Malek, M. Haddadi et A. Gama, '*Optimisation d'un Système Solaire de Production d'Eau Chaude*', Revue des Énergies Renouvelables, Vol. 13, N°3, pp. 465 – 476, 2010.
- [8] A.B. Stambouli, '*Promotion of Renewable Energies in Algeria: Strategies and Perspectives*', Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 15, N°2, pp. 1169 – 1181, 2011.
- [9] R. Boudries and R. Dizene, '*Potentialities of Hydrogen Production in Algeria*', International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 33, N°17, pp. 4476 – 44487, 2011.
- [10] B. Mahmah, F. Harouadi, H. Benmoussa, S. Chader, M. Belhamel, A. M'Raoui, K. Abdeladim, A.N. Cherigui and C. Etievant, '*MedHySol: Future Federator Project of Massive Production of Solar Hydrogen*', International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 34, N°11, pp. 4922 – 4933, 2011.
- [11] C.H. Li, X.J. Zhu, G.Y. Cao, S. Sui and M.R. Hu, '*Dynamic Modeling and Sizing Optimization of Stand-Alone Photovoltaic Power Systems Using Hybrid Energy Storage Technology*', Renewable Energy, Vol. 34, N°3, pp. 815 – 826, 2009.
- [12] K. Zhou, J.A. Ferreira and S.W.H. de Haan, '*Optimal Energy Management Strategy and System Sizing Method for Stand-Alone Photovoltaic-Hydrogen Systems*', International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 33, N°2, pp. 477 – 489, 2008.
- [13] A.E. Adel, '*Design, Modeling and Control Strategy of PV/FC Hybrid Power System*', Journal of Electrical Systems, Vol. 7, N°2, pp. 270 – 286, 2011.
- [14] S. Pedrazzi, G. Zini, P. Tartarini, '*Complete Modeling and Software Implementation of a Virtual Solar Hydrogen Hybrid System*', Energy Conversion and Management, Vol. 51, N°1, pp. 122 – 129, 2010.
- [15] C. Darras, S. Sailer, C. Thibault, M. Muselli, P. Poggi, J.C. Hogue, S.M. Elsoet, E. Pinton, S. Grehant, F. Gailly, C. Turpin, S. Astier and G. Fontès, '*Sizing of Photovoltaic System Coupled with Hydrogen/Oxygen Storage Based on the Oriente Model*', International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 35, N°8, pp. 3322 – 3332, 2011.
- [16] F. Ma, Y. Wang, S. Ding and L. Jiang, '*Twenty Percent Hydrogen-Enriched Natural Gas Transient Performance Research*', International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 34, N°11, pp. 6523 – 6531, 2009.
- [17] S. Labeled, '*Solar Hydrogen Production in Algeria: Perspectives and Applications*', Assessment of Hydrogen Energy for Sustainable Development, pp. 161 – 175, Springer-Link, 2007.161–175.