

Etude d'un système photovoltaïque de production d'énergie à base d'hydrogène vert

Ahmed DJAFOUR¹, Mohamed Salah AIDA² et Boubekour AZOUI³

¹Univ Ouargla, Fac. des Sciences Appliquées, Lab. de Génie Électrique, Ouargla 30000 (Algérie)

²Univ Constantine 1, Fac. des Sciences, Constantine 25000, Algérie

³Univ Hadj Lakhdar Batna, Fac. de Technologie, Laboratoire LEB, Batna 05000, Algérie

*E-mail : djafour.ah@univ-ouargla.dz

ملخص : إن ظهور مفاهيم جديدة للتوليد اللامركزي للكهرباء وتطور مصادر الطاقة المتجددة يحث على الكثير من الاهتمام بتقنيات تخزين الطاقة. إن الطاقة المتجددة هي أفضل المرشحين، لكن إنتاجها الغير منتظم يحتاج إلى البحث عن وسيلة فعالة للتخزين ومحافظة على البيئة. إن نظام يقرن بين حفل فوطوفولطائي و محلل كهربائي يمكن من تخزين الكهرباء عن طريق التخزين على شكل غاز.

هذا المقال يعرض نتائج تحديد أبعاد نظام إنتاج الهيدروجين الذي تم الحصول عليه من خلال تغذية محلل كهربائي بواسطة الألواح الشمسية الفوطوفولطائية المثبتة في ورقلة، لتلبية احتياجات خلية وقود من نوع PEMFC بالهيدروجين. إن تحديد أبعاد نظام فوطوفولطائي لموقع معين يتطلب معرفة الإشعاع الشمسي لهذا الأخير، للأسف، كثير من المواقع في الجزائر ليس لديها مثل هذه المعطيات الإشعاعية أو أنها ليست ممثلة بما فيه الكفاية، في هذه الدراسة قمنا بتطوير برنامج لحساب الإشعاع الشمسي الذي يتلقاه سطح مائل، بعد ذلك قمنا بإنشاء مخطط يسمح بتحديد أبعاد العناصر الأساسية المكونة لتרכيبة إنتاج الهيدروجين عن طريق إدخال الخصائص التقنية اللازمة لمكونات النظام والقيم المحسوبة للإشعاع الكلي لموقع ورقلة، وإحتياجات الطاقة الكهربائية للمستخدم.

كلمات دالة : الطاقة الشمسية، نظام فوطوفولطائي، محلل كهربائي، هيدروجين، خلية وقود، تحديد الأبعاد.

RÉSUMÉ : L'apparition de nouveaux concepts de production décentralisée d'électricité et le développement des sources renouvelables suscitent un vif intérêt pour les techniques de stockage de l'énergie. Les énergies renouvelables sont les meilleurs candidats mais l'intermittence de leur production nécessite de trouver des moyens de stockage efficaces et respectant l'environnement. Un système couplant un champ photovoltaïque et un électrolyseur permet de stocker l'électricité par l'intermédiaire d'un stockage sous forme de gaz.

Cet article présente les résultats de dimensionnement d'un système de production d'hydrogène obtenu par le biais d'un électrolyseur, alimenté par des modules solaires photovoltaïques installés à Ouargla, pour satisfaire les besoins en hydrogène d'une pile à combustible de type PEMFC. Le dimensionnement d'un système photovoltaïque pour un site donné nécessite la connaissance de l'irradiation solaire de ce dernier ; malheureusement, beaucoup de localités d'Algérie ne disposent pas de ces données d'irradiation ou ne sont pas suffisamment représentatives. Dans cette étude nous avons élaboré un programme de calcul qui permet de déterminer le rayonnement global reçu par une surface inclinée. Ensuite nous avons établi un organigramme qui permet de dimensionner les éléments principaux de l'installation de production d'hydrogène en introduisant les caractéristiques techniques nécessaires des composants de système ainsi que les valeurs calculés des rayonnements globaux du site de Ouargla et les besoins en énergie électrique de l'utilisateur.

Mots Clés : Energie solaire, Système photovoltaïque, Electrolyseur, Hydrogène, Pile à combustible, Dimensionnement.

ABSTRACT: The appearance of new concepts of decentralized electricity generation and the development of renewable sources are attracting much interest for techniques of energy storage. Renewable sources are the best candidates, but the intermittent of their production needs to find effective means of storing and protecting the environment. A system coupling a photovoltaic (PV) array and an electrolyzer is used to store electricity by means of a storage form of gas.

This paper presents the results of sizing a system of hydrogen production obtained through an electrolyzer, powered by photovoltaic solar modules installed in Ouargla, to meet the needs of hydrogen for a fuel cell of type, PEMFC. Sizing a photovoltaic system for a given site requires knowledge of the solar radiation of the latter. Many localities in Algeria don't have such data or radiation data are not sufficiently representative. In this study we developed a calculation program for determining the global radiation received by a surface inclined. And we have established a flowchart that helps to size the main components of the installation to produce hydrogen by introducing the necessary technical characteristics of system components and the calculated values of global radiation for the site of Ouargla and electric energy needs of the user.

Keywords: Solar energy, photovoltaic system, electrolyzer, hydrogen, fuel cell, Sizing.

1. Introduction

La conversion photovoltaïque est l'un des modes les plus intéressants d'utilisation de l'énergie solaire. Elle permet d'obtenir de l'électricité de façon directe et autonome à l'aide d'un matériel fiable et de durée de vie relativement élevée, permettant une maintenance réduite. Les pays à fort ensoleillement pourraient devenir les grands bénéficiaires de cette forme d'énergie. Le climat et la situation géographique de l'Algérie ont pris place parmi les pays les plus avantagés en ce domaine [1].

Les projets couplant un générateur renouvelable et un système de stockage par l'hydrogène sont étudiés depuis 1986. Equipés d'un parc de batteries assurant le stockage journalier de l'électricité, ces systèmes stockent l'énergie d'une saison à une autre grâce à l'hydrogène. Les études centrées sur la production d'hydrogène solaire ont permis de comparer le rendement des différents couplages d'un champ solaire et d'un électrolyseur. Le couplage direct des composants est souvent conseillé par ces premières études pour des raisons de fiabilité, de rendement (perte dans le convertisseur), de disponibilité et de coût [2].

L'objectif de ce travail est donc l'étude et le dimensionnement d'un système photovoltaïque hybride de production d'énergie électrique. Il s'agit principalement de produire le besoin en hydrogène pour faire fonctionner une pile à combustible de type PEMFC (pile à combustible à membrane échangeuse de proton). Dans ce travail nous avons établi un modèle mathématique qui permet de dimensionner les éléments principaux de l'installation de production d'hydrogène en introduisant les caractéristiques techniques nécessaires ainsi que les paramètres climatiques et solaires du site d'implantation du système.

2. Systèmes photovoltaïques

Un système photovoltaïque est constitué du générateur qui regroupe les modules photovoltaïques qui se composent de cellules solaires. Le courant maximal de charge dépend des dimensions et du nombre série - parallèle des modules [3], généralement associé à l'un ou plusieurs des éléments suivants :

- Un système d'orientation ou de suivi.
- Une gestion électronique (stockage, mise en forme du courant, transfert de l'énergie).
- Un stockage palliant la nature aléatoire de la source solaire.
- Un convertisseur DC /AC.
- Une charge en courant continu, basse tension ou en courant alternatif standard.

La figure 1 représente symboliquement les divers éléments du système le plus général. En pratique, les systèmes utilisent les éléments appropriés au type de charge et aux conditions locales [4].

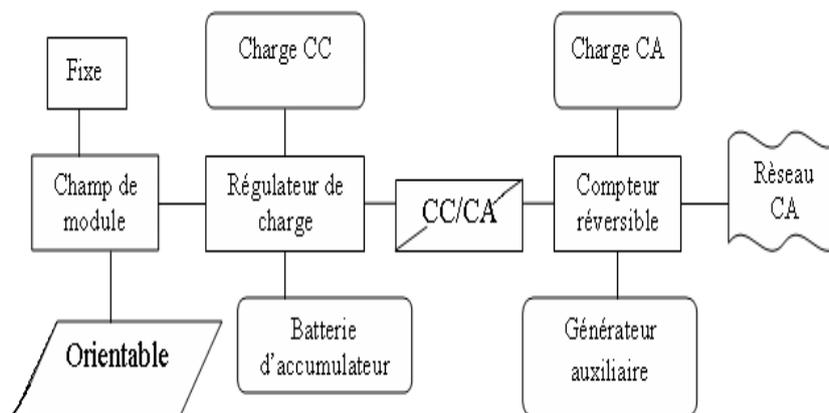


Figure 1 : Schéma synoptique des divers types des systèmes photovoltaïques

Dans cette étude nous choisissons des modules photovoltaïques avec des cellules polycristallines fabriquées principalement à partir de sources de matériau moins raffinées, mais convient à l'industrie photovoltaïque, leurs rendements sont d'environ (11 à 13%) [5].

3. Production d'hydrogène solaire

Dans le contexte énergétique actuel, les propriétés physiques et environnementales de l'hydrogène font de lui un vecteur énergétique de qualité en association avec l'électricité. Le XXI^e siècle pourrait voir la naissance de « l'électricité hydrogène ». Bien qu'il soit très abondant sur Terre, l'hydrogène n'existe pas à l'état naturel. Actuellement, sa production est essentiellement effectuée par reformage catalytique d'hydrocarbures (principalement gaz naturel) et par électrolyse de l'eau [6]. La production d'hydrogène à partir de carburants fossiles est aujourd'hui la plus répandue, mais elle ne pourrait constituer une solution à long terme au vu de la durée de vie limitée de ces carburants. Il peut être produit à partir de l'eau en utilisant une large variété de sources d'énergie renouvelable (Figure 2).

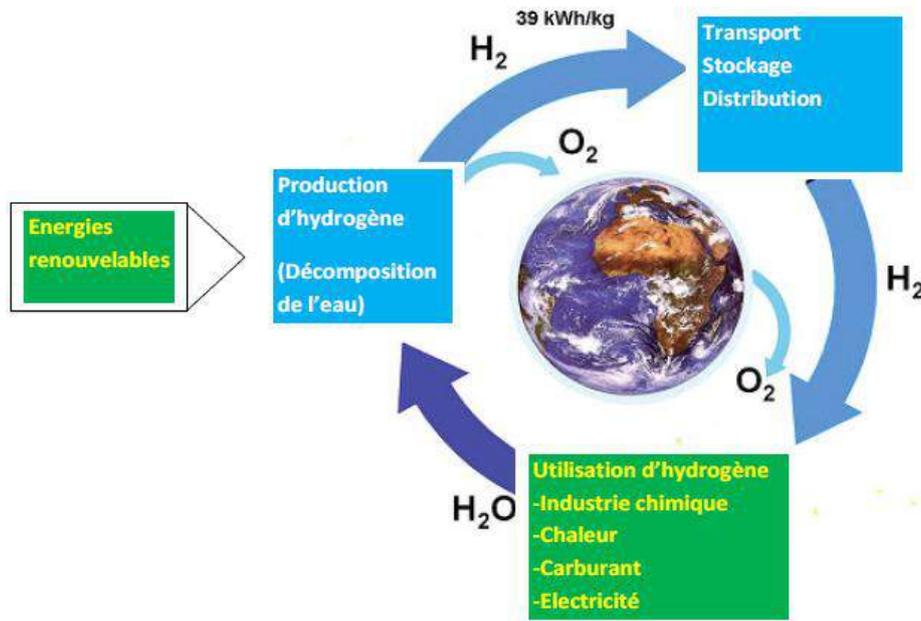


Figure 2 : Cycle de l'hydrogène

3.1. Production d'hydrogène à partir de l'électrolyse de l'eau

L'électrolyse de l'eau est une réaction électrochimique de décomposition de l'eau en hydrogène et en oxygène. Elle est possible par le passage d'un courant continu à travers deux électrodes immergées dans un électrolyte liquide ou solide. Les technologies en concurrence sont de deux natures, l'une porte sur le type d'électrolyte et l'autre sur le type de structure (monopolaire ou bipolaire). Il existe trois types d'électrolytes : l'alcalin, le PEM (Proton Exchange Membrane) et l'électrolyse à haute température par SOEC (Solid Oxid Electrolyser Cell) [6 - 8].

4. Systèmes de production d'électricité à base d'hydrogène vert

L'hydrogène peut être produit à partir de l'énergie électrique générée par les systèmes éoliens et photovoltaïques dans des différents nombres d'applications [9]. L'association de ce mode de production à la pile à combustible est présentée comme étant donc un moyen écologique de production d'énergie électrique. Ils peuvent être divisés en applications autonomes et connectée au réseau (Voir figure 3).

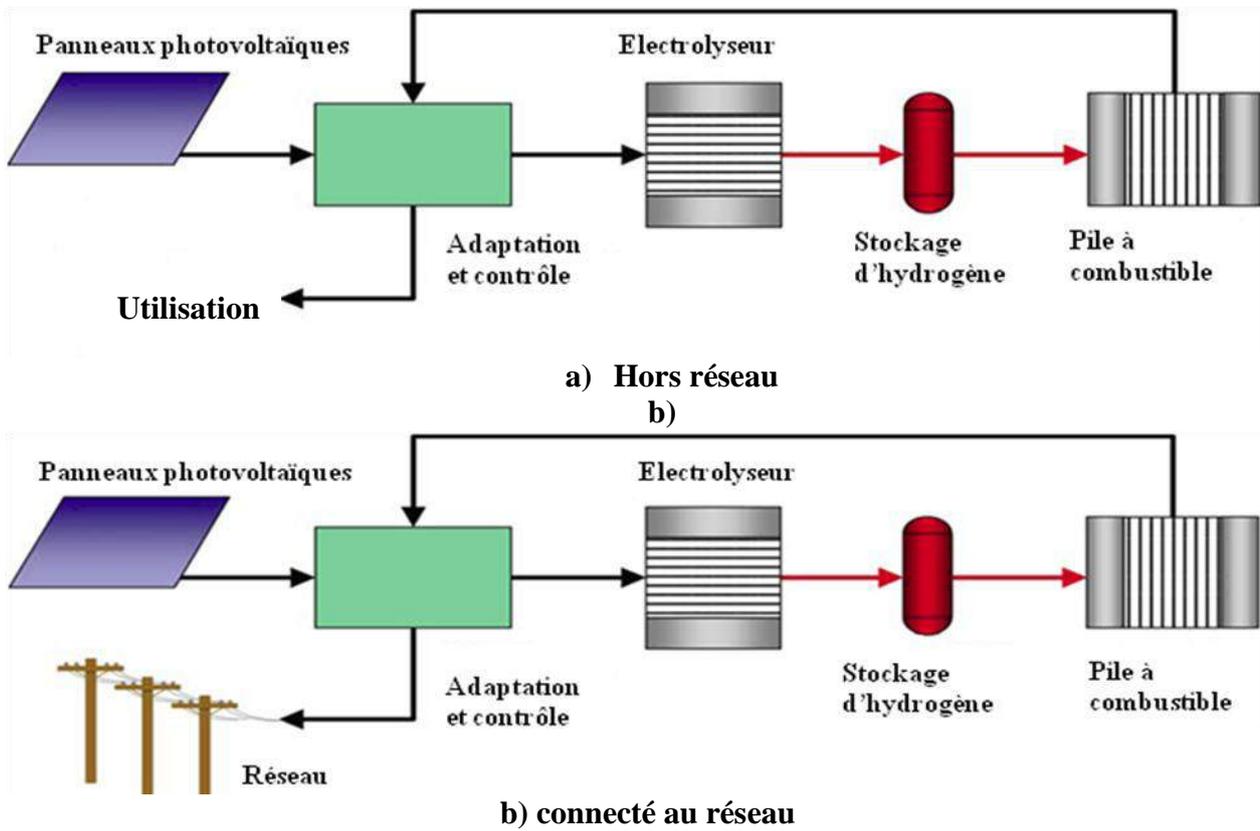


Figure 3 : Systèmes de production d'électricité à base d'hydrogène vert

4.1. La pile à combustible (PEMFC)

Une pile à combustible est un générateur qui convertit directement l'énergie interne d'un combustible en énergie électrique en utilisant un procédé électrochimique contrôlé. La pile à combustible à membrane échangeuse de proton est composée de l'assemblage de cellules élémentaires qui comportent une chambre cathodique et une chambre anodique séparés par deux électrodes et un électrolyte intermédiaire (polymère conducteur protonique) [10]. Le flux molaire de gaz consommés par la pile est représenté par [11] :

$$F_{gaz,pac} = \frac{n_c \times I}{n \times F} \times \frac{1}{\eta F_{pac}} \quad (1)$$

Avec $F_{gaz,pac}$, n_c , n , I , F , ηF_{pac} : respectivement le flux de gaz consommés (mol/s), Nombre de cellules, Le nombre de mole d'électrons échangés par mole d'eau ($n = 2$ pour l'hydrogène, $n = 4$ pour l'oxygène), le courant, constante de faraday, 96485 (C/mole) et le rendement faradique de la pile.

4.2. L'électrolyseur PEM

Le principe de fonctionnement d'un électrolyseur PEM (Proton Exchange Membrane) est fondé sur le même concept qu'une pile à combustible PEM. Le flux molaire de gaz produit par l'électrolyseur est représenté par [11, 12] :

$$F_{gaz,El} = \frac{n_c \times I}{n \times F} \times \eta F_{El} \quad (2)$$

Avec $F_{gaz,El}$, ηF_{El} : respectivement flux de gaz produit (mol/s) et le rendement faradique d'électrolyseur.

4.3. Le Système de Stockage

Le stockage d'énergie dans les systèmes photovoltaïques autonomes est en général assuré par des batteries, composant utilisés dans la majorité des cas, [13]. Les caractéristiques techniques des systèmes de stockage peuvent entraîner d'importantes contraintes de fonctionnement et réduire leur domaine d'utilisation. Le couplage ou l'hybridation de technologies ayant des propriétés complémentaires est dans certains cas nécessaires pour contourner les difficultés liées à l'utilisation d'un dispositif unique. Dans notre cas nous étudierons un système avec stockage hybride (stockage via l'hydrogène et stockage dans les batteries).

5. Dimensionnement de générateur photovoltaïque

Pour le dimensionnement d'un système photovoltaïque, on part des besoins de la charge en énergie. Dans notre cas l'électrolyseur représente la charge c'est-à-dire E_j (kWh/j) sur le site où l'irradiation globale journalière moyenne dans le plan des modules est de E_i (kWh/m².j), pour avoir à la fin la taille nécessaire du générateur photovoltaïque.

Pour accomplir le dimensionnement nous avons considéré les hypothèses suivantes :

- Le flux molaire produit par l'électrolyseur est le même que le flux molaire consommé par la pile.
- La demande est constante durant la période d'étude (elle peut changer pendant la journée, mais la valeur moyenne journalière reste constante).
- Les rendements des composants du système sont constants.

5.1. Estimation de rayonnement solaire

Pour déterminer l'irradiation solaire sur la surface des panneaux, nous avons utilisé les coordonnées de site d'Ouargla et les données de l'insolation mesurées par l'Office National de Météorologie d'Ouargla pour une durée de dix années d'observation (2000 à 2009), et par l'application de modèle de lieu et Jordan. Nous avons trouvé, [14 - 17].

$$\overline{H_{cp}} = \overline{H_0} * \overline{K_t} * \overline{R} \quad (3)$$

Avec $\overline{H_{cp}}$, $\overline{H_0}$, $\overline{K_t}$, \overline{R} : respectivement l'irradiation globale moyenne journalière au niveau des panneaux en Wh/m².j, l'irradiation extraterrestre moyenne journalière (Wh/m².j), l'indice de clarté moyenne mensuelle, le facteur d'inclinaison moyenne mensuelle.

La figure 4 représente les résultats de calcul de la moyenne mensuelle de l'irradiation journalière incidente sur une surface orientée vers le sud à Ouargla avec les différentes inclinaisons (horizontale, optimale saisonnier, optimale journalier moyen mensuel, optimale annuel).

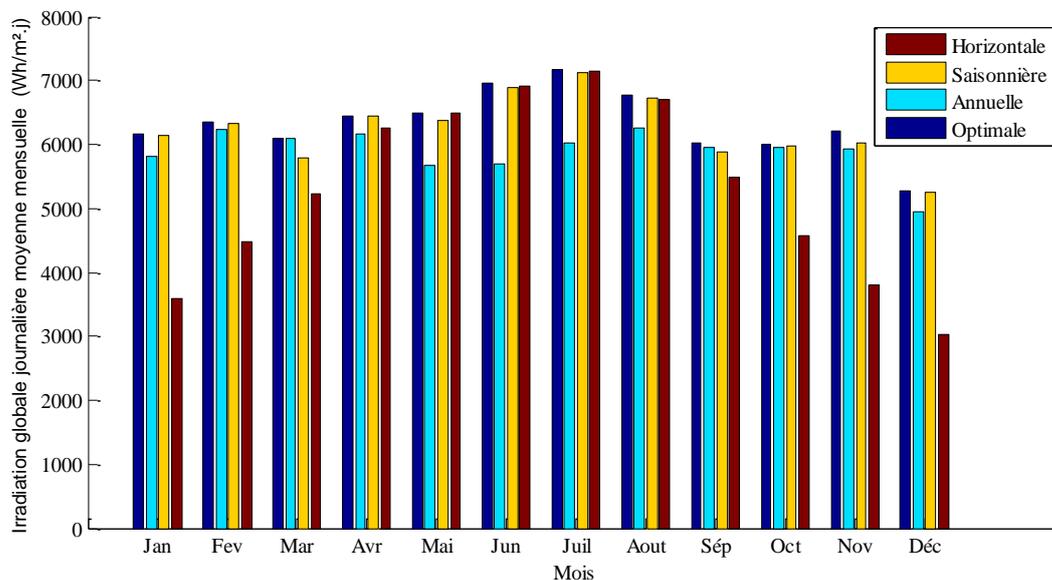


Figure 4 : L'irradiation globale moyenne journalière mensuelle pour différentes inclinaisons

Nous avons calculé la moyenne mensuelle de l'irradiation journalière incidente sur une surface orientée vers le sud à Ouargla avec les différentes inclinaisons par rapport à l'horizontale. Il est clair que l'unique angle optimal d'inclinaison pour chaque mois de l'année correspond au point maximal de la courbe de l'irradiation mensuelle journalière en fonction de l'inclinaison pour ce mois.

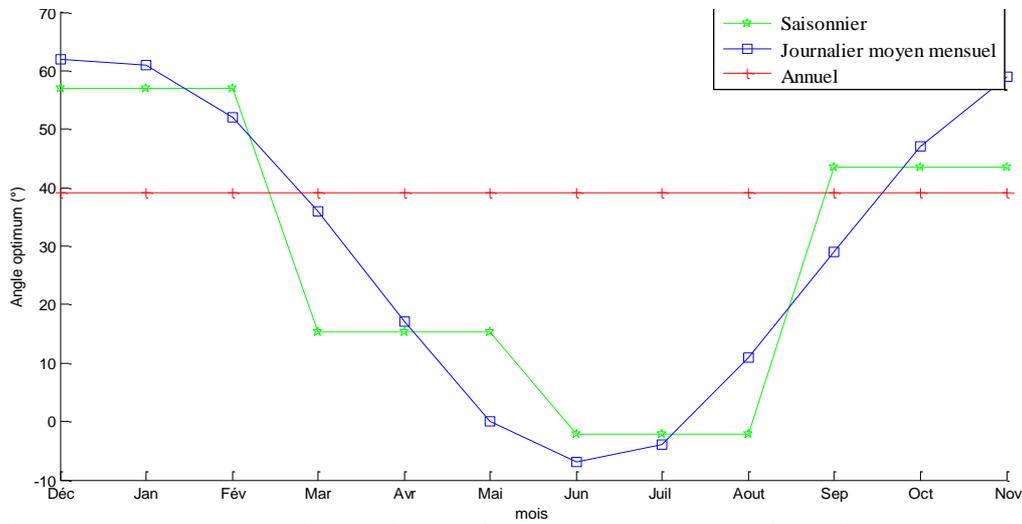


Figure 5 : Les angles optimaux journaliers moyen mensuel, saisonniers et annuels

Par l'utilisation du modèle d'El-Kassaby nous avons calculé les angles optimaux saisonniers et avec celle de Gladius l'angle optimal annuel. A l'aide de notre organigramme, nous avons calculé les irradiances globales correspondantes pour un capteur orienté vers le sud. Avec une inclinaison optimale (β_{opt}) annuelle égale à 39.14° , l'irradiation moyenne journalière maximale reçue à Ouargla est égale à $5.889 \text{ kWh/m}^2.\text{j}$, ce qui donne une énergie moyenne annuelle de $2149.6 \text{ kWh/m}^2.\text{an}$, [17 - 19].

5.2. Estimation des besoins en énergie électrique

Dans notre cas et pour satisfaire le besoin en énergie électrique de l'utilisateur final, une pile à combustible de 1000 W va fonctionner pendant 6 heures chaque nuit. Pour produire le besoin en hydrogène pour cette pile, nous utilisons deux électrolyseurs de 1.920 kW chacun. En s'appuyant sur les hypothèses que nous avons mentionné et en utilisant les équations (1) et (2), nous avons trouvé que les électrolyseurs vont fonctionner pendant quatre heures chaque jour pour produire l'hydrogène nécessaire pour le fonctionnement de cette pile, voir (Tableau.1) pour les spécifications des électrolyseurs et de la pile.

Tableau 1 : Caractéristiques techniques d'électrolyseur type PEM et de la pile FC-S 1000 [11], [20]

Spécifications	Electrolyseur PEM	Pile PEM, FCS-C1000
Tension nominale	48 V	28.8 V
Puissance nominale	1920 W	1000
Puissance maximale	2000 W	
Nombre de cellules	26	48
Pression de fonctionnement	15 bars	
Courant de fonctionnement	40 A	35 A
Température de fonctionnement	70°C	
Température maximale de stack		65°C
Taux de production de H ₂	0,45 m ³ /h	
Tension d'une cellule	1,84V	
Pression de H ₂		0.45-0.55 bar
pression d'O ₂		0.2095 atm

5.3. La puissance crête du générateur

La puissance crête du générateur (P_c) en kWc est donnée par l'équation suivante [21] :

$$P_c = \frac{E_c}{K * E_i} \quad (4)$$

E_c et E_i sont respectivement l'énergie consommée par jour et l'irradiation quotidienne en (kWh/j).
K est le coefficient correcteur pour les systèmes avec batterie, il est compris entre 0.55 et 0.75 [21].
La valeur utilisée dans nos calculs (système avec batterie) est égale à 0.72.

5.3.1. Résultats de dimensionnement de générateur

Les puissances crêtes de générateur calculées par l'équation (4) pour chaque mois avec une inclinaison optimale annuelle des panneaux de 39.14°, sont représentées dans le Tableau 2.

Tableau 2 : La Puissance Crête Nécessaire Pour Chaque Mois avec l'Inclinaison 39,14°

Mois	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12
P_c (kW _c)	3.67	3.42	3.50	3.47	3.76	3.74	3.55	3.41	3.59	3.58	3.60	4.31

*Pour satisfaire les besoins journaliers en énergie durant toute l'année, la puissance crête minimale à installer sera d'après le tableau 2, $P_c = 4,31$ kWc. Nous utilisons des modules photovoltaïques Solarfun, SF190-27-P180 de technologie Si-poly, voir (Tableau 3) pour les spécifications des modules (dans les conditions standards).

Tableau 3 : Caractéristiques du module Solarfun, SF190-27-P180 [22]

Puissance maximale (P_m)	180 Wc
Tension à Puissance maximale (V_{pm})	26,5V
Courant à Puissance maximale (I_{pm})	6,8 A
Tension de circuit ouvert (V_{co})	32,4 V
Courant du court-circuit (I_{cc})	7,72 A
Dimensions	1494mm*1000mm*45mm
Tolérance(%)	5,0

Le nombre de module nécessaire est :

$$N_T = \frac{P_c}{P_{C \text{ Module}}} = 4310/180 = 23.94, \text{ soit } 24 \text{ modules dans } 12 \text{ branches en parallèle, dans chaque}$$

branche 2 modules en séries. La superficie totale des modules installés est de 35,85 m² et la puissance crête est de 4320 Wc.

5.4. Estimation de la capacité de stockage

La détermination du parc batterie (capacité de stockage) est réalisée à partir de la prise en compte d'un certain nombre de jours d'autonomie à assurer à production nulle. Ce nombre de jours varie suivant les applications et la situation géographique. Pour tenir compte à la fois des phénomènes de température et de profondeur de décharge maximale, la capacité en C_{20} nécessaire à stocker est évaluée par la formule suivante [13], [23] :

$$C_{20} = \frac{E_c \times J_{Aut}}{RT \times P_d \times U} \quad (5)$$

Avec J_{Aut} , RT , P_d et U : respectivement autonomie en jours, coefficient réducteur de la température (%), profondeur de décharge maximale autorisée (%) et la tension de travail (V).

Le nombre des branches des batteries (N_b) doit satisfaire la relation suivante :

$$N_b \geq (C_{20}/C_{20_{\text{batterie}}}) \quad (6)$$

Pour notre cas avec des batteries (Deka 8G8D AGM Solar Battery) de 12V, 225 Ah en C_{20} [24], et pour une autonomie d'un jour et avec $RT = 0,9$ et $P_d = 0,8$ on trouve le nombre des branches, $N_b \geq 2$ branches. Pour fixer la tension du système de stockage à la tension de travail, nous avons trouvé le nombre des batteries en série par branche, $N_s = 4$ batteries.

5.5. Choix de régulateur

Le premier paramètre à considérer est la puissance du régulateur, ou le courant maximal qu'il peut contrôler pour une tension nominale donnée. Pour la tension, le régulateur devra pouvoir supporter environ le double de sa tension nominale, valeur proche de la tension ouverte du panneau V_{co} à basse température [13].

6. Conclusion

Dans cette étude nous avons montré un exemple de dimensionnement d'un générateur photovoltaïque qui permet de rendre autonome un système hybride de production d'énergie, il s'agit principalement de produire le besoin en hydrogène pour faire fonctionner une pile à combustible de type PEMFC dans le but d'une bonne gestion de l'énergie électrique produite par le système PV. On peut dire que les résultats de ce dimensionnement sont parfaitement théoriques (en absence d'une expérimentation). La supposition de quelques hypothèses rend ces derniers approximatifs. Pour les mois qui ont des demandes d'hydrogène inférieures à la quantité produite par le système nous proposons l'augmentation de la durée de fonctionnement de la pile et l'injection de l'énergie électrique supplémentaire dans le réseau électrique s'il existe, sinon il faut prévoir une autre application pour la consommation de supplément de la production.

Références

- [1] K. Tahri et B. Benyoucef ; "Etude de Modélisation d'un Générateur Photovoltaïque" ; Journal of Scientific Research N° 0 vol. 1 (2010).
- [2] S. Busquet ; "Étude d'un système autonome de production d'énergie couplant un champ photovoltaïque, un électrolyseur et une pile à combustible : réalisation d'un banc d'essai et modélisation" ; Thèse de Doctorat de l'Ecole des Mines de Paris, CENERG, Sophia Antipolis, 2003.
- [3] B. Omar, A. Guen-Bouazza, B. Bouazza, T. Boussoukaia et N. E Chabane-Sari ; "Conception et dimensionnement d'une installation solaire autonome alimentant un poste radio téléphonique mobile de type Emetteur/Récepteur (E/R)" ; 6^{ème} séminaire international sur la physique énergétique, Bechar, 21- 23 Octobre, 2002.
- [4] A. Ricaud ; "Photopiles solaires : de la physique de la conversion photovoltaïque aux filières, matériaux et procédés" ; Presse Polytechnique et Universitaires Romandes 1997.
- [5] B. Flèche et D. Delagnes ; "Energie solaire photovoltaïque", France, 2007.
- [6] J. Labbé ; "L'hydrogène électrolytique comme moyen de stockage d'électricité pour systèmes photovoltaïques isolés" ; Thèse de Doctorat, Ecole des Mines de Paris, 2006.
- [7] S. Rabih ; "Contribution à la modélisation de systèmes réversibles de types électrolyseur et pile à hydrogène en vue de leur couplage aux générateurs photovoltaïques" ; Thèse de l'Institut National Polytechnique de Toulouse, 2008.
- [8] AFH2 Th. Alleau ; "Production d'hydrogène par électrolyse de l'eau", Mémento de l'hydrogène, fiche 3.2.1. Révision mai 2011.
- [9] A. Ursua, L.M. Gandia et P. Sanchis ; "Hydrogen Production From Water Electrolysis: Current Status and Future Trends" ; Proceedings of the IEEE Volume: 100 , Issue: 2 , pp. 410 – 426, 2012.
- [10] P. Stevens, F. Novel-Cattin, A. Hammou, C. Lamy et M. Cassir ; "Pile à combustible", Technique de l'ingénieur, Doc. D3340, 10 Août 2000.

- [11] H. Abdi, N. Ait Messaoudene, M. Omari et Y. Bekhta ; "Etude et dimensionnement d'une installation solaire de production d'hydrogène", *2ème* WIH2 Ghardaïa, 2007.
- [12] Q. Ulleberg ; "Modeling of advanced alkaline electrolyzers a system simulation approach" ; *Int. J. Hydrogen Energy* **28**, 2003, pp. 21 - 33.
- [13] A. Labouret et M. Villoz ; "Energie solaire photovoltaïque : Manuel du professionnel" ; Dunod, Paris, 2003.
- [14] W. A. Beckman et J. A. Duffie ; "Solar engineering of thermal processes" ; A wiley-interscience publication, New York. 1980
- [15] K. Messaitfa ; " Evaluation de l'apport quantitatif des inclinaisons optimales d'un système de pompage photovoltaïque" ; Enersole 01, Adrar, Algérie, 30-31 Octobre 2001, pp255-272.
- [16] M. Capderou ; "Atlas solaire de l'Algérie" ; Office des Publications Universitaire Tome1, Tome2. Algérie, 1986.
- [17] A. Djafour ; "Etude d'un système de production d'hydrogène solaire" ; Thèse de Doctorat, Université d'Ouargla 2013.
- [18] M. M. Kassaby ; "Monthly and daily optimum tilt angle for south facing solar collectors, theoretical model, experimental and empirical correlations" ; *Solar and Wind Technology*, Vol. **5**, N°6, pp. 589 –596, 1988.
- [19] G. Lewis ; "Optimum sizing on a Collector for a Domestic Water Heating System" ; *Solar and Wind Technology*, Vol. **4**, N°3, pp. 411 - 414, 1987.
- [20] Site web consulté en Mai 2015, www.horizonfuelcell.com
- [21] L. Chancelier et E. Laurent ; "L'Electricité Photovoltaïque" ; Editeur Gret, France, 1996.
- [22] Commercial. www.solarfun-power.com
- [23] M. Benbitour, A. Gamma et M. belhamel ; "Logiciel de dimensionnement des systèmes PV" ; *Bulletin des énergies renouvelables* N°10, Décembre 2006.
- [24] Site web consulté en Mai 2015, <http://www.solarelectricsupply.com/solar-components/solar-batteries/gel-batteries/deka-gel-batteries/deka-8g8d-solar-batteries>