

ETUDE DES DIFFERENTS ETAGES D'UN SYSTEME HYBRIDE (PHOTOVOLTAÏQUE – EOLIEN – PILE A COMBUSTIBLE)

Mimi Belatel et Abdelghani Ouazeta
Laboratoire d'Electrotechnique, Faculté des Sciences de la Technologie
Université Constantine 1, Algérie
e-mail: belatelmimi2002@yahoo.fr

Résumé— *Cet article est basé sur l'étude des différents étages de la production décentralisée de l'énergie électrique à partir d'un système hybride de type photovoltaïque, éolien et pile à combustible pour alimenter une charge DC. Les systèmes hybrides de types (PV/E/PAC) font valoir des arguments forts qui pourraient permettre à cette technologie de s'imposer dans les applications de production décentralisée d'énergie. Pour un développement écologique et économique, la réalisation d'un tel système s'avère très intéressante lorsque les conditions locales sont favorables.*

Mots-clés— *Système hybride, photovoltaïque, éolien, pile à combustible.*

Abstract— *This paper is based on the study of different levels of decentralized production of electricity from a hybrid type solar, wind turbine and fuel cell to supplying a DC load. Hybrid systems types (PV/W/PEM) argue that strong arguments could allow the technology itself in applications decentralized energy production. For ecological and economic development, the realization of such system is very useful when local conditions are favorable.*

Keywords — *Hybrid system, Photovoltaic, Wind turbine, Fuel cell.*

1. Introduction

Pour un développement durable, le recours à l'utilisation des systèmes énergétiques à sources d'énergies renouvelables est devenu indispensable pour la production de l'énergie électrique [1-2].

La combinaison de plusieurs sources d'énergies renouvelables permet d'optimiser au maximum les systèmes de production d'électricité, aussi bien du point de vu technique qu'économique.

L'avantage d'un système hybride par rapport à un système pur éolien ou pur photovoltaïque, dépend de beaucoup de facteurs fondamentaux : la forme et le type de la charge, le régime du vent, le rayonnement solaire, le coût et la disponibilité de l'énergie, le coût relatif de la machine éolienne, le champ photovoltaïque, la disponibilité de l'hydrogène, le développement des piles à combustible, le système de stockage électrochimique et d'autres facteurs d'efficacités. Les systèmes photovoltaïques sont actuellement économiques pour les installations de faibles puissances. Pour les systèmes d'énergies autonomes, le coût du stockage représente la plus grande contrainte du coût global du système pour les installations de grandes puissances [3].

Dans ce contexte, le travail proposé dans cet article consiste en une combinaison de trois sources d'énergies (solaire, éolienne et hydrogène) de production continue de l'énergie électrique. L'autonomie de ce système sera assurée par un système de stockage. Dans ce travail, le système hybride est destiné à alimenter une charge DC.

2. Etude du système hybride (PV/E/PAC)

2.1. Modélisation des panneaux photovoltaïques

Le modèle mathématique du générateur photovoltaïque est basé sur le circuit équivalent. Ce circuit est représenté sur la figure 1, par un générateur de courant I_{cc} , une diode et deux résistances R_s et R_{sh} .

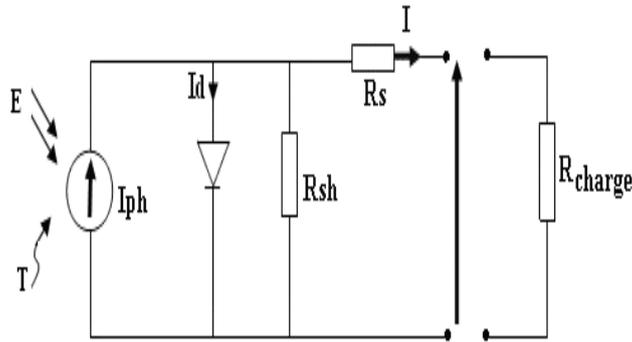


Fig. 1. Schéma électrique réel d'une cellule photovoltaïque

La caractéristique courant-tension d'une cellule solaire se met sous la forme mathématique et peut être reformulée sous la forme:

$$I = I_{ph} - I_s \left[\exp\left(\frac{(V + R_s I)}{U_T}\right) - 1 \right] - \left(\frac{V + R_s I}{R_{sh}}\right) \quad (1)$$

Le photo-courant I_{ph} est créé dans la structure par une partie de rayonnement absorbé (ce courant est pratiquement le courant de court circuit de la cellule):

$$I_{ph} = I_{ph}(T_1)[1 + K_0(T - T_1)] \quad (2)$$

$$I_{ph}(T_1) = I_{CC}(T_1 \cdot nom) \cdot \frac{E}{E_{nom}} \quad (3)$$

$$K_0 = \frac{I_{CC}(T_2) - I_{CC}(T_1)}{T_2 - T_1} \quad (4)$$

Le courant de saturation inverse de la diode I_s est donné par:

$$I_s = I_s(T_1) \left(\frac{T}{T_1}\right)^{\frac{3}{A}} \exp\left(\frac{V_g}{\frac{U_T}{T} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_1}\right)}\right) \quad (5)$$

avec:

$$I_s(T_1) = \frac{I_{CC}(T_1)}{\exp\left(\frac{V_{CO}(T_1)}{U_T \frac{T_1}{T}}\right) - 1} \quad (6)$$

$$U_T = \frac{AK_0 T}{q} \quad (7)$$

La résistance R_s est déduite par l'équation suivante:

$$R_s = -\frac{dV}{dI_{V_{CO}}} - \frac{1}{X_V} \quad (8)$$

La puissance fournie au circuit extérieur par une cellule photovoltaïque sous éclairage dépend de la résistance de charge (résistance externe placée aux bornes de la cellule). Cette puissance est maximale (notée P_{max}) pour un point de fonctionnement P_{max} (I_{max} , V_{max}) de la courbe courant-tension (courants compris entre 0 et I_{CC} et tension comprise entre 0 et V_{CO}). Donc la puissance fournie par la cellule est donnée par le produit ($V \times I$); c.à.d:

$$P = V \cdot I \quad (9)$$

Le rendement est donné par le rapport de la puissance électrique maximale générée à la puissance du rayonnement solaire incident [4-9]:

$$\eta_c = \frac{V_{max} \cdot I_{max}}{P_{solaire}} \quad (10)$$

q : charge de l'électron, 1.602×10^{-19} C.

K_0 : la constante de Boltzman, 1.381×10^{-23} J/K.

A : facteur d'idéalité.

U_T : tension thermique.

V : tension à la borne de la diode.

T : température absolue (en kelvin).

R_s : est une résistance série.

R_{sh} : est une résistance shunt.

Nous avons effectués une simulation où nous avons maintenu un éclairage constant pour différentes températures. La courbe caractéristique 2 va présenter des allures différentes selon la température. La tension à vide va diminuer avec l'augmentation de la température, à l'inverse cette variation est pratiquement compensée par la variation du courant de court-circuit. On remarque donc sur la figure 3 que la température influe inversement sur la puissance.

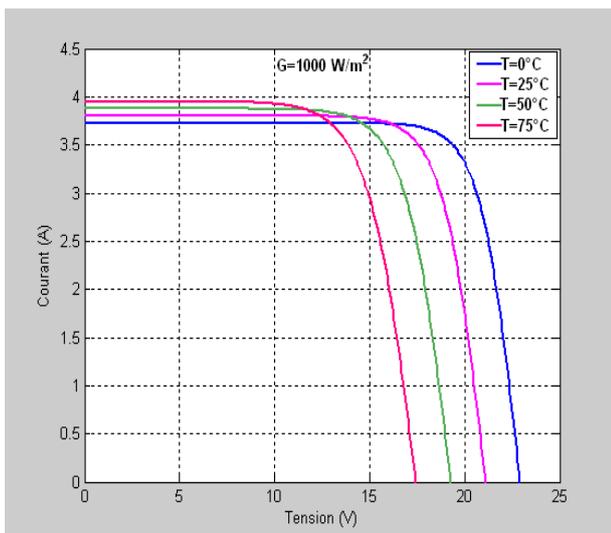


Fig. 2. Influence de la température sur la caractéristique Courant-Tension I(V)

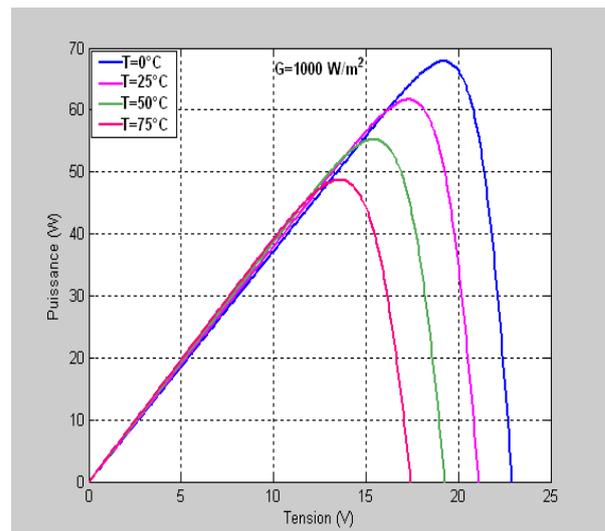


Fig. 3. Influence de la température sur la caractéristique Puissance-Tension P(V)

Par contre, lorsque nous avons maintenus une température constante à différents éclairages, on remarque sur la figure 4 que l'accroissement du courant de court-circuit est beaucoup plus important que

l'augmentation de la tension de circuit ouvert, car le courant de court-circuit (I_{sc}) est une fonction linéaire de l'éclairement et la tension du circuit ouvert (V_{oc}) est une fonction logarithmique. On remarque aussi sur la figure 5 que la puissance délivrée par un générateur PV dépend de la variation de l'éclairement.

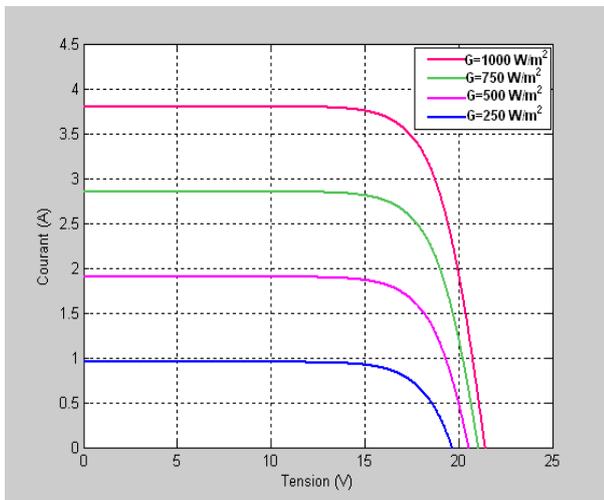


Fig. 4. Influence de l'éclairement sur la caractéristique Courant-Tension I(V)

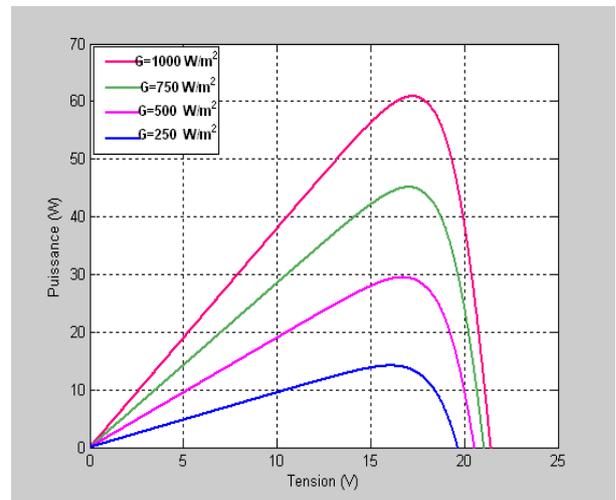


Fig. 5. Influence de l'éclairement sur la caractéristique Puissance-Tension P(V)

La variation de la température et de l'éclairement en même temps dans les figures 6 et 7, nous a permis de conclure qu'il y a une variation de la tension du circuit-ouvert (V_{oc}), une grande variation du courant (I_{sc}) et donc une variation de la puissance délivrée.

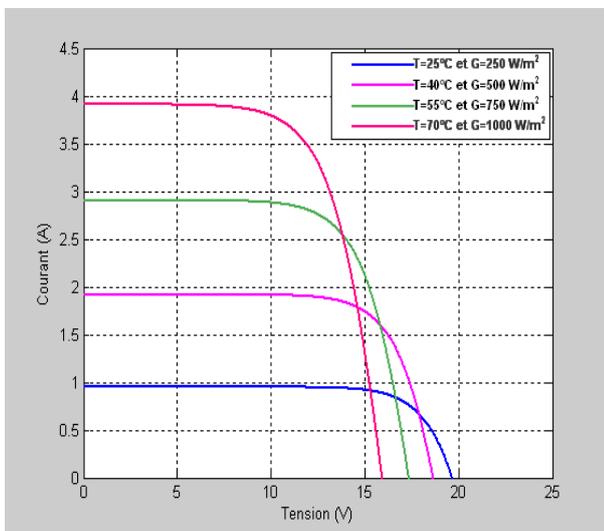


Fig. 6. Influence de l'éclairement et la température sur la caractéristique I(V)

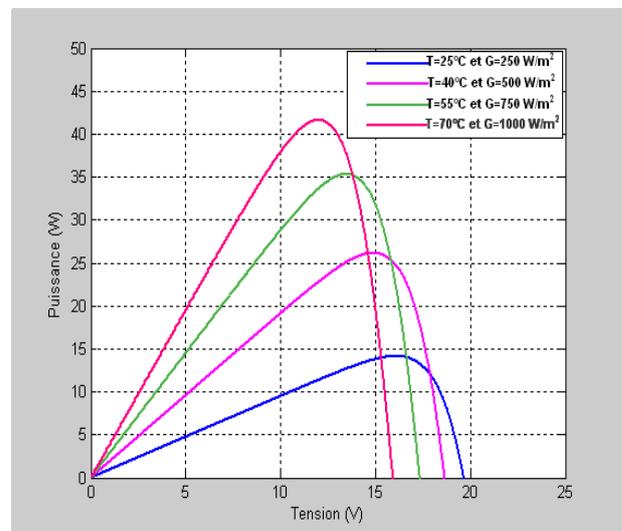


Fig. 7. Influence de l'éclairement et la température sur la caractéristique P(V)

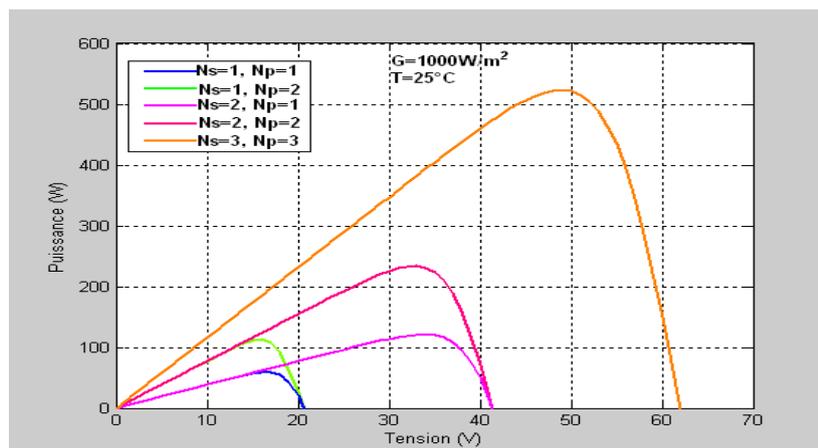


Fig. 8. Groupement de panneaux

Un module ou des cellules sont connectées en parallèle “Np” est suffisant pour augmenter le courant du générateur. Pour obtenir une augmentation de la tension du générateur on associe “Ns” modules en série. Afin d’obtenir des puissances de quelques kW, sous une tension convenable, il est nécessaire d’associer les modules en panneaux et de monter les panneaux en rangés de panneaux séries et parallèles pour former ce que l’on appelle un générateur photovoltaïque [10-11]. La figure 8 représente la puissance délivrée d’un groupement de panneaux en série et en parallèle.

2.2. Modélisation de l’éolienne

Les éoliennes permettent de convertir l’énergie du vent en énergie électrique. Cette conversion se fait en deux étapes:

- Au niveau de la turbine (rotor), qui extrait une partie de l’énergie cinétique du vent disponible pour la convertir en énergie mécanique, en utilisant des profils aérodynamiques. Le flux d’air crée autour du profil une poussée qui entraîne le rotor et constitue par la suite une force parasite.
- Au niveau de la génératrice, qui reçoit l’énergie mécanique et la convertit en énergie électrique, transmise ensuite au réseau électrique [10-12].

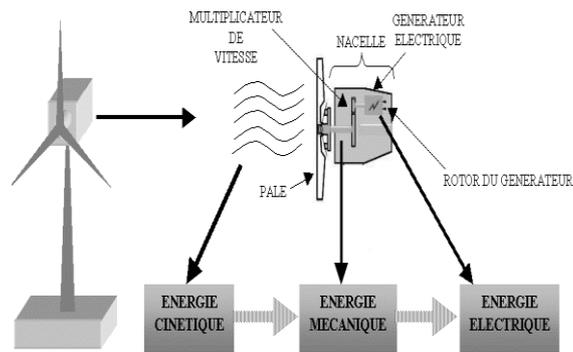


Fig. 9. Principe d’une éolienne

La puissance éolienne est donnée par la relation suivante:

$$P_v = \frac{1}{2} \rho S V^3 \quad (11)$$

ρ : masse volumique de l’air, S : surface traversée par l’air, R : rayon du rotor de l’éolienne, V : vitesse du vent.

La puissance fournie par le rotor de l’éolienne est donnée par la relation suivante:

$$P = C_p \frac{\rho \cdot S \cdot V^3}{2} \quad (12)$$

C_p : Coefficient qui dépend de la forme du rotor et de la vitesse du vent, ainsi il existe une relation linéaire entre la vitesse du vent et la vitesse angulaire du rotor.

$$k = \omega \cdot \frac{R}{V} \quad (13)$$

ω : vitesse angulaire du rotor de l’éolienne.

Le coefficient C_p est donné par le constructeur en fonction du type de capteur:

$$C_p(\lambda, \beta) = 0.73 \left(\frac{151}{\lambda_i} - 0.58\beta - 0.002\beta^{2.3} - 13.2 \right) e^{\frac{18.4}{\lambda_i}} \quad (14)$$

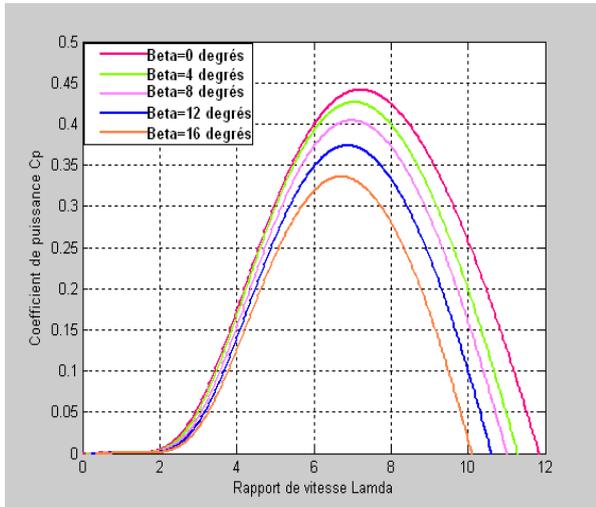


Fig. 10. Variation du coefficient de puissance

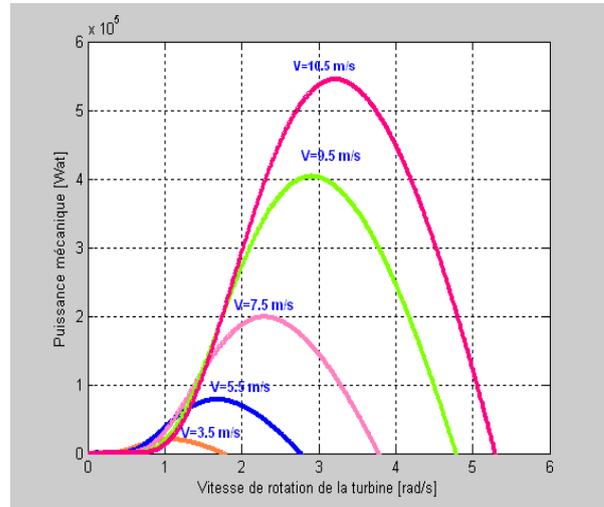


Fig. 11. Puissance de la turbine

La caractéristique du coefficient de puissance représentée sur la figure 10 varie avec l'angle d'orientation des pales (β) et le ratio de vitesse (λ). La figure 11 représente la puissance mécanique délivrée en fonction de la puissance de la turbine pour plusieurs valeurs de la vitesse du vent.

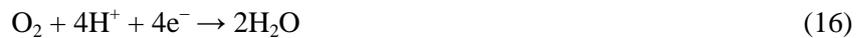
2.3. Modélisation de la pile à combustible

Une PAC est un assemblage de cellules élémentaires, comprenant deux électrodes (l'anode et la cathode) chargées en catalyseur (le plus souvent du platine), séparées par un électrolyte, dont le rôle est de permettre la migration des ions d'une électrode à l'autre, sous l'effet du champ électrique créé [12-14]:

L'anode: (où se passe l'oxydation) est alimentée en combustible (H_2 , CH_3OH ,...), selon la réaction d'oxydation suivante:



La cathode: (où se passe la réduction) est alimentée en comburant (O_2 , air,...), selon la réaction de réduction suivante:



Catalyseur: pour que les deux demi-réactions soient possibles, il faut un catalyseur (c'est-à-dire un composé capable d'augmenter la vitesse de réaction, sans être consommé par lui-même).

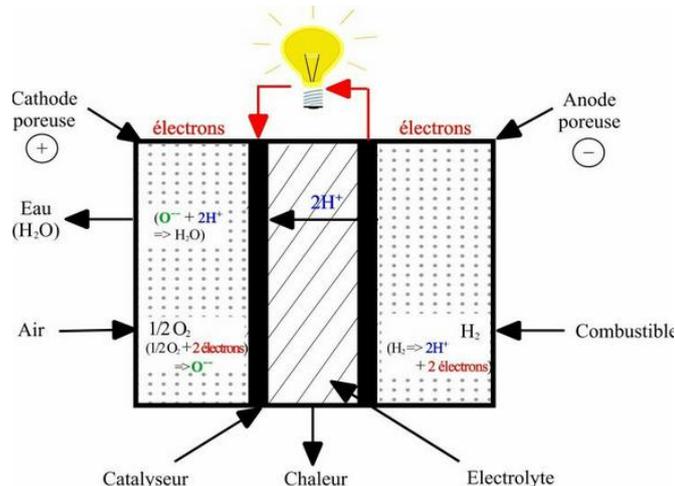


Fig. 12. Principe de fonctionnement d'une pile à combustible

Le potentiel réel global de la pile à combustible PEMFC, est donné par l'équation:

$$U_{PAC} = E_{Nernst} - V_{act} - V_{ohm} - V_{conc} \quad (17)$$

La modélisation en statique d'une pile à combustible PEM comme représentée à la figure 13 est basée sur l'expression de la tension en fonction du courant débité. Partant de la tension idéale issue de l'équation (18) de Nernst où apparaissent les conditions de fonctionnement en température, pression et composition du gaz:

$$E_{Nernst} = 1,229 - 0,85 T^{-3} * (T - 298,15) + 4,31 * 10^{-5} * T * \left[\ln \left(\frac{P_{H_2}^*}{P_{O_2}^*} \right) + \frac{1}{2} \ln \left(P_{O_2}^* \right) \right] \quad (18)$$

La relation entre les pertes d'activations et la densité de courant est exprimée dans l'équation suivante:

$$V_{act} = \xi_1 + \xi_2 T + \xi_3 T \ln(C_{O_2}^*) + \xi_4 T \ln(I_{PAC}) \quad (19)$$

L'expression de la polarisation ohmique s'exprime par la relation (20) comme suit:

$$V_{ohm} = \frac{I_{PAC}}{A} \left[\frac{181,6 \left[1 + 0,03 \left(\frac{I_{PAC}}{A} \right) + 0,062 \left(\frac{T}{303} \right)^2 \left(\frac{I_{PAC}}{A} \right)^{2,5} \right]}{\left[\lambda_{H_2O/SO-3} - 0,634 - 3 \left(\frac{I_{PAC}}{A} \right) \right] \cdot \exp \left[4,18 \left(\frac{T-303}{T} \right) \right]} \right] + A \cdot R_c \quad (20)$$

$$V_{conc} = -B \left(1 - \frac{J}{J_{Max}} \right) \quad (21)$$

Le rendement électrique η_{elec} d'une pile à combustible est défini comme suit:

$$\eta_{elec} = \frac{U_{PAC}}{1,48V} \quad (\text{eau liquide})$$

$$\eta_{elec} = \frac{U_{PAC}}{1,23V} \quad (\text{vapeur d'eau}) \quad (22)$$

La puissance P_{PAC} délivrée par la pile, s'exprime comme le produit de la tension de pile U_{PAC} et du courant de pile I_{PAC} :

$$P_{PAC} = U_{PAC} * I_{PAC} \quad (23)$$

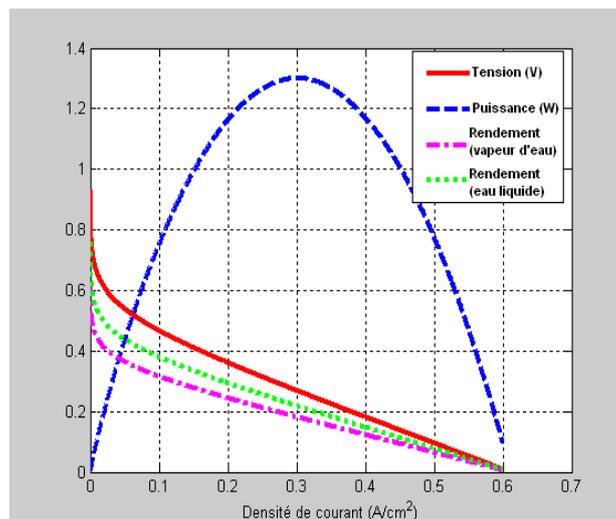


Fig. 13. Caractéristiques de la pile à combustible

2.4. Modélisation du système (PV/E/PAC)

Pour un développement écologique et économique, le couplage d'un système photovoltaïque-éolien (PV/E) peut être très intéressant lorsque les conditions locales sont favorables du point de vue vent et ensoleillement. Mais cela reste insuffisant, donc une nouvelle technologie basée sur le couplage d'un système hybride de type (photovoltaïque-éolien) avec la pile à combustible, s'avère très intéressante. La prise de conscience de la raréfaction prochaine des ressources pétrolières, et de la nécessité d'aller vers des combustions propres ne rejetant pas ou peu de CO₂ pour accompagner le développement inéluctable des transports, donne un grand élan aux recherches visant à développer d'autres carburants, parmi lesquels l'hydrogène ou ses dérivés. L'hydrogène qui pourrait se substituer au gaz et au pétrole pour la production d'énergie électrique, thermique et mécanique dans un certain nombre de créneaux, dont la technologie et la rentabilité restent encore à étudier car on est loin de connaître les optima technico-économiques. Il ouvre une voie nouvelle qui est celle de la production et de l'utilisation de l'électricité à travers des piles à combustibles, comme par exemple pour la motorisation électrique dans les transports et pour la cogénération chaleur-électricité dans les applications stationnaires comme l'habitat. Par exemple pour satisfaire 25 kWh/j avec une pointe de 4.8kW, le système optimal est composé d'une éolienne de 3.5kW, un générateur photovoltaïque de 1.5 kW, un générateur Diesel de taille de 5kW, 6 batteries de stockage, une pile à combustible de 5 kW et un onduleur de 72/230V [12-20].

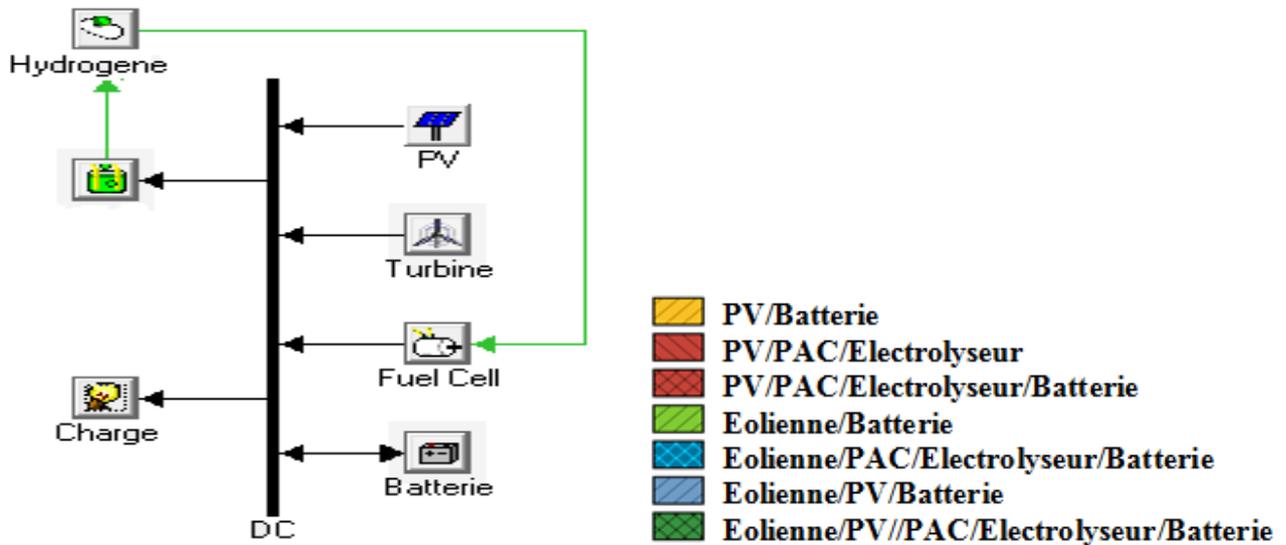


Fig. 14. Système hybride (PV/E/PAC) réalisé avec Homer

L'objectif de cette étude est la pré faisabilité de l'utilisation du système d'énergie hybride en minimisant à la fois le coût du système, le défaut de charge et l'émission du CO₂.

Fig. 15. Energie électrique du système hybride

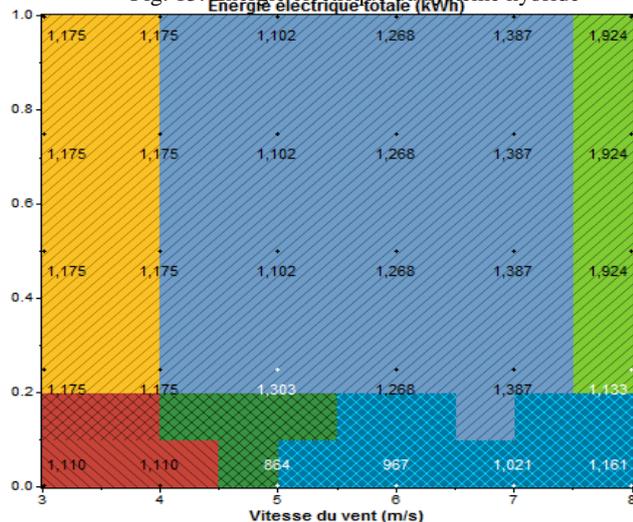
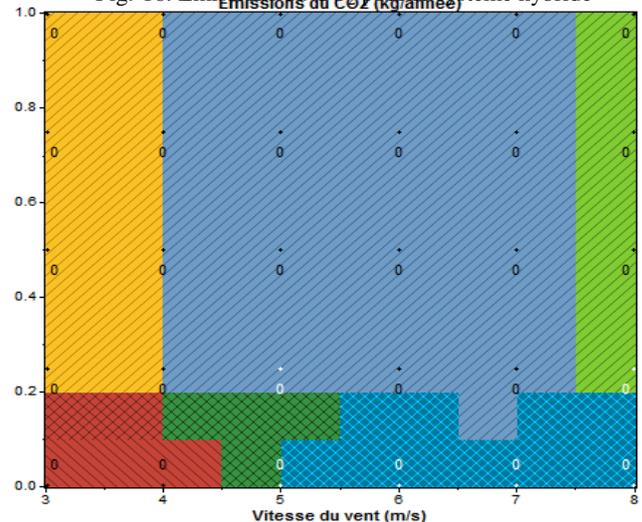


Fig. 16. Emissions du CO₂ pour le système hybride



La figure 15 représente la puissance électrique totale du système hybride. On remarque que la réduction du prix des piles à combustibles de 10% permet de faire des systèmes hybrides faisables dans les régions où la vitesse du vent mensuelle annuelle dépasse la valeur de 8m/s.

On remarque aussi sur la figure 16, que théoriquement les émissions du CO₂ qui menace la prospérité de l'écosystème pour notre système énergétique hybride renouvelable sont nulles.

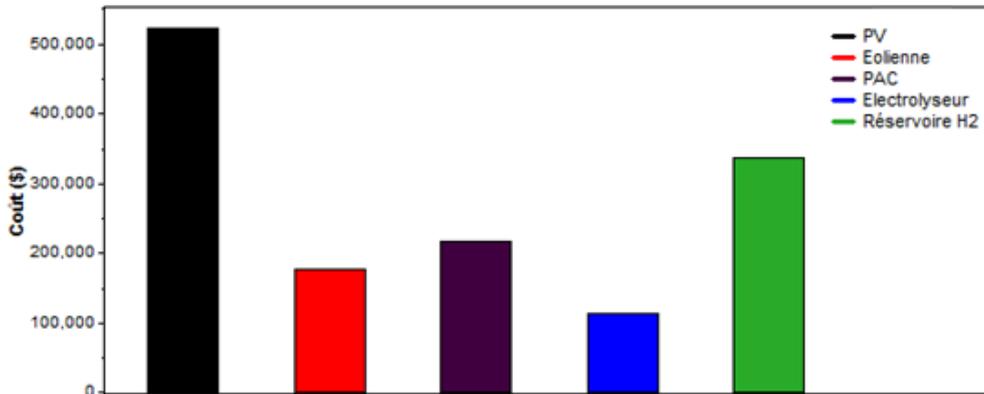


Fig. 17. Coût des différents étages du système hybride

La figure 17, représente le coût des différents étages du système hybride utilisé dans cette étude, l'énergie solaire photovoltaïque contribue de 36.55% du coût total de l'installation hybride, l'éolienne de 12.75%, la pile à combustible de 14.82%, l'électrolyseur de 7.58%, le réservoir de l'Hydrogène est de 23.44% et enfin le reste concerne les batteries de stockage.

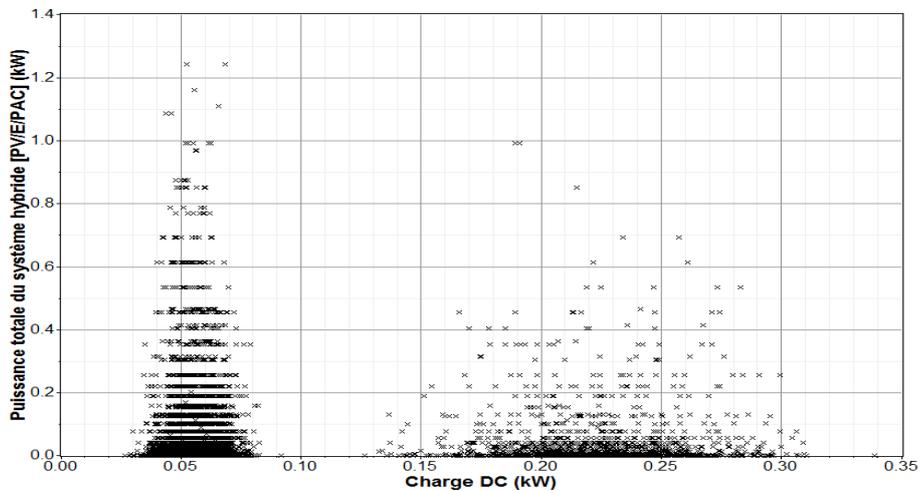


Fig. 18. Variation de la puissance totale du système hybride en fonction de la charge

La combinaison de plusieurs sources d'énergies surtout les renouvelables permet d'optimiser au maximum les systèmes de production d'électricité, aussi bien du point de vue technique qu'économique. Les solutions technologiques nouvelles proposées par les générateurs hybrides même si elles sont très complexes comparativement aux solutions courantes mono-source, présentent par contre un intérêt évident considérable par leur flexibilité incomparable, leur souplesse de fonctionnement et leur prix de revient attractif [3, 19].

La figure 18, représente la variation de la puissance totale du système hybride en fonction de la charge. Cette hybridation est capable de lisser la puissance délivrée par la source d'énergie comme l'absorption des pics aléatoires de puissances parasites et palier pendant une durée limitée une indisponibilité partielle ou totale de l'énergie, comme par exemple pendant le démarrage d'une pile à combustible, ou lorsque le soleil est marqué par les nuages devant le générateur photovoltaïque ou l'absence du vent.

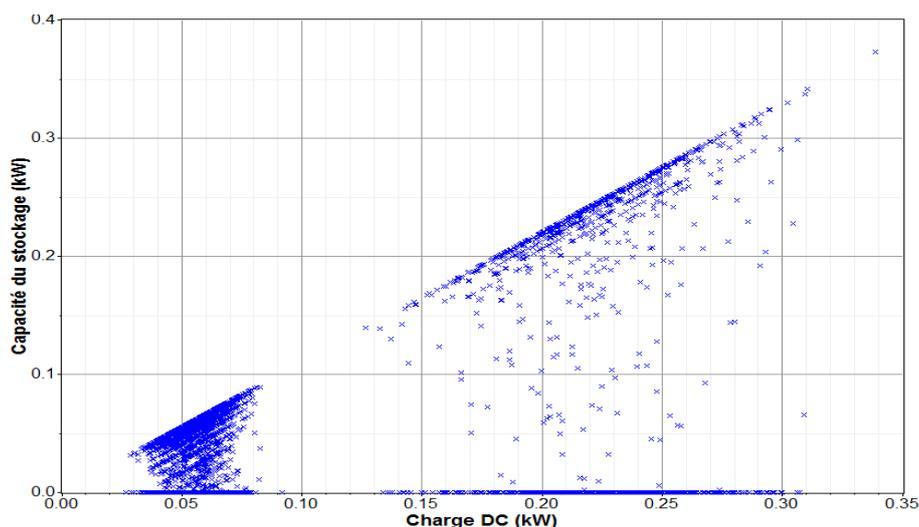


Fig. 19. Capacité du stockage en fonction de la charge

À ce jour, le stockage direct de l'énergie électrique n'étant pas possible, l'électricité est convertie en énergie potentielle qui est stockée puis récupérée et retransformée pour être utilisable. En revanche, la chaleur peut être stockée directement via un matériau spécifique ou transformée en énergie chimique par exemple. La nature du stockage est multiple et en fonction du temps de décharge, de la puissance et de la durée requises. Le stockage peut être à usage fixe ou centralisé, on parle alors de stockage stationnaire, mais il peut être aussi mobile, il est alors qualifié d'embarqué (moyens de transport, appareils électroniques,...etc.). On différencie aussi le stockage en fonction de sa capacité (quantité de charge électrique disponible): le stockage est dit de faible capacité lorsque celle-ci est de l'ordre du kWh et de forte capacité si elle est supérieure à 10 MWh. Dans ce cas, on parle de stockage massif de l'énergie [20].

La figure 19 représente la capacité de stockage en fonction de la variation de la charge. L'évolution attendue au niveau mondial du marché du stockage semble s'orienter plus particulièrement vers les batteries.

3. Conclusion

Dans ce travail, on présente l'étude des différents étages d'un système hybride pour l'alimentation d'une charge DC. Les nouvelles technologies des panneaux photovoltaïques, des turbines éoliennes ainsi que les recherches sur les piles à combustibles sont des conditions nécessaires et suffisantes pour que le système (Photovoltaïque/Éolien/Pile à combustible) soit commercialement faisable. Lorsqu'on utilise un tel système, on doit nécessairement utiliser un système de stockage d'énergie, comme par exemple des batteries, afin d'alimenter la charge lorsque les sources ne produisent pas suffisamment d'énergie.

La montée en puissance de l'électricité d'origine renouvelable et hybride imposera certainement et progressivement des moyens de stockages massifs d'énergies. Les besoins en chaleurs sont également pourvus par les produits pétroliers dans les réseaux autonomes. Trouver des alternatives basées sur la biomasse, les thermopompes, la cogénération ou le solaire thermique pourrait offrir des opportunités de réduire le coût annuel des sources mais aussi les émissions de CO₂. L'importance de l'enjeu justifie pleinement la mobilisation de tous les acteurs dans ce domaine, en particulier en termes de la recherche scientifique. Des nouvelles technologies des panneaux photovoltaïques, des turbines éoliennes, et des recherches sur les piles à combustibles sont des conditions nécessaires et satisfaisantes pour que les systèmes (PV/E/PAC) soient commercialement faisables.

4. Références

- [1] S. Diaf, M. Haddadi et M. Belhamel, "Analyse technico économique d'un système hybride (photovoltaïque/éolien) autonome pour le site d'Adrar," *Revue des Energies Renouvelables*, Vol. 9, N°3, 2006, pp. 127–134.
- [2] D. S. Koussa et M. Belhamel, "Contribution à l'étude théorique du comportement d'un système hybride (éolien-photovoltaïque-diesel) de production d'électricité sans interruption," *Revue Afrique Science*, Vol. 5, N°1, 2009, pp. 23–38.

- [3] M. Belhamel, S. Moussa et A. Kaabeche, "Production d'Electricité au moyen d'un système hybride (Eolien- Photovoltaïque-Diesel)," *Revue des Energies Renouvelables: Zones Arides*, 2002, pp. 49-54.
- [4] J. R. Hernanz et al., "Modelling of photovoltaic module," *International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ'10)*, Granada, Spain, March, 2010.
- [5] T. Salmi, M. Bouzguenda, A. Gastli, A. Masmoudi, "MATLAB/Simulink based modelling of solar photovoltaic cell," *International Journal of Renewable Energy Research*, Vol. 2, N°2, 2012, pp. 213-218.
- [6] F. M. González-Longatt, "Model of photovoltaic module in Matlab," *Conference II CIBELEC'05*, 2005.
- [7] H. L. Tsai, C. S. Tu and Y. J. Su, "Development of generalized photovoltaic model using Matlab/Simulink," *Conference WCECS'2008*, San Fransisco, USA, 2008.
- [8] S. Sheik Mohammed, "Modeling and simulation of photovoltaic module using MATLAB/Simulink," *International Journal of Chemical and Environmental Engineering*, Vol. 2, N°5, 2011, pp. 350-355.
- [9] S. Chatterjee and S. Mallika, "Cascaded multilevel inverter for photovoltaic systems with PI control," *International Journal of Electronics and Electrical Engineering*, Vol. 2, N° 2, 2012, pp. 1-15.
- [10] M. Belatel, "Etude techno-économique d'un système hybride (PV/E) utilisé pour la protection de l'environnement en Algérie," *Conférence CNPIE'2011*, Skikda, Algérie, 2011.
- [11] M. Belatel, "Modélisation d'un système hybride de type photovoltaïque-éolien utilisé pour la production d'énergie," *Conférence ICRE'2012*, Bejaia, Algérie, 2012.
- [12] A. Ouazeta, "Introduction à la production hybride: étude de différents étages (PV/E/PAC)," Université Mentouri de Constantine, 2012.
- [13] M. Belatel, F. Z. Aissous et F. Ferhat, "Contribution à l'étude d'une pile à combustible de type PEMFC utilisée pour la production d'énergie électrique verte," *Revue des Energies Renouvelables*, Vol. 15, N°1, 2012, pp. 13-28.
- [14] M. Belatel, F. Benchikh, Z. Simohamed, F. Ferhat et F. Z. Aissous, "Technologie du couplage d'un système hybride de type photovoltaïque-éolien avec la pile à combustible pour la production de l'électricité verte," *Revue des Energies Renouvelables*, Vol. 14, N°1, 2011, pp. 145-162.
- [15] T. Maatallah, "Etude de la préféabilité des systèmes d'énergie hybride autonome dans la région de Tunis," *Congrès International sur les Energies Renouvelables et Environnement*, Tunisie, 2009.
- [16] V. Demeusy, "Dimensionnement d'un système hybride photovoltaïque/groupe électrogène avec le logiciel Homer," Editions Solarpedia, USA, 2011.
- [17] J. B. Fulzele and S. Dutt, "Optimum planning of hybrid renewable energy system using Homer," *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*, Vol. 2, N° 1, February, 2012, pp. 68-74.
- [18] E. A. Al-ammar, N. H. Malik and M. Usman, "Application of using hybrid renewable energy in Saudi Arabia," *ETASR - Engineering, Technology & Applied Science Research*, Vol. 1, N° 4, 2011, pp.84-89.
- [19] H. Ibrahim, A. Ilinca et J. Perron, "Investigations des différentes alternatives renouvelables et hybrides pour l'électrification des sites isolés," Editions *LREE*, Septembre 2008.
- [20] C. P. Jacquin et J. F. Bertrant, "Le stockage massif de l'énergie," Editions *IFP Energies nouvelles*, France, 2013.