

Technologie du couplage d'un système hybride de type photovoltaïque-éolien avec la pile à combustible pour la production de l'électricité verte

M. Belatel*, F. Benchikh, Z. Simohamed, F. Ferhat et F.Z. Aissous

Laboratoire d'Electrotechnique de Constantine, 'LEC'
Faculté des Sciences de l'Ingénieur, Université Mentouri
Route Ain-El-Bey, Constantine, Algérie

(reçu le 29 Novembre 2010 – accepté le 30 Mars 2011)

Résumé - *Les problèmes de l'environnement, tels que, les limites des ressources, le réchauffement climatique, la pollution atmosphérique due à l'émission de gaz à effet de serre dans le cas des hydrocarbures, ainsi que la production de déchets difficiles à traiter dans le cas du nucléaire, ont fait prendre conscience qu'un développement écologique et économique respectueux de l'environnement, dans lequel nous vivons, est nécessaire pour pouvoir produire des énergies propres et cela doit être très intéressant dans le futur. C'est dans ce contexte que cet article est basé sur l'étude d'une nouvelle technologie qui représente un couplage d'un système hybride de type photovoltaïque-éolien avec la pile à combustible pour la production de l'électricité verte.*

Abstract - *The environmental problems such as the limits of resources, global warming, air pollution due to the emission of greenhouse gases in the case of oil, and the production of waste material difficult to handle in the case of nuclear, have raised awareness that sustainable and environmentally respectful economic environment in which we live, is needed to produce clean energy and it must be very interesting in the future. In this case this paper is based on the study of a new technology that represents a coupling of a hybrid photovoltaic-wind system with the fuel cell to produce green energy.*

Mots clés: Technologie - Couplage - Photovoltaïque - Eolien - PAC - Energie verte.

1. INTRODUCTION

Etant donné l'épuisement des sources d'énergies conventionnelles et les pressions croissantes qui s'exercent sur les pays du monde entier pour qu'ils réduisent leurs émissions de gaz à effet de serre. Il n'est pas surprenant de voir les autorités publiques s'intéresser aux sources d'énergies renouvelables. Donc la recherche de nouvelles sources d'énergie sera probablement la préoccupation majeure de la prochaine génération d'ingénieurs et de chercheurs [1].

L'utilisation d'un aérogénérateur ou un système photovoltaïque peut ne pas subvenir à lui seul aux besoins énergétiques souhaités. En effet, l'énergie éolienne ou l'énergie solaire peut nous faire défaut au moment où nous en avons le plus besoin. Pour assurer le fonctionnement d'une installation durant toute l'année, on envisage l'utilisation d'un système d'appoint.

Plusieurs travaux ont été réalisés en utilisant comme système d'appoint un groupe électrogène, un groupe diesel ou autres dont le fonctionnement dans ces installations est lié à la nature des besoins. Un système d'appoint à base d'énergie fossile réduit la

* belatelmimi2002@yahoo.fr

capacité de stockage nécessaire et le coût, mais d'une part, il nécessite la maintenance et le carburant et d'autre part, il présente comme inconvénients le bruit et la pollution.

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 [2]. 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 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 au travers des piles à combustible, comme par exemple pour la motorisation électrique dans les transports et pour la cogénération chaleur électricité dans les applications stationnaires comme l'habitat [3].

2. MODELISATION DU SYSTEME HYBRIDE PHOTOVOLTAIQUE-EOLIEN (PV-E)

L'intérêt d'un tel couplage est d'avoir plus d'énergie, mais comme pour tout système solaire, le risque demeure d'avoir trop d'énergie à certains moments et pas assez à d'autres. Il s'agit donc, par l'intermédiaire d'un système de stockage, d'emmagasiner l'excès énergétique lorsqu'il existe et de le restituer lors des périodes de manque d'apport.

Pour faire cette analyse, nous définissons un système de conversion complètement intégré qui combine les deux sortes d'énergies. Ce système contient la conversion d'énergie solaire et éolienne, qui est ensuite reliée au stockage et à la demande [2].

2.1 Modélisation du gisement solaire

L'irradiation globale sur plan incliné est calculée par la relation suivante:

$$G_{inc} = B_{in} + D_i + R_i \quad (1)$$

où B_{in} représente l'irradiation directe, D_i l'irradiation diffuse et R_i l'irradiation réfléchie, sur un plan incliné.

2.1.1 Reconstitution des moyennes mensuelles des irradiations directes sur plan incliné

L'irradiation directe sur un plan incliné est donnée par l'expression suivante:

$$B_{in} = R_b \times (G_H - D_H) \quad (2)$$

avec, G_H , D_H et R_b qui sont respectivement les valeurs horaires des irradiations globales, diffuses et facteur de forme. Ce dernier est donné par l'expression suivante:

$$R_b = \cos(\theta_i) / \sin(h) \quad (3)$$

où θ_i et h sont respectivement l'angle d'incidence et la hauteur du soleil.

2.1.2 Reconstitution des moyennes mensuelles des irradiances diffuses sur plan incliné

L'irradiation diffuse sur plan incliné est donnée par l'équation suivante:

$$D_n = D_H \times (1 - \cos \beta) / 2 \quad (4)$$

avec β l'angle d'inclinaison de la surface de captation, et D_H l'irradiation diffuse sur un plan horizontal.

2.1.3 Reconstitution des moyennes mensuelles des irradiances réfléchies sur plan incliné

L'irradiation réfléchie par le sol et incident sur un plan incliné est donnée par l'équation suivante:

$$R_i = (B_n \times \sin h + D_H) \times \rho \times (1 + \cos \beta) / 2 \quad (5)$$

avec ρ et B_n sont respectivement l'albédo du sol et l'irradiation directe sur un plan normal.

2.2 Modélisation du gisement éolien

La distribution de Weibull décrit la distribution en fréquence de la vitesse du vent. Elle s'est avérée appropriée pour la description des propriétés statistiques du vent. La fonction de Weibull est fonction de deux paramètres c et k et peut s'écrire:

$$F(v) = 1 - \exp\left(-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right) \quad (6)$$

où c et k sont respectivement le facteur d'échelle et le facteur de forme, qui caractérise l'asymétrie de la distribution.

Ainsi, en utilisant la définition de $F(v)$, celle-ci s'écrit donc [4]:

$$F(v) = \left(\frac{k}{c}\right) \times \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} \times \exp\left(-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right) \quad (7)$$

2.3 Modélisation du générateur photovoltaïque

Dans le modèle choisi, la résistance série était incluse, mais pas la résistance shunt. Une simple diode shunt a été utilisée pour réaliser la meilleure forme de la courbe.

Ce modèle est une version simplifiée du modèle à une seule diode présenté par Gow et Manning [5, 6].

La figure 1 représente le schéma électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque. D'après la loi de Kirchhoff, le courant de sortie de la cellule est donné par:

$$I = I_{ph} - I_D \quad (8)$$

Le courant photonique est lié à l'éclairement, à la température et au courant photonique mesuré aux conditions de référence par:

$$I_{ph} = \frac{G}{G_{ref}} \times I_{scT_c} \times (1 + \alpha (T_c - T_{cref})) \quad (9)$$

Le courant de la diode est donné par l'expression de Shockley:

$$I_D = I_0 \times \left\{ \exp \left(\frac{q(V + I \times R_s)}{A k T_c} \right) - 1 \right\} \quad (10)$$

La résistance shunt est déduite par l'équation suivante:

$$R_s = - \frac{dV}{dI} \Big|_{V_{ocT_c}} + \frac{A k T_c}{q I_{scT_c}} \quad (11)$$

où

G représente l'éclairement de fonctionnement et G_{ref} l'éclairement normalisé,
 α , le coefficient de température du courant I_{ph} (mA/°C),

A , le facteur d'idéalité de la jonction P-N,

k , la constante de Boltzmann, 1.381×10^{-23} J/K,

T_{cref} , la température absolue de référence de la cellule,

q , la charge d'un électron, 1.602×10^{-19} C,

V , la tension imposée aux bornes de la cellule,

I_0 , le courant de saturation à l'obscurité,

I_{scT_c} , le courant de court-circuit de la cellule à la température ambiante T_c ,

V_{ocT_c} , la tension du circuit ouvert à la température T_c .

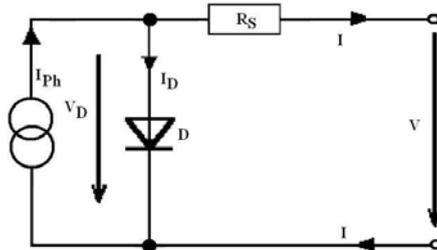


Fig. 1: Circuit électrique équivalent de la cellule photovoltaïque à une diode

Toutes ces constantes peuvent être déterminées en utilisant les données de fabricants de modules photovoltaïques. Le module BP MSX60 de BPSolar 60W sera utilisé pour illustrer et vérifier le modèle. Le photo-courant est directement proportionnel à l'éclairement.

Quand la cellule est court circuitée, un courant négligeable entre dans la diode. Le rapport entre le photo-courant et la température est linéaire, et est déduit en notant le changement du photo-courant en fonction de la variation de température.

Quand la cellule est en obscurité, la caractéristique ($I-V$) est donnée par l'équation de Shockley. Quand la cellule illuminée est en circuit ouvert, le photo-courant passe entièrement dans la diode.

La caractéristique fondamentale du générateur photovoltaïque, donnée pour un éclairement et une température donnés, n'impose ni le courant ni la tension de fonctionnement; seule la courbe ($I-V$) est fixée. C'est la valeur de la charge aux bornes du générateur qui va déterminer le point de fonctionnement du système photovoltaïque.

La figure 2, représente les trois zones essentielles:

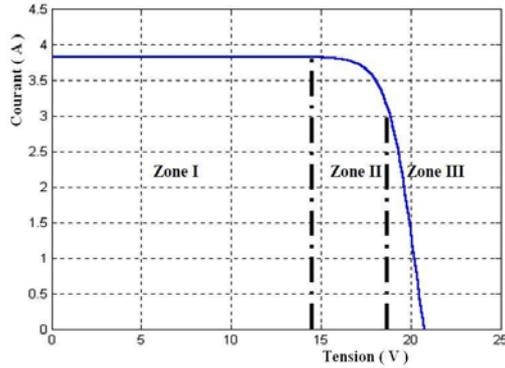


Fig. 2: Les différentes zones de la caractéristique ($I-V$)

La zone I: où le courant reste constant, quelle que soit la tension, pour cette région, le générateur photovoltaïque fonctionne comme un générateur de courant.

La zone II: correspondant au coude de la caractéristique, la région intermédiaire entre les deux zones, représente la région préférée pour le fonctionnement du générateur, où le point optimal qui est caractérisé par une puissance maximale peut être déterminé.

La zone III: qui se distingue par une variation de courant correspondant à une tension presque constante, dans ce cas le générateur est assimilable à un générateur de tension.

Une première manière d'étudier la cohérence du modèle développé tout au long de ce travail est d'étudier l'allure des caractéristiques courant-tension et puissance-tension obtenues.

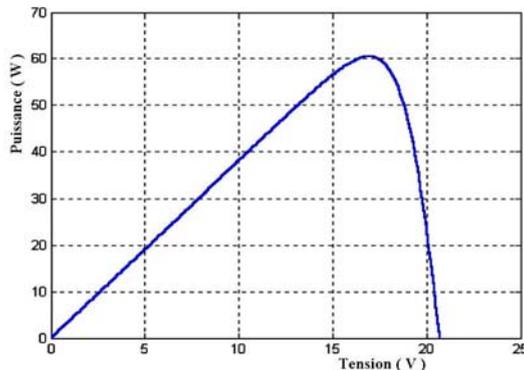


Fig. 3: Caractéristique puissance – tension ($P-V$)

La résistance série agit sur la pente de la caractéristique dans la zone où la photodiode qui se comporte comme un générateur de tension, et lorsqu'elle est élevée, elle diminue la valeur du courant de court-circuit (I_{sc}). L'augmentation du facteur de qualité de la diode influe inversement sur le point de puissance maximale et cela se traduit par une baisse de puissance au niveau de la zone de fonctionnement.

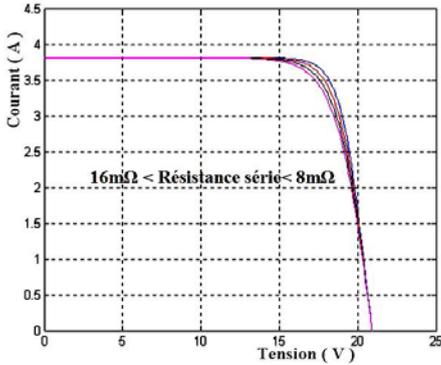


Fig. 4: Influence de la résistance série

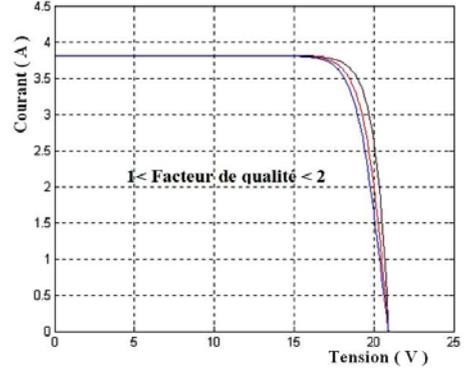


Fig. 5: Influence du facteur de qualité

Pour que le système photovoltaïque soit optimisé et fonctionne au point maximale de la puissance, il faut intégrer un MPPT qui a pour rôle de détecter ce point et oblige le système d'opérer précisément sur ce dernier dont le fonctionnement est optimal.

Le tracé du point de puissance maximale, 'MPPT' permet au module photovoltaïque de fonctionner à son point de puissance maximale. Il est conçu généralement avec un convertisseur qui règle la puissance tirée du module solaire. En changeant la commande des commutateurs, l'énergie transférée par le convertisseur peut être commandée avec précision.

Le point maximum de puissance est habituellement contrôlé par deux variables de commande. La tension ou la puissance sont à chaque fois mesurées et employées à nouveau dans une boucle pour déterminer si le module solaire est au point de la puissance maximale [7-9].

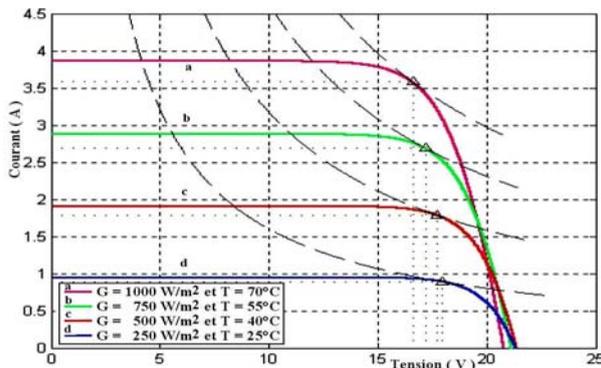


Fig. 6: Système MPPT pour la détermination des caractéristiques courant-tension et puissances optimales obtenues

2.4 Modélisation du générateur éolien

Nous savons que l'éolienne procure son énergie du vent, par conséquent, il existe une relation entre la vitesse du vent et la vitesse de rotation, le couple et la puissance sur le rotor d'une éolienne.

La puissance éolienne peut être définie par la relation suivante [10]:

$$P_V = \frac{1}{2} \rho \times S \times V^3 \quad (12)$$

ρ : Masse volumique de l'air en kg/m^3 ; S : Surface traversée par l'air en m^2 ;
 $S = \pi R^2$, R : Rayon du rotor de l'éolienne, V : Vitesse du vent en m/s .

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

$$P = C_P \times \frac{\rho \times S \times V^3}{2} \quad (13)$$

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.

$$k = \omega \times \frac{R}{V} \quad (14)$$

ω : Vitesse angulaire du rotor de l'éolienne.

Le coefficient C_P est fonction de k et il est donné par le constructeur en fonction du type de capteur.

Le couple développé sur le rotor de l'éolienne est défini de la manière suivante:

$$T = C_P \times \frac{\rho \times S \times V^3}{2\omega} = C_P \times \frac{R \times \rho \times S \times V^2}{2k} \quad (15)$$

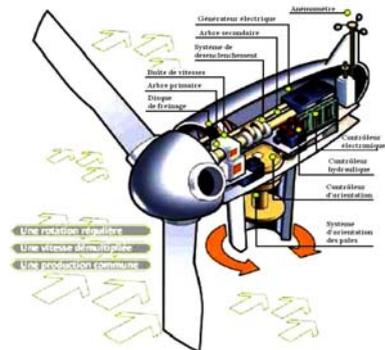
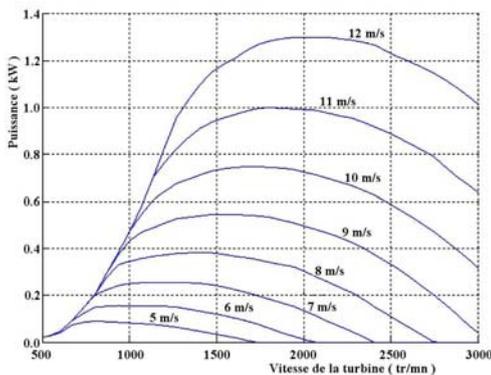


Fig. 7: Puissance théorique disponible d'une éolienne donnée

Les machines asynchrones à rotor bobiné permettent, par un réglage dynamique du glissement, de s'adapter aux variations de puissances fournies par la turbine. La partie mécanique peut généralement subir les variations brutales du régime de vent, ce type de contraintes devient inacceptable pour les fortes puissances. La variation de vitesse

devient donc de plus en plus justifiée à mesure qu'on augmente la puissance de l'éolienne.

Equations électriques: les équations des tensions s'écrivent dans le référentiel d-q sous la forme générale suivante:

$$V_{ds} = R_s \times I_{ds} + \frac{d\Phi_{ds}}{dt} - \theta_s \times \Phi_{qs} \quad (16)$$

$$V_{qs} = R_s \times I_{qs} + \frac{d\Phi_{qs}}{dt} - \theta_s \times \Phi_{ds} \quad (17)$$

$$V_{dr} = R_r \times I_{dr} + \frac{d\Phi_{dr}}{dt} - \theta_r \times \Phi_{qr} \quad (18)$$

$$V_{qr} = R_r \times I_{qr} + \frac{d\Phi_{qr}}{dt} - \theta_r \times \Phi_{dr} \quad (19)$$

Equations des flux: les expressions des flux s'expriment par:

$$\Phi_{ds} = L_s \times I_{ds} + M \times I_{dr} \quad (20)$$

$$\Phi_{qs} = L_s \times I_{qs} + M \times I_{qr} \quad (21)$$

$$\Phi_{dr} = L_r \times I_{dr} + M \times I_{ds} \quad (22)$$

$$\Phi_{qr} = L_r \times I_{qr} + M \times I_{qs} \quad (23)$$

Le couple mécanique et le couple électromagnétique sont donnés par les relations suivantes:

$$\Gamma_{mec} = \Gamma_r + f \times \Omega + J \times \frac{d\Omega}{dt} \quad (24)$$

$$\Gamma_{em} = -P \times \frac{M}{L_s} (I_{dr} \times \Phi_{qs} - I_{qr} \times \Phi_{ds}) \quad (25)$$

Equations d'auto excitation: l'auto amorçage du générateur asynchrone est assuré par la présence des condensateurs et de la saturation. Les condensateurs fournissent l'énergie réactive nécessaire et la saturation limite la tension du générateur. Ce processus est gouverné par la relation suivante, appelée équation d'amorçage du générateur.

$$\frac{dV_{ds}}{dt} = \frac{1}{C} \times i_{ds} \quad (26)$$

$$\frac{dV_{qs}}{dt} = \frac{1}{C} \times i_{qs} \quad (27)$$

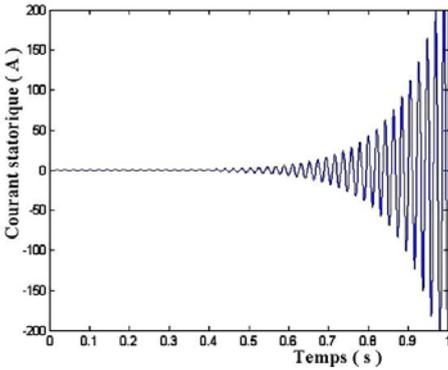


Fig. 8: Courant statorique en linéaire

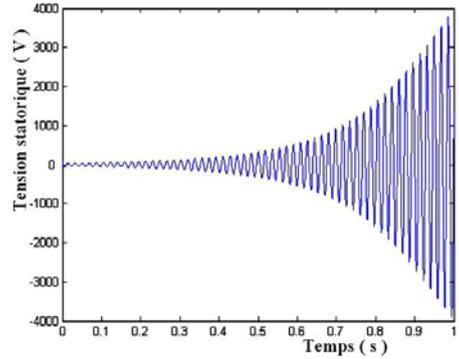


Fig. 9: Tension statorique en linéaire

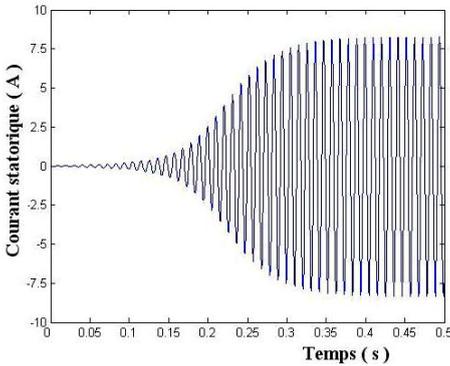


Fig. 10: Courant statorique en saturation

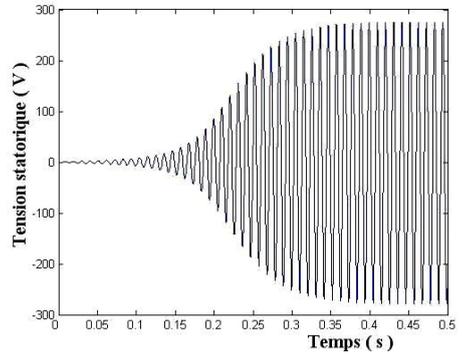


Fig. 11: Tension statorique en saturation

On a fait l'étude du générateur en linéaire et nous avons obtenu les figures 8 et 9 qui représentent les résultats de simulation obtenus pour le courant et la tension. Ces deux figures montrent que le fonctionnement en linéaire est pratiquement impossible du fait que le courant et la tension ne sont plus limités.

Dans ce cas, le flux magnétique est proportionnel au courant d'excitation et les différentes inductances utilisées dans le système d'équations du flux sont constantes.

Dans la réalité physique, la machine asynchrone à rotor bobiné est toujours saturée, donc les figures 10 et 11, nous montrent comment la saturation limite le courant et la tension [10-12].

2.5 Modélisation du système hybride (photovoltaïque-éolien)

L'énergie délivrée par un module photovoltaïque est décrite par la caractéristique ($I-V$) qui varie de manière à ce que le courant suivie une relation de la forme:

$$I = f(v, E_s, T_j) \quad (28)$$

On voudrait toujours déterminer la puissance maximale que peut fournir un groupe de modules photovoltaïques pour un ensoleillement et une température donnée.

La puissance produite par un aérogénérateur éolien est estimée par la relation suivante:

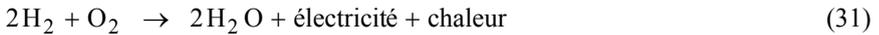
$$P = \int_{v_{in}}^{v_{out}} P(v) \times f(v) \times dv \quad (29)$$

Ainsi, connaissant les caractéristiques de l'aérogénérateur choisi, de la moyenne mensuelle par jour de la vitesse du vent et de la densité de probabilité de Weibull correspondante, nous pouvons déduire rapidement la puissance produite par le système hybride [4]:

$$E_L = E_{pv} \times A_{pv} + E_{el} \times A_{el} \quad (30)$$

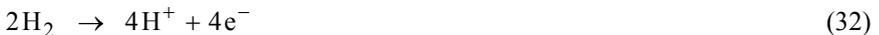
3. MODELISATION DE LA PILE A COMBUSTIBLE

Le principe de la pile à combustible a été démontré par l'Anglais William Grove, en 1839, le processus peut être décrit comme l'inverse de l'électrolyse de l'eau. En fait, il s'agit d'une combustion électrochimique contrôlée d'hydrogène et d'oxygène, avec production simultanée d'électricité, d'eau et de chaleur, selon une réaction chimique globale:



Une pile à combustible, '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:

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:



Le 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). Afin que le catalyseur puisse travailler efficacement, la création de zones actives doit être assurée. Ces zones mettent en présence à la fois le gaz réactif, les électrons, les protons et le catalyseur, cela se réalise au niveau de l'interface électrode-électrolyte.

La pile à combustible (PAC) est un système de production d'énergie renouvelable qui possède de nombreux avantages. Par exemple, une pile à combustible à membrane échangeuse de proton (PEMFC) ou pile à hydrogène qui utilise de l'hydrogène comme combustible, et de l'oxygène comme comburant, le déchet obtenu est de l'eau [13, 14].

Le potentiel réel global de la pile à combustible PEMFC, par l'équation suivante [15]:

$$\begin{aligned}
 U_{PAC} = & 0,2817 - 0,85 \cdot 10^{-3} (T - 298,15) + 4,308 \cdot 10^{-5} T \left[\ln \left(\frac{3}{4} P_{ano} \right) + \frac{1}{2} \ln \left(\frac{1}{2} P_{cat} \right) \right] \\
 & + \left[2,86 \cdot 10^{-3} + 2 \cdot 10^{-4} \ln(A) + 4,3 \cdot 10^{-5} \ln \left[\frac{0,75 P_{ano}}{1,09 \cdot 10^6 \exp(77/T)} \right] \right] \times T \\
 & + 7,6 \cdot 10^{-5} T \ln \left[\frac{0,5 P_{cat}}{5,08 \cdot 10^6 \exp(-498/T)} \right] - 1,93 \cdot 10^{-4} T \ln(I_{PAC}) \\
 & - I_{PAC} \left[\frac{181,6 \left[1 + 0,03 \left(\frac{I_{PAC}}{A} \right) + 0,062 \left(\frac{T}{303} \right)^2 \left(\frac{I_{PAC}}{A} \right)^{2,5} \right]}{A \times \left[\lambda_{H_2O/SO_3^-} - 0,638 - 3 \left(\frac{I_{PAC}}{A} \right) \right] \exp \left[4,18 \left[\frac{T - 303}{T} \right] \right]} \right]^{1 + R_C} \\
 & + B \left(1 - \frac{J}{J_{max}} \right)
 \end{aligned} \tag{34}$$

Le rendement électrique η_{elec} d'une pile à combustible est défini comme le rapport entre l'énergie électrique produite W_{elec} et l'énergie chimique apportée par les réactifs, c'est-à-dire l'énergie thermique ΔH qui serait libérée par la réaction:

$$\eta_{elec} = \frac{W_{elec}}{\Delta H} \tag{35}$$

Le rendement énergétique maximal est le rapport entre la travail maximal théorique W_{max} fourni par une pile (c'est-à-dire qui fonctionnerait de manière réversible) et la variation d'enthalpie au cours de la réaction:

$$\eta_{rév} = \frac{W_{max}}{\Delta H} = \frac{\Delta G}{\Delta H} \tag{36}$$

Pour une pile à combustible fonctionnant en hydrogène et oxygène, les enthalpies de formation de l'eau à 25°C sont égales à -285 kJ.mol⁻¹ et -242 kJ.mol⁻¹ selon que l'eau est formée respectivement sous forme liquide ou gazeuse. Le rendement théorique maximal, à 25°C, est donc de 83 % si l'eau formée est liquide et de 95 % dans le cas de vapeur d'eau.

En pratique, la tension U_{PAC} de la pile est inférieure à la valeur maximale, à cause de l'irréversibilité des réactions, de la chute ohmique et de la diffusion des réactifs jusqu'aux sites catalytiques. Le rendement électrique réel η_{elec} peut s'écrire en fonction de la tension:

$$\eta_{elec} = \frac{nF \times U_{PAC}}{\Delta H} \tag{37}$$

Cette expression peut se ramener à un rapport de tension, par exemple, à 25°C:

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

$$\eta_{\text{elec}} = \frac{U_{\text{PAC}}}{1,23 \times V} \quad (\text{vapeur d'eau})$$
(38)

où 1,48 V et 1,23 V correspondent aux tensions qui devraient être obtenues si le système était efficace à 100 %. Ainsi, plus la tension de la pile est élevée, le rendement est meilleur en électricité.

Toute énergie non convertie en électricité est perdue sous forme de chaleur, à l'inverse, plus la tension de la pile est basse, plus la pile produit de la chaleur. Ceci pose de nombreux problèmes pour la conception des stacks, puisqu'il est nécessaire d'évacuer une grande quantité de chaleur dans un système que l'on souhaite le plus compact possible.

La puissance P_{PAC} délivrée par la pile, s'exprimant comme le produit de la tension de pile U_{PAC} et du courant de pile I_{PAC} [16]:

$$P_{\text{PAC}} = U_{\text{PAC}} \times I_{\text{PAC}} \quad (39)$$

Le stack de la pile à combustible utilisé dans notre étude est composé de 23 cellules dont la surface active est de 100 cm². Sa puissance électrique est de 500 W, sa puissance thermique de 600 W. Ce stack a été réalisé par ZSW (Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung, ZSW, Ulm, Allemagne). Ses dimensions extérieures sont de 230 × 140 × 140 mm³.

Le nombre de cellules dans un stack est déterminé par la valeur maximale de la tension requise et la tension opérationnelle du système. La tension totale d'un stack est la somme élémentaire des potentiels des cellules qui lui compose [17]:

$$V_{\text{stack}} = \sum_{i=1}^{N_{\text{cell}}} V_i = \bar{V}_{\text{cell}} \times N_{\text{cell}} \quad (40)$$

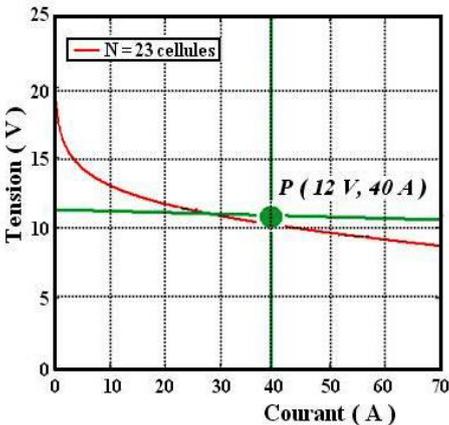


Fig. 12: Courbe tension - courant pour un stack

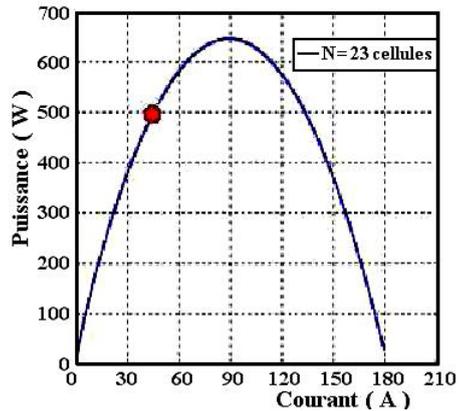


Fig. 13: Allure générale de la puissance d'un stack

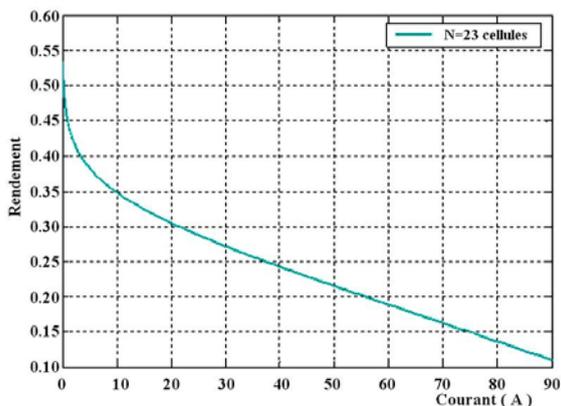


Fig. 14: Allure générale du rendement d'un stack

On remarque clairement que l'empilement de plusieurs cellule a pour effet de multiplier la tension finale de la pile, comme si on a shunté plusieurs batteries en série.

On remarque aussi sur les figures de la modélisation de la PEM, que le point de fonctionnement passe presque par celui cité dans notre modèle.

4. COUPLAGE DU SYSTEME PHOTOVOLTAIQUE-EOLIEN AVEC LA PILE A COMBUSTIBLE

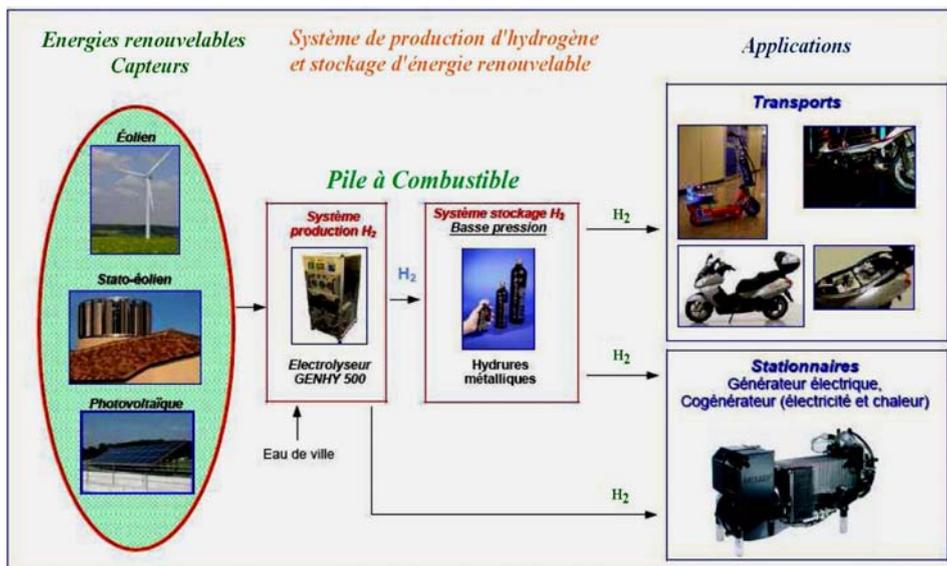


Fig. 15: Technologie du couplage d'un système hybride photovoltaïque-éolien avec la pile à combustible [19]

Compte tenu des problèmes environnementaux sévères auxquels la planète est confrontée, l'introduction d'un nouveau vecteur énergétique, tel que l'hydrogène, doit

favoriser le développement des sources primaires renouvelables telles que le solaire, l'éolien et l'hydraulique.

L'hydrogène d'origine renouvelable contribuera à la diversification des approvisionnements pour les transports et permettra le stockage de l'énergie intermittente pour les applications de cogénération stationnaire. Les sources d'énergies renouvelables sont de nature intermittente.

Mais le fait que l'hydrogène puisse être stocké sans perte et en grande quantité permet d'envisager un lissage de la production électrique d'origine renouvelable et l'alimentation en continu des véhicules à hydrogène.

Comme schématisé sur la figure 15, il s'agit de fournir une solution permettant la production d'hydrogène très pur à partir d'électricité d'origine photovoltaïque et/ou éolienne et d'eau à partir d'un électrolyseur de type PEM. Les différents modules 'production électrique, 'MPE'', et 'production d'hydrogène, 'MPH' peuvent être fournis séparément. Il est toutefois à noter que l'interaction entre ces deux modules étant très forte, leur couplage nécessite une attention particulière.

L'intérêt de l'utilisation de l'hydrogène comme combustible réside dans la diversité des sources d'approvisionnement ainsi que dans l'impact possible sur l'environnement. La production locale par voie électrolytique sur des systèmes de petite capacité est une voie qui doit être examinée, car il ne faut pas oublier qu'un litre d'eau contient suffisamment d'hydrogène pour produire 2 kWh d'électricité, via une pile à combustible présentant un rendement de 55 %.

Néanmoins, seules les validations des performances dans un cadre opérationnel, associées à une analyse environnementale (cycle de vie, bilans énergétique, émissions) et économique, permettront d'engager durablement cette technologie vers une exploitation commerciale [18, 19].

Dans notre étude, le photovoltaïque produit une puissance de 1.5 kW, l'éolien produit une énergie égale à 3.5 kW, donc le système hybride va produire une énergie totale de 5 kW, cette énergie pourra être utilisée au moins dans 10 piles à combustible de 500 kW et ces dernières peuvent être utilisées après dans le transport ou dans le système stationnaire.

5. CONCLUSION

Ces dernières années, l'utilisation des énergies renouvelables comme le photovoltaïque et l'éolien est en forte croissance pour la production de l'électricité. Mais ces systèmes doivent être hybridés avec d'autres sources d'énergie comme l'hydrogène qui peut être produit par électrolyse, puis stocké et enfin réutilisé par une pile à combustible pour produire de l'énergie électrique verte.

Donc, les besoins de production d'énergie électrique et thermique sont de plus en plus nécessaires, c'est pour cela que la production d'hydrogène par des moyens autonomes comme le couplage aux énergies renouvelables ou le reformage apporte des réponses propres, fiables et plus économique à cette nouvelle technologie.

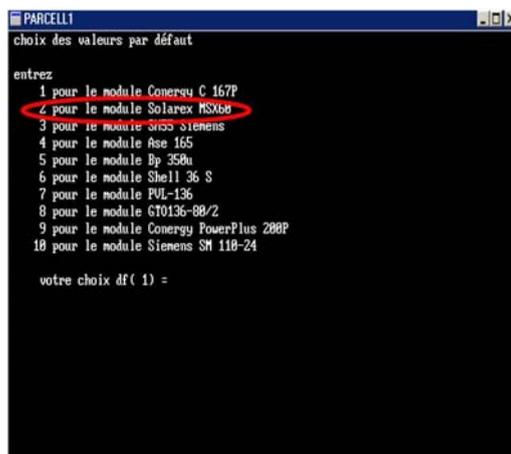
Dans ce contexte, le but de ce travail est de présenter une contribution basée sur la modélisation d'un système hybride «énergies renouvelables-PEM», et qui va permettre aux différents chercheurs dans le domaine des énergies renouvelables un retour d'expérience sur cette technologie de couplage à grande échelle.

ANNEXES

Tableau 1: Caractéristiques du module photovoltaïque de type MSX60 [8, 9]

Propriétés du module	Valeur
Température	25 °C
Tension de circuit ouvert	21.1 V
Courant de court-circuit	3.8 A
Tension de référence correspondant à la puissance maximale	17.5 V
Courant de référence correspondant à la puissance maximale	3.5 A
Puissance maximale	60 W
Nombre de cellules	25

La détermination des paramètres du module photovoltaïque de type MSX60 est faite avec le logiciel Parcelli.



Fenêtre du logiciel Parcelli

Tableau 2: Paramètres de la machine asynchrone à rotor bobiné de 3.5 kW utilisée comme aérogénérateur [12]

Caractéristiques	Valeur
Puissance nominale	3.5 kW
Fréquence nominale	50 Hz
Tension ligne-ligne	380 V
Nombre de pôles	4
Résistance du stator	0.76 Ω

Résistance du rotor	0.74 Ω
Inductance statorique	0.77 H
Inductance rotorique	0.77 H
Inductance mutuelle	0.074 H
Valeur de capacité	80 μ F

Tableau 3: Valeurs des paramètres du modèle électrochimique ZSW-23 cellules [17]

Paramètres du stack		Valeur
N	Nombre de cellule du stack	23
$V_{no\ min\ ale}$	Tension nominale du stack	12 V
$I_{no\ min\ ale}$	Courant nominal du stack	40 V
$P_{no\ min\ ale}$	Puissance nominale du stack	500 W
Paramètres physiques de la PAC		
A	Surface active de la pile	100 cm ²
L	Epaisseur de la membrane	280 μ m
R_C	Résistance équivalente de contact à la conduction des électrons	0.0003 Ω
J_{max}	Densité de courant maximale	0.42 A/cm ²
T	Température opératoire absolue de la pile	303.15 K
B	Constante empirique, dépendant du type de pile et de son fonctionnement	0.016
λ_{H_2O/SO_3^-}	Teneur en eau dans la membrane	14 mol(H ₂ O)/mol(SO ₃)
P_{ano}	Pression partielle de l'hydrogène	0.01 Atm
P_{cath}	Pression partielle de l'oxygène	0.02 Atm

REFERENCES

- [1] D. Saheb Koussa, M. Belhamel et B. Kazed, 'Système Eolien pour l'Alimentation d'une Charge à Usage Domestique', Revue des Energies Renouvelables, Vol. 10, N°1, pp. 127 – 138, 2006.
- [2] A. El Khadimi, L. Bchir et A. Zeroual, 'Dimensionnement et Optimisation Technico-Economique d'un Système d'Energie Hybride Photovoltaïque - Eolien avec Système de Stockage', Revue des Energies Renouvelables, Vol. 7, pp. 73 – 83, 2004.

- [3] H. Mahcene et al., "L'hydrogène et son impact sur la chaîne du froid", *Workshop National sur l'Hydrogène*, Université Kasdi Merbah, Ouargla, Algérie, 2009.
- [4] D. Sabe-Koussa et M. Belhamel, 'Contribution à l'Etude Théorique du Comportement d'un Système Hybride: Eolien – Photovoltaïque – diesel' de Production d'Electricité Sans Interruption', *Revue des Energies Renouvelables*, Vol. 11, N°1, pp. 137 – 151, 2008.
- [5] M.S. Jamri and T.C. Wei, 'Modeling and Control of a Photovoltaic Energy System Using the State-Space Averaging Technique', *American Journal of Applied Sciences*, Vol. 7, N°5, pp. 682 – 691, 2010.
- [6] T. Ikegami, T. Maezono, F. Nakanishi, Y. Yamagata and K. Ebihara, 'Estimation of Equivalent Circuit Parameters of PV Module and Its Application to Optimal Operation of PV System', *Solar Energy Materials and Solar Cells*, Vol. 67, n°1-4, pp. 389 – 395, 2001.
- [7] R. Chenni, 'Etude Techno-Economique d'un Système de Pompage Photovoltaïque dans un Village Solaire', Thèse de Doctorat, Université Mentouri, Constantine, Algérie, 2007.
- [8] F.M. González-Longatt, 'Model of Photovoltaic Module in Matlab', *Conference II-CIBELEC'05*, Mérida, Venezuela, 2005.
- [9] H.L. Tsai, C.S. Tu, and Y.J. Su, 'Development of Generalized Photovoltaic Model Using Matlab/Simulink', *Proceedings of the World Congress on Engineering and Computer Science (WCECS)*, San Francisco, USA, pp. 1 – 6, October 22 - 24, 2008.
- [10] M. Belatel et H. Benalla, 'Etude par CAO d'une Machine Synchrone à Aimant Permanent pour la Production d'Energie Eolienne', *Revue des Energies Renouvelables*, Vol. 11, N°2, pp. 167 – 180, 2008.
- [11] B. Multon, O. Gergand et H. Ben Ahmed, 'Etat de l'Art dans les Aérogénérateurs Electriques', Extrait du Rapport de Synthèse, Ecrin, 'L'Electronique de Puissance, Vecteur d'Optimisation pour les Energies Renouvelables', Paris, France, 2002.
- [12] S. Mekhtoub, R. Ibtouen et S. Bacha, 'Analyse Dynamique des Générateurs Eoliens lors d'un Creux de Tension du Réseau', *Revue des Energies Renouvelables*, Vol. 12, N°2, pp. 225 – 235, 2009.
- [13] Site Internet: www.ulb.ac.be/infosciences/files/piles.pdf, 'Les Piles à Combustible'.
- [14] K. Mammar and A. Chaker, 'Fuzzy Logic-Based Control of Power of PEM Fuel Cell System For Residential Application', *Leonardo Journal of Sciences*, N°14, pp. 147 – 166, 2009.
- [15] F. Amrouche, B. Mahmah, M. Belhamel and H. Benmoussa, 'Modélisation d'une Pile à Combustible PEMFC Alimentée Directement en Hydrogène-Oxygène et Validation Expérimentale', *Revue des Energies Renouvelables*, Vol. 8, pp.109 – 120, 2005.
- [16] M. Boillot, 'Validation Expérimentale d'Outils de Modélisation d'une Pile à Combustible de Type PEM', Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Lorraine, France, 2005.
- [17] I. Sadli, 'Modélisation par Impédance d'une Pile à Combustible PEM pour Utilisation en Electronique de Puissance', Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Lorraine, France, 2006.

- [18] Site Internet: www.afh2.org/uploads/memento/pdf/fiche_3_2_1.pdf, '*Production d'Hydrogène par Electrolyse de l'Eau*'.
- [19] Rapport, '*Installation de Production d'Hydrogène à Partir d'Energie Renouvelable pour l'Alimentation d'une Pile à Combustible PEM et le Stockage de l'Hydrogène sous Forme d'Hydrure Métallique*' Document pour Système Didactiques, Editions Compagnie Européenne des Technologies de l'Hydrogène, CETH, 2010.