



Modélisation, Simulation et Gestion d'énergie d'un Système Hybride (Photovoltaïque/Eolien) avec Stockage d'énergie

Sofia. Lalouni, Djamila. Rekioua

Laboratoire de Technologie Industrielle et de l'information (LT2I)

Département d'Electrotechnique, Université de Béjaïa, (Algérie)

lalouni_sofia@yahoo.fr, dja_rekioua@yahoo.fr.

Résumé — Cet article présente un système de gestion d'énergie d'un système hybride de production d'énergie électrique, qui combine deux sources d'énergies renouvelables (photovoltaïque, éolienne), des batteries de stockage et une charge alternative. Le gestionnaire d'énergie a pour objectif de déterminer à chaque instant le mode de fonctionnement des deux sous systèmes, photovoltaïque et éolien en passant du mode de fonctionnement à puissance maximale au mode de régulation de puissance pour satisfaire la demande de la charge. Pour assurer le fonctionnement des deux générateurs photovoltaïque et éolien à leurs points de puissance maximale (PPM), deux contrôleurs par logique floue sont introduits. Ils résolvent le problème d'oscillations de la méthode perturbation et observation, en optimisant l'amplitude de la perturbation pour assurer une extraction rapide et sans oscillations. Les performances du gestionnaire d'énergie sont montrées aux moyens de simulations, les résultats montrent l'efficacité du gestionnaire d'énergie pour contrôler et coordonner le fonctionnement des sous-systèmes qui constituent le système hybride.

Mots clef — Système hybride, Générateur PV, Turbine éolienne, Gestion d'énergie, Batterie.

I. INTRODUCTION

La consommation mondiale d'énergie ne cesse de croître, posant des questions cruciales sur le problème du réchauffement de la planète dû aux gaz à effet de serre. Suite à cette prise de conscience, un développement économique respectueux de l'environnement s'avère absolument nécessaire. En vue de rendre l'approvisionnement en électricité plus écologique, l'exploitation des ressources renouvelables est nécessaire. Concernant l'Algérie, un pays très vaste d'un climat très diversifié, ayant deux grandes zones géographiques distinctes, peut devenir un bon concurrent dans cette course de recours aux énergies renouvelables.

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 vraiment attractif. Cependant, ces solutions exigent au préalable un dimensionnement laborieux

basé sur une connaissance approfondie du gisement en énergies renouvelables du site d'implantation à l'amant et une gestion rigoureuse de l'énergie électrique produite à l'aval [1]. On propose dans cet article, une stratégie de contrôle et de gestion d'un système hybride qui combine deux sources d'énergies renouvelables (éolienne, photovoltaïque) avec des batteries de stockage. Le superviseur détermine la puissance de réglage à partir de la puissance totale demandée (puissance de charge et puissance nécessaire pour charger les batteries) et de la puissance disponible fournie par les générateurs. Pour assurer le fonctionnement des générateurs photovoltaïque et éolien à leurs points de puissance maximale (PPM), des contrôleurs MPPT sont introduits. Plusieurs algorithmes (MPPT) ont été développés et largement adaptés pour déterminer le point de puissance maximum [2-4]. La Ref.[4] présente la méthode perturbation et observation (P&O) qui est largement utilisée à cause de sa simplicité d'implémentation, mais cette méthode présente un problème d'oscillation autour du point de puissance maximale. Cet article propose une méthode de contrôle intelligent pour la recherche du PPM. Cette méthode emploie un contrôleur de logique floue [5]. La conception optimale du système hybride constitue un de nos objectifs avec un transfert maximum d'énergie puis un contrôle et une gestion du système hybride pour une bonne surveillance du fonctionnement des sous-systèmes de production d'énergie renouvelable.

II. DESCRIPTION DU SYSTEME HYBRIDE

Le système hybride de production d'énergie présenté dans cet article est celui qui combine et exploite deux sources d'énergies renouvelables (photovoltaïque, éolienne). Cette structure est représentée sur la figure (1). IL comprend, un sous système photovoltaïque avec un convertisseur DC/DC de type parallèle qui permet de rattraper à chaque fois le point de puissance maximale. Une turbine éolienne qui assure la conversion de l'énergie du vent en électricité. L'alternateur utilisé est MSAP associée à un redresseur à IGBT. Les deux sous systèmes sont reliées à un bus continu. Le stockage est assuré par des batteries de type plomb acide. La charge à alimenter peut être continu ou alternative branchée à travers un onduleur.

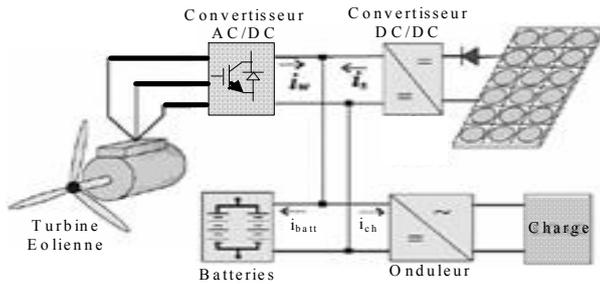


Fig.1 : Structure du système hybride (PV-éolien).

III. MODELISATION DU SYSTEME HYBRIDE

A. La Turbine éolienne

La turbine éolienne transforme l'énergie de la masse d'air en mouvement et délivre une puissance mécanique caractérisée par la vitesse de rotation et le couple mécanique. L'expression de la puissance mécanique capturée à partir du vent par la turbine éolienne est formulée comme suit [6]:

$$P_{eol} = \frac{1}{2} C_p(\lambda) \cdot \rho \cdot S \cdot v_v^3 \quad (1)$$

$C_p(\lambda)$: Le coefficient de puissance, ρ : la masse volumique de l'air, S : la surface balayée, v_v : la vitesse du vent. La turbine éolienne est caractérisée par sa courbe $C_p(\lambda)$; ou λ le rapport de vitesse en bout de pâles qui est donné par :

$$\lambda = \frac{\Omega_t R}{v_v} \quad (2)$$

Ω_t et R sont respectivement la vitesse mécanique de la turbine et le rayon de la turbine.

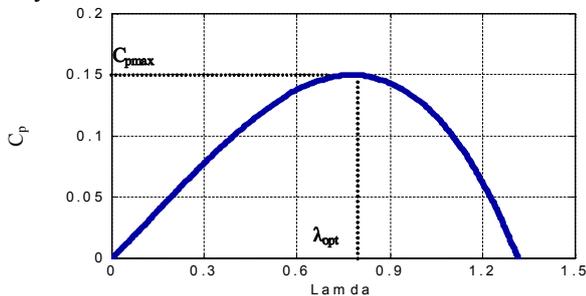


Fig.2 : Coefficient de puissance C_p en fonction de λ .

Le coefficient de puissance C_p varie suivant (λ) . La turbine éolienne utilisée pour cette étude est à axe vertical de type Savonius, $C_p(\lambda)$ est donné par l'équation (3) et la caractéristique est montrée sur la fig. 2. Cette caractéristique a une forme parabolique qui admet un maximum ($C_{pmax}=0.15$) pour ($\lambda_{opt}=0.78$) qui permet d'avoir une

puissance maximale. Pour chaque vitesse de vent, il faut que le système trouve la puissance maximale ce qui équivaut à la recherche de la vitesse de rotation optimale ω_{opt} .

$$C_p(\lambda) = -0.2121 \lambda^3 + 0.0856 \lambda^2 + 0.2539 \lambda \quad (3)$$

B. La machine synchrone à aimants permanents

Le modèle de La machine synchrone à aimants permanent à pôles lisses utilisé est décrit par les équations suivantes :

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & -\omega L_c \\ \omega L_c & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + L_c \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \omega \phi_f \end{bmatrix} \quad (4)$$

R : représente la résistance d'une phase statorique. L_c est l'inductance cyclique de phase, P : le nombre de paire de pôle, ω : la vitesse angulaire du rotor, ϕ_f : le flux magnétique produit par l'aimant permanent.

La puissance injectée par le sous système éolien dans le bus continu est donnée par l'équation.5 avec i_{eol} le courant modulé par le redresseur:

$$P_{eol} = V_{dc} \cdot I_{eol} \quad (5)$$

B. Le générateur photovoltaïque

De nombreux modèles mathématiques de générateurs photovoltaïques, ont été développés pour représenter leur comportement très fortement non linéaire qui résulte de celui des jonctions semi-conducteurs qui sont à la base de leur réalisation [5], [6], [7]. Dans notre travail, nous avons choisi le modèle suivant [5] :

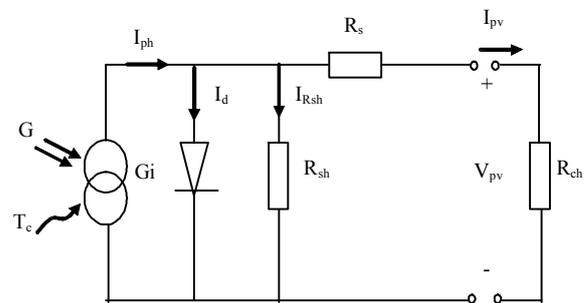


Fig. 3 : Modèle équivalent d'une cellule solaire.

L'expression du courant du générateur photovoltaïque est donnée par :

$$I_{pv} = I_{sc} \left\{ 1 - K_1 \left[\exp K_2 V_{pv}^m - 1 \right] \right\} \quad (6)$$



Les coefficients K_1 , K_2 et m sont donnés par: [5]

$$K_1 = 0.01175$$

$$K_2 = \frac{K_4}{V_{oc}^m} \quad (7)$$

$$K_3 = \ln \left[\frac{I_{sc}(1 + K_1) - I_{mpp}}{K_1 I_{sc}} \right] \quad (8)$$

$$K_4 = \ln \left[\frac{1 + K_1}{K_1} \right] \quad (9)$$

$$m = \frac{\ln \left[\frac{K_3}{K_4} \right]}{\ln \left[\frac{V_{mpp}}{V_{oc}} \right]} \quad (10)$$

L'équation (6) est applicable que pour un niveau d'insolation G et de température particuliers ($G=1000 \text{ W/m}^2$, $T_c=25^\circ\text{C}$), relatif aux conditions standard de fonctionnement.

La puissance injectée par le sous système photovoltaïque dans le bus continu est donnée par :

$$P_s = V_{dc} \cdot I_s \quad (11)$$

Les panneaux photovoltaïques utilisés sont de type SIEMENS SM 110-24, leurs caractéristiques techniques sont données dans [5].

Les caractéristiques puissance tension $P_{pv}(V_{pv})$ et $I_{pv}(V_{pv})$ du panneau photovoltaïque, ont été réalisées pour deux niveaux d'éclairement et de température, Figures(4). Les caractéristiques expérimentales obtenues sont ainsi comparées aux caractéristiques de simulation pour les mêmes conditions de fonctionnement ($G=530 \text{ W/m}^2$ et $T_c=28.9^\circ\text{C}$, $G=628 \text{ W/m}^2$ et $T_c=33^\circ\text{C}$, $G=753 \text{ W/m}^2$ et $T_c=35.7^\circ\text{C}$).

On peut voir des caractéristiques qu'il y a un point unique ou la puissance photovoltaïque est maximale, ce point est appelé point de puissance maximum, la puissance correspondante à ce point est notée P_{mpp} . En raison du coût élevé des cellules solaires, on doit s'assurer que les panneaux photovoltaïques fonctionnent toujours au point de puissance maximal (MPP).

Par conséquent un dispositif MPPT doit être incorporé pour forcer le système à fonctionner en ce point. Plusieurs algorithmes (MPPT) pour l'extraction du maximum de puissance ont été développés dans [5], [6]. Ces dernières années, les contrôleurs par logique floue (FLC) sont largement utilisés pour la recherche du MPP [4 ;5 ;8]. Ces derniers sont

indépendants du modèle du processus, ils se caractérisent par leur aptitude à appréhender les problèmes de non linéarité et ils présentent des performances robustes par rapport aux variations des conditions atmosphériques et de la charge.

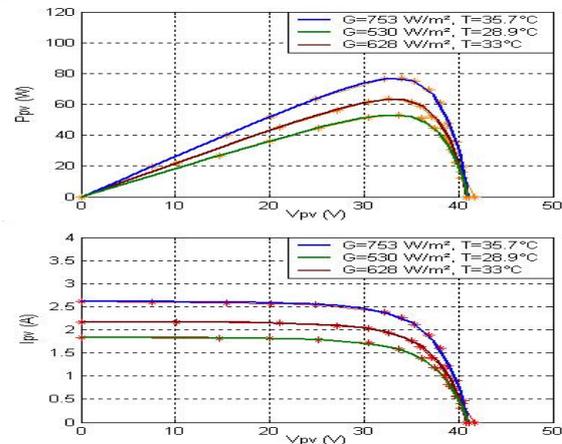


Fig. 4 : Courbes expérimental et de simulation $P_{pv}(V_{pv})$ et $I_{pv}(V_{pv})$

IV. STRUCTURE DU CONTROLEUR FLOU

Pour assurer le fonctionnement des deux générateurs photovoltaïque et éolien à leurs points de puissance maximale (PPM), des contrôleurs MPPT flou sont introduit. Le contrôleur flou est adopté pour assurer une extraction continue du point de puissance maximale des deux sous systèmes éolien et photovoltaïque. Ces entrées sont les variations de la puissance photovoltaïque (ΔP_{pv}) et de la tension photovoltaïque (ΔV_{pv}) du générateur photovoltaïque et les variations de la puissance éolienne (ΔP_w) et de la vitesse de rotation ($\Delta \Omega$) de l'éolienne. La structure du contrôleur par logique floue appliqué au système photovoltaïque et éolien est montrée sur la figure (5).

La variation de ΔP_{pv} résultant de la variation de la tension photovoltaïque est soit dans le sens positif soit dans le sens négatif. La valeur de (ΔP_{pv}) peut aussi être petite où au contraire grande. A partir de ce jugement la valeur de la consigne de tension photovoltaïque ($V_{pv,ref}$) est augmentée ou diminuée de façon petite ou respectivement grande dans le sens qui permet d'augmenter la puissance. La table des règles de décision floue est donnée dans [5]. Les figures (6-7) présentent la puissance du générateur photovoltaïque (P_{pv}) pour les deux méthodes de control MPPT (perturbation et observation (P&O) et le contrôleur par logique floue (FLC)). On peut voir que le (FLC) présente une réponse plus rapide, la méthode (P&O) présente ainsi des oscillations autour du point de fonctionnement en régime permanent. Le contrôleur flou permet une réduction non seulement du temps de convergence pour extraire le MPP, mais aussi des fluctuations de puissance en régime établi.

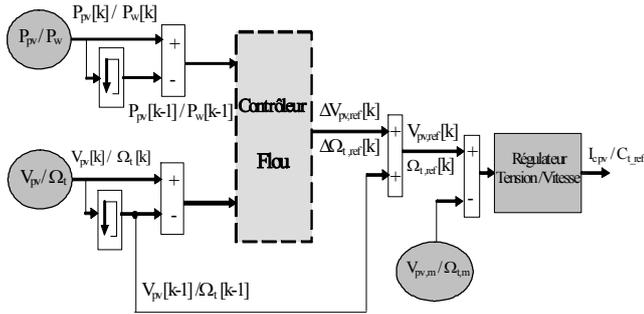


Figure 5: Structure du contrôleur.

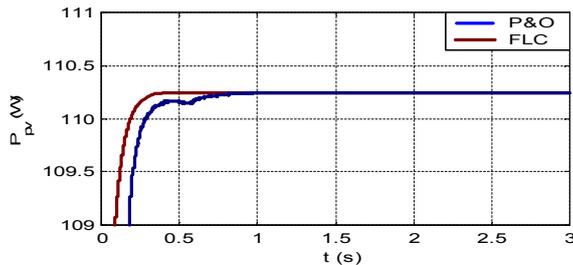


Figure 6.a: Allure de P_{pv} en régime transitoire.

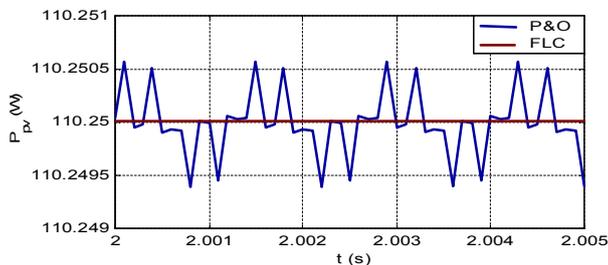


Figure 6.b: Allure de P_{pv} en régime permanent.

V. MODES DE FONCTIONNEMENT DU GESTIONNAIRE D'ENERGIE

Pour la conception du superviseur, il a été décidé que le sous-système photovoltaïque serait le générateur principal, alors que le sous-système éolien constituerait le générateur complémentaire. Ce choix est motivé par un dimensionnement déjà effectué en se basant sur les moyennes mensuelles annuelles de notre site. Cependant, ce superviseur peut s'étendre pour des applications considérant le sous-système éolien en tant que générateur principal et le sous-système photovoltaïque jouant le rôle secondaire.

Trois modes de fonctionnement sont possibles pour déterminer la capacité du système hybride à satisfaire la puissance totale demandée (la puissance de charge plus la puissance nécessaire pour charger les batteries) et ceux en fonction des conditions atmosphériques (ensoleillement, température et vitesse du vent). Ce superviseur est essentiel pour contrôler efficacement le fonctionnement des sous-systèmes de production d'énergie (photovoltaïque, éolien).

Une description des modes de fonctionnement est donnée sur la figure (7)

A. Mode (1)

Ce mode correspond aux périodes où la puissance photovoltaïque est suffisante pour satisfaire la demande de la charge. Le générateur photovoltaïque doit fournir la puissance totale pendant que le sous-système éolien est inactif et les batteries sont en charge. Cette situation est maintenue tant que la puissance demandée par la charge ne dépasse pas la puissance photovoltaïque maximale, au-delà de cette limite le superviseur bascule au *mode(2)* pour activer le générateur éolien.

B. Mode (2)

Le superviseur garde le sous système photovoltaïque pour générer le maximum de puissance (fonctionnement au point de puissance maximale ($MPPT_{pv}=1$)) et le sous système éolien est réglé pour produire une puissance de référence. Cette puissance de référence correspond à la puissance nécessaire pour compléter la puissance produite par le générateur photovoltaïque en même temps satisfait la puissance totale de la charge. Il est à noter qu'en *mode (1) et (2)* les batteries ne sont pas sollicitées pour produire de la puissance à la charge, au contraire elles deviennent une partie de la puissance demandée. Une fois la limite de production maximale est atteinte ou excédée, le système entre en mode de fonctionnement 3 (*mode (3)*).

C. Mode (3)

Dans ce mode de fonctionnement les deux sources d'énergie, fournissent le maximum de puissance (fonctionnement en MPPT). En plus, pour satisfaire entièrement la demande de la charge, les batteries se chargent ou se déchargent. Lors de la décharge, le *mode (3)* est maintenu tant que l'énergie disponible aux niveaux des batteries est suffisante pour compléter la demande de la charge, après ça, la charge doit être déconnectée pour laisser les batteries se charger.

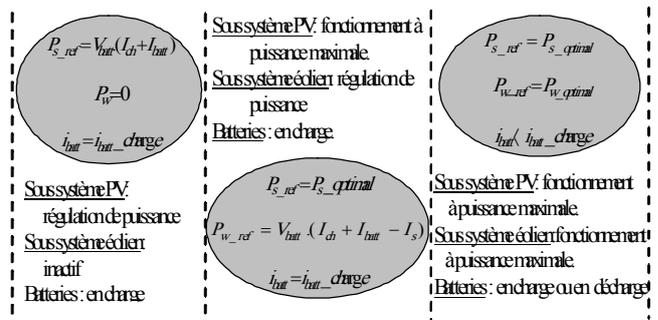


Fig.7: Description des modes de fonctionnement du gestionnaire d'énergie.



VI. SIMULATIONS ET RESULTATS

La gestion d'énergie est nécessaire pour contrôler efficacement le fonctionnement des sous-systèmes de production d'énergie (photovoltaïque, éolien). Le système hybride (photovoltaïque, éolien) de la figure (1) est simulé pour des variations des conditions climatique (ensoleillement, température et vitesse du vent) pendant une journée d'hiver et d'été dans la région de Bejaïa (Latitude: 36.45N, Longitude: 005.04E, Altitude: 2m). Le sous-système photovoltaïque est constitué de (09) panneaux photovoltaïques de 110W chacun, d'un hacheur parallèle (Boost) et de batteries de stockage (12V) de type plomb acide de capacité 920Ah. La tension de la batterie U_{batt} est réglée à une valeur de consigne de 120V. Cependant, la chaîne de conversion à énergie éolienne dispose d'une éolienne de 600W d'une génératrice synchrone à aimants permanents, d'un redresseur MLI relié au banc de batteries et d'une charge qui représente une maison de consommation journalière de 3920 Wh/j. Le profil de charge est représenté sur la figure (8). Nous avons simulé le système hybride en introduisant les valeurs de l'ensoleillement de la température et de la vitesse du vent de deux journées, d'été et d'hiver. Nous avons visualisé les puissances de références, de chaque sous système ainsi que les modes de fonctionnement du superviseur.

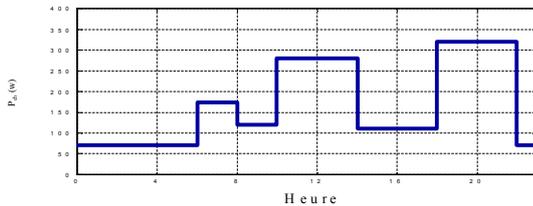


Fig.8 : Puissance de la charge (P_{ch})

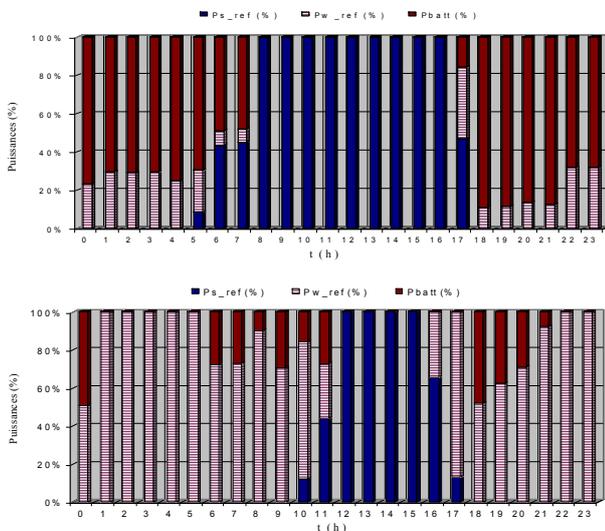


Fig.9 : Bilan des puissances de références, photovoltaïque, éolienne et de batterie du système hybride pour une journée respectivement d'été et d'hiver.

La figure (9) représente les puissances mises en jeu dans notre système hybride durant une journée (été puis hiver). On notera que durant la journée d'été, les batteries sont très sollicitées pour fournir le supplément d'énergie demandée par la charge, alors que nous avons une réduction considérable de la période d'intervention de la batterie en hiver. Dans les figures (10.f) sont représentées les allures de la puissance totale demandée et la somme des puissances de références produites (photovoltaïque+éolienne). On peut constater que la puissance demandée correspond à la puissance produite à l'exception des périodes où cette dernière est insuffisante. La batterie se décharge pour satisfaire la demande de la charge (fig.10. g). Le superviseur détermine le mode de fonctionnement du système hybride en analysant la puissance totale demandée et les puissances produites photovoltaïque et éolienne (fig.10.h). La tension du bus continu est bien réglée à sa valeur de consigne de 120V (fig.10.i).

VII. CONCLUSION

Pour une gestion rigoureuse de l'énergie une stratégie de contrôle et de supervision du système hybride (photovoltaïque/éolien) a été établie. Le gestionnaire détermine les puissances de références à partir de la puissance totale demandée (puissance de charge et puissance nécessaire pour charger les batteries) et de la puissance disponible fournie par le générateur photovoltaïque et la turbine éolienne. Le gestionnaire développé fournit un cadre souple pour contrôler et coordonner le fonctionnement des sous-systèmes qui constituent le système hybride pour déterminer ainsi le mode de fonctionnement adéquat.

REFERENCES

- [1]-A. El Khadimi, L. Bchir et A. Zeroual, « Dimensionnement et optimisation technico-économique d'un système d'énergie hybride photovoltaïque - éolien avec système de stockage », Revue des Energies Renouvelables, Vol. 7, 73-83, 2004.
- [2]- Patcharaprakiti N., Premrudeepreechacharn S., Sriuthaisirivong Y. (2005). « Maximum power point tracking using adaptive fuzzy logic control for grid connected photovoltaic system ». Renewable Energy 30(11), pp.1771-1788.
- [3]- L. J.L. Santos, F. Antunes, A. Chehab, C. Cruz, «A maximum power point tracker for pv systems using a high performance boost converter», Solar Energy, Vol. 80, N°7, 772-778, 2006.
- [4]-V. Salas, E. Olias, A. Barrado, A. Lazaro, «Review of the maximum power point tracking algorithms for stand-alone photovoltaic systems», Solar Energy Materials & Solar Cells Vol.90, N°11, 1555-1578, 2006.
- [5]-S. Lalouni, D. Rekioua, T.Rekioua, E. Matagne «Fuzzy logic control of stand-alone photovoltaic system with battery storage», Journal of Power Source, Vol. 193, N° 2, 899-907, 2009.
- [6]-F. Valenciaga, P.F. Puleston, «Supervisor control for a stand-alone hybrid generation system using wind and photovoltaic energy», IEEE transactions on energy conversion, Vol. 20, N° 2, 389-405, 2005
- [7]-O. Gergaud, B. Multon, H. Ben Ahmed, «Analyse and experimental validation of various photovoltaic system models», 7^{ème} congrée international ELECTRIMACS, Montréal, Canada, 1-6, 2002.
- [8]-N. Ammasai Gounden, Sabitha Ann Peter, Himaja Nallandula and S. Krithiga, «Fuzzy logic controller with MPPT using line-commutated inverter for three-phase grid connected photo-voltaic systems», Renewable Energy, Vol. 34, N°3, 909-915, 2009



Journée d'été

Journée d'hiver

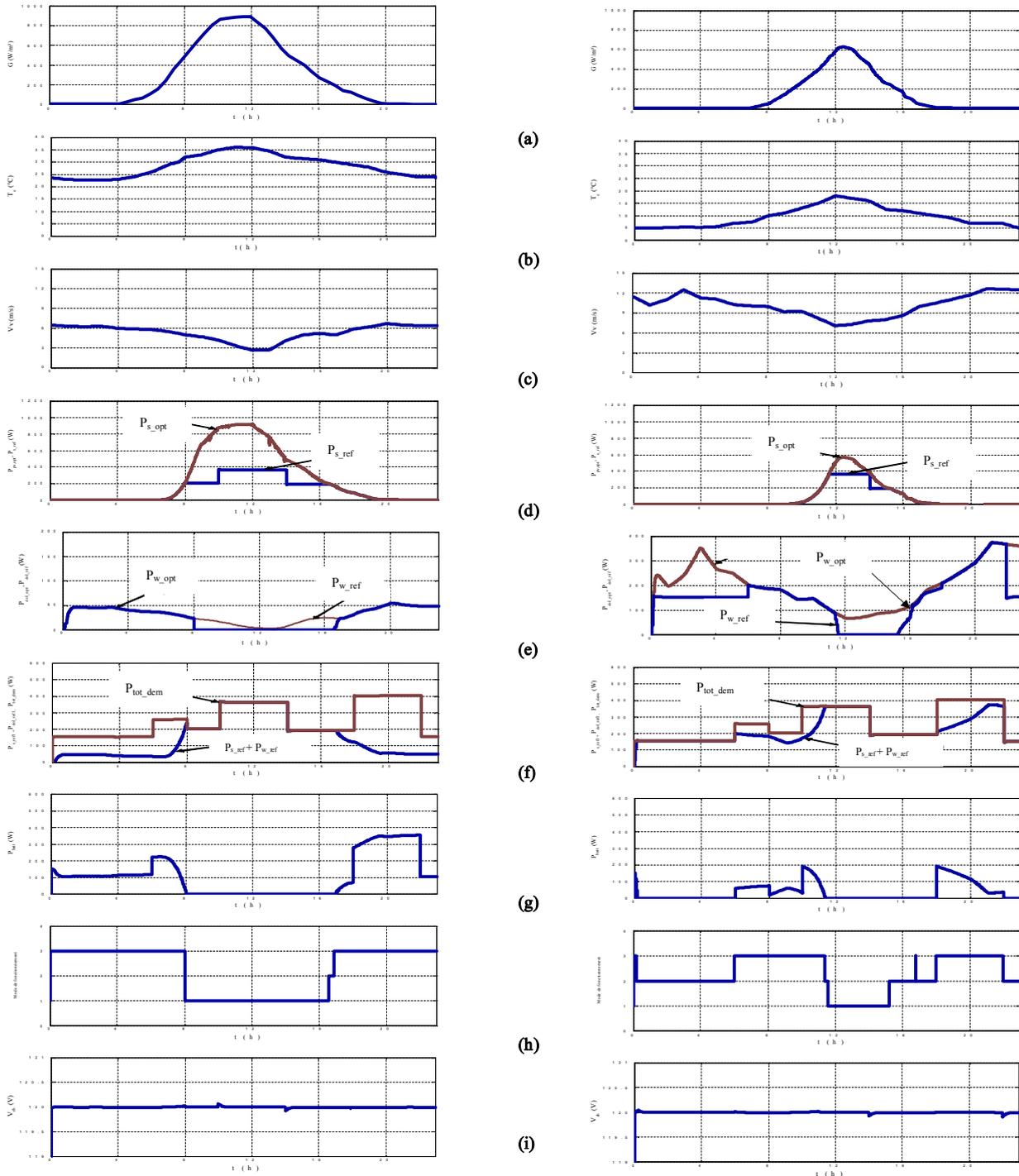


Fig.10: (a) :Irradiation (G) pendant une journée, (b) :Température (T_c), (c) :Profil de la vitesse du vent (V_v), (d) :Puissance photovoltaïque produite, maximale (P_{pv_max}) et de référence (P_{ref_s}), (e) : Puissance éolienne produite, maximale (P_{w_max}) et de référence (P_{ref_w}), (f) : Puissance total demandée et puissance produite ($P_{ref_s}+P_{ref_w}$), Puissance délivrée par les batteries, (g) : Puissance délivrée par les batteries, (h) : Mode de fonctionnement, (i) : Allure de la tension du bus continu.