

## Analyse de l'intégration d'un système de production photovoltaïque dans un réseau autonome

Nacer Mahfoudi\*

Département d'électrotechnique, Faculté des Sciences de l'Ingénierat, Université Badji Mokhtar,  
BP 12, Annaba 23000, Algérie

Révisé le 11/11/2011

Accepté le 24/07/2012

### ملخص

هذا العمل يخص النظام الإنتاجي للطاقة الكهربائية اللامركزية بدون نظام تخزين و موجه للاستعمالات التي تتطلب الطاقة الضعيفة ، معزولة عن الشبكة ، مغذية عن طريق جهاز يولد الطاقة الفوتوفولطائية . إن النتائج الرئيسية لهذا النظام تتعلق بالخصائص الهامة للموقع ( الإضاءة ، الحرارة ، العوائق الجغرافية ، الغبار... الخ) . و بمرود الخلايا، فضلاً عن خصائص أخرى من المعدات المستعملة (جهاز منظم، موج) . وفي هذا السياق من أجل تخفيض الكلفة و تسبير ملائم للطاقة عن طريق التصميم الأمثل للنظام و التي على ضوءها يتم تسجيل هذه الأعمال .

الكلمات المفتاحية: الإنتاج اللامركزي - سلسلة التبدل الكهروضوئية ( فوتوفولطائيك ) - موج ذو مستويات متعددة مقطوع - مخفض و رافع.

### Résumé

Ce travail concerne le système de production d'électricité décentralisée sans système de stockage pour des applications stationnaires de petites tailles ; isolées du réseau ; alimentées par un générateur photovoltaïque. Ces performances dépendent des caractéristiques du site (ensoleillement, température ambiante, obstacles géographiques, empoussièrement,.. etc.), du rendement des modules mais aussi des caractéristiques des autres équipements utilisés (régulateur, onduleur, etc.).

Ainsi, ce présent travail peut contribuer à la diminution du coût du générateur photovoltaïque et à la gestion adéquate de l'énergie par un dimensionnement optimal du système.

**Mots Clés :** Production décentralisée - Chaîne de conversion photovoltaïque - Onduleur multi niveaux NPC - Hacheur dévolteur survolteur.

### Abstract

This work concerns the system of decentralized power generation without storage system for stationary applications of small size, isolated network powered by a photovoltaic generator. This performance depends on the characteristics of the site (temperatures, sunlight, geographic barriers, dust,... etc.), the performance of the modules but also other characteristics of equipment used (controller, inverter,... etc.). Thus, this work can help reduce the cost of photovoltaic generator and adequate management of energy by optimal sizing of the system.

**Keywords:** Decentralized production - Photovoltaic conversion system - Multi-levels inverter NPC- Chopper buck booster.

\*Auteur correspondant : mahfoudi.nacer@yahoo.fr

### 1. INTRODUCTION

D'un point de vue économique, les systèmes de production décentralisés ne sont pas encore concurrentiels [1]. Le coût élevé du générateur photovoltaïque nous impose une utilisation optimale de ce dernier pour aboutir à un fonctionnement économique et rentable. Pour cela, nous avons choisi un système de conversion d'énergie photovoltaïque, à la fois simple, précis et suffisamment rapide sans système de stockage destiné pour des applications stationnaires de petites tailles. Les différents concepts de la technologie des cellules solaires nous ramènent au développement du modèle théorique à une diode, les caractéristiques principales sous différents éclairagements et températures ont été développés par simulation dans l'environnement Matlab. Ces derniers influent fortement sur le rendement de conversion d'énergie. Ainsi, nous avons développé l'étude de la chaîne de conversion proposée qui y est constituée par, un générateur photovoltaïque, un étage d'adaptation formé par un hacheur (dévolteur-survolteur) qui joue le rôle d'interface entre la source et la charge en assurant à travers une action de contrôle le transfert du maximum de puissance. Nous avons introduit un onduleur triphasé type Neutral-Point-Clamped (NPC) à trois niveaux sa commande basée sur la modulation à largeur d'impulsions (MLI) dont le but d'avoir une tension de sortie la plus proche de la sinusoïde que celle issue de l'onduleur classique. Enfin, nous avons présenté les principaux résultats de simulation, et les perspectives qui en résultent.

### 2. MODELISATION DU SYSTEME

La chaîne de conversion proposée est constituée par un générateur photovoltaïque, un hacheur (dévolteur survolteur), un onduleur triphasé type NPC à trois niveaux à commande MLI et une charge RL variable. La figure 1 schématise le synoptique d'un tel système.

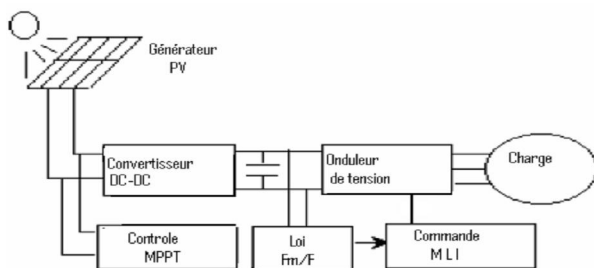


Figure 1. Chaîne élémentaire de conversion photovoltaïque

La démarche générale pour le dimensionnement et la gestion de transfert d'énergie sur la base des prévisions réelles de la consommation et les données météorologiques du site de mesure est illustrée sur la figure 2.

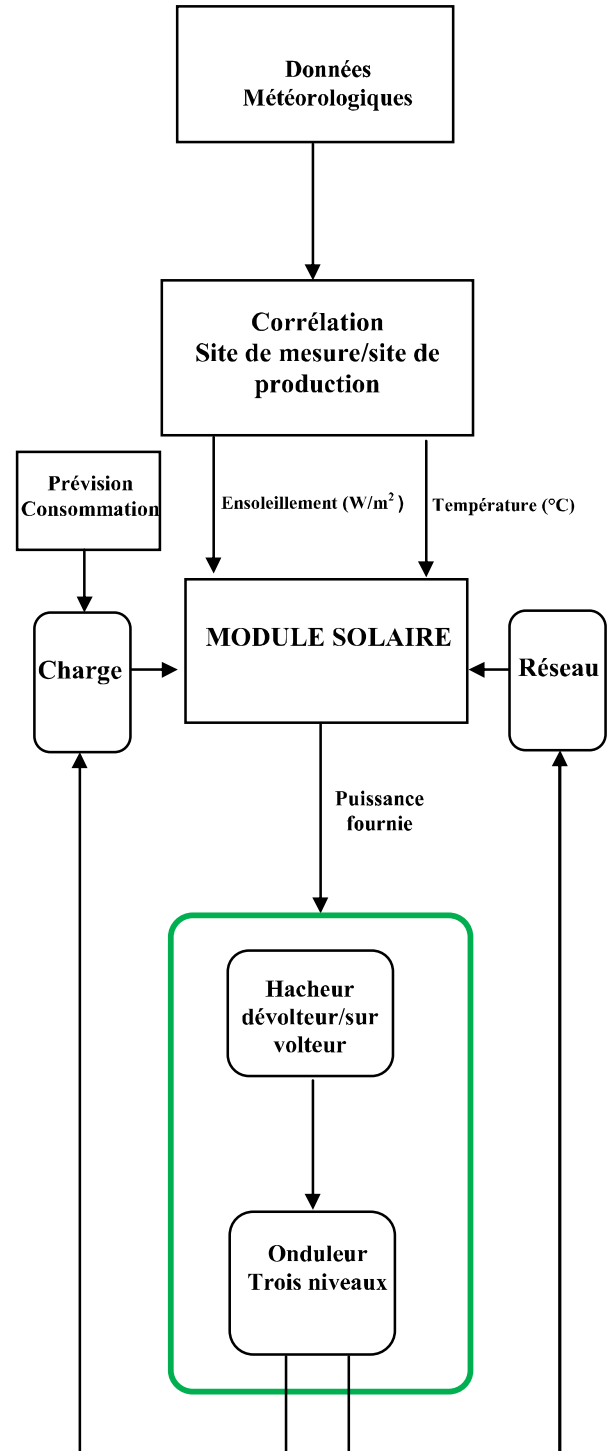


Figure 2. Schéma de transfert d'énergie

### 2.1 Modèle du générateur solaire

La cellule photovoltaïque permet la conversion directe de l'énergie lumineuse en énergie électrique. Elle est souvent présentée comme un générateur de courant électrique dont le comportement est équivalent à une source de courant shuntée par une diode [1].

Pour tenir compte des phénomènes physiques au niveau de la cellule, le modèle est complété par deux résistances série  $r_s$  et shunt  $r_p$  comme le montre le schéma électrique équivalent de la figure 3.

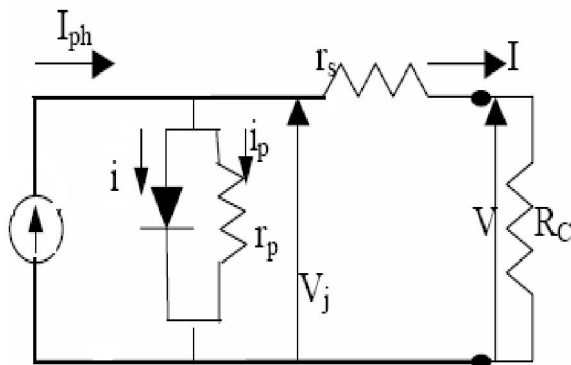


Figure 3. Schéma équivalent d'une cellule.

Le courant  $I$  fourni par la cellule figure 3. est donné par Kasemsan [2] et Muselli [3].

$$I = I_{ph} - i - i_p = I_{ph} - I_s \left[ e^{\frac{qV_j}{KT}} - 1 \right] - \frac{V_j}{r_p} \quad (1)$$

En remplaçant  $V_j$  par  $V_j = V + r_s \cdot I$  nous obtenons.

$$I = I_{ph} - I_s \left[ e^{\frac{q(V+r_s \cdot I)}{KT}} - 1 \right] - \frac{V + r_s \cdot I}{r_p} \quad (2)$$

$I_{ph}$  : Photo courant ;  $K$  : constante de Boltzmann ;  $T$  : température de la cellule ;  $V$  : tension aux bornes de la cellule ;  $q$  : charge de l'électron ;  $i_p$  : courant dérivé par la résistance shunt ;  $i_s$  : courant de saturation

$r_s$  : résistance série due à la contribution des résistances de base et du front de la jonction et des contacts face avant et arrière

$r_p$  : résistance shunt est une conséquence de l'état de surface le long de la périphérie de la cellule.

### 2.2 Modèle du hacheur (dévolteur survolteur)

La figure 4 correspondant à un convertisseur DC-DC « dévolteur –survolteur » qui est utilisé comme adaptateur source –charge, lorsque la puissance de la charge à alimenter est supérieure ou inférieure à celle délivrée par le générateur PV [4]. L'adaptation entre la source et la charge est réalisée par la variation du rapport cyclique  $\alpha$ .

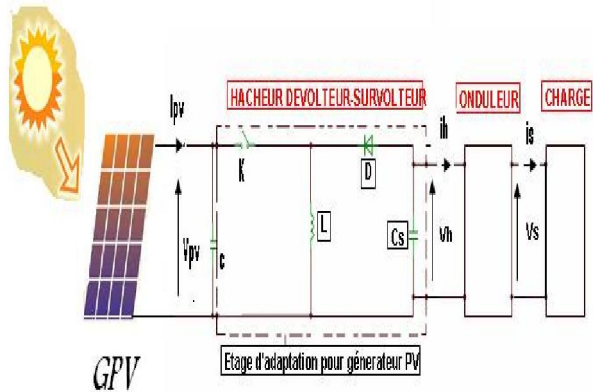


Figure 4. Système de conversion photovoltaïque autonome.

Les relations électriques entre les grandeurs d'entrée du convertisseur (hacheur) (correspondant à  $I_{PV}$  et  $V_{PV}$  du générateur) et de sortie du hacheur (respectivement  $I_H$  et  $V_H$ ) ne dépendent que du rapport cyclique  $\alpha$ .

La tension de sortie du hacheur en fonction de la tension d'entrée et du rapport cyclique est exprimée par l'expression suivante.

$$V_H = \frac{\alpha}{1 - \alpha} V_{PV} \quad (3)$$

Si la tension aux bornes de la charge est supérieure à celle du générateur  $\Rightarrow \alpha > 0.5$ .

Si la tension aux bornes de la charge est inférieure à celle du générateur  $\Rightarrow \alpha < 0.5$ .

La tension de sortie est minimale lorsque  $\alpha = 0$ .

Si on tient compte de la résistance  $R_B$  de la bobine on trouve

$$V_S = \frac{V_{PV} \alpha}{(1 - \alpha) \left[ 1 + \frac{R_B}{R(1 - \alpha)^2} \right]} \quad (4)$$

### 2.3 Modèle de l'onduleur

La structure de l'onduleur de tension en pont triphasé de type NPC à 3 niveaux est représentée par la figure 5 [5,6]. Elle est composée de trois demi ponts monophasés. A partir de la source principale de tension continue E, et à l'aide d'un diviseur de tension capacitif formé par les condensateurs  $C_1$  et  $C_2$  de même capacité, on obtient deux sources secondaires de tension continue délivrant chacune un potentiel à demi tension  $E/2$ . Cette structure crée alors un point neutre O entre les condensateurs  $C_1$  et  $C_2$ . Chaque demi-pont est composé de deux étages d'interrupteurs. Chaque étage comporte deux transistors IGBT en série avec un point commun relié par une diode au point neutre O. Des diodes antiparallèles sur les transistors assurent la réversibilité des courants de la charge.

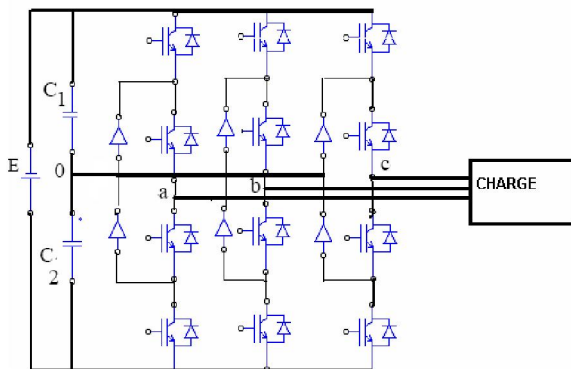


Figure 5. Structure de l'onduleur NPC

Les signaux de commande des interrupteurs de l'onduleur NPC sont obtenus à partir des intersections des trois signaux de référence sinusoïdaux déphasés entre eux de  $120^\circ$ , de fréquence  $f_m$  et d'amplitude,  $A_m$  avec un signal triangulaire d'amplitude  $A_p$  et de fréquence,  $f_p$  appelée 'porteuse' très supérieure à  $f_m$  (Fig. 6). On définit par conséquent l'indice de modulation  $M = \frac{f_p}{f_m}$  et l'indice de réglage de tension  $r = \frac{V_m}{V_p}$  (5)

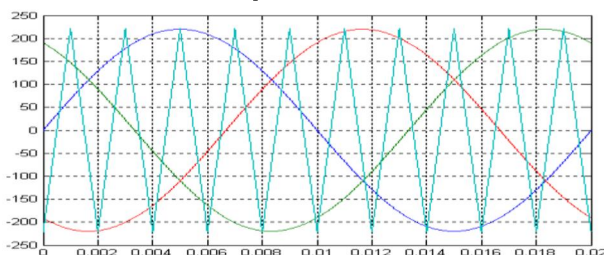


Figure 6. Principe de la modulation sinusoïdale classique

### 3. PROFIL DE CONSOMMATION

Dans l'étude du fonctionnement d'un système électrique, il est plus pratique de présenter les utilisateurs par groupe ; il est alors intéressant de connaître leurs lois d'évolution de la puissance totale demandée au cours du temps. Le profil de consommation a été relevé par les agents Sonelgaz en installant l'appareil de mesure ASM8. Le consommateur étudié est une administration présentant toutes les commodités et dont l'évolution de la charge est représentée sur la figure 7.



Figure 7. Profil de consommation pour une charge triphasée

Ce profil de consommation a été relevé entre la période du 29 janvier jusqu'au 31 janvier avec une période moyenne de 10 minutes. Ce consommateur a besoin de (135) kW/h par jour selon le tableau de relevé (Tab.1).

Tableau 1. Relevé des valeurs maximales des courants des phases

Date	I1	I2	I3	Ne
Max I1	4.7	5.1	0.8	4.1 %In
Max I2	2.8	8.1	0.0	6.9 %In
Max I3	4.6	5.0	0.8	4.0 %In
Max Ne	2.8	8.1	0.0	6.9 %In

Le schéma synoptique d'une charge à caractère résistive et inductive étudié dans notre travail est illustré dans la figure 8.

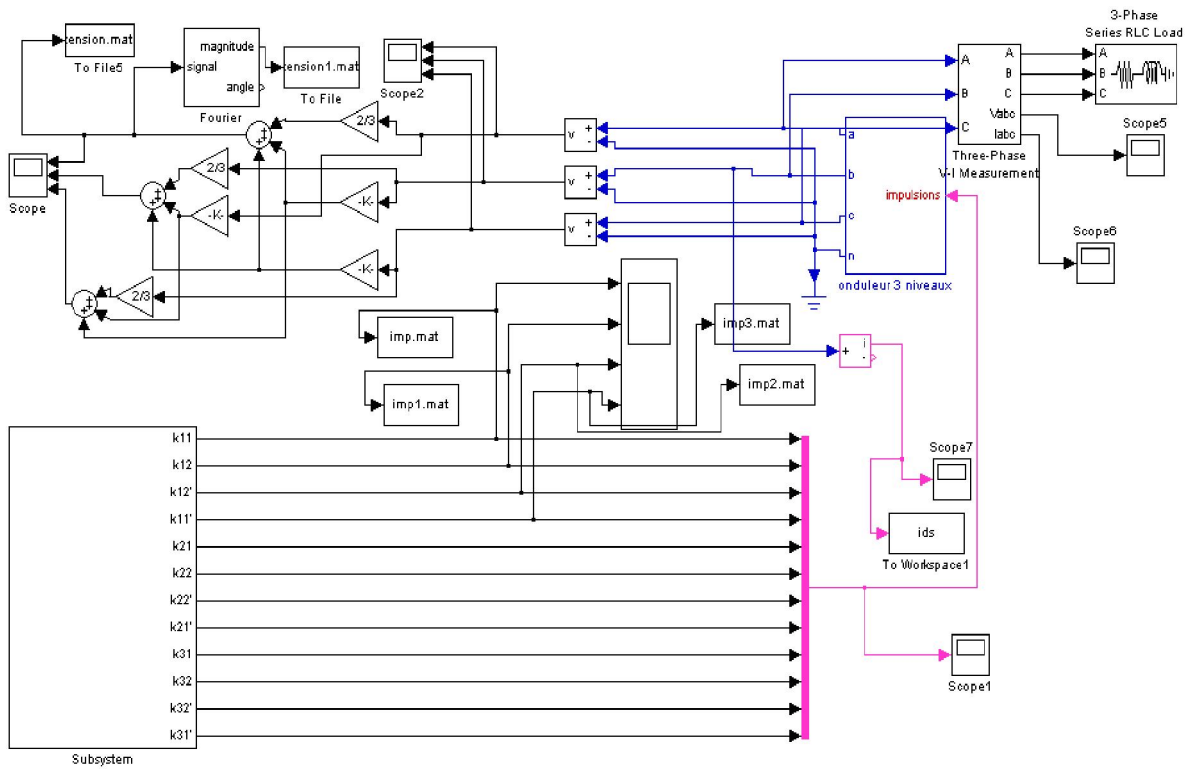


Figure 8. Schéma synoptique du système de conversion d'énergie avec charge triphasée

### 3.1 Données météorologique du site de mesure

Les données solaires nécessaires pour l'établissement d'un choix du système sont l'ensoleillement dans le plan des panneaux et la température de jonction des cellules.

La figure 9 représente l'insolation réelle pour la région de Souk Ahras. Elle peut atteindre jusqu'à (14) heures d'ensoleillement pour les mois de mai, juin et juillet.

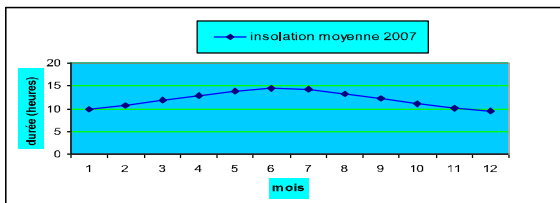


Figure 9. Insolation moyenne du site

La température des panneaux ;  $T_j$  est évaluée à partir des données d'ensoleillement et de la température ambiante par la formule donnée par kasemsan [2].

$$T_j = T_a + E_s \cdot \frac{N_{oct} - 20}{800} \quad (6)$$

$N_{OCT}$  : est le « nominal operating cell temperature » ; condition de température nominale de fonctionnement, c'est un

paramètre fourni par le constructeur des panneaux solaires. Ce modèle ne prend pas en compte les effets d'influence du vent sur les échanges thermiques (Fig. 10).

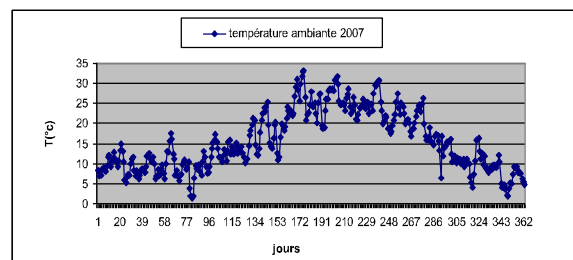


Figure 10. Température ambiante du site

La figure 11 nous montre la température de jonction des cellules à partir de l'ensoleillement et de la température de l'air ambiant. C'est une caractéristique calculée à partir de l'équation (6) et suite aux données météorologiques.

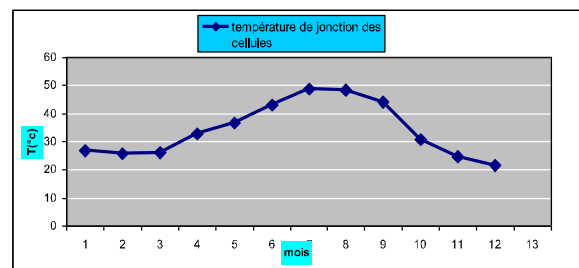


Figure 11. Température de jonction des cellules

### 3.2 Discussion

La caractéristique I (V) (Fig. 12) est tracée à partir de l'équation (7).

$$I = I_{ph} - I_s \left[ \exp\left(\frac{qV_J}{KT}\right) - 1 \right] - \frac{V_J}{r_p} \quad (7)$$

C'est une équation implicite dont la résolution  $I = f(V)$  fait appel à des méthodes d'approximations successives [4]. On définit deux points important sur cette courbe.

Le courant de court-circuit, lorsque  $V = 0$ , vaut  $I = I_{ph}$

La tension de circuit ouvert, lorsque  $I = 0$ , s'écrit

$$V_{co} = \frac{KT}{q \cdot \log\left[\frac{I_{ph}}{I_s} + 1\right]} \quad (8)$$

Lorsque on varie la température (Fig. 13) de 25°C jusqu'à 36°C à ensoleillement constant  $E_s = 850 \text{ w/m}^2$  on remarque que la température est inversement proportionnelle à la tension en circuit ouvert, lorsque la température augmente, la tension en circuit ouvert  $V_{co}$  diminue [4,6].

La figure 14 représente la variation de l'éclairement de la cellule de  $150 \text{ w/m}^2$  jusqu'à  $850 \text{ w/m}^2$  à température constante 25°C. On constate que la valeur du courant de court-circuit I(A) varie d'une manière simultanée avec l'intensité du rayonnement  $I_{ph}$ , par contre la tension en circuit ouvert  $V_{co}$ , reste quasiment constante même à faible éclairement (Fig. 15).

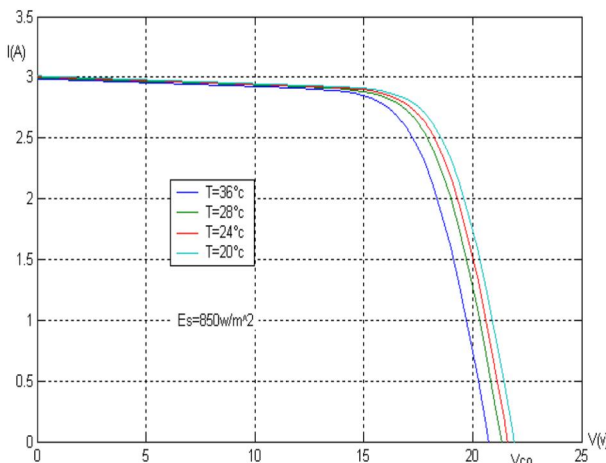


Figure 12. Influence de la température sur la caractéristique I (V).

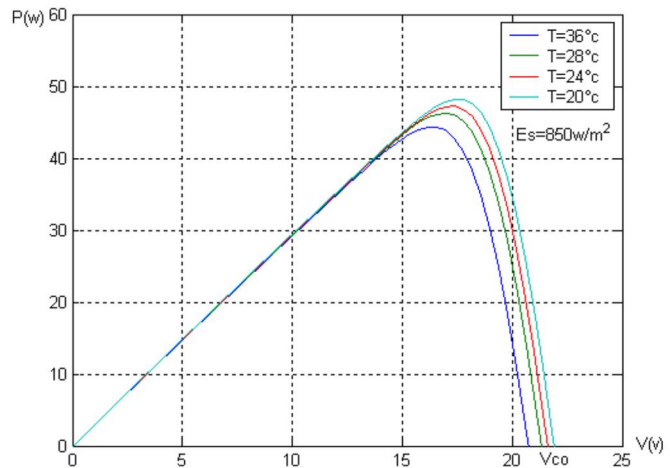


Figure 13. Influence de la température sur la caractéristique P (V)

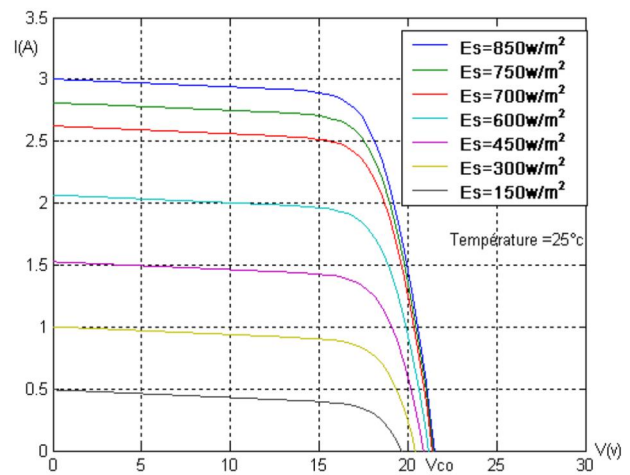


Figure 14. Caractéristique I (V) d'un GPV pour différents éclairements

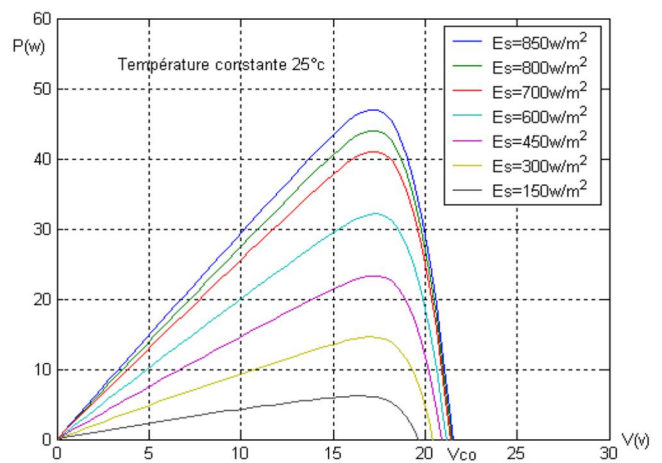


Figure 15. Courbe de puissance d'un GPV Pour différents éclairements.

Sur la figure 16 est illustré le gain du hacheur, on distingue que le convertisseur DC-DC est de type (dévolteur –survolteur).

Lorsque le rapport cyclique est inférieur à 0.5 la tension de sortie du hacheur est toujours inférieure à celle d'entrée, dans cette zone de travail notre hacheur est dévolteur. Au delà de 0.5, la tension de sortie est toujours supérieure à celle d'entrée, dans cette zone de travail, notre hacheur est survolteur [7].

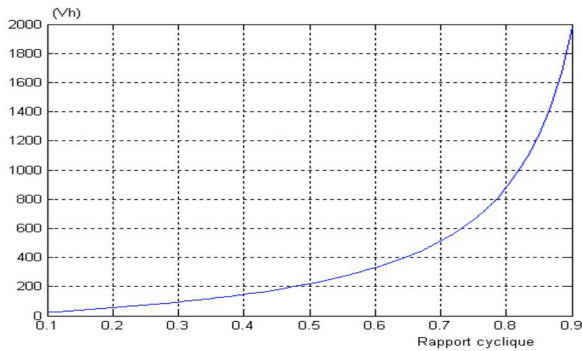


Figure 16. Rendement du hacheur

Sur la figure 17 est illustrée l'influence de la résistance de la bobine sur la tension de sortie du hacheur, on constate que l'effet de la résistance est de diminuer la valeur de la tension de sortie, cette diminution devient importante lorsque le rapport cyclique se rapproche de 1. Suivant les résultats obtenus, les projets de décentralisations de l'énergie par des GPV sans stockage d'énergie devient viable et peut intéresser certains consommateurs du même profil que la charge étudiée (Fig. 18, 19, 20), tel que les centres d'affaires, les écoles, les relais.... etc.

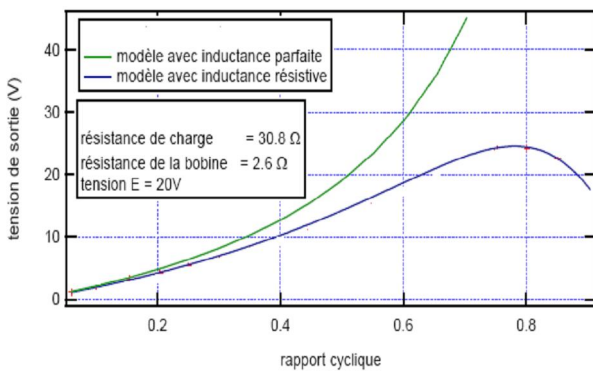


Figure 17. Influence de la résistance de la bobine sur la tension de sortie du hacheur

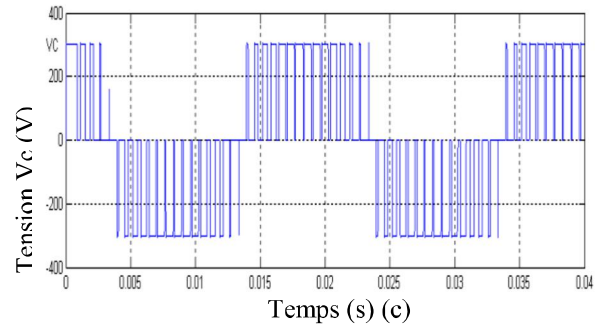
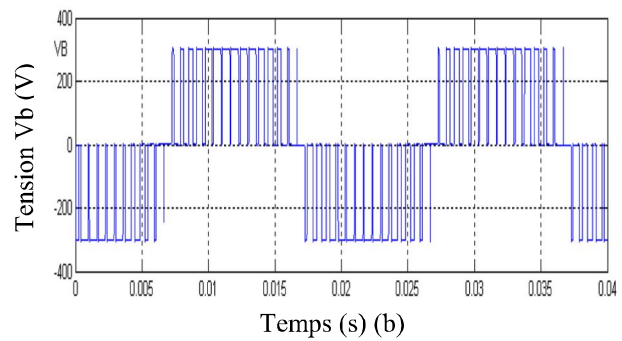
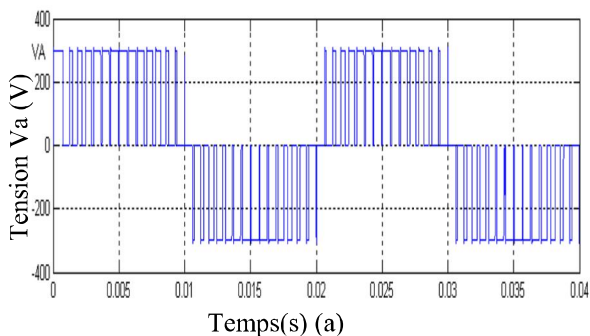


Figure 18. Allure des tensions de sortie sans la charge : (a)Tension simple Va. (b) Tension simple Vb. (c) Tension simple Vc

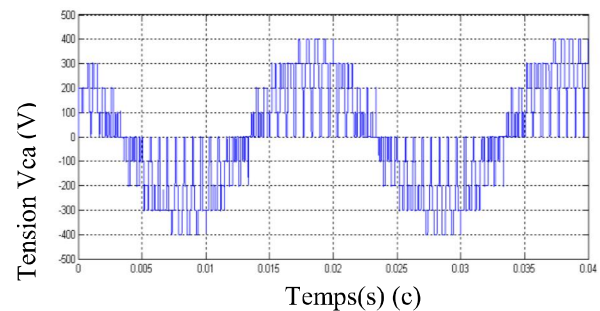
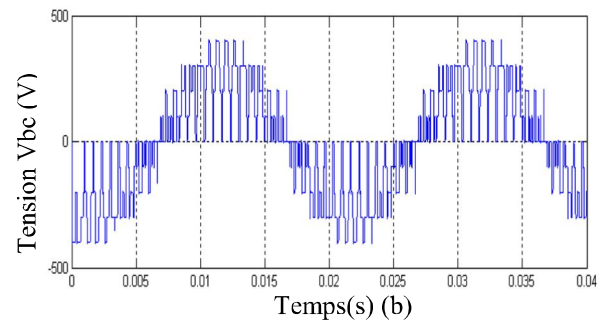
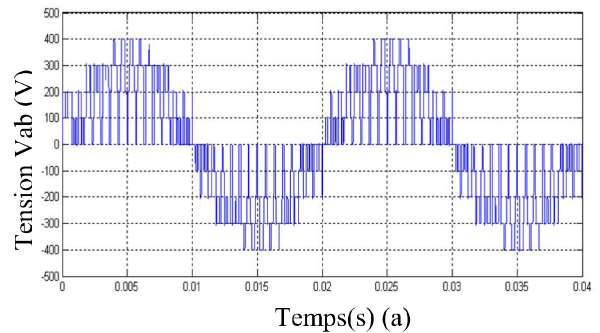


Figure 19. Allure des tensions de sortie sans la charge :(a)Tension composée Vab. (b)Tension composée Vbc. (c) Tension composée Vca

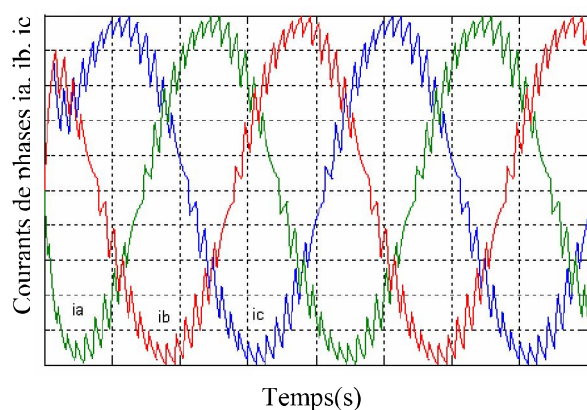


Figure 20. Allure des courants de phases avec charge RL

Afin de justifier notre étude, une analyse économique s'impose. Dans ce contexte nous comparons la facturation du site étudié avec et sans GPV (Tab.2) sachant que les heures de travail sont de 8h jusqu'à 18h30' le reste sont des heures de gardiennage, donc du coucher jusqu'au lever du soleil, l'alimentation est importée exclusivement du réseau, par contre le jour l'alimentation est assurée par le GPV et le déficit est importé du réseau électrique.

Le prix moyen de consommation de l'énergie électrique est de 5DA le kWh. Ce prix

comprend les frais d'abonnement, la taxe de la valeur ajoutée (TVA) et les droits fixes.

La figure 21 représente le modèle électrique de toute la chaîne de conversion photovoltaïque proposés qui y constituée par, le modèle électrique à une diode du GPV, un étage d'adaptation formé par un hacheur (dévolteur-survolteur), qui joue le rôle d'interface entre la source et la charge, un onduleur triphasé type NPC à trois niveaux à commande MLI et une charge variable [1,3].

La technique d'optimisation par l'algorithme Hill Climbing consiste à faire « monter » le point de fonctionnement le long de la caractéristique (Fig.15) du générateur pour cela, deux pentes sont possibles. La recherche s'arrête théoriquement quand le point de puissance maximal est atteint. Cette méthode est basée sur la relation entre la puissance du panneau et la valeur du rapport cyclique appliqué au convertisseur.

Mathématiquement, le point maximum de puissance est atteint lorsque  $\frac{dP_{pv}}{dD}$  est forcé à zéro par la commande, grâce à un choix judicieux du rapport cyclique D.

Tableau 2. Relevé des valeurs maximales de puissance

Prix unitaire	Sans GPV		Avec GPV	
	kWh GPV	kWh Réseau	kWh GPV	kWh Réseau
5DA/kWh				
Janvier	00.00	4052.0	3107	945
Février	00.00	4768.8	3871.8	897
Mars	00.00	4597.8	3487.8	1110
Avril	00.00	4173.4	3363.4	810
Mai	00.00	4477.5	3547.5	930
Juin	00.00	5352.4	3762.4	1590
Juillet	00.00	5152.9	3682.9	1470
Août	00.00	5207.0	3467	1740
Septembre	00.00	4334.9	3104.9	1230
Octobre	00.00	4159.2	3019.2	1140
Novembre	00.00	3935.7	2855.7	1080
Décembre	00.00	3291.6	2121.6	1170
Total	00.00	53503.2	39391.2	14112
Facture	267516.00DA		70560.00DA	



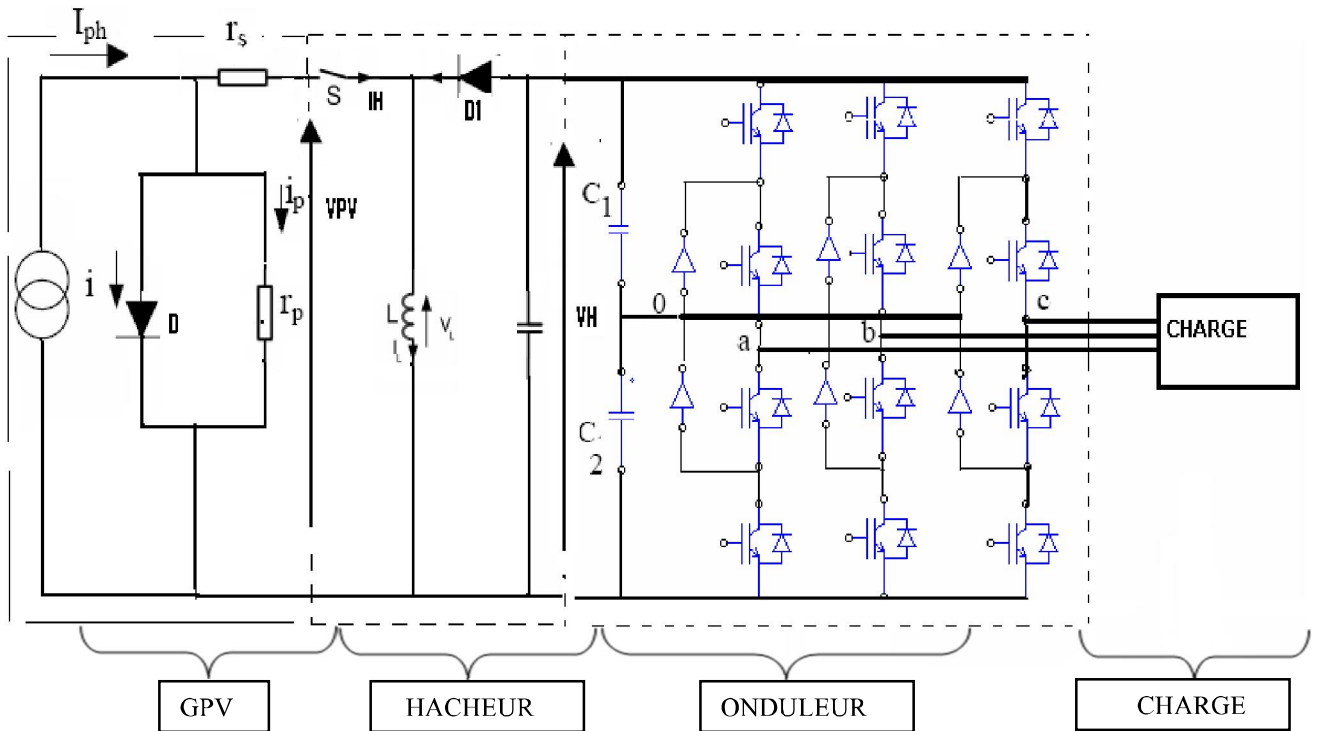


Figure 21. Schéma électrique de la chaîne élémentaire de conversion photovoltaïque

La variable *Slope* (Fig. 22) correspond à une variable qui prend la valeur « 1 » ou « -1 » suivant la direction que l'on doit donner à la recherche pour augmenter la puissance en sortie du panneau.

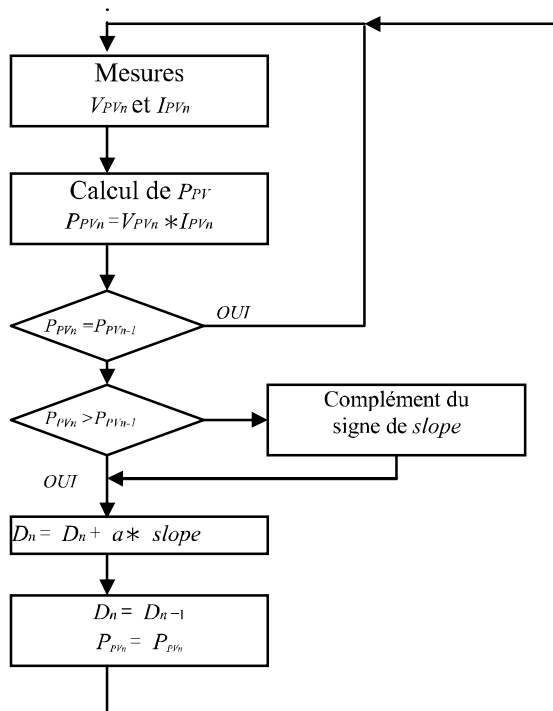


Figure 22. Algorithme type de la commande Hill Climbing.

#### 4. COMMENTAIRE.

On remarque bien que l'onduleur impose à sa sortie un système de tensions sous forme de créneaux modulés en largeurs d'impulsions, ces créneaux ne sont pas synchronisés avec les tensions sinusoïdales du réseau (en cas de raccordement du système photovoltaïque avec le réseau basse tension). Le convertisseur NPC permet d'obtenir des performances statiques et dynamiques très intéressantes et ses applications sont diverses de nos jours, le NPC apparaît également prometteur dans le domaine de l'énergie renouvelable et pour les applications basse tension [6, 7, 8]. Cependant l'utilisation d'un pont diviseur capacitif fait apparaître des problèmes d'équilibrage du point milieu. Le potentiel de celui-ci peut onduler avec une amplitude importante, voir diverger dans certains cas. La conversion basée sur l'onduleur NPC a permis d'extraire le maximum de puissance que le panneau photovoltaïque peut transformer [9].

#### 5. CONCLUSION

Nous avons proposé un modèle économique complet des éléments de la chaîne de conversion d'énergie qui dépend des facteurs climatiques (éclairage, température), ces derniers influents fortement sur le rendement. Il

est important que lors du dimensionnement d'une installation alimentée par un GPV, les facteurs climatiques seront impérativement nécessaires [10, 11,12].

Les solutions innovantes d'insertion des systèmes photovoltaïques sans stockage d'énergie au sein des réseaux de distribution peuvent intéresser certains consommateurs de petite taille et de même profil que la charge étudiée tels que les relais, station de pompage, signalisation routière et les administrations.

Le site de mesure choisi et qui est considéré comme site de production dispose d'un gisement solaire très important dépassant ainsi 2692 heures d'ensoleillement sur la quasi totalité de la région, ce site peut orienter certains acteurs et les intéressés vers ce secteur de marché énergétique.

L'intégration des GPV sans stockage d'énergie dans les addictions de certains consommateurs s'avèrent économiquement et écologiquement intéressant [4, 8,11].

## RÉFÉRENCES

[1] Brambilla A., Gambarara M., Garutti A., & Ronchi F., 1999. New approach to photovoltaic arrays maximum power point tracking, Power electronics specialist's conference, 30th Annual IEEE, Vol. 2, 632-637.

[2] Kasemsan S., Caliskan V.A., & Lee C.Q., 1993. Maximum power tracking in parallel connected converters, IEEE transactions on aerospace and electronics systems, Vol. 29, N°3.

[3] Muselli A., Notton G., & Louche A., 1999. Design of hybrid-photovoltaic power generator, with optimization of energy management, solar energy, Elsevier, Vol. 65, 143-157.

[4] Shraif M.F., 2002. Optimisation et mesure de chaîne de conversion d'énergie photovoltaïque en énergie électrique, Thèse de Doctorat de l'Université Paul Sabatier, Toulouse- France.139p.

[5] Bae H.S., Park J.H., Cho B.H., & Yu G.J., 2005. New control strategy for 2-stage utility-connected photovoltaic power conditioning system with a low cost digital processor, Power electronics specialists conference, IEEE , 2925 – 2929.

[6] Joseph Song Maguelle., 2004. Convertisseurs multi niveaux asymétriques alimentés par transformateurs multi secondaire basse fréquence, Réaction au réseau d'alimentation, Thèse de Doctorat E.P.E de Lausanne. 235p.

[7] Pankow Y., 2004. Etude de l'intégration de la production décentralisée dans un réseau basse tension, Thèse de doctorat de l'école national supérieure d'Art et Métier, Lille.162p.

[8] Aziz A., 2006. Propriétés électriques des composants électroniques minéraux et organiques, conception et modélisation d'une chaîne photovoltaïque pour une meilleure exploitation de l'énergie solaire, Thèse de Doctorat en Sciences (Electronique), Université Paul Sabatier, Toulouse-France.234p.

[9] Ben Romdhane Y., & al., 1995. Elaboration and comparison of different methods for neutral point voltage control of NPC inverter, IEEE Conference, Stockholm.

[10] Jain A., & Kapoor A., 2005. New approach to study organic solar cells using Lambert W-Functions, Solar energy materials and solar cells, Vol. 86, 197-205.

[11] Kassmi K., Hamdaoui M., & Olivie F. 2007. Caractérisation des panneaux photovoltaïques, Conception et Optimisation d'un système photovoltaïque pour une meilleure exploitation de l'énergie solaire, *revue des énergies renouvelables*, CER'07, Oujda, Vol.10, 451-462.

[12] Huang Y. C., Liao Y. C., Li S., Wu M. C., Chen w., & Su W. F., 2009. Solar energy materials and Solar Cells 93, 888-892.

[13] Petibon S., 2009. Nouvelles architectures distribuées de gestion et de conversion de l'énergie pour les applications photovoltaïques, Thèse de Doctorat de l'université de Toulouse-France.145p.

[14] Zainudin H.N., & Mekhilef S., 2010. Comparison study of maximum power point tracker, Techniques for PV systems. Proceedings of the 14th international middle east power systems. Conference (MEPCON'10), Cairo University, Egypt, 19-21.