

## Conception, simulation et réalisation d'un système photovoltaïque destiné au stockage d'énergie dans les batteries stationnaires (2V)

T. Mrabti<sup>1</sup>, M. El Ouariachi<sup>1</sup>, B. Tidhaf<sup>2</sup>, El Chadli<sup>3</sup> et K. Kassmi<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Université Mohamed Premier, Faculté des Sciences, Laboratoire LEPAS, Oujda, Maroc

<sup>2</sup> Université Mohamed Premier, Ecole Nationale des Sciences Appliquées, ENSA, Oujda, Maroc

<sup>3</sup> Université Mohamed Premier, Faculté des Sciences, Laboratoire LES, Oujda, Maroc

(reçu le 02 Novembre 2009 – accepté le 25 Mars 2010)

**Résumé** - Dans cet article, nous avons étudié dans le simulateur Pspice, la conception et le fonctionnement d'un système photovoltaïque (PV) destiné au stockage de l'énergie électrique, produite par les panneaux PV, dans les batteries de tensions inférieures à celles optimales des panneaux PV (batteries stationnaires '2V',...). Dans ce système, la régulation de la puissance est effectuée par le biais d'un convertisseur DC/DC, de type Buck (dévolteur), et d'une commande MPPT qui fixe la tension optimale du panneau PV à une valeur fixe (Commande CFT) [8]. Les résultats obtenus montrent d'une part le bon fonctionnement de chaque bloc du système, et d'autre part l'oscillation de la puissance fournie par le générateur PV autour du point de puissance maximale (PPM). Les différents résultats obtenus dans Pspice sont validés à partir du système PV réalisé au laboratoire. Durant une journée de fonctionnement, nous avons montré un très bon accord entre l'expérience et la simulation, et des performances très satisfaisantes du système PV conçu et réalisé au cours de ce travail. Pour une journée où l'éclairement maximal est de l'ordre de  $750 \text{ W/m}^2$  (vers le milieu de la journée), l'énergie produite par le panneau est de l'ordre de 290 Wh. En comparant avec le fonctionnement optimal du panneau, obtenu par la modélisation du fonctionnement des panneaux PV dans Pspice, nous avons montré que les pertes d'énergie sont inférieures à 1.4 %. Ces faibles valeurs de pertes, le rendement satisfaisant du convertisseur (> 70 %) et donc le bas coût du système PV montrent que le système PV conçu et réalisé peut être utilisé dans une installation pour usage domestique: éclairage, audio visuel, télévisions,...

**Abstract** - In this article, we have studied in the simulator Pspice the design and the operation of a photovoltaic (PV) system intended for the storage of electrical energy, produced by PV panels, in the batteries of voltage lower than those optimal of PV panels (stationary batteries '2V',...). In this system the regulation of the power is carried out by the means of a DC/DC converter, of Buck type, and of an MPPT command which keeps the optimal voltage of PV panel at a fixed value (CFV Command) [8]. The results obtained show on the one hand the good performance of each block of the system, and on the other hand, the power provided by PV generator oscillates around the maximum power point (MPP). The various results obtained in Pspice are validated from the PV system realized at the laboratory. During one day of operation, we have shown a very good agreement between the experiment and simulation and a very satisfactory performances of PV system conceived and realized during this work. For one day when the maximum irradiation is about  $750 \text{ W/m}^2$  (about the middle), the energy produced by the panel is in order of 290 Wh. By comparing with the optimal operation of the panel, obtained by the modelling of the functioning of PV panels in Pspice, we have shown that the energy losses are lower than 1.4 %. These low losses values, the satisfactory of the converter efficiency (> 70 %) and thus the low cost of PV system show that the PV system conceived and realized can be used in an installation for domestic use: visual lighting, audio, TV...

**Mots clés:** Energie photovoltaïque (PV) - Panneaux PV - Système PV - Caractérisations électriques - Commande MPPT - Convertisseur DC/DC Buck - Simulateur Pspice - Grandeurs électriques optimales - Point de puissance maximale (PPM).

## 1. INTRODUCTION

Dans les applications photovoltaïques (PV) [1, 2], le stockage de l'énergie électrique dans les batteries de tensions inférieures à celles optimales des panneaux photovoltaïques induit des pertes considérables d'énergie [3-5]. La conception et la réalisation d'une commande MPPT [6-10], à bas coût, et d'un convertisseur DC/DC de type buck (dévolteur) sont indispensables afin de minimiser ces pertes.

Dans la littérature et dans les installations photovoltaïques actuelles, on trouve très peu de systèmes qui utilisent des convertisseurs DC/DC de type buck. La majorité des études utilise un convertisseur boost (survolteur) où la tension optimale des modules photovoltaïques est inférieure à celles de la charge (batteries,...) [11-13].

Dans des travaux présentés aux références [8, 14-18], nous avons modélisé d'une manière fine le fonctionnement électrique des modules photovoltaïques (SP75) et analysé la régulation de la puissance électrique de ces modules par une commande MPPT qui fixe une tension Fixe (CFT), lorsque le convertisseur d'énergie (DC/DC) est un hacheur de type boost.

L'avantage de cette commande est sa simplicité de réalisation et son coût bas. Nous avons montré dans le simulateur Pspice [8, 16-18], et expérimentalement que la commande MPPT ainsi conçue joue correctement son rôle: elle régule la tension de sortie du module à sa valeur optimale.

Nous avons montré que cette tension optimale est fixée à partir des valeurs de l'éclairement et de la température qui correspondent au milieu de la journée, et qu'au cours d'une journée de fonctionnement, les pertes d'énergie sont très faibles (inférieures à 2 %).

Dans les cas des convertisseurs buck, la commande MPPT conçue pour les convertisseurs boost n'est plus utilisable. Elle nécessite des modifications et des améliorations des blocs de la commande, afin de commander correctement l'interrupteur de puissance du convertisseur et par conséquent, réguler la tension optimale des modules à une tension supérieure à celle de la charge.

Dans ce cadre, nous analysons dans Pspice et expérimentalement la conception de la commande MPPT CFT, afin qu'elle régule le fonctionnement optimal des modules à partir des convertisseurs DC-DC buck. Nous analysons le fonctionnement de chacun des blocs, ainsi que le fonctionnement du système complet, sur une journée entière. Une attention particulière est attachée aux pertes d'énergie des modules photovoltaïques par le système conçu et réalisé.

## STRUCTURE DU SYSTEME PHOTOVOLTAÏQUE

### 2.1 Schéma synoptique d'un système photovoltaïque

La figure 1 représente le schéma synoptique d'un système photovoltaïque qui est constitué par:

- Un module photovoltaïque (SP75) [19, 20], qui fournit une puissance de 55 W, sous une tension de 13.8 V et un courant de 4 A [15, 21]. Dans [15, 21], nous avons modélisé d'une manière fine le fonctionnement électrique du module. Nous avons montré que les paramètres de la cellule photovoltaïque du module dépendent fortement de l'éclairement (le courant de saturation de la diode des cellules

augmente avec l'éclairement) et que la tension optimale ( $V_{pv0}$ ) du module dépend de la température et donc des saisons.

- Un convertisseur buck est dimensionné pour qu'il fonctionne à une fréquence de 10 kHz [10].
- Une commande MPPT (CFT) qui fixe une tension au générateur photovoltaïque [8, 10], muni d'un circuit de commande buck (CCB). Le circuit CCB a pour rôle de commander correctement l'interrupteur de puissance du convertisseur à l'ouverture et à la fermeture.
- Une charge qui peut être, soit une résistance de valeur inférieure à la valeur optimale de la résistance du module, soit une batterie supportant une tension de valeur inférieure à la tension optimale du module.

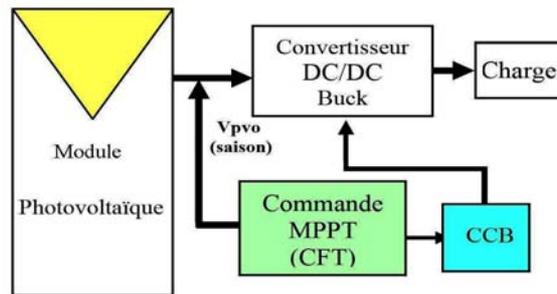


Fig. 1: Schéma synoptique du système PV adapté par un convertisseur Buck, une commande MPPT (CFT) munie du circuit CCB

## 2.2 Structure du convertisseur buck

La structure du convertisseur DC-DC de type buck est représentée sur la figure 2.

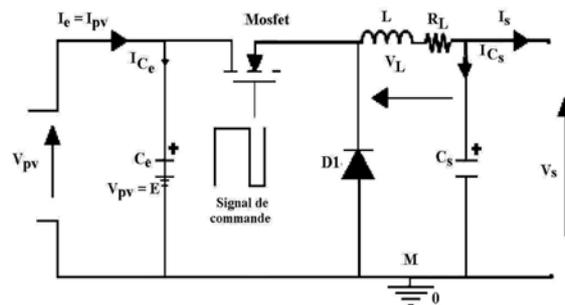


Fig. 2: Structure du convertisseur d'énergie buck (dévolteur)

Dans ce système:

- Les inductances et capacités ( $L$ ,  $C_e$ ,  $C_s$ ), permettent essentiellement de filtrer le courant et de minimiser le taux d'ondulation de la tension à l'entrée et la sortie des convertisseurs [6, 22, 23].
- L'interrupteur du convertisseur est un transistor Mosfet de puissance (IRF 540). Ce transistor est choisi puisqu'il présente des performances satisfaisantes: faibles pertes

de puissance par commutation et présentant une très faible résistance  $R_{D\text{Son}}$  [8, 10].

- La diode  $D$  est une diode ‘roue libre’ de type MUR8100. Elle permet d’évacuer l’énergie stockée dans la self pendant le blocage de l’interrupteur. Nous avons choisi une diode Schottky [6, 24] de puissance dont la chute à l’état passant est faible pour minimiser les pertes en conduction.

### 2.3 Structure de la commande MPPT

La régulation de la puissance fournie par le générateur PV est réalisée par la commande MPPT de type CFT (Fig. 3) [8, 10]. Cette commande régule la tension de sortie du générateur PV à une valeur de référence constante. Les différents blocs de cette commande sont:

- L’amplificateur de différence qui calcule l’erreur entre une fraction ( $V_p$ ) de la tension réelle ( $V_{pv}$ ) aux bornes du panneau PV et une tension de référence ( $V_r$ ) (nous avons choisi des paramètres pour que  $V_r = 2.4$  V). Les résistances  $R_{20}$  et  $R_{21}$  sont calculées de telle manière à avoir une erreur nulle, lorsque la tension à la sortie du module est fixée à une valeur  $V_{pvo}$ . Dans notre cas, on a [8, 10]:

$$V_p = V_r = V = 2.4 \text{ V} \quad (1)$$

$$R_{21} = \frac{R_{20}}{\frac{V_{pvo}}{V} - \frac{3}{2}} \quad (2)$$

Sur le **Table 1**, nous avons représenté les valeurs de la résistance  $R_{21}$  en fonction de la tension  $V_{pvo}$ , lorsque  $R_{20} = 10 \text{ k}\Omega$ . Dans le cadre de notre expérimentation (éclairage au milieu de la journée de l’ordre de  $750 \text{ W/m}^2$ ), nous avons choisi la valeur de la tension  $V_{pvo}$  en tenant compte des résultats de la modélisation fine du fonctionnement optimal du panneau PV ( $V_{pvo}$  dépend de la température et des saisons) (Fig. 4) [21]. Comme le montre la figure 4, la valeur de la tension optimale et par conséquent la tension  $V_{pvo}$  est d’environ 13.5 V.

**Table 1:** Résistance  $R_{21}$  en fonction de la tension  $V_{pvo}$  lorsque  $R_{20} = 10 \text{ k}\Omega$

$V_{pvo}$ (V)	16.38	15.2	15	14,531	14	13.5
$R_{21}$ (k $\Omega$ )	1.877	2.068	2.105	2.195	2.307	2.42

- L’amplificateur non inverseur a pour rôle d’amplifier l’erreur.
- L’amplificateur inverseur a pour rôle de changer le signe de l’erreur.
- L’intégrateur (circuit RC), de constante de temps  $\tau_0$ , a pour rôle de générer la tension de référence ( $V_{ref}$ ). Si cette tension augmente (diminue), le point de fonctionnement du générateur PV se déplace vers les conditions du circuit fermé (ouvert).

- Le comparateur LM319 qui compare la tension  $V_{ref}$  à celle en dent de scie fournie par l'oscillateur NE 555, pour générer à la sortie du comparateur un signal modulé en largeur d'impulsion et de fréquence 10 kHz. Il est à noter que l'amplitude de ce signal ne peut commander correctement l'interrupteur du convertisseur. Pour ce faire, nous avons intercalé entre le convertisseur et le comparateur, le circuit CCB.

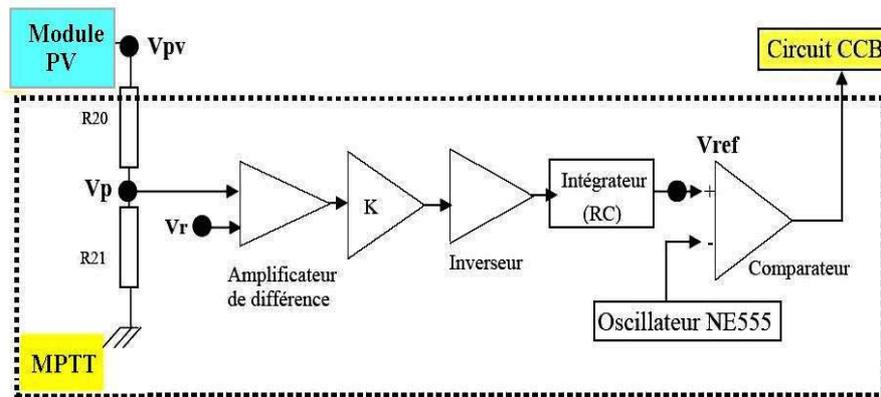


Fig. 3: Schéma synoptique de la commande MPPT (CFT)

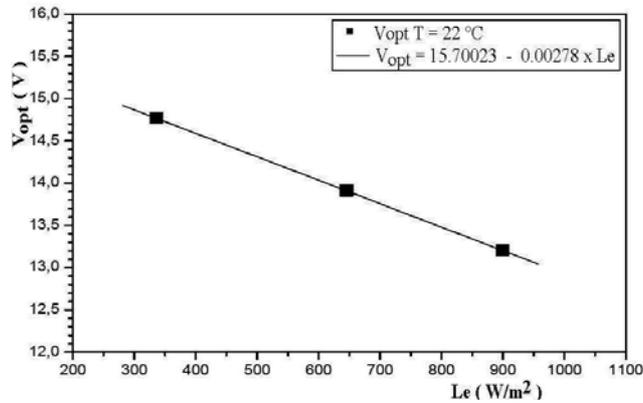


Fig. 4: Variation de la tension optimale en fonction de l'éclairement [21]

#### 2.4 Structure du circuit CCB

La figure 5 représente le schéma synoptique du circuit CCB qui est formé par: un oscillateur NE555, un circuit de pompage de charge, un inverseur à transistor bipolaire et un driver. Son principe de fonctionnement est le suivant:

- L'oscillateur génère un signal carré à l'entrée de la pompe de charge. Lorsque sa sortie est nulle, le premier condensateur  $C2$  se charge et la tension  $V_A$  est égale à la tension  $V_{CC} = 12$  V (moins la chute de tension dans la diode  $D1$ ). De la même manière, le condensateur  $C3$  se charge et la tension  $V_{C3}$  est égale à la tension  $V_{CC}$  (moins la chute de tension dans les deux diodes  $D1$  et  $D2$ ).

- Lorsque la sortie d'oscillateur bascule à  $V_{CC}$ , la tension  $V_A$  augmente et atteint la valeur  $2 \cdot V_{CC}$  (moins la chute de tension dans la diode  $D1$ ). En conséquence, suite à la charge du condensateur  $C3$ , la tension supportée par le condensateur  $C3$  atteint la valeur  $2 \cdot V_{CC}$  (moins les chutes de tension dans les diodes  $D1$  et  $D2$ ).
- Cette dernière tension polarise un transistor bipolaire (NPN) fonctionnant en régime de commutation (inverseur). Le signal fourni par la commande MPPT (Fig. 3) est injecté à la base de ce transistor bipolaire et le signal du collecteur de celui-ci est injecté au transistor Mosfet du convertisseur à travers le un Driver. Le signal ainsi fourni, d'amplitude d'environ  $2 \cdot V_{CC}$ , est largement suffisante pour assurer l'ouverture et la fermeture du transistor MOSFET.

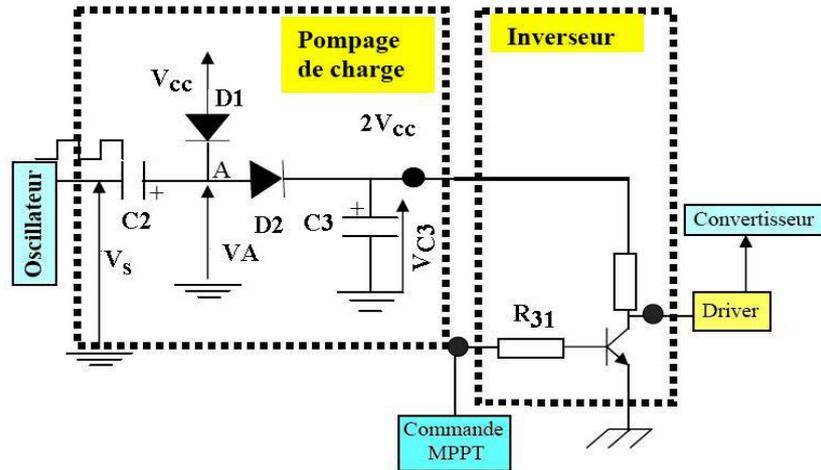


Fig. 5: Schéma synoptique du circuit CCB.  
R1 et R2 deux résistances

### 3. ETUDE DU SYSTEME PV DANS PSPICE

Nous avons implanté sur la figure 6 le circuit du système PV sur Pspice (Fig. 3), puis nous avons relevé les différentes grandeurs électriques (tensions courants et puissances) du système pour une charge résistive de  $1.2 \Omega$ , un éclairage de  $796.2 \text{ W/m}^2$  à une température de  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Les différents paramètres de la commande MPPT sont calculés pour réguler la tension à la sortie du générateur PV à la valeur  $15 \text{ V}$ .

Il est à noter que puisque la source de l'interrupteur IRF 540 est flottante, alors nous avons intercalé entre la sortie du comparateur (Fig. 3) et la grille de l'interrupteur, le circuit CCB. Ce dernier double la tension générée par le comparateur et assure la fermeture et l'ouverture de l'interrupteur MOSFET.

Les résultats typiques sont représentés sur les figures 7 et 8.



- Les différentes grandeurs électriques à l'entrée et à la sortie du convertisseur (Fig. 8) montrent que:
  - Le système converge vers les conditions optimales au bout de 80 ms;
  - Les différentes grandeurs électriques oscillent autour de leurs valeurs optimales [10]:

\* la tension d'entrée (sortie) du convertisseur oscille autour de 15 V (7 V),

\* le courant d'entrée (sortie) du convertisseur oscille autour de 3.42 A (5.97 A),

\* la puissance d'entrée (sortie) du convertisseur oscille autour de 51.36 W (43.40 W).

Par ailleurs, nous avons vérifié que les oscillations obtenus dépendent fortement de la constante du temps  $\tau_0$  de l'intégrateur (R26, C1): lorsque  $\tau_0$  augmente (diminue) le système devient lent (rapide) et l'amplitude des oscillations diminue (augmente). Aussi, si la constante du temps  $\tau_0$  est très faible alors le système PV devient instable.

La comparaison de ces valeurs à celles obtenues lors de l'analyse de l'adaptation du générateur [14, 15] montre un très bon accord. Donc, la commande MPPT utilisée régule bien le fonctionnement électrique du générateur PV autour des conditions optimales.

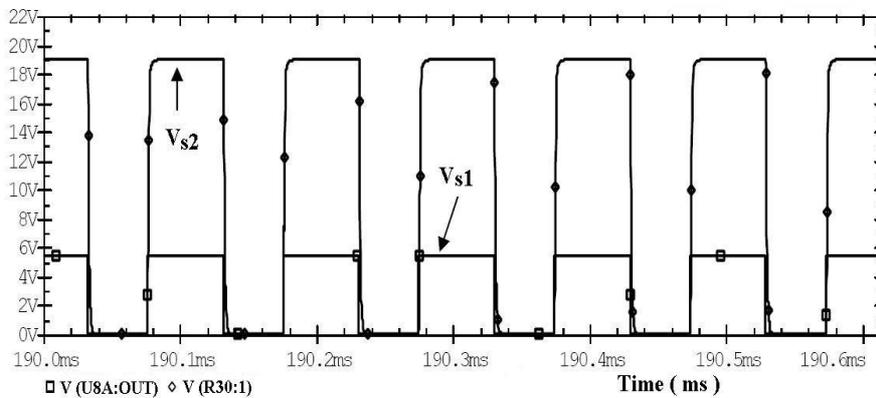
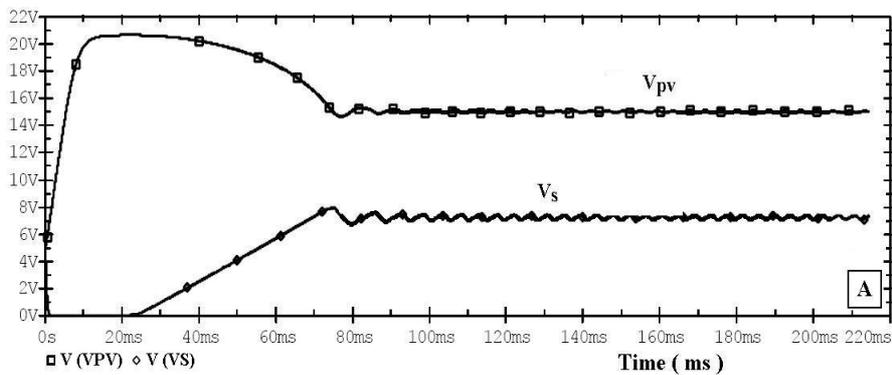


Fig. 7: Signaux générés par la commande MPPT ( $V_{s1}$ ) et par le circuit CCB qui commande le MOSFET ( $V_{s2}$ )



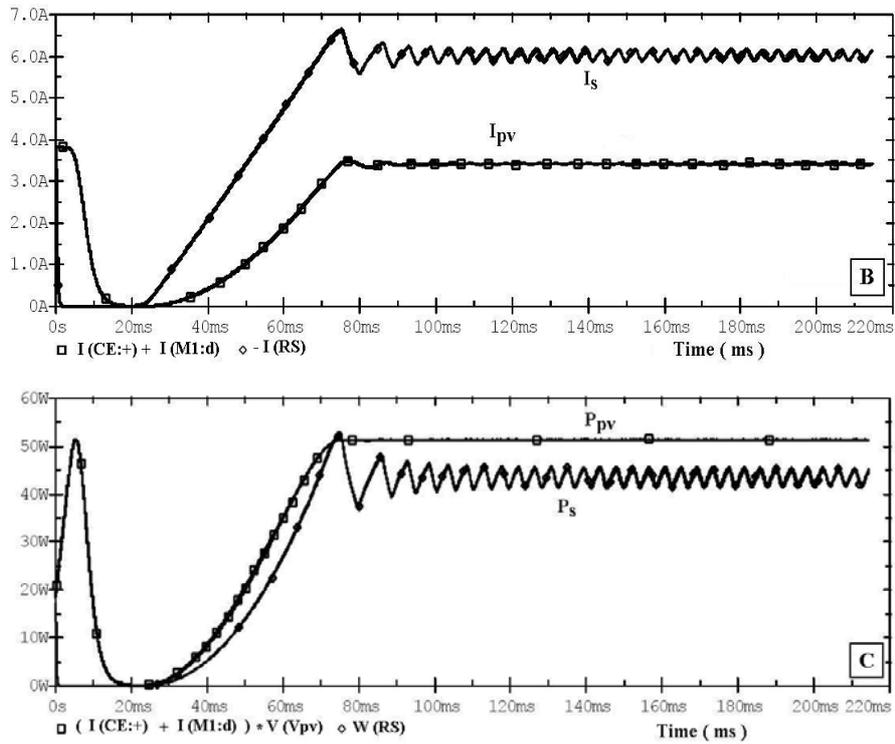


Fig. 8: Simulation dans Pspice des grandeurs électriques à l'entrée et à la sortie du convertisseur, ( $L_e = 796 \text{ W/m}^2$ )  
(A)- Tensions (B)- Courants (C)- Puissances

## 4. RESULTATS EXPERIMENTAUX

### 4.1 Procédures expérimentales

Le générateur photovoltaïque (ensemble de modules) SP75 et le banc de mesure mis au point sont représentés sur les figures 9 et 10.



Fig. 9: Modules PV 'SP75' installés sur le toit de la Faculté

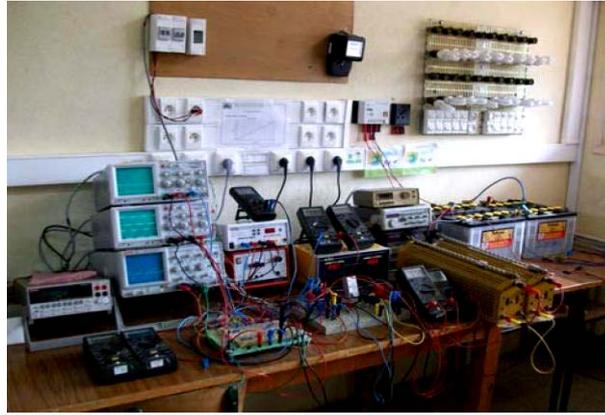


Fig. 10: Banc de mesure mis en place pour la caractérisation

Les différents blocs du système d'énergie (convertisseur buck, commande MPPT 'CFT', circuit de commande buck 'CCB') ont été réalisés sur des maquettes d'essai (Labs) (Fig. 11). Des travaux sont en cours afin de les réaliser à partir des circuits imprimés.

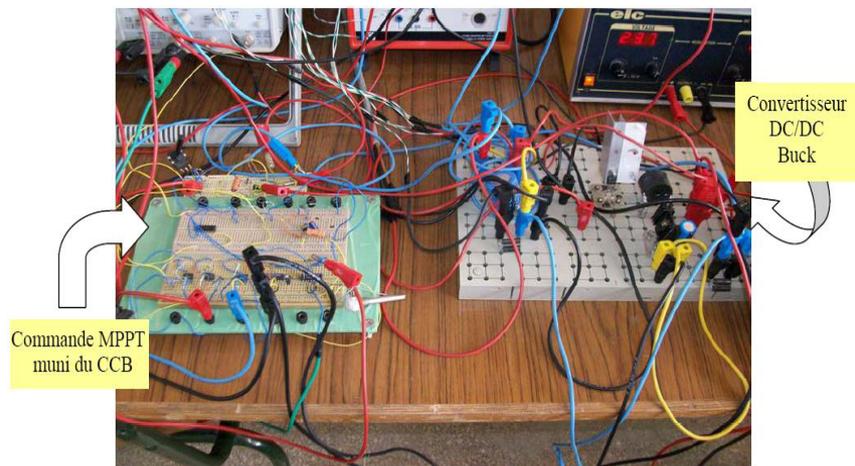


Fig. 11: Convertisseur Buck et commande MPPT 'CFT' muni du circuit 'CCB'

#### 4.2 Fonctionnement des blocs du système PV

Afin de valider les résultats de simulations obtenus dans cette partie, nous avons réalisé le système de la figure 3 et expérimenté le fonctionnement de chaque bloc du système, lorsque la température est de 20 °C, l'éclairement de 796.7 W/m<sup>2</sup> et la charge de 1.2 Ω.

Les résultats obtenus sont représentés sur les figures 12 à 15. Il apparaît que:

- La tension à la sortie du générateur PV se stabilise à 14.96 V et celle aux bornes de la charge à 6.15 V (Fig. 12 A). Ces résultats montrent que la commande MPPT et le convertisseur DC-DC jouent correctement leurs rôles.

- L'oscillateur (Fig. 3) génère un signal en dent de scie de fréquence de l'ordre de 10 kHz (Fig. 12 C). La même figure 12 C montre que l'intégrateur RC (Fig. 3) génère un signal lentement variable.
- Le signal généré par la commande MPPT (sortie du comparateur) a une fréquence de l'ordre de 10 kHz, un rapport cyclique ( $\alpha$ ) de 0.588 et une amplitude de 10 V (Fig. 12 B).  
Aussi, l'amplitude du signal généré par le circuit CCB est de 20 V (Fig. 12 B). Cette dernière amplitude est largement suffisante pour commander le mosfet à l'ouverture et à la fermeture. Comme le montre la figure 13, lorsque le temps varie entre  $\alpha T$  et  $T$  ( $T$  et  $\alpha T$ ), le mosfet est ouvert (fermé).
- Les signaux des figures 14 et 15 montrent le bon fonctionnement de l'inductance et de la diode lorsque le convertisseur est commandé par le signal généré par le circuit 'CCB'. Lorsque le temps varie entre  $\alpha T$  et  $T$  ( $T$  et  $\alpha T$ ), l'inductance se décharge (charge) et la diode conduit (bloquée).

La comparaison de l'ensemble des résultats expérimentaux à ceux obtenus dans Pspice, nous constatons d'une part, un très bon accord entre l'expérience et la simulation, et d'autre part, le bon fonctionnement de la commande MPPT et du circuit CCB.

Ces derniers génèrent un signal modulé en largeur et d'amplitude suffisamment importante pour commander l'interrupteur du convertisseur à l'ouverture et à la fermeture, et fixent la tension (optimale) du générateur PV à la valeur 15 V.

En conclusion, le système photovoltaïque, conçu au cours de ce travail, permet bien de faire osciller le point de fonctionnement du générateur, autour du point de puissance maximale (PPM), lorsque le convertisseur DC-DC est de type buck.

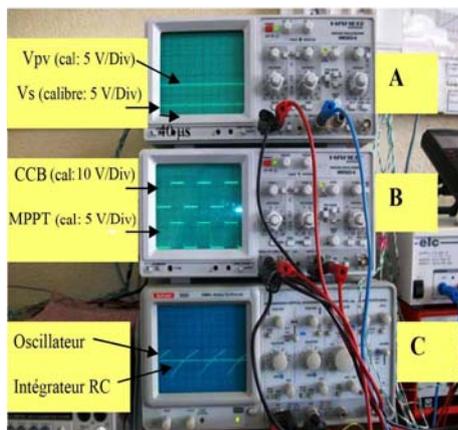


Fig. 12: Signaux générés: **A**- à la sortie du générateur PV et aux bornes de la charge, **B**- à la sortie de la commande MPPT et le circuit CCB, **C**- à la sortie de l'oscillateur et l'intégrateur RC

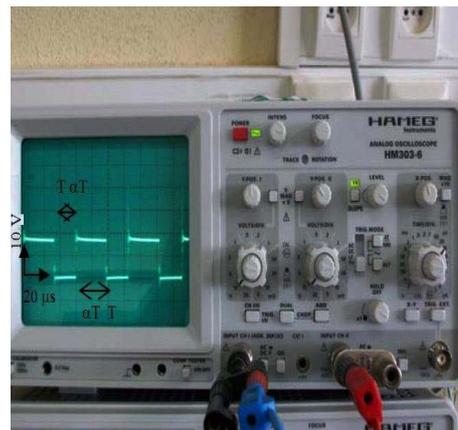


Fig. 13: Tension drain-source (VDS) du Mosfet

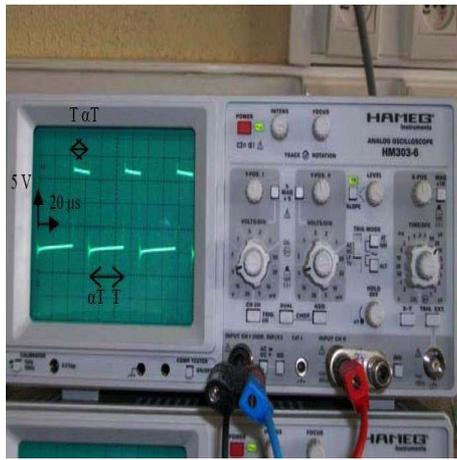


Fig. 14: Tension aux bornes de l'inductance

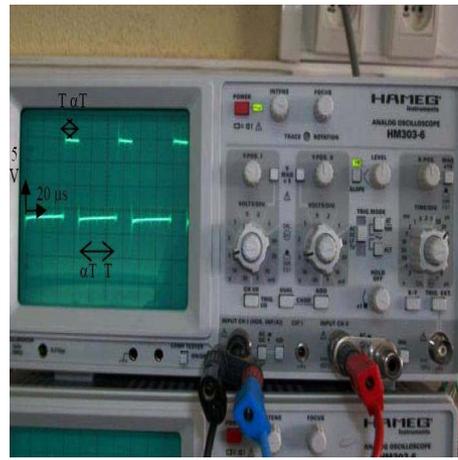


Fig. 15: Tension aux bornes de la diode (entre la cathode et l'anode)

#### 4.3 Régulation et optimisation du fonctionnement du système PV

Dans les travaux présentés [8, 17], nous avons montré dans le cas d'un convertisseur boost muni d'une commande MPPT CFT que la tension de régulation  $V_{pv0}$  doit être proche à celle optimale correspondante au milieu de la journée.

En tenant compte de cette dernière considération et les résultats de la figure 4 [21], nous étudions dans cette partie, la régulation et l'optimisation du système PV complet (Fig. 3) en fixant une tension  $V_{pv0}$  (13.5 V) qui est très proche à celle optimale au milieu de la journée du mois de Juillet (température de l'ordre de 35 °C).

Sur la figure 16, sont représentés les résultats obtenus: variation de l'éclairement, rapport cyclique ( $\alpha$ ) du signal qui commande l'interrupteur de puissance, tensions à l'entrée et à la sortie du convertisseur ( $V_{pv}$  et  $V_s$ ), courant à l'entrée et à la sortie du convertisseur ( $I_{pv}$  et  $I_s$ ), puissances fournies par le module et à la charge ( $P_{pv}$  et  $P_s$ ).

Sur les mêmes figures, nous avons représenté les résultats de simulation (grandeurs électriques optimales du panneau et les grandeurs électriques du système complet).

Il apparaît:

- L'intensité de l'éclairement est maximale au milieu de la journée et elle est de l'ordre de 750 W/m<sup>2</sup>.
- Un très bon accord entre l'expérience et la simulation. Plus particulièrement, un très bon accord des grandeurs électriques expérimentales et optimales du module PV. Ceci montre que les paramètres fixés ( $V_{opt} = 13.5$  V) permettent bien de faire fonctionner le module PV sous ses conditions optimales.

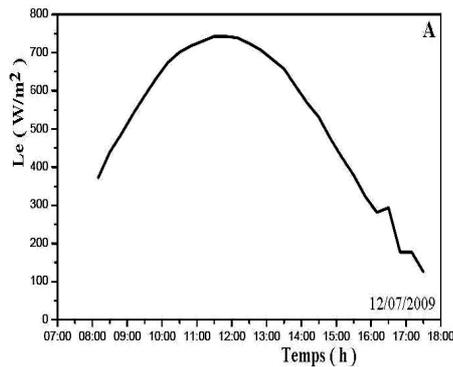
Sur la figure 17, nous avons évalué les pertes d'énergie du module PV (par rapport à l'optimum): au milieu de la journée où la puissance est importante, les pertes sont très faibles (inférieures à 2 %).

Aussi, durant cette journée, nous avons estimé l'énergie produite par le module à 289.51 Wh (soit des pertes de l'ordre de 1.4 %).

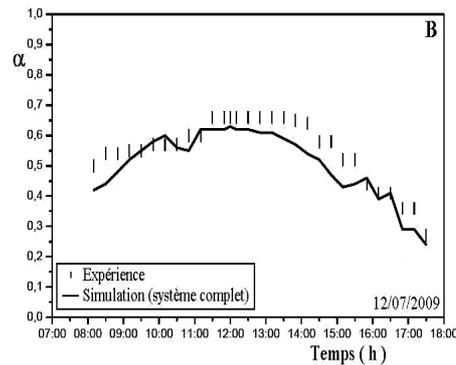
- Les grandeurs électriques expérimentales de la charge sont légèrement inférieures à celles simulées. Le tracé du rendement du convertisseur aux cours de la journée (Fig. 18) montre des valeurs expérimentales satisfaisantes de l'ordre de 75 %, et légèrement inférieures à celles simulées. Des travaux sur les circuits imprimés sont en cours afin d'améliorer les grandeurs électriques au niveau de la charge.

En conclusion, l'ensemble des résultats obtenus dans cette partie montre que la commande MPPT muni du circuit CCB ainsi conçue joue correctement son rôle. Elle fixe un fonctionnement optimal du module PV durant toute la journée.

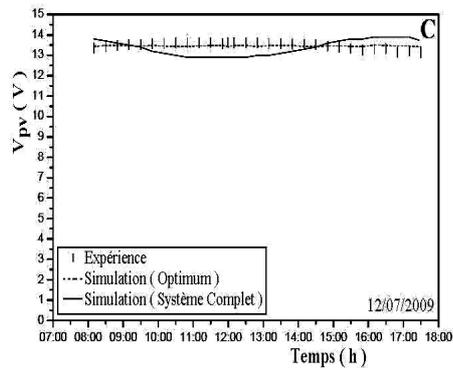
Les pertes obtenues (< 2 %) et le rendement du convertisseur buck (75 %) montrent que le système PV peut être utilisé dans une installation PV afin de stocker l'énergie produite par les modules PV dans les batteries, de tensions inférieures à celles optimales du module PV.



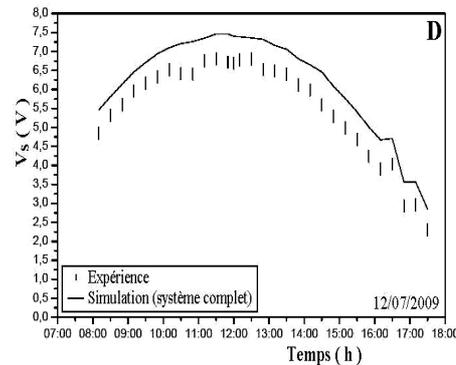
A- Variation de l'éclairement



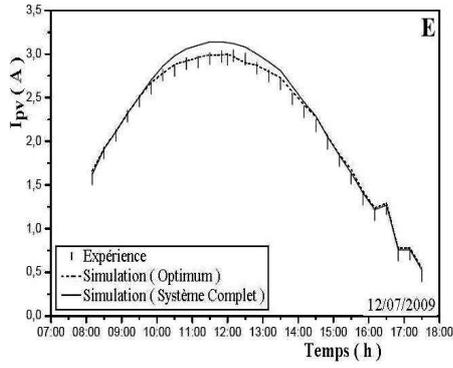
B- Rapport cyclique du signal commandant l'interrupteur de Mosfet



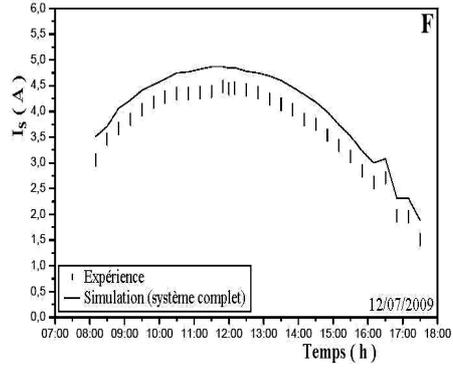
C- Tension  $V_{pv}$  du module PV



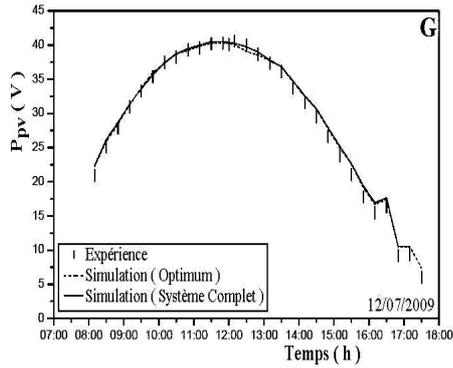
D- Tension  $V_s$  supportée par la charge



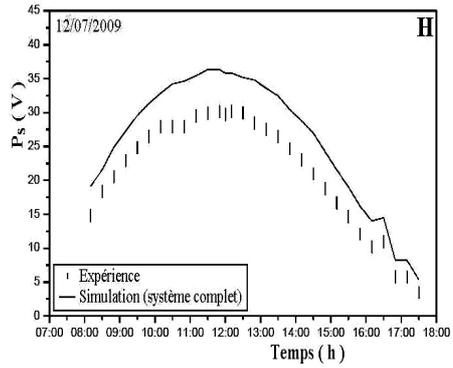
E- Courant  $I_{pv}$  débité par le module



F- Courant  $I_s$  circulant dans la charge



G- Puissance  $P_{pv}$  fournie par le module



H- Puissance  $P_s$  fournie à la charge

Fig. 16: Simulations (optimum et système PV complet)

et mesures obtenues au cours de la journée 12 Juillet 2009:

A- Variation de l'éclaircement, B- Rapport cyclique du signal qui commande l'interrupteur de Mosfet, C- Courant  $I_{pv}$  débité par le module, D- Courant  $I_s$  circulant dans la charge,

E- Tension  $V_{pv}$  du module, F- Tension  $V_s$  supportée par la charge,

G- Puissance  $P_{pv}$  fournie par le module, H- Puissance  $P_s$  fournie à la charge.

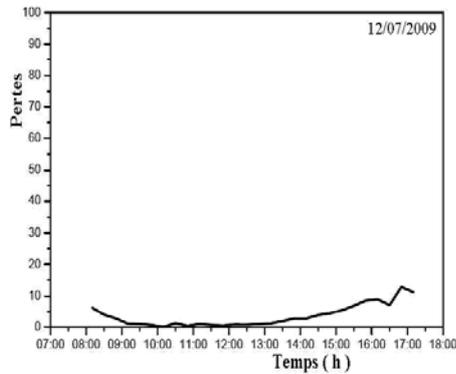


Fig. 17: Pertes de puissance du module

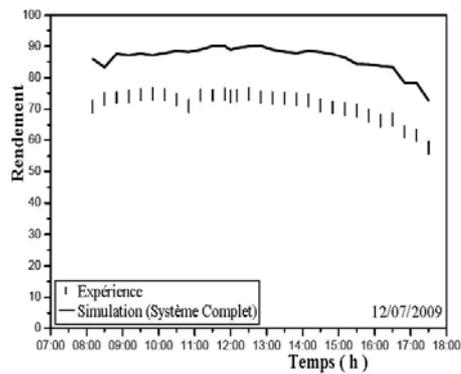


Fig. 18: Rendement du convertisseur

## 5. CONCLUSION

Dans cet article, nous avons analysé dans le simulateur Pspice et expérimentalement le fonctionnement optimal d'un système PV, de moyennes puissances (100 W) dont la régulation de la puissance est effectuée par une commande MPPT CFT muni d'un circuit CCB. Le rôle de la commande est d'une part de commander correctement l'interrupteur du convertisseur, et d'autre part de fixer une tension fixe optimale  $V_{opt}$  à la sortie du module PV.

Au cours d'une journée de fonctionnement du système, nous avons montré que toutes les grandeurs électriques (tensions, courant et puissances) oscillent autour des valeurs fixées (optimum). Les pertes de puissances sont très faibles (inférieures à 2 %) et le rendement du convertisseur est satisfaisant (de l'ordre de 75 %). Après une journée de fonctionnement du système PV, l'énergie produite par le module est estimée à 289.51 Wh.

En comparant avec les résultats de simulation (optimum du module), nous avons évalué les pertes d'énergie à 1.4 %. Ces résultats montrent que la commande MPPT et le circuit CCB conçus et réalisés au cours de ce travail, jouent correctement leurs rôles: optimisation de la puissance électrique fournie par le module PV.

L'ensemble des résultats obtenus dans ce travail montre que le prototype photovoltaïque développé au laboratoire peut être utilisé dans une installation PV afin d'optimiser le fonctionnement des panneaux et stocker l'énergie produite dans les batteries, de tensions inférieures à celles optimales du panneau PV.

### Remerciements

Ce travail rentre dans le cadre:

- du Programme Thématique d'Appui à la Recherche Scientifique (Protars III) 'D43/06',
- Coopération Maroc-Belge, 'Commission Universitaire Institutionnelle', CUI-Oujda 2008-2012 (Activité Eau et Environnement / sous-activité Energies Renouvelables).

### REFERENCES

- [1] K. Meah, S. Ula and S. Barrett, '*Solar Photovoltaic Water Pumping - Opportunities and Challenges*', Renewable and Sustainable Energy Review, Vol. 12, N°4, pp. 1162 – 1175, 2008.
- [2] A.A. Ghoneim, '*Design Optimization of Photovoltaic Powered Water Pumping Systems*', Energy Conversion and Management, Vol. 47, N°11-12, pp. 1449 – 1463, 2006.
- [3] Wei Chen, Hui Shen, Bifen Shu, Hong Qin and Tao Deng, '*Evaluation of Performance of MPPT Devices in PV Systems with Storage Batteries*', Renewable Energy, Vol. 32, N°9, pp. 1611 – 1622, 2007.
- [4] N.D. Kaushika and A.K. Rai, '*Solar PV Design Aid Expert System*', Solar Energy Materials and Solar Cells, Vol. 90, N°17, pp. 2829 – 2845, 2006.
- [5] A. Jossen, J. Garche and D.U. Sauer, '*Operation Conditions of Batteries in PV Applications*', Solar Energy, Vol. 76, N°6, pp. 759 – 769, 2004.
- [6] M.F. Shraif, '*Optimisation et Mesure de Chaînes de Conversion d'Energie Photovoltaïque en Energie Electrique*', Doctorat de l'Université Paul Sabatier de Toulouse (France), LAAS, CNRS, 2002.

- [7] Z. Salameh and D. Taylor, 'Step-up Maximum Power Point Tracker for Photovoltaic Arrays', Proceedings of the 1988 Annual Meeting of the American Solar Energy Society, Cambridge, USA, pp. 409 - 414, 20-24 June, 1988.
- [8] M. El Ouriachi, T. Mrabti, B. Tidhaf, Ka. Kassmi and K. Kassmi, 'Regulation of the Electric Power Provided by the Panels of the Photovoltaic Systems', International Journal of Physique Sciences, Vol. 4, N°5, pp. 294 - 309, 2009.
- [9] A.M. Pernia, J. Arias, M.J. Prieto, J.A. Martinez, 'A Modular Strategy for Isolated Photovoltaic Systems Based on Microcontroller', Renewable Energy, Vol. 34, N°7, pp. 1825 - 1832, 2009.
- [10] T. Mrabti, M. El Ouriachi, B. Tidhaf, Ka. Kassmi, E. Chadli and K. Kassmi, 'Regulation of Electric Power of Photovoltaic Generators with DC-DC Converter (Buck Type) and MPPT Command', International Conference on Multimedia Computing and Systems, ICMCS'09 IEEE, pp. 322 - 326, Ouarzazate, Morocco, April 2-4, 2009.
- [11] R. Akkaya, A.A. Kulaksız and O. Aydogdu, 'DSP Implementation of a PV System with GA-MLP-NN Based MPPT Controller Supplying BLDC Motor Drive', Energy Conversion and Management, Vol. 48, N°1, pp. 210 - 218, 2007.
- [12] N. Dasgupta, A. Pandey and A.K. Mukerjee, 'Voltage-Sensing-Based Photovoltaic MPPT with Improved Tracking and Drift Avoidance Capabilities', Solar Energy Materials and Solar Cells, Vol. 92, N°12, pp. 1552 - 1558, 2008.
- [13] K-H. Chao and C-J. Li, 'An Intelligent Maximum Power Point Tracking Method Based on Extension Theory for PV Systems', Expert Systems with Applications, Vol. 37, N°2, pp. 1050 - 1055, 2010.
- [14] K. Kassmi, M. Hamdaoui et F. Olivie, 'Caractérisation des Panneaux Photovoltaïques. Conception et Optimisation d'un Système Photovoltaïque pour une Meilleure Exploitation de l'Energie Solaire', Revue sur les Energies Renouvelables, Edité par l'UNESCO, Rabat, Morocco, pp. 87 - 110, 2007.
- [15] T. Mrabti, M. El Ouriachi, B. Tidhaf, Ka. Kassmi, E. Chadli et K. Kassmi, 'Modélisation des Propriétés Electriques et Caractérisation des Panneaux Photovoltaïques', Revue des Energies Renouvelables, Vol. 12, N°1, pp. 105 - 116, 2009.
- [16] M. El Ouriachi, T. Mrabti, B. Tidhaf, Ka. Kassmi, F. Bagui and K. Kassmi, 'Regulation of Electric Power Provided by Photovoltaic Panels Systems', International Conference on Multimedia Computing and Systems, ICMCS'09, pp. 454 - 459, April 2-4, 2009.
- [17] T. Mrabti, M. El Ouriachi, K. Kassmi, F. Olivie et F. Bagui, 'Conception, Modélisation et Réalisation d'un Système Photovoltaïque de Moyenne Puissance', Revue des Energies Renouvelables, Vol. 11, N°4, pp. 567 - 575, 2008.
- [18] T. Mrabti, M. El Ouriachi, K. Kassmi, F. Olivie et F. Bagui, 'Amélioration du Fonctionnement des Systèmes Photovoltaïques suite aux Brusques Variations des Conditions Météorologiques et de la Charge', Revue des Energies Renouvelables, Vol. 11, N°1, pp. 107 - 117, 2008.
- [19] [http://sunwize.com/info\\_center/pdfs/shell\\_SP75\\_PC.pdf](http://sunwize.com/info_center/pdfs/shell_SP75_PC.pdf).
- [20] Site Internet Consulté, [http://sunwize.com/info\\_center/pdfs/shell\\_SP75\\_PC.pdf](http://sunwize.com/info_center/pdfs/shell_SP75_PC.pdf).
- [21] T. Mrabti, M. El Ouriachi and K. Kassmi, 'Characterization and Fine Modeling of the Electric Operation of the Photovoltaic Panels'; (en cours de publication).
- [22] E. Matagne, Document de Travail, 'Energie Solaire Photovoltaïque', Université catholique de Louvain, Faculté des Sciences Appliquées, Octobre 2000.
- [23] H. Knopf, 'Analysis, Simulation and Evaluation of Maximum Power Point Tracking (MPPT) Methods for a Solar Powered Vehicle', Thesis, Portland State University, 1999.
- [24] P. Dondon. Site web: <http://www.enseirb.fr/~dondon/puissance/flyback/Flyback.html>. Copyright 2000.