

N° d'ordre: 40/2018-C/MT

**RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE**  
**MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA**  
**RECHERCHE SCIENTIFIQUE**  
**UNIVERSITE SAAD DAHLEB DE BLIDA 1**  
**Institut d'Aéronautique et des études spatiales**  
**Département de construction Aéronautique**



## Mémoire

Présentée pour l'obtention du diplôme de

**MASTER EN AERONAUTIQUE**  
Spécialité : **Avionique**

Présentée par:

**ADDALA Salah eddine et BENNOUR Ahmed**

### THÈME

Conception et implémentation d'une commande  
MPPT de haute performance pour  
GPV embarqué

Soutenu publiquement, le 21/07/2019, devant le jury composé de:

<b>Mme. CHEGGAGA Nawal</b>	<b>Prof à l' U BLIDA</b>	<b>Promotrice</b>
<b>Mme.</b>	<b>Prof à l' U BLIDA</b>	<b>Président</b>
<b>Mr.</b>	<b>MC à l' U BLIDA</b>	<b>Examinateur</b>
<b>Mr.</b>	<b>Prof à l' U BLIDA</b>	<b>Examinateur</b>

# ***REMERCIEMENT***

Dieu merci pour m'avoir donné la santé, la volonté, le courage et la patience qui m'ont permis de réaliser ce travail.

C'est avec beaucoup de reconnaissance que j'exprime mes remerciements à mon promotrice de mémoire, **CHEGGAGA Nawal**, pour m'avoir guidé et encadré pendant cette année, Leur disponibilité, leur écoute, leur confiance et leurs encouragements ont permis d'instaurer un climat propice pour travailler.

J'adresse aussi mes sincères remerciements à tous les membres du jury qui m'ont fait l'honneur de participer à évaluer ce travail par leurs connaissances et leur esprit critique constructif.

Mes vifs remerciements à ..... Professeur à **I' U BLIDA**, de nous faire l'honneur de présider le jury de ce travail. Qu'il veuille bien trouver ici toute ma gratitude et mon respect.

Je remercie également **Prof. ....**, d'avoir accepté d'examiner ce travail et faire partie du jury.

J'ai une pensée reconnaissante pour tous mes professeurs qui, tout au long de mes études.

Pour finir, mes dernières expressions de remerciements vont tout naturellement à ma famille et mes amis, en particulier mes parents et mes frères pour leur soutien tout au long de mes études.

# Résumé

L'objectif de ce travail est une contribution de l'analyse du comportement et la maîtrise des performances d'un système photovoltaïque constitué par un module PV, un convertisseur **DC-DC** de type **BOOST**, charge et un contrôleur (**MPPT**) avec la technique perturbe et observe (**P&O**). Technique basé sur la perturbation du système par l'augmentation ou la diminution d'un pas de la tension de référence. L'adoption d'un pas adaptative a permis de réduire le temps de réponse et la puissance dissipée. Les résultats de simulation obtenue sous MATLAB/Simulink montrent la performance du contrôle dans le comportement dynamique des systèmes photovoltaïques embarqué.

Mots clés : système PV embarqué, MPPT, P&O, puissance, rayonnement.

# Abstract

The objective of this work is a contribution of the behavior analysis and the control of the performances of a photovoltaic system constituted by a PV module, a **DC-DC** converter of type **BOOST**, load and a controller (**MPPT**) with the technique disturb and observe (**P&O**). Technology-based on the disturbance of the system by the increase or decrease of a step of the reference voltage. The adoption of an adaptive pitch has made it possible to reduce the response time and the power dissipated. The simulation results obtained under MATLAB / Simulink show the control performance in the dynamic behavior of embedded photovoltaic systems.

Keywords: embedded PV system, MPPT, P & O, power, radiation.

## ملخص

الهدف من هذا العمل هو المساهمة في تحليل سلوك ومراقبة أداء النظام الكهروضوئي ، الذي يتكون من وحدة تقنية ، محول من نوع بوست ، مقاومة ومراقب ، مع التقنية الإزعاج والمراقبة هذه التقنية تعتمد على اضطراب النظام بزيادة او نقصان خطوة التوتر الاصلية . وقد مكن اعتماد خطوة متكيفة من تقليل وقت الاستجابة وتبديد الطاقة . النتائج المتحصل عليها من (مطلب / سيميلينك ) تظهر أداء التحكم في السلوك الديناميكي للأنظمة الكهروضوئية المدمجة الكلمات المفتاحية : نظام مدمج، طاقة، إشعاع، الاضطراب والمراقبة .

# Table des Matières

<b>Introduction générale</b>	<b>1</b>
<b>1 GENERALITE SUR LA PHOTOVOLTAIQUE</b>	<b>3</b>
1.1 Introduction . . . . .	3
1.2 L'énergie solaire . . . . .	3
1.3 Principes de calcul de l'énergie solaire . . . . .	5
1.4 Rayonnement solaire . . . . .	9
1.5 L'effet Photovoltaïque . . . . .	11
1.6 Caractéristiques électriques d'une cellule photovoltaïque . . . . .	12
1.7 Les différents types de cellules solaires (cellules photovoltaïque) . . . . .	14
1.8 Panneaux photovoltaïque . . . . .	15
1.8.1 L'orientation des panneaux : . . . . .	16
1.9 Conclusion . . . . .	17
<b>2 APPLICATION DE LA PHOTOVOLTAIQUE SUR LES AVIONS</b>	<b>18</b>
2.1 Introduction . . . . .	18
2.2 Qu'est ce qu'un avion solaire? . . . . .	18
2.3 Quelque type avion solaire . . . . .	19
2.4 Le principe de fonctionnement d'un avion solaire . . . . .	22
2.5 Branchement direct des panneaux sur les batteries . . . . .	23
2.5.1 Les batteries utilisées sur solar impuls . . . . .	24
2.5.2 L'expérience aéronautique de Kokam . . . . .	24
2.5.3 Un système de stockage de l'énergie amélioré pour Solar Impulse	25
2.6 Utilisation de modules MPPT : . . . . .	25
2.7 Conclusion . . . . .	26
<b>3 MODELISATION D'UN SYSTEME PHOTOVOLTAIQUE</b>	<b>27</b>
3.1 Introduction . . . . .	27
3.2 L'outil MATLAB /SIMULINK . . . . .	27

3.3	Système photovoltaïque proposé . . . . .	28
3.4	Modélisation et simulation d un systeme photovoltaïque autonome: .	29
3.5	Modélisation de l'algorithme perturbation et observation ( P& O ) : .	31
3.6	Modélisation du convertisseur boost . . . . .	34
3.7	Modélisation du système solaire avec régulateur (MPPT) alimenter a une charge . . . . .	35
3.8	Conclusion . . . . .	35
<b>4</b>	<b>SIMULATION AVEC CHANGEMENT D'ENSOLEILLEMENT ET TEMPERATURE</b>	<b>36</b>
4.1	Introduction . . . . .	36
4.2	Le fonctionnement de système photovoltaïque avec MPPT pour dif- férentes conditions météorologique avec une charge résistive . . . . .	37
4.2.1	Etude de système photovoltaïque avec CST . . . . .	37
4.3	Etude du système avec variation brusque d'enseillement et température constante . . . . .	40
4.4	Lorsque on a un changement brusque rapide d'enseillement et température constante . . . . .	44
4.5	Changement graduaele rapide d'enseillement a température con- stante avec ( $\Delta V=0.006v$ ) . . . . .	52
4.6	Changement graduel lent d enseillement à température constante avec ( $\Delta V=0.006v$ ) . . . . .	58
4.7	Etude de système variation graduelle rapide de température avec enseillement constant . . . . .	62
4.8	Variation graduelle lente de température aves enseillement constant	65
4.9	Variation brusque de température à enseillement constant . . . . .	68
4.10	Variation aléatoire de l'enseillement et température . . . . .	72
4.11	Conclusion . . . . .	75
	<b>Conclusion et Perspectives</b>	<b>76</b>

## Notations générales

Dans cette partie, nous dressons une liste non exhaustive des principales notations utilisées tout au long de ce mémoire. D'autres, plus spécifiques, seront introduites dans le texte.

$\varphi$	La latitude
$L$	La longitude
$\delta$	La déclinaison du soleil
$E$	L'irradiation solaire en ( $W/m^2$ )
$T_j$	La durée du jour exprimée en $h$
$\omega$	L'angle horaire
$H$	Temps solaire moyen
TSV	Temps solaire vrai
So	La durée et taux d'insolation
$\sigma$	Le taux d'insolation
Va	La vitesse de l'avion en $km \cdot h^{-1}$
d	Le diamètre de l'hélice en $m$
Nh	La fréquence de rotation de l'hélice en $tr \cdot min^{-1}$ .
$\eta$	Le rendement mécanique d'une hélice
I	Le courant en (A)
V	La tension en (V)
$P_{max}$	La puissance maximale produite PV (W).
$V_{max}$	Tension qui correspond à la puissance maximale (V).
$I_{max}$	Courant qui correspond à la puissance maximale (A).
$\alpha$	Le rapport cyclique de convertisseur.
$K_v$	Coefficient de température en circuit-ouvert ( $V/^\circ C$ )
$K_i$	Coefficient de température en court-circuit ( $A/^\circ C$ )
Icc	Le courant de court-circuit en (A)
Icc0	Courant de court-circuit (A)
Vco	La tension de circuit ouvert en (V)
Ns	Nombre de modules dans le panneau en série.

$N_p$	Nombre de modules dans le panneau en parallèle.
$n$	Le facteur de qualité de diode
$I_{ph}$	Courant photonique(A)
$I_d$	Courant de diode (A)
$I_{sa}$	Courant de saturation inverse de ladiode(A)
$R_S$	La résistance en série
$R_p$	La résistance shunt
$I_0$	Courant inverse de saturation de diode
$E$	L'éclairement réels et à la condition de référence [ $W/m^2$ ] ,
$E_0$	L'éclairement réels et à la condition de standard [ $W/m^2$ ]
$T$	La température de la jonction en( K)
$T_r$	La température de cellule, réelle et à la condition de référence(298K)
$q$	La constant de charge d'électron $1.620.10^{-23}C$
$K= 1.38.10^{-23}J/K$	Constant de Boltzmann

## Abréviation utilisées

PV	Panneau Photovoltaïque.
GPV	Générateur Photovoltaïque.
MPPT	Maximum Power Point Tracking.
PPM	Point de puissance maximale.
P&O	Perturbation et Observation.
DC	Courant Continu (Direct Current).
CST	Condition standard.

# Introduction générale

Durant ces dernières décennies, la consommation énergétique est en croissance dans toutes les régions du monde. En effet, d'après l'agence internationale de l'énergie, la demande mondiale d'énergie pourrait augmenter de 45% d'ici l'an 2030 [13], en raison du développement démographique et de l'industrialisation de pays comme la Chine et l'Inde dont le nombre d'habitants dépasse les 2 milliards, ce qui augmente la consommation d'électricité par habitant. Actuellement, la grande partie de la production de l'énergie électrique est basée sur des ressources non renouvelables comme le charbon, le gaz naturel et le pétrole, qui représente un grand pourcentage de la production énergétique dans le monde ce qui entrainera dans les quelques prochaines décennies un risque d'épuisement de ces ressources. En plus, la croissance de la demande d'énergie se traduit généralement par une fluctuation du prix du pétrole dans le marché mondial.

L'énergie solaire est une alternative intéressante à l'énergie des combustibles fossiles. La conversion directe du rayonnement solaire en électricité est connue sous le nom d'effet photovoltaïque. L'énergie PV se développe très rapidement. Elle est durable, propre et sans pollution de l'environnement. Elle est de nature multidisciplinaire, impliquant la mécanique, l'électronique de puissance, théorie de contrôle, et d'autres filières. D'ailleurs, on prévoit, pour commander la puissance électrique débitée, diverses méthodes : l'action sur les propriétés physicochimiques des cellules, l'action sur les trackers mécaniques d'orientation automatique des panneaux solaires, et l'action sur l'interface d'électronique de puissance qui relie le générateur PV avec sa charge. Cette dernière action est communément appelée la commande électrique des systèmes PV. Elle consiste en l'élaboration de topologies des convertisseurs statiques et de développement d'algorithmes de commande MPPT (Maximum Power Point Tracking) pour la meilleure capture de la puissance maximale.

Plusieurs travaux ont abordé le problème de la recherche du point de fonctionnement permettant de tirer le maximum d'énergie des modules PV en utilisant différentes méthodes MPPT. Cependant, la non linéarité de la caractéristique des modules PV, leurs dépendances de la température, de l'ensoleillement et le

niveau de dégradation de la caractéristique rendent l'implémentation de ces méthodes très complexe. Ces méthodes présentent aussi, lors des variations des conditions météorologiques, une mauvaise convergence ou une oscillation autour du point de puissance optimale dans les conditions normales de fonctionnement. Si le transfert de puissance entre les sources d'énergies renouvelables et la charge n'est pas optimal, l'efficacité globale du système sera grandement affectée. Les travaux de recherche se poursuivent encore pour rendre ces méthodes plus efficaces: c'est dans cette optique que s'inscrit ce thème de recherche.

L'objectif principal de ce travail est de bâtir une approche autour des chaînes de conversion PV suivi par l'optimisation du transfert énergétique entre la source d'énergie PV et le bus continu, dans le but d'améliorer le rendement des systèmes PV par le développement d'algorithmes de commande MPPT.

Dans le premier chapitre, après avoir présenté la définition de l'effet PV permettant la production d'électricité à partir d'un rayon lumineux frappant une pastille de silicium, avec quelques paramètres internes et externes influant sur la conversion d'énergie PV. également, des généralités sur les générateurs photovoltaïques (GPV)

Le second chapitre comprend l'application de la photovoltaïques dans le domaine d'aéronautique, on abordera quelques types d'avions solaires avec le principe de fonctionnement et le branchement des batteries sur les panneaux.

Le troisième chapitre est consacré pour la modélisation de l'ensemble composé de : générateur photovoltaïque (MSX 60), hacheur survolteur et la commande MPPT « perturbation et observation ».

Le quatrième chapitre renferme les résultats de la simulation du système sous différentes conditions météorologiques, La commande du système MPPT consiste donc en l'ajustement de ce convertisseur à récupérer le maximum d'énergie produite du le photo-générateur, c'est-à-dire minimiser voire éliminer les pertes d'énergie. Le modèle de la caractéristique courant- tension est non linéaire, avec des contraintes de température et l'ensoleillement qui varient d'une manière aléatoire ce qui nous confronte à un problème d'optimisation non linéaire.

# Chapitre 1

## GENERALITE SUR LA PHOTOVOLTAÏQUE

### 1.1 Introduction

Le soleil est une source énergétique quasiment illimitée, il pourrait couvrir plusieurs milliers de fois notre consommation globale d'énergie. C'est pourquoi, l'homme cherche depuis longtemps à mettre à profit cette énergie importante et diffusée sur l'ensemble de la planète, il est arrivé à réaliser ce but par le moyen dit cellule photovoltaïque.

Dans ce chapitre on va définir l'énergie solaire et quel est le principe pour calculer cette énergie a la base de quelque paramètre.

L'énergie solaire photovoltaïque provient de la transformation directe d'une partie du rayonnement solaire en énergie électrique.

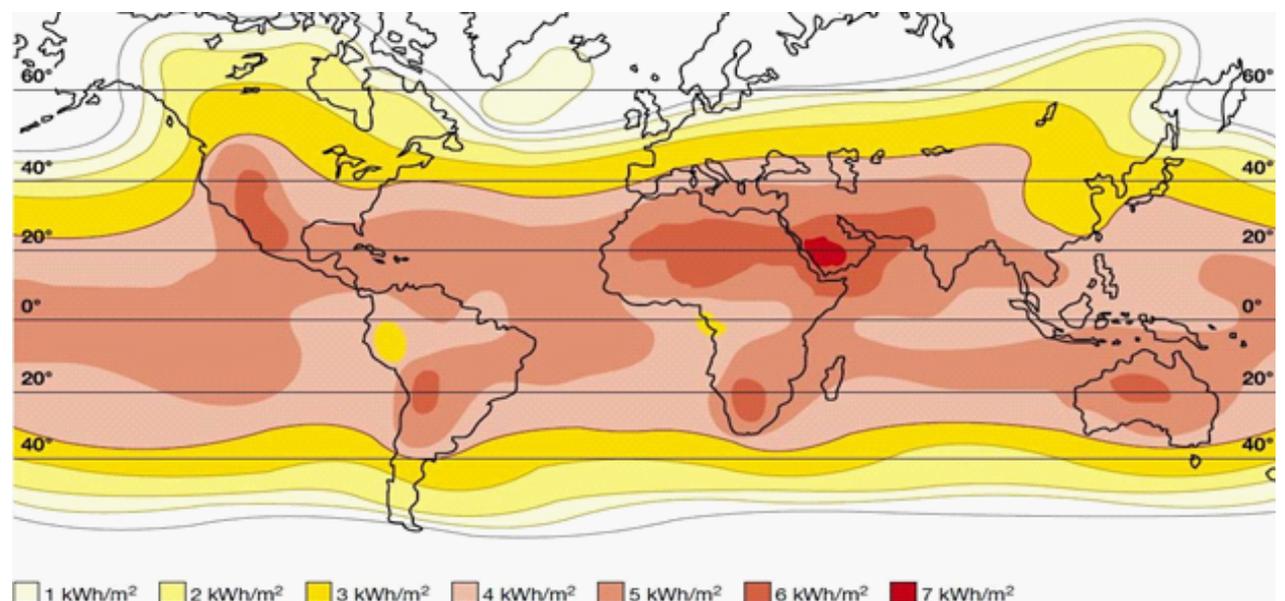
Pour comprendre le fonctionnement de cette énergie, nous effectuons dans ce chapitre un bref rappel sur le principe de l'effet photovoltaïque, la cellule photovoltaïque et ses performances ainsi le générateur solaire photovoltaïque et leurs performances.

### 1.2 L'énergie solaire

Nous commençons ce chapitre sur le rayonnement solaire avec une courte introduction sur le Soleil. Le Soleil est l'étoile centrale de notre système solaire. Il se compose principalement d'hydrogène et hélium. La masse du soleil est si grand qu'il contribue à 99,68% du total masse du système solaire avec une masse d'environ  $1,9891 \times 10^{30}$ kg, composée d'hydrogène (75% de la masse ou 92% du volume) et

d'hélium (25% de la masse ou 8% du volume). Sa température (au centre) est environ 15000000 K et la température à la surface appelée la photosphère est approximativement 6000 K. Au centre du Soleil, les conditions de pression et de température sont telles que fusion se fait. La distance entre le soleil et la terre est d'environ 149,6 millions de km. Les rayons solaires se déplacent à la vitesse de la lumière. Les photons émis par la surface du Soleil prennent en moyenne 8 minutes et 20 secondes pour se rendre du Soleil à la Terre. [2]

Le rayonnement produit par le soleil est appelé rayonnement solaire et il est défini comme la puissance par unité de surface reçue du Soleil sous forme de rayonnement électromagnétique dans la gamme de longueurs d'onde de l'instrument de mesure. L'irradiation peut être mesurée dans l'espace ou à la surface de la Terre après absorption atmosphérique et diffusion. Il est mesuré perpendiculairement à la lumière du soleil entrant et s'exprimant en mégajoules par mètre carré, MJ/m<sup>2</sup> (comme recommandé par l'Organisation météorologique mondiale) ou en watts-heures par mètre carré, Wh/m<sup>2</sup> (surtout par l'industrie solaire). Cette mesure divisée par le temps d'enregistrement fournit la mesure de densité de puissance, appelée l'éclairement énergétique/irradiance, exprimé en watts par mètre carré (W/m<sup>2</sup>). Dans ce travail, nous allons utiliser la notion d'irradiance exprimée en watts par mètre carré (W/m<sup>2</sup>).



**Figure 1.2.1:** Atlas Mondiale de l'irradiance solaire moyenne (kWh/m<sup>2</sup>/jour)

Les 3 façons importantes dont l'énergie solaire est utilisée sont :

- **Photosynthèse:** le processus bioénergétique qui permet aux plantes, aux

algues et à certaines bactéries, dites photo-autotrophes, de synthétiser de la matière organique en utilisant la lumière du soleil.

- **L'énergie solaire thermique:** qui consiste tout simplement à produire de la chaleur grâce à des panneaux sombres. On peut aussi produire avec de la vapeur à partir de la chaleur du soleil puis convertir la vapeur en électricité.
- **L'énergie solaire photovoltaïque:** qui consiste à produire directement de l'électricité à partir de la lumière à l'aide de panneaux solaires (cellules photovoltaïques).

Le rayonnement solaire absorbé par les cellules photovoltaïques est absorbé en photons. L'énergie d'un photon étant donnée par la relation:

$$E = \frac{h \cdot c}{\lambda} \quad (1.1)$$

avec

$h$  : la constante de Planck, ( $6,626070040 \times 10^{-34}$  J.s),

$c$  : la vitesse de la lumière (299792458 m /s),

$\lambda$  : La longueur d'onde du photon (m).

## 1.3 Principes de calcul de l'énergie solaire

Afin d'étudier efficacement et de faire des calculs corrects du rayonnement solaire par rapport à la composition géographique de la terre, nous devons définir certains termes qui représentent les paramètres et les processus impliqués. Ceux-ci sont:

### La latitude ( $\varphi$ )

C'est l'angle formé par le plan équatorial et la direction reliant le lieu considéré, au centre de la terre. Les latitudes de l'hémisphère Nord sont affectées d'un signe positif et celles de l'hémisphère Sud d'un signe négatif. (10)

### La longitude (I)

Représente l'angle formé par le plan méridien de lieu considéré et le plan méridien origine. Ce dernier passe par l'observatoire de Greenwich et a pour longitude 00. Les longitudes situées à l'est de ce méridien sont positives et celles situées à l'Ouest négatives. [10]

## L'altitude

L'altitude est l'élévation d'un lieu par rapport au niveau de la mer, mesurée en mètre (m).

## La déclinaison du soleil ( $\delta$ )

La déclinaison du soleil est l'angle entre la direction du soleil et le plan équatorial de la terre. La déclinaison varie entre  $-23.45^\circ$  (le 21 décembre) et  $+23.45^\circ$  (le 21 juin). Le mouvement relatif du soleil par rapport à la terre est composé d'une part d'un mouvement annuel pendant lequel la terre se déplace sur une orbite elliptique quasiment circulaire (excentricité proche de zéro) et d'autre part du mouvement de rotation de la terre sur elle-même de périodicité égale à un jour ou 24 heures. Dans ce dernier mouvement, le soleil semble décrire une trajectoire qui correspond à un parallèle situé entre les deux tropiques, celui du Cancer au solstice de juin et celui du Capricorne au solstice de décembre. La déclinaison du soleil peut donc être assimilée à la latitude du parallèle décrivant la trajectoire du soleil pour un jour donné. La déclinaison du Soleil varie selon les saisons et il est calculer avec une formule attribuée à Desmond Fletcher :

$$\delta = 23.45 \times \sin\left(\frac{2\pi}{365}(284 + J)\right) \quad (1.2)$$

avec :

$\delta$  : la déclinaison en degrés,

$J$  : le numéro du jour de l'année du calendrier. [16]

## Durée du jour

La durée du jour est par définition le temps pendant lequel le centre du disque solaire est apparent depuis un lieu situé sur un terrain « plat » à perte de vue (on dit qu'il n'y a pas de masque à l'horizon). Cela ne se produit qu'en mer, ou sur de très grandes plaines non vallonnées. En terrain accidenté on peut voir le Soleil plus ou moins longtemps selon le lieu (sommet ou vallée). Attention en raison de la diffusion de la lumière par l'atmosphère, il fait jour, au sens commun, avant le lever et après le coucher du soleil et ceci dépend des conditions météorologiques. La formule approchée suivante, exacte pour une planète sphérique sans atmosphère, ne prend pas, bien sûr, ce phénomène de diffusion atmosphérique en compte [17]

$$T_j = 24 \times \left(1 - \frac{\arccos(\tan \delta \times \tan n\varphi)}{\pi}\right) \quad (1.3)$$

avec

$T_j$  : la durée du jour exprimée en  $h$ ,

$\varphi$  : La latitude du lieu.

### L'angle horaire ( $\omega$ )

L'angle horaire est défini comme l'angle, compté positivement vers l'Est, entre la position actuelle du plan méridien local et la position de ce même méridien à midi vrai (ou entre le plan méridien local et le plan méridien qui contient le centre du Soleil à l'instant qui nous concerne) [17]

$$\omega = \frac{\pi \times (12 - H)}{12} = \pi \times \left(1 - \frac{H}{12}\right) \text{ en radians} \quad (1.4)$$

$$\omega = \frac{180 \times (12 - H)}{12} = 15 \times (12 - H) \text{ en degrés} \quad (1.5)$$

$H$  est l'heure solaire vraie,  $12h$  quand le centre du Soleil passe dans le plan méridien local.

### Temps solaire moyen

Le temps solaire moyen est l'angle horaire  $H$  d'un mobile fictif, appelé Soleil moyen, qui se déplacerait régulièrement sur l'équateur de manière que l'intervalle de temps qui s'écoulerait entre ses deux passages consécutifs en un même méridien soit égal à 24 h, durée du jour solaire moyen. [15]

### Temps solaire vrai(TSV)

Le temps solaire vrai est une mesure du temps basée sur le déplacement apparent du Soleil au cours de la journée. Le temps solaire vrai en un lieu et à un moment donné est l'angle horaire.

Angle horaire du soleil  $H$  en ce lieu et à ce moment. En découle la définition du midi solaire : c'est l'instant où le Soleil atteint son point de culmination, en un endroit donné de la Terre ; à cet instant, son angle horaire est égal à zéro. [15]

$$TSV = 12 + \frac{\omega}{15} \quad (1.6)$$

### La durée et taux d'insolation

Par ciel clair et pendant la durée de jour d'ensoleillement  $S_o$  (de lever au coucher du soleil), le sol reçoit le rayonnement solaire maximal. Mais la durée effective

d'ensoleillement  $S$  d'une journée ordinaire est inférieure à cette durée maximale. [10]

Le taux d'insolation est donné par l'expression:

$$\sigma = \frac{S}{S_o} \quad (1.7)$$

La durée maximale  $S_o$  est calculée par l'expression suivante [10]

$$S_o = \left( \frac{2}{15} \right) \cos^{-1}(-\tan \varphi \times \tan \delta) \quad (1.8)$$

avec :

$\delta$  : La déclinaison

$\varphi$  : La latitude du lieu.

### Position du soleil

La position du Soleil dans le ciel est fonction du temps et des coordonnées géographiques de l'observateur à la surface de la Terre. Comme la Terre se déplace autour du Soleil au cours de l'année, le Soleil semble se déplacer par rapport aux étoiles fixes sur la sphère céleste, le long d'un chemin appelé l'écliptique. La direction du soleil dans le ciel est repérée par l'intermédiaire de deux angles qui est:

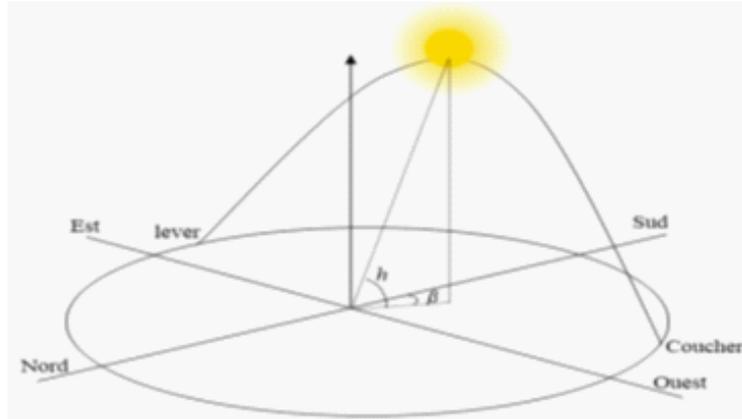
- La hauteur angulaire ( $h$ ) : Qui détermine la longueur de la traversée de la l'atmosphère est l'angle formé par la direction de soleil et le plan horizontal. Sa valeur sera comprise entre 00 (au lever et au coucher) et maximum au zénith (midi en temps solaire vrai). La hauteur  $h$  est définir par :

$$\sin h = \sin \varphi \sin \omega + \cos \varphi \cos \omega \cos \delta \quad (1.9)$$

Quand le sinus est négatif, c'est que le soleil n'est pas encore levé.

- Azimut du soleil ( $\beta$ ) : Angle que fait la projection de la direction du soleil avec la direction du sud. Cet angle étant orienté positivement vers l'Ouest. L'azimut du soleil est définir par:

$$\sin \beta = \frac{\cos \delta \times \sin \omega}{\cos h} \quad (1.10)$$



**Figure 1.3.1** : Position du soleil

## 1.4 Rayonnement solaire

Le rayonnement solaire qui arrive au sol se décompose en deux parties : L'une provient directement du soleil (direct), l'autre a été diffusée par l'atmosphère (diffus). Le rayonnement solaire est un rayonnement électromagnétique composé essentiellement:

- de lumière visible de longueur d'onde comprise entre 400nm et 800 nm.
- de rayonnement infrarouge (IR) de longueur d'onde inférieure à 400 nm.
- de rayonnement ultraviolet (UV) de longueur d'onde supérieure à 800nm.

Sur Terre, l'atmosphère (via le dioxyde de carbone, l'ozone, la vapeur d'eau...) absorbe en grande partie les IR et les UV et un peu la lumière visible. Ainsi plus l'épaisseur d'atmosphère traversée est importante, plus la quantité d'énergie solaire reçue par le sol est faible. Quand on se rapproche des pôles, les rayons sont plus inclinés : la même quantité d'énergie se répartie sur une plus grande surface. C'est pourquoi le rayonnement solaire par unité de surface reçu diminue de l'équateur vers les pôles (ceci, avec l'inclinaison de l'axe de la Terre, est à l'origine du phénomène

des saisons).

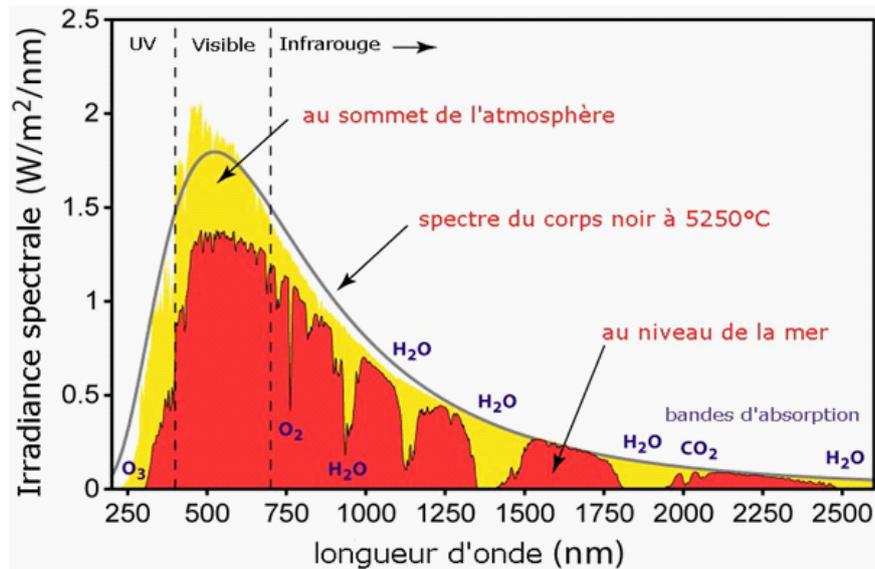


Figure 1.4.1 Spectre du rayonnement solaire

On utilise la notion AM pour Air Mass afin de caractériser le spectre solaire en termes d'énergie émise. Pour tenir compte de la distance traversée par les rayons, il est nécessaire d'introduire une notion de masse d'air (AM) elle correspond à la longueur relative du parcours à travers l'atmosphère terrestre traversée par le rayonnement solaire direct. Au niveau du sol le rayonnement global reçu par une surface plane d'inclinaison quelconque est constitué de trois composantes principales .

### Rayonnement direct

Flux solaire sous forme de rayons parallèles provenant de disque soleil sans avoir été dispersé par l'atmosphère .

### Rayonnement diffus

C'est la partie du rayonnement provenant du soleil, ayant subi multiples réflexions (dispersions), dans l'atmosphère .

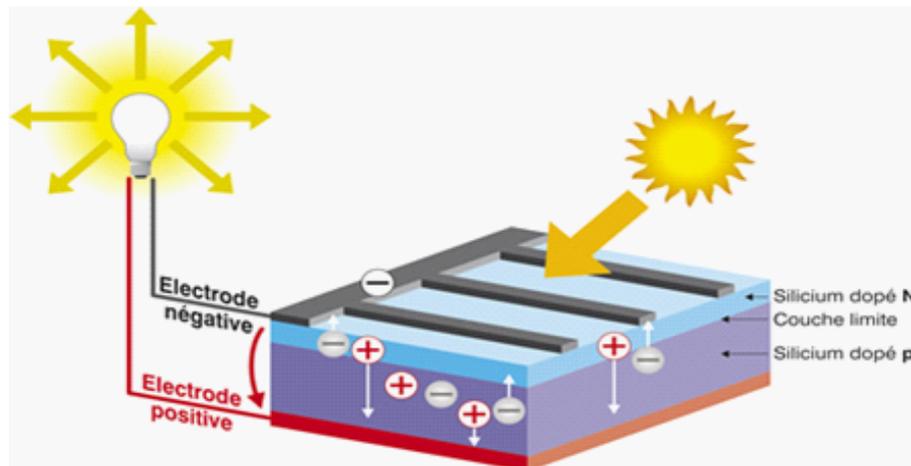
### Rayonnement réfléchi

C'est la partie de l'éclairement solaire réfléchi par le sol, ce rayonnement dépend directement de la nature du sol (nuage, sable...).Il se caractérise par un coefficient propre de la nature de lien appelé Albédo .

## Rayonnement global

Un plan reçoit de la part du sol un rayonnement global qui est le résultat de la superposition des trois compositions direct, diffus et réfléchi. Les stations météorologiques généralement mesurer le rayonnement global horizontal par un Pyromètre placé horizontalement à l'endroit requis.

## 1.5 L'effet Photovoltaïque



**Figure 1.5.1** Schéma d'une cellule solaire

L'effet photovoltaïque utilisé dans les cellules solaires permet de convertir directement l'énergie lumineuse (photons) des rayons solaires en électricité, par le biais du déplacement de charges électriques dans un matériau semi-conducteur (le silicium) ([15]). Pour augmenter la conductivité des semi-conducteurs on y introduit des impuretés. Ce procédé est appelé dopage.

### Dopage de type N

On remplace un atome de silicium par un atome pentavalent. Quatre d'entre eux assurent les liaisons avec les atomes voisins de silicium et le cinquième resté disponible va être excité vers la bande de conduction très facilement par l'agitation thermique. D'où le nombre d'électron libre qui va fortement augmenter : dans ce cas le nombre de trou est très inférieur au nombre d'électron libre. On obtient ainsi un cristal dopé N (négatif).

## Dopage de type P

De la même façon on introduit des atomes trivalents, ses trois électrons vont assurer les liaisons covalentes avec trois atomes voisins mais laisser un trou au quatrième. Ce trou se déplace de proche en proche dans le cristal pour créer un courant. Ici le nombre de trous est très supérieur au nombre d'électrons libres du cristal intrinsèque, on obtient donc un cristal dopé P (positif), les impuretés utilisées sont souvent du Bore.

## La jonction PN

Une jonction PN est l'accolement d'une région dopé P et d'une région dopée N. Lors de cet assemblage les porteurs de charges libres s'attirent et se recombinent dans la zone de jonction où les porteurs libres disparaissent : c'est la zone de transition. Il ne reste donc plus que les ions dans cette zone qui vont créent un champ électrique interne au niveau de la jonction et qui empêche les charges libres restantes dans chaque zone de traverser la jonction pour se recombiner.

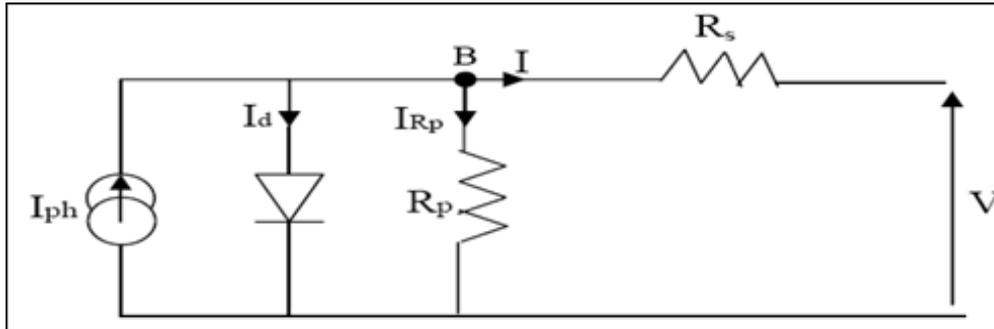
## Principe de fonctionnement

Lorsqu'un photon de la lumière arrive, son énergie crée une rupture entre un atome de silicium et un électron, modifiant les charges électriques. Les atomes, chargés positivement, vont alors dans la zone P et les électrons, chargés négativement, dans la zone N. Une différence de potentiel électrique, c'est-à-dire une tension électrique, est ainsi créée. C'est ce qu'on appelle l'effet photovoltaïque. A la surface, le contact électrique (électrode négative) est établi par la grille afin de permettre à la lumière du soleil de passer à travers les contacts et de pénétrer dans le silicium. Les cellules solaires sont recouvertes d'une couche antireflet qui protège la cellule et réduit les pertes par réflexion. C'est une couche qui donne aux cellules solaires leur aspect bleu foncé.

## 1.6 Caractéristiques électriques d'une cellule photovoltaïque

La figure présente le schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque sous éclairage. Il correspond à un générateur de courant  $I_{ph}$  monté en parallèle avec une diode. Deux résistances parasites sont introduites dans ce schéma. Ces résistances ont une certaine influence sur la caractéristique  $I = f(V)$  de la cellule

- La résistance série ( $R_s$ ) est la résistance interne de la cellule ; elle dépend principalement de la résistance du semi-conducteur utilisé, de la résistance de contact des grilles collectrices et de la résistivité de ces grilles.
- La résistance shunt ( $R_p$ ) est due à un courant de fuite au niveau de la jonction; elle dépend de la façon dont celle-ci a été réalisée.



**Figure 1.6.1** : Schéma équivalent électrique de la cellule PV

L'association en série des cellules délivre une tension égale à la somme des tensions individuelles et un courant égal à celui d'une seule cellule.

L'association en parallèle des photopiles délivre un courant égal à la somme des courants individuels et une tension égale à celle d'une seule cellule.

Un module est constitué des cellules associées en série/parallèle encapsulées et protégées par une face avant du module qui doit être en verre ayant les caractéristiques suivantes :

- bonne transparence
- résistance à l'impact et à l'abrasion (grêle, jet de pierres, vent de sable, nettoyage au chiffon).
- étanchéité à l'humidité.

L'enrobage des cellules ayant les caractéristiques suivantes :

- transparence (à l'avant)
- souplesse pour «enrober» les cellules et connexions.
- adéquation aux indices optiques du verre et des cellules.

Le matériau généralement utilisé est de l'Acétate d'éthylène-vinyl (EVA).

En Face arrière, un matériau ayant les caractéristiques suivantes :

- Protection mécanique contre le poinçonnement et les chocs (risque de mise à nu et de bris des cellules).
- étanchéité à l'humidité.
- bonne évacuation de la chaleur.
- La face arrière est généralement réalisée soit en verre (modules dits «bi-verre») soit en composite alu/teflon (plus fragile).

## 1.7 Les différents types de cellules solaires (cellules photovoltaïques)

Il existe différents types de cellules solaires ou cellules photovoltaïques. Chaque type de cellule est caractérisé par un rendement et un coût qui lui sont propres. Cependant, quelque soit le type, le rendement reste assez faible : entre 8 et 23% de l'énergie que les cellules reçoivent. Actuellement, il existe trois principaux types de cellules

### a. Les cellules monocristallines :

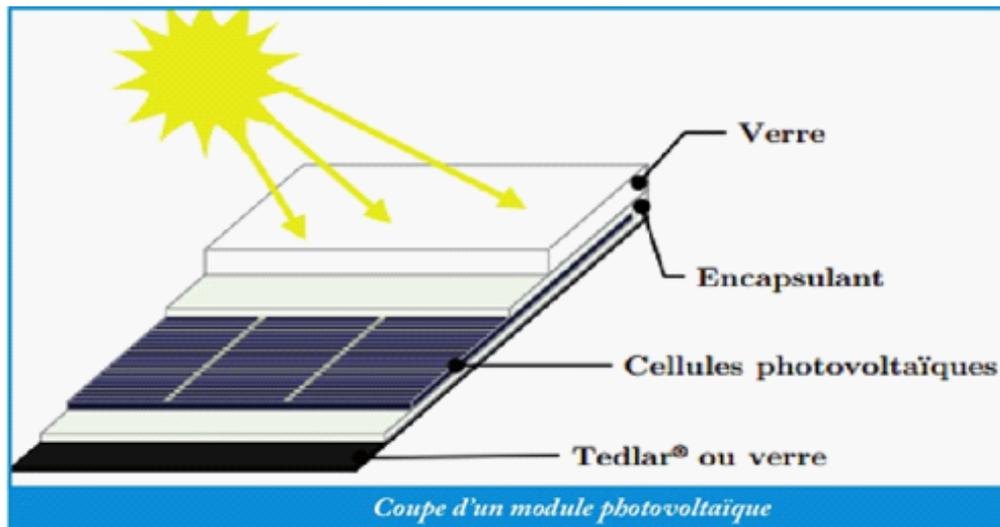
Elles ont le meilleur rendement (de 12 à 18% voir jusqu' 24% en laboratoire) Cependant, elles coûtent trop chers dues à leur fabrication complexe.

### b. Les cellules poly cristallines :

Leur conception est plus facile et leur coût de fabrication est moins important . Cependant leur rendement est plus faible ( de 11% à 15% voir jusqu'à 19.8 en laboratoire).

### c. Les cellules amorphes :

Elles ont un faible rendement (de 5% à 8% voir jusqu'13% en laboratoire) , mais ne nécessitent que de très faibles épaisseurs de silicium et ont un coût peu élevé . Elles sont utilisé couramment dans de petits produits de consommation telle que des calculatrices solaires ou encore des montres.



**Figure 1.7.1** : Coupe d'un module PV

Les modules photovoltaïques assurent les fonctions suivantes :

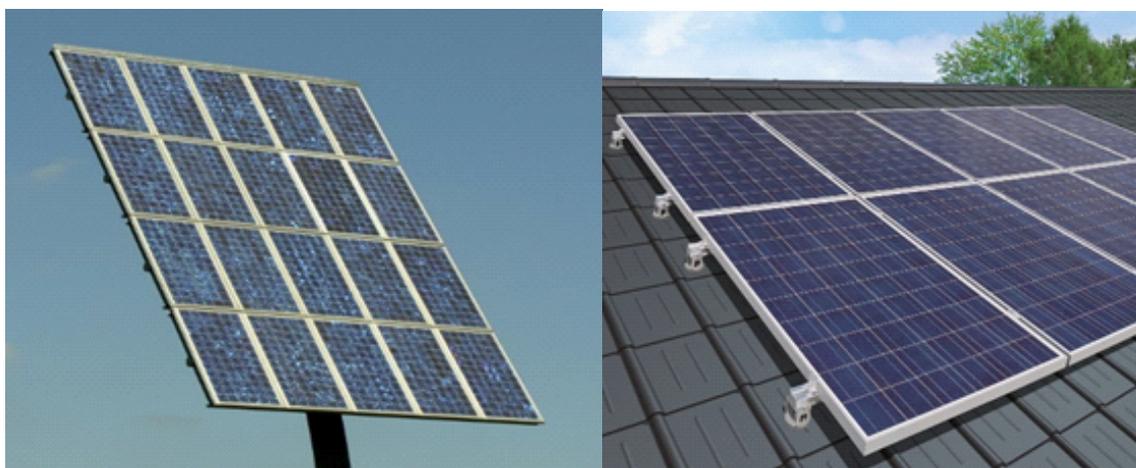
- Protection des cellules contre les agents atmosphériques
- Protection mécanique et support.
- Connexion électrique entre cellules et avec l'extérieur.

## 1.8 Panneaux photovoltaïques

La cellule photovoltaïque élémentaire constitue un générateur de très faible puissance vis-à-vis des besoins de la plupart des applications domestiques ou industrielles. Une cellule élémentaire de quelques dizaines de centimètres carrés, délivre au maximum, quelques watts sous une tension inférieure au volt (tension de jonction PN). Pour produire plus de puissance, plusieurs cellules doivent être assemblées afin de créer un module ou un panneau photovoltaïque. En effet, les modules PV sont composés d'un ensemble de cellules mises en série, réalisant la conversion proprement dite de la lumière du soleil en électricité. Ils sont eux-mêmes associés en série et parallèle pour former un champ photovoltaïque d'une puissance crête définie selon des conditions spécifiques d'éclairement, de température et de spectre solaire. La plupart des modules commercialisés sont constitués de deux à quatre réseaux de cellules en silicium cristallins connectés en série.



**Figure 1.8.1 :** Monocristallines Multi cristallines Couche mince



**Figure 1.8.2 :** Panneau Solaire

### 1.8.1 L'orientation des panneaux :

L'installation des modules peut se faire sur un toit si son orientation et son inclinaison sont bonnes ou à même le sol pour peu que l'endroit soit bien dégagé, aéré (10 cm d'espace sous les modules est vivement conseillé) et protégé. On les place habituellement avec la pente vers l'équateur (vers le sud dans l'hémisphère nord). L'inclinaison des panneaux n'est pas critique. On la prend en général égale à la latitude, avec une tolérance de 15°. La hauteur maximale du soleil variant au cours de l'année, on choisira une inclinaison supérieure ou inférieure à la latitude suivant que les besoins sont les plus importants lorsque la course du soleil est basse (éclairage, besoins importants en hiver dans l'hémisphère nord) ou haute (irrigation...) [17].

## 1.9 Conclusion

Nous allons parler au cours de ce chapitre, la définition de l'énergie solaire avec les paramètres principaux pour le calcul de l'énergie solaire, puis on a bien expliqué le principe de l'effet photovoltaïque qui dépend des caractéristiques d'une cellule photovoltaïque.

Enfinement on a parlé sur les modules photovoltaïques et on a approfondit sur la façon d'installation.

# Chapitre 2

## APPLICATION DE LA PHOTOVOLTAÏQUE SUR LES AVIONS

### 2.1 Introduction

On générale l'énergie solaire utilisé dans divers domaine comme l'électricité bâtiment, l'aéronautique .....

dans notre cas on parle sur le domaine d'aéronautique, on va définir l'avion solaire et citée quelque type d'avion, en suite on va expliquer le principe de fonctionnement et la façon de branchement des panneaux direct sur les batteries .

Finalemment on va parler sur l'utilisation de la MPPT dans l'avion solaire.

### 2.2 Qu'est ce qu'un avion solaire?

Un avion solaire est un appareil dont le moteur électrique est alimenté, complètement ou en partie, par de l'énergie qu'il capte du soleil grâce à des panneaux photovoltaïques. Disposés sur la surface de l'aile, ils convertissent l'énergie lumineuse en énergie électrique. Une cellule photovoltaïque est un composant électrique qui, exposé à la lumière, génère une tension électrique. Connecté aux panneaux, un circuit électronique assure une utilisation optimale de cette énergie afin d'alimenter le moteur qui va cette fois transformer l'énergie électrique en énergie mécanique au travers de l'hélice. Une batterie est utilisée pour stocker l'énergie supplémentaire générée par les cellules.

L'utilisation de l'énergie solaire pour propulser un avion est actuellement un sujet

d'actualité avec le projet Solar Impulse, qui a comme objectif de faire effectuer un tour du monde sans escale à un avion solaire piloté. Solar Impulse a effectué son premier vol le 7 avril 2010.



**Figure 2.2.1 :** Solar impulse

## **2.3 Quelques type avion solaire**

### **Sky-Sailor :**

André Noth a lui conçu, fabriqué et fait voler un avion sans pilote, le Sky-Sailor (3,3m d'envergure), destiné à des vols de plus de 24 heures, et ne tirant son énergie que de l'énergie solaire. Une partie du surplus d'énergie capturée de jour est stockée pour le vol de nuit, à la fois sous forme électrochimique, par l'intermédiaire de batteries, et sous forme d'énergie mécanique potentielle.



**Figure 2.3.1:** Sky-Sailor

L'énergie solaire est-elle toutefois d'un usage si simple? Rappelons tout d'abord qu'une cellule solaire convertit un flux de photons en charges électriques et éventuellement en courant, par l'intermédiaire de la création de paires électrons-trous dans la zone de transition d'une jonction PN semi-conductrice. Une description plus détaillée de ce principe est donnée plus loin dans ce document. C'est une source d'énergie à longue durée de vie ne nécessitant pas de maintenance autre qu'un nettoyage éventuel.

L'irradiation dépend de plus – dans notre cas - de la situation géographique de l'avion, de l'heure, de la date, des conditions météorologiques, de l'assiette de l'avion et de la localisation du panneau de cellules sur l'avion. A titre d'illustration.

### **Solar Impulse 2 :**

Un avion solaire pour faire le tour du monde, Voler sans carburant mais avec les rayons solaires comme unique source d'énergie de propulsion, jusqu'à cinq jours et cinq nuits de suite, avec un seul pilote à bord, le tout pour tenter de réaliser un tour du monde par étapes : c'est l'objectif du Solar Impulse 2 (SI2).

Cet avion solaire à l'envergure plus grande qu'un Boeing 747, mais léger comme une grosse voiture (2,3 tonnes), imaginé par l'aérostier-psychiatre suisse Bertrand Piccard et l'ingénieur-pilote militaire André Borschberg, a été dévoilé, mercredi 9 avril 2014, sur la base militaire de Payerne, en Suisse. Sans être absolument

révolutionnaire sur le plan scientifique, il est équipé de diverses technologies les plus novatrices utilisées dans le but d'économiser du poids. L'aile, par Exemple, a été entièrement réalisée en fibres de carbone. « Il fallait qu'elle soit plus résistante que celle du premier avion, le HB-SIA, car nous irons un peu plus vite  $90\text{km/h}$  au maximum , contre  $65\text{km/h}$  avec le prototype – mais aussi proportionnellement plus légère », explique André Borschberg .

Cellules photovoltaïques encapsulées dans le tissu de l'aile Pour former l'aile, « nous avons apposé divers éléments en carbone, et porté l'ensemble à  $65^{\circ}\text{C}$  sous desserres en plastique similaires à celles des maraîchers, pendant cinq heures, pour uniformiser l'action des colles, raconte André Borschberg. Nous avons été obligés de le faire en trois fois.» L'aile est en effet si longue – 72 m contre 64 m pour le HB-SIA – qu'il était impossible de faire autrement. Son armature est constituée de 144 nervures oblongues alignées tous les 50 cm, le long du longeron central similaire à une grosse poutre rectangulaire. Un élément qui avait cédé à l'été 2012 lors d'un test de charge, faisant prendre un an de retard au projet. « Nous sommes revenus un peu en arrière, en concevant un longeron plus solide, mais aussi un peu plus lourd », précise le pilote. Et de rappeler que le facteur poids joue un rôle crucial, surtout de nuit, lorsque l'avion ne peut utiliser que l'énergie solaire accumulée durant la journée, et que chaque kilo supplémentaire fait augmenter la consommation de « carburant ».



**Figure 2.3.2** : L'aéroplane Solar Impulse 2

L'effort d'économie de poids a aussi été réalisé dans la conception des cellules solaires, minces de  $135\ \mu\text{m}$  (millièmes de millimètre). Des cellules photovoltaïques

dont l'efficacité est à peine meilleure que celles qui équipent le premier prototype mais qui seront plus nombreuses : 17 248 contre 11 628 sur le HB-SIA. Les cellules ont par ailleurs subi un encapsulage total dans le film transparent en polymère qui constitue le dessus de l'aile. « Durant les longues étapes, nous pourrions avoir à traverser des nuages ou à voler dans une légère pluie », justifie le pilote. Avec le premier avion, les périples avaient en effet lieu par temps dégagé.

Les batteries, ces réservoirs à énergie de l'avion, toujours en lithium-polymère, « sont sensiblement les mêmes que sur le HB-SIA, si ce n'est qu'elles sont un peu meilleures, d'une puissance de  $260 Wh/kg$  contre 220 auparavant, pour un poids total de  $633kg$  ».



**Figure 2.3.3 :** Hb-Sia solar impulse

## 2.4 Le principe de fonctionnement d'un avion solaire

Ces batteries alimentent des moteurs qui ont une puissance moyenne sur 24 heures de  $15cv$ , comparable à une petite moto, et sa puissance maximale est de  $70cv$ . Les quatre moteurs sont fixés sous les ailes, avec une hélice bipale de quatre mètres de diamètre. Le rendement total de cet ensemble de moteurs est de 94%, ce qui en fait un record d'efficacité énergétique. La vitesse du Solar Impulse varie entre  $36km/h$  et  $140km/h$ , ce qui équivaut à la vitesse d'une voiture.

Le Solar Impulse 2 doit être autonome en énergie pendant plusieurs jours de vol. Le jour, des cellules photovoltaïques assurent la production de l'énergie utilisée par les moteurs. La nuit, après une phase où l'avion plane, des batteries prennent le relais et fournissent l'énergie aux moteurs. Ces mêmes batteries doivent être rechargées. Le jour, les cellules photovoltaïques ont donc un double rôle, alimenter les moteurs et recharger les batteries.

La chaîne de propulsion de l'avion est constituée d'un contrôleur, d'un moteur brushless, d'un réducteur et de l'hélice de l'avion, Le rendement mécanique  $\eta$  d'une hélice est le rapport entre la puissance de traction et la puissance qui entraîne l'hélice en rotation. Le rendement  $\eta$  dépend d'un paramètre nommé  $r$ . Ce paramètre est donné par la formule suivante :

$$r = \frac{Va}{d * Nh}$$

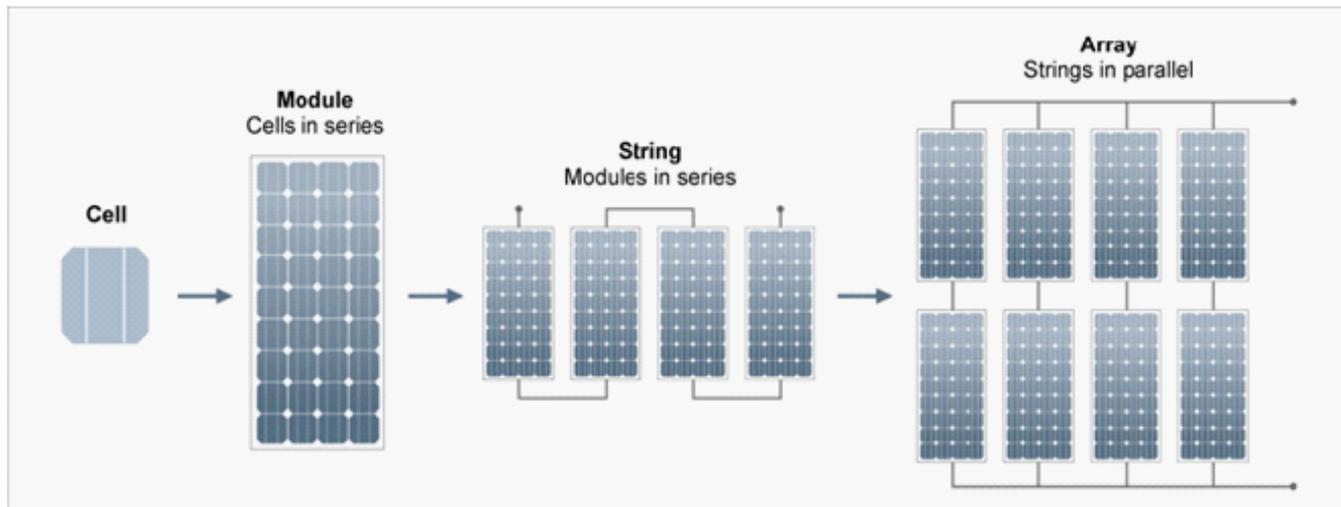
Dans cette formule,  $Va$  est la vitesse de l'avion en  $km \cdot h^{-1}$ ,  $d$  est le diamètre de l'hélice en  $m$ ,  $Nh$  est la fréquence de rotation de l'hélice en  $tr \cdot min^{-1}$ .

$\eta =$  puissance de traction/ la puissance qui entraîne l'hélice en rotation.

La fréquence de rotation du moteur correspondant à son rendement optimal est de  $4000 tr \cdot min^{-1}$ . Puisqu'elle est différente de la fréquence de rotation optimale de l'hélice, on interpose un réducteur pour que l'hélice et le moteur fonctionnent à des fréquences de rotation optimales.

## 2.5 Branchement direct des panneaux sur les batteries

Chaque cellule photovoltaïque a une tension à vide de  $0,6V$  et un courant de court-circuit de  $7,64A$ . Les cellules photovoltaïques sont regroupées en modules, strings et enfin en panneaux Chaque panneau alimente un pack de batteries. Un pack est constitué de 70 batteries montées en série. La tension délivrée par un pack est égale à  $304,5V$  à vide.



**Figure 2.5.1** : Le regroupement pour un panneaux

### 2.5.1 Les batteries utilisées sur solar impuls

Solar Impulse utilise 4 blocs de batteries NMC ultra-haute puissance de 38,5 kilowatts/heure ( $kWh$ ) de Kokam, qui ont des cellules de 150 ampères/heure, totalisant un stockage d'énergie de  $154kWh$ . Au cours des 17 vols représentant au total 26 744 miles (43041 kilomètres), les 17248 cellules photovoltaïques de Solar Impulse 2 ont produit  $11000kWh$  d'électricité, dont beaucoup ont été stockés dans ses batteries NMC ultra-haute puissance de Kokam, puis déchargés pour alimenter l'avion pendant la nuit.

### 2.5.2 L'expérience aéronautique de Kokam

En avril, Kokam a lancé une gamme de nouvelles solutions de batteries haute puissance qui s'appuient sur sa technologie de pointe de batteries NMC ultra-haute puissance pour les véhicules aériens sans pilote (UAV) et d'autres systèmes sans pilote. Par ailleurs, des dizaines de clients utilisent actuellement dans le monde entier les solutions de batteries de pointe de Kokam pour les UAV, les avions électriques et d'autres applications aéronautiques, dont les leaders de l'industrie Airbus.

### **2.5.3 Un système de stockage de l'énergie amélioré pour Solar Impulse**

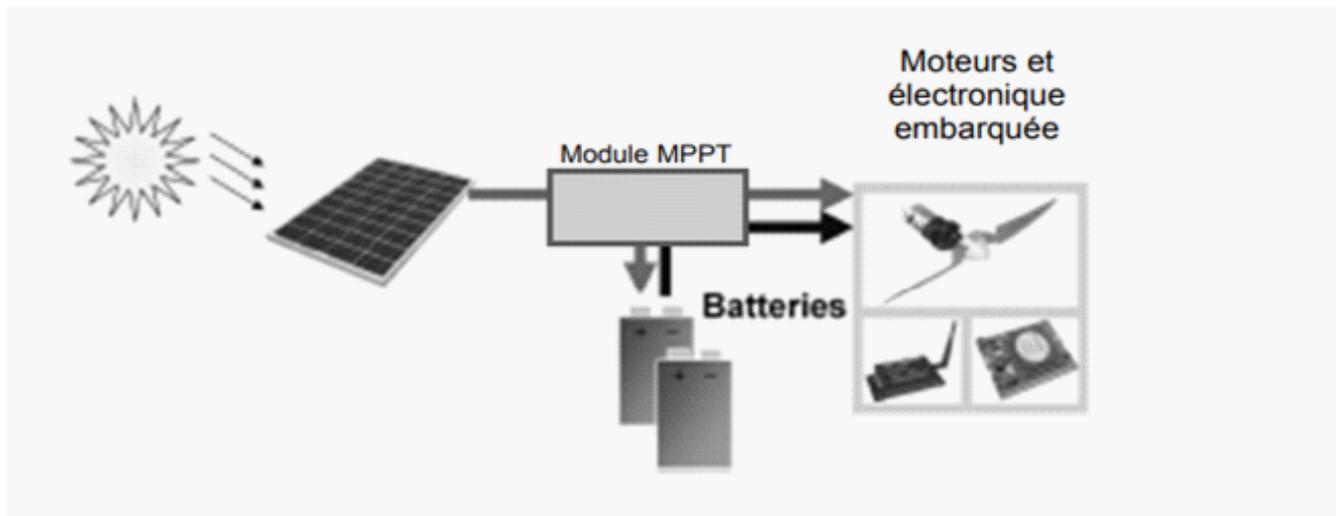
Pendant l'étape la plus difficile du vol autour du monde de Solar Impulse 2 - le vol record de 5 jours et 5 nuits entre Nagoya, au Japon et Hawaï - la température de la batterie de Solar Impulse 2 s'est élevée en raison d'un profil de vol différent de celui prévu et de la sur-isolation des gondoles (boîtiers des moteurs) par rapport à la température extérieure. Par conséquent, les batteries NMC ultra-haute puissance de Solar Impulse 2 ont atteint une température proche des 50 degrés Celsius pendant une période prolongée, une température plus élevée que celle des normes de conception.

Comme il était impossible d'écarter la perte de capacité et d'autres dégâts soufferts par les batteries dans les installations disponibles à Hawaï, l'équipe de Solar Impulse a, pour des raisons de sécurité, décidé de remplacer les batteries par de nouvelles. Des essais faits après le vol sur les batteries d'origine dans des installations en Allemagne ont déterminé que les batteries n'étaient pas endommagées, et ne présentaient qu'un léger déclin de la capacité des batteries par rapport à la capacité d'origine en novembre 2013. Compte tenu de l'utilisation des batteries pendant deux ans, ce niveau de perte de capacité est normal.

Toutefois, pour éviter une éventuelle surchauffe de ses batteries à l'avenir, l'équipe de Solar Impulse a installé un nouveau système de refroidissement conçu pour éviter tout problème lié à la température si le profil de la mission de vol change. Par ailleurs, au cas où le système de refroidissement tombe en panne, un nouveau système de secours permet au pilote d'ouvrir manuellement l'orifice du conteneur, ce qui lui permet d'utiliser l'air extérieur pour refroidir les batteries sans les laisser trop se refroidir et geler.

## **2.6 Utilisation de modules MPPT :**

Est l'abréviation de "Maximal Power Point Tracking", qui signifie en français "Recherche du Point de Puissance Maximale". Intercalé entre un panneau solaire et un pack de batteries, le module MPPT cherche en permanence à produire une tension et un courant correspondant à la puissance maximale, PMPP que peut délivrer le panneau. Afin d'extraire à chaque instant le maximum de puissance disponible aux bornes du panneau et de la transférer aux packs de batteries, on utilise des modules MPPT.



**Figure 2.6.1** : Emplacement de module MPPT

## 2.7 Conclusion

Le Solar Impulse est un avion solaire très innovant, un des premiers avions à fonctionner uniquement à l'énergie solaire et capable de voler de nuit. Il a relevé de nombreux défis, comme le tour du monde qui est en cours et détient de nombreux records. Cependant l'avion a ses limites et ne peut pas remplacer les avions de ligne que nous connaissons actuellement, par son manque de place, d'autonomie et sa vitesse. Mais des recherches pour améliorer ses capacités sont en cours et des solutions sont envisageables, des découvertes futures pourraient bien permettre à cet avion de rivaliser avec nos avions de ligne. L'utilisation de la MPPT permet de transférer la maximum de puissance délivré par le panneaux a les batteries.

# Chapitre 3

## MODELISATION D'UN SYSTEME PHOTOVOLTAIQUE

### 3.1 Introduction

Dans ce chapitre, on présentera une étude de modélisation d'un système photovoltaïque adapté par une commande MPPT numérique « perturbation et observation ». Ce système est composé d'un générateur photovoltaïque, un convertisseur survolteur « boost », une commande MPPT « perturbation et observation » ainsi qu'une charge, la modélisation a été effectuée sous le logiciel **MATLAB/Simulink**.

### 3.2 L'outil MATLAB /SIMULINK

MATLAB fait également partie d'un ensemble d'outils intégrés dédiés au traitement du Signal. En complément du noyau de calcul Matlab, l'environnement comprend des modules optionnels qui sont parfaitement intégrés à l'ensemble :

1. Une vaste gamme de bibliothèques de fonctions spécialisées (Toolboxes).
2. Simulink, un environnement puissant de modélisation basée sur les schémas-blocs et de simulation des systèmes dynamiques linéaires et non linéaires.
3. Des bibliothèques de blocs Simulations spécialisés (Blocksets).
4. D'autres modules dont un Compilateur, un générateur de code C, un accélérateur.

5. Un ensemble d'outils intégrés dédiés au Traitement du Signal : le DSP Workshop.

## SIMULINK

est une plate-forme de simulation multi-domaine et de modélisation des systèmes dynamiques. Il fournit un environnement graphique et un ensemble de bibliothèques contenant des blocs de modélisation qui permettent le design précis, la simulation, l'implémentation et le contrôle de systèmes de communications et de traitement du signal .

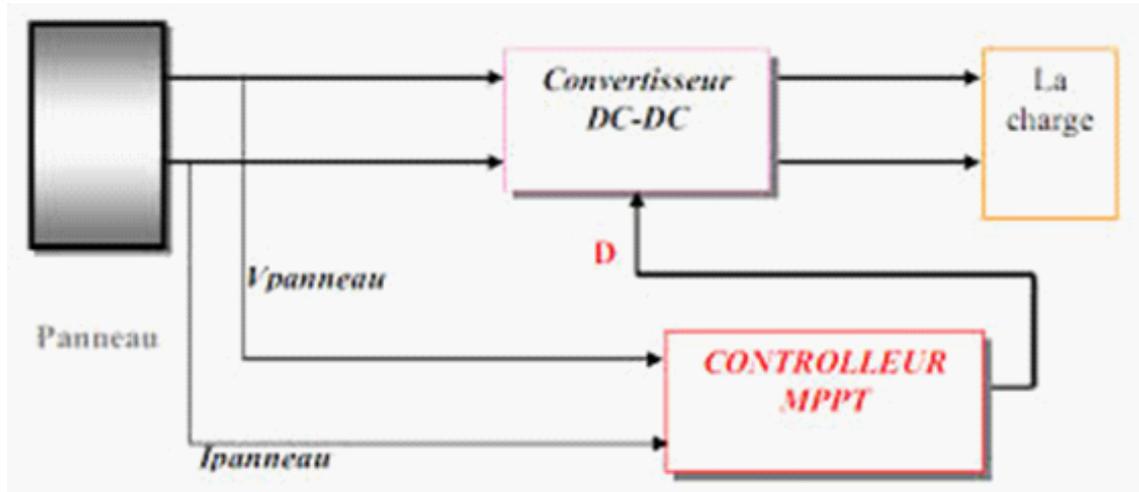
### 3.3 Système photovoltaïque proposé

- Le générateur PV (MSX 60) est en silicium monocristallin et est constitué de 36 cellules photovoltaïques élémentaires. Il peut délivrer dans les conditions standards de test (CST) une puissance de 60W, un courant de 3.5A sous une tension optimale de 17.1 V.

Puissance maximal , $P_{max}$	60W
Tension de $P_{max}$ , $V_m$	17.1V
Courant de $P_{max}$ , $I_{mp}$	3.5A
Courant de court-circuit, $I_{cc0}$	3.8A
Tension de circuit-ouvert, $V_{C_o}$	21.1V
Coefficient de température en circuit-ouvert $V_{oc}$ , $K_v$	$-80mV/^\circ C$
Coefficient de température en court-circuit $I_{cc}$ , $K_i$	$2.4mA/^\circ C$
Nombre des cellules	36

**Tableau 3.3.1:** Spécifications du module PV Solar MSX-60

- Un convertisseur d'énergie de type survolteur (Boost) pour des applications nécessitant des tensions supérieures à 24V.
- Pour la recherche de point de fonctionnement optimale de générateur PV en travail avec la MPPT (Maximum Power Point Tracking) qui dépend des conditions météorologiques et de la variation de la charge stables. Son principe de régulation est basé sur la variation automatique du rapport cyclique  $\alpha$ .



**Figure 3.3.1 :** Schéma synoptique d'un système photovoltaïque avec convertisseur (DC/DC) contrôlé par (MPPT) sur charge

### 3.4 Modélisation et simulation d un systeme photovoltaïque autonome:

Dans le cas idéal, la jonction PN soumise à l'éclairement photovoltaïque connectée à une charge peut être schématisée par un générateur de courant  $I_{cc}$  en parallèle avec une diode. Sous obscurité, l'équation de la diode est donnée:

$$I_d = \exp\left(\frac{qV}{n}\right) - 1 \quad (3.1)$$

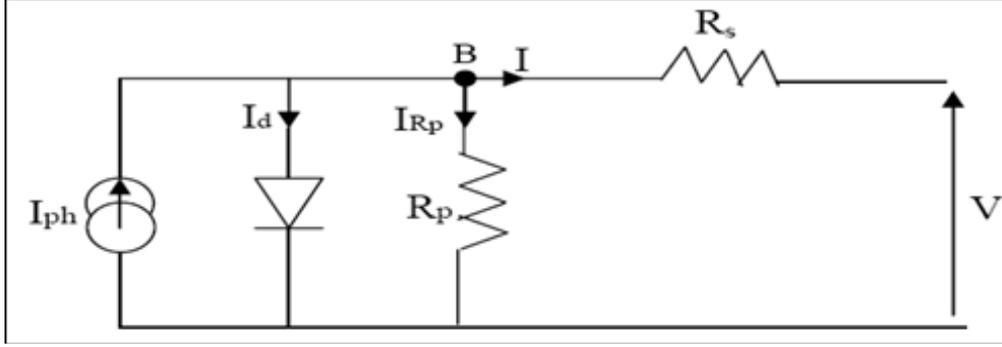
Sous éclairement, on aura :

$$I = I_{cc} - I_s \left( \exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) - 1 \right) \quad (3.2)$$

Avec :  $I_s$ , courant de saturation inverse de la diode,  
 $q$ , la charge de l'électron ( $1.610 - 19C$ ),  
 $k$ , la constante de Boltzmann ( $1.3810 - 23J/K$ ),  
 $n$ , le facteur de non idéalité de la photopile ( $1 < n < 2$ ),  
 $T$ , la température de la jonction en  $K$ ,  
 $i$ , le courant circulant dans la diode,  
 $I$ , le courant de sortie,

$V$  la tension de sortie.

En circuit ouvert, la charge tend vers l'infini et  $V$  tend vers  $V_{co}$ , qui est la tension en circuit ouvert. Lorsque les résistances de contact et les pertes ohmiques sont prises en compte comme dans le cas réel, nous devons associer au schéma équivalent une résistance série ( $R_s$ ) et une résistance parallèle ( $R_p$ ), le modèle de la cellule devient:



**Figure 3.4.1** : Circuit électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque

Ainsi l'équation (3.2) devient:

$$I = I_{ph} - I_d - I_{sh} \quad (3.3)$$

$$I = I_{ph} - I_{sat} \cdot \exp\left(\frac{R_s \cdot I}{nkT} - 1\right) - I_{sh} \quad (3.4)$$

avec

$$I_{sh} = V + \frac{R_s I}{R_p} \quad (3.5)$$

$$I_{ph} = (I_{cco} + K_i (T - T_r)) \frac{E}{E_o} \quad (3.6)$$

$$I_{cc} = \frac{I_{cco}}{\exp\left(\frac{q \cdot V_{co}}{nkT_r}\right) - 1} \quad (3.7)$$

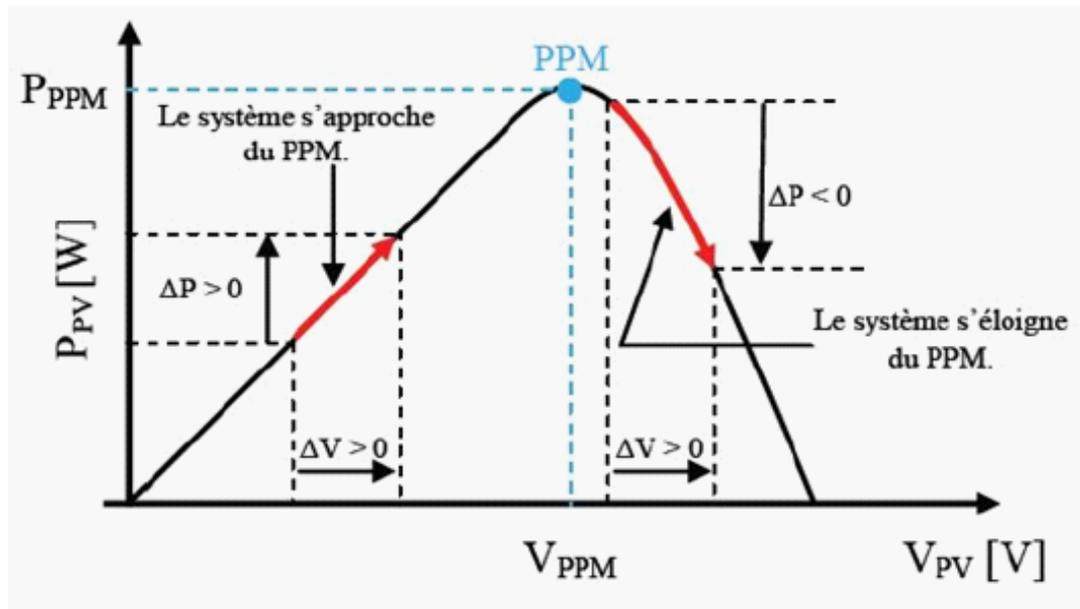
$$I_{sat} = I_{cc} \cdot \left(\frac{T}{T_r}\right)^3 \cdot \exp\left(-\frac{Eg}{nK} \left(\frac{1}{T_r} - \frac{1}{T}\right)\right). \quad (3.8)$$

On peut présenter le schéma électrique équivalent du générateur photovoltaïque (GPV) par un schéma bloc :



précédente alors on garde la même direction de perturbation précédente sinon on inverse la perturbation du cycle précédent.

Le fonctionnement de l'algorithme (P & O) est bien expliqué sur l'organigramme de la **Figure 3.4.2** :



**Figure 3.5.1** : Caractéristique puissance–tension d'un panneau photovoltaïque (P&O)

La figure suivante illustre l'organigramme de la commande MPPT de type P&O. Pour déterminer la puissance à chaque instant, deux capteurs sont nécessaires pour mesurer les valeurs de la tension et du courant.

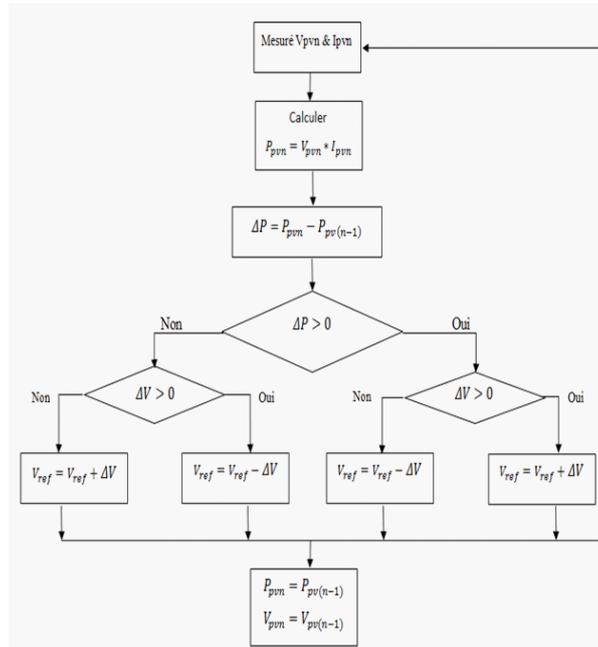
Avec :

$P_{pv(n-1)}$  : La puissance précédente dans le temps  $(t - 1)$

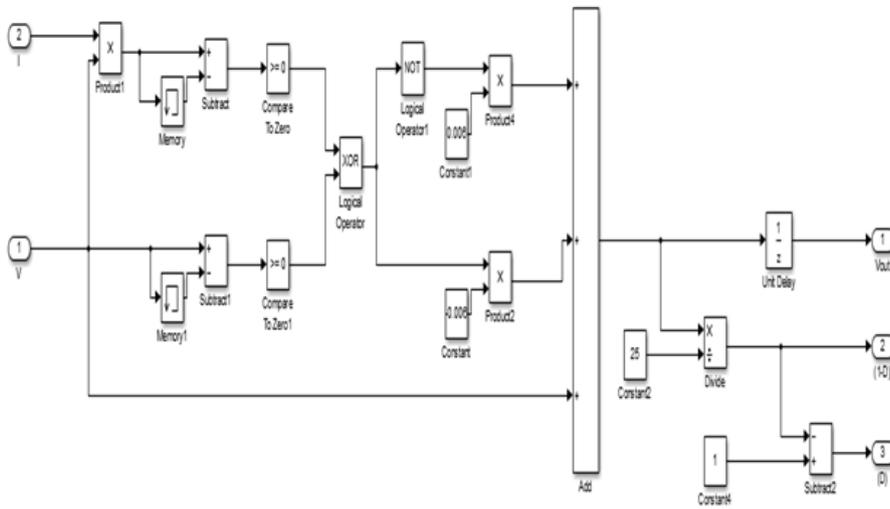
$V_{(pv(n-1))}$  : La tension précédente dans le temps  $(t - 1)$

$$\Delta V = V_{pv(n)} - V_{pv(n-1)} \quad (3.9)$$

$$\Delta P = P_{pv(n)} - P_{pv(n-1)} \quad (3.10)$$



**Figure 3.5.2:** Algorithme de MPPT à base de la méthode P&O



**Figure 3.5.3:** Modèle l'algorithme P&O sous Simulink/Matlab

### 3.6 Modélisation du convertisseur boost

Le convertisseur continu-continu est un hacheur à transistor de type parallèle donc élévateur de tension, Son rapport de transformation est, en appelant  $\alpha$  le rapport cyclique (rapport du temps pendant lequel le transistor est fermé, à la période de hachage) :

$$\frac{VS}{V} = \frac{1}{1 - \alpha} \text{ avec } \alpha < 1 \quad (3.11)$$

$$IL = i - C1 \times \frac{dV}{dt} \quad (3.12)$$

$$\frac{dVS}{dt} = \left( \frac{(1 - \alpha) * IL - Is}{C1} \right) \quad (3.13)$$

avec  $C1 = 1.7\mu F$  et  $L = 1\mu H$ .

$$\frac{dIL}{dt} = \frac{(1 - \alpha) \times VS - V}{L} \quad (3.14)$$

Ces équations sont implémentées en Simulink. Le bloc correspondant dans la figure suivante :

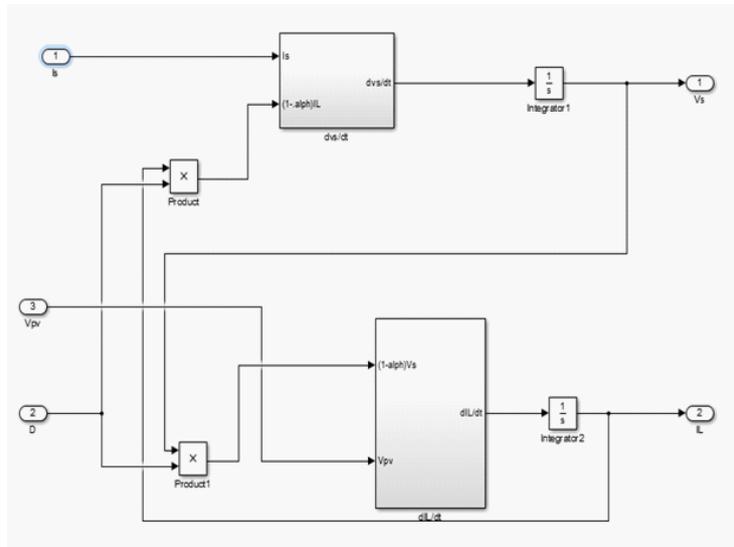


Figure 3.6.1 : Modèle de hacheur (BOOST) sous Simulink/Matlab



# Chapitre 4

## SIMULATION AVEC CHANGEMENT D'ENSOLEILLEMENT ET TEMPERATURE

### 4.1 Introduction

Ce travail a pour objectif de concevoir un banc d'essai photovoltaïque. Ce dernier est conçu principalement autour d'un convertisseur élévateur de tension statique DC/DC (Boost), qui relie le module photovoltaïque à la charge. La commande, de la recherche de point de puissance maximale choisie, maximise la puissance de sortie de ce générateur, pour différentes conditions de l'éclairement ou de la température. Dans ce chapitre, le comportement du notre système sera analysé par des simulations. Pour mieux comprendre certains régimes propres au système nous allons montrer a priori les résultats de simulation de l'ensemble charge alimenté par un générateur solaire, via un hacheur survolteur. En registre les réponses qu'il délivre le panneau solaire. Un système photovoltaïque adapté par une commande MPPT numérique (P&O), ce système contient :

- un générateur photovoltaïque.
- un convertisseur survolteur « boost ».
- une commande MPPT (P&O).
- ainsi qu'une charge.

## 4.2 Le fonctionnement de système photovoltaïque avec MPPT pour différentes conditions météorologique avec une charge résistive

### 4.2.1 Etude de système photovoltaïque avec CST

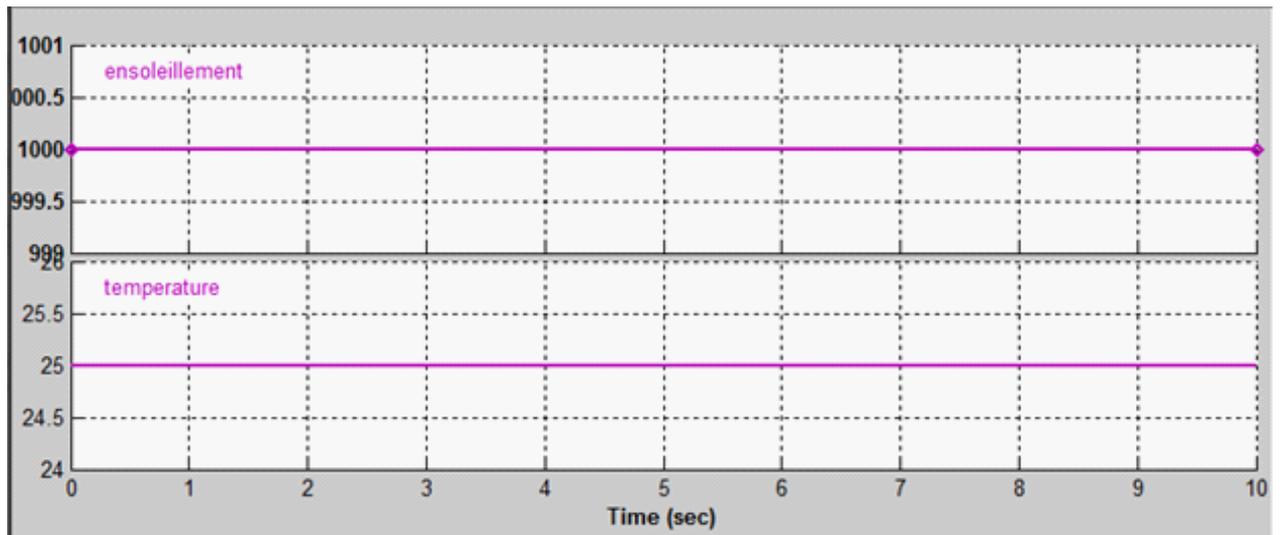


Figure 4.2.1: Condition standars

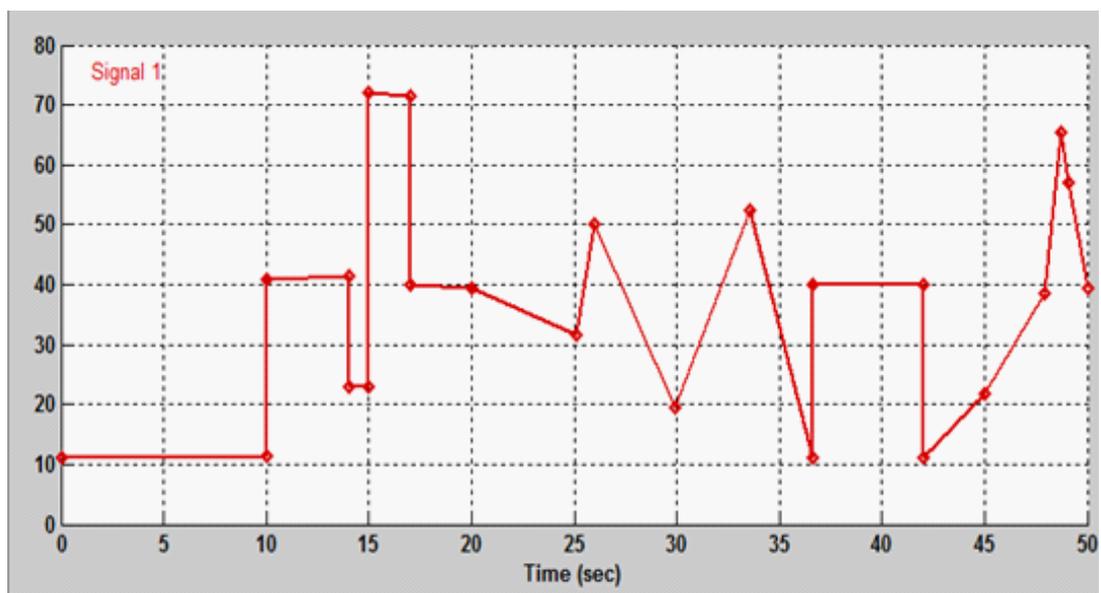
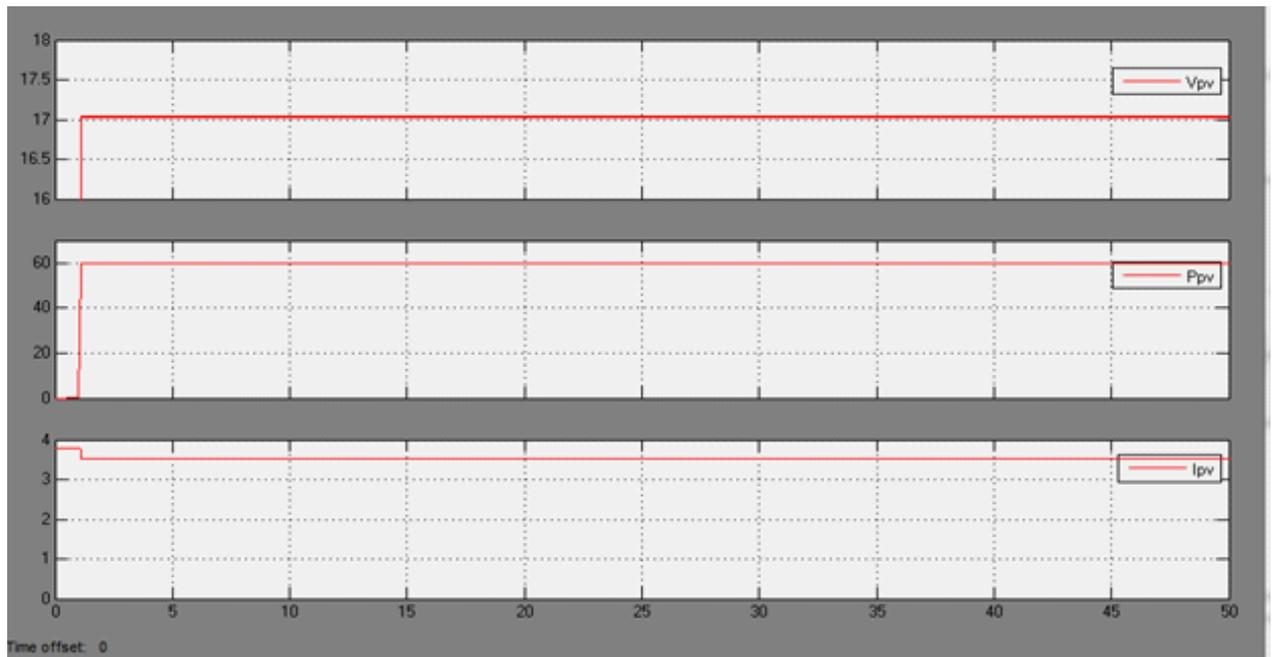
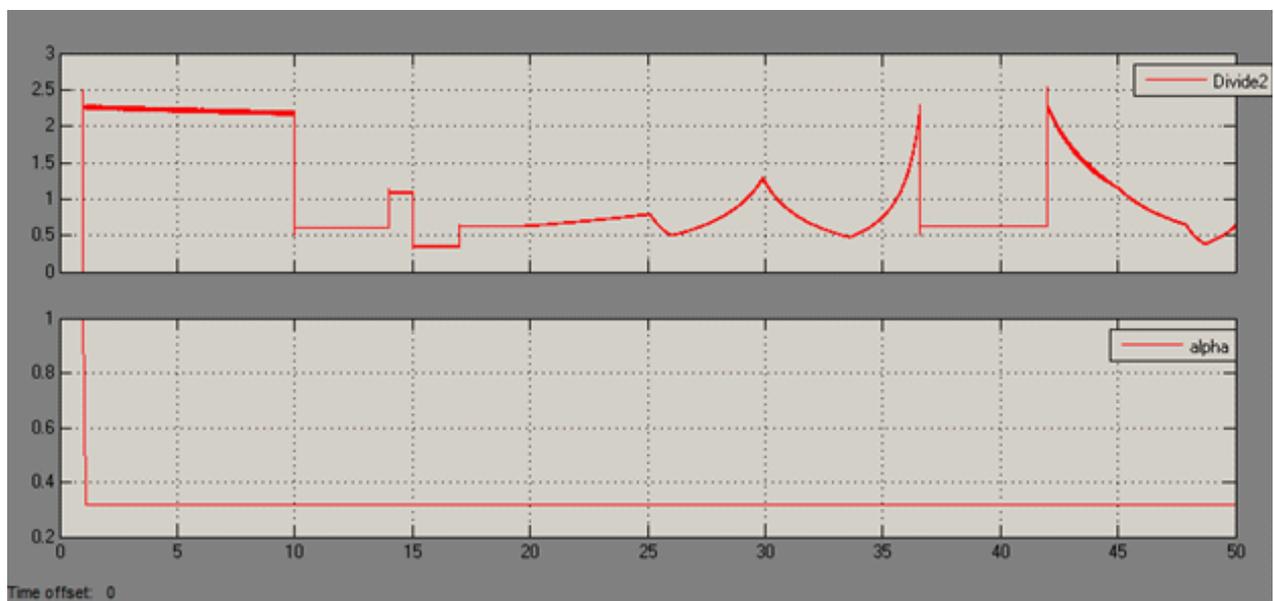


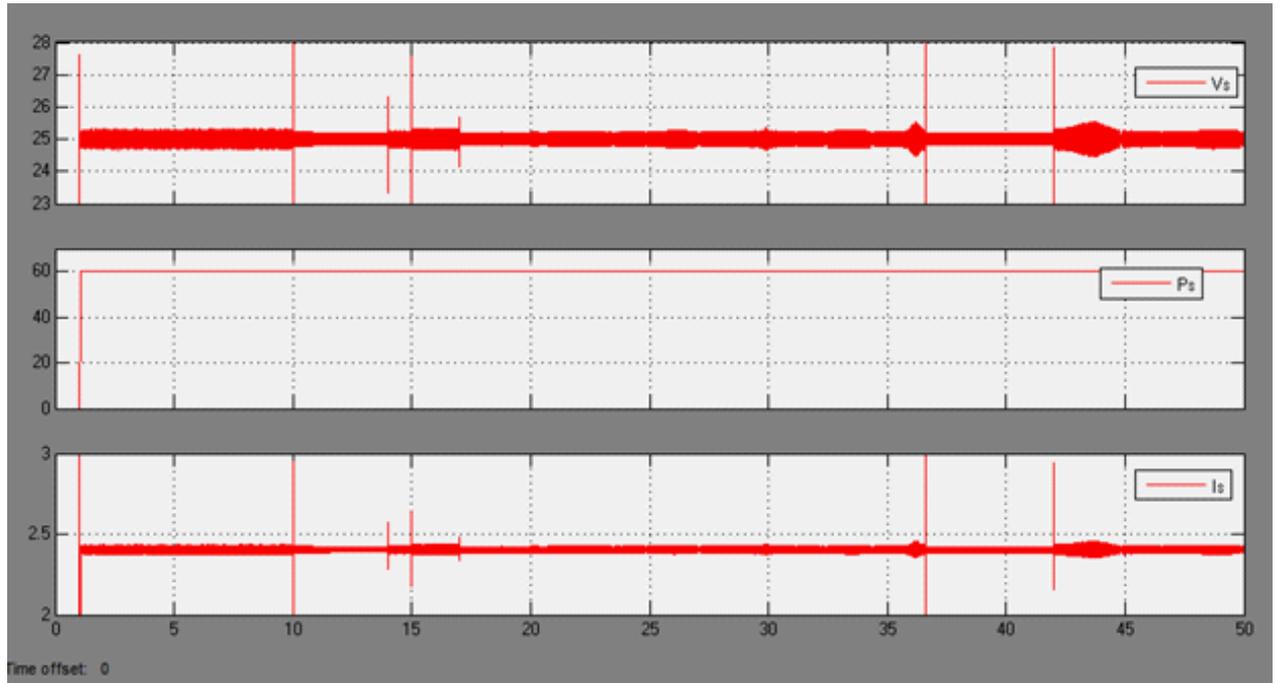
Figure 4.2.2 : La charge résistive utilisé dans le système



**Figure 4.2.3 :** Les sorties de panneau (la tension  $V_{pv}$  et la puissance  $P_{pv}$  et le courant  $I_{pv}$ ) avec  $(\Delta V = 0.006v)$  sous CST



**Figure 4.2.4 :** Le courant de sortie de la charge résistive et le rapport cyclique  $\alpha$  avec  $(\Delta V = 0.006v)$



**Figure 4.2.5 :** Les sorties du convertisseur (BOOST) (la tension  $V_s$  la puissance  $P_s$  le courant  $I_s$ ) ( $\Delta V = 0.006v$ )

La simulation montre que le panneau solaire (MSX 60) délivre une tension, un courant et une puissance avec des CST, comme présenté dans le chapitre précédent  $V = 17.1v$ ,  $I = 3.5A$ ,  $P = 50w$ , par la suite le courant de sortie de la charge résistive suit la variation de la charge et la valeur du rapport cyclique  $\alpha$ , ce qui donne la relation entre la tension du panneau et la tension de sortie du convertisseur, la puissance est conservé (panneau et convertisseur boost). Le système passe par une période transitoire après une période de stabilisation à la valeur optimale.

### 4.3 Etude du système avec variation brusque d'ensoleillement et température constante

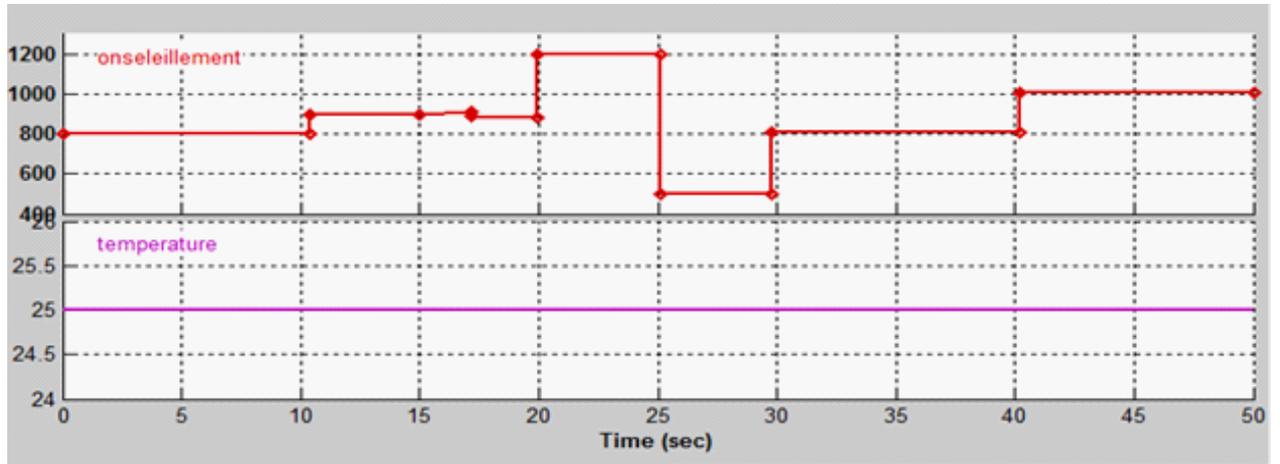


Figure 4.3.1 : Variation brusque d'ensoleillement et température constante

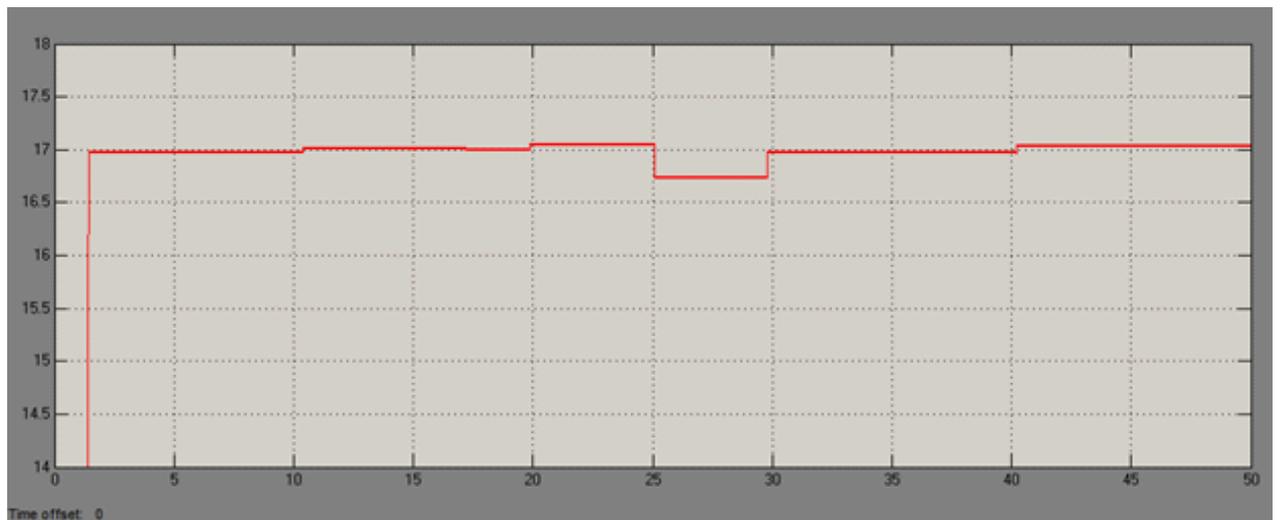
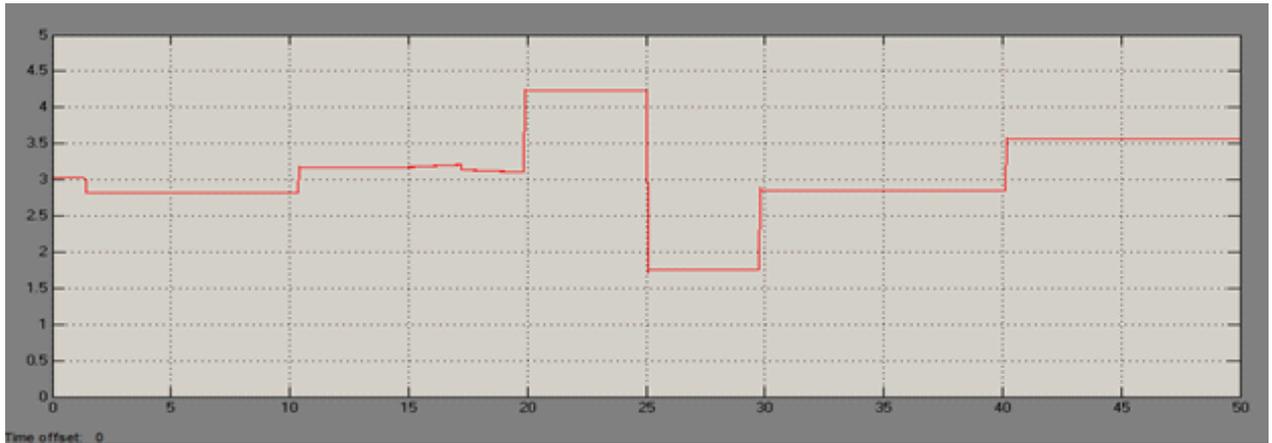
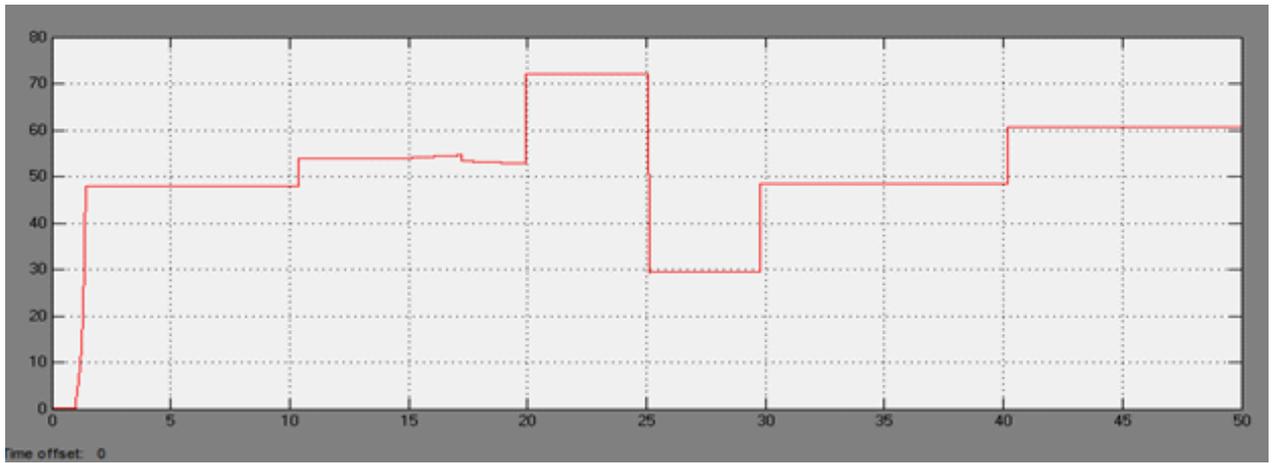


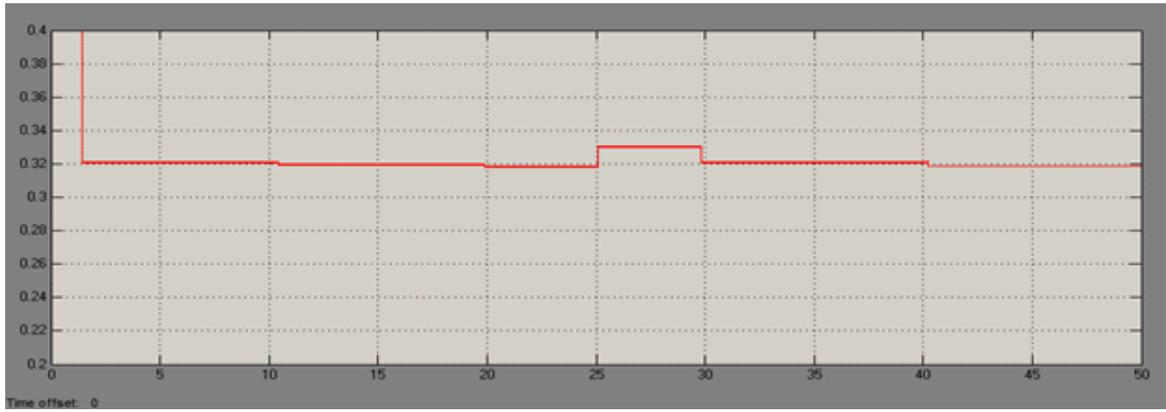
Figure 4.3.2 : La tension de sortie V Gpv



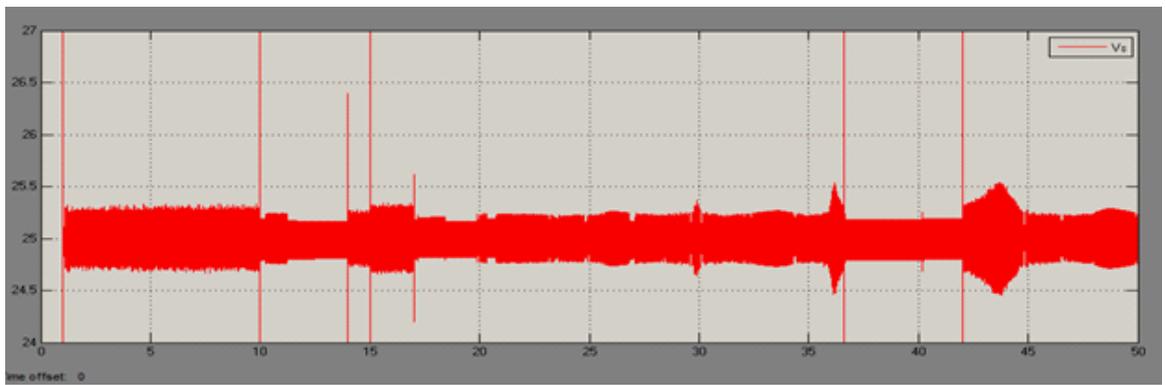
**Figure 4.3.3 :** Le courant de sortie  $I_{Gpv}$



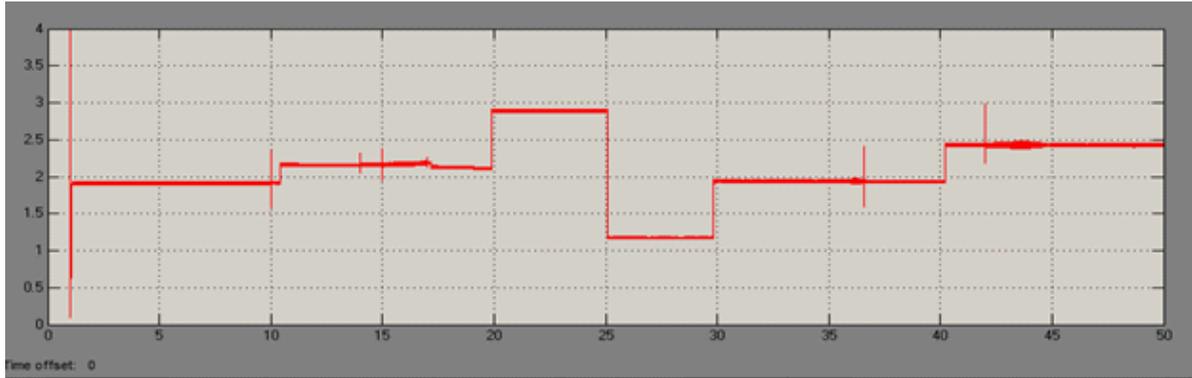
**Figure 4.3.4 :** La puissance de sortie  $P_{Gpv}$



**Figure 4.3.5** : Le rapport cycliques ( $\alpha$ )



**Figure 4.3.6** : La tension de sortie du convertisseur  $V_s$



**Figure 4.3.7 :** Le courant de sortie du convertisseur  $I_s$

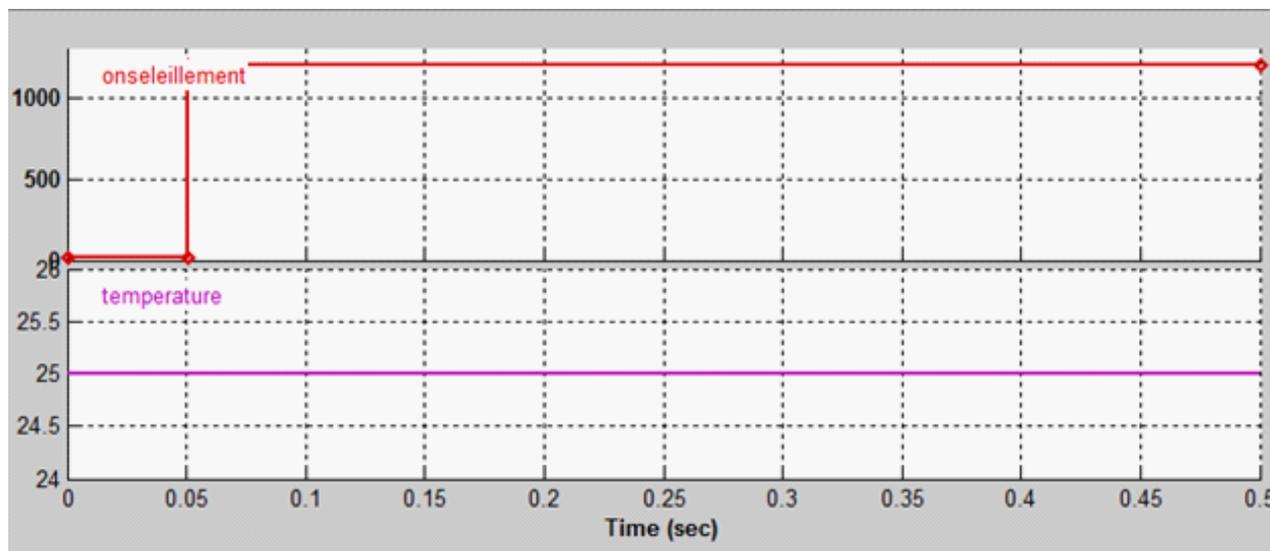


**Figure 4.3.8 :** La puissance de sortie du convertisseur  $P_s$

On remarque que la variation des conditions météorologiques influe sur le système, tous les paramètres varient avec la variation d'ensoleillement. Les deux puissances de sortie (panneau et convertisseur) augmentent par rapport à la puissance avec CST, le régulateur MPPT permet de rechercher le PPM pour différentes conditions météorologiques.

On a travaillé avec un pas constant ( $\Delta V = 0.006v$ ), on va étudier le système pour différentes valeurs de pas du point de vue du temps de réponse, les vibrations et la puissance dissipée.

## 4.4 Lorsque on a un changement brusque rapide d'ensoleillement et température constante



**Figure 4.4.1 :** Changement brusque rapide d'ensoleillement et température constante

Pour la première étude on prend 4 valeurs de pas

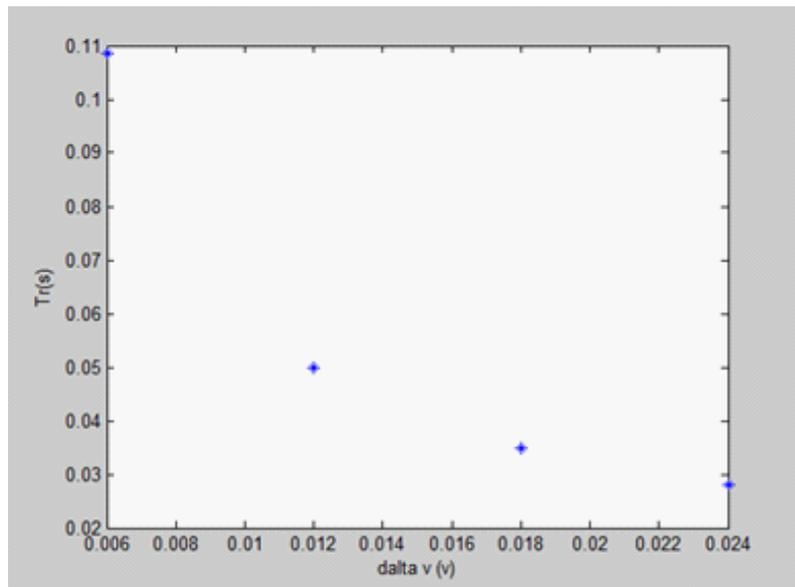
$\Delta V (v)$	$Tr (s)$	Perturbation(v)	$\Delta I (A)$	$P$ dissipée(w)
$\Delta V = 0.006$	0.1085	0.012	0.003	$3.6 \times 10^{-5}$
$\Delta V = 0.012$	0.05	0.024	0.006	$1.44 \times 10^{-4}$
$\Delta V = 0.018$	0.035	0.036	0.009	$3.24 \times 10^{-4}$
$\Delta V = 0.024$	0.028	0.048	0.012	$5.76 \times 10^{-4}$

**Tableaux 4.4.1 :** Le comportement du système pour différentes pas

$$P \text{ dissipée} = \text{perturbation} \times \Delta I$$

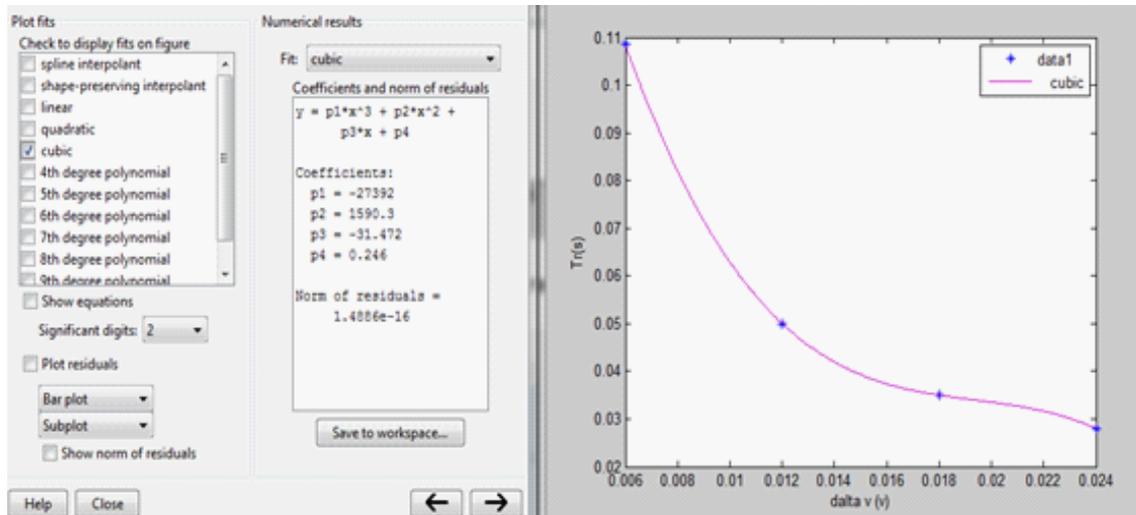
**Remarque 4.1** On remarque qu'à chaque fois que le pas augmente le temps de réponse diminue mais les perturbations et la puissance dissipée augmente.

on cherche une fonction  $Tr = f(\Delta V)$  après on implémente sur Simulink pour généraliser le pas avec MATLAB on obtient la figure suivante :



**Figure 4.4.2 :** La représentation des points sur MATLAB

Pour trouver la fonction on a besoin d'une interpolation avec le minimum d'erreur

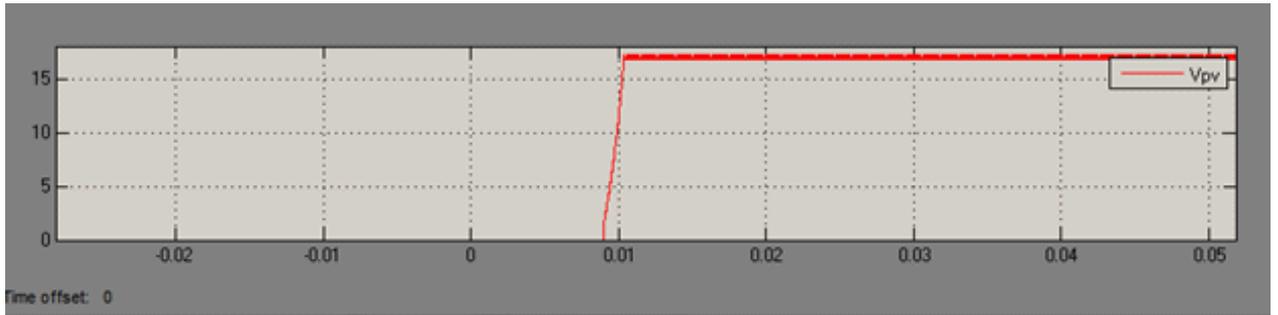


**Figure 4.4.3 :** L'interpolation choisie pour un minimum d'erreur

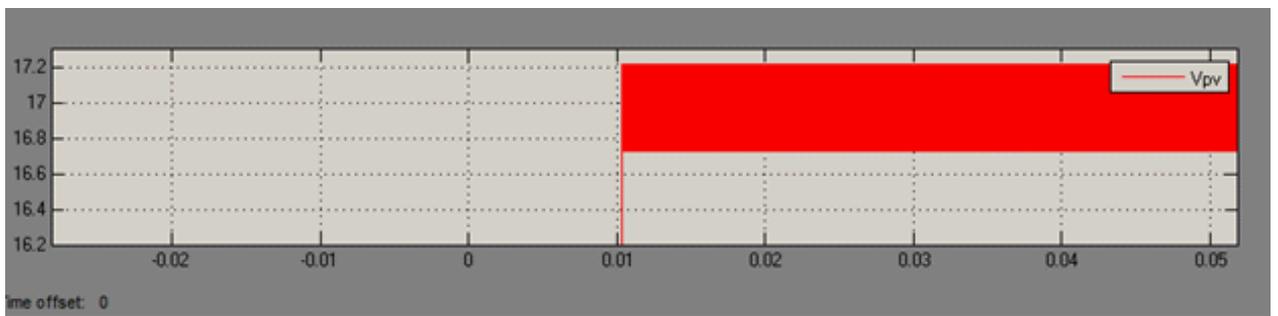
Donc la fonction  $Tr = f(\Delta V)$

$$Tr(\Delta V) = -27392 \times \Delta V^3 + 1590 \times \Delta V^2 - 31.472 \times \Delta V + 0.246$$

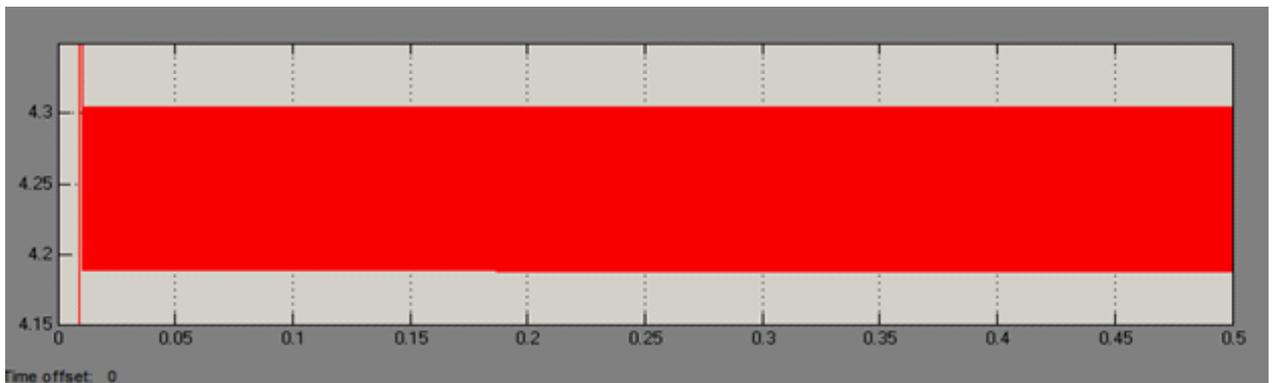
On trouve avec l'implémentation de la fonction  $Tr = f(\Delta V)$  sur le simulink



**Figure 4.4.4 :** Le temps de réponse par l'implémentation de  $Tr = f(\Delta V)$



**Figure 4.4.5 :** Les perturbations de tension par l'implémentation de  $Tr = f(\Delta V)$



**Figure 4.4.6 :** Les perturbations de courant par l'implémentation de  $Tr = f(\Delta V)$

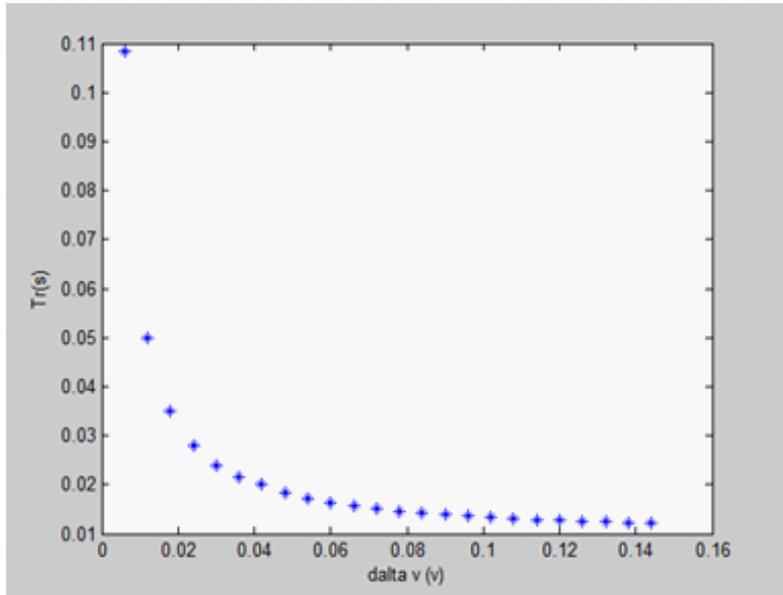
A partir des figures (**Figure 4.4.4** , **Figure 4.4.5** , **Figure 4.4.6** ) on trouve :  $Tr = 0.01s$  , perturbation =  $0.42v$  , P dissipée =  $0.0495w$ .

Pour plus de précision de la fonction  $Tr = f(\Delta V)$  il faut augmenter le nombre de pas utilisé, dans notre cas on choisit 24 points.

$\Delta V (v)$	$Tr (s)$	Perturbation( $v$ )	$\Delta I (A)$	$P$ dissipée(w)
$\Delta V = 0.006$	0.1085	0.012	0.003	$3.6 \times 10^{-5}$
$\Delta V = 0.012$	0.05	0.024	0.006	$1.44 \times 10^{-4}$
$\Delta V = 0.018$	0.035	0.036	0.009	$3.24 \times 10^{-4}$
$\Delta V = 0.024$	0.028	0.048	0.012	$5.76 \times 10^{-4}$
$\Delta V = 0.03$	0.024	0.06	0.014	$8.4 \times 10^{-4}$
$\Delta V = 0.036$	0.0215	0.072	0.018	$1.296 \times 10^{-3}$
$\Delta V = 0.042$	0.02	0.084	0.02	$1.68 \times 10^{-3}$
$\Delta V = 0.048$	0.0182	0.096	0.024	$2.304 \times 10^{-3}$
$\Delta V = 0.054$	0.0172	0.108	0.027	$2.916 \times 10^{-3}$
$\Delta V = 0.06$	0.0164	0.12	0.03	$3.6 \times 10^{-3}$
$\Delta V = 0.066$	0.0156	0.132	0.032	$4.224 \times 10^{-3}$
$\Delta V = 0.072$	0.015	0.144	0.036	$5.184 \times 10^{-3}$
$\Delta V = 0.078$	0.0146	0.156	0.04	$6.24 \times 10^{-3}$
$\Delta V = 0.084$	0.0142	0.168	0.042	$7.056 \times 10^{-3}$
$\Delta V = 0.09$	0.0139	0.18	0.044	$7.92 \times 10^{-3}$
$\Delta V = 0.096$	0.0136	0.192	0.049	$9.408 \times 10^{-3}$
$\Delta V = 0.102$	0.0133	0.204	0.05	$1.02 \times 10^{-2}$
$\Delta V = 0.108$	0.0131	0.216	0.054	$1.6664 \times 10^{-2}$
$\Delta V = 0.114$	0.0129	0.228	0.056	$1.2768 \times 10^{-2}$
$\Delta V = 0.120$	0.0127	0.24	0.058	$1.392 \times 10^{-2}$
$\Delta V = 0.126$	0.0126	0.252	0.06	$1.512 \times 10^{-2}$
$\Delta V = 0.132$	0.0125	0.264	0.064	$1.6896 \times 10^{-3}$
$\Delta V = 0.138$	0.0123	0.276	0.066	$1.8216 \times 10^{-3}$
$\Delta V = 0.144$	0.0122	0.288	0.07	$2.016 \times 10^{-3}$

**Tableau 4.4.2:** Les différents pas avec leurs perturbations de tension, de courant et la puissance dissipée

On utilise le MATLABE pour présenter  $Tr = f(\Delta V)$

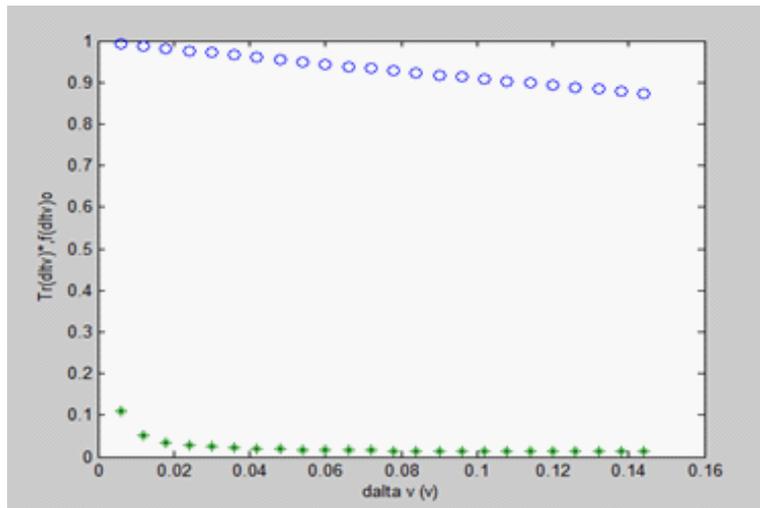


**Figure 4.4.7 :** La courbe de  $Tr = f(\Delta V)$

On voit qu'on peut estimer plusieurs fonctions à cette courbe par exemple :  
 $\frac{1}{x}$ ,  $\frac{1}{\sqrt{x}}$ ,  $\frac{1}{x+1}$ , ...

On travail avec

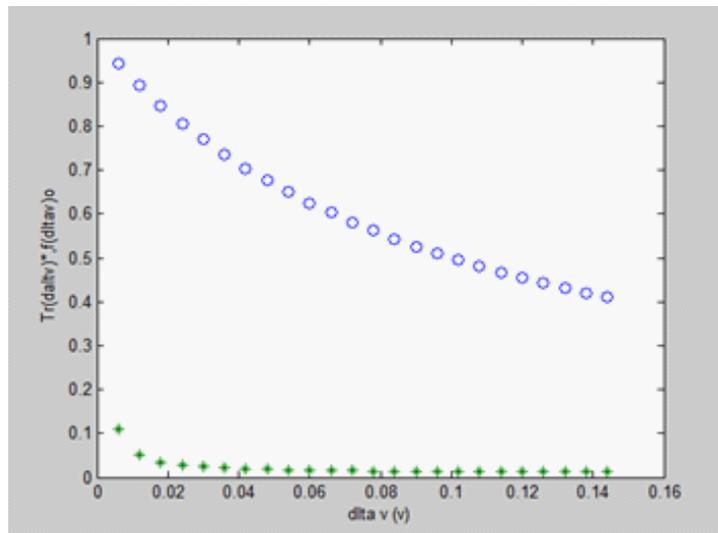
$$f(\Delta V) = \frac{1}{\Delta V + 1}. \quad (4.1)$$



**Figure 4.4.8:** L'écart entre les deux fonctions

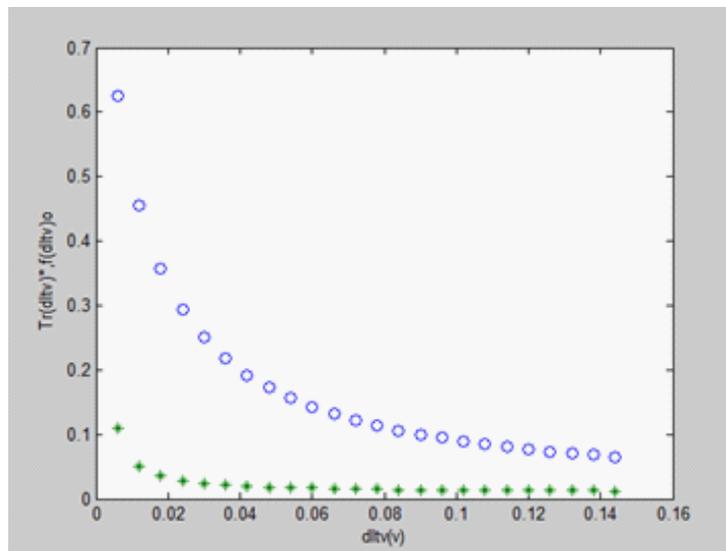
Il faut jouer sur la fonction  $f(\Delta V) = \frac{1}{\Delta V + 1}$  pour approcher a  $Tr = f(\Delta V)$

Pour  $f(\Delta V) = \frac{1}{1+10 \times \Delta V}$



**Figure 4.4.9 :** L'écart après un changement sur  $f(\Delta V)$

Pour  $f(\Delta V) = \frac{1}{1+100 \times \Delta V}$



**Figure 4.4.10 :** L'écart après un autre changement sur  $f(\Delta V)$

Donc pour diminuer l'erreur avec les deux fonctions on calcule le rapport de chaque deux points ( $f(\Delta V)/Tr(\Delta V)$ ) , en suite on calcule la moyenne du rapport, après on multiplie la moyenne par la fonction  $f(\Delta V) = \frac{1}{1 + 100 \times \Delta V}$ .

$Tr(\Delta V)$	$(\Delta V) = \frac{1}{1 + 100 \times \Delta V}$	Rapport = $\frac{f(\Delta V)}{Tr(\Delta V)}$
0.1085	0.625	5.76
0.05	0.4545	9.09
0.035	0.3571	10.20
0.028	0.2941	10.50
0.024	0.25	10.41
0.0215	0.2174	10.11
0.02	0.1923	9.615
0.0182	0.1724	9.472
0.0172	0.1563	9.087
0.0164	0.1429	8.713
0.0156	0.1316	8.435
0.015	0.1220	8.133
0.0146	0.1136	7.78
0.0142	0.1064	7.4929
0.0139	0.1	7.352
0.0136	0.0943	6.9338
0.0133	0.0893	6.7142
0.01315	0.0847	6.4410
0.0129	0.0806	6.248
0.01279	0.0769	6.012
0.0126	0.0735	5.833
0.0125	0.0704	5.632
0.0123	0.0676	5.495
0.0122	0.0649	5.319

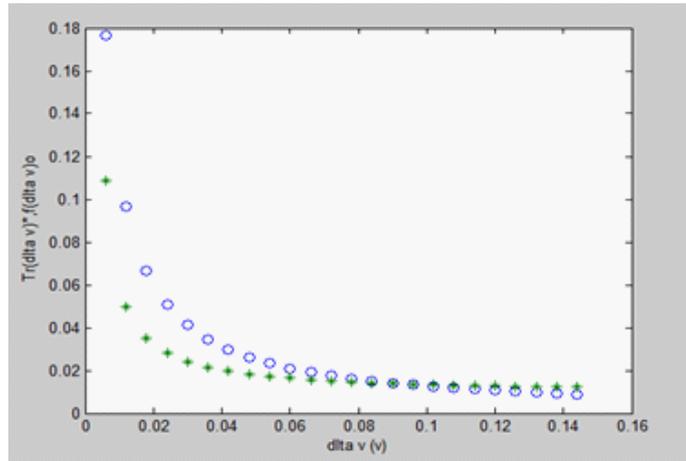
**Tableau 4.4.3:** les valeur de deux fonctions  $Tr$  et  $f(\Delta V)$  avec le rapport  $f(\Delta V)/Tr$

$$\text{Moyenne} = \frac{\left(\sum_{k=0}^n \text{rapport}\right)}{n} \text{ avec } n = 24$$

$$\text{Moyenne} = 7.7820$$

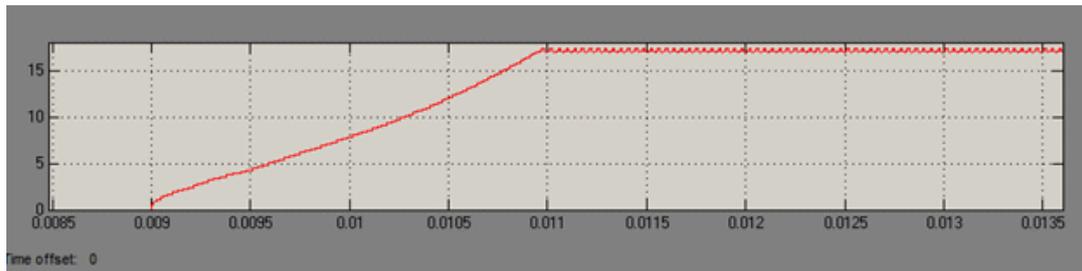
$$\text{donc la fonction } f(\Delta V) = \frac{1}{1 + 778.20 \times \Delta V}$$

La représentation de  $f(\Delta V)$  et  $Tr(\Delta V)$

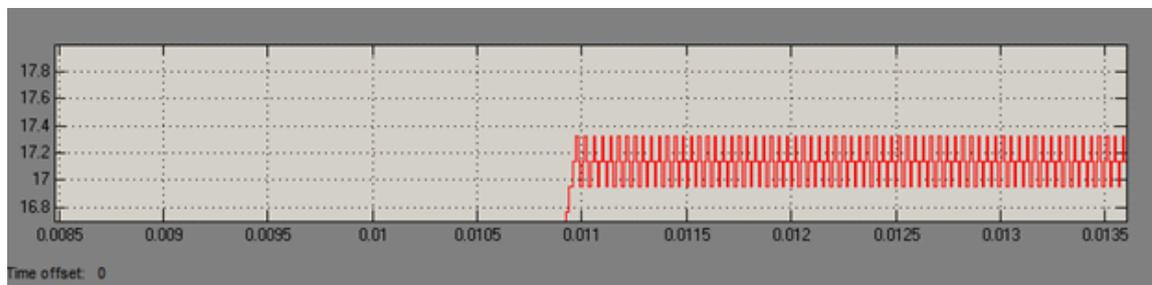


**Figure 4.4.11 :** L'écart finale entre les deux fonctions  $f(\Delta V)$  et  $Tr(\Delta V)$

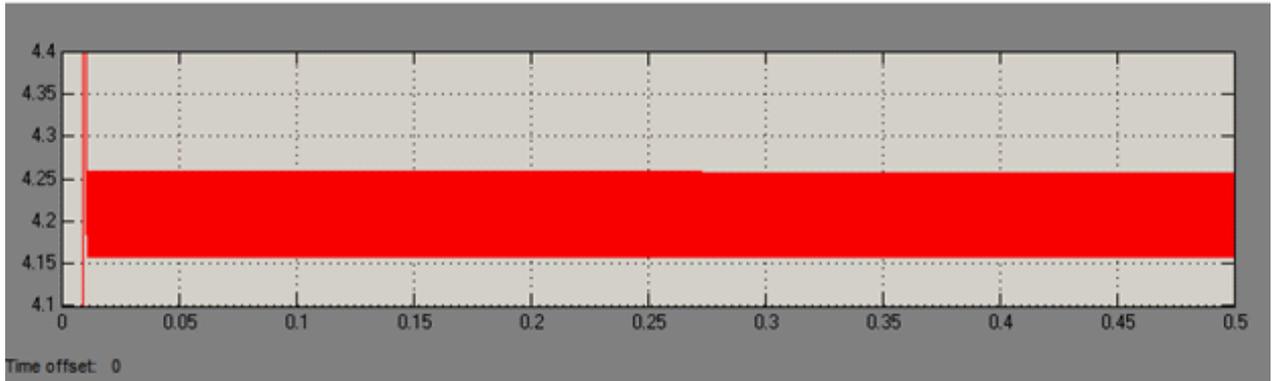
On implémente la fonction  $f(\Delta V) = \frac{1}{1 + 778.20 \times \Delta V}$  dans Simulink



**Figure 4.4.12 :** Le temps de réponse



**Figure 4.4.13:** Les perturbation de tension



**Figure 4.4.14** : Les perturbations de courant

Le temps de réponse de la (**Figure 4.4.4**) presque le même avec (**Figure 4.4.12**) par contre les perturbations et la puissance dissipée de (**Figure 4.4.13** , **Figure 4.4.14** ) mieux que (**Figure 4.4.5** , **Figure 4.4.6** )

Donc la fonction  $f(\Delta V)$  permet d'améliorer le système (moins des perturbations et des pertes) .

## 4.5 Changement graduel et rapide d'ensoleillement à température constante avec ( $\Delta V=0.006v$ )

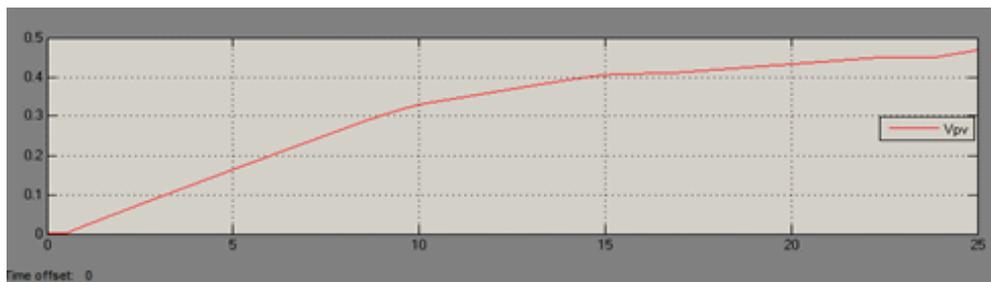


**Figure 4.5.1** : Variation graduelle et rapide d'ensoleillement à température constante

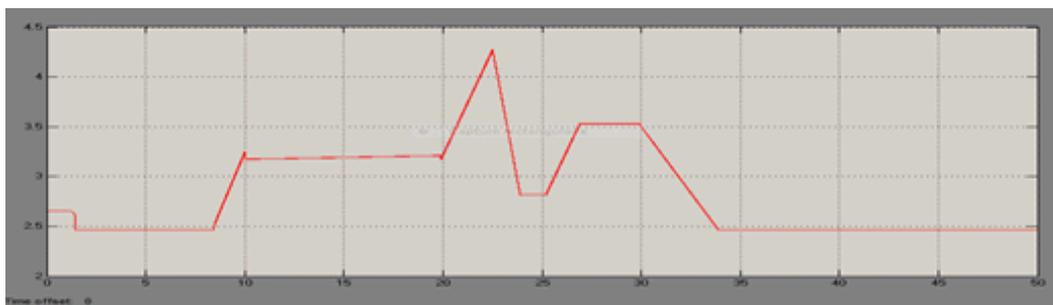


**Figure 4.5.2 :** la tension de sortie  $V_{Gpv}$  avec ( $\Delta V=0.006v$ )

Avec l'implémentation de la fonction  $f(\Delta V)$ .



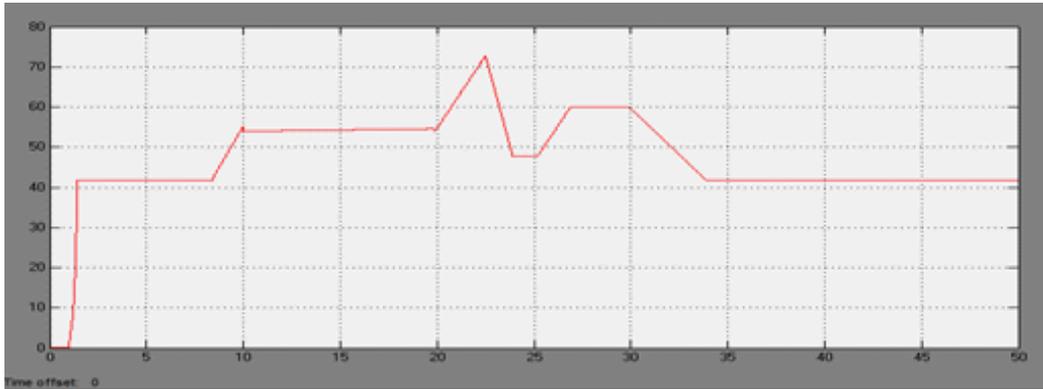
**Figure 4.5.3 :** la tension de sortie  $V_{Gpv}$  avec l'implémentation de la fonction  $f(\Delta V)$ .



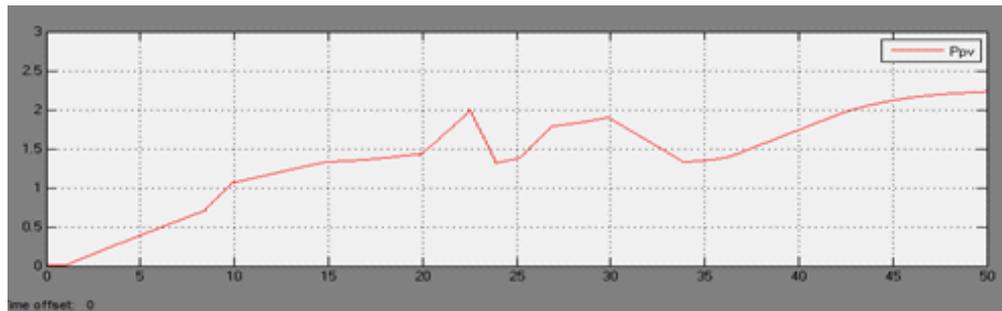
**Figure 4.5.4 :** Le courant de sortie  $I_{Gpv}$  avec ( $\Delta V=0.006v$ )



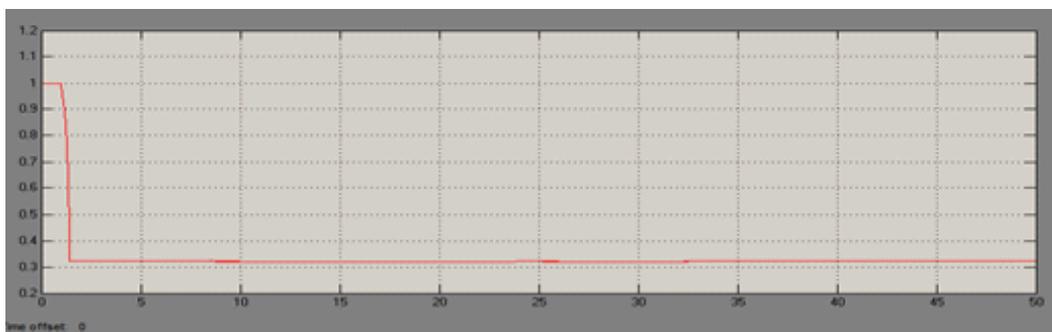
**Figure 4.5.5 :** Le courant de sortie  $I_{Gpv}$  avec l'implémentation de la fonction  $f(\Delta V)$ .



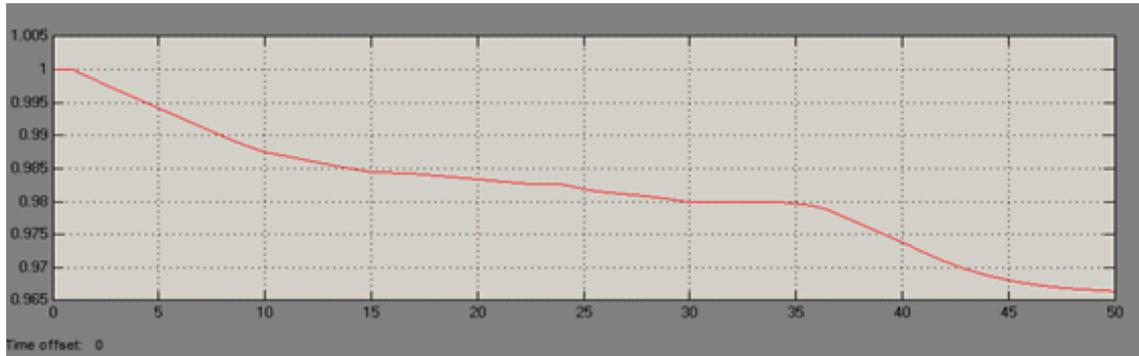
**Figure 4.5.6 :** la puissance de sortie  $P_{Gpv}$  avec  $(\Delta V=0.006v)$



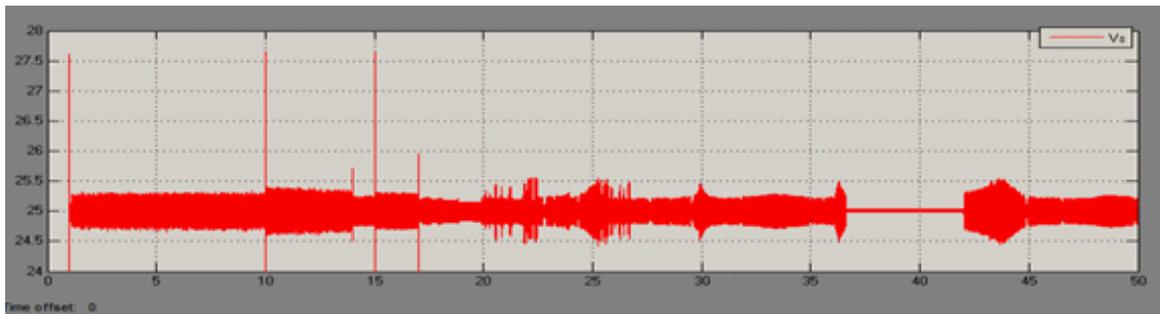
**Figure 4.5.7** : la puissance de sortie P Gpv avec l'implémentation de la fonction  $f(\Delta V)$ .



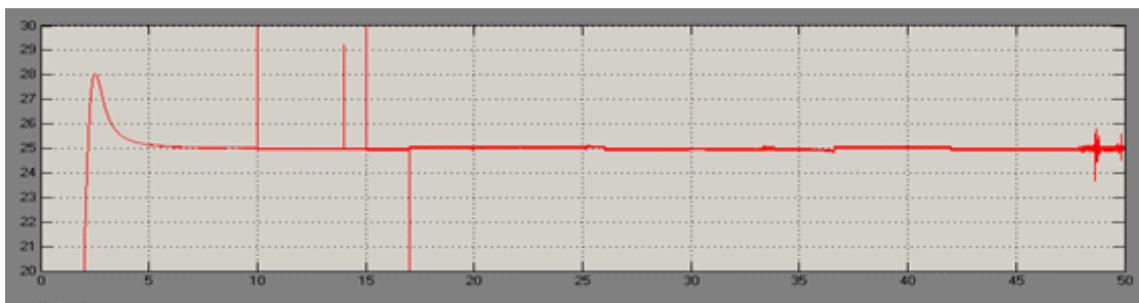
**Figure 4.5.8** : Le rapport cycliques ( $\alpha$ ) avec ( $\Delta V=0.006v$ )



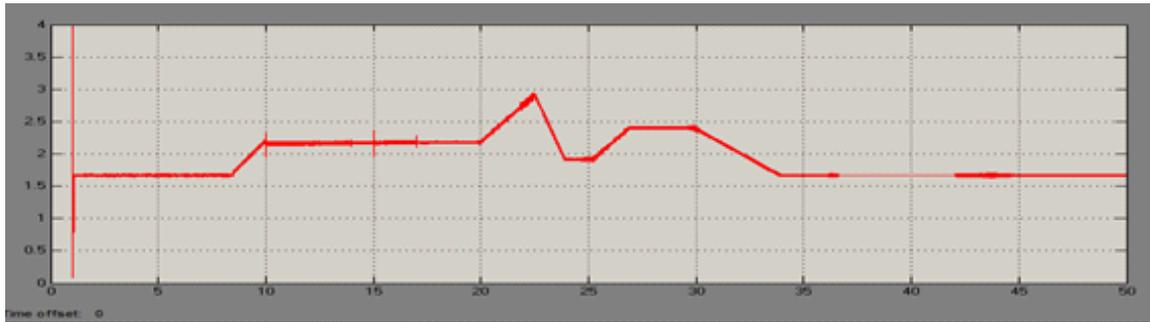
**Figure 4.5.9:** Le rapport cycliques ( $\alpha$ ) avec l'implémentation de la fonction  $f(\Delta V)$ .



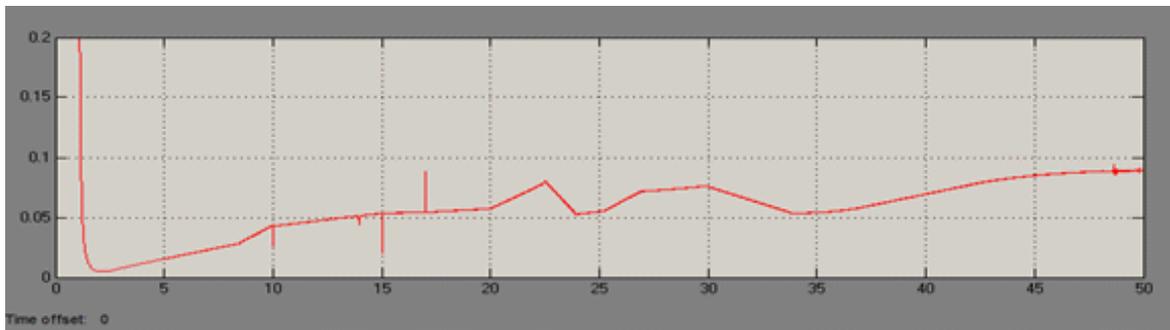
**Figure 4.5.10 :** La tension de sortie de convertisseur Vs2 avec ( $\Delta V = 0.006v$ )



**Figure 4.5.11 :** la tension de sortie de convertisseur Vs2 avec l'implémentation de la fonction  $f(\Delta V)$ .



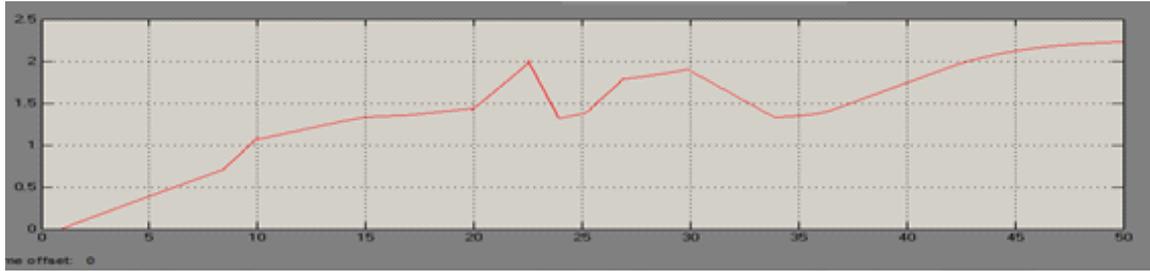
**Figure 4.5.12 :** Le courant de sortie de convertisseur  $I_s$  avec ( $\Delta V=0.006v$ )



**Figure 4.5.13 :** Le courant de sortie de convertisseur  $I_s$  avec l'implémentation de la fonction  $f(\Delta V)$ .



**Figure 4.5.14:** la puissance de sortie de convertisseur  $P_s$  avec ( $\Delta V=0.006v$ )

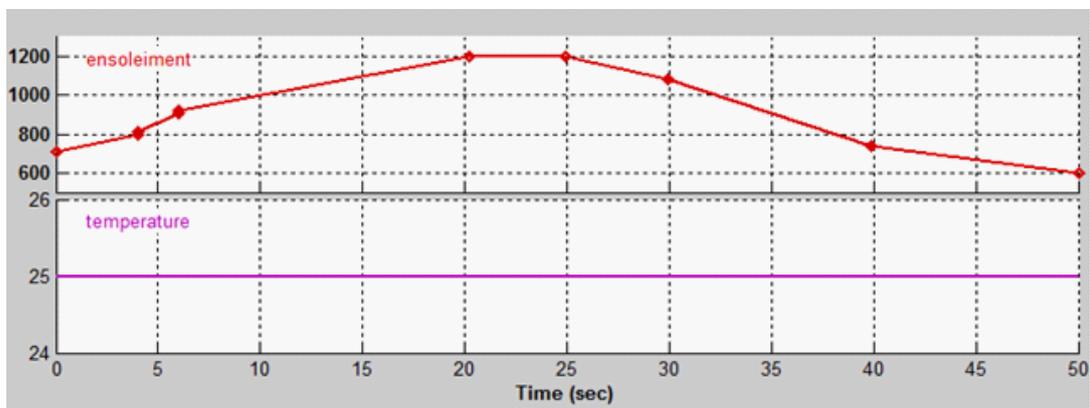


**Figure 4.5.15:** La puissance de sortie de convertisseur  $P_s$  avec l'implémentation de la fonction  $f(\Delta V)$ .

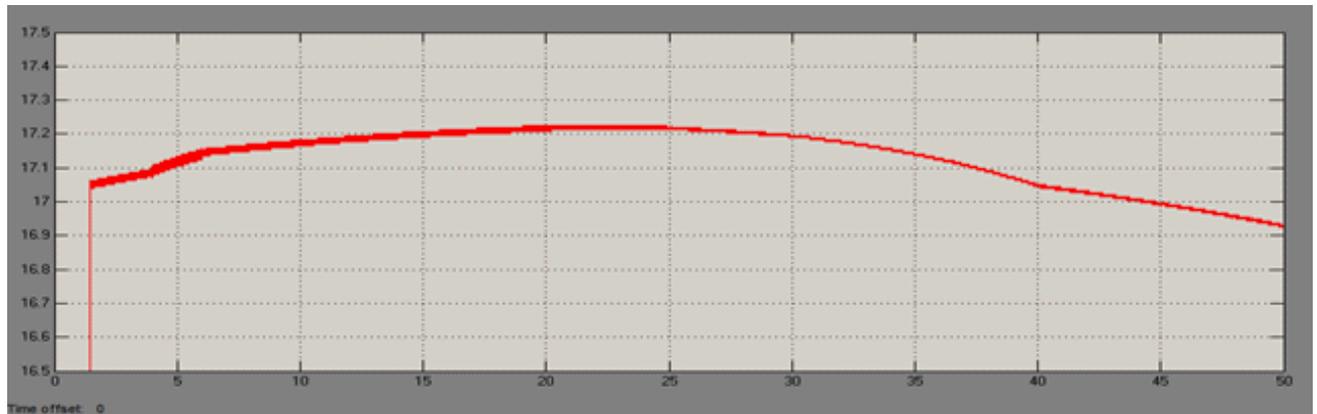
Quel que soit la variation de l'ensoleillement l'algorithme P&O suit le point max de la puissance, le système suit la variation de l'ensoleillement, dans les phases de transition on observe des vibrations (**Figure 4.5.2**) la tension  $G_{pv}$ , par la suite on a implémenté la fonction  $f(\Delta V)$  on résulte une tension de sortie de  $G_{pv}$  (**Figure 4.5.3**) moins de vibrations et de puissance dissipée avec un bon temps de réponse par rapport (**Figure 4.5.2**). Le courant de sortie du convertisseur varie avec la variation de l'ensoleillement en fonction de rapport cyclique ( $\alpha$ ) ce qui implique que la puissance fournie par le panneau solaire a la puissance de sortie de convertisseur.

L'implémentation de la fonction  $f(\Delta V)$  permet de réduire les vibrations (puissance dissipée) avec un temps de réponse plus petit si on opère avec un pas constant.

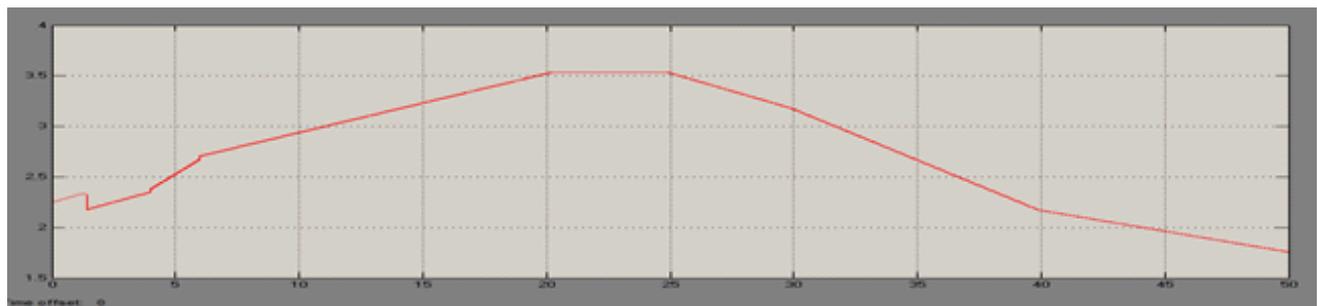
## 4.6 Changement graduel lent d'ensoleillement à température constante avec ( $\Delta V=0.006v$ )



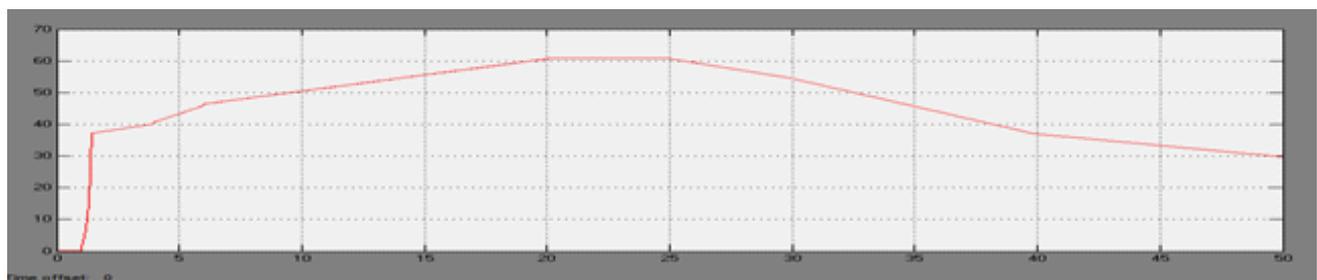
**Figure 4.6.1 :** Variation graduel lente d'ensoleillement avec température constante



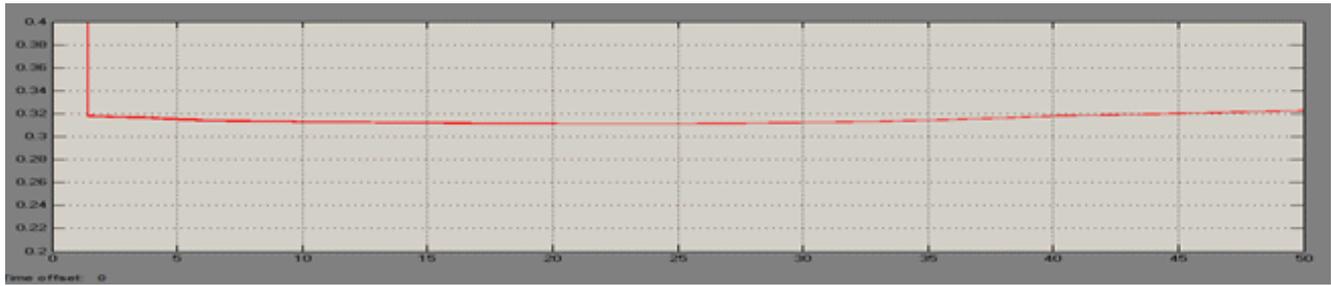
**Figure 4.6.2 :** La tension de sortie V Gpv



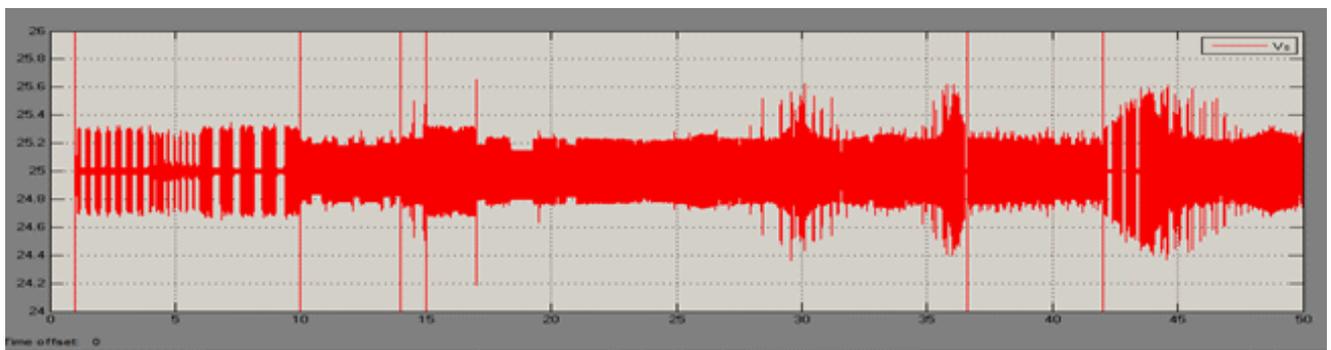
**Figure 4.6.3 :** Le courant de sortie I Gpv



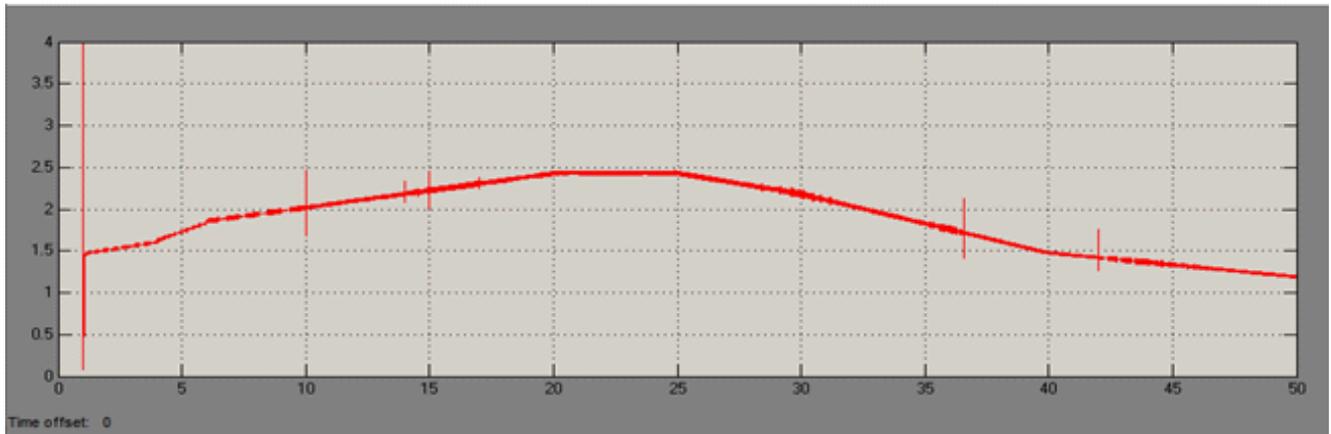
**Figure 4.6.4 :** La puissance de sortie P Gpv



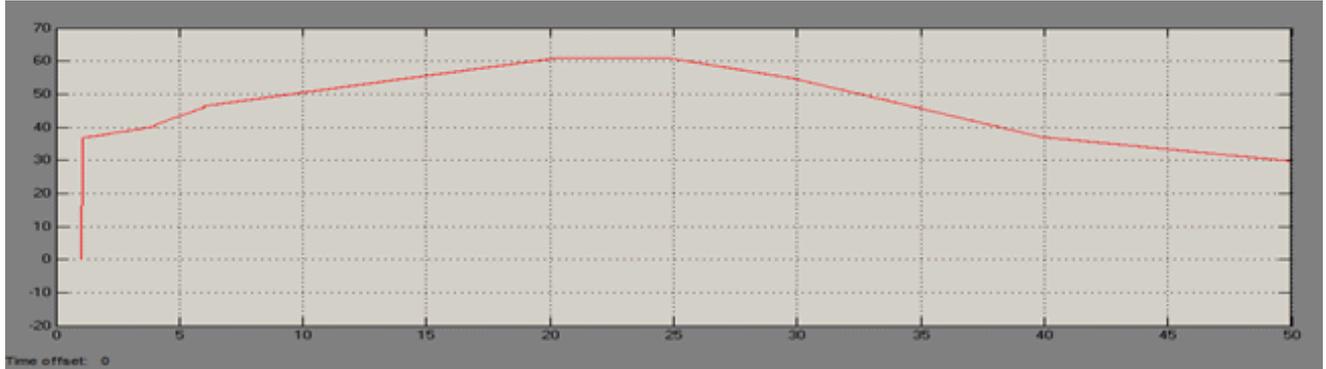
**Figure 4.6.5 :** Le rapport cyclique ( $\alpha$ )



**Figure 4.6.6 :** La tension de sortie du convertisseur  $V_{s2}$



**Figure 4.6.7 :** Le courant de sortie du convertisseur  $I_s$



**Figure 4.6.8** : La puissance de sortie du convertisseur Ps

Quel que soit la variation de l'ensoleillement, l'algorithme P&O suit le point max de la puissance, le système aussi va suivre la variation de l'ensoleillement, dans les phases de transition on observe des petites vibrations dans la tension Gpv.

Le courant de sortie du convertisseur varie avec la variation de l'ensoleillement en fonction du rapport cyclique ( $\alpha$ ) ce qui implique que la puissance fournie par le panneau est égale à la puissance de sortie du convertisseur.

## 4.7 Etude de système variation graduelle rapide de température avec ensoleillement constant

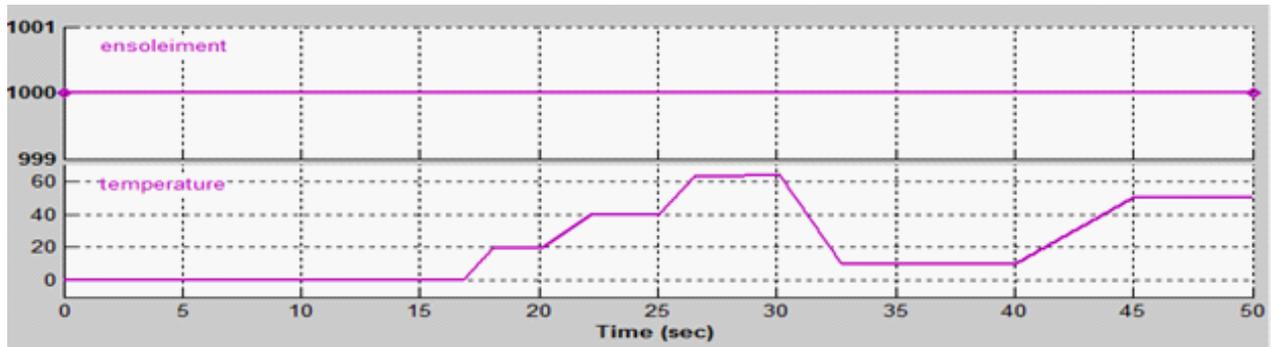


Figure 4.7.1 : Variation graduelle rapide de température avec ensoleillement constant

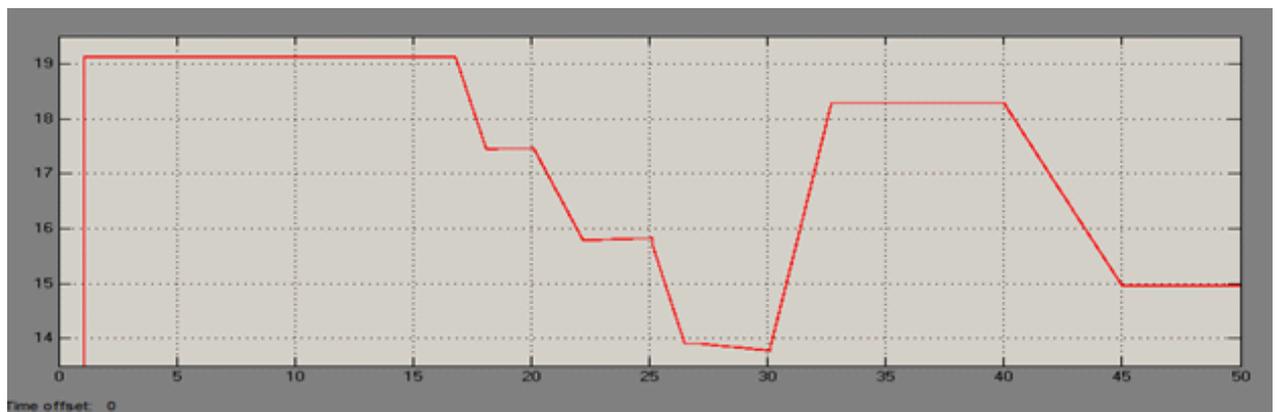
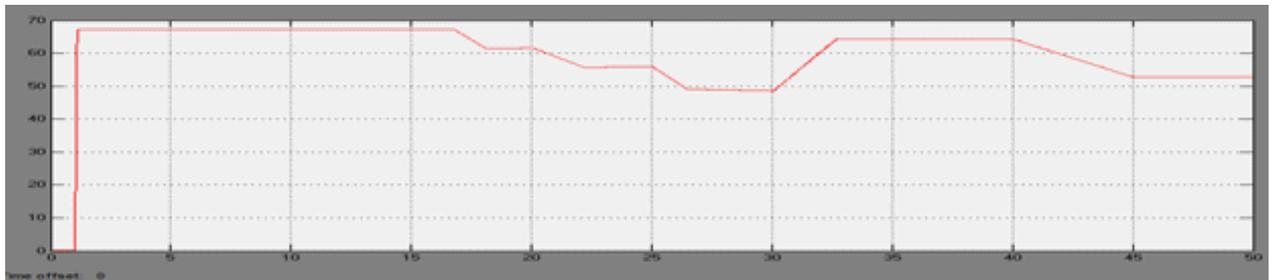


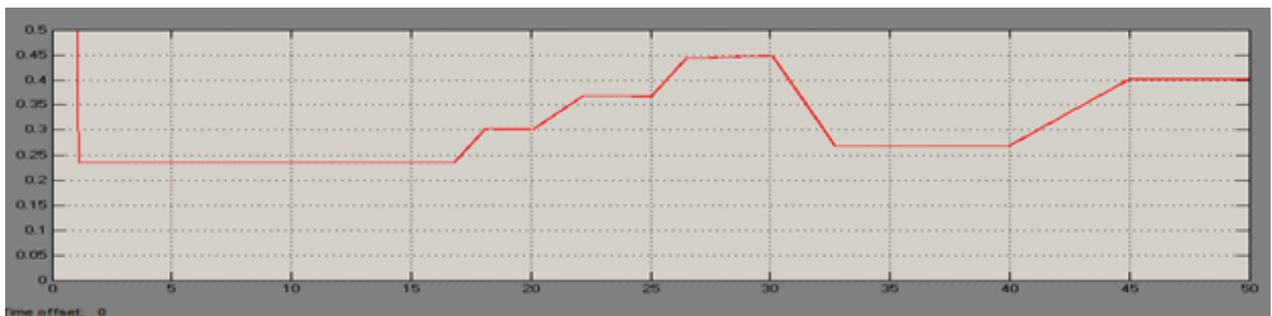
Figure 4.7.2 : La tension de sortie  $V_{Gpv}$



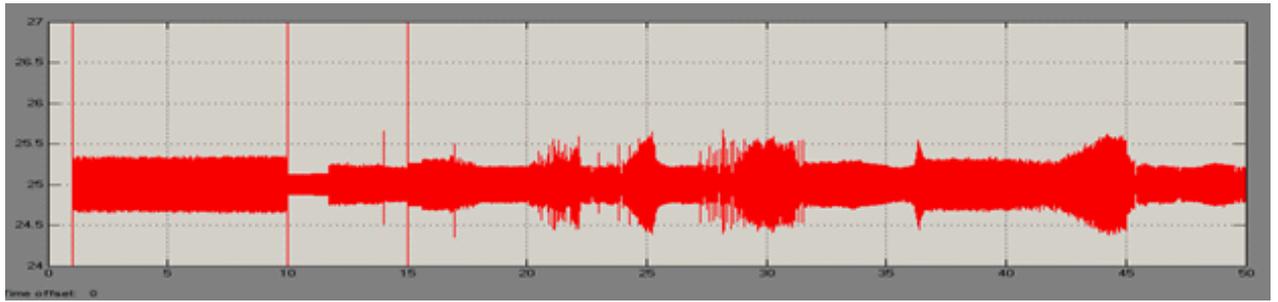
**Figure 4.7.3 :** Le courant de sortie I Gpv



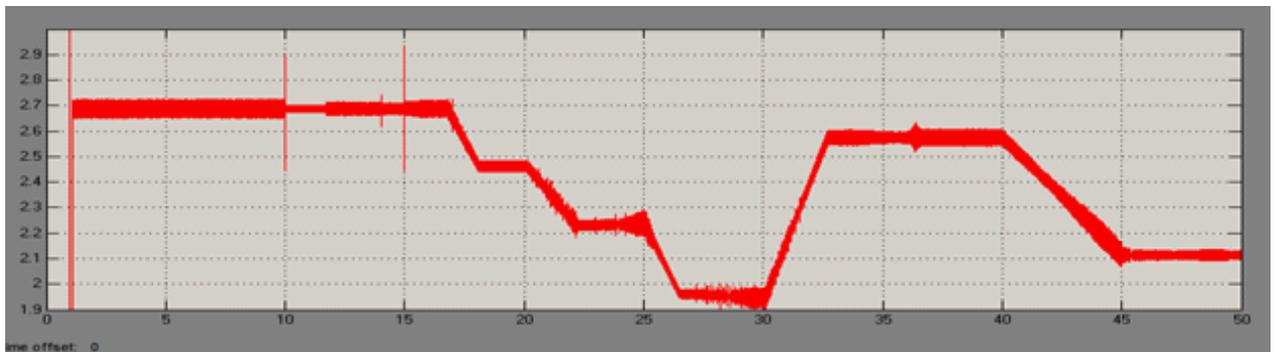
**Figure 4.7.4 :** La puissance de sortie P Gpv



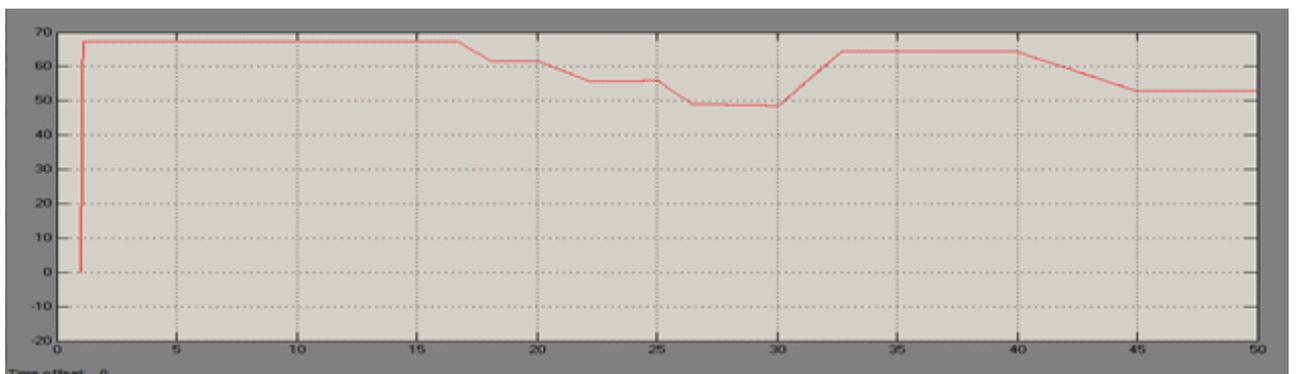
**Figure 4.7.5 :** Le rapport cyclique ( $\alpha$ )



**Figure 4.7.6 :** La tension de sortie du convertiseur  $V_{s2}$



**Figure 4.7.7 :** le courant de sortie du convertisseurs  $I_s$

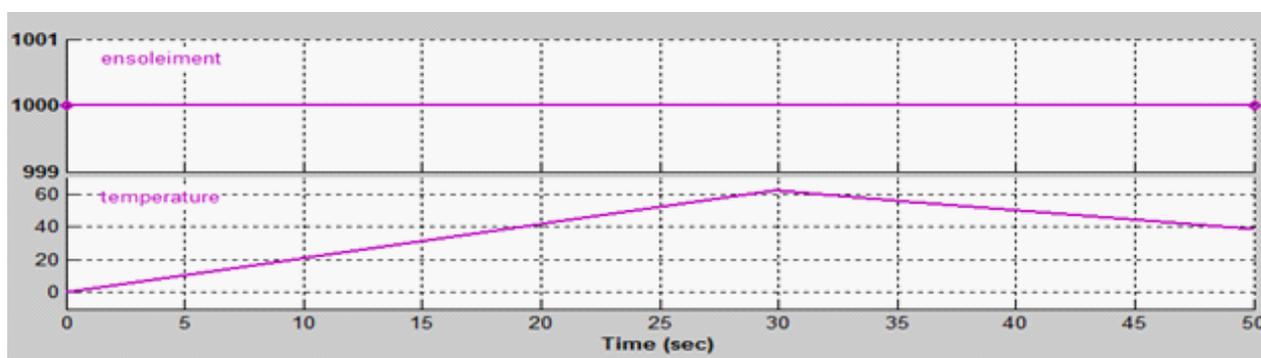


**Figure 4.7.8:** La puissance de sortie du convertisseur  $P_s$

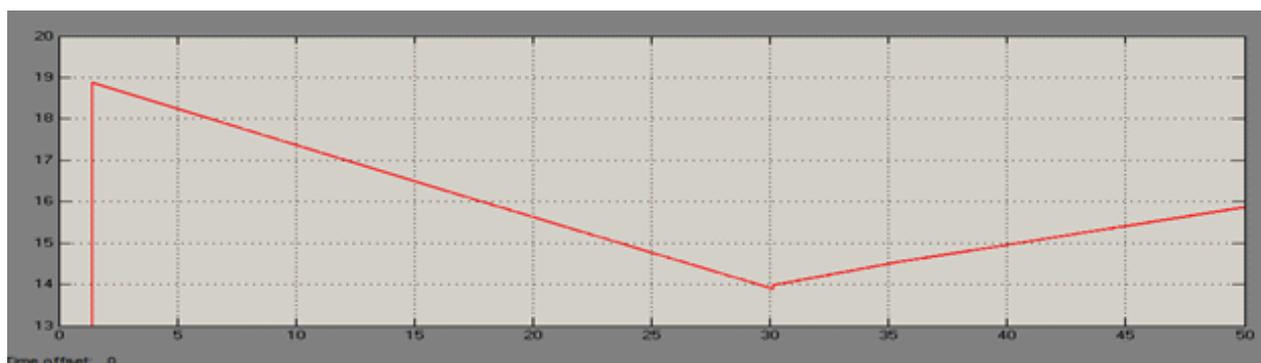
Quel que soit la variation de la température, l'algorithme P&O suit le point max de la puissance. Cette variation influe sur la puissance (puissance du panneau, puissance du convertisseur).

Lorsqu'on a un changement de température on observe que la tension de sortie GPV varie inversement à la température même pour la puissance, mais le courant de sortie GPV suit la variation de température sauf lorsqu'on a un changement de température on observe une chute de courant qui, par la suite, va suivre la variation de la température.

## 4.8 Variation graduelle lente de température avec ensoleillement constant



**Figure 4.8.1 :** Variation graduelle lente de température avec ensoleillement constant



**Figure 4.2.2:** La tension de sortie V Gpv

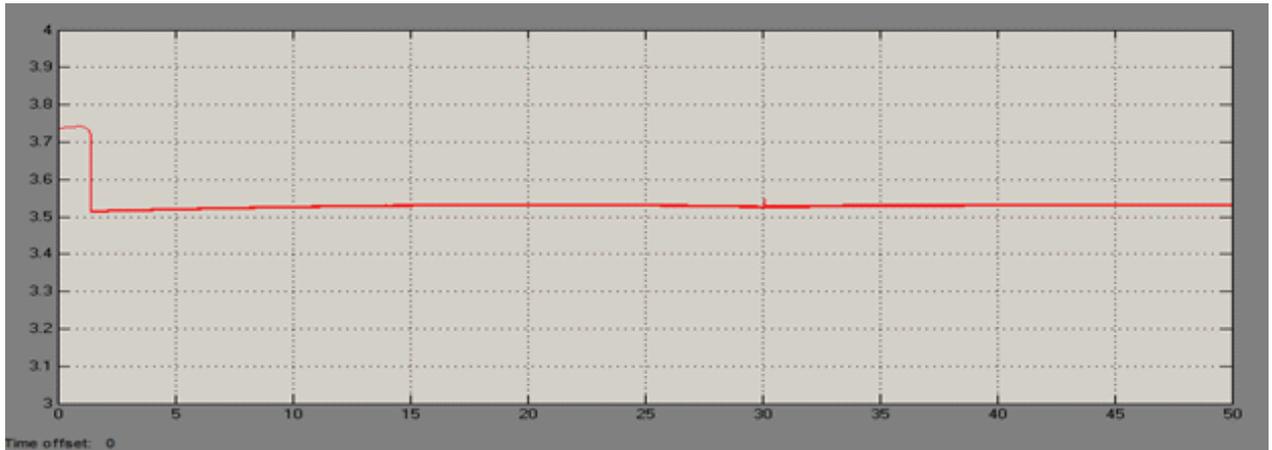


Figure 4.8.3: Le courant de sortie  $I_{Gpv}$

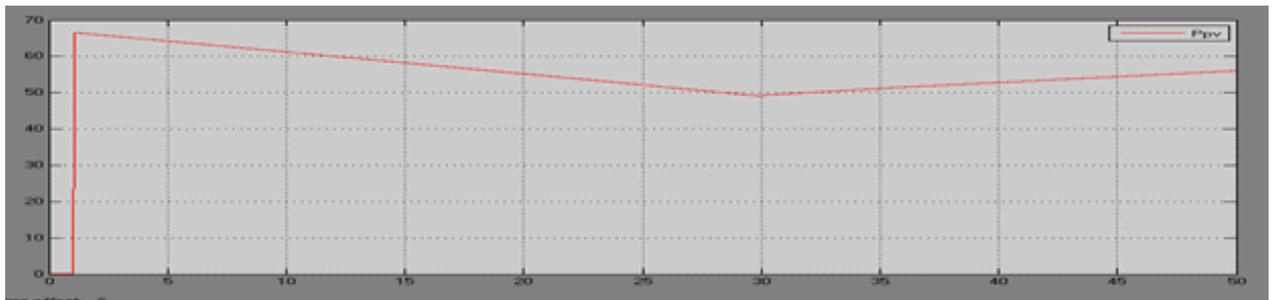


Figure 4.8.4: La puissance de sortie  $P_{Gpv}$

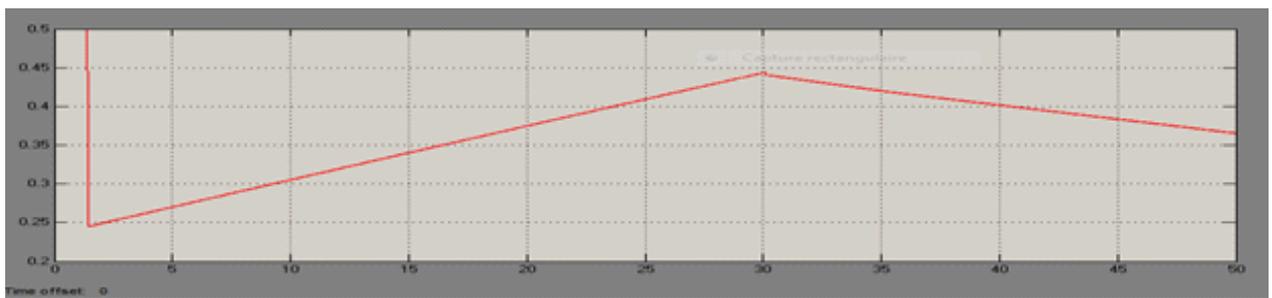
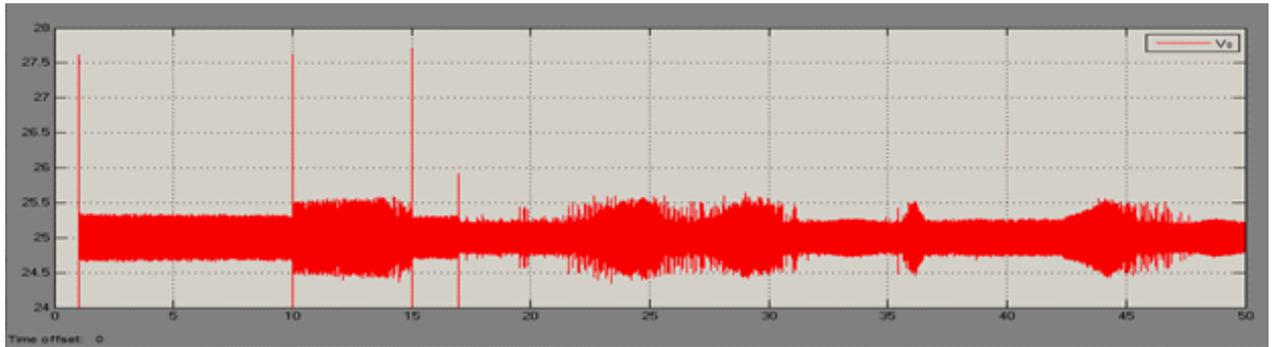
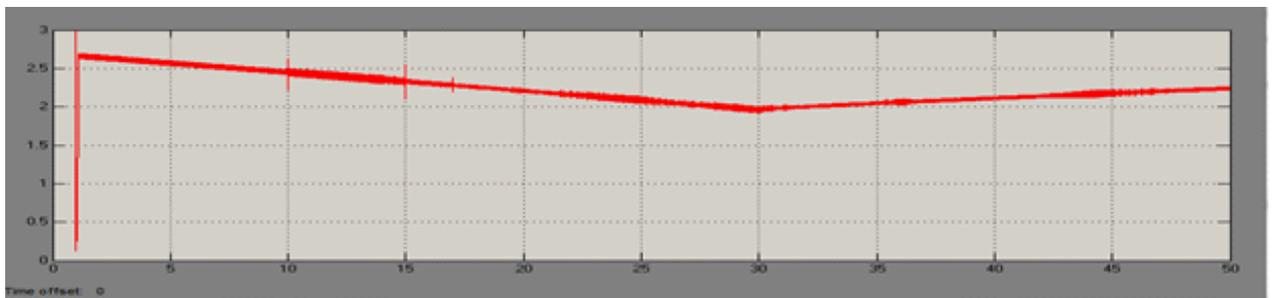


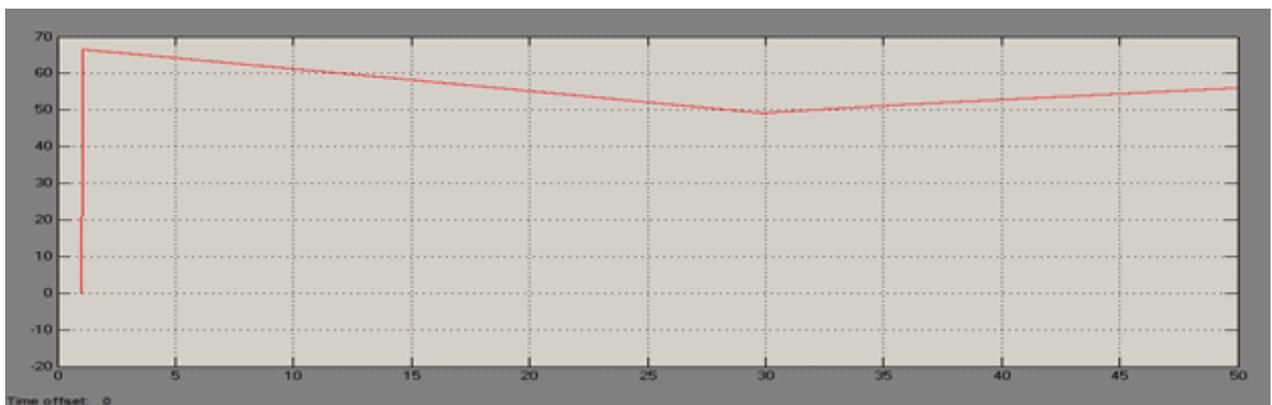
Figure 4.8.5 : Le rapport cyclique ( $\alpha$ )



**Figure 4.8.6 :** La tension de sortie du convertisseur  $V_{s2}$



**Figure 4.8.7 :** Le courant de sortie du convertisseur  $I_s$



**Figure 4.8.8 :** La puissance de sortie du convertisseur  $P_s$

Quel que soit la variation de la température, l'algorithme P&O suit le point max de la puissance. Cette variation influe sur la puissance (puissance du panneau, puissance du convertisseur).

Lorsqu'on a un changement de température on observe que la tension de sortie GPV varie inversement à la température même pour la puissance, mais le courant de sortie GPV suit la variation de température sauf lorsqu'on a un changement de température on observe une chute de courant qui, par la suite, va suivre la variation de la température.

## 4.9 Variation brusque de température à ensoleillement constant

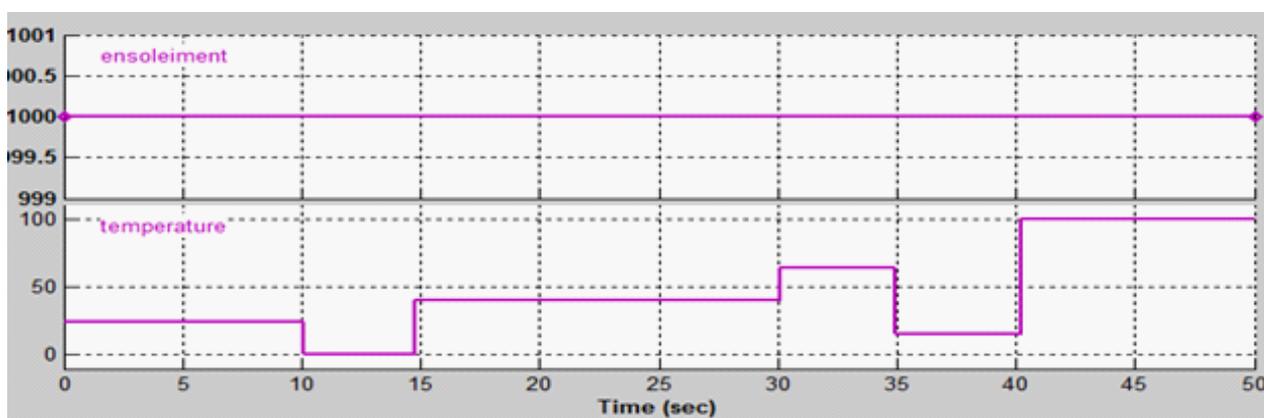


Figure 4.9.1 : Variation brusque de température a ensoleillement constant

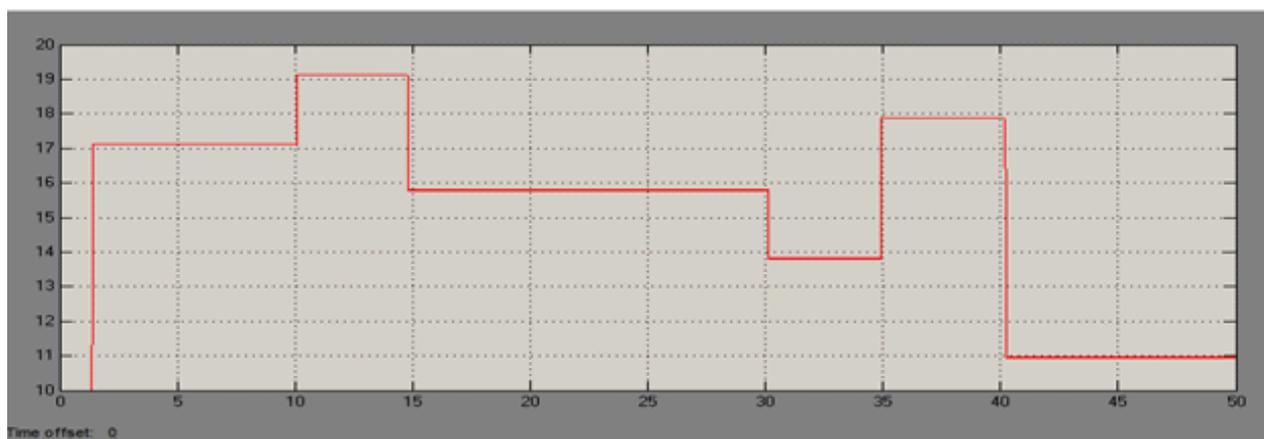


Figure 4.9.2 : La tension de sortie V Gpv

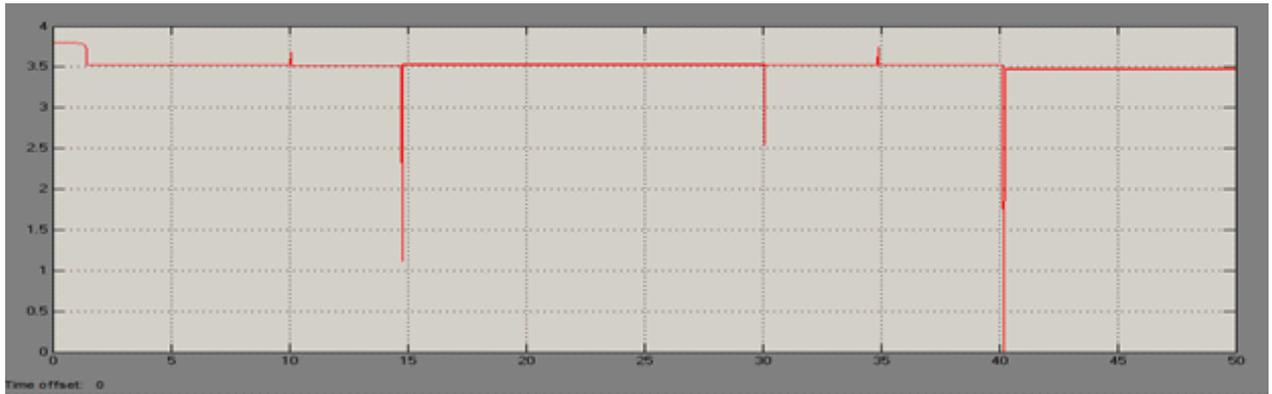


Figure 4.9.3 : Le courant de sortie  $I_{Gpv}$

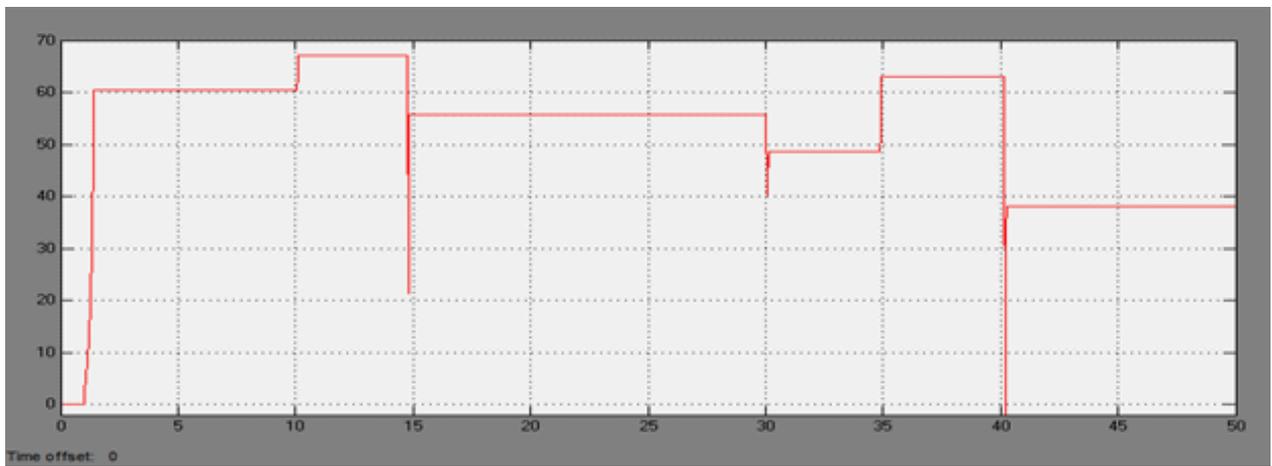
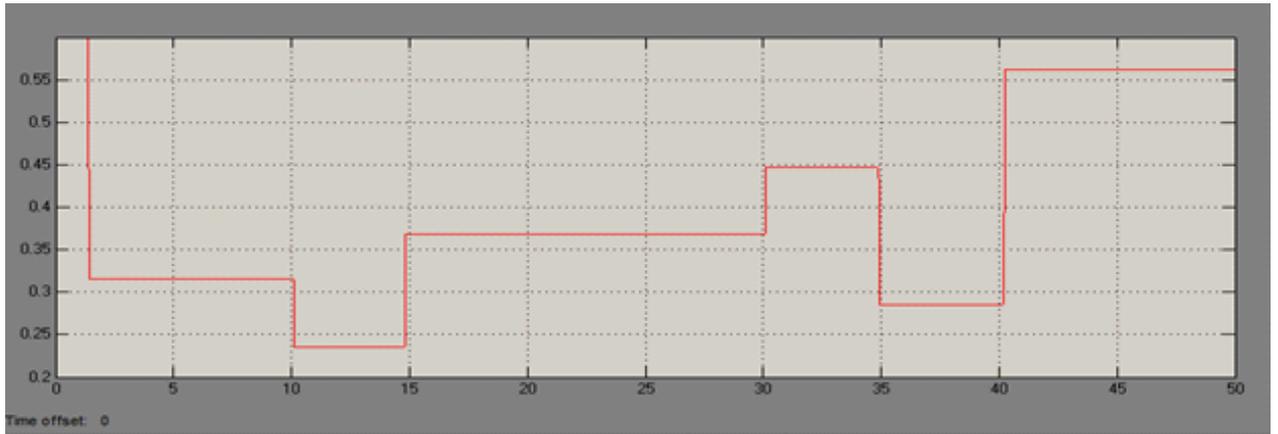
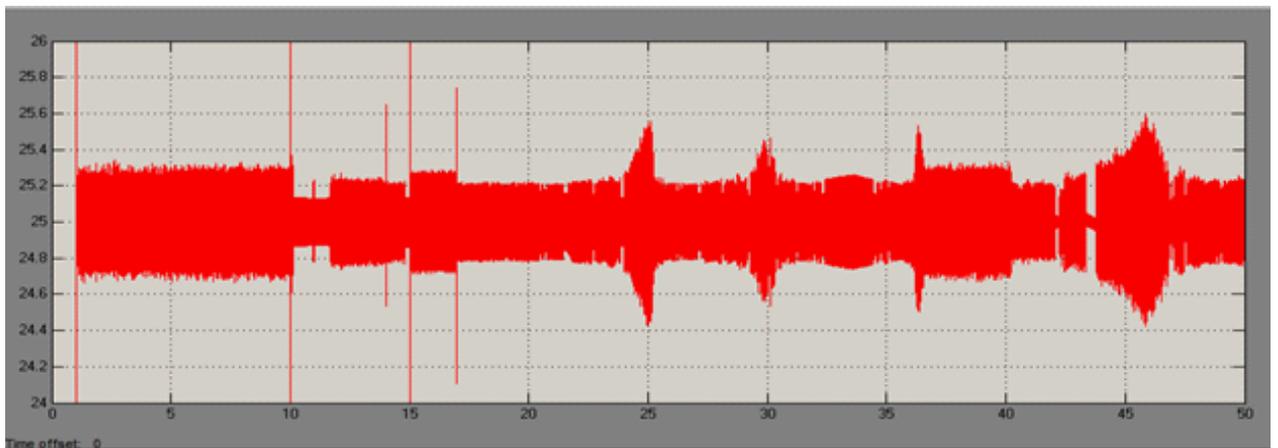


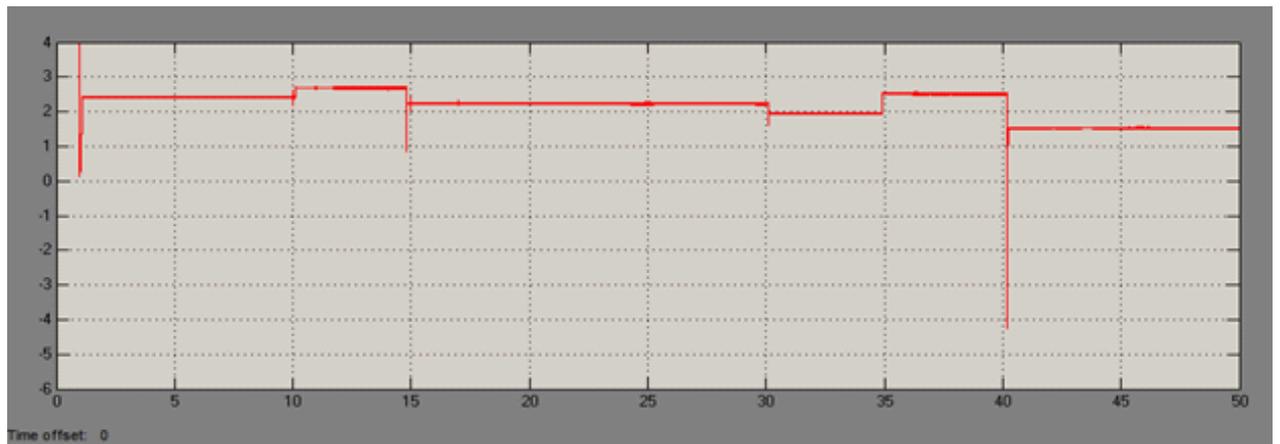
Figure 4.9.4: La puissance de sortie  $P_{Gpv}$



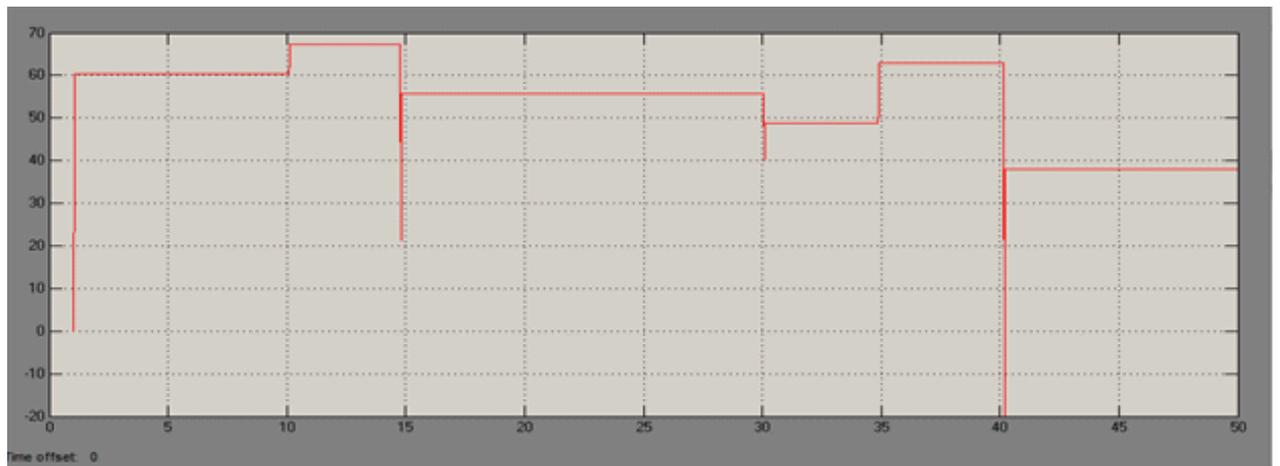
**Figure 4.9.5 :** Le rapport cyclique ( $\alpha$ )



**Figure 4.9.6 :** La tension de sortie du convertisseur  $V_{s2}$



**Figure 4.9.7 :** Le courant de sortie du convertisseur  $I_s$



**Figure 4.9.8:** La puissance de sortie du convertisseur  $P_s$

Quel que soit la variation de la température, l'algorithme P&O suit le point max de la puissance. Cette variation influe sur la puissance (puissance du panneau, puissance du convertisseur), dans les phases de transition on observe des chutes de courant qui après transite à la valeur optimale.

Lorsqu'on a un changement de température on observe que la tension de sortie GPV varie inversement à la température même pour la puissance, mais lorsque on a un changement de température on voit une chute de courant après il suit la variation des conditions.

## 4.10 Variation aléatoire de l'ensoleillement et température

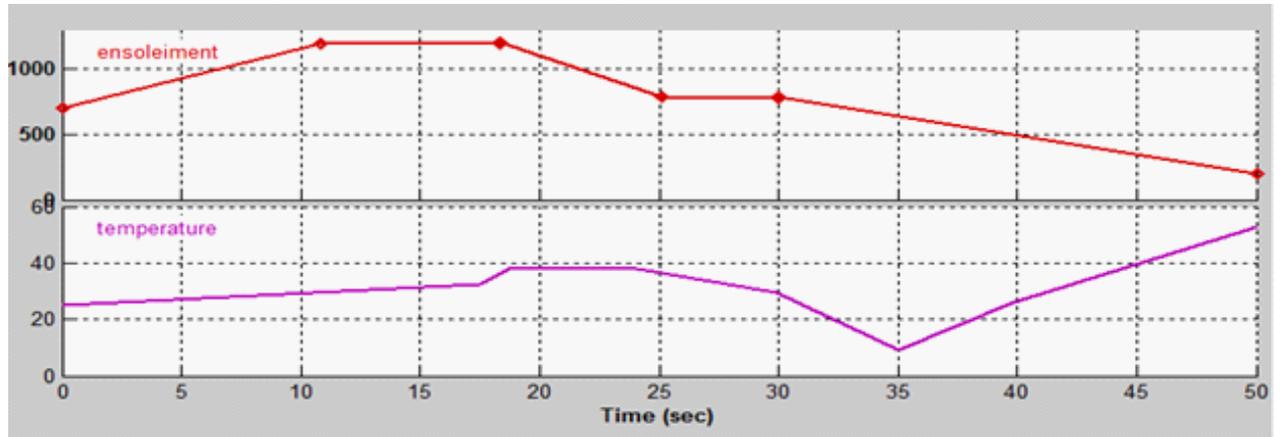


Figure 4.10.1 : Variation aléatoire de l'ensoleillement et température

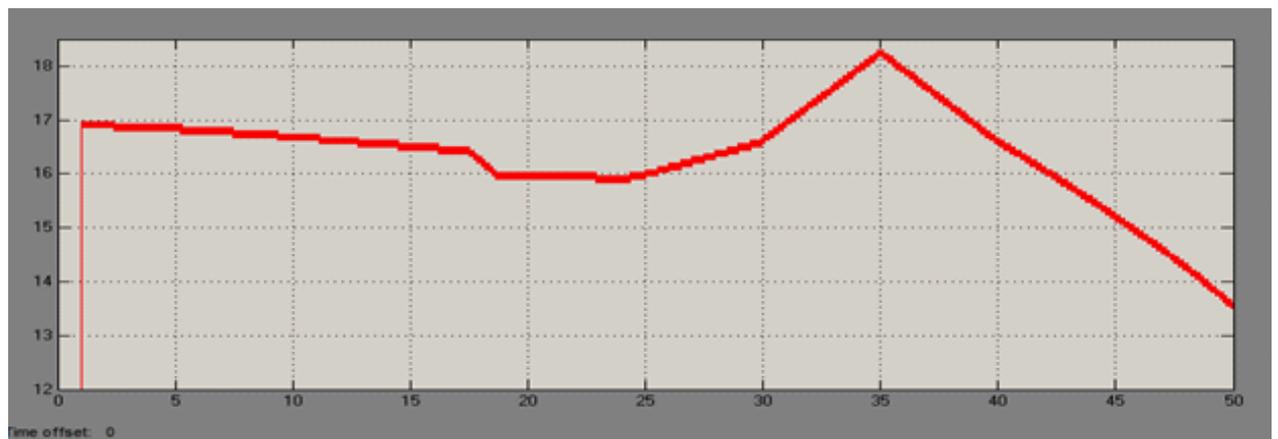
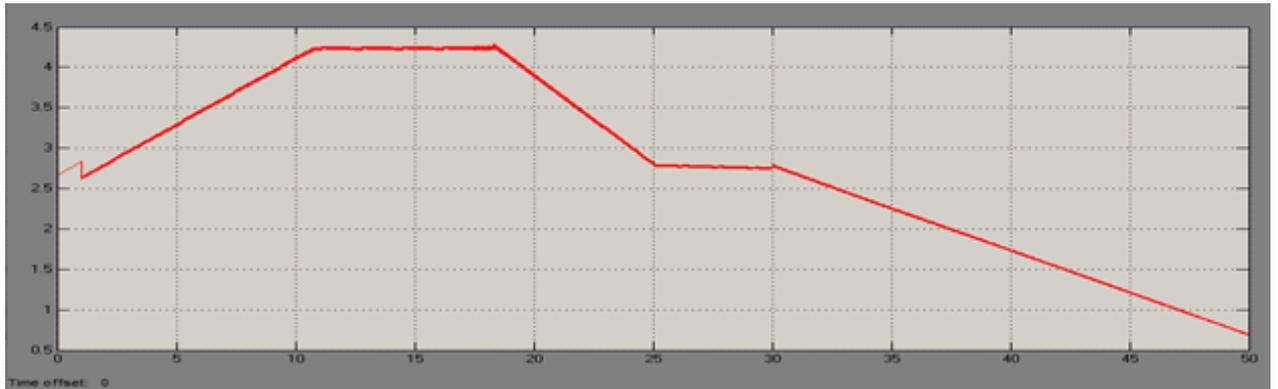
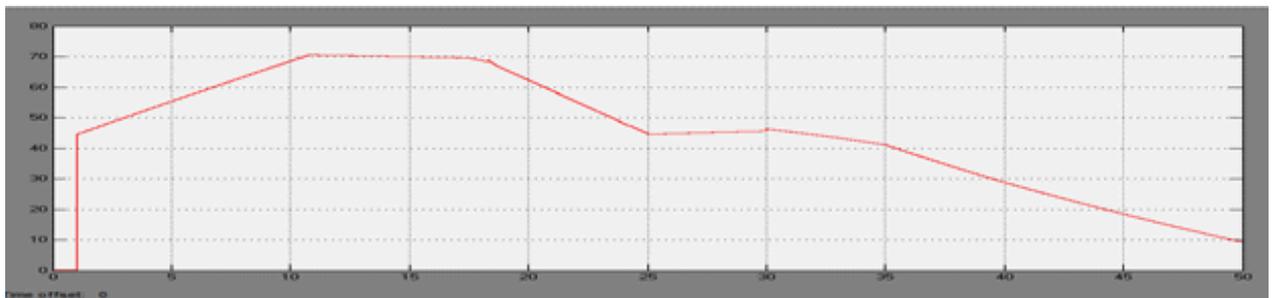


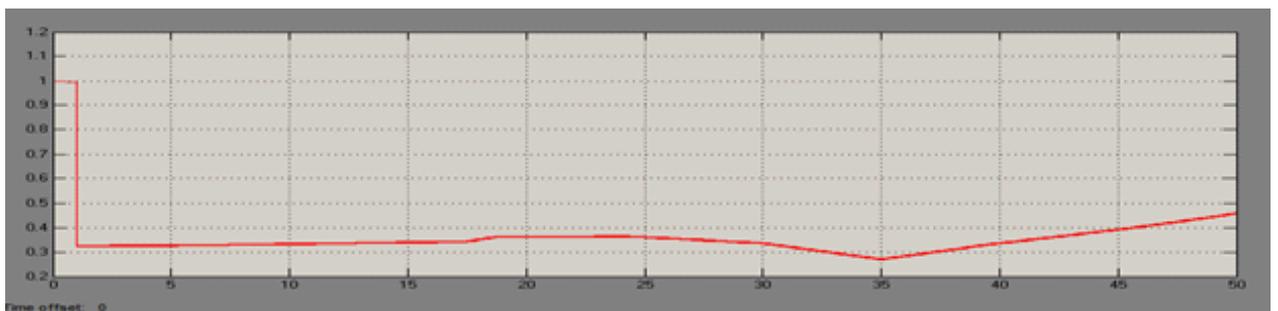
Figure 4.10.2 : La tension de sortie  $V_{Gpv}$



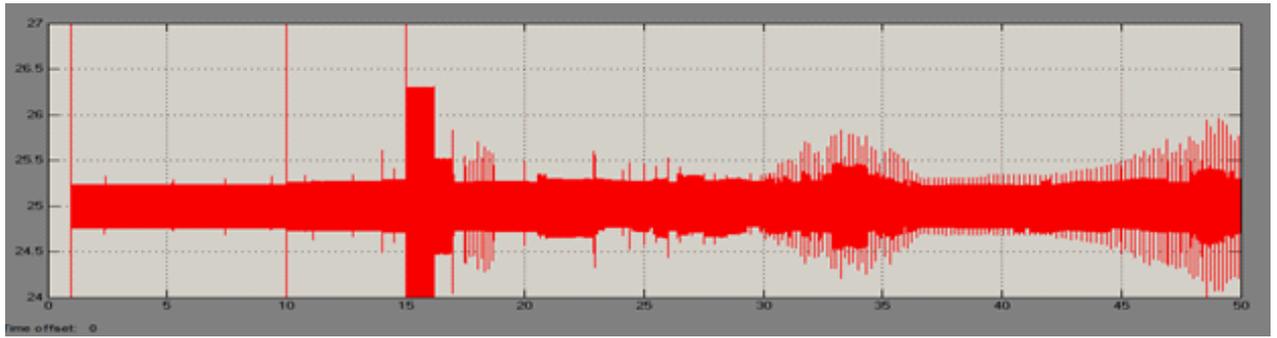
**Figure 4.10.3:** le courant de sortie I Gpv



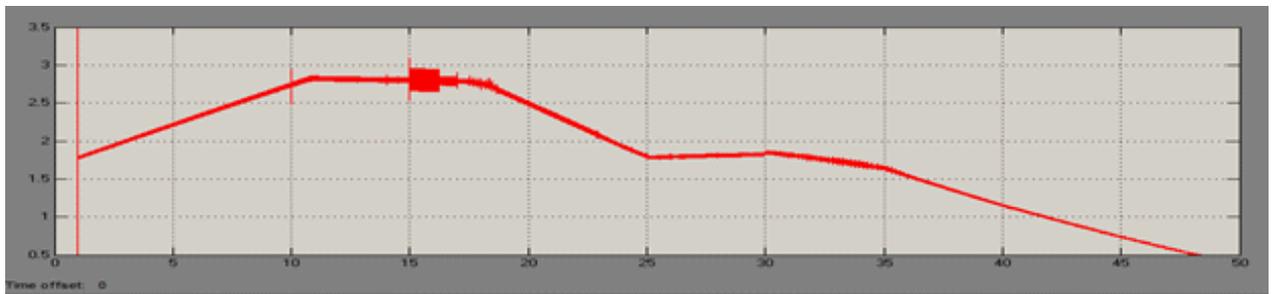
**Figure 4.10.4:** La puissance de sortie P Gpv



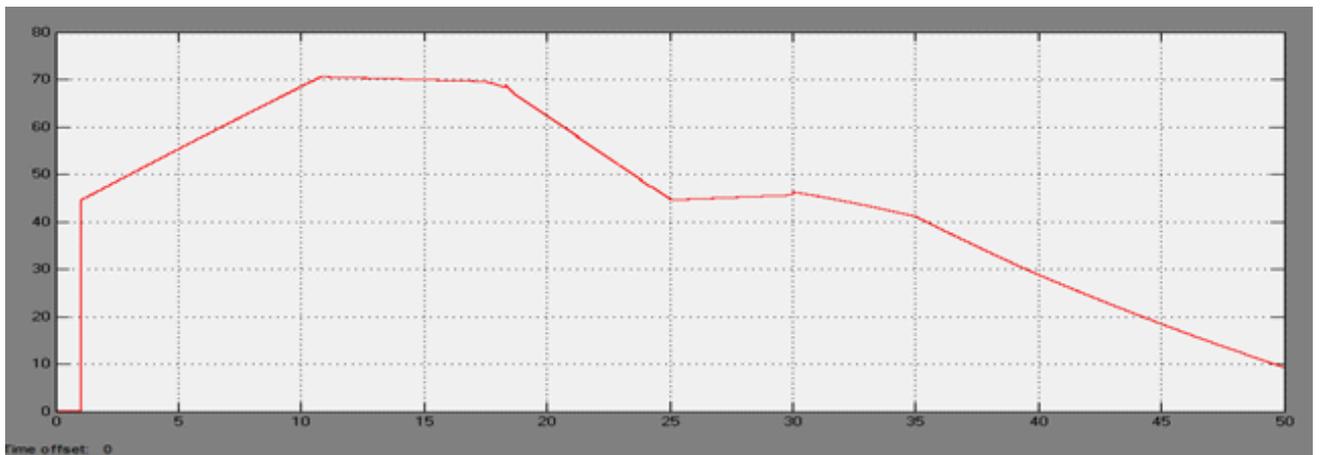
**Figure 4.10.5 :** Le rapport cyclique ( $\alpha$ )



**Figure 4.10.6 :** La tension de sortie du convertisseur  $V_{s2}$



**Figure 4.10.7 :** Le courant de sortie du convertisseur  $I_s$



**Figure 4.10.8:** La puissance de sortie du convertisseur  $P_s$

Quel que soit la variation de la température et l'ensoleillement, l'algorithme P&O suit le point max de la puissance.

Lorsque on a un changement de température on observe que la tension de sortie GPV varie inversement à la température. Mais le courant de GPV, le courant du convertisseur et les deux puissances suivent la variation de l'ensoleillement.

## 4.11 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons montré que quel que soit les conditions météorologiques le système conserve la puissance par l'algorithme P&O ensuite on a étudié un système PV lié avec un convertisseur d'énergie DC-DC (hacheur) adapté par une commande MPPT( P&O).la commande MPPT cherche le point de fonctionnement par des oscillations qui prennent quelque secondes .le convertisseur fournit une tension de sortie supérieure a la tension fourni par le GPV, donc la commande permet de transférer le maximum de puissance avec un rendement élevé. Les variations des conditions météorologiques influent sur le système. Le changement de l'ensoleillement permet d'augmenter la puissance par contre la température influe inversement sur la tension et la puissance.

Le choix de pas de tension ( $\Delta V$ ) permet d'assurer la précision, la stabilité et la rapidité de système .plus le pas est petit plus les oscillations sont faibles autour du PPM. Plus le pas est grand le système peut devenir instable et moins précis. Donc on a crée une fonction de tel sort que le système doit être rapide, précis et stable.

# Conclusion et Perspectives

Les travaux de recherche présentés dans ce mémoire consistent en la modélisation et l'optimisation du transfert d'énergie électrique dans système solaire PV (un panneau solaire, une commande MPPT(P&O),un convertisseur (Boost),une charge résistive).

Pour que ces systèmes de production soient rentables, c'est-à-dire : simple, fiable et à moindre coût, il faut optimiser toute la chaîne de production pour obtenir de bons rendements. Cela peut être réalisé par un choix judicieux des constituants, un bon dimensionnement des composants et des techniques de commandes performantes.

Le but de cette étude était de porter une contribution dans le transfert de la puissance PV maximale en intervenant sur le pas de poursuite du PPM. Des modifications ont été menées sur l'algorithme (P&O) pour créer un pas qui varie en fonction de l'ensoleillement.

La première validation de la méthode proposée est faite par simulation sous le logiciel Matlab/Simulink dans une chaîne de conversion à base d'un convertisseur de type Boost. Les résultats de simulation ont montré clairement que la méthode proposée est efficace pour la recherche du PPM quelles que soient les conditions climatiques de l'ensoleillement et de la température. En plus, elle est capable de faire positionner le point de fonctionnement au PPM dès le début de la marche du système.

La comparaison des résultats de simulation de cette méthode avec la technique MPPT classique (pas constant) montre que la nouvelle approche a apporté une amélioration sur le temps de réponse et la puissance dissipée, elle est capable d'atteindre le point de fonctionnement optimal lors d'un changement brusque du rayonnement solaire avec une performance élevée et temps de réponse réduit dans les deux états stables et dynamiques, soit en croissance ou en décroissance.

La réponse du système au profil de variation de l'éclairement prouve que la technique développée permet de réduire les erreurs de trajectoire de la poursuite du PPM. Cela peut se traduire par la minimisation des pertes de puissance engendrées.

Par conséquent, on peut dire que la stratégie de contrôle proposée peut être

considérée comme une solution intéressante dans le domaine de la maîtrise des systèmes photovoltaïques embarqué en particulier les avions solaires et les drones. Les travaux abordés dans ce travail sont très encourageants et nous motivent de plus en plus à continuer dans ce même axe de recherche.

En perspectives, on propose quelques tâches à traiter ultérieurement, comme :

- l'optimisation de la fonction du pas d une manière académique.
- Effectuer des essais expérimentaux avec des panneaux solaires réels et non avec une source programmable.

# Bibliographie

- [1] MOHAMED EL AMINE KHALED BENALOUACH , Modélisation, Simulation et Optimisation d'un Système Energétique de Production Photovoltaïque associé à un Accumulateur, thèse de Magister en Physique université Abou-Bekr belkaïd de Tlemcen (2013).
- [2] AYACHE KHEDIDJA, Modélisation et Simulation d'un Générateur Photovoltaïque Couplé à un Réseau électrique, Mémoire de Magister Université Mohamed Chérif Messaâdia de Souk-Ahras (2014).
- [3] MECHOUMA RABIAA, Contribution à l'étude des onduleurs dans les systèmes photovoltaïques: Applications pour les charges commerciales, thèse de doctorat en sciences Université Hadj Lakhdar Batna (2015).
- [4] BADIA AMROUCHE, Contribution au développement d'une nouvelle méthode MPPT basée sur les concepts de l'intelligence artificielle pour les systèmes photovoltaïques, thèse de doctorat université Saad DAHLAB de Blida (2013).
- [5] MERAHI REDA, Modélisation d'un dispositif MPPT pour l'étude de l'augmentation de la puissance produite par les générateur photovoltaïques, diplôme de magister université Badji Mokhtar Annaba (2010).
- [6] TIAR MOURAD, Commande Optimale d'un Système de Génération Photovoltaïque Hybride, Diplôme de Magister en Electrotechnique Université Mohamed Khider Biskra (2011).
- [7] M.BELHADJ, Modélisation d'un Système de captage Photovoltaïque Autonome, Mémoire de Magister, Centre Universitaire De Bechar (2008).
- [8] MERAHI REDA, Modélisation d'un dispositif MPPT pour l'étude de l'augmentation de la puissance produite par les générateur photovoltaïques", diplôme de magister université Badji Mokhtar Annaba (2010).

- [9] SADRATI YUCEF, Implementation de l'algorithme p&o pour un systeme photovoltaïque, memoire master universite kasdi merbah-Ouargla (2016)
- [10] HANANOU ROUABAH, Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque, memoire master academique universite kasdi merbah-Ouargla (2014).
- [11] ANNE L. ,PASKAL C. ,JEAN P. ,BNJAMIN, Cellule solaire les bases de l'énergie photovoltaïque, Edition theqnique et scientifiques francaises, (2010).
- [12] DARIGA MEEKHUN, Réalisation d'un système de conversion et de gestion de l'énergie d'un système photovoltaïque pour l'alimentation des réseaux de capteurs sans fil autonomes pour l'application aéronautique, these de doctora l'Institut National des Sciences Appliquées Toulouse, (2015).
- [13] B. FLÈCHE - D. DELAGNES, Production d'énergie électrique: énergie solaire photovoltaïque, Energie solaire photovoltaïque.doc: juin 07.
- [14] N. AOUCICHE , M.S. AÏT CHEIKH ET A. MALEK, Centre de Développement des Energies Renouvelables, CDER ,10 Mai.
- [15] T. T. GUINGANE, Z. KOALAGA, E. SIMONGUY, F. ZOUGMORE, D. BONKOUNGOU, Modélisation et simulation d'un champ photovoltaïque utilisant un convertisseur élévateur de tension.
- [16] AMRONE MOHAMED, Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque, mémoire master académique université Saad dahlab-blida (2016).
- [17] SAAD MOTAHHIR, ABDELAZIZ EL GHZIZAL, AZIZ DEROUICH, Modélisation et commande d'un panneau photovoltaïque dans l'environnement PSIM.
- [18] [http://www.lemonde.fr/planete/article/2014/04/09/solar-impulse-2-un-nouvel-avion-solaire-pour-faire-le-tour-du-monde\\_4398389\\_3244.html#RVI5rxmxyT7OxtEo.99](http://www.lemonde.fr/planete/article/2014/04/09/solar-impulse-2-un-nouvel-avion-solaire-pour-faire-le-tour-du-monde_4398389_3244.html#RVI5rxmxyT7OxtEo.99),19mai 2019
- [19] <http://solarimpulsemktpe.e-monsite.com/pages/i-le-fonctionnement-et-la-conception.html>,20 mai 2019,20 mai 2019,20 mai2019
- [20] <https://www.e-kart.fr/1381-alimente-par-les-batteries-nmc-kokam-solar-impulse-2-acheve-son-premier-vol-autour-du-monde>,25 juin 2019
- [21] <http://aviondufutur.e-monsite.com/pages/l-electricite-dans-l-avion/l-energie-solaire.html>,20 mai 2019

[22] <https://lesolarimpulse2.wordpress.com/les-panneaux-photovoltaiques/>,20juin  
2019