

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République Algérienne démocratique et populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

جامعة البليدة  
Université de Bblida1  
كلية التكنولوجيا  
Faculté de Technologie

قسم الإلكترونيك  
Département d'Électronique



## Mémoire de Master

Mention Électronique  
Spécialité Systèmes de Vision et Robotique

présenté par

MANSEUR Lyes

&

SIAKENE Amine

---

# Analyse et simulation d'un système photovoltaïque adapté par deux types de commande MPPT (P&O et Incrémentation de l'inductance)

---

Proposé par : Mme H. AITABDESSLAM

Année Universitaire 2017-2018

## *Remerciements*

Nous tenons avant tout à remercier le bon **DIEU** qui nous a donnés la volonté et le courage pour la réalisation de ce travail.

A notre promotrice qui nous a aidés et orientés pour mener à bien ce travail,

A tous les enseignants, les administratifs et le personnel du Département d'Electronique,

Vont nos sincères remerciements et notre profonde gratitude.

## *Dédicace*

À mes chers parents :

Mon cher **père** qui, par ses précieux conseils et son soutien, a su me guider vers le droit chemin et vers la voie de la réussite.

Ma très chère **mère** qui a sacrifié sa noble existence pour bâtir la mienne, et qui est pour moi : le symbole du courage et du sacrifice.

Les mots ne suffisent guère pour exprimer l'attachement, l'amour et l'affection que je porte.

À tous mes amis (sud et nord)

À tous ceux qui me sont chers

---

#### ملخص:

مولد الطاقة الكهروضوئية يقدم طاقة غير مستقرة، تعتمد على الإضاءة الشمسية والحرارة، لذلك هناك حاجة إلى إدراج محول بين المولد والمتلقي متبوع بأوامر معروفة باسم MPPT (تتبع الحد الأقصى للطاقة) الغرض من هذا المشروع هو تصميم ونمذجة و محاكاة للسلسلة الكهروضوئية تستخدم نوعين من تكنولوجيا MPPT وهذا باستخدام Matlab Simulink

كلمات المفاتيح: MPPT، للسلسلة الكهروضوئية، Matlab Simulink،

---

#### Résumé :

Le générateur photovoltaïque (PV) fournit une puissance non stable, elle dépend de l'éclairement solaire et de la température. Donc, il est nécessaire d'intercaler entre le générateur et le récepteur un convertisseur statique suivi par des commandes connues sous le nom de MPPT (Maximum Power Point Tracking). Le but de ce mémoire est l'étude, la modélisation et la simulation d'une chaîne PV en utilisant deux techniques MPPT sous le logiciel : Matlab Simulink.

**Mots clés :** MPPT, PV, Matlab Simulink,

---

---

**Abstract :**

The photovoltaic generator provided power not stable, it depends on solar and temperature illumination. So it needed to inserted between the generator and the receiver a converter followed by orders known as the MPPT (Maximum Power Point Tracking). The purpose of this paper is the design, modeling and simulation of PV chain using two MPPT methods with Matlab Simulink.

**Keywords :** MPPT, PV, Matlab Simulink,

---

## Liste des Symboles et abréviations

$\alpha$ :	Rapport cyclique
$I_{cc}$ :	Courant de court-circuit d'une cellule ou d'un module solaire [A]
MPPT :	Maximum Power Point Tracking.
$V_{co}$	Tension du circuit ouvert [V]
VOP :	Tension optimale d'un générateur PV [V]
$V_p$ :	Tension de sortie d'un module PV [V]
$V_e$ :	Tension d'entrée d'un hacheur [V]
$V_s$ :	Tension de sortie d'un hacheur[V]
ppm :	point de puissance maximale [V]
PPM :	Point de Puissance Maximale
PV :	Photovoltaïque.
$G_{pv}$ :	générateur photovoltaïque.

Les autres abréviations sont explicitées dans le texte.

### Table des matières

Remerciements.....	2
Dédicaces.....	3
Résumé.....	4
Liste des acronymes et abréviations.....	4

Table des matières.....	5
Liste des figures.....	7
Liste des tableaux.....	7

## **Chapitre I :Le générateur photovoltaïque**

-1.1 Introduction.....	14
-1.2 Rappel sur les semi-conducteurs.....	14
-1.3 L'effet photovoltaïque et la jonction PN.....	14
-1.4 La cellule photovoltaïque.....	15
-1.5 Représentations électroniques des cellules PV.....	15
-1.6. Caractéristique d'une cellule photovoltaïque.....	17
-1.6.1 La tension de circuit ouvert $V_{oc}$ .....	17
-1.6.2 Le courant de court-circuit $I_{cc}$ .....	17
-1.6.3 La puissance de crête $P_c$ .....	18
-1.6.4 Le point de fonctionnement maximal $P_{pm}$ .....	18
-1.6.5 Le facteur de forme FF.....	18
-1.6.6 Le rendement d'un module.....	18
-1.7 Les caractéristiques électriques d'un module PV.....	19
-1.8 Etude et simulation de l'influence des conditions météorologiques	

sur le module.....	20
-1.8.1 L'influence de la température.....	20
-1.8.2 L'influence de l'éclairement.....	21
-1.9 Conclusion.....	23

## Chapitre II

### Les convertisseurs DC/DC et les commandes MPP

-2.1 Introduction.....	21
-2.2 L'étage d'adaptation entre un générateur PV et une charge.....	25
-2.3 Différents types d'hacheurs.....	27
-2.3.1 Convertisseur Boost.....	27
-2.3.2 Convertisseur Buck.....	30
-2.3.3 Convertisseur Buck-Boost.....	33
-2.3.4 Convertisseur Cuk.....	34
-2.4 Récapitulatif d'analyse et choix du convertisseur.....	35
-2.5 Les commande MPPT.....	37
-2.6 quelques travaux sur les commandes MPPT.....	38
-2.7 Bilan sur les différents types d'algorithmes MPPT existants dans la Littérature.....	38
-2.8 Algorithme perturbation et observation (P&O).....	39
-2.9 Algorithme 'incrémental conductance' (INC).....	42

-2.10 Conclusion.....	45
-----------------------	----

### Chapitre III : Simulation et Résultats

-3.1 Introduction.....	47
-3.2 Simulation d'un système photovoltaïque avec deux méthodes (p&o, incrémentation de l'inductance).....	47
-3.3 Modélisation du panneau kc200GT sous Matlab Simulink.....	47
-3.4 simulation d'un système PV avec la commande MPPT (p&o).....	53
-3.4.1 Fonctionnement sous des conditions standard.....	54
-3.4.2 Eclairage variable et température constante.....	58
-3.4.3 Température variable et éclairage constant.....	62
-3.5 simulation d'un système PV avec la commande MPPT (inc).....	65
-3.5.1 Fonctionnement sous des conditions standard.....	66
-3.5.2 Eclairage variable et température constante.....	71
3.5.3 Température variable et éclairage constant.....	76
-3.6 Comparaison entre les deux méthodes(p&o/inc).....	80
-3.7 conclusion.....	83
-3.8 Conclusion générale.....	84

### Liste des figures

Figure (1.1) L'effet photovoltaïque.....	15
Figure (1.2) Représentation d'une cellule PV idéale.....	15

Figure (1.3) Représentation d'une cellule PV réelle.....	16
Figure (1.4) la caractéristique I(v).....	19
Figure (1.5) la caractéristique P(v).....	19
Figure (1.6) Caractéristiques I - v d'un module KC200GT pour différentes températures constantes sous une irradiation de 1000 W/m.....	20
Figure (1.7) ) Caractéristiques P - V d'un module KC200GT pour différentes températures constantes sous une irradiation de 1000 W/m.....	21
Figure (1.8) Caractéristiques I - V d'un module KC200GT pour différents éclairagements et une température ambiante de 25°C.....	22
Figure (1.9) ) Caractéristiques P - V d'un module KC200GT pour différents éclairagements et une température ambiante de 25°C.....	22
Figure (2.1) Emplacement de l'étage d'adaptation.....	26
Figure (2.2) Formes d'ondes des courants et tensions du convertisseur Boost.....	37
Figure (2.3) Circuit équivalent du Boost quand l'interrupteur est fermé.....	38
Figure (2.4) Circuit équivalent du Boost quand l'interrupteur est ouvert .....	38
Figure (2.5) Formes d'ondes des courants et tensions du convertisseur.....	30
Figure (2.6) Formes d'ondes des courants et tensions du convertisseur Buck-Boost....	34
Figure (2.7) Formes d'ondes des courants et tensions du convertisseur Cuk.....	34
Figure (2.8) Evolution du gain en tension en fonction du rapport cyclique des convertisseurs.....	36
Figure (2.9) L'emplacement de la commande MPPT dans le système PV.....	37
Figure (2.10) Classification des différentes méthodes de poursuite du PPM.....	39
Figure (2.11) Algorithme type de la méthode INC .....	40
Figure (2.12) Algorithme type de la méthode P&O.....	41



Figure (2.13) Algorithme type de la méthode INC.....	44
--	----

### Chapitre III : Simulation et Résultats

-Figure(3,1) modèle d'un panneau sous Matlab Simulink.....	48
-Figure(3,2) la puissance en fonction de tension.....	49
-Figure(3,3) courant $i$ en fonction de tension $V$ .....	49
-Figure(3,4) L'influence de l'éclairement sur la caractéristique $I=f(V)$ .....	50
-Figure(3,5) L'influence de l'éclairement sur la caractéristique $P=f(V)$ .....	51
-Figure(3,6) L'influence de la température sur la caractéristique $I=f(V)$ .....	52
-Figure(3,7) L'influence de la température sur la caractéristique $P=f(V)$ .....	53
-Figure(3,8) simulation d'un système PV avec la commande MPPT (p&o).....	53
-Figure(3,9) la puissance de GPV.....	54
-Figure(3,10) la puissance de sortie $P(W)$ .....	55
-Figure(3,11) tension de sortie.....	55
-Figure(3,12) le courant de GPV.....	56
-Figure(3,13) la tension de GPV.....	56
-Figure(3,14) rapport ciclyque.....	57
-Figure(3,15) puissance de GPV.....	58
-Figure(3,16) la puissance de sortie.....	59
-Figure(3,17) Le courant de GPV.....	59
-Figure(3,18) La tension de GPV.....	60
-Figure(3,19) La tension de sortie.....	61
-Figure(3,20) rapport ciclyque.....	61

-Figure(3,21) la puissance de GPV.....	62
-Figure(3,22) la puissance de sortie.....	63
-Figure(3,23) le courant de GPV.....	63
-Figure(3,24) la tension de sortie.....	64
-Figure(3,25) le courant de GPV.....	64
-Figure(3,26) rapport cyclique.....	65
-Figure(3,27) simulation d'un système PV avec la commande MPPT (inc).....	65
-Figure(3,28) puissance de GPV.....	66
-Figure(3,29) puissance de sortie.....	67
-Figure(3,30) tension de GPV.....	68
-Figure(3,31) courant de GPV.....	69
-Figure(3,32) tension de sortie.....	69
-Figure(3,33) rapport cyclique.....	70
-Figure(3,34) puissance de GPV.....	71
-Figure(3,35) puissance de sortie.....	72
-Figure(3,36) tension de GPV.....	73
-Figure(3,37) courant de GPV.....	74
-Figure(3,38) tension de sortie.....	75
-Figure(3,39) rapport cyclique.....	75
-Figure(3,40) puissance de GPV.....	76
-Figure(3,41) puissance de sortie.....	77
-Figure(3,42) tension de GPV.....	77

-Figure(3,43) courant de GPV.....	78
-Figure(3,44) tension de sortie.....	79
-Figure(3,45) rapport cyclique.....	79
-Figure(3,46) Modèle de simulation du GPV adapte par les deux techniques MPPT (P& O) et(INC).....	80
-Figure(3,47) les puissances de sortie des duex méthodes (p&o, inc) dans les conditions standards.....	81
-Figure(3,48) les puissances de sortie des duex méthodes (p&o, inc) quand T variable et éclairement constant.....	81
-Figure(3,49) les puissances de sortie des duex méthodes (p&o, inc) quand T cst et éclairement variable.....	82

### liste des tableaux

-Tableau( 1. 1) : caractéristiques électriques du panneau kc200gt.....	19
-Tableau (2.1) : Récapitulatif des caractéristiques des convertisseurs continu-continu.....	36

## **INTRODUCTION GENERALE**

Les énergies renouvelables sont des énergies à ressource illimitée, qui regroupent un certain nombre de filières technologiques selon la source d'énergie valorisée et l'énergie utile obtenue. La filière étudiée dans ce mémoire est l'énergie solaire photovoltaïque (PV).

L'énergie solaire photovoltaïque provient de la transformation directe d'une partie du rayonnement solaire en énergie électrique, générée par une tension et un courant, effectuée par le biais d'une cellule dite : photovoltaïque, basée sur un phénomène physique appelé effet photovoltaïque. La tension générée peut varier en fonction du matériau utilisé pour la fabrication de la cellule. L'association de plusieurs cellules PV en série/parallèle donnent lieu à un générateur photovoltaïque (GPV). En effet la caractéristique  $I(V)$  de ce dernier dépend de l'éclairement solaire et de la température. Ces variations climatiques entraînent la fluctuation du point de puissance maximale. A cause de cette fluctuation, on intercale souvent entre le générateur et le récepteur un convertisseur de courant continu connu sous le nom de hacheur suivi par des commandes permettant de poursuivre le point de puissance maximale.

Ces commandes sont, connues sous le nom de MPPT (Maximum Power Point Tracking), , qui assure le couplage entre le GPV et le récepteur, d'une façon qui permet au premier de délivrer sa puissance maximale.

Dans ce travail on va simuler tout le système à partir du GPV jusqu'à le récepteur, passant par un convertisseur (hacheur), commandé par deux techniques de MPPT (perturb and observe et incremental conductance), avec les logiciels de la simulation : MATLAB Simulink

# Chapitre I

## Le générateur photovoltaïque

## 1.1 Introduction

La conversion directe de la lumière en énergie électrique s'obtient par l'intermédiaire de cellules photovoltaïques, selon un processus appelé couramment effet photovoltaïque [1]. Dans ce chapitre, nous allons présenter un bref rappel sur les semi-conducteurs, on va discuter l'influence des paramètres météorologiques sur la caractéristique courant-tension  $I(v)$ , et puissance-tension  $p(v)$  délivré par une simulation d'un panneau solaire (kc200gt) sous MATLAB SIMULINK

## 1.2 Rappel sur les semi-conducteurs

Le semi-conducteur a une structure cristalline. Celle-ci consiste en des atomes parfaitement rangés en lignes et en colonnes et liés les uns aux autres par quatre électrons périphériques. Ces électrons ne peuvent pas se déplacer, et l'ensemble se comporte comme un bon isolant électrique.

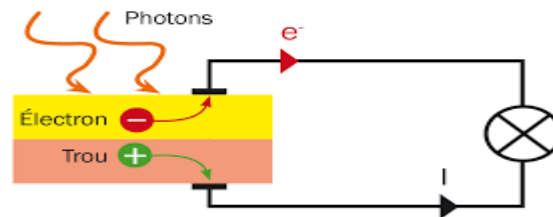
Quand un semi-conducteur est éclairé par la lumière du soleil, les photons qui constituent cette lumière sont capables de transmettre leur énergie aux électrons de valence du semi-conducteur pour rompre la liaison qui les maintient liés aux atomes respectifs. Pour chaque liaison rompue, on obtient un électron libre dans le semi-conducteur ainsi qu'un trou. Les trous se comportent, sous différents aspects, comme des particules avec une charge positive égale à celle de l'électron.

## 1.3 L'effet photovoltaïque et la jonction PN

Cet effet fut observé la première fois en 1839 par le physicien français Edmond Becquerel, l'effet photovoltaïque permet la transformation de l'énergie lumineuse en électricité. Sous l'effet d'un rayonnement lumineux incident, les électrons des bandes de valence du semi-conducteur vont pouvoir passer dans la bande de conduction et devenir libres. Ce phénomène va engendrer au sein de la structure du semi-conducteur la création de pair

d'électron-trou. Ceux-ci, sous l'effet de la barrière de potentiel, vont s'accumuler sur chacune des faces extérieures des zones P et N. Ainsi, une tension électrique apparaît dans les deux cotés **N et P**.

Le dispositif devient donc générateur électrique sous l'effet de la lumière. La collecte de courant se fait par les contacts métalliques (électrodes), (Figure I.1) Si ces électrodes sont reliées à un circuit extérieur, un courant continu circule [2] [3] [4].



**Figure (1.1)** :L'effet photovoltaïque

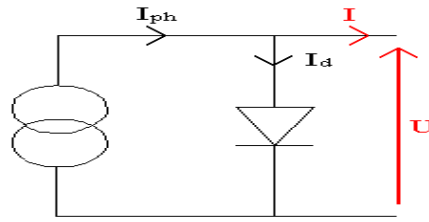
## 1.4 La cellule photovoltaïque

Appelé aussi, cellule solaire ou photopile, la cellule photovoltaïque est fabriquée à l'aide de matériaux semi-conducteurs. Elle est l'élément de base d'un générateur photovoltaïque, son rôle est de transformer l'énergie solaire en électricité de type continu. La proportion d'énergie transformée constitue le rendement de la cellule [5].

La plus répandue est à base de silicium monocristallin, un certain nombre d'autres matériaux et de structures font l'objet d'efforts de recherche considérables visant à découvrir et à mettre au point des solutions nouvelles pour obtenir des cellules à base de sulfure de cadmium, du silicium amorphe, de l'arséniure de gallium [1].

## 1.5 Représentations électroniques des cellules PV

On peut facilement représenter la cellule PV par le schéma de la figure (Figure I. 2), où le générateur de courant modélise le courant  $I_{ph}$  généré par l'éclairement appliqué à la cellule (l'effet photovoltaïque). La diode modélise le comportement de la cellule dans l'obscurité. C'est le cas idéal de la cellule.



**Figure( 1.2 )** Représentation d'une cellule PV idéale.

Dans ce cas le courant  $I$  est donné par :

$$I = I_{ph} - I_d(1)$$

Avec  $I_{ph}$  : Courant créé par l'effet voltaïque.

$$I_{ph} = [I_{sc} + K_i(T - 298)] \frac{\beta}{1000} \quad (2)$$

$$I_d : \text{Courant de la diode exprimé par : } I_d = I_s \left[ \exp\left(\frac{qV}{nKT}\right) - 1 \right] \quad (3)$$

Ou :  $I_s$  : courant de saturation inverse de la diode.

$q$  : la charge de l'électron ( $1,6 \cdot 10^{-19}$  c).

$K$  : constante de Boltzmann ( $1,38 \cdot 10^{-23}$  m<sup>2</sup>kg/s<sup>2</sup>K).

$T$  : température de la jonction.

$V$  : tension de sortie de la cellule.

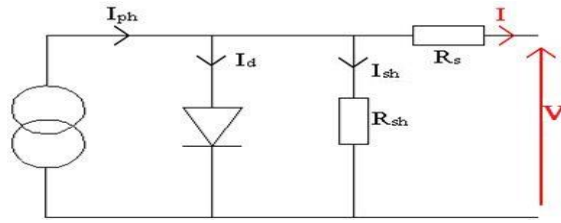
$n$  : le facteur d'idéalité de la diode, dans le cas idéal  $n=1$ .

$\beta$ : niveau d'ensoleillement.

Mais en réalité il y a des pertes au niveau de la cellule donc on ajoute au schéma de la cellule idéale deux résistances pour modéliser les pertes internes :

- Résistance série  $R_s$  : cette résistance est constituée de plusieurs composants. Parmi ces composants, l'émetteur et grille supérieure (composé du doigt et la résistance de barres) dominant la résistance série globale.
- Résistance de shunt  $R_{sh}$  : Une faible résistance de shunt provoque des pertes de puissance dans les cellules solaires en fournissant un trajet de courant alternatif pour le courant généré par la lumière. Une telle dérivation réduit la quantité de courant circulant à travers la jonction de cellules solaires et réduit la tension à partir de la cellule solaire. L'effet d'une résistance de shunt est particulièrement grave à de faibles niveaux de lumière.





**Figure (1. 3)** Représentation d'une cellule PV réelle

La nouvelle équation modélisant la cellule sera

$$I = I_{ph} - I_d - I_{sh} \quad (1.4)$$

Ou :

$$I_{sh} = \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \quad (1.5)$$

$$\text{Et : } I_d = I_s \left[ \exp \left( q \left( \frac{V + IR_s}{nKT} \right) - 1 \right) \right] \quad (1.6)$$

L'équation (4) sera donc :

$$I = I_{ph} - I_s \left[ \exp \left( \frac{q(V + IR_s)}{nKT} \right) - 1 \right] - \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \quad (1.7)$$

## 1.6 : Caractéristique d'une cellule photovoltaïque

### 1.6.1 La tension de circuit ouvert $V_{co}$

La tension en circuit ouvert  $V_{co}$ , est la tension maximale disponible à partir d'une cellule solaire, ce qui se produit à courant nul. La tension en circuit ouvert correspond à la quantité de polarisation en sens direct sur la cellule solaire en raison de la polarisation de la jonction de la cellule solaire avec le courant généré par la lumière [6].

### 1.6.2 Le courant de court-circuit $I_{cc}$

Si la résistance de charge aux bornes de la cellule PV est nulle, alors sous une intensité de lumière donnée, le courant qui est généré sera à sa valeur maximale pouvant être atteinte. Dans ces conditions, la cellule photovoltaïque est dite être dans sa configuration de court-circuit et le courant est appelé courant de court-circuit,  $I_{cc}$ .

Afin de maximiser l'efficacité d'une cellule photovoltaïque, les chercheurs et les ingénieurs tentent de maximiser la tension en circuit ouvert et le courant de court-circuit [7].

### 1.6.3 La puissance de crête $P_c$

Mesurée par watt-crête, est la puissance électrique maximale délivrée par une Cellule solaire pour un ensoleillement standard de  $1000\text{W}/\text{m}^2$  à  $25^\circ\text{C}$ .

### 1.6.4 le point de fonctionnement maximal $P_{pm}$

C'est le point de la puissance maximale  $P_{max}$  dont les coordonnées sont le courant  $I_{max}$ , et la tension  $V_{max}$  [8].

### 1.6.5 le facteur de forme FF

Le facteur de forme (fill factor en anglais) est une mesure de la véritable caractéristique I-V. Sa valeur est supérieure à 0,7 pour les bonnes cellules [9]. Il est le rapport entre la puissance maximale que peut être délivrée à la charge et le produit de  $I_{cc}$  et  $V_{co}$ .

$$FF = \frac{P_c}{I_{cc}V_{co}}(8)$$

### 1.6.6 Le rendement d'un module

Il représente le rapport entre l'énergie électrique fournie par la cellule et l'énergie incidente et s'exprime par la relation suivante [10]:

$$\eta = \frac{P_c}{G_b \cdot S}(9)$$

Avec :  $P_c$  : la puissance maximale délivrée à la charge.

$G_b$  : le flux global incliné.

$S$  : la surface de module photovoltaïque.

Ce rendement de conversion dépend de plusieurs facteurs qui sont :

- Absorption incomplète des photons et excès des photons absorbés ;
- La réflexion à la surface qui peut être réduit par le traitement antireflet de la surface exposée au rayonnement à incidence normale;
- Rendement de collecte qui dépend des caractéristiques des matériaux

## 1.7 Les caractéristiques électriques d'un module PV

Pour des conditions météo logiques standard, d'un éclairage de  $1000\text{w}/\text{m}^2$  et une température de  $25^\circ\text{c}$ , on a simulé un panneau solaire type kc200gt (Tableau I. 1) sous obtenue les résultats par le couplage avec le Matlab Simulink (Figure I.4 et Figure I.5)

Modèle	KC200GT	Simulation
Puissance maximale, $P_{\max}$	200 W	200.1 W
Tolérance	+10% /-5%	/
Tension $V_{\max}$ correspondant à $P_{\max}$	26.3 V	26.3 V
Courant $I_{\max}$ correspondant à $P_{\max}$	7.61 A	7.61 A
Tension de circuit-ouvert, $V_{\text{co}}$	32.9 V	32.9 V
Courant de court-circuit, $I_{\text{cc}}$	8.81 A	8.81 A

Tableau ( 1. 1) : caractéristiques électriques du panneau kc200gt

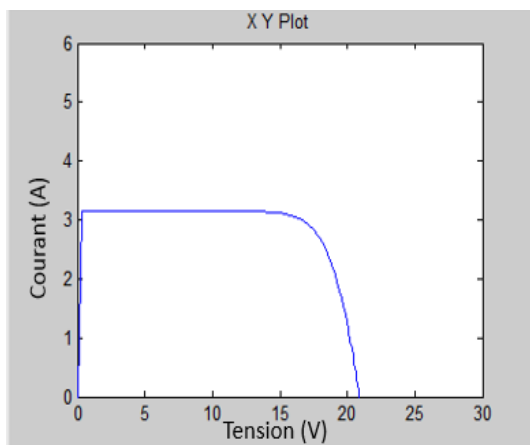


Figure ( I.4) : la caractéristique I(v)

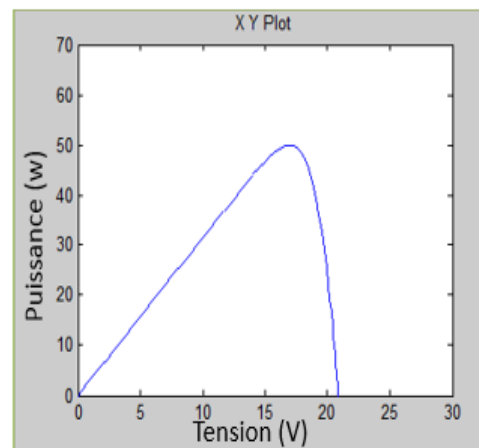


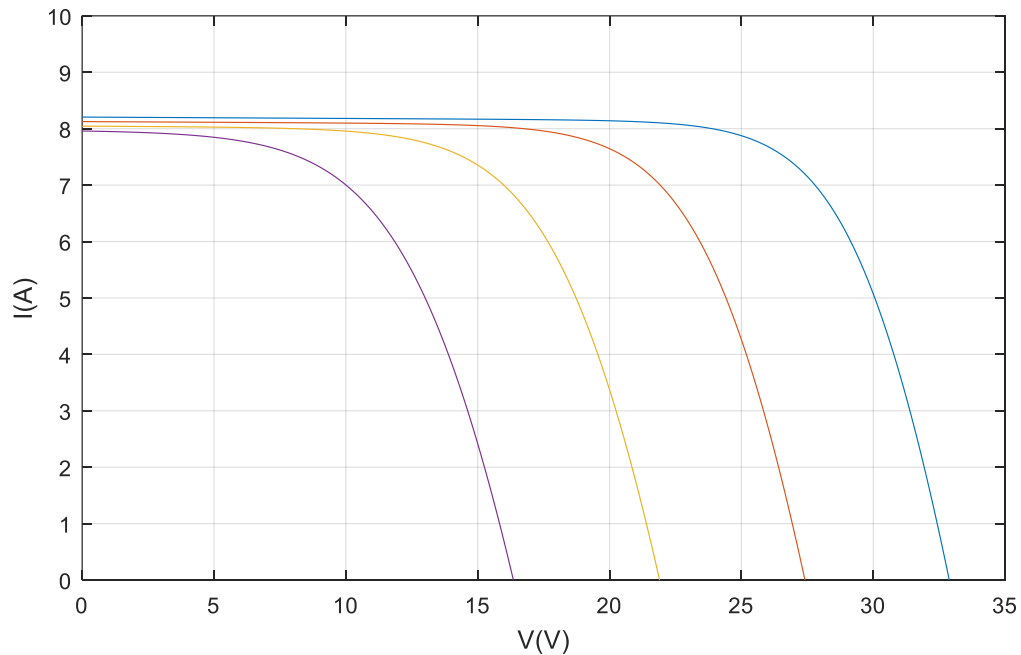
Figure (I.5) : la caractéristique P(v)

À partir de la figure( I.5), on observe que le logiciel Matlab simulink prend comme considération la résistance interne du panneau : existence d'une droite reflétant la loi d'ohm

## 1.8 : Etude et simulation de l'influence des conditions météorologiques sur le module PV

### 1.8.1 l'influence de la température

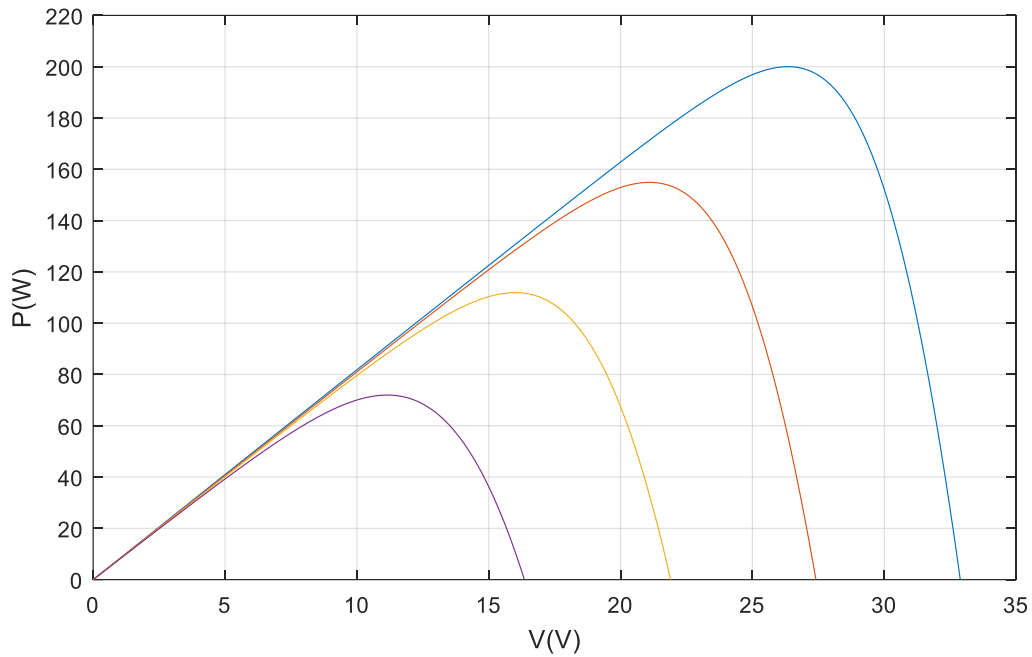
La courbe ci-dessous (Figure 1.6) relate la variation du courant en fonction de la tension pour un éclairage fixe et des températures variables dans la gamme  $[10^{\circ}, 55^{\circ}]$  par pas de  $10^{\circ}$



**Figure (1.6) :** Caractéristiques I –v d'un module KC200GT pour différentes températures constantes sous une irradiation de  $1000 \text{ W/m}^2$

Nous remarquons que la température a une influence négligeable sur la valeur du courant de court-circuit. Par contre, la tension en circuit ouvert baisse assez fortement lorsque la température augmente.

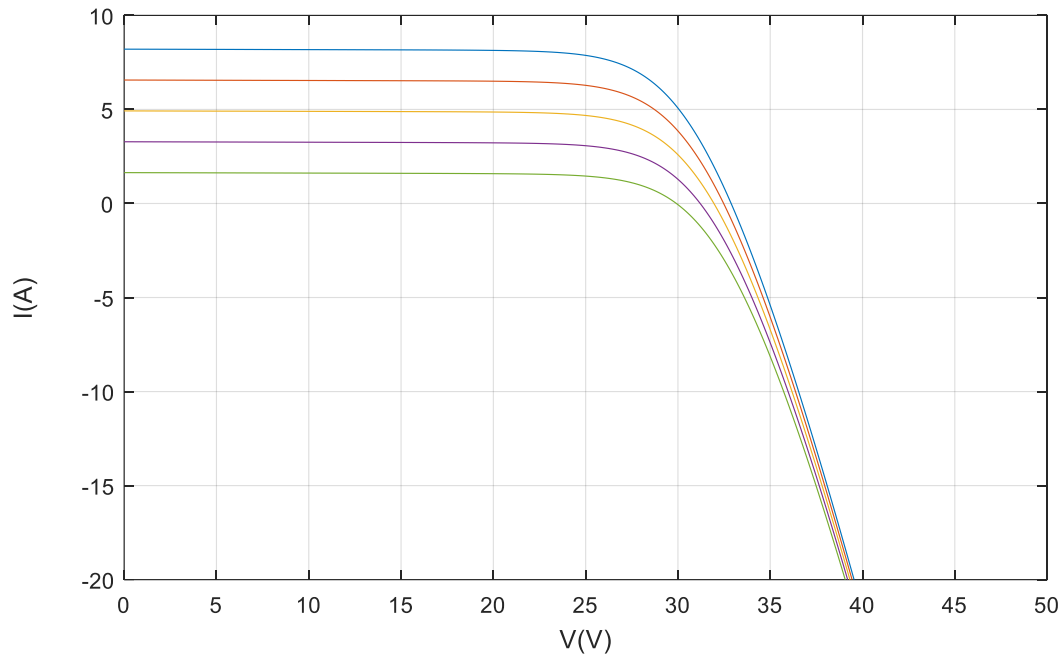
Dans le cas de la variation de la puissance en fonction de la tension (Figure I .8) toujours à éclairage fixe et à température variable ,on constate que lorsque la température augmente, la puissance diminue.



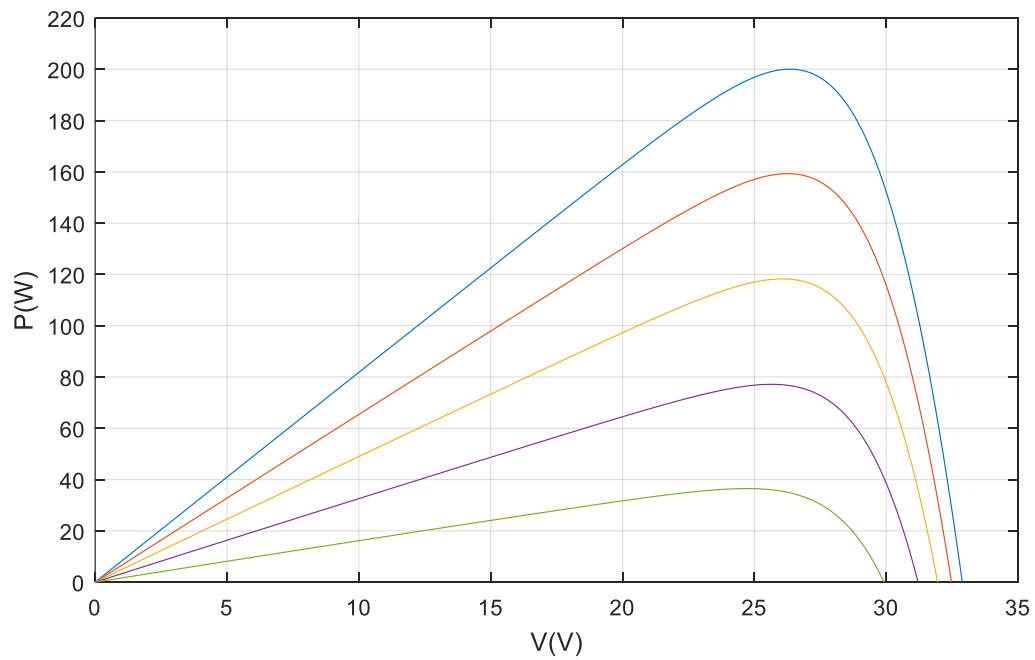
**Figure (1.7)** Caractéristiques P – V d’un module KC200GT pour différentes températures constantes sous une irradiation de  $1000 \text{ W/m}^2$

### 1.8.2 L’influence de l’éclairement

Dans le cas d’une étude à température fixe ( $25^\circ$ ) et à éclairement variable, les caractéristiques  $I(V)$  (Figure I .9) et  $P(V)$  (Figure I.10) nous remarquons que l’augmentation de l’éclairement, engendre une augmentation d’une façon importante de puissance et du courant délivré par le panneau solaire par contre la tension la tension  $V_{co}$  est affectée est subit aussi de légers variation en passant d’un éclairement a une autre .



**Figure(1.8)** Caractéristiques I – V d'un module KC200GT pour différents éclairagements et une température ambiante de 25°C



**Figure ( 1.9)** Caractéristiques P – V d'un module KC200GT pour différents éclairagements et une température ambiante de 25°C

## **1.9 Conclusion**

La cellule photovoltaïque est l'élément de base dans la conversion de l'énergie solaire en énergie électrique. Elle présente une caractéristique courant-tension fortement non linéaire, et son rendement dépend des conditions météorologiques (éclairage, température).

Donc il est nécessaire de raccorder un étage qui doit suivre tous changements météorologiques, et qui sera bien détailler dans le chapitre suivant.

## **Chapitre 2 : Le convertisseur DC/DC**

### **Et les commandes MPPT**



## 2.1 Introduction

Ce chapitre est consacré, pour la définition de l'étage d'adaptation (convertisseur DC/DC) connue par le nom hacheur.

L'utilisation des convertisseurs de puissance pour différentes applications devient de plus en plus importante. Les domaines sont principalement les applications domestiques (téléphone mobile, ordinateurs, électroménager), l'industrie automobile (avec l'apparition de véhicules hybrides et électriques), l'aéronautique (l'avion électrique), le domaine ferroviaire, les énergies renouvelables (panneaux solaires photovoltaïques, éoliennes), les réseaux de transport d'énergie électrique (les liaisons à courant continu), etc.

Les hacheurs sont des convertisseurs statiques continu-continu, permettant de générer une source de tension continue variable à partir d'une source de tension continue fixe. Ils se composent de condensateurs, d'inductance et d'interrupteurs statiques. Ils consomment moins de puissance. C'est pour cette raison que les hacheurs ont de très bons rendements.

On détaillera son principe de fonctionnement, suivi par une classification des commandes MPPT (Maximum Power Point Tracking) présentée dans la littérature. Dans le cadre de notre travail nous nous sommes particulièrement intéressés par deux méthodes : l'incrémentation de la conductibilité, et la méthode de perturbation et observation (p&o).

## 2.2 L'étage d'adaptation entre un générateur PV et une charge

Un GPV présente des caractéristiques  $I(V)$  non linéaires avec des ppm, ces caractéristiques dépendent entre autre du niveau d'éclairement et de la température de la cellule. De plus selon les caractéristiques de la charge sur laquelle le GPV débite, nous pouvons trouver un très fort écart entre la puissance potentielle du générateur et celle réellement transférée à la charge en mode connexion direct.[11]

Afin d'extraire à chaque instant le maximum de puissance disponible aux bornes du GPV et la transférer à la charge, la technique utilisée classiquement est d'utiliser un étage d'adaptation entre le GPV et la charge comme décrit dans la (figure II.1). Cet étage joue le rôle d'interface entre les deux éléments en assurant à travers une action de contrôle le transfert du maximum de puissance fournie par le générateur pour qu'elle soit la plus proche possible de  $P_{\max}$  disponible.[12]

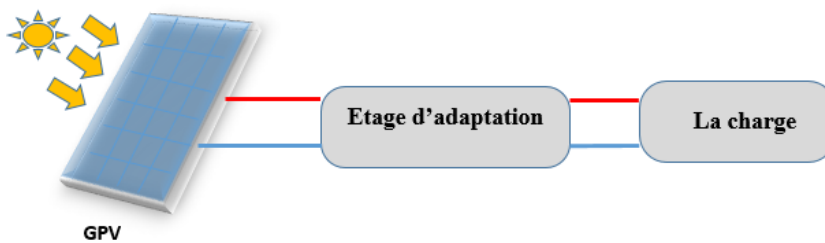
Aujourd'hui, on peut trouver deux types d'étages d'adaptation électroniques distincts commercialisés.

Le premier type permet de connecter le GPV à une charge continue telle qu'une batterie. Il fait appel à des convertisseurs DC-DC. Ce type d'architecture est la plupart du temps utilisé pour un fonctionnement en site isolé (hors réseau, off-grid en anglais).

Dans certains cas, il n'y a pas le choix car les caractéristiques de la charge ne sont pas compatibles avec la forme d'électricité produite par un GPV. C'est le cas de toutes les charges ayant besoin des tensions alternatives. Dans ce cas, on fait appel à un second type d'architecture permettant d'effectuer une conversion continu-alternatif (DC-AC).

L'étage d'adaptation (partie de puissance) se compose généralement d'un convertisseur statique, qui est situé entre les panneaux solaires et la charge.

Par définition un convertisseur statique est un montage permettant par une commande adaptée de un ou plusieurs interrupteurs à semi-conducteur de régler un transfert d'énergie entre une source et un récepteur, Usuellement, au sein d'un MPPT.



**Figure (2.1):** Emplacement de l'étage d'adaptation

### 2.3 Différents types d'hacheurs

Selon la position du commutateur et du hacheur, différents types de convertisseurs de tension peuvent être réalisés, nous citons à titre d'exemple:

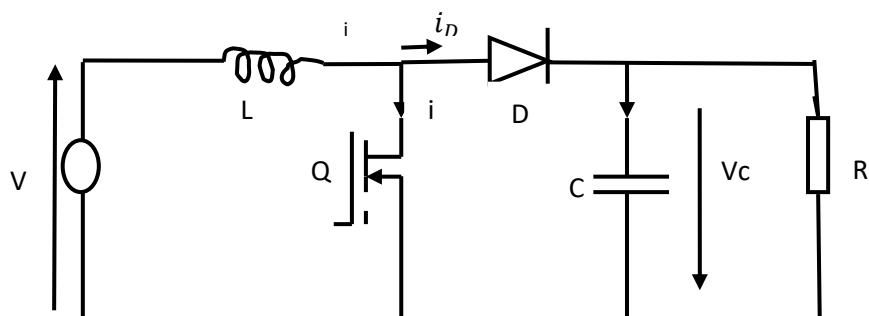
- ✓ L'abaisseur de tension « Buck »
- ✓ L'élévateur de tension « Boost »

- ✓ L'abaisseur élévateur de tension « Buck-Boost »
- ✓ Le Cuk.

Dans ce qui suit, nous abordons la modélisation des ces quatre convertisseur.

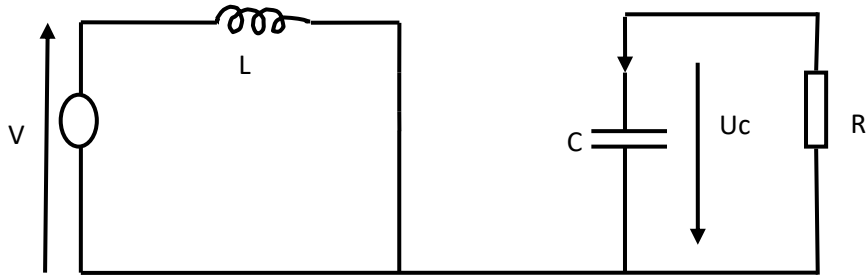
### 2.3.1 Convertisseur Boost

On considère un convertisseur DC-DC de type Boost. Il est composé essentiellement d'un interrupteur  $K$  (comme IGBT ou MOSFET) et d'une diode  $D$ . L'interrupteur  $K$  est commandé par un signal à modulation de largeur d'impulsion (MLI) de période de découpage fixe  $Td$  et de rapport cyclique variable  $\alpha$ . La conduction des deux interrupteurs est complémentaire, quand  $K$  est fermé  $D$  est ouvert ; et quand  $K$  est ouvert,  $D$  est fermé. Durant chaque période,  $K$  est fermé de l'instant 0 à  $\alpha Td$  et ouvert de  $\alpha Td$  à  $Td$ . On distingue deux modes de fonctionnement selon que le courant dans l'inductance s'annule (conduction discontinue) ou pas (conduction continue). On s'intéresse au second cas qui est le plus important. La figure (2.2) donne le schéma de principe de ce convertisseur, les intervalles de conduction de l'interrupteur et de la diode ainsi que les formes d'ondes de ses courants (à gauche) et tensions (à droite).



**Figure 2.2)** : Formes d'ondes des courants et tensions du convertisseur Boost

Lorsque l'interrupteur  $K$  est fermé ( $0 < t < \alpha T_e$ ), le circuit du convertisseur devient Figure( 2.3) :



**Figure )2.3)** : Circuit équivalent du Boost quand l'interrupteur est fermé.

$$L \frac{di_L}{dt} = Ve \tag{2.1}$$

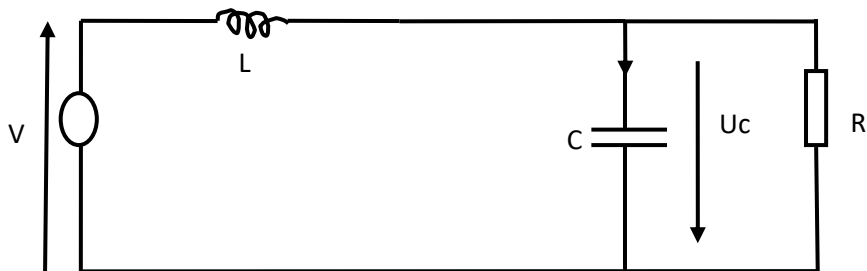
$$i_L = I_{mn} + \frac{Ve}{L} t \tag{2.2}$$

Avec  $I_{min}$  la valeur minimale du courant dans l'inductance.

A l'instant  $t = \alpha T_d$ , le courant dans l'inductance atteint sa valeur maximale  $I_{max}$

$$I_{max} = I_{min} + \frac{Ve}{L} \alpha T_d \tag{2.3}$$

Lorsque l'interrupteur  $K$  est ouvert ( $\alpha T_d < t < T_d$ ), le circuit du convertisseur sera comme montré dans la Figure (2.4).



**Figure ( 2.4)** : Circuit équivalent du Boost quand l'interrupteur est ouvert .

$$L \frac{di_L}{dt} = Ve - Vs \tag{2.4}$$

$$i_L = I_{max} + \frac{Ve - Vs}{L} (t - \alpha T_d) \tag{2.5}$$

A l'instant  $t = T_d$ , le courant dans l'inductance revient à sa valeur minimale  $I_{min}$

$$i_{\min} = I_{\max} + \frac{V_e - V_s}{L} (t - a T_d) \quad (2.6)$$

Soit  $\Delta i_{L=I_{\max}-i_{\min}}$  l'ondulation du courant dans l'inductance.

En faisant l'égalité des valeurs de l'ondulation du courant tirées des équations (2.3) et (2.6), on peut déduire la valeur moyenne de la tension de sortie  $V_s$  :

$$V_s = \frac{1}{1-\alpha} V_e \quad (2.7)$$

On remarque qu'on peut contrôler la tension de sortie du convertisseur en faisant varier sa tension d'entrée ou son rapport cyclique. Celui-ci étant toujours compris entre 0 et 1, alors le montage fonctionne en élévateur de tension.

En appliquant le principe de conservation de puissance entre l'entrée et la sortie du convertisseur, on peut établir la valeur moyenne du courant dans l'inductance en fonction du courant moyen dans la charge et du rapport cyclique :

$$I_L = \frac{1}{1-\alpha} I_s \quad (2.8)$$

De l'expression (2.3), on exprime l'ondulation de courant dans l'inductance :

$$\Delta i_{L=} \frac{\alpha V_e}{L} T_d = \frac{\alpha V_e}{L f} \quad (2.9)$$

Avec  $f$  la fréquence de découpage.

Pendant la première séquence de fonctionnement ( $0 < t < a T_d$ ), seul le condensateur donne de l'énergie à la charge, on peut écrire :

$$C \frac{dv_s}{dt} = -i_s \quad (2.10)$$

Alors l'ondulation de la tension de sortie peut être exprimée par:

$$\Delta V_s = \frac{a I_s}{C \cdot f} T_d = \frac{a V_e}{(1-\alpha) R C f} \quad (2.11)$$

D'après l'analyse des deux séquences de fonctionnement, on constate que les contraintes sur l'interrupteur commandé et la diode sont les mêmes en courant et en tension

$$i_{k,\max} = i_{d,\max} = I_{\max} = I_L + \frac{\Delta i_L}{2} = \frac{I_s}{1-\alpha} + \frac{\Delta i_L}{2} \quad (2.12)$$

$$V_{k,\max} = |V_{d,\max}| = V_{s,\max} = V_s + \frac{\Delta V_s}{2} = \frac{V_e}{1-\alpha} + \frac{\Delta V_s}{2} \quad (2.13)$$

### 2.3.2 Convertisseur Buck

On procède de la même manière dans l'étude du convertisseur Buck. La figure (2.5) montre la structure et les formes d'ondes du courant et de la tension de ce convertisseur qui est caractérisé par la disposition en série de l'interrupteur avec la source.

La tension de sortie en valeur moyenne, l'ondulation de courant dans l'inductance et l'ondulation de la tension de sortie sont donnés respectivement par:

$$V_s = a \cdot V_e \quad (2.14)$$

$$\Delta i_L = \frac{a(1-a) \cdot V_e}{L \cdot f} \quad (2.15)$$

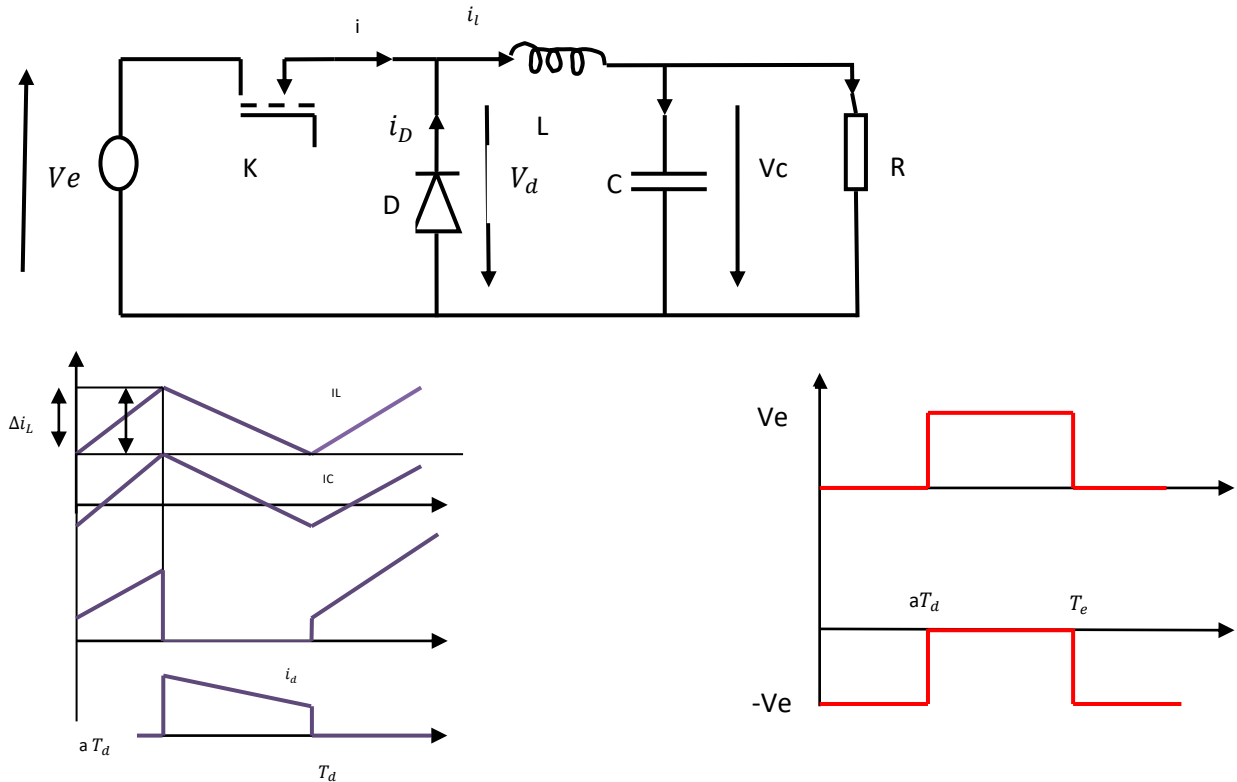
$$\Delta V_s = \frac{\Delta i_L}{8Cf} = \frac{a(1-a)V_e}{8CLf^2} \quad (2.16)$$

Le convertisseur est donc abaisseur en tension.

Le courant moyen traversant l'inductance est égal au courant moyen dans la charge :

$$I_L = I_s \quad (2.17)$$

Les contraintes sur l'interrupteur commandé et la diode sont les mêmes.



**Figure )2.5)** : Formes d'ondes des courants et tensions du convertisseur Buck.

En tension, on a :

$$V_{k,max} = |V_{d,max}| = V_e \quad (2.18)$$

Et en courant :

$$i_{k,max} = i_{d,max} = I_{L,max} = I_L + \frac{\Delta i_L}{2} \quad (2.19)$$

### Calcul de C:

Le condensateur de sortie C sert à filtrer la tension de sortie. Plus la valeur de C est grande, plus le signal de sortie n'est lissé, mais d'autre part, le courant absorbé atteint des pics plus considérables. Les paramètres dimensionnant d'un condensateur sont sa capacité et la tension max qu'il peut supporter. La valeur du condensateur nous sera donnée à partir de valeur crête-à-crête du signal Vs en régime permanent dont il dépend

$$\text{On a } i_c(t) = i_L(t) - I_s \quad (2.20)$$

$$\Delta V_s = V_2 - V_1 = \frac{1}{C} \int_{t_A}^{t_2} \delta I_L(t) dt \quad (2.21)$$

$$\text{Donc } \Delta V_s = \frac{1}{C} A \quad (2.23) \quad \text{et } A = \frac{1}{2} \times I_{cmax} \times (t_2 - t_1) \quad (2.22)$$

$$\text{On calcule : } t_2 - t_1 \text{ et } I_{cmax}, I_{cmin} \quad (2.24)$$

• Pendant la Première phase de conduction ( $0 < t < aT$ ):

$$t = 0 \rightarrow \begin{cases} i_L = 0 \\ I_s = \frac{1}{2} I_{Lmax} (a - a') \end{cases} \rightarrow I_{cmin} = -\frac{I_{Lmax}}{2} (a - a') \quad (2.25)$$

$$t = aT \rightarrow \begin{cases} i_L = I_{Lmax} \\ I_s = \frac{1}{2} I_{Lmax} (a - a') \end{cases} \rightarrow I_{cmax} = \frac{I_{Lmax}}{2} (2 - (a - a')) \quad (2.26)$$

On peut écrire l'équation du courant de C :

$$i_c = \frac{I_{cmax} - I_{cmin}}{aT} t + I_{cmin} \quad (2.27)$$

$$i_c = 0 \rightarrow \frac{I_{Lmax}}{aT} t + \frac{I_{Lmax}}{2} (a - a') = 0 \quad (2.28)$$

$$t = t_1 = \frac{aT}{2} (a - a') \quad (2.29)$$

• Pendant la deuxième phase de conduction ( $aT < t < (a - a')T$ ):

$$t = aT \rightarrow \begin{cases} i_L = I_{Lmax} \\ I_S = \frac{1}{2} I_{Lmax}(a - a') \end{cases} \rightarrow I_{cmax} = \frac{I_{Lmax}}{2} (2 - (a - a')) \quad (2.30)$$

$$t = (a - a') \rightarrow \begin{cases} i_L = 0 \\ I_S = \frac{1}{2} I_{Lmax}(a - a') \end{cases} \rightarrow I_{cmin} = -\frac{I_{Lmax}}{2} (a - a') \quad (2.31)$$

On peut écrire l'équation du courant de C :

$$i_c = \frac{I_{cmin} - I_{cmax}}{a'T} (t - aT) + I_{cmin} \quad (2.32)$$

$$i_c = -\frac{I_{Lmax}}{a'T} (t - aT) + \frac{I_{Lmax}}{2} (2 - (a + a')); a'T = (a' + a)T - aT \quad (2.33)$$

$$i_c = -\frac{I_{Lmax}}{a'T} (t - aT) + \frac{I_{Lmax}}{2} (2 - (a + a')) = 0 \quad (2.34)$$

$$t = t_2 = (a + a') \left(1 - \frac{a}{2}\right) T \quad (2.35)$$

On calcule :  $t_1 - t_2$  :

$$(t_2 - t_1) = (a + a') \left(1 - \frac{a}{2} - \frac{a'}{2}\right) T = \frac{(2 - (a + a'))}{2} (a + a') T \quad (2.36)$$

$$A = \frac{1}{2} \times I_{cmax} \times (t_2 - t_1) = \frac{1}{2} \frac{I_{Lmax}}{2} (2 - (a + a')) \frac{(2 - (a + a'))}{2} (a + a') T \quad (2.37)$$

$$I_{Lmax} = \frac{V_s a' T}{L} \quad \text{et} \quad V_s = \frac{a V_e}{(a + a')} \quad I_{Lmax} = \frac{a' a V_e T}{(a + a') L} \quad (2.38)$$

$$\text{Donc :} \quad A = \frac{a' a V_e (2 - (a - a'))^2}{8 L f^2} \quad (2.39)$$

$$\text{Alors :} \quad \Delta V_s = \frac{1}{C} A = \frac{a' a V_e (2 - (a - a'))^2}{8 L f^2} \quad (2.40)$$

$$C = \frac{a' a V_e (2 - (a - a'))^2}{8 L \Delta V_s f^2} \quad (2.41)$$

**Calcule l'inductance L :**

$$\text{On a :} \quad I_{Lmax} = \frac{V_s a' T}{L} \quad (2.41)$$

$$\text{Alors :} \quad I_{Lmin} \geq \frac{V_s a' T}{L} \quad (2.42)$$



### 2.3.3 Convertisseur Buck-Boost

La topologie et les formes d'ondes de courant et de tension obtenues de ce convertisseur sont présentées à la figure (2.6) La tension de sortie moyenne est donnée par:

$$V_s = \frac{aV_e}{1-a} \quad (2.43)$$

L'ondulation de courant dans l'inductance est donnée par :

$$\Delta I_L = \frac{aV_e}{L_f} \quad (2.44)$$

et l'ondulation de la tension de sortie:

$$\Delta V_s = \frac{aI_s}{C.f} = \frac{a^2 V_e}{(1-a)RCf} \quad (2.45)$$

La tension de sortie du convertisseur Buck-Boost est négative par rapport à la tension d'entrée. Son amplitude peut être supérieure ou inférieure à celle de la tension d'entrée selon la valeur du rapport cyclique. C'est un abaisseur-élévateur-inverseur en tension. Le courant moyen traversant l'inductance est donné par :

$$I_L = \frac{I_s}{1-a} \quad (2.46)$$

Les contraintes en tension et en courant sur l'interrupteur commandé et la diode sont les mêmes :

$$V_{k,max} = |V_{d,max}| = V_{s,max} + V_e = \frac{V_e}{1-a} + \frac{\Delta V_s}{2} \quad (2.47)$$

$$i_{k,max} = i_{d,max} = I_{L,max} = \frac{I_s}{1-a} + \frac{\Delta i_L}{2} \quad (2.48)$$

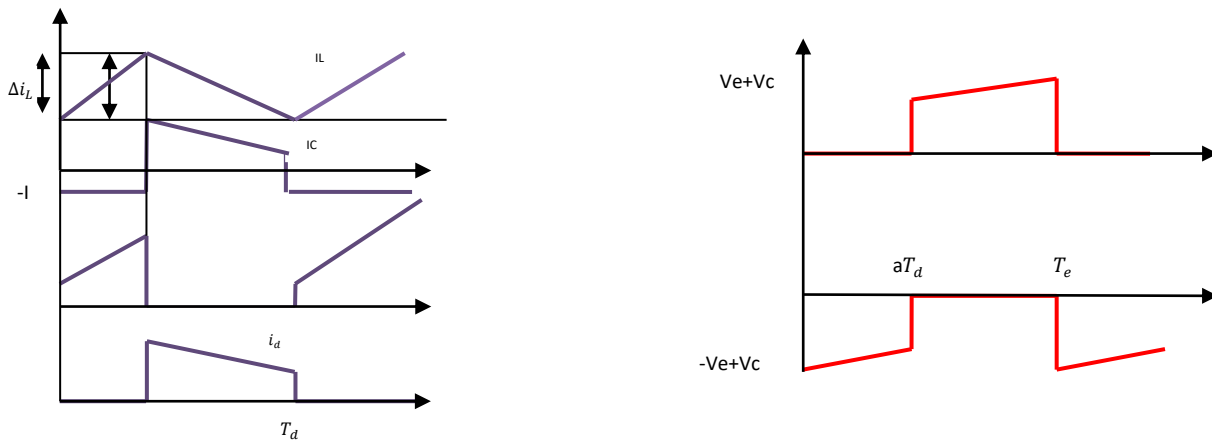
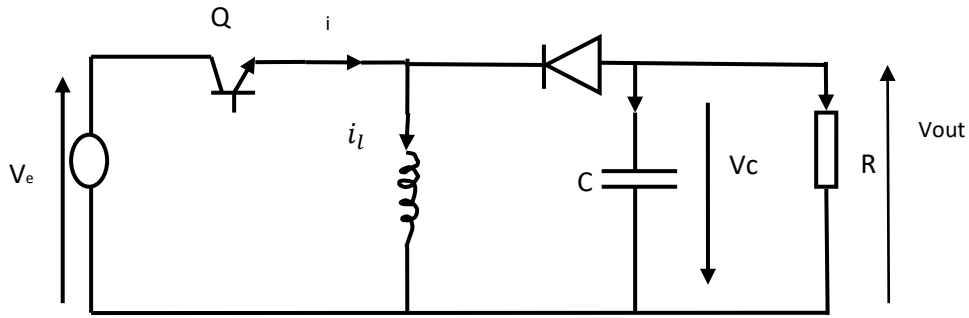


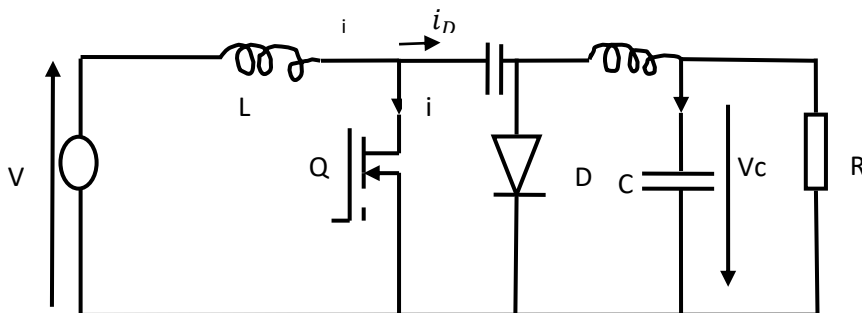
Figure 2.6) : Formes d'ondes des courants et tensions du convertisseur Buck-Boost.

### 2.3.4- Convertisseur Cuk

La figure (2.7) illustre le circuit électrique du convertisseur Cuk et ses formes d'ondes de courant et de tension. La tension de sortie moyenne est donnée par:

$$V_s = \frac{\alpha V_e}{1-\alpha} \quad (2.49)$$

On remarque que le rapport de transformation est similaire à celui du Buck-Boost. De même, on peut dire que c'est un montage abaisseur-élevateur-inverseur en tension.



**Figure )2.7) :** Circuit équivalent du convertisseur Cuk.

L'expression reliant les courants moyens est :

$$I_L = \left(\frac{a}{1-a}\right) I_L = \left(\frac{a}{1-a}\right) I_s \quad (2.50)$$

Les ondulations de courant dans les deux inductances :

$$\Delta i_L = \frac{aV_e}{L'f} \quad (2.51)$$

$$\Delta i_{L'} = \frac{aV_e}{L'f} \quad (2.52)$$

L'ondulation de la tension de sortie:

$$\Delta V_s = \frac{\Delta i_{L'}}{8C'f} = \frac{aV_e}{8L'Cf^2} \quad (2.53)$$

L'ondulation de la tension aux bornes de  $C'$

$$\Delta V_{C'} = \frac{(1-a)I_L}{C'f} = \frac{a^2 V_e}{(1-a)RCf} \quad (2.54)$$

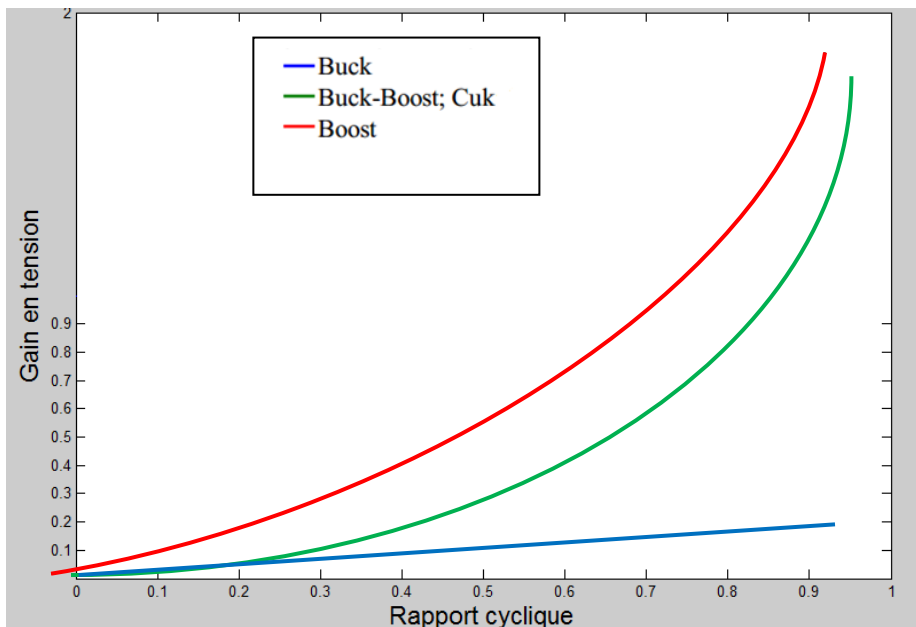
Les contraintes sur l'interrupteur commandé et la diode sont :

$$V_{k,max} = |V_{d,max}| = V_{C',max} = \frac{V_e}{1-a} + \frac{\Delta V_{C'}}{2} \quad (2.55)$$

$$i_{k,max} = i_{d,max} = I_L - I_{L'} = \frac{\Delta i_L + \Delta i_{L'}}{2} \quad (2.56)$$

## 2.4)- Récapitulatif d'analyse et choix du convertisseur

Un panneau solaire PV est un générateur d'électricité continu basse tension. Il est préférable de mettre un dispositif élévateur de tension comme étage adaptateur d'impédance entre la source et la charge. Tous les convertisseurs cités précédemment excepté le Buck, peuvent jouer ce rôle d'élévateur de tension. D'ailleurs, les structures Buck-Boost, Cuk et Sepic sont élévatrices pour un rapport cyclique supérieur à un demi. Si on regarde à la complexité des structures, le Boost est le plus simple. Les contraintes en tension et en courant sur les interrupteurs et les diodes sont presque similaires pour les différentes topologies élévatrices.



**Figure (2.8) :** Evolution du gain en tension en fonction du rapport cyclique des convertisseurs

Si on les compare du point de vue gain en tension, aussi le Boost prend la première place comme le montre la figure (2.9) qui donne l'évolution du gain en tension en fonction du rapport cyclique. Enfin, une comparaison de ces convertisseurs est donnée par le Tableau 2. qui récapitule l'analyse faite auparavant sur les différents convertisseurs. On peut remarquer aussi que la diode D présente dans le convertisseur Boost peut jouer le rôle de protection du GPV ce qui permet de dispenser de la diode anti-retour et de faire des économies par rapport aux autres topologies.

**Tableau 2.1.** Récapitulatif des caractéristiques des convertisseurs continu-continu

Paramètres	Gain en tension	Contraintes en tension	Contraintes en courant
convertisseurs	$\frac{V_s}{V_e}$	$V_{k,max} =  V_{d,max} $	$i_{k,max} =  i_{d,max} $
Boost	$\frac{1}{1-a}$	$\frac{V_e}{1-a} + \frac{\Delta V_s}{2}$	$\frac{I_s}{1-a} + \frac{\Delta i_L}{2}$
Cuk	$\frac{a}{1-a}$	$\frac{V_e}{1-a} + \frac{\Delta V_{c'}}{2}$	$I_L + I_{L'} + \frac{\Delta i_L}{2}$

Buck- Boost	$\frac{a}{1-a}$	$\frac{V_e}{1-a} + \frac{\Delta V_s}{2}$	$\frac{I_s}{1-a} + \frac{\Delta i_L}{2}$
Buck	$a$	$V_e$	$I_L \frac{\Delta i_L}{2}$

## 2.5 Les commande MPPT

La commande MPPT fait varier le rapport cyclique du convertisseur statique jusqu'à l'obtention de la puissance maximale  $P_{max}$  disponible aux bornes du générateur.

L'algorithme MPPT peut être plus ou moins compliqué pour rechercher le PPM., Il est basé généralement sur la variation du rapport cyclique du convertisseur statique. L'algorithme place sur le PPM en fonction des évolutions des paramètres d'entrée du convertisseur statique ( $I_{PV}$  et  $V_{PV}$ ), qui dépendent fortement de l'ensoleillement et de la température.

Dans la section suivante, nous présentons un bilan sur les différents types d'algorithmes MPPT présents dans la littérature en détaillons l'algorithme MPPT basée sur la perturbation et l'observation (p&o), et l'incrémental de la conductibilité.

L'emplacement du bloc définissant la commande MPPT est configuré en Figure II ce bloc nécessite comme signaux d'entrée : la tension et le courant transmis par l'intermédiaire d'instrument de mesure

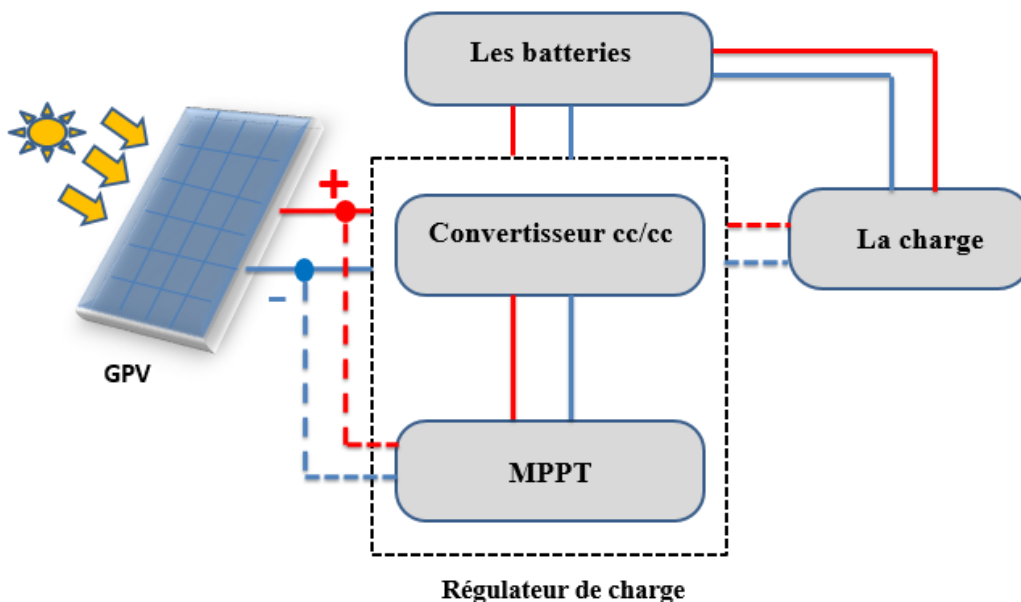


Figure (2.9) :L'emplacement de la commande MPPT dans le système PV

## **2.6 quelques travaux sur les commandes MPPT**

**2003** :(étude comparative entre les différents syst MPPT) fait par:Hohm, D. P., & Ropp, M. E.

**2004**:(évolution des sys PV) fait par:Liu, C., Wu, B., & Cheung R.

Solar Buildings Conférence, Montréal

**2008** : ( les techniques du Sys MPPT) fait par: Aranda, R., & Leva, S

**2009** :(nouveau algorithme basé sur un calculateur numérique) fait par:Hu, J., Zhang, J., & Wu, H  
China: Baoding

**2012** :(simulation et analyse des Sys MPPT) fait par:Busa, V., Narsingoju, K. K., & Kumar, G. V .le  
journéé international des ingenieurs d'électronique et electricité (IJAEEEE)

**2014**:(A Review on favorable maximum power point tracking systems in solar energy application)  
fait par:Jusoh, A., Sutikno, T., Guan, T. K., & Mekhilef, S Telkomnika

**2015**: (Maximum Power Point Tracking techniques for photovoltaic) systems fait par :Lyden, S., &  
Haque, M. E/ A comprehensive

## **2.7 Bilan sur les différents types d'algorithmes MPPT existants dans la**

### **Littérature**

Il existe différentes manières de classification des algorithmes MPPT. Cependant il est plus intéressant de les classer selon le nombre de variables (paramètres d'entrée) ou selon la technique utilisée pour la poursuite du PPM. Figure (2.12)

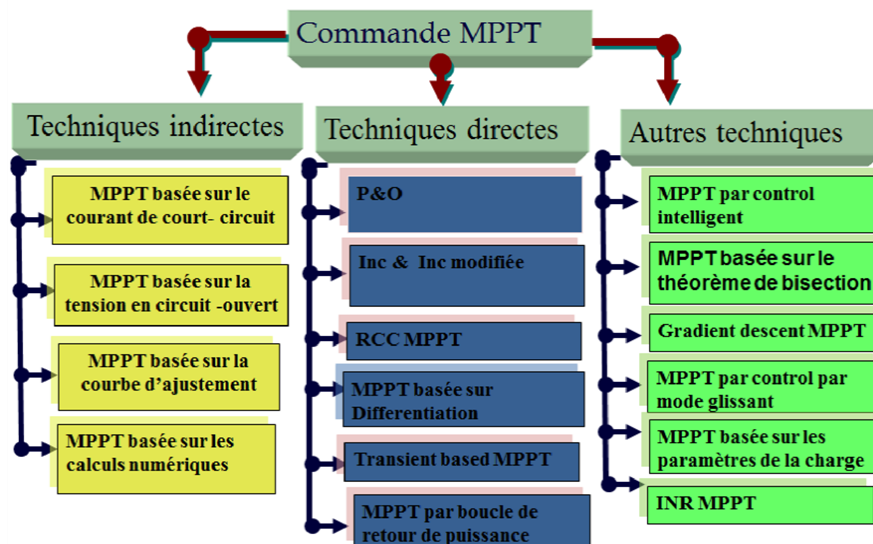


Figure (2.10): Classification des différentes méthodes de poursuite du PPM

## 2.8 Algorithme perturbation et observation (P&O)

La méthode de P&O est une approche largement répandue dans le domaine des techniques *MPPT*, due à sa simplicité. Elle exige seulement des mesures sur la tension de sortie du GPV et son courant de sortie. Comme son nom l'indique, cette méthode fonctionne par la perturbation de la tension  $V$  du système par l'augmentation ou la diminution de la tension du générateur en agissant directement sur le rapport cyclique du convertisseur DC-DC, puis l'observation de l'effet sur la puissance du Gpv.

Le principe des commandes MPPT de type P&O consiste à perturber la tension  $V_{pv}$  d'une faible amplitude autour de sa valeur initiale et d'analyser le comportement de la variation de puissance  $P_{pv}$ , comme l'illustre la figure (IV.10) dans le cas de GPV, on peut déduire que si une incrémentation positive de la tension  $V_{pv}$  engendre un accroissement de la puissance  $P_{pv}$ , cela signifie que le point de fonctionnement se trouve à gauche du *PPM*.

Si au contraire, la puissance décroît, cela implique que le système a dépassé le *PPM*. Un raisonnement similaire peut être effectué lorsque la tension décroît. A partir de ces diverses analyses sur les conséquences d'une variation de tension sur la caractéristique  $P_{pv} = f_{pv}(V)$ , il est alors facile de situer le point de fonctionnement par rapport au *PPM*, et de faire converger ce dernier vers le maximum de puissance à travers un ordre de commande approprié.

En résumé, si suite à une perturbation de tension, la puissance GPV augmente, la

direction de perturbation est maintenue. Dans le cas contraire, elle est inversée pour reprendre la convergence vers le nouveau PPM.

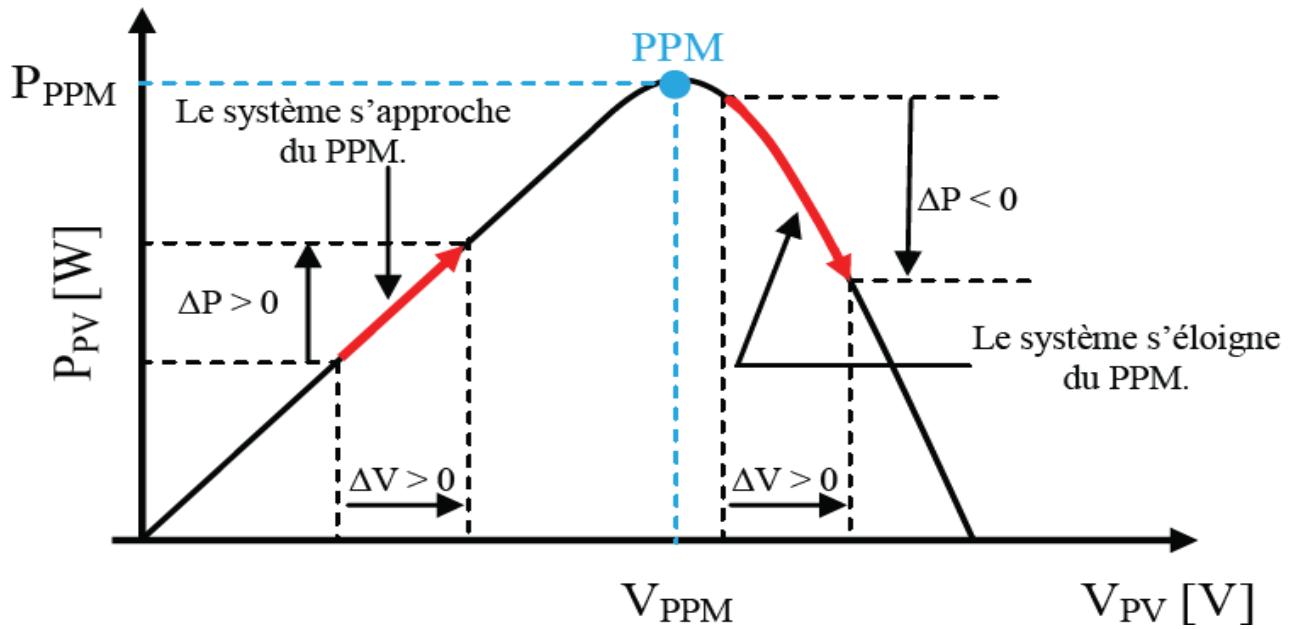
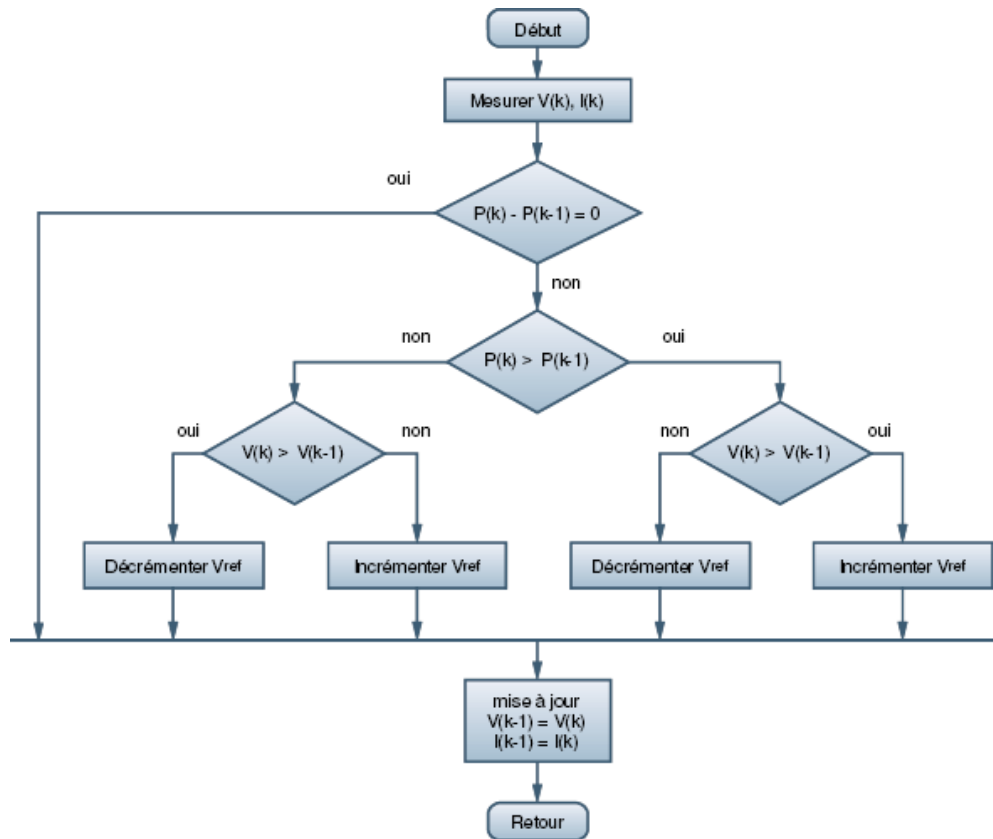


Fig. (2.11) : Caractéristique  $P_{PV}(V_{PV})$  d'un panneau solaire GPV.

La figure (IV.12) représente l'algorithme classique associé à une commande MPPT de type  $P\&O$ , où l'évolution de la puissance est analysée après chaque perturbation de tension.





**Fig 2.12** : Algorithme type de la méthode P&O

Si plus généralement, on désire suivre le point de puissance maximale en s'affranchissant de la connaissance des paramètres qui modifient sa position, on doit recourir aux techniques d'asservissement, en utilisant la plus souple, celle de la perturbation et de l'observation, (P&O).

C'est l'algorithme de poursuite du point de puissance maximale (PPM) le plus utilisé, et comme son nom l'indique il est basé sur la perturbation du système par l'augmentation ou la diminution de la tension de référence ( $V_{ref}$ ), ou en agissant directement sur le rapport cyclique du convertisseur (DC-DC), puis l'observation de l'effet sur la puissance de sortie en vue d'une éventuelle correction de ce rapport cyclique.

## 2.9 Algorithme 'incrémental conductance' (INC)

Dans cet algorithme, on calcul la dérivée de la puissance de sortie du panneau. Cette dérivée est nulle au point de puissance maximale, positive à gauche et négative à droite du point MPP .

[31.32.36]

La puissance du GPV

$$(2.57) \quad \begin{cases} \frac{dP}{dV} = 0 \dots\dots P = P_{\max} \\ \frac{dP}{dV} < 0 \dots\dots P < P_{\max} \\ \frac{dP}{dV} > 0 \dots\dots P > P_{\max} \end{cases}$$

La dérivée partielle  $\frac{dP}{dV}$  est donnée par :

$$\frac{dP}{dV} = I + V \frac{dI}{dV} \cong I + V \frac{\Delta I}{\Delta V}$$

Alors, l'équation(2.57) peut être écrite comme suite:

$$(2.58) \quad \begin{cases} \frac{\Delta I}{\Delta V} = -\frac{I}{V} \dots\dots P = P_{\max} \\ \frac{\Delta I}{\Delta V} < -\frac{I}{V} \dots\dots P < P_{\max} \\ \frac{\Delta I}{\Delta V} > -\frac{I}{V} \dots\dots P > P_{\max} \end{cases}$$

Le MPP peut donc être poursuivi en comparant la conductance instantanée ( $G = I/V$ ) à

l'incrémentation de la conductance comme le montre L'organigramme de la figure(2.13)  $V_{ref}$  et la tension de référence pour laquelle le panneau  $G_{pv}$  est forcé de fonctionner au MPP,  $V_{ref}=V_{mpp}$  une fois que le MPP est atteint le point de fonctionnement correspondant est maintenu, à moins qu'un changement dans  $\Delta I$  est noté, indiquant un changement des conditions atmosphériques et donc de MPP. L'algorithme augmente ou diminue  $V_{ref}$  pour suivre le nouveau MPP.

La taille de l'incrément détermine la rapidité de la poursuite du MPP. Une poursuite rapide peut être obtenue avec un incrément plus grand, mais le système ne pourrait pas fonctionner exactement au MPP et oscille autour de celui-ci. Il y a donc, comme pour la méthode P&O, un compromis entre rapidité et précision. Cette méthode peut être améliorée en amenant le point de fonctionnement près du MPP dans une première étape, puis d'utiliser l'algorithme INC pour suivre exactement le MPP dans une deuxième étape.

Généralement, le point de fonctionnement initial est réglé pour correspondre à une charge résistive proportionnelle au rapport de la tension de circuit ouvert

$V_{oc}$  sur le courant

de court-circuit  $I_{cc}$ .

Ces deux solutions assurent que le vrai MPP est poursuivi s'il existe plusieurs maxima locaux

Une manière moins évidente pour effectuer la méthode INC est d'utiliser conductance instantanée et l'incrément de la conductance pour générer un signal d'erreur .[31.36]

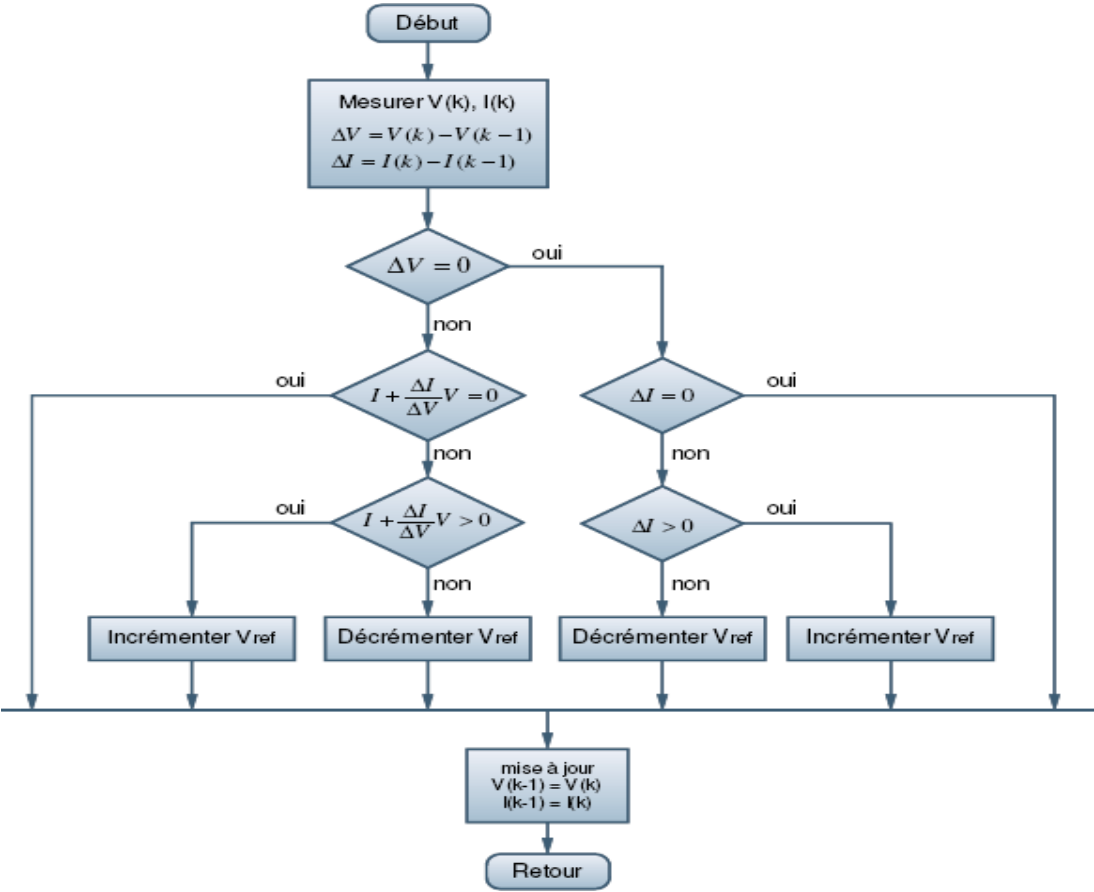


Figure (2.13) : Algorithme type de la méthode INC

## **2.10 : Conclusion**

Dans tout système photovoltaïque, le circuit raccordé au panneau solaire a un rôle fondamental. Il permettant l'adaptation de la charge, afin d'extraire la puissance maximale disponible qui est influencée par l'ensoleillement et la température. Nous avons extraire les deux techniques de commande permettant d'atteindre cet objectif elles seront l'objet d'une simulation dans le chapitre suivant.

# Chapitre III

## Simulation et Résultats

### **3.1 Introduction**

Ce chapitre sera consacré à la simulation d'une chaîne PV composé d'un GPV, hacheur parallèle (boost ),et une commande MPPT(p&o) .une autre chaîne composé d'un même GPV, d'un hacheur parallèle (boost) et une commande MPPT(inc) sera aussi simulée. On va simuler chaque bloc Independent de l'autre. La chaîne entière sera ensuite simulée en groupant tous les blocs.

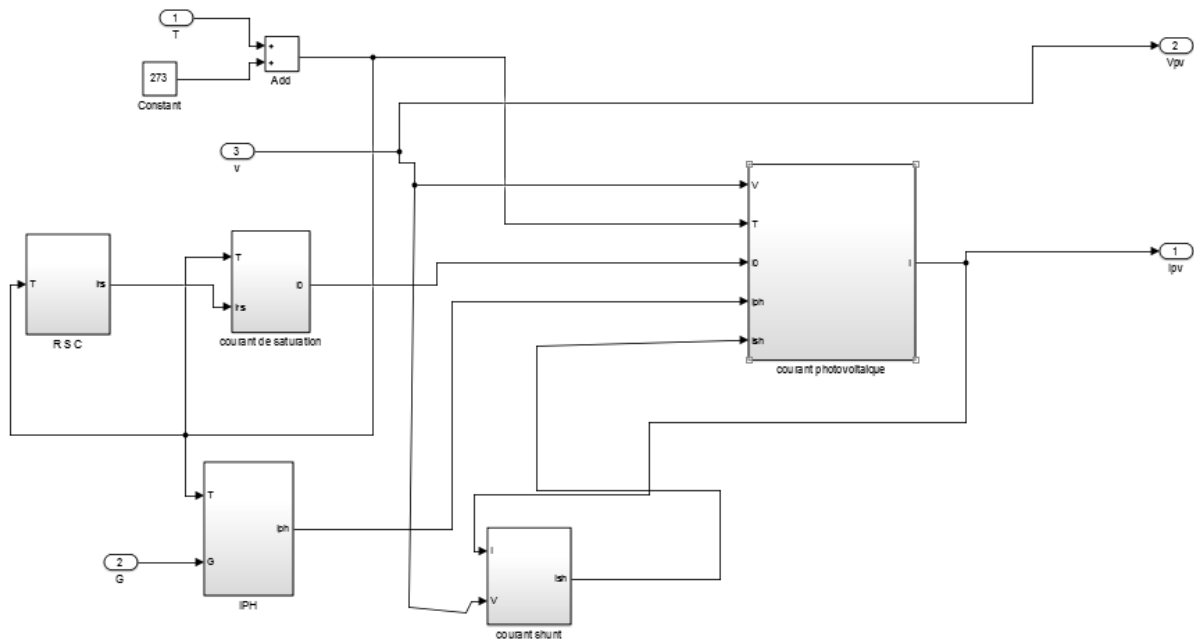
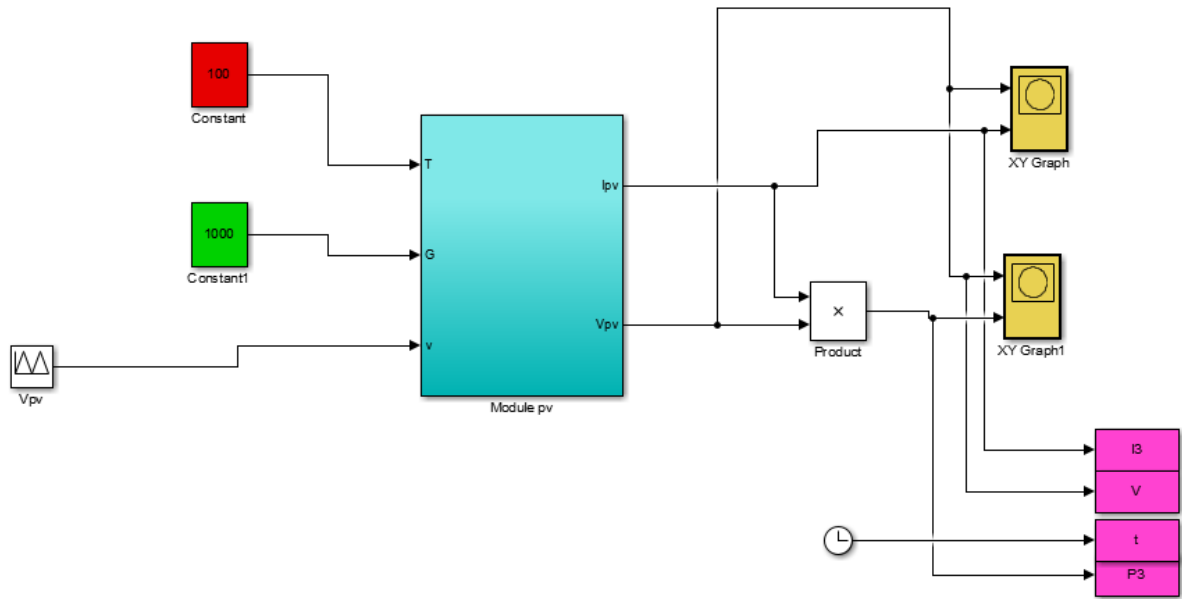
### **3.2 Simulation d'un système photovoltaïque avec deux méthodes (p&o, incrémentation de l'inductance)**

Pour réaliser ces deux simulations, nous avons utilisé les équipements suivants :

- Générateur kc200GT
- Convertisseur d'énergie DC-DC (élevateur).
- Carte MPPT fonctionne par l'algorithme perturbe et observe P&O.
- Carte MPPT fonctionne par l'algorithme incrémentation de l'inductance INC

### **3.3 Modélisation du panneau kc200GT sous Matlab Simulink**

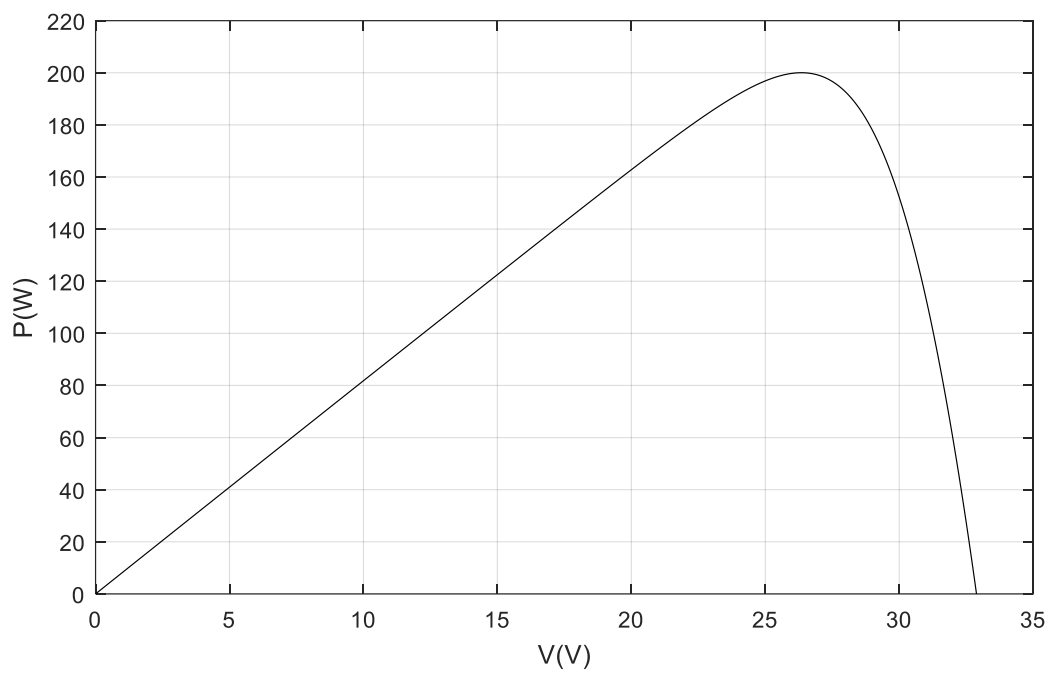
L'élaboration du panneau sous Matlab Simulink nécessite le raccordement de plusieurs sous-blocs qui modélisent les équations qui définissent le fonctionnement de la cellule PV



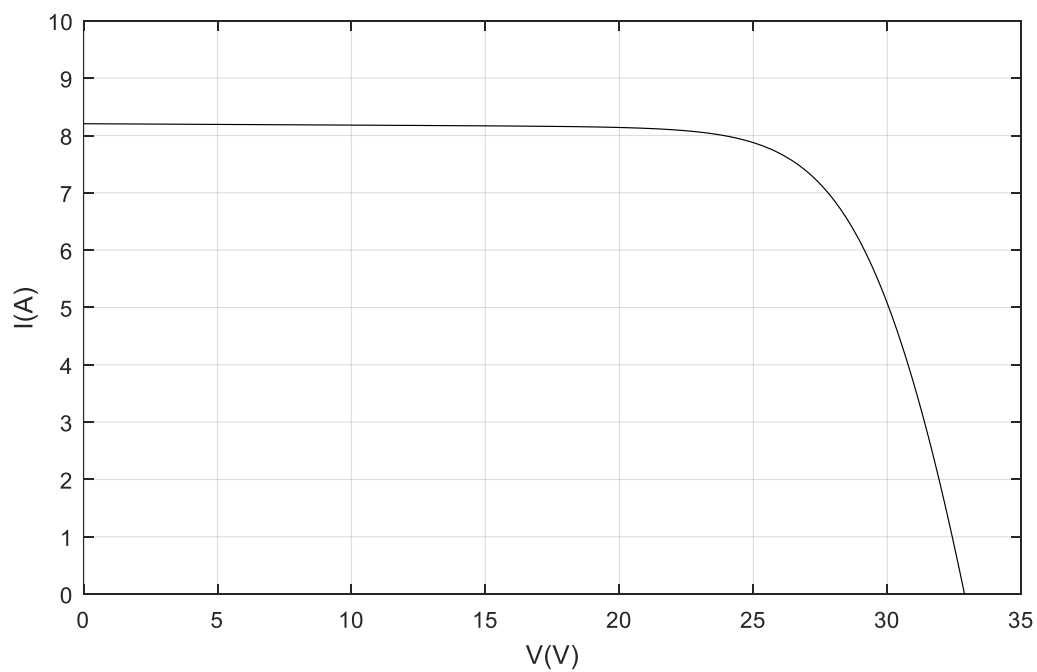
**Figure (3.1) :** modèle d'un panneau sous Matlab Simulink

On a modélisé le panneau pour avoir la caractéristique  $I(v)$  et  $p(v)$  dans des conditions standard de l'éclairage et la température ( $1000\text{w/m}^2$  et  $25^\circ\text{c}$ ).le bloc de modélisation se présente Figure(3.2 )et figure(3.3)



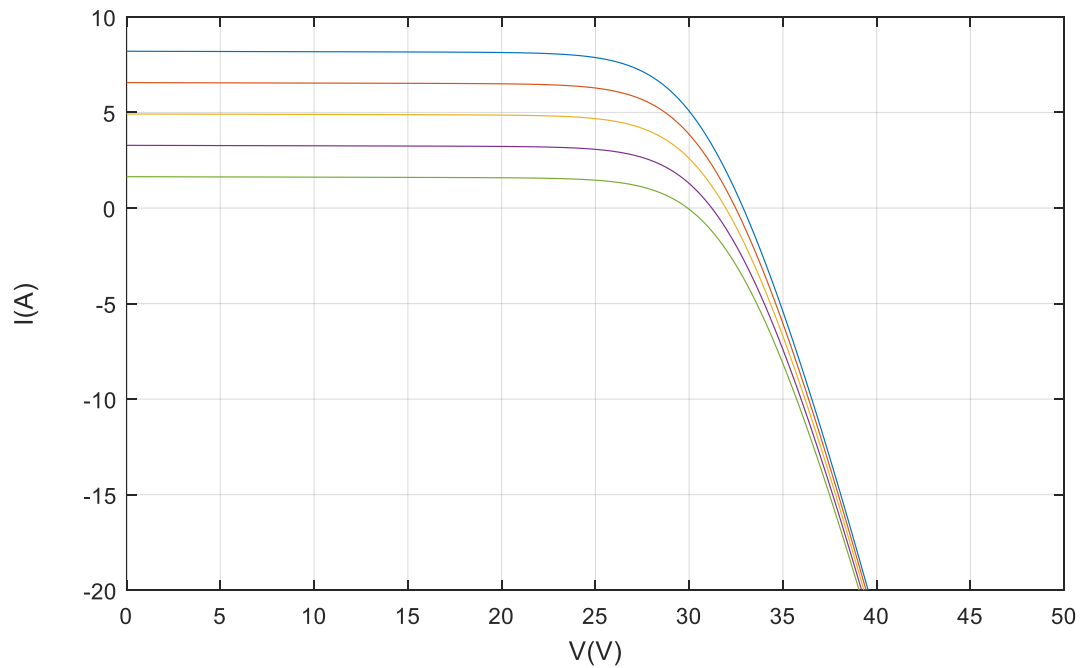


**Figure (3.2)** la puissance en fonction de tension



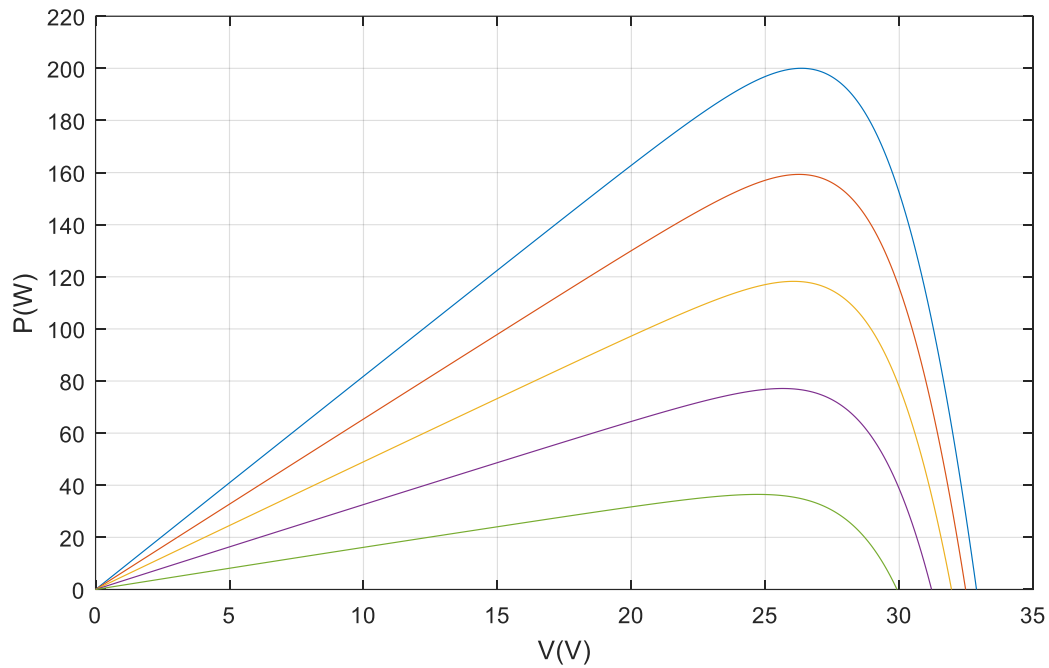
**Figure (3.3)** courant  $i$  en fonction de tension  $V$

La figure (3.4) montre l'influence de l'éclairement sur la caractéristique  $I=f(V)$ . A une température constante, on constate que le courant subit une variation importante, mais par contre la tension varie légèrement. Car le courant de court circuit est une fonction linéaire de l'éclairement alors que la tension de circuit ouvert est une fonction logarithmique



**Figure (3.4)** L'influence de l'éclairement sur la caractéristique  $I=f(V)$

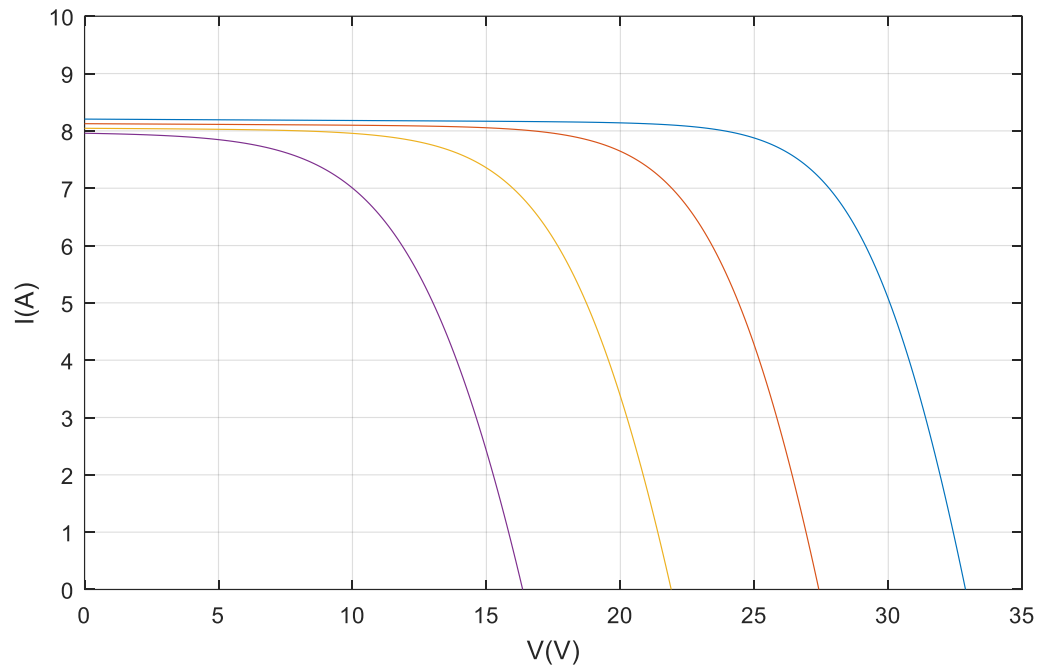
La figure ( 3.5) illustre la variation de la puissance délivrée par le générateur en fonction de la tension pour différentes valeurs d'éclairement [1000,800,600,400,200], ce qui nous permet de déduire l'influence de l'éclairement sur la caractéristique  $P(V)$  .



**Figure (3.5)** L'influence de l'éclairement sur la caractéristique  $P=f(V)$

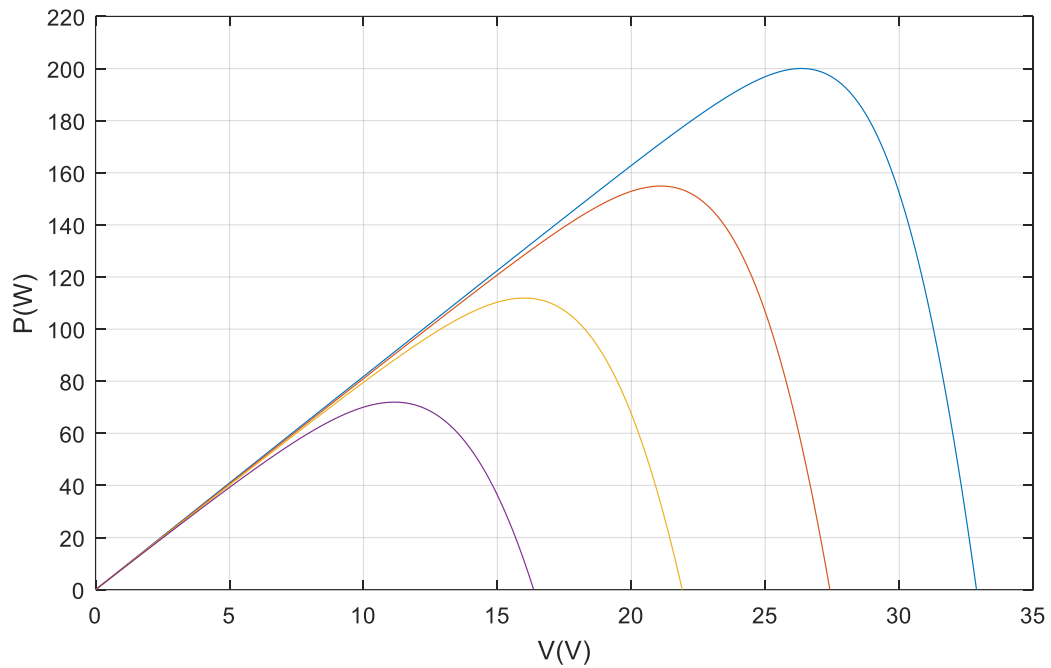
La figure (3.6) montre l'influence de la température sur la caractéristique  $I=f(V)$ . Il est essentiel de comprendre l'effet de changement de la température d'une cellule solaire sur la caractéristique  $I=f(V)$ . [100,75,50,25]c

Le courant dépend de la température puisque le courant augmente légèrement à mesure que la température augmente, mais la température influe négativement sur la tension de circuit ouvert. Quand la température augmente la tension de circuit ouvert diminue. Par conséquent la puissance maximale du générateur subit une diminution



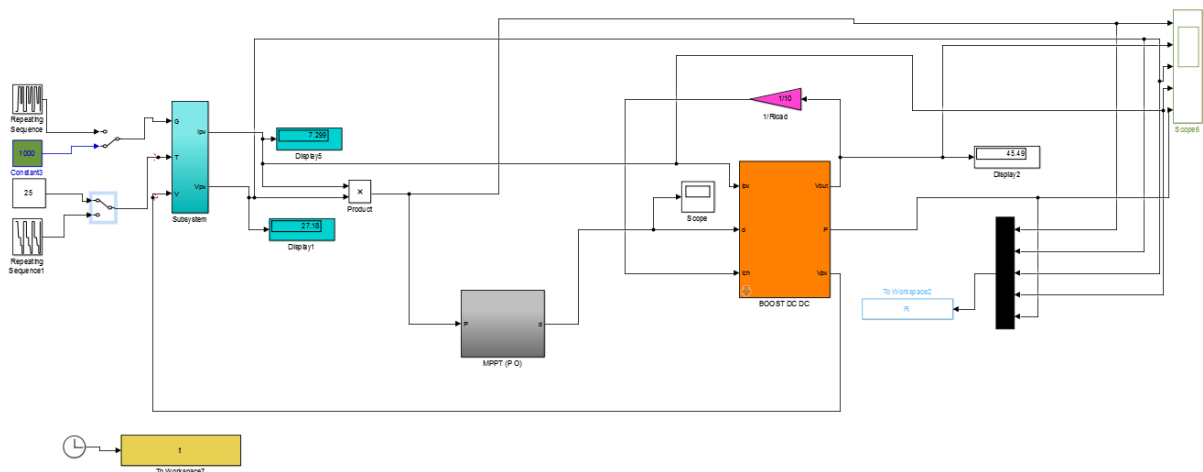
**Figure (3.6)** L'influence de la température sur la caractéristique  $I=f(V)$

La figure (3.7) illustre la variation de la puissance délivrée par le générateur en fonction de la tension pour différentes valeurs de la température [100,75,50,25], ce qui nous permet de déduire l'influence de la température sur la caractéristique  $P=fct(V)$



**Figure (3.7)** : L'influence de la température sur la caractéristique  $P=f(V)$

### 3.4 simulation d'un système PV avec la commande MPPT (p&o)

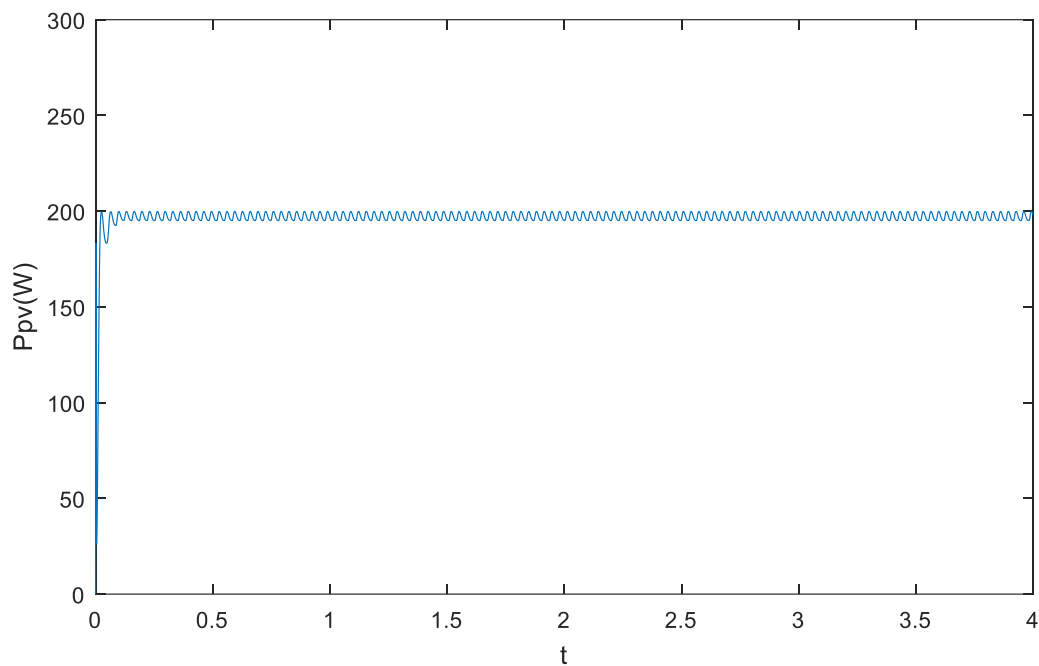


**Figure (3.8)** simulation d'un système PV avec la commande MPPT (p&o)

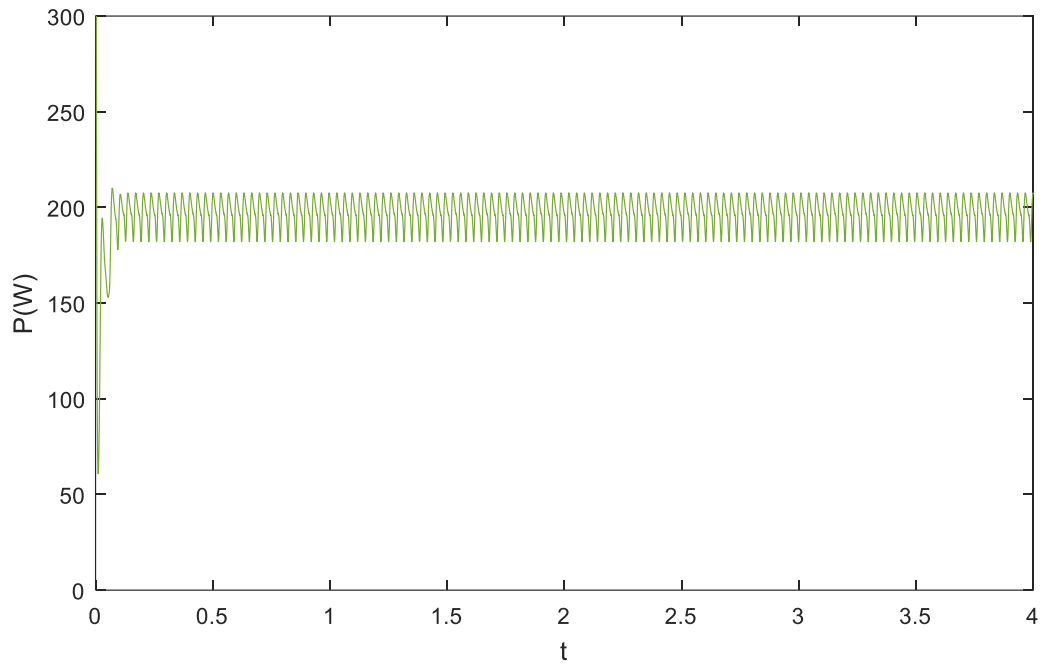
### 3.4.1 Fonctionnement sous des conditions standard

Dans les figures (3.9 et 3.10 et 3.11 et 3.12 et 3.13), est pour un éclairage constant de 1000 W/m<sup>2</sup> et une température de 25°C.

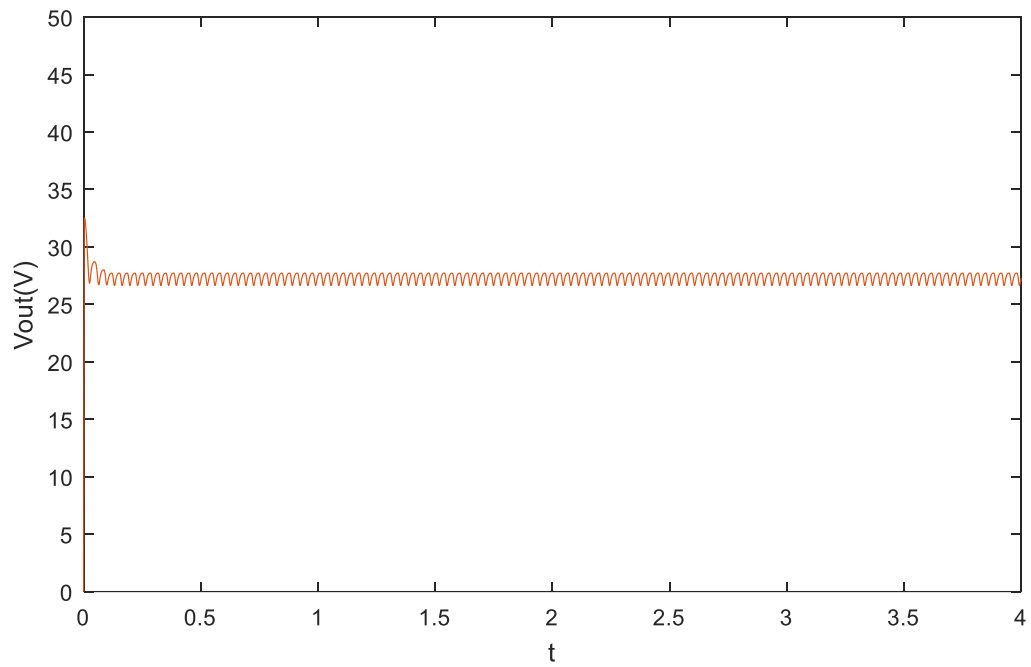
#### ➤ Résultats de simulation



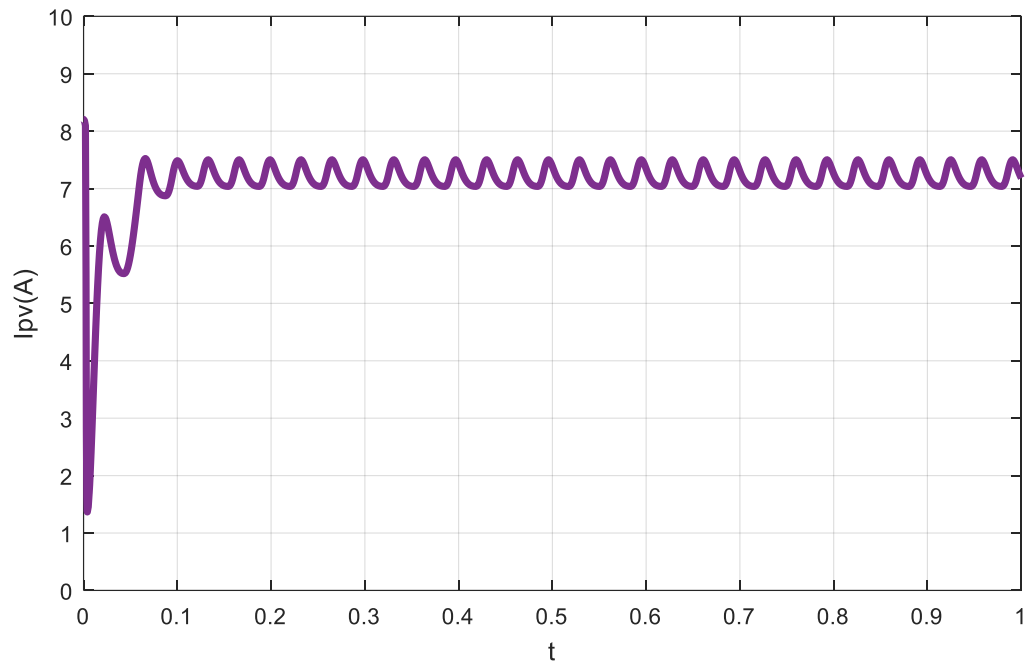
**Figure(3.9)** la puissance de GPV



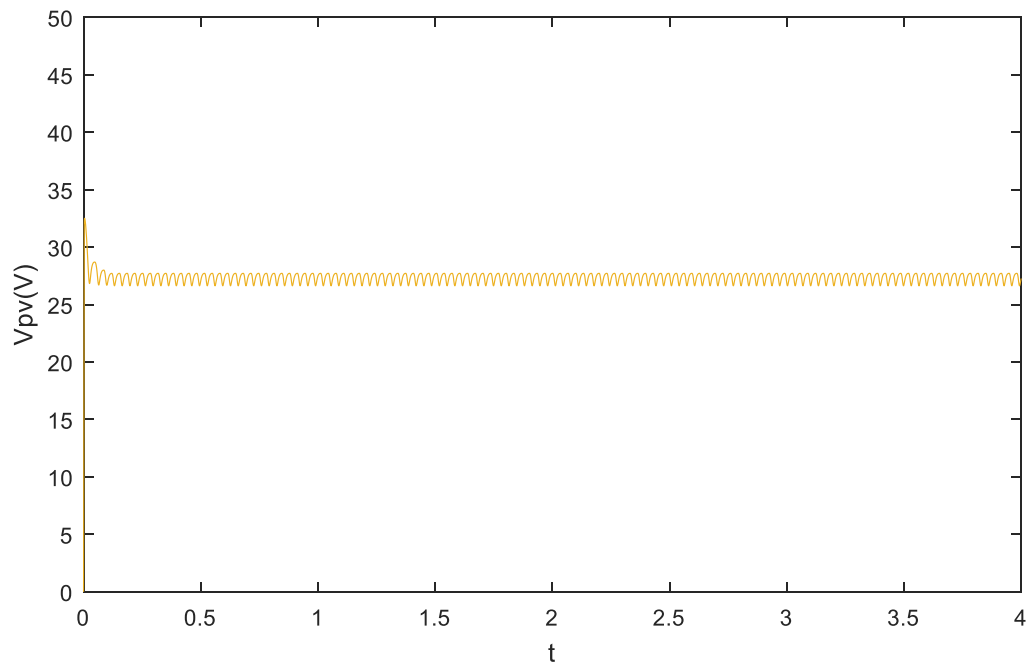
**Figure (3.10)** la puissance de sortie  $P(W)$



**Figure(3,11)** tension de sortie

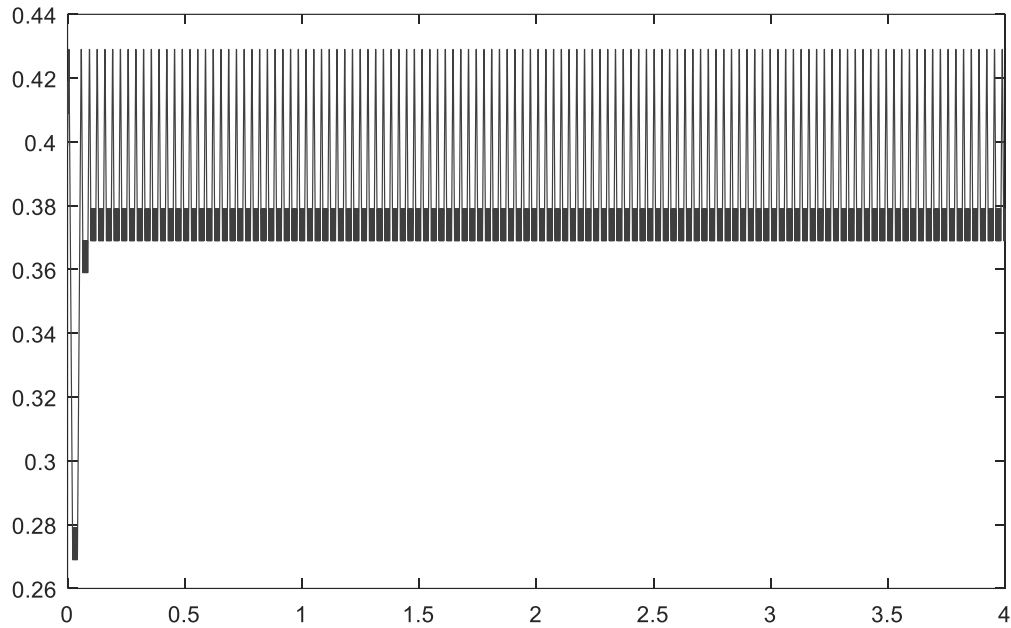


**Figure (3.12)** le courant de GPV



**Figure (3.13)** la tension de GPV





**Figure (3.14)** rapport ciclyque

Les résultats de simulation des caractéristiques électriques à la sortie du panneau et à la sortie du hacheur de type élévateur contrôlé par la commande MPPT il apparaît que:

Les différentes grandeurs électriques (puissances, tensions et courants) se stabilisent autour des valeurs fixées :

Après un régime transitoire de durée 2 ms, la commande MPPT fait osciller le point de fonctionnement autour du point du PPM.

La puissance fournie par le générateur PV se stabilise autour de 200 W et celle fournie à la sortie autour de 195 W, à la sortie du panneau, la tension et le courant se stabilisent respectivement autour de 27.5 V et 7.2A.

.

Notons que la différence entre la puissance à la sortie du panneau et celle fournie à la charge reste dans la limite de 5 W. Ces pertes sont attribuées aux pertes par commutation et par conduction dans le transistor Mosfet, dans la diode et dans les différents composants de la commande MPPT.

### 3.4.2 Eclairage variable et température constante

Pour présenter l'effet de l'éclairage  $E$  sur la puissance, on maintient la température à une valeur constante  $T=25^{\circ}\text{C}$  et on fait varier l'éclairage de [ 400 400 1000 1000 600 600 1000 1000]  $\text{W}/\text{m}^2$ .

#### ➤ Résultats de simulation

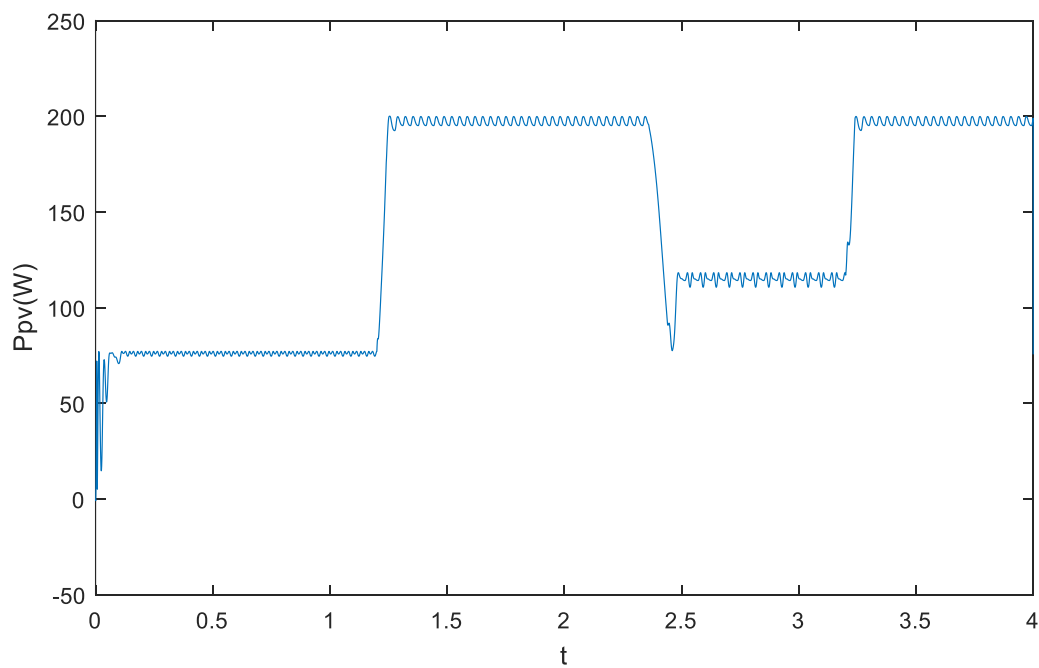
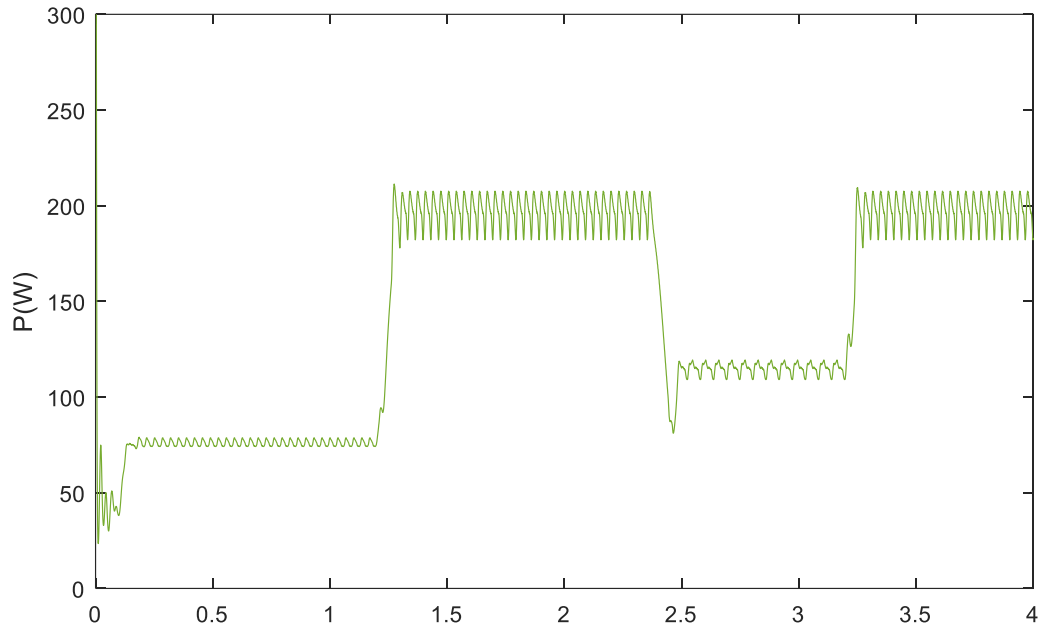
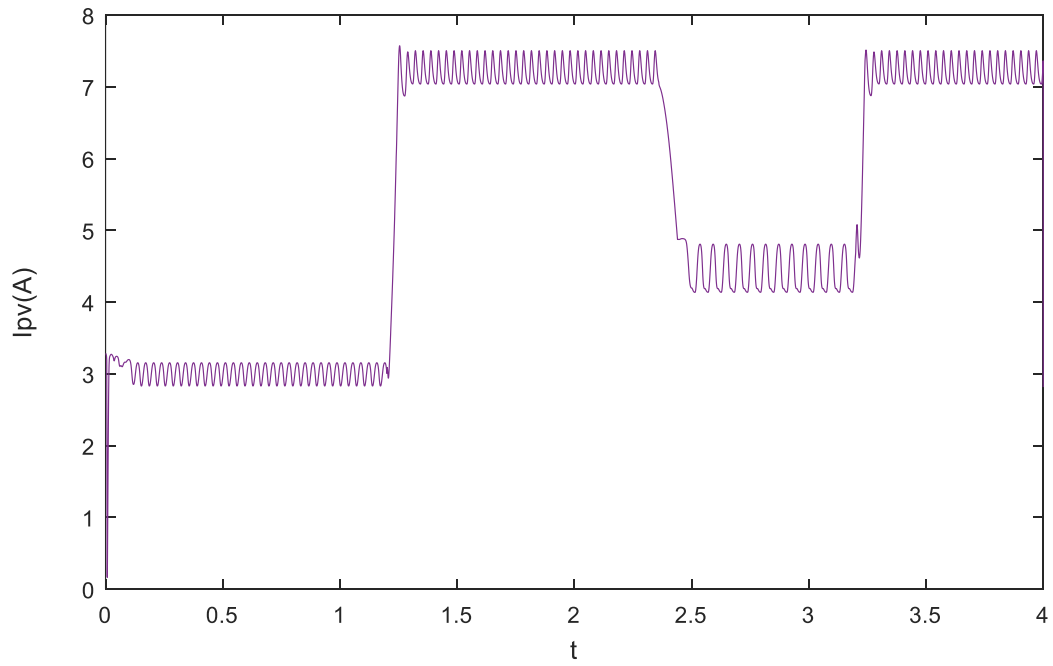


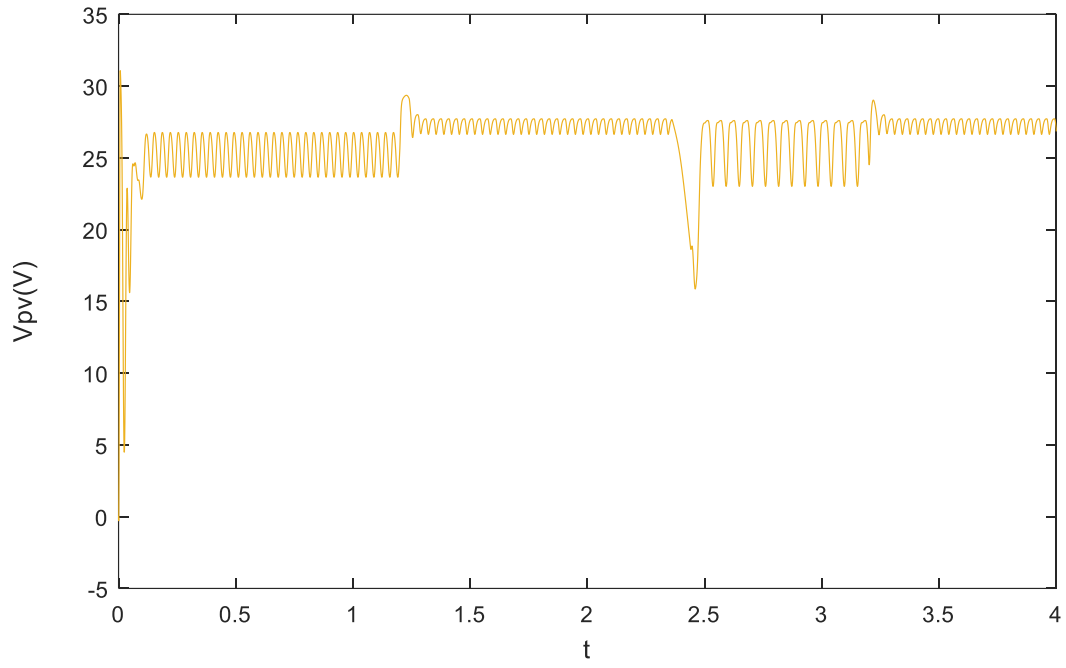
Figure (3.15) puissance de GPV



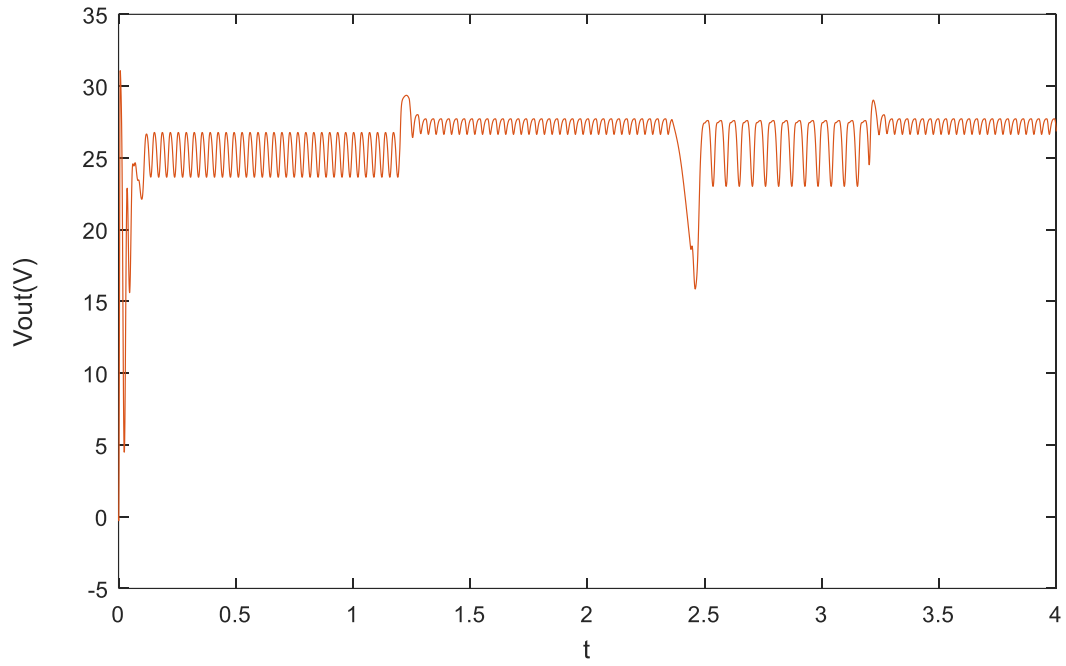
**Figure (3.16)** la puissance de sortie



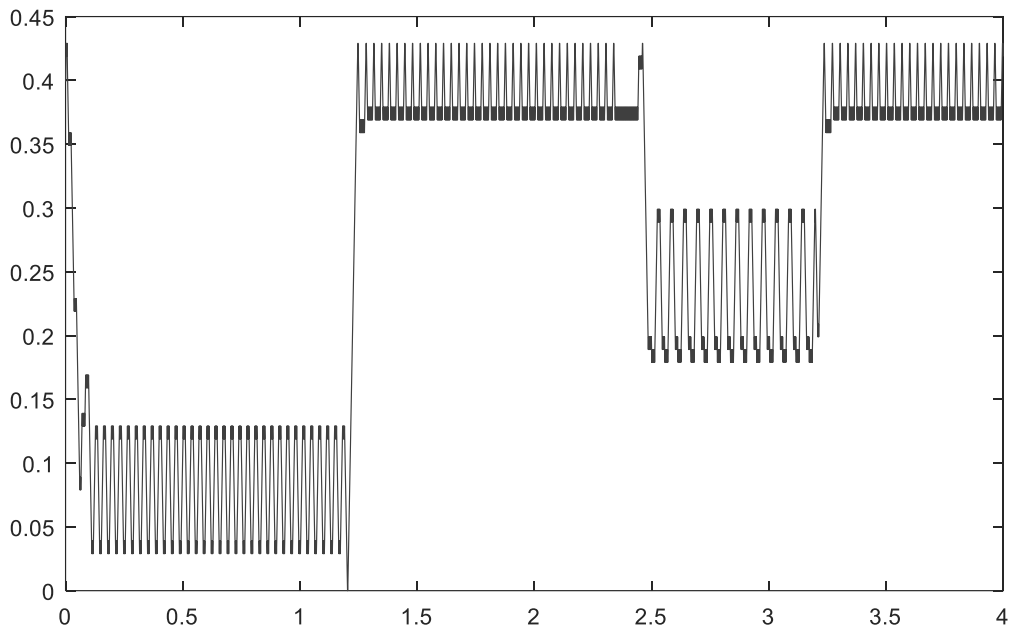
**Figure (3.17)** Le courant de GPV



**Figure (3.18)** La tension de GPV



**Figure (3.19)** La tension de sortie



**Figure (3.20)** rapport ciclyque

D'après les résultats de simulation obtenus, on remarque qu'il existe une relation de proportionnalité entre la puissance et l'éclairement. Ainsi que le temps de réponse est très

rapide. Mais on constate que les courbes de la puissance, de la tension et du courant présentent des oscillations dans le régime permanent.

### 3.4.3 Température variable et éclairage constant

Pour présenter l'effet de la température  $T$  sur la tension, on fait maintenir l'éclairage à une valeur constante  $E= 1000 \text{ w/m}^2$  et on fait varier la température de (60 60, 40 40 et 30 30 et 20 20) °C.

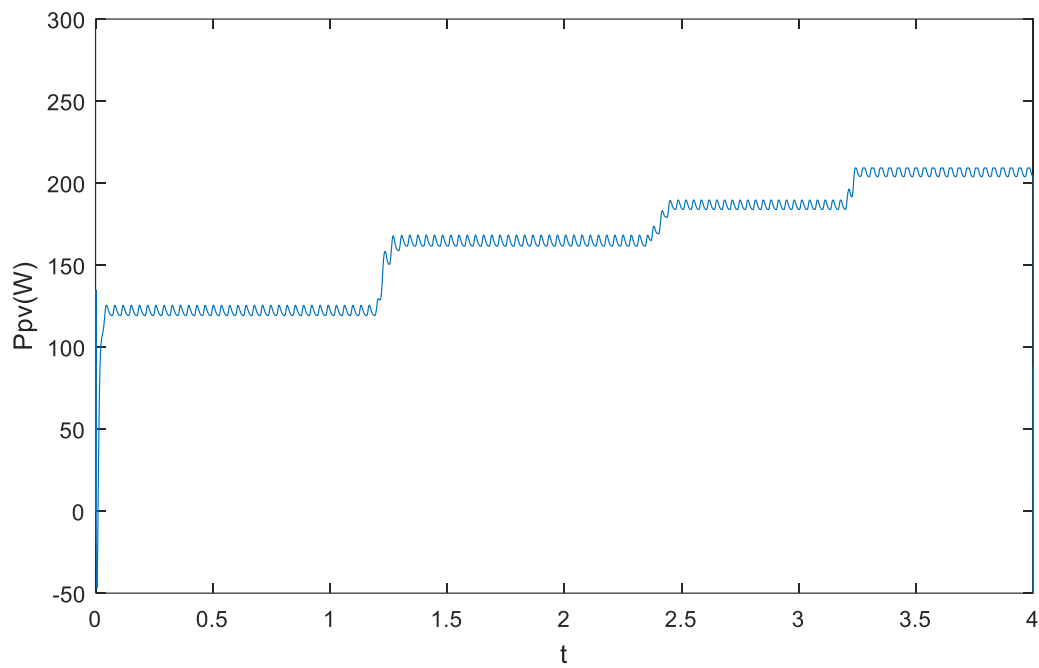
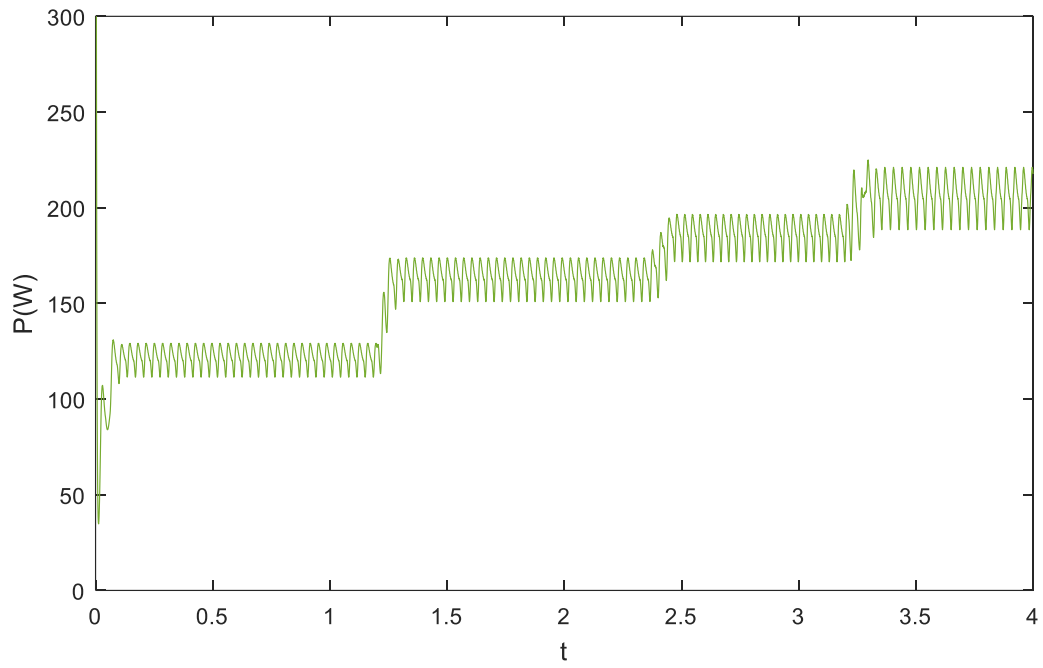
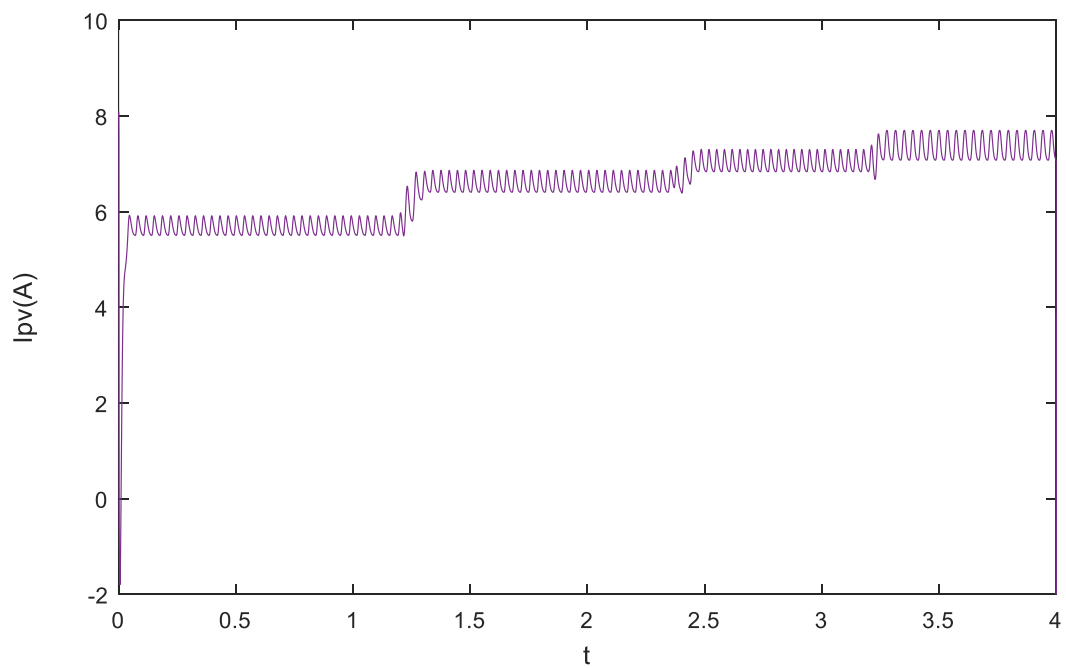


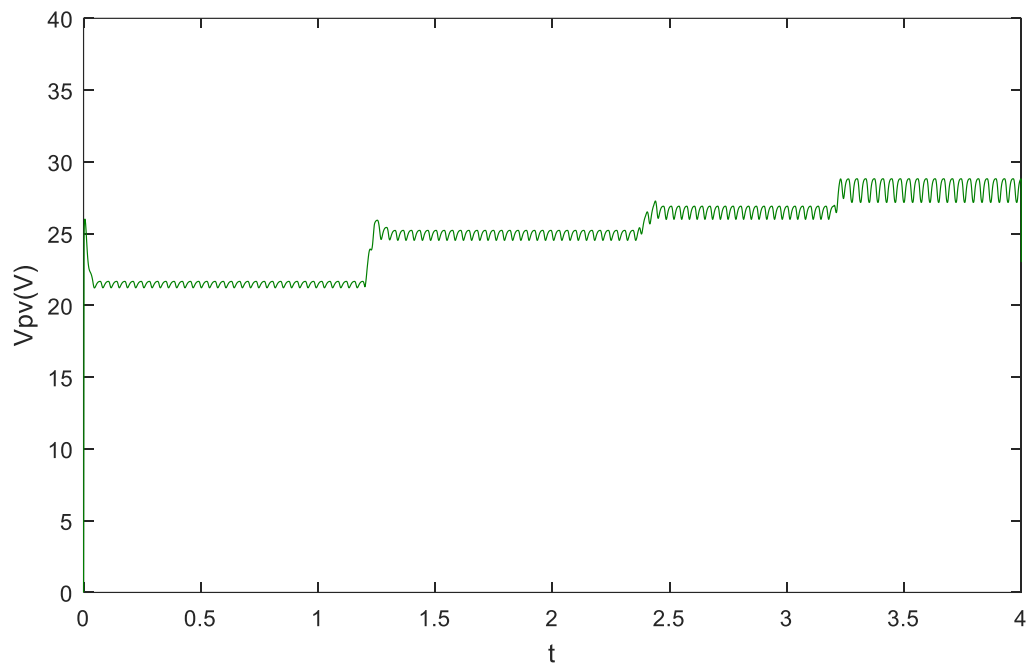
Figure (3.21) la puissance de GPV



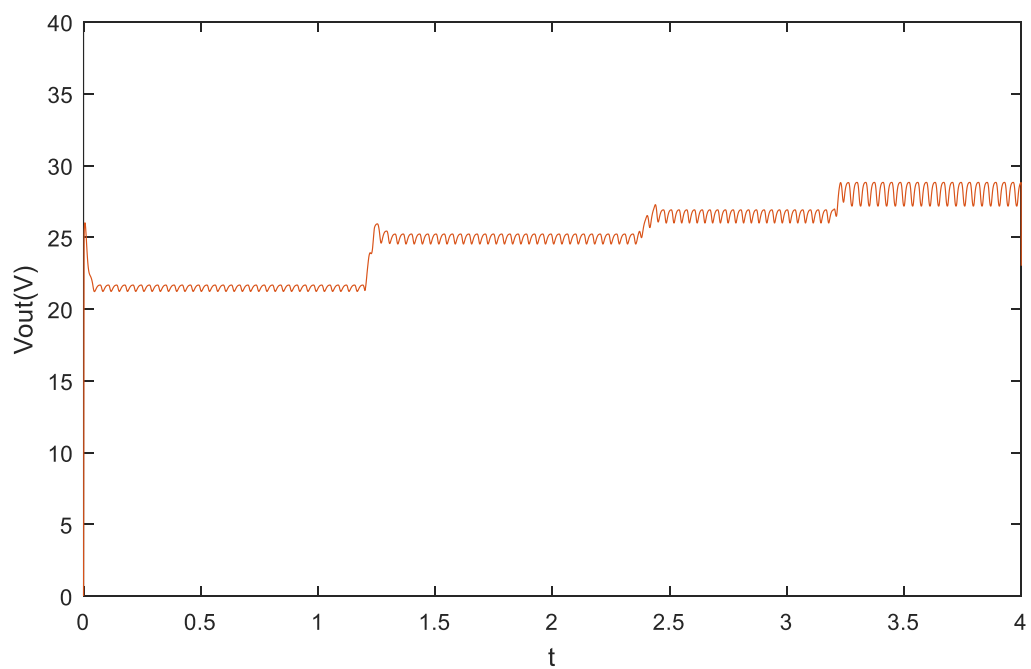
**Figure (3.22)** la puissance de sortie



**Figure (3.23)** le courant de GPV

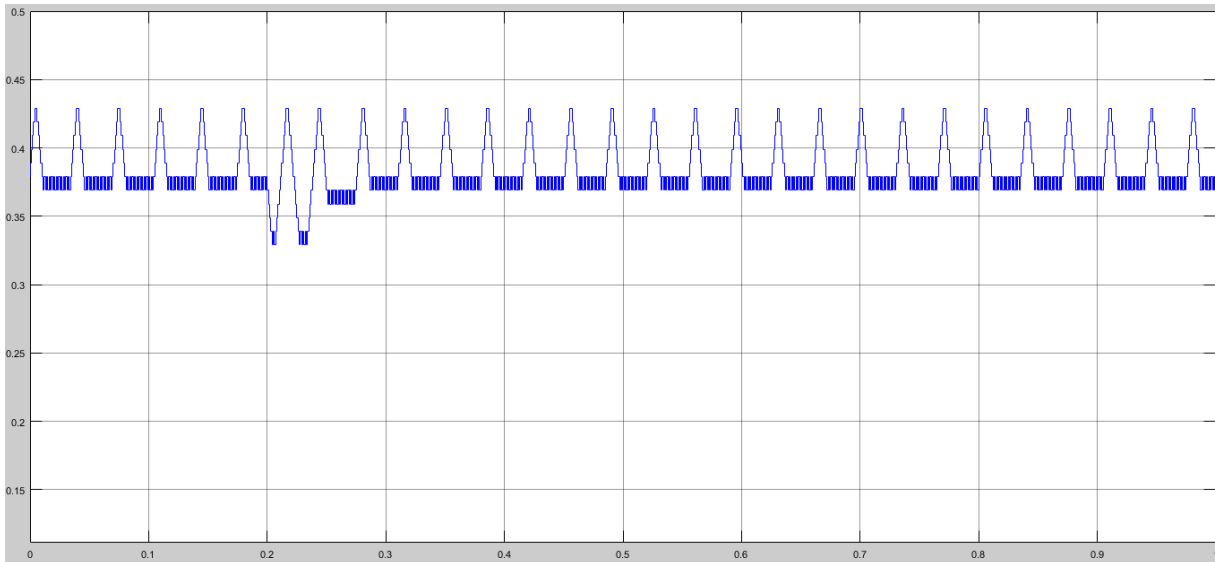


**Figure (3.24)** la tension de GPV



**Figure (3.25)** la tension de sortie

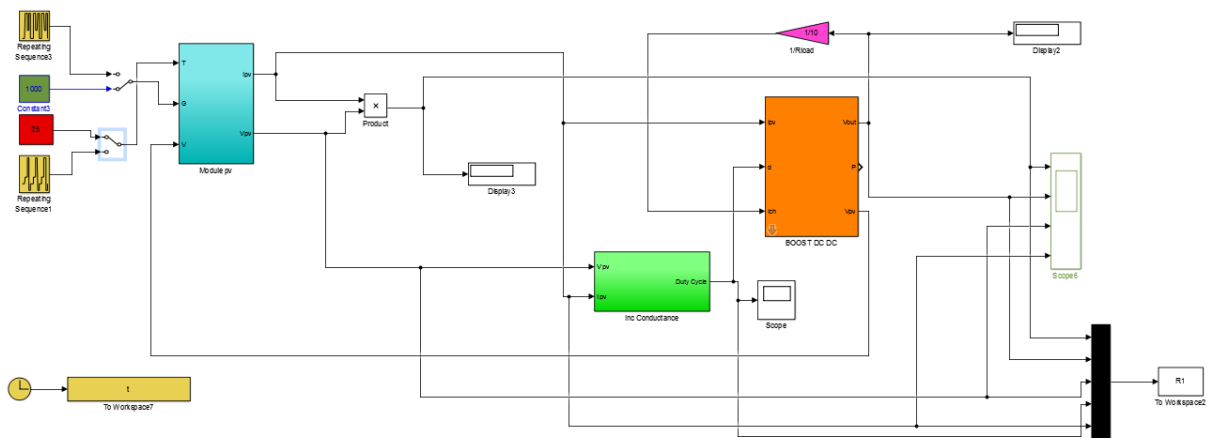




**Figure(3,26)** rapport cyclique

D'après les résultats de simulation obtenus, on remarque qu'il existe une relation d'inversement proportionnel entre la puissance et température, on remarque également qu'une variation de la température provoque une variation considérable de la tension ( $V_{pv}$ ), par contre le courant  $I_{pv}$  dans ce cas varie légèrement. Ainsi on constate que les courbes de puissance, de tension et du courant présentent des oscillations dans le régime permanent

### 3.5simulation d'un système PV avec la commande MPPT (inc)



**Figure (3.27)** simulation d'un système PV avec la commande MPPT (inc)

### 3.5.1 Fonctionnement sous des conditions standard

Dans les figures (3.24 et 3.25 et 3.26 et 3.27 et 3.28), est pour un éclairement constant de 1000 W/m<sup>2</sup> et une température de 25°C.

#### ➤ Résultats de simulation

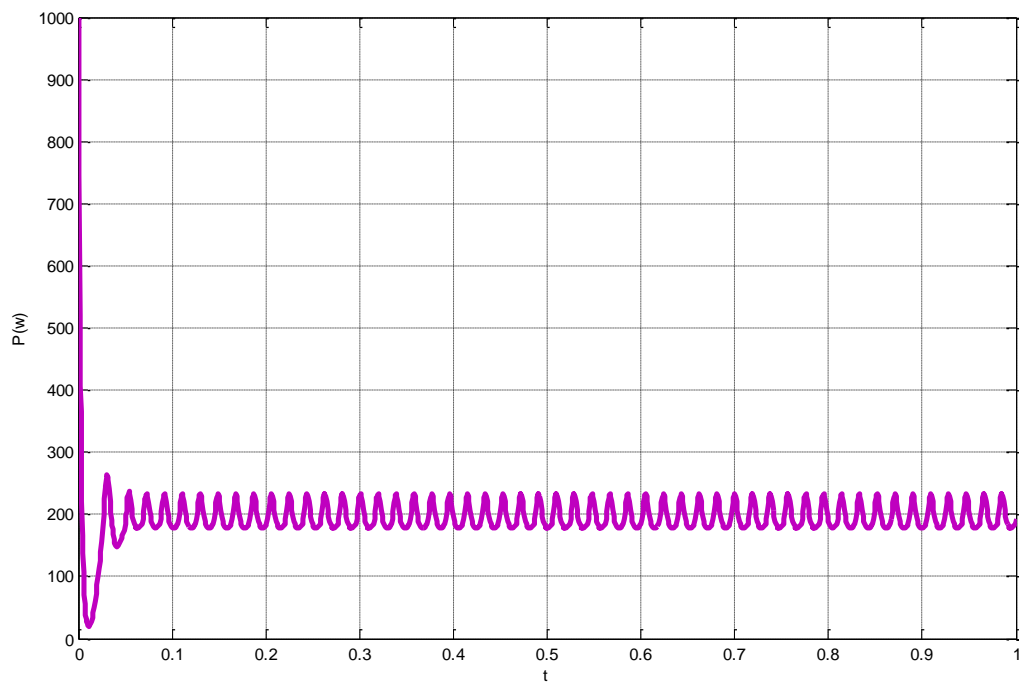
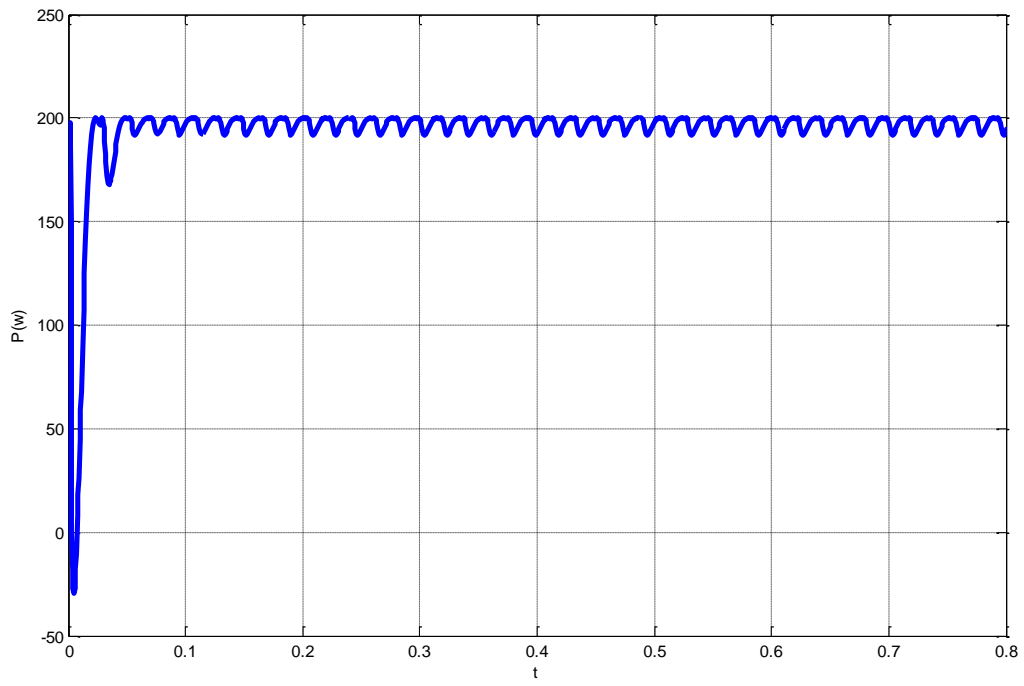
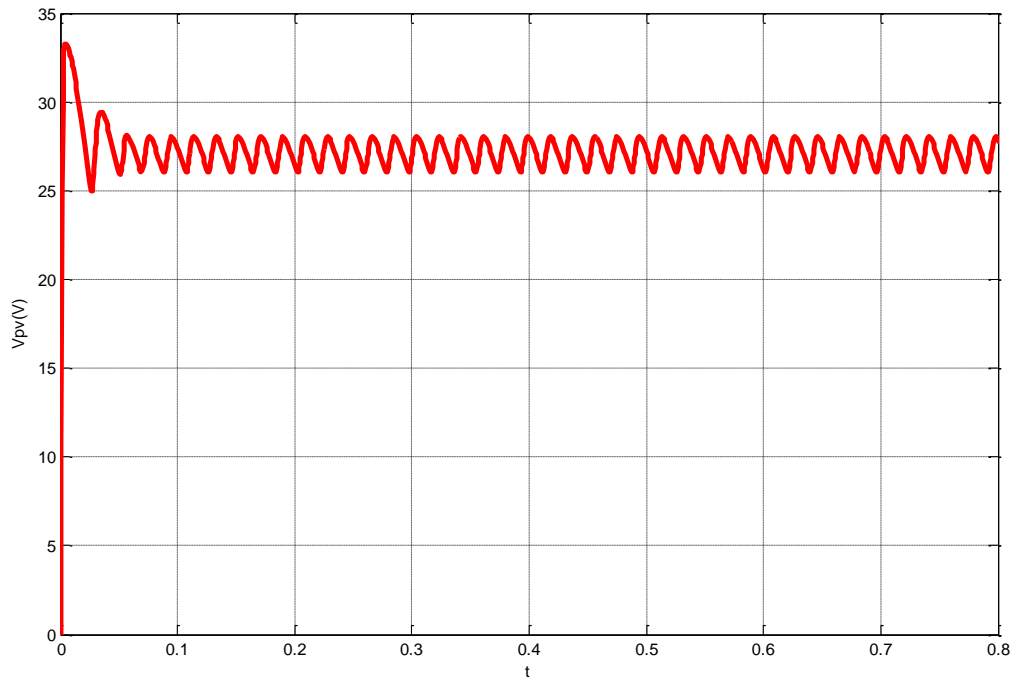


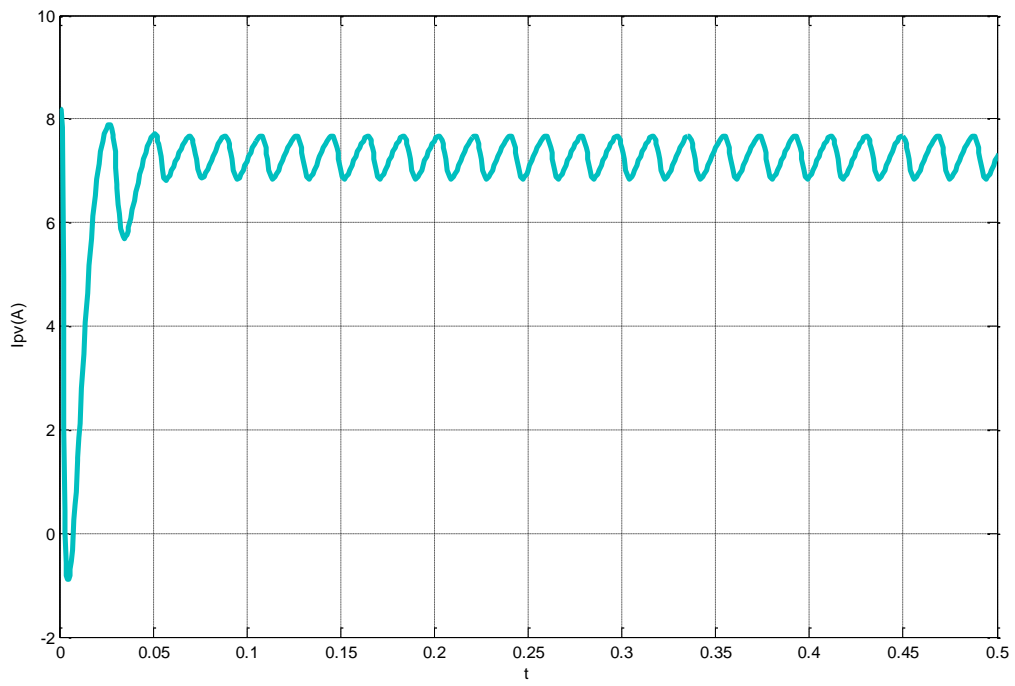
Figure (3.28) puissance de GPV



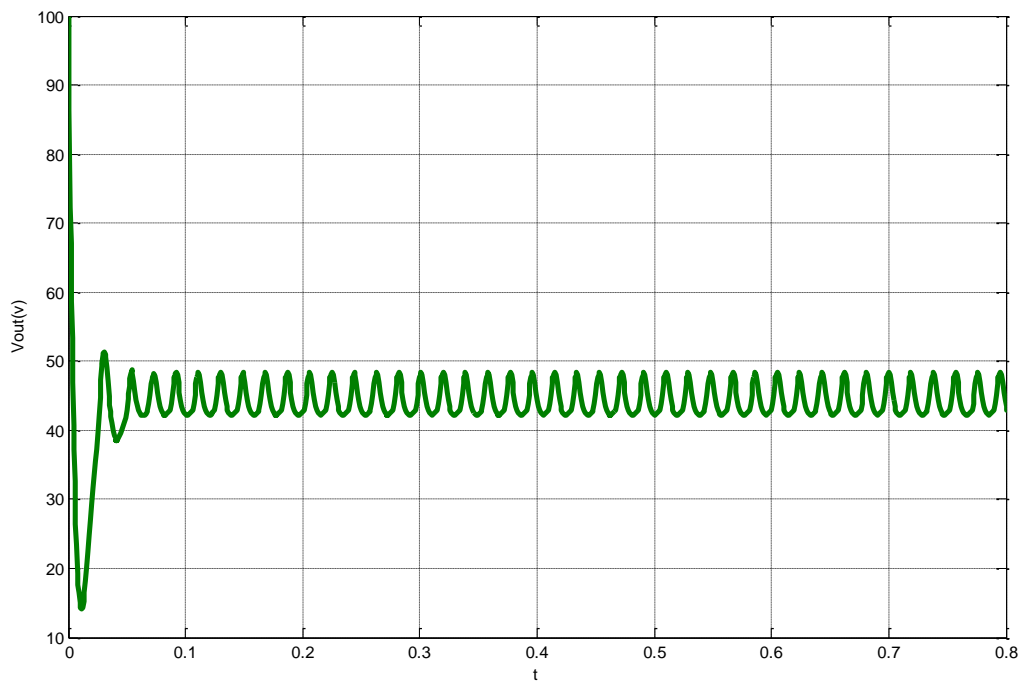
**Figure (3.29)** puissance de sortie



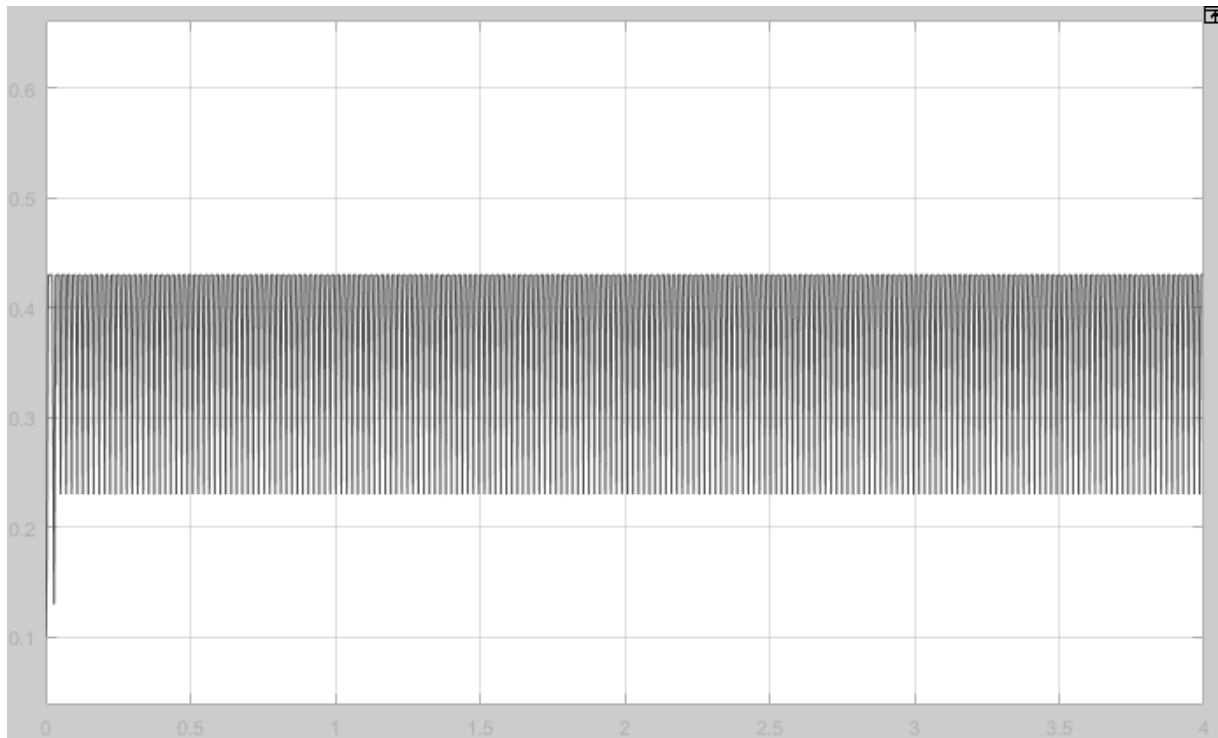
**Figure (3.30)** tension de GPV



**Figure (2.31)** courant de GPV



**Figure (3.32)** tension de sortie



**Figure(3,33)** rapport cyclique

Les résultats de simulation des caractéristiques électriques à la sortie du panneau et à la sortie du hacheur de type élévateur contrôlé par la commande MPPT il apparaît que:

Les différentes grandeurs électriques (puissances, tensions et courants) se stabilisent autour des valeurs fixées :

Après un régime transitoire de durée 2 ms, la commande MPPT fait osciller le point de fonctionnement autour du point du PPM.

La puissance fournie par le générateur PV se stabilise autour de 200 W et celle fournie à la sortie autour de 195 W, à la sortie du panneau, la tension et le courant se stabilisent respectivement autour de 45 V et 7.2A.

Notons que la différence entre la puissance à la sortie du panneau et celle fournie à la charge reste dans la limite de 5 W. Ces pertes sont attribuées aux pertes par commutation et par conduction dans le transistor Mosfet, dans la diode et dans les différents composants de la commande MPPT.

### 3.5.2 Eclairage variable et température constante

Pour présenter l'effet de l'éclairage  $E$  sur la puissance, on maintient la température à une valeur constante  $T=25^{\circ}\text{C}$  et on fait varier l'éclairage de [ 400 400 1000 1000 600 600 1000 1000]  $\text{W}/\text{m}^2$ .

#### ➤ Résultats de simulation

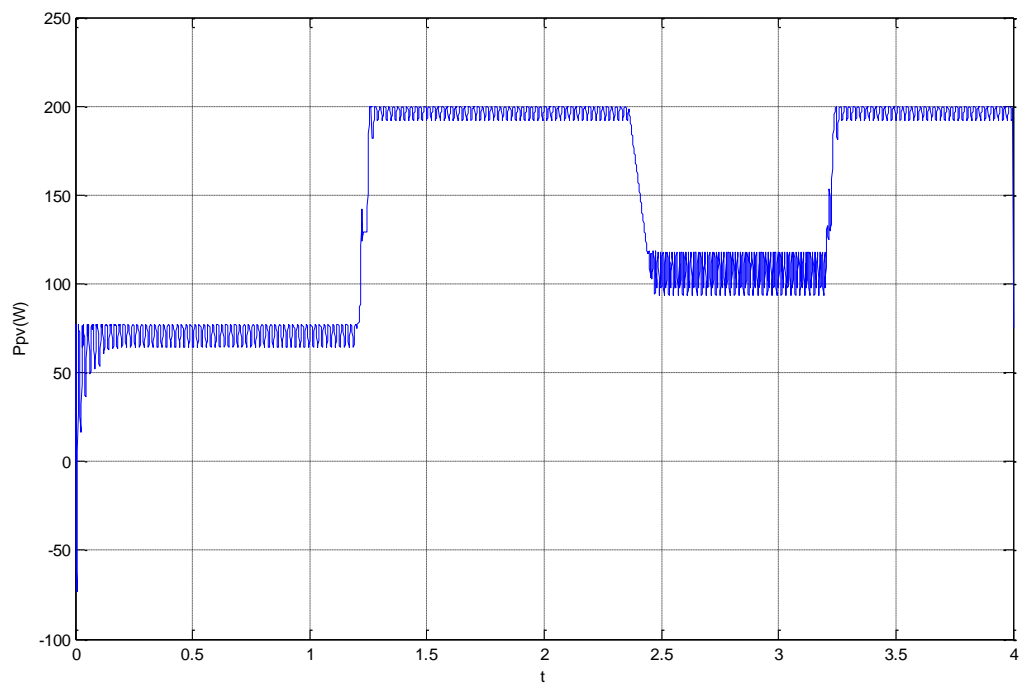
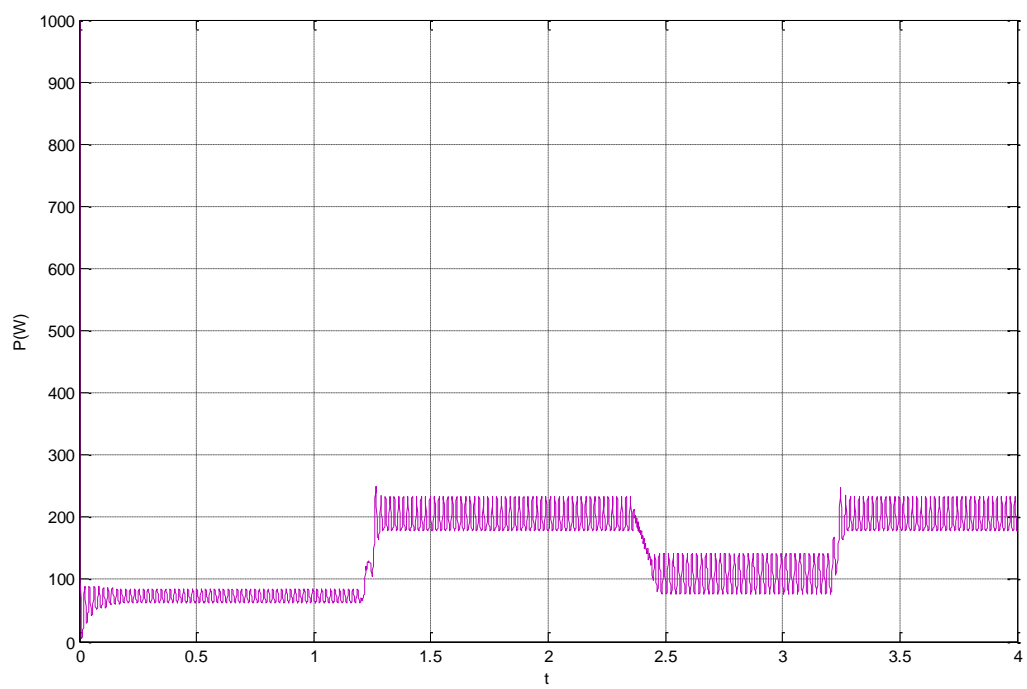
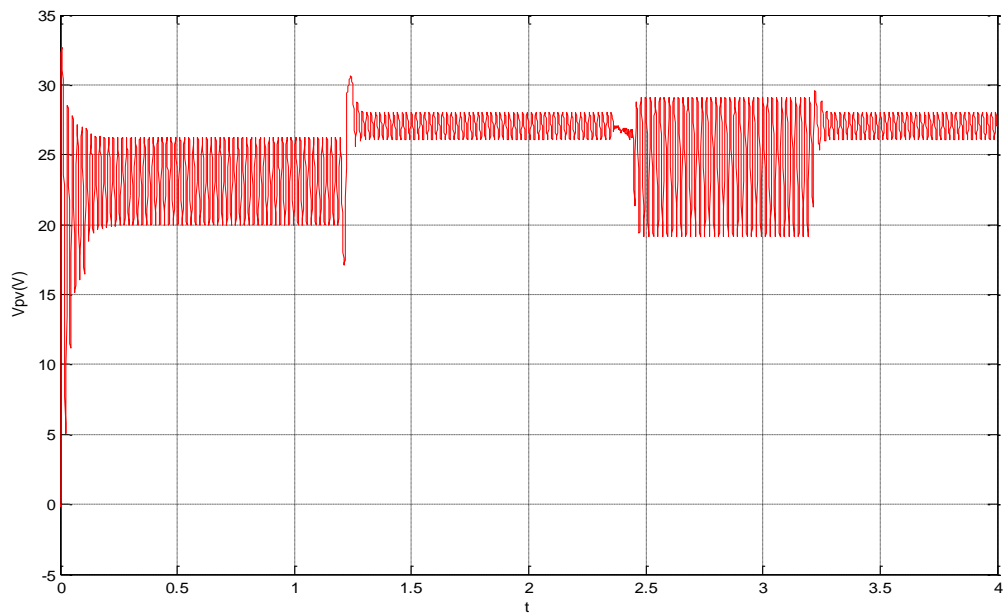


Figure (3.34) puissance de GPV

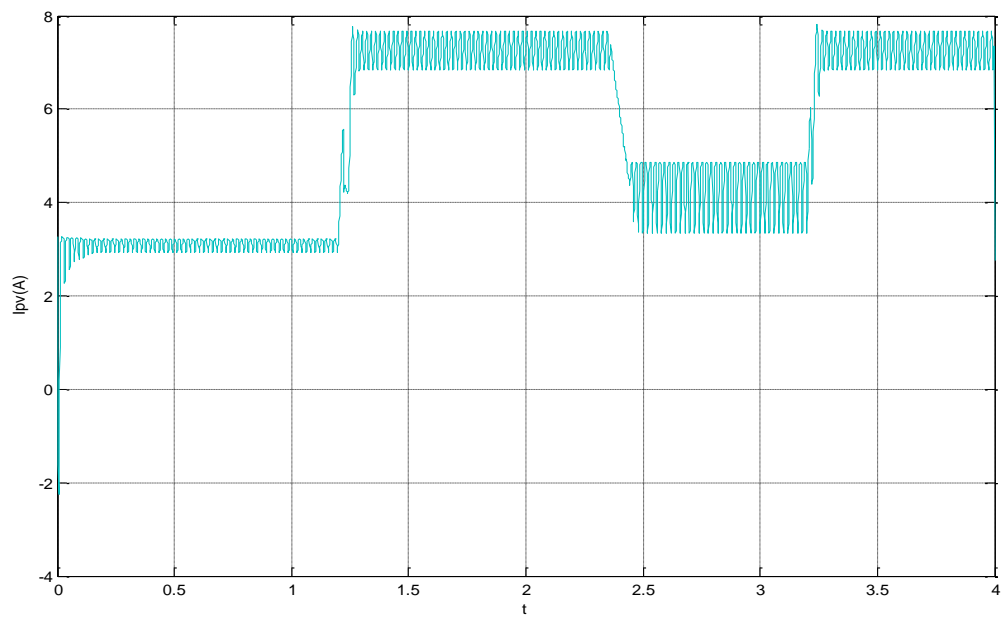


**Figure (3.35)** puissance de sortie

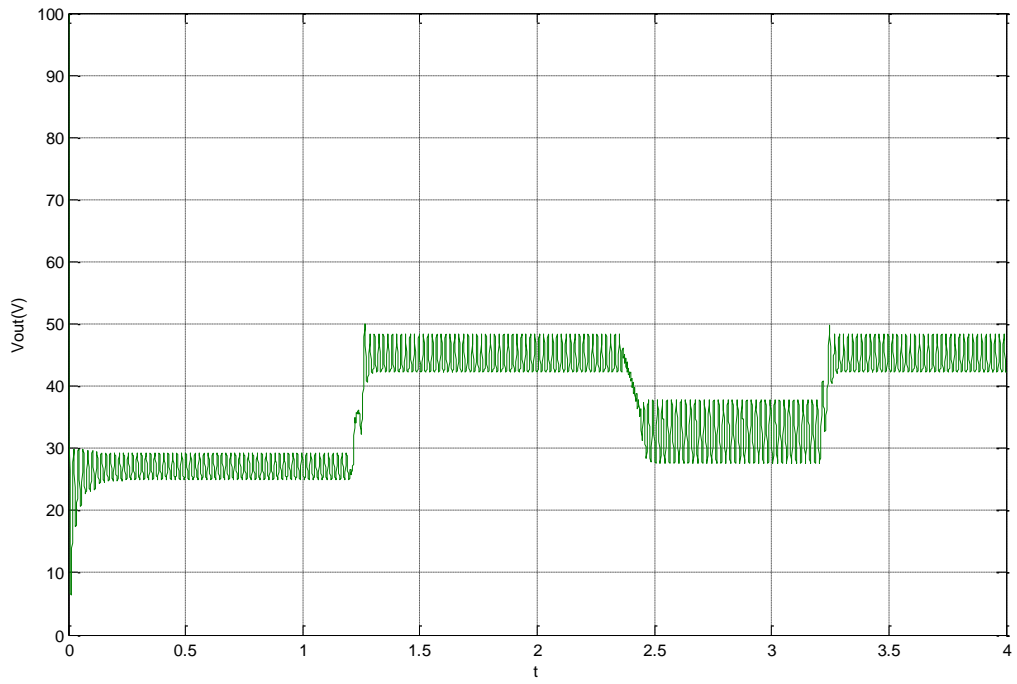




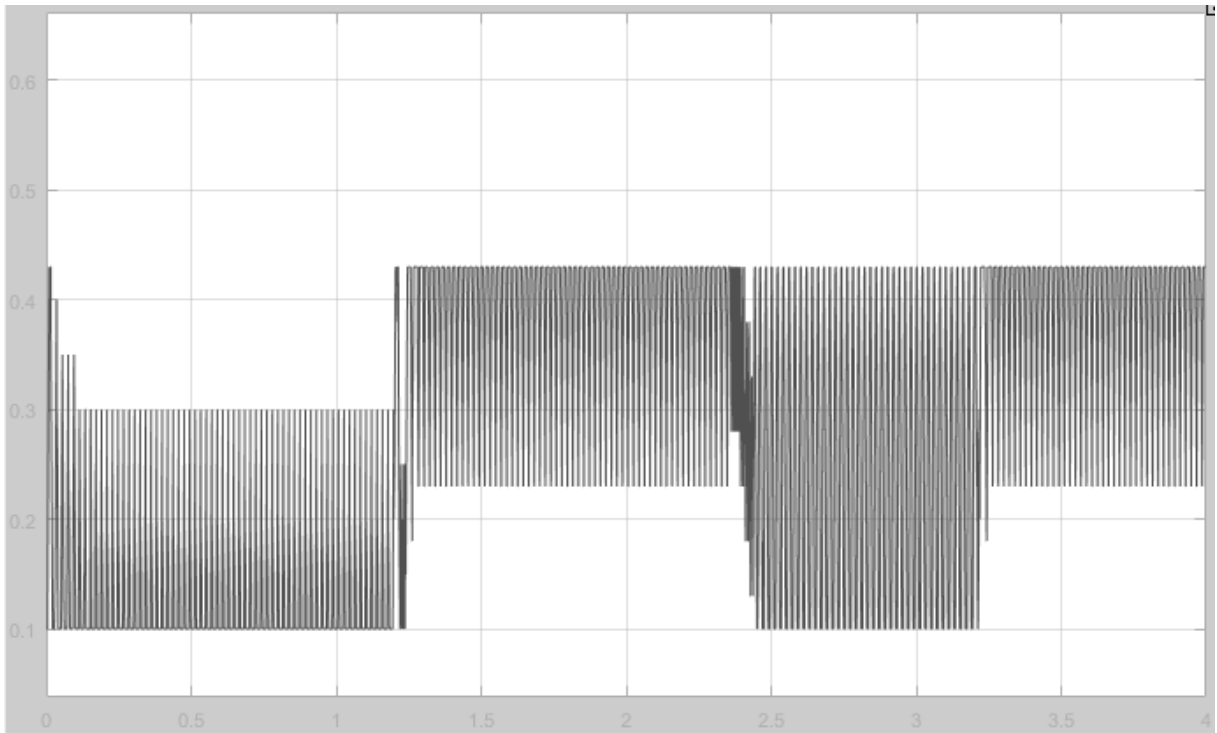
**Figure (3.36)** tension de GPV



**Figure (3.37)** courant de GPV



**Figure (3.38)** tension de sortie

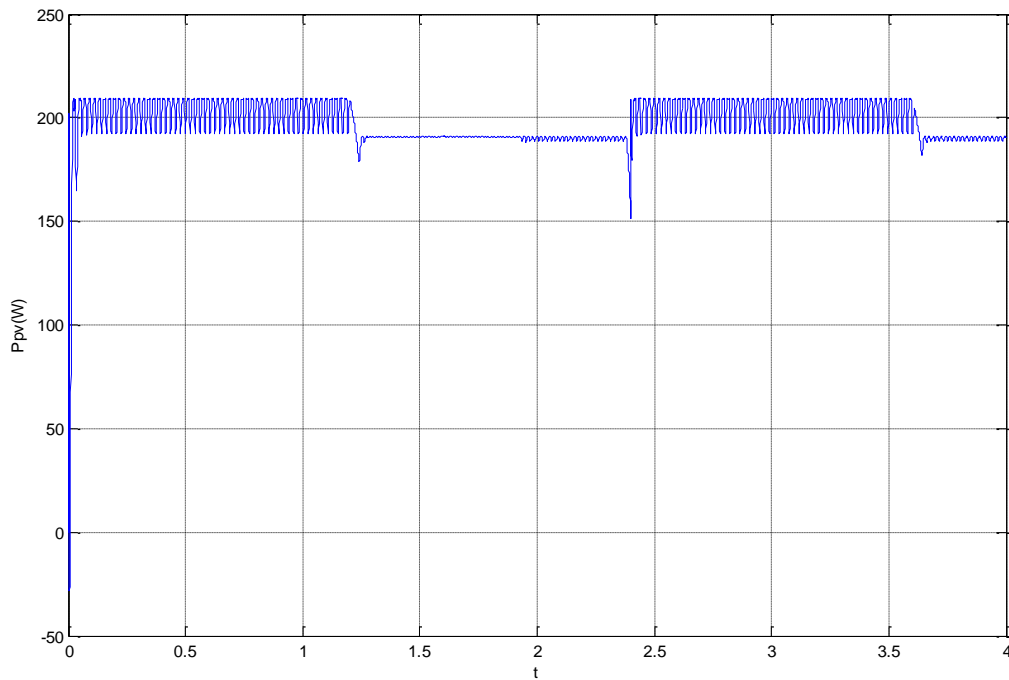


**Figure (3.39)** rapport cyclique

D'après les résultats de simulation obtenus, on remarque qu'il existe une relation de proportionnalité entre la puissance et l'éclairement. Ainsi que le temps de réponse est très rapide. Mais on constate que les courbes de la puissance, de la tension et du courant présentent des oscillations dans le régime permanent

### 3.5.3 Température variable et éclairement constant

Pour présenter l'effet de la température  $T$  sur la tension, on fait maintenir l'éclairement à une valeur constante  $E = 1000 \text{ w/m}^2$  et on fait varier la température de  $[20 \ 20 \ 30 \ 30 \ 20 \ 20 \ 30 \ 30]^\circ\text{C}$ .



**Figure (3.40)** puissance de GPV

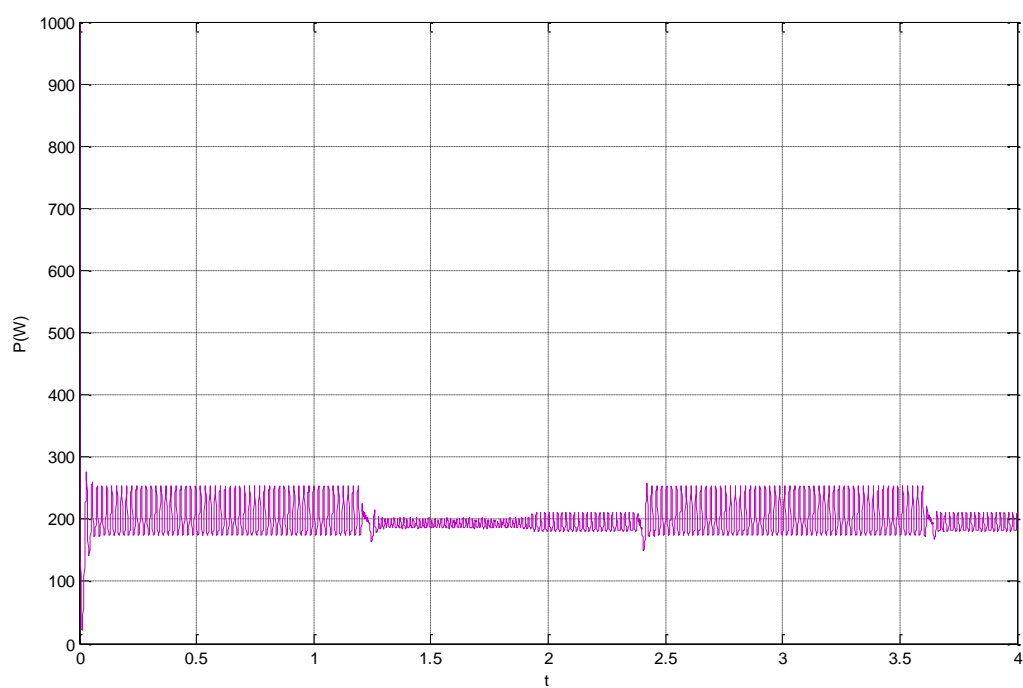


Figure (3.41) puissance de sortie

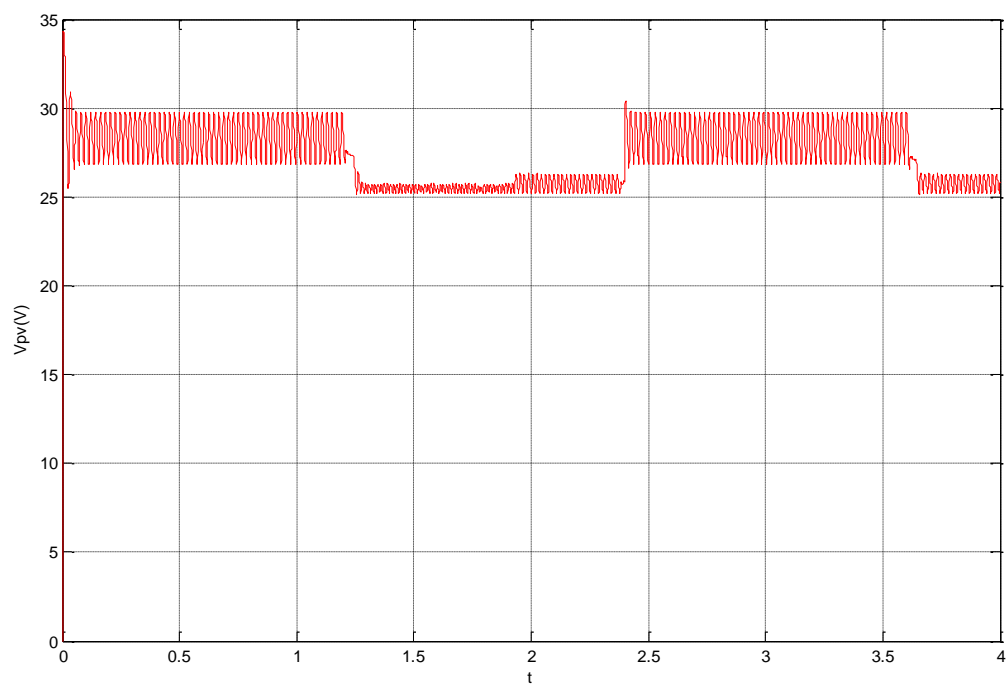
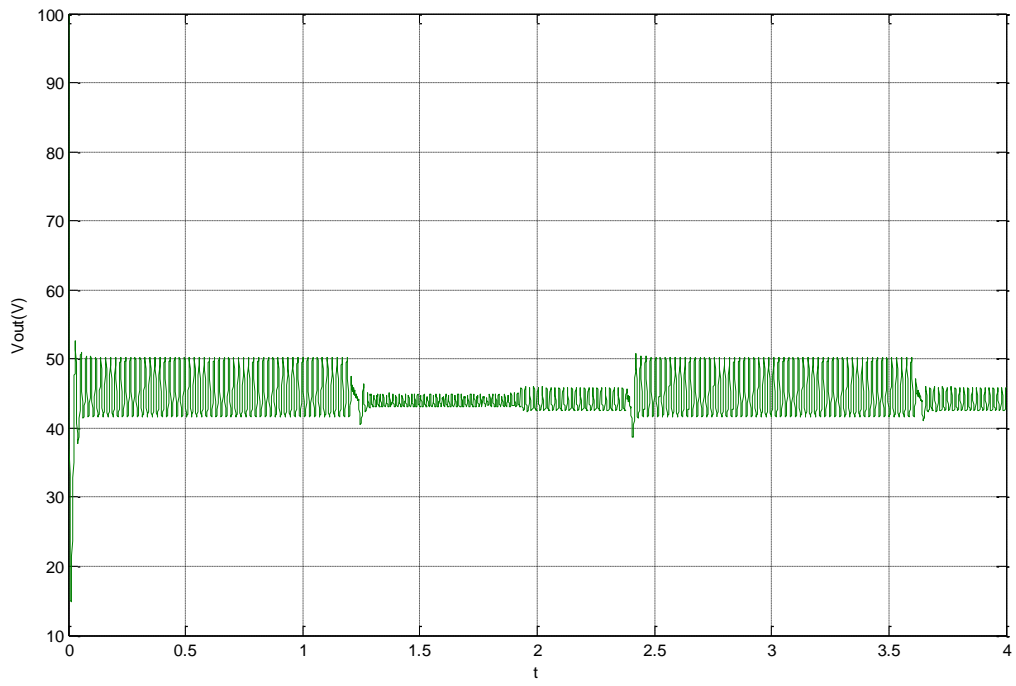
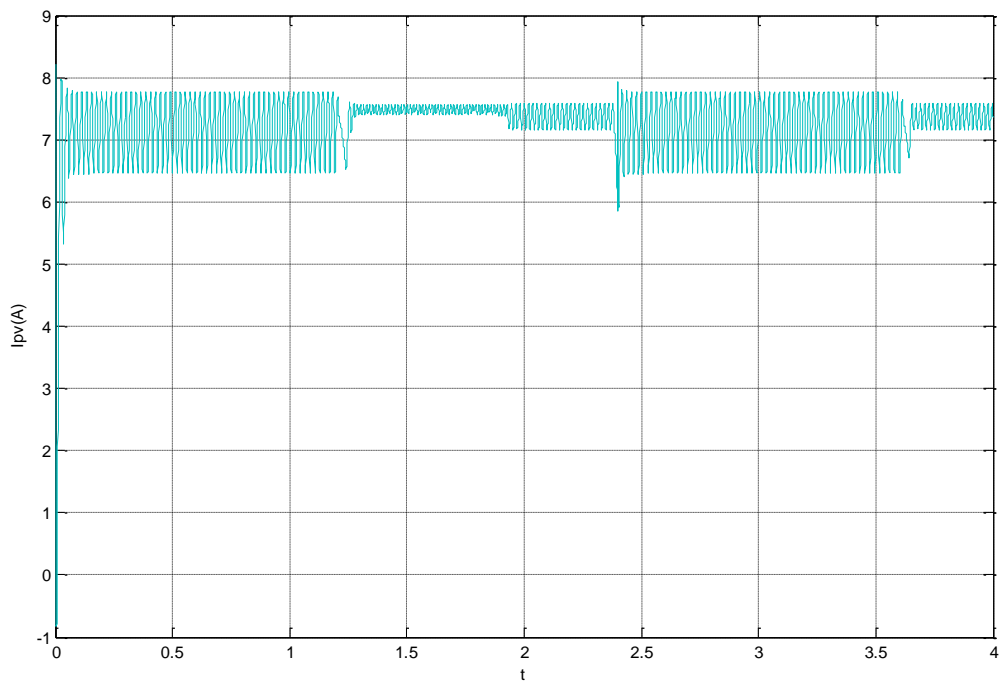


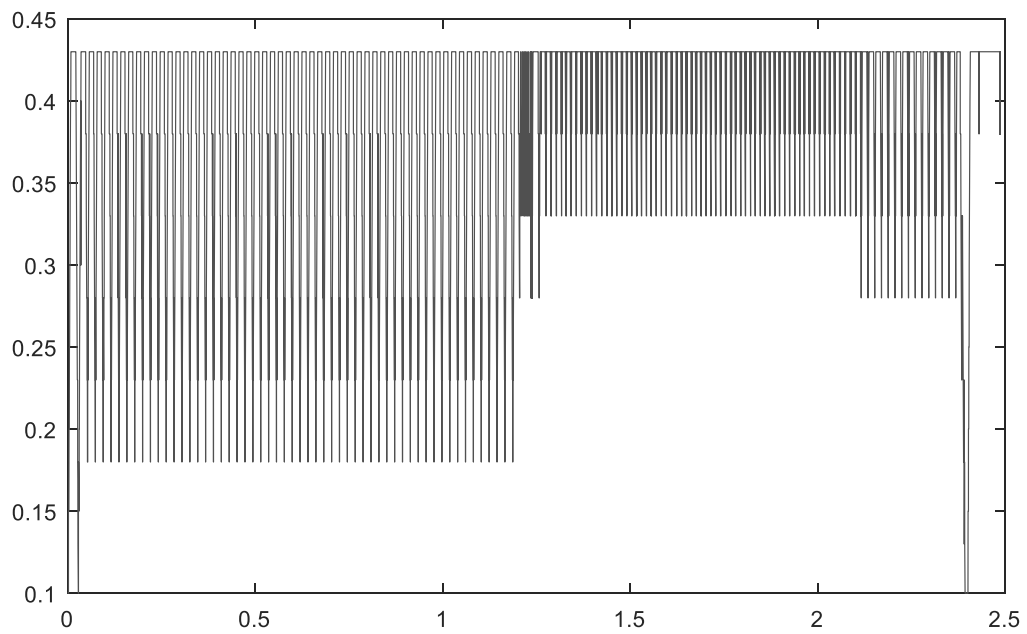
figure (3.42) tension de GPV



**Figure (3.43)** tension de sortie



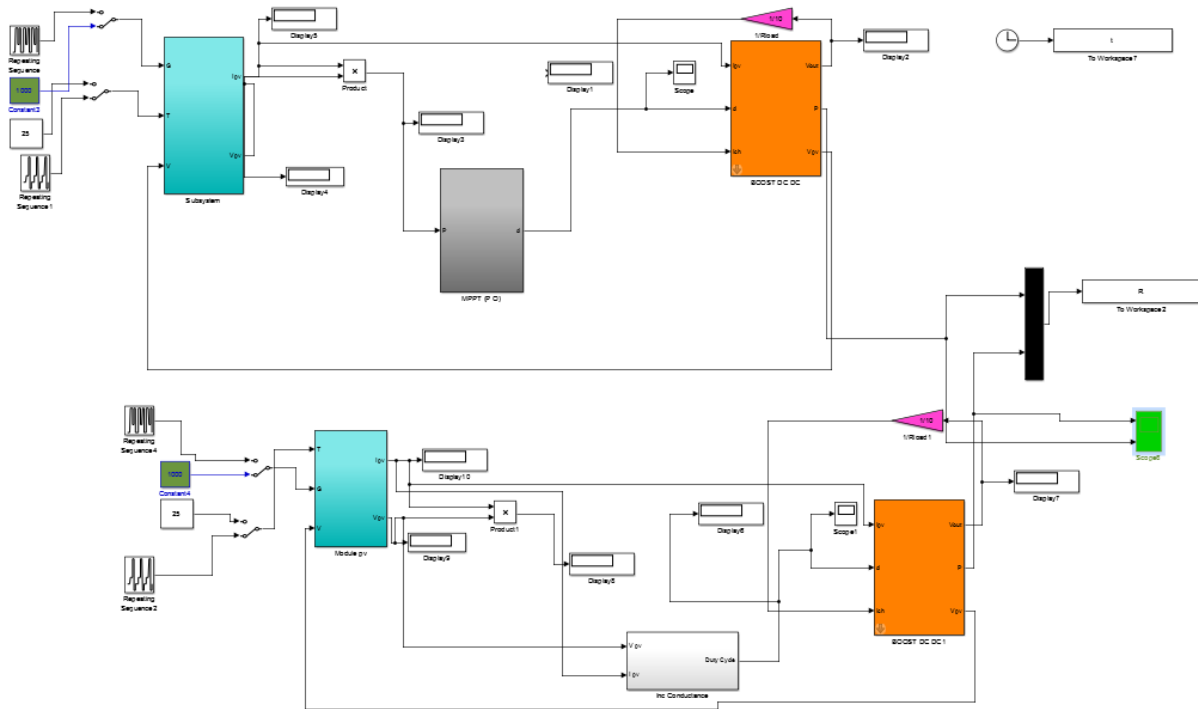
**Figure (3.44)** courant de GPV



### Figure(3,45) rapport cyclique

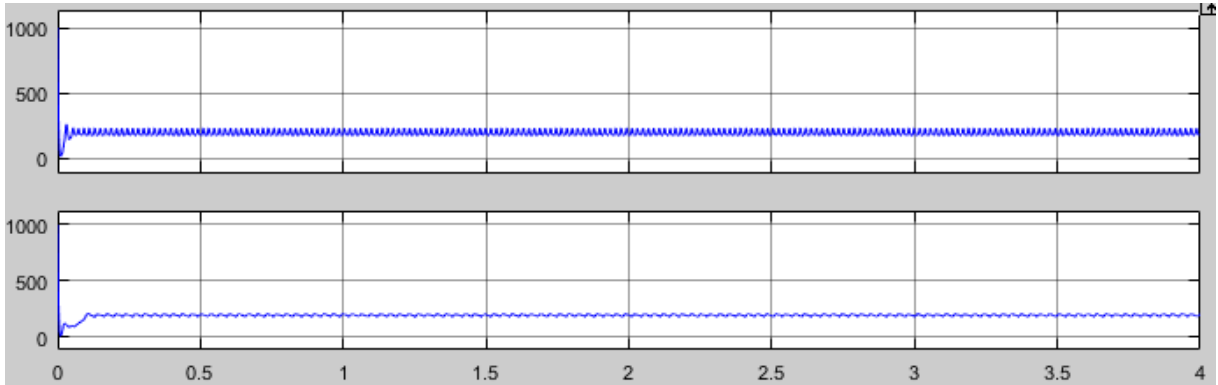
D'après les résultats de simulation obtenus, on remarque qu'il existe une relation d'inversement proportionnel entre la puissance et température, on remarque également qu'une variation de la température provoque une variation considérable de la tension ( $V_{pv}$ ), par contre le courant  $I_{pv}$  dans ce cas varie légèrement. Ainsi on constate que les courbes de puissance, de tension et du courant présentent des oscillations dans le régime permanent

### 3.6 Comparaison entre les deux méthodes (p&o et inc)

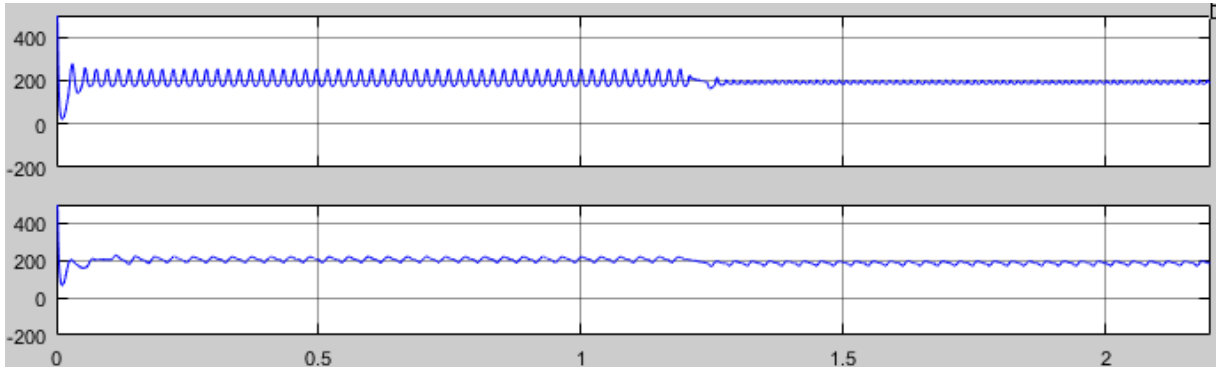


Figure(3,46 ) Modèle de simulation du GPV adapte par les deux techniques MPPT (P&O) et MPPT(INC).

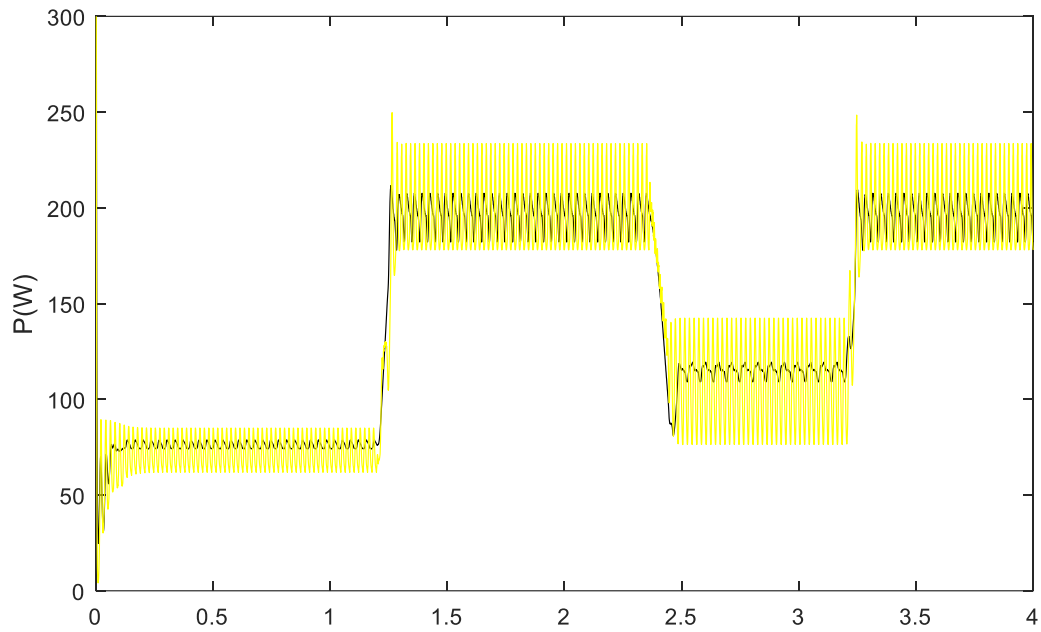




**Figure(3,47)** les puissances de sortie des deux méthodes(p&o,inc) dans les conditions standards



**Figure(3,48)** les puissances de sortie des deux méthodes (p&o,inc) quand T variable et éclairement constant



**Figure(3,49)** les puissances de sortie des deux méthodes (p&o,inc) quand T cts

Et éclairement variable

d'après les figure précédentes, Si on intéresse au temps de réponse, on a bien vu que la méthode de( inc) atteint la puissance maximale rapidement puis la méthode( p&o), et si on intéresse à l'oscillation autour le MPP on remarque que la méthode de( p&o)à présent une oscillation important par contre la méthode( inc) présente une oscillation moine que la méthode (inc)

**3.7 conclusion :** après la modélisation et la simulation d'un système photovoltaïque adapté par deux différentes méthodes de commande MPPT (la méthode perturbation puis observation (P&O), incrémentation de la conductance (Inc)), La méthode P&O impose toujours une oscillation autour du PPM. En effet, cette oscillation est nécessaire pour connaître les variations de la puissance de sortie du GPV et ainsi réajuster le rapport cyclique du convertisseur DC-DC en faisant en sorte que le point de fonctionnement du GPV oscille le plus près possible du PPM, même si les conditions de fonctionnement sont inchangées. Cela entraîne des pertes en régime établi. D'autre part, le type de commande MPPT nommé algorithme d'incrément de conductance (IncCond) se base sur la dérivée de la conductance du GPV ( $dG = dI/dV$ ) pour connaître la position relative du PPM et enfin pour appliquer une action de contrôle adéquate au suivi de ce PPM .

### 3.8 Conclusion générale

Les travaux présentés dans cette thèse se sont focalisés sur l'optimisation de la production d'énergie électrique par les générateurs photovoltaïques ainsi que le suivi du PPM de ces derniers,

La modélisation et la conception d'un module ou générateur PV est une manière d'étude très important pour analyser le fonctionnement de système PV, et voir l'influence de différents facteurs sur le module surtout la variation de l'éclairement et la température.

Nous avons montré tout d'abord l'importance d'installer un étage d'adaptation entre le générateur PV et la charge, avec une explication et simulation de son principe de fonctionnement.

Deux méthodes MPPT conventionnelles sont appliquées à un système photovoltaïque constitué d'un GPV, d'un convertisseur boost, et d'un contrôleur MPPT. Le contrôleur utilisé est basé sur des techniques classiques (p&o,inc) leurs performances sous des conditions de fonctionnement variables sont évaluées et analysées par simulation à l'aide de simulink de matlab. Des résultats satisfaisants ont été obtenus avec la méthode inc. le fonctionnement sous des accroissements lents de puissance, provoqués par des augmentations lents et rapides d'ensoleillement ou par diminution de la température des cellules, a indiqué un léger retard de la méthode p&o devant la méthode inc.

Finalement, la méthode inc montre son efficacité et sa robustesse par rapport à la méthode de (p&o) en qualité de la rapidité et de la diminution des oscillations.

Nous espérons d'avoir plus d'amélioration sur ce travail

# Bibliographie

- [1]: L'électricité photovoltaïque, Yves JAUTARD et Thierry BOUDOL (Solarte) - 25/05/2000.
- [2]: R. Chenni, " Etude Techno-économique d'un Système de Pompage Photovoltaïque dans un Village Solaire, Thèse de Doctorat, Avril 2006.
- [3]: Townsend, T. U. "A method for estimating the long-term performance of directcoupledphotovoltaicsystems". MS Thesis, SolarEnergyLaboratory, University of Wisconsin, Madison, 1989.
- [4]: AkihiroOi, "Design and Simulation of Photovoltaic Water Pumping System", A Thesis Presented to the Faculty of California Polytechnic State University, San Luis Obispo, 2005.
- [5]: G. Walker, "Evaluating MPPT Converter Topologies Using A MATLAB PV Model, A Thesis Presented to the Faculty of California Polytechnic State University, San Luis Obispo, 2005
- [6] <http://www.pveducation.org/pvcdrom/solar-cell-operation/open-circuit-voltage>
- [7] Manuel scolaire « TERMINALE STI ELECTROTECHNIQUE Nathan », 'Ce qu'il faut savoir sur L'énergie solaire photovoltaïque', office fédéral suisse des questions conjoncturelles-Suisse, 2011/2 012.
- [8] David Sanz Morales, 'Maximum Power Point Tracking Algorithms for Photovoltaic Applications', Thesis submitted for examination for the degree of Master of Science in Technology, 14.12.2010.
- [9] Francisco M, González-Longatt, 'Model of Photovoltaic Module in Matlab', 2docongresoiberoamericano de estudiantes de ingenieríaeléctrica, electrónica y computación, pp 1-5, 2005.
- [10] K.TAHRI, B. BENYOUCEF, 'Etude de Modélisation d'un Générateur Photovoltaïque', 10ème Séminaire International sur la Physique Energétique, Journal of Scientific Research N° 0 vol. 1 , pp 192-197, 2010.
- [11]: Cédric CABAL, "Optimisation énergétique de l'étage d'adaptation électronique dédié à la conversion photovoltaïque", Thèse de doctorat soutenue le 15 décembre 2008.
- [12]: Angel Cid Pastor, "Conception et Réalisation de Modules Photovoltaïques Electroniques, thèse de doctorat, soutenue le 29 septembre 2006.
- [13] Akihiro Oi, « Design and Simulation of Photovoltaïque Water Pumping System » Faculty of California Polytechnic State University, 2005

[14] H. Knopf, «Analysis, Simulation and Evaluation of Maximum Power Point Tracking (MPPT) Methods for a Solar Powered Vehicle » Portland State University, 1999

[15] T. Eeram, Student Member, IEEE, and Patrick L. Chapman, Senior Member, IEEE, «"Comparison of Photovoltaic Array Maximum Power Point Tracking Techniques » IEEE Transactions on Energy Conversion, 2006

