



Université Mohamed Khider de Biskra  
Faculté des Sciences et de la Technologie  
Département de génie électrique

## MÉMOIRE DE MASTER

Sciences et Technologies  
Electrotechnique  
Machine Electrique

Réf. : .....

---

Présenté et soutenu par :  
**KHAIR Oussama**

Le : samedi 6 juillet 2019

# Etude et commande d'un système photovoltaïque soumis à un ombrage partiel

---

### Jury :

Dr.	CHARROUF Omar	MCA	Université de Biskra	Rapporteur
Mme	ABDEDAIM Sabrina	MCA	Université de Biskra	Président
Mme	SAADI Aicha	MCA	Université de Biskra	Examineur



Université Mohamed Khider de Biskra  
Faculté des Sciences et de la Technologie  
Département de génie électrique

## MÉMOIRE DE MASTER

Sciences et Technologies  
Electrotechnique  
Machine Electrique

---

Présenté et soutenu par :  
**KHAIR Oussama**  
Le : samedi 6 juillet 2019

# Etude et commande d'un système photovoltaïque soumis à un ombrage partiel

---

Présenté par :  
**KHAIR Oussama**

Avis favorable de l'encadreur :  
Dr. CHARROUF Omar *signature*

**Avis favorable du Président du Jury**

Dr. ABDEDAIM Sabrina

*Signature*

**Cachet et signature**

# REMERCIEMENTS

---

## REMERCIEMENTS

*Je remercie Allah le tout puissant qui m'a donné le courage et la volonté pour achever ce mémoire.*

*Nous exprimons notre profonde gratitude au **Dr charrouf Omar**, avant tout pour avoir proposé ce sujet, ensuite pour avoir pris la responsabilité de notre encadrement et enfin pour nous avoir guidés tout au long de la période qu'a pris cette étude.*

*Nous remercions chaleureusement les **membres du jury** pour avoir accepté d'évaluer ce travail.*

*Nous remercions également le regretté **professeur Menacer Arzaki** pour ses efforts au cours de sa carrière.*

*Je voudrais également remercier les enseignants du département de génie électrique de l'université*

*Mohamed Khider à Biskra et les camarades de la promo : machines durant les années : 2017/2018 et*

*2018/2019*

# Dédicaces

---

## Dédicaces

*Je voudrais dédier ce travail à:*

*Mes chers parents et ma chère famille*

*Surtout mon oncle Mouammar, qui m'a*

*soutenu durant mes études*

*- A tous les amis pour l'aide qu'ils m'ont*

*apportée, en particulier :*

*-a mes amis et frères Abdelhadi Ourrad et*

*Salah Eddine Gamma,*

*Khair Oussama*



# Résumé

## Résumé

Dans cette étude nous avons étudié un système photovoltaïque soumis à un ombrage partial. Des technique de commande MPPT principalement la méthode perturbe observe (*P&O*) et le contrôle par recherche d'extremum (ESC) ont été validés par la conception d'un modèle sous MATTLAB/SUMILINK.

### Mots-clés :

Système photovoltaïque, commande MPPT, perturbe observe (P et O), contrôle par recherche d'extremum (ESC)

## ملخص

في هذه الدراسة درسنا نظام الضوئي يخضع لتظليل الجزئي. و تم التحقق من صحة تقنيات التحكم MPPT أساسا بطريقة اضطراب -ملاحظ (P & O) ومراقبة البحث على النقطة الأعظمية (ESC) من خلال تصميم نموذج MATTLAB / SUMILINK

### الكلمات المفتاحية:

نظام الطاقة الضوئية وحدة التحكم MPPT، خوارزمية الملاحظة والاضطراب (PetO)، خوارزمية البحث عن النقطة الاعظمية (ESC) .

## Liste de symbole

---

### Liste de symbole

MPPT	Poursuite du Point de Puissance Maximale, 'Maximum Power Point Tracking'.
GPV	Générateur Photovoltaïque.
DC/DC	Hacheur Courant Continu/Courant Continu
MOSFET	Métal Oxyde Silicone Field ect Transistor
P&O	Perturbe et Observe
ESC	Contrôle par recherche d'extremum (extremum seeking control)
CIS	Cuivre Indium Sélénium
CdTe	Tellure de Cadmium
GaAs	Arséniure de Gallium
$\theta$	L'angle entre la position du soleil et le zénith exprimée en (Deg)
AM	masse d'air
$I_0$	Courant de saturation de la diode
n	facteur d'idéalité de la diode
k	constante de Boltzmann ( $1,38 \cdot 10^{-23}$ J/K)
q	Charge électrique (en coulomb)
T	température en Kelvin
$I_{ph}$	Courant photonique généré par la lumière,
$I_0$	Saturation cellulaire du courant d'obscurité,
$R_p$	Résistance de parallèle en $\Omega$ ,
$R_s$	Résistance série en $\Omega$ ,
$I_{Rp}$	Courant circulant dans la résistance $RP$ .
$I_{RS}$	Courant circulant dans la résistance $RS$ .
$\alpha$	Facteur d'idéalité [1.6 pour le silicium].
$I_{phn}$	Courant photonique nominal en STC,
T	Température de la cellule en Kelvin,

## Liste de symbole

---

$T_n$	Température nominale en Kelvin au STC, 25 ° C,
$K_i$	Coefficient de température du courant de court-circuit,
$G$	Eclairement solaire en $1 \text{ kW} / \text{m}^2$
$G_n$	Rayonnement solaire en $\text{KW} / \text{cm}^2$ .
STC	Condition de température standard
$I_{scn}$	Courant de court-circuit nominal au STC,
$V_{ocn}$	Tension nominale à vide du STC,
$K_v$	Coefficient de température de la tension de circuit ouvert à $I_{sc}$ .
$q$	Charge de l'électron $1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$ .
FF	Facteur de forme
$P_{max}$	Puissance maximale
$\eta$	Rendement
$N_{pp}$	Nombre du module connecté en parallèle.
$N_{ss}$	Nombre de modules connectés en série.
$V_{sh}$ :	Tension de la cellule ombrée
$\alpha$	le rapport cyclique
$\tau$	temps à l'état fermé
$T_s$	Période
$I_{pv}$	Courant photovoltaïque (A)
$V_{pv}$ :	Tension photovoltaïque (V)
$L$	l'inductance de filtre de convertisseur Buck et Boost
$I_L$	Courant moyen passant à travers l'inductance
$R_L$	Résistance de filtre.
$I_{SH}$	Courant de charge
$V_{SH}$	Tension de charge

## Liste de symbole

---

$V_{mpp}$	Tension maximale du point de puissance
$I_{mpp}$	Courant maximale du point de puissance
E	l'erreur
CE	variation d'erreur

# Sommaire

---

## Sommaire

### Chapitre I : Généralités sur l'énergie solaire

I-Introduction.....	3
I-2-Le rayonnement solaire.....	3
I-2-1- Caractéristique du rayonnement solaire.....	4
I-2-2-Mesure du rayonnement solaire.....	4
I-2-3-Les type de rayonnement.....	5
I-2-4-Spectre du rayonnement.....	6
I-3 L'énergie solaire .....	7
I-4-L'énergie photovoltaïque.....	7
I-4-1-Topologies de systèmes photovoltaïques .....	7
I-4-2-L'effet photovoltaïque.....	9
I-4-3-Principe générale .....	9
I-4-4-La Jonction PN utilisée comme capteur.....	10
I-4-5-La cellule photovoltaïque.....	10
I-4-6- Type et rendement des cellules photovoltaïques.....	10
I-5- Les avantages et les inconvénients d'un générateur PV.....	12
I-5-1- Les avantage.....	12
I-5-2- Les inconvénients.....	12
I-6-La future d'énergie solaire photovoltaïque en Algérie .....	12
I-7-Conclusion.....	13

### Chapitre II : Modélisation du système photovoltaïque

II-1-Introduction.....	14
II-2-Schéma équivalent d'une cellule solaire.....	14
II-3- Module Photovoltaïque.....	16
II-3-1- Caractéristique de modèle PV.....	17
II-4- générateur PV .....	18

# Sommaire

---

II-5- Influence de L'éclairément sur GPV.....	21
II-5-1 Influence de L'éclairément.....	21
II-6-modélisation d'un GPV soumis à un ombrage.....	22
II-6-1-Description de l'ombrage.....	22
II-6-2- Effet d'ombrage partiel.....	22
II-6-3-Protection du PV.....	25
II-7-Convertisseur DC/DC (Hacheur).....	26
II-7-1-Convertisseur Buck.....	26
II-7-2-Convertisseur Boost.....	28
II-8-Conclusion .....	30

## **Chapitre III : Approche de commande adoptée**

III-1-Introduction.....	31
III-2-Principe de MPPT.....	31
III-3-Types d'algorithme de MPPT.....	32
III-4-Technique de commande de MPPT de GPV.....	32
III-4-1-Méthode de perturbe et d'observe (P&O).....	32
III-4-2-Méthode d'Incrémentale Conductance.....	35
III-4-3-Méthode La Tension de circuit ouvert fractionnaire (Voc).....	36
III-4-4-Méthode La court-circuit fractionné Courant de circuit (Isc).....	37
III-4-5-Méthode logique floue.....	37
III-5-Technique de commande d'ombrage partiel de GPV.....	39
III-5-1-Méthode de contrôle par recherche d'extremum (ESC).....	39
III-5-1-1-Principe de méthode (ESC).....	39
III-5-1-2- Conception du Contrôleur ESC sous SUMILINK.....	41
III-6-Conclusion .....	43

# Sommaire

---

## Chapitre IV : Résultat de Simulation

IV-1-Introduction.....	44
IV-2-Résultata de simulation.....	45
IV-3-Régulation avec la commande MPPT (P&O) sans ombrage.....	46
IV-3-1-Variation d'éclairments et charge constante.....	46
IV-3-2-Variation de charge 45Ω et 30Ω et 15Ω et éclairment constante.....	47
IV-3-3-Variation d'éclairment et variation de charge .....	48
IV-4-Régulation avec la commande MPPT par méthode ESC sans ombrage...	48
IV-4-1-Variation d'éclairments et charge constante.....	48
IV-4-2-Variation de charge 45Ω et 30Ω et 15Ω et éclairment constante.....	49
IV-4-3-Variation d'éclairments et variation de charge.....	50
IV-5-Régulation avec ombrage partiel.....	51
IV-5-1-Scenario 1 sévère :.....	51
IV-5-2-Scenario 2 modéré :.....	52
IV-5-3-Scenario 3 faible :.....	52
IV-6-Applique la méthode (Perturbe & Observe) en trois scenarios.....	53
IV-6-1- Résultats de scenario 1 à charge constant.....	53
IV-6-1-1-Variation de charge .....	54
IV-6-2-Résultats de scenario 2 à charge constant.....	55
IV-6-2-1-Variation de charge .....	56
IV-6-3- Résultats de scenario 3 à charge constant.....	56
IV-6-3-1-Variation de charge .....	57
IV-7-Applique la méthode ESC en trois scenarios.....	58

# Sommaire

---

IV-7-1- Résultats de scenario 1 à charge constant .....	58
IV-7-1-1-Variation de charge.....	59
IV-7-2- Résultats de scenario 2 à charge constant.....	59
IV-7-2-1-Variation de charge.....	60
IV-7-3- Résultats de scenario 3 à charge constant.....	61
IV-7-3-1-Variation de charge.....	62
IV-8-Conclusion.....	63
Conclusion générale .....	64
 Bibliographes	



# Liste de Figure

---

## Liste de Figure

### Chapitre I

<b>Figure (I-1) :</b> Description du nombre de masse d'air.....	4
<b>Figure (I-2) :</b> Différents composantes du rayonnement.....	6
<b>Figure (I-3) :</b> spectre solaire hors atmosphère.....	6
<b>Figure (I-4) :</b> Les systèmes photovoltaïques autonomes.....	8
<b>Figure (I-5) :</b> Les systèmes PV décentralisés connectés au réseau.....	8
<b>Figure (I-6) :</b> principe de fonctionnement d'une jonction P-N.....	10
<b>Figure (I-7) :</b> Répartition énergétique en Algérie.....	13

### Chapitre II

<b>Figure (II-1) :</b> Circuit de cellule PV équivalent.....	14
<b>Figure (II-2) :</b> module photovoltaïque .....	16
<b>Figure (II-3) :</b> Caractéristique de $P=f(V)$ d'un module photovoltaïque.....	18
<b>Figure (II-4) :</b> Caractéristique de $I=f(V)$ d'un module photovoltaïque.....	18
<b>Figure (II-5) :</b> Structure d'un générateur photovoltaïque.....	19
<b>Figure (II-6) :</b> modules photovoltaïques connecte en séries.....	19
<b>Figure (II-7) :</b> modules photovoltaïques connecte en parallèle.....	20
<b>Figure (II-8) :</b> Différentes connexions pour le générateur PV série /parallèle.....	20
<b>Figure (II-9) :</b> Caractéristique $P=f(V)$ d'un GPV pour une température constante de 25°C et un l'éclairement variable.....	21
<b>Figure (II-10) :</b> Caractéristique $I=f(V)$ d'un GPV pour une température constante de 25°C et un l'éclairement variable.....	22
<b>Figure (II-11) :</b> Différentes configurations avec: (a) irradiation uniforme, (b) ombrage léger, (c) ombrage moyen, (d) ombrage sévère.....	23
<b>Figure (II-12) :</b> la caractéristique $I=f(V)$ on ombrage partial.....	23
<b>Figure (II-13) :</b> la caractéristique $P=f(V)$ on ombrage partial.....	24

## Liste de Figure

---

<b>Figure (II-14):</b> Module photovoltaïque avec une cellule touché par l'ombre.....	24
<b>Figure (II-15) :</b> Diodes de protection des modules.....	25
<b>Figure (II-16) :</b> Convertisseur DC/DC.....	26
<b>Figure (II-17) :</b> La forme de variation en fonction du rapport cyclique.....	26
<b>Figure (II-18) :</b> Circuit fonctionnel d'un convertisseur Buck.....	27
<b>Figure (II-19) :</b> Fermes d'ondes courant/tension dans un convertisseur Buck.....	28
<b>Figure (II-20) :</b> Circuit fonctionnel d'un convertisseur Boost.....	29
<b>Figure (II-21) :</b> Circuit équivalent du Boost quand l'interrupteur.....	29

### Chapitre III

<b>Figure (III-1) :</b> Chaîne de conversion d'énergie solaire comprenant une commande MPPT..	32
<b>Figure (III-2) :</b> caractéristique de puissance dans la P&O.....	33
<b>Figure (III-3) :</b> Organigramme de la méthode P&O.....	34
<b>Figure (III-4) :</b> Schéma de la commande MPPT P&O en MATLAB-SIMULINK.....	34
<b>Figure (III-5) :</b> Incrémentale Conductance (IncCond).....	35
<b>Figure (III-6) :</b> Organigramme d'un algorithme de conductance incrémentielle.....	36
<b>Figure (III-7) :</b> Fonctions d'adhésion.....	38
<b>Figure (III-8) :</b> Schéma bloc de l'algorithme à base de la logique floue.....	38
<b>Figure (III-9):</b> Un schéma de principe d'un système de contrôle ESC.....	40
<b>Figure (III-10) :</b> Illustration de la dynamique de l'ESC.....	41
<b>Figure (III-11) :</b> Un schéma de SUMILINK d'un système ESC sinusoïdal .....	42
<b>Figure (III-12) :</b> Schéma de modèle SUMILINK du contrôleur ESC associé au GPV.....	43

### Chapitre IV

<b>Figure (IV-1) :</b> schéma de générateur photovoltaïque.....	45
<b>Figure (IV-2) :</b> caractéristique $I_{pv}=f(V_{pv})$ présente le point de puissance maximal MPPT..	45
<b>Figure (IV-3) :</b> caractéristique $P_{pv}=f(V_{pv})$ présente le point de puissance maximal MPPT.	46
<b>Figure (IV-4) :</b> Allure de la puissance face à une variation d'éclairement par MPPT P&O pour une charge constante $R = 15\Omega$ .....	46

## Liste de Figure

---

<b>Figure (IV-5) :</b> Allure de la puissance face à une variation de charge par MPPT P&O Pour un éclairage constante $G = 1000 \text{ W/ m}^2$ .....	47
<b>Figure (IV-6) :</b> la courbe de rapport cyclique on commode le convertisseur boost par méthode P et O .....	47
<b>Figure (IV-7) :</b> Allure de la puissance face à une variation d'éclairage par MPPT P&O pour une charge variable.....	48
<b>Figure (IV-8) :</b> Allure de la puissance face à une variation d'éclairage par MPPT par méthode ESC pour une charge constante $R = 15\Omega$ .....	49
<b>Figure (IV-9) :</b> Allure de la puissance face à une variation de charge par MPPT par méthode de ESC pour un éclairage constante $G = 1000 \text{ W/ m}^2$ .....	49
<b>Figure (IV-10) :</b> la courbe de rapport cyclique on commode le convertisseur boost par méthode ESC .....	50
<b>Figure (IV-11) :</b> Allure de la puissance face à une variation d'éclairage par MPPT par méthode ESC pour une charge variable.....	50
<b>Figure (IV-12) :</b> résultat d'ombrage partiel de scenario 1.....	51
<b>Figure (IV-13) :</b> résultat d'ombrage partiel de scenario 2.....	52
<b>Figure (IV-14) :</b> résultat d'ombrage partiel de scenario 3.....	53
<b>Figure (IV-15) :</b> Caractéristique de $P_{pv}=f(V_{pv})$ par méthode (Perturbe & Observe) .....	53
<b>Figure (IV-16) :</b> Caractéristique de $P_{pv}=f(t)$ par méthode (Perturbe & Observe).....	54
<b>Figure (IV-17) :</b> Allure de la puissance face à une variation de charge par MPPT méthode (Perturbe & Observe).....	54
<b>Figure (IV-18) :</b> Caractéristique de $P_{pv}=f(V_{pv})$ par méthode (P & O).....	55
<b>Figure (IV-19) :</b> Caractéristique de $P_{pv}=f(t)$ par méthode (Perturbe & Observe) .....	55
<b>Figure (IV-20) :</b> Allure de la puissance face à une variation de charge par MPPT méthode (Perturbe & Observe) .....	56
<b>Figure (IV-21) :</b> Caractéristique de $P_{pv}=f(V_{pv})$ par méthode (P & O).....	57

## Liste de Figure

---

<b>Figure (IV-22) :</b> Caractéristique de $P_{pv}=f(t)$ par méthode (P & O).....	57
<b>Figure (IV-23) :</b> Allure de la puissance face à une variation de charge par MPPT méthode (P&O).....	58
<b>Figure (IV-24) :</b> Caractéristique de $P_{pv}=f(V_{pv})$ par méthode ESC.....	58
<b>Figure (IV-25) :</b> Caractéristique de $P_{pv}=f(t)$ par méthode ESC .....	59
<b>Figure (IV-26) :</b> Allure de la puissance face à une variation de charge par MPPT méthode ESC .....	59
<b>Figure (IV-27) :</b> Caractéristique de $P_{pv}=f(V_{pv})$ par méthode ESC .....	60
<b>Figure (IV-28) :</b> Caractéristique de $P_{pv}=f(t)$ par méthode ESC.....	60
<b>Figure (IV-29) :</b> Allure de la puissance face à une variation de charge par MPPT méthode ESC.....	61
<b>Figure (IV-30) :</b> Caractéristique de $P_{pv}=f(V_{pv})$ par méthode ESC.....	61
<b>Figure (IV-31) :</b> Caractéristique de $P_{pv}=f(t)$ par méthode ESC.....	62
<b>Figure (IV-32) :</b> Allure de la puissance face à une variation de charge par MPPT méthode ESC.....	62

# Liste de tableau

---

## Liste de tableau

### Chapitre I

**Tableau (I-1) :** Rendement énergétique des différents types de cellules photovoltaïques.....11

### Chapitre III

**Tableau (III-1) :** Résumé du fonctionnement de l'algorithme P&O.....33

**Tableau (III-2) :** Tableau de réglage flou.....39

**Tableau (III-3) :** Les paramètres du contrôleur ESC..... 42

### Chapitre IV

**Tableau (IV-1) :** caractéristiques électriques de notre GPV .....44

# Introduction générale

---

# Introduction générale

# INTRODUCTION GENERALE

---

## Introduction générale

L'énergie a été depuis les temps anciens le moteur principal de la vie humaine, elle joue un rôle très important dans l'activité journalière et dans le développement des pays [8].

L'énergie est la préoccupation essentielle pour l'homme dans le monde actuel. La disponibilité de ses sources est le facteur qui affectera le futur de l'homme. Avec la diminution du stock mondial d'hydrocarbures d'origine fossile (pétrole, gaz et charbon), la demande énergétique croissante sans cesse et la crainte d'une pollution de plus en plus envahissante ; les énergies renouvelables (solaire, marine, éolienne, etc.) reviennent au premier plan de l'actualité [4].

L'énergie solaire est une source d'énergie inépuisable et propre car elle ne provoque pas d'émissions de gaz nocifs pour notre l'environnement. Elle est disponible partout et sans cesse renouvelable. Son exploitation par l'homme devrait suffire les besoins énergétique de toute l'humanité [3].

L'énergie solaire photovoltaïque est l'une des énergies renouvelables les plus utilisées. Elle consiste à convertir directement le rayonnement électromagnétique en électricité grâce à l'effet photovoltaïque. Les panneaux photovoltaïques (PV) ont la capacité de transformer les photons en électrons c'est-à-dire l'énergie sous forme de courant continu ainsi directement utilisable. La capacité mondiale installée en 2018 utilisant l'énergie photovoltaïque a atteint 505 GW à travers le monde. La Chine est aujourd'hui le premier pays à installer cette source d'enger avec une capacité installée de l'ordre de 176 GW [28].

. Les systèmes PV génèrent une puissance dépendante du changement des conditions climatiques ; telles que le rayonnement solaire et la température des panneaux et de la variation de la charge. Par conséquent, une technique de recherche du point de puissance maximale (PPM) destinée à contrôler le rapport cyclique du convertisseur DC/DC est nécessaire pour garantir un fonctionnement optimal de la chaine PV dans différentes conditions d'exploitation. Plusieurs travaux ont abordé le problème de la recherche du point de fonctionnement permettant de soutirer le maximum d'énergie des modules PV en utilisant différentes méthodes dites MPPT (maximum power point tracking) .Les plus connues de ces méthodes sont (Perturbe et Observe (P&O) , incrémentation de conductance (IC), méthode basée sur la mesure du courant de court-circuit  $I_{cc}$  et tension de circuit ouvert  $V_{oc}$  , logique flou). Cependant, le 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

## INTRODUCTION GENERALE

---

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 [23].

Lorsqu'un module Photovoltaïque est partiellement ombré, une dissipation d'une puissance considérable résulte et dégrade les caractéristiques du module, induisant même des pannes importantes [7]. En raison des caractéristiques électriques fortement non linéaires des cellules PV et de leurs associations, le rendement des systèmes PV peut être amélioré par des solutions utilisant des techniques de recherche du point de puissance plus adaptées que les méthodes conventionnels tel que le contrôle par recherche d'extremum (ESC) que nous proposons d'étudier dans ce mémoire.[4].

Ce mémoire est divisé en quatre chapitres comme suit :

Dans le premier chapitre, nous présentons des notions générales sur le soleil, l'énergie solaire, l'énergie photovoltaïque.

Le deuxième chapitre, sera consacré à la modélisation d'un système photovoltaïque ensuite nous présentons le GPV et le convertisseur statistique Buck-Boost.

Le troisième chapitre, présentera le principe des deux méthodes MPPT utilisée dans cette étude à savoir perturbe observe (P&O) et contrôle par recherche d'extremum (ESC).

Le quatrième chapitre, quant à lui détaillera la simulation du système GPV tout en donnant les principaux résultats part une étude comparative entre les deux techniques de commande utilisées sous des conditions de fonctionnement variable dans les deux cas avec et sans ombrage.

Une conclusion générale dressera le bilan de cette étude en donnant quelques perspectives pour de futurs travaux.



---

# **Chapitre I : Généralités sur l'énergie solaire**

## I-Introduction

L'énergie solaire est l'énergie diffusée par le rayonnement du soleil. L'énergie solaire est à l'origine de toutes les formes de production énergétique renouvelable aujourd'hui utilisées sur terre, à l'exception de l'énergie nucléaire, L'homme utilise l'énergie solaire pour la transformer en d'autres formes d'énergie : énergie chimique (les aliments que notre corps utilise), énergie cinétique, énergie thermique, énergie électrique ou biomasse ou énergie photovoltaïque [1].

Les systèmes photovoltaïques sont particulièrement bien adaptés à la production décentralisée d'électricité et les sites isolés : électrification rurale (pour les besoins domestiques et les besoins communautaires : centres de santé, écoles, etc.), pompage de l'eau, réfrigération, télécommunications, etc. Ils constituent donc une solution de choix pour les populations rurales qui ne pourront pas être reliées aux réseaux électriques conventionnels, même pour les villes on peut économiser la consommation d'énergie par l'utilisation des panneaux sur le toit ou sur les façades des bâtiments [3].

Dans ce chapitre, nous présentons le rayonnement solaire et l'énergie solaire ainsi que l'énergie photovoltaïque et leur caractéristiques enfin nous avons présentons un aperçu sur la future de l'énergie photovoltaïque en Algérie

## I-2-Le rayonnement solaire

Le rayonnement solaire est transmis dans l'espace de manière uniforme et dans toutes les directions. Arrive à la couche atmosphérique, sa densité extraterrestre totale diminue à  $1367 \text{ W/m}^2$ . La rotation et l'inclinaison de la Terre font également que l'énergie disponible en un point donné varie selon plusieurs facteurs qui tantôt augmentent, tantôt diminuent. Le rayonnement solaire et le rendent diffus. En résumé, on peut dire que l'intensité du rayonnement solaire est extrêmement 'variable suivant [4] :

- la localisation géographique du site (spécialement par rapport à sa latitude);
- la saison;
- l'heure;
- les conditions météorologiques (nébulosité, poussière, humidité...)
- l'altitude du lieu.

Il est possible de représenter l'allure des courbes correspondant aux variations de l'ensoleillement selon différents paramètres [4].

## I-2-1- Caractéristique du rayonnement solaire

### a) L'atmosphère

Les couches atmosphériques modifient profondément la distribution spectrale du Rayonnement solaire qui subit une atténuation et une modification de son spectre, à la suite Des phénomènes complexes d'absorption et de diffusion par les poussières et les aérosols (les Poussières des cendres, des micros cristaux, des micros gouttelettes, des fumées de pollution Industrielle dont la taille varie de 0.5 à 10  $\mu$  m.). Ainsi la couche d'ozone absorbe la majeure Partie du rayonnement ultraviolet, tandis que la vapeur d'eau absorbe le rayonnement Infrarouge [7].

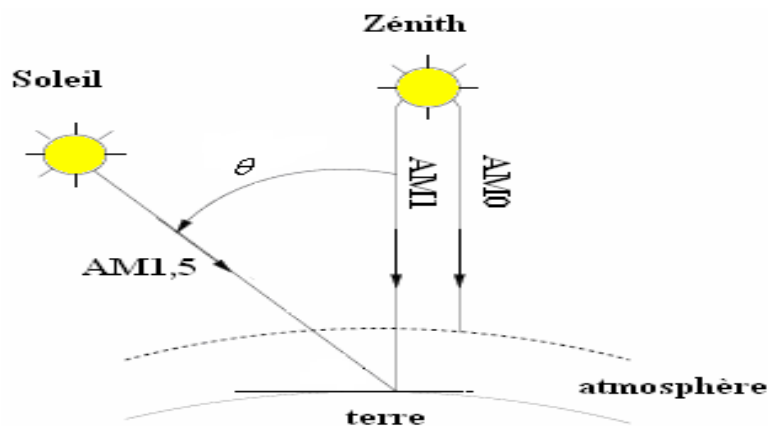
### b) Masse d'air

On appelle masse d'air, la perte de l'énergie solaire par l'absorption atmosphérique. AM Elle est donnée en fonction de l'angle entre le soleil et le zénith.

$$AM = \frac{1}{\sin \theta} \quad (I-1)$$

Où :

$\theta$  : représente l'angle entre la position du soleil et le zénith exprimée en (Deg) [10].



**Figure (I-1) :** Description du nombre de masse d'air.

## I-2-2-Mesure du rayonnement solaire

L'ensoleillement correspond à l'intensité du rayonnement solaire reçu sur un plan à un moment donné. Il s'exprime habituellement en watts par mètre carré ( $W/m^2$ ). La ressource solaire, l'ensoleillement varie de zéro, au lever du Soleil, à sa valeur maximale, typiquement au midi solaire.

L'ensoleillement peut également exprimer la quantité d'énergie solaire captée sur un plan pendant un intervalle déterminé. Il s'exprime habituellement en kilowattheure par mètre carré

(kWh/m<sup>2</sup>), en «heure de soleil maximum», en mégajoule par mètre carré (MJ/m<sup>2</sup>) ou en calorie par centimètre carré (cal/cm<sup>2</sup>) pour l'intervalle déterminé – une journée ou une heure [4].

## I-2-3-Les type de rayonnement

- **Le rayonnement direct**

C'est un rayonnement qui est reçu directement du soleil, sans diffusion par l'atmosphère.

Ses rayons sont parallèles entre eux. Ils peuvent être mesurés par un pyromètre [5].

- **Le rayonnement diffus**

C'est constitué par la lumière diffusée par l'atmosphère (air, nébulosité, aérosols). La diffusion est le phénomène qui répartit un faisceau parallèle en une multitude de faisceaux partant dans toutes les directions. Dans le ciel, ce sont à la fois les molécules d'air, les gouttelettes d'eau (nuages) et les poussières qui produisent ce (éclatement) des rayons du soleil. Cela dépend donc avant tout des conditions météorologiques [6].

- **L'albédo**

C'est la fraction d'un rayonnement incident diffusé ou réfléchi par un obstacle. Ce Terme étant généralement réservé au sol aux nuages, c'est une valeur moyenne de leur Réductance pour le rayonnement considéré et pour tous les angles d'incidences possibles. Par Définition possibles. Par Définition, le corps noir possède un albédo nul [7].

- **Le rayonnement global**

C'est la somme de tous les rayonnements reçus, y compris le rayonnement réfléchi par le Sol et les objets qui se trouvent à sa surface. Il est mesuré par un pyromètre ou un Solari Mètre sans écran. Rayonnement Globale = rayonnement direct + rayonnement diffus + Rayonnement réfléchi [5].

La figure (I-2) représente les différents types composants de rayonnement solaire

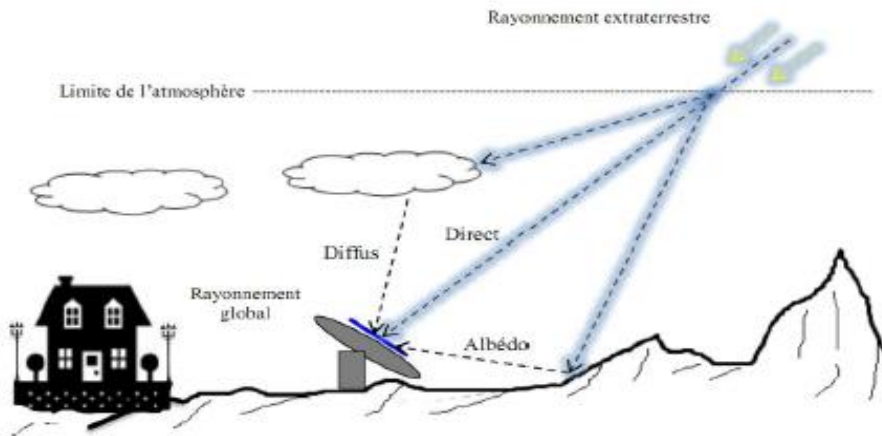


Figure (I-2) : Différents composantes du rayonnement

**I-2-4-Spectre du rayonnement**

Le rayonnement électromagnétique est composé de «grains» de lumière appelés photons. L'énergie de chaque photon est directement liée à la longueur d'onde  $\lambda$  :

Le spectre du rayonnement extraterrestre correspond environ à l'émission d'un corps noir porté à 5800° K. Une courbe standard, compilée selon les données recueillies par les satellites, est désignée sous le nom d'AM 0. Sa distribution en énergie est répartie en [6]:

Ultraviolet Uv	0.20 <math>< \lambda < 0.38 \text{ mm}</math>	6.4%
Infrarouge Ir	0.78 <math>< \lambda < 10 \text{ mm}</math>	45.6%
Visible	0.38 <math>< \lambda < 0.78 \text{ mm}</math>	48.0%

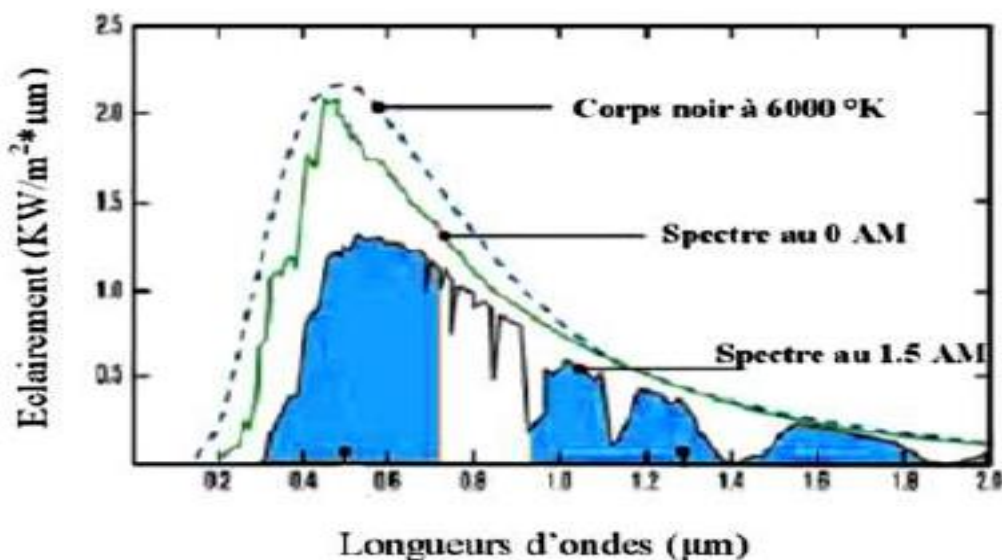


Figure (I-3) : spectre solaire hors atmosphère

## I-3-L'énergie solaire

Le soleil est la source d'énergie la plus puissante et cette énergie est gratuite, il n'y a qu'à l'exploiter sur terre, il existe différents types d'énergies solaires [4].

- l'énergie passive
- l'énergie solaire thermique
- l'énergie thermodynamique :
- l'énergie photovoltaïque

## I-4-L'énergie photovoltaïque

L'énergie photovoltaïque résulte de la transformation directe de la lumière du soleil en énergie électrique aux moyens des cellules généralement à base de silicium cristallin qui reste la filière la plus avancées sur le plan technologiques et industriel, en effet le silicium et l'un des éléments les plus abondants sur terre sous forme de silice non toxique.

En effet le mot " photovoltaïque " vient du grec " photo " qui signifie lumière et de " voltaïque " qui tire son origine du nom d'un physicien italien Alessandro Volta (1754 -1827) qui a beaucoup contribué à la découverte de l'électricité, alors le photovoltaïque signifie littérairement la « lumière électricité » [2].

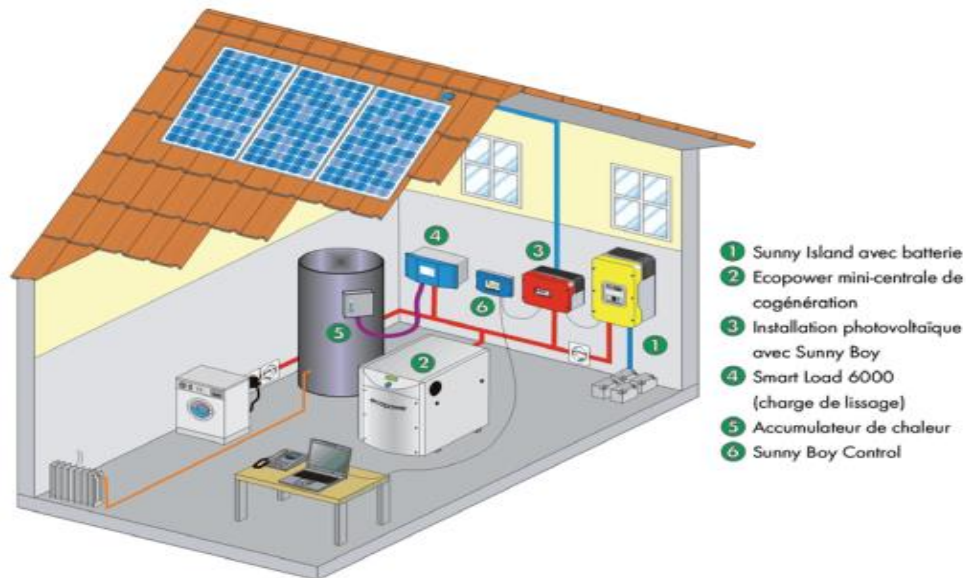
La conversion de la lumière en électricité, appelée effet photovoltaïque, a été découverte par Antoine Becquerel en 1839, mais il faudra attendre près d'un siècle pour que les scientifiques approfondissent et exploitent ce phénomène de la physique [3].

### I-4-1-Topologies de systèmes photovoltaïques

Il existe deux types de systèmes PV: les systèmes autonomes et les systèmes connectés au réseau. **Les systèmes photovoltaïques autonomes** avec des puissances PV maximales peuvent avoir des milliwatts à plusieurs kilowatts. Ils ne sont pas connectés à un réseau électrique. Afin d'assurer l'approvisionnement du système autonome avec alimentation électrique également dans les moments sans rayonnement ou avec très faible rayonnement, les systèmes autonomes ont généralement un système de stockage intégré. Si les systèmes sont utilisés seulement pendant le temps où le rayonnement est suffisant pour alimenter le système en énergie électrique directement, un système de stockage n'est pas nécessaire. Ceci s'applique également à la situation dans laquelle le produit. Livres par le système peuvent être stockés. Il existe actuellement une très grande variété de systèmes autonomes. Les exemples vont du solaire calculatrices et montres aux systèmes de contrôle du trafic, aux systèmes capables de fournir un ou plusieurs plusieurs bâtiments situés dans des zones reculées alimentés en électricité. Ils peuvent être des systèmes à courant continu avec ou sans batterie de stockage,

ou ils peuvent être des systèmes AC avec un onduleur. Les systèmes PV connectés au réseau sont toujours connectés au réseau public onduleur adapté car un module PV ne délivre que du courant continu [17].

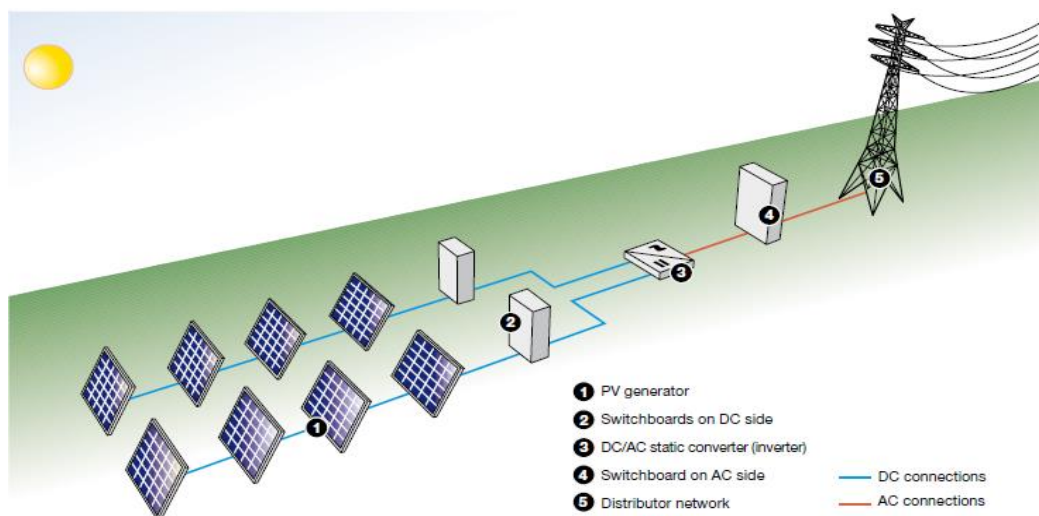
La figure (I-4) schématise un système autonome



**Figure (I-4) :** Les systèmes photovoltaïques autonomes

**Les systèmes PV décentralisés connectés au réseau** ont principalement une petite plage de puissance et sont installés sur le toit des bâtiments (installation sur toit plat) ou intégré aux façades des bâtiments. Les systèmes PV connectés au réseau centrale ont une puissance installée allant jusqu'à la plage en MW. Avec une telle centrale photovoltaïque, il est possible d'alimenter directement le réseau moyenne ou haute tension [17].

La figure (I-5) représente les systèmes PV décentralisés connectés au réseau.



**Figure (I-5) :** Les systèmes PV décentralisés connectés au réseau

## I-4-2-L'effet photovoltaïque

L'effet photovoltaïque est un processus de transformation de l'énergie émise par le soleil, sous forme de photons, en énergie électrique à l'aide de composant semi-conducteur appelé Cellule solaire [8].

## I-4-3-Principe générale

La formation d'une jonction réalisée par le dopage du silicium représente le principe de base de la cellule solaire. La création d'une barrière de potentiel dans le semi-conducteur permet de séparer les électrons et les trous qui sont générés par l'absorption de la lumière dans le matériau. Lors de la formation de la jonction, les électrons diffusent vers la zone p et les trous vers la zone n (alignement du niveau de Fermi), afin de tendre vers un équilibre Thermodynamique. Le dipôle, créé aux bords de la jonction, entraîne la formation d'un champ Électrique qui s'oppose à l'équilibre à tout déplacement de charges. La polarisation de la Jonction en direct permet alors de diminuer la hauteur de la barrière de potentiel et donc L'intensité de champ électrique permettant le passage de porteurs de charges. A l'opposé, une Polarisation inverse augmentera la hauteur de la barrière [9].

La relation courant-tension pour une diode idéale à l'obscurité est donnée par la relation:

$$I = I_0 \left( e^{\left( \frac{q \cdot V}{n \cdot k \cdot T} \right)} - 1 \right) \quad (\text{I-2})$$

Avec :

$I_0$  : Courant de saturation de la diode

n : facteur d'idéalité de la diode

k : constante de Boltzmann ( $1,38 \cdot 10^{-23}$  J/K)

q : charge électrique (en coulomb)

T : température en Kelvin

- **Dopage de type N** : Le dopage de type N (négatif), qui consiste à introduire dans la structure cristalline du Semi-conducteur des atomes étrangers qui ont la propriété de donner chacun un électron Excédentaire, libre de se mouvoir dans le cristal (ex : le phosphore) [8].
- **Dopage de type P** : Le dopage de type P (positif) utilise des atomes dont l'insertion dans le réseau Cristallin donnera un trou excédentaire. (ex : le bore) [8].

La figure (I-6) illustre le principe du fonctionnement d'une jonction P-N



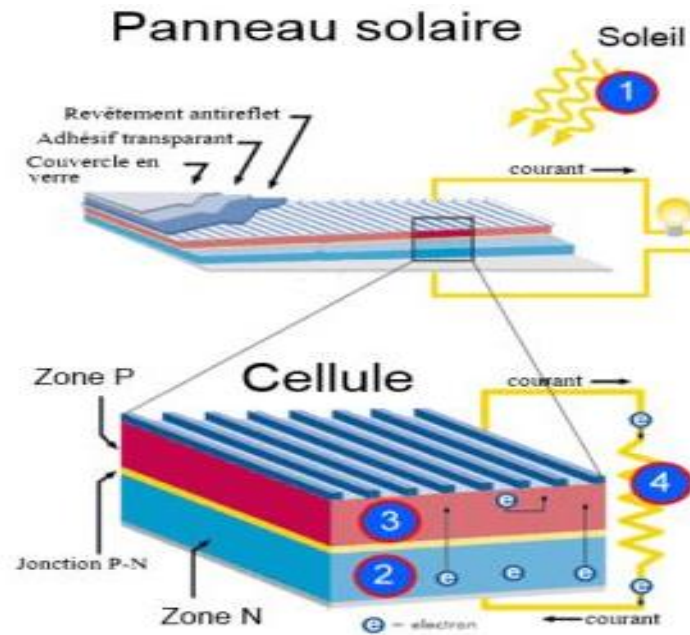


Figure (I-6) : principe de fonctionnement d'une jonction P-N

**I-4-4-La Jonction PN utilisée comme capteur**


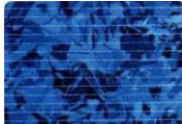
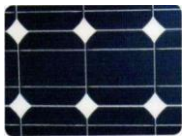

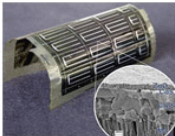

En polarisant électriquement une jonction PN classique a base de si, on obtient les caractéristique statique d'une diode .la particularité du si est lorsque la jonction PN est éclairée, une courant proportionnel a l'éclairement apparait. C'est cette particularité qui est employée dans les générateurs solaires photovoltaïques [11].

**I-4-5-La cellule photovoltaïque**

La première cellule photovoltaïque (photopile) a été développée aux États-Unis en 1954 par les chercheurs des laboratoires Bell, qui ont découvert que la photosensibilité du Silicium pouvait être augmentée en ajoutant des "impuretés", principalement le bore et le phosphore. C'est une technique appelée le "dopage" qui est utilisée pour tous les semi-conducteurs. Mais, ce n'est que lors de la course vers l'espace que les cellules ont quitté les Laboratoires pour s'orienté vers la production d'énergie dans les systèmes centralisés et Décentralisés. Dès lors les photopiles sont vues comme une solution idéale pour satisfaire les Besoins en électricité dans plusieurs applications comme à bord des satellites, ou site isolé, ou Bien raccordé au réseau [8].

**I-4-6- Type et rendement des cellules photovoltaïques**

Il existe différents types de cellules solaires (ou cellules photovoltaïques), et chaque type de cellules a un rendement et un coût qui lui est propre. Cependant, quel que soit leur type, leur rendement reste assez faible: de 8 à 23% de l'énergie qu'elles reçoivent. Il existe trois principaux types de cellules à l'heure actuelle [10].

Type de cellules	Rendements des cellules (%)			Domaines d'applications
	Théorique	En labo	disponible	
Silicium monocristallin 	27	24,7	14-16	Modules de grandes dimensions pour toits et façades, appareils de faibles puissances, espace (satellites)
Silicium Poly cristallin 	27	19,8	12-14	Modules de grandes dimensions pour toits et façades, générateurs de toutes tailles (reliés réseau ou sites isolés)
Silicium amorphe 	25	13	6-8	Appareils de faible puissance, production d'énergie embarquée (calculatrice, montre, de grandes dimensions (intégration dans le bâtiment)
Arséniure de gallium GaAs 	29	27,5	18-20	Système de concentrateur, espace (satellites)
CIS (cuivre-indium -sélénium) 	27,5	18,2	10-12	Appareils de faibles puissances, modules des grandes dimensions (intégration dans le bâtiment)
Tellure de Gadmiun CdTe 	28,5	16	9-11	Modules de grandes dimensions (intégrations dans le bâtiment)

**Tableau (I-1) :** Rendement énergétique des différents types de cellules photovoltaïques

## **I-5- Les avantages et les inconvénients d'un générateur PV**

### **I-5-1- Les avantages**

Par rapport aux autres sources renouvelables, la photovoltaïque offre des avantages particuliers:

- Elle est exploitable pratiquement partout, la lumière du soleil étant disponible dans le monde entier.
- L'équipement de production peut presque toujours être installé à proximité du lieu de consommation, évitant ainsi les pertes en ligne.
- Il est totalement modulable et la taille des installations peut être facilement ajustée selon les besoins ou les moyens.
- Aucun mouvement, pas de pollution directe ou indirecte (facteurs atmosphériques ou liquides, produits de nettoyage, risque d'accident physique...) aucun déchet, aucune perturbation pour l'environnement de proximité, c'est une énergie purement propre et écologique.
- La maintenance et les réparations sont réduites à presque rien pour la partie photovoltaïque et à peu de chose pour l'électronique associée [3].

### **I-5-2- Les inconvénients**

- le coût d'investissement des panneaux photovoltaïques est élevé.
- Le rendement réel de conversion d'un module est faible.
- Lorsque le stockage de l'énergie électrique par des batteries est nécessaire, le coût du système photovoltaïque augmente.
- Les panneaux contiennent des produits toxiques et la filière de recyclage n'existe pas encore.
- Le rendement électrique diminue avec le temps [1].

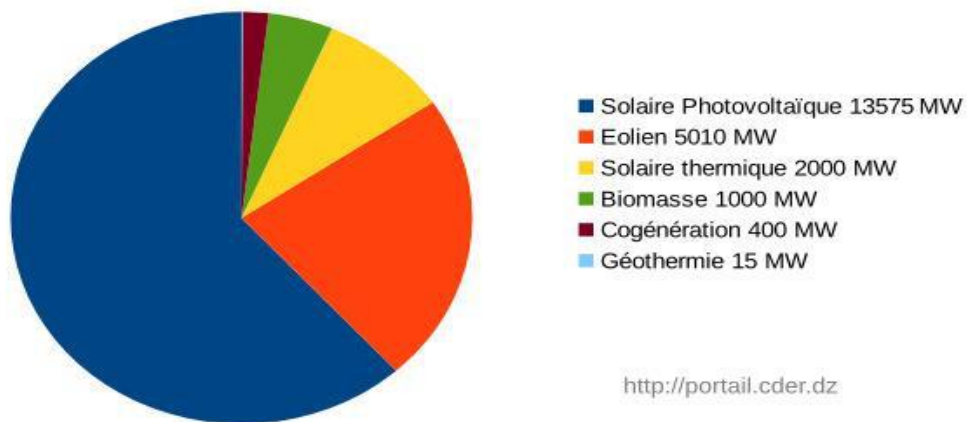
## **I-6-La future d'énergie solaire photovoltaïque en Algérie**

La stratégie énergétique de l'Algérie repose sur l'accélération du développement de l'énergie solaire. Le gouvernement prévoit le lancement de plusieurs projets solaires photovoltaïques d'une capacité totale d'environ 800 MW d'ici 2020. D'autres projets d'une capacité de 200 MW par an devraient être réalisés sur la période 2021-2030 [4].

La figure (I-8) schématise les parts des sources renouvelables dans le programme algériens d'ER (2030)

Objectifs du programme algérien des Energies Renouvelables

22 GW à l'horizon 2030



**Figure (I-7) : Répartition énergétique en Algérie**

## I-7-Conclusion

Nous avons dans ce chapitre présenté la généralité sur l'énergie solaire. D'abord nous avons parlé du rayonnement solaire et leur type ensuite nous avons présenté l'énergie photovoltaïque avec leur caractéristique à été donne un à percer sur le future de l'énergie photovoltaïque dans Algérie.

La modalisation du générateur PV et ses paramètres seront expliqués dans le prochain chapitre.

---

# **Chapitre II : Modélisation du système photovoltaïque**

II-1-Introduction

Un système photovoltaïque convertit la lumière du soleil en électricité. Il peut être généralement divisé en deux groupes de base; systèmes photovoltaïques autonomes et connectés au réseau. Les cellules solaires sont les dispositifs fondamentaux d'un système PV. Pour augmenter la quantité d'énergie produite par ce système, les cellules solaires peuvent être regroupées pour former des modules pouvant être connectés en série ou en parallèle pour former un réseau. Dans ce chapitre, le fonctionnement de base des cellules solaires et de leur structure sera présenté en détail, ainsi que leur modèle mathématique. En outre, certains facteurs qui affectent le fonctionnement des cellules PV sont discutés [12].

II-2-Schéma équivalent d'une cellule solaire

La cellule solaire est généralement modélisée par un schéma équivalent à une deux diodes il s'agit de modéliser le courant de court-circuit affecté par l'éclairement comme source et l'effet photovoltaïque par une diode alors que une résistance un série et une autre en parallèle représentent les pertes du modèle.

La figure (II-1) montre le circuit équivalent du modèle de cellule PV.

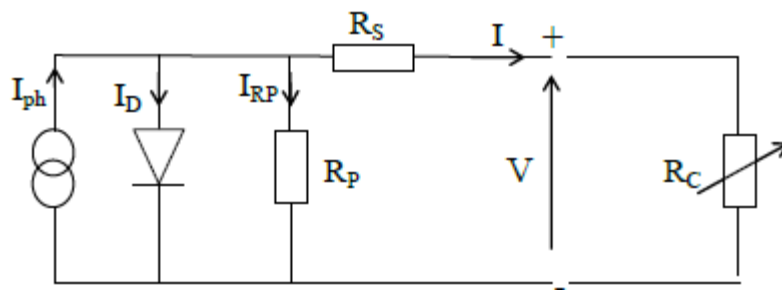


Figure (II-1) : Circuit de cellule PV équivalent

L'équation caractéristique d'une cellule solaire est donnée par:

$$I = ( I_{ph} - I_0 * ( e^{(V+I*R_s) * \frac{1}{\alpha * V_t}} - 1 ) - \frac{V - I * R_s}{R_p} ) \tag{II-1}$$

Ou :

$I_{ph}$ : est un courant photonique généré par la lumière,

$I_0$ : Saturation cellulaire du courant d'obscurité,

$R_p$ : Résistance de shunt en  $\Omega$ ,

$R_s$ : Résistance série en  $\Omega$ ,

$\alpha$ : Facteur d'idéalité [1.6 pour le silicium].

Le courant photonique est le courant dans la cellule résultant du rayonnement solaire. Cela dépend à la fois de la température et de l'éclairement énergétique. Par conséquent, sa valeur reste constante quelle que soit la tension externe. Il est donné par l'équation suivante [12]:

$$I_{ph} = \frac{G}{G_n} * ( I_{phn} + K_i * (T - T_n) ) \quad (II-2)$$

Ou :

$I_{phn}$ : Courant photonique nominal en STC,

$T$  : Température de la cellule en Kelvin,

$T_n$ : Température nominale en Kelvin au STC, 25 ° C,

$K_i$ : Coefficient de température du courant de court-circuit,

$G$ : Éclairement solaire en  $1 \text{ kW} / \text{m}^2$

$G_n$  : Rayonnement solaire en  $\text{KW} / \text{cm}^2$ .

Le courant de saturation cellulaire est le courant de saturation inverse de la diode. Il dépend uniquement de la température et peut être calculé à l'aide de:

$$I_0 = \frac{I_{scn} + K_i * (T - T_n)}{e^{\frac{V_{ocn} + K_v * (T - T_n)}{\alpha * V_t}} - 1} \quad (II-3)$$

Ou:

$I_{scn}$ : Est le courant de court-circuit nominal au STC,

$V_{ocn}$ : est la tension nominale à vide du STC,

$K_v$ : Coefficient de température de la tension de circuit ouvert à  $I_{sc}$ .

La tension thermique est donnée par:

$$V_t = \frac{K * T}{q} \quad (\text{II-4})$$

Où

K: la constante de Boltzmann  $1,38 \times 10^{-23} \text{ J / K}$ ,

q : est la charge de l'électron  $1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$ .

### II-3- Module Photovoltaïque

Un module photovoltaïque est composé d'une connexion en série et en parallèle de cellules solaires, avec les composants supplémentaires des diodes de blocage et de dérivation. Alors que la fabrication et la taille des cellules solaires varient, une seule cellule a généralement une capacité de traitement de la tension relativement basse de l'ordre de 0,6 V. Afin de conditionner les cellules solaires de manière plus pratique, la plupart des fabricants produisent des modules solaires; un groupe de cellules solaires connectées en série et en parallèle afin d'augmenter la capacité de traitement de la tension et du courant. Bien qu'il existe une variété de schémas de connexion pour une multitude d'applications, un schéma commun pour les modules PHV utilisés dans la production d'énergie liée au réseau est la connexion de 72 cellules en série. Par exemple, le module Shell SQ150-PC ainsi composé fournit une tension et un courant nominaux de 34 V, 4,4 A [14].



**Figure (II-2) : module photovoltaïque**



### II-3-1- Caractéristique de module PV

#### ❖ La tension en circuit ouvert

Si l'on place une photopile sous une source lumineuse constante, sans aucune charge à ses bornes, celle-ci va produire une tension continue d'environ 0,6 V, appelée tension en circuit ouvert  $V_{oc}$  ou à vide (elle varie légèrement avec la température et l'éclairement) [3].

#### ❖ Le courant de court-circuit

A l'inverse du cas précédent, si l'on place une photopile en court-circuit, elle va débiter un Courant maximal à tension nulle. Ce courant est dit courant de court-circuit  $I_{cc}$ . De plus, comme nous l'avons vu au paragraphe précédent, le photo-courant fourni par la cellule est proportionnel à l'intensité lumineuse et à la surface du panneau mis en œuvre, Ainsi, plus ces deux paramètres seront élevés, plus l'intensité produite sera grande [1].

#### ❖ La puissance maximale

L'objectif principal de l'utilisateur de générateur photovoltaïque est que l'énergie produite soit la plus optimale possible, c'est la puissance électrique maximum que peut fournir le module, qui est associé à une tension maximale  $U_m$  et à une intensité maximale  $I_m$ . Lorsqu'il est question de puissance maximale dans les conditions normalisées d'ensoleillement standard STC (25°C et un éclairement de 1000 W/m<sup>2</sup>), on parle alors de puissance, mesurée en watts (W) [3].

#### ❖ Facteur de forme :

Le facteur de forme est défini comme étant le rapport entre une puissance maximale fournie par la cellule et le produit du courant de court circuit par la tension de circuit ouvert, il est donné par :

$$FF = \frac{P_{max}}{V_{oc} * I_{cc}} \quad (II-5)$$

Ce facteur indique la performance du module, plus il s'approche de l'unité plus le module est Performant [16].

#### ❖ Rendement de la cellule

Le rendement correspond au rapport entre la puissance électrique effectivement délivrée par la cellule photovoltaïque et la quantité d'énergie solaire reçue. Le rendement caractérisant le taux de conversion photons-électrons d'un panneau solaire photovoltaïque, noté, est alors défini selon l'équation suivante [16] :

$$\eta = \frac{P_{max}}{S * G} \quad (II-6)$$

la figure (II-3) et la figure (II-4) représente les caractéristiques  $P=f(V)$  et  $I=f(V)$  d'un module photovoltaïque les représentés le point de puissance maximale

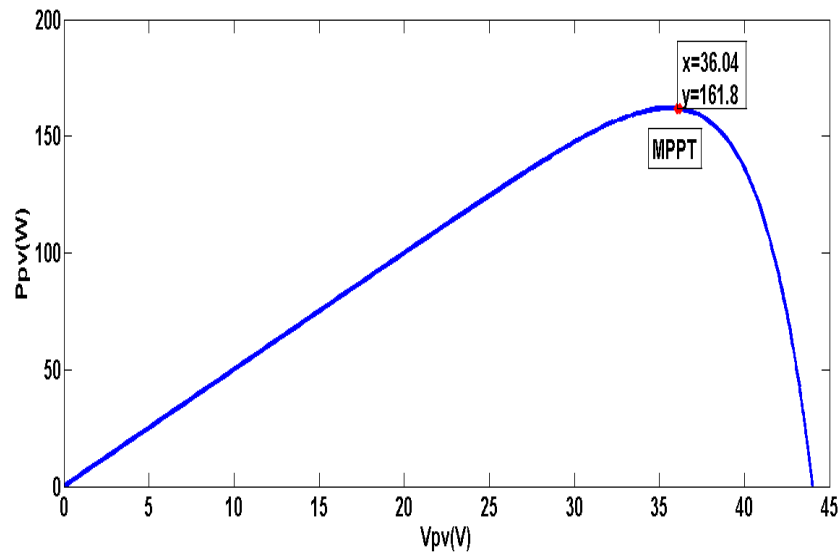


Figure (II-3) : Caractéristique de  $P=f(V)$  d'un module photovoltaïque

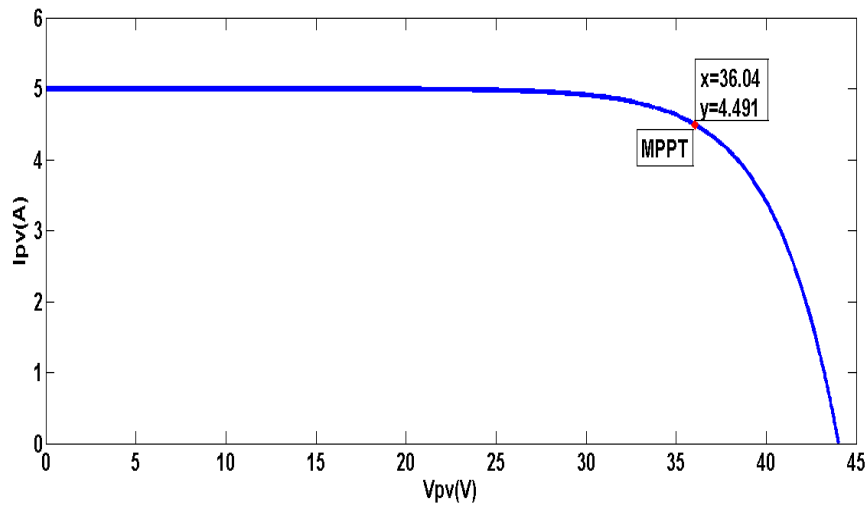


Figure (II-4) : Caractéristique de  $I=f(V)$  d'un module photovoltaïque

### II-4- Générateur Photovoltaïque

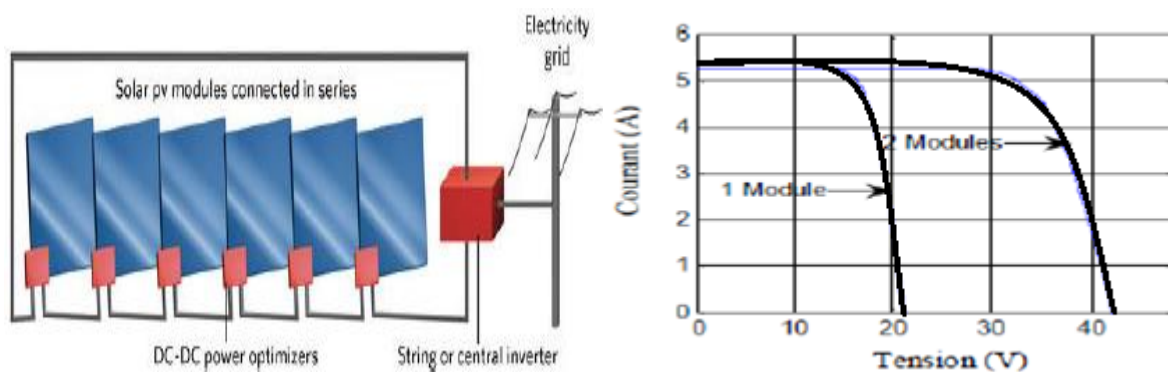
Une matrice est une structure composée d'un certain nombre de modules PV, montés sur le même plan avec des connexions électriques pour fournir suffisamment d'énergie électrique pour une application donnée. La puissance des tableaux varie de quelques centaines à plusieurs centaines de watts. kilowatts. La connexion de modules dans un tableau est similaire à la connexion de cellules dans un seul module. Pour augmenter la tension, les

modules sont connectés en série et pour augmenter le courant, ils sont connectés en parallèle. Le jumelage est encore très important pour la performance globale du tableau. La structure d'un tableau est illustrée à la figure (II-4) [13].



**Figure (II-5) :** Structure d'un générateur photovoltaïque

Pour les modules en série, les courbes  $I - V$  sont simplement ajoutées le long de l'axe de tension; comme le montre la figure (II-6). C'est-à-dire qu'à n'importe quel courant donné (qui traverse chacun des modules), la tension totale est simplement la somme des tensions individuelles des modules [12].



**Figure (II-6) :** modules photovoltaïques connectés en série

Une association parallèle de  $np$  cellules est possible et permet d'accroître le courant de sortie du générateur. Dans le groupement parallèle les cellules sont soumises à la même tension et la caractéristique résultante du groupement est obtenue par addition des courants [15]. comme illustre par la figure (II-7)

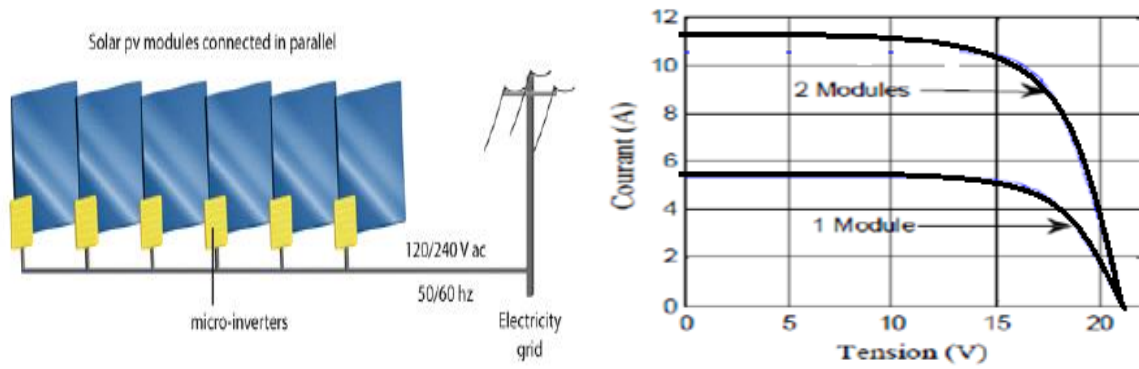


Figure (II-7) : modules photovoltaïques connectés en parallèle

Lorsqu'une puissance élevée est requise, la matrice consiste généralement en une combinaison de modules en série et en parallèle pour lesquels la courbe I-V totale correspond à la somme des courbes I-V de chaque module [12].

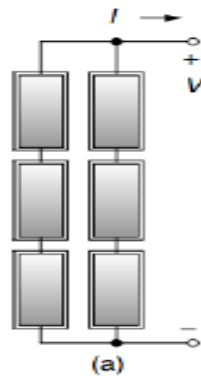


Figure (II-8): Différentes connexions pour le générateur PV série /parallèle

Le modèle mathématique du générateur photovoltaïque est exprimé par [12].

$$I = \left( N_{pp} I_{ph} - N_{pp} I_0 * \left( e^{\left( \frac{v}{N_s} + \frac{I}{N_{pp}} * R_s \right) * \frac{1}{\alpha * V_t * N_s}} - 1 \right) - \frac{V * \frac{N_{ss}}{N_{pp}} - I * R_s}{R_p} \right) \quad (II-7)$$

Où:

$N_{pp}$ : est le numéro du module connecté en parallèle.

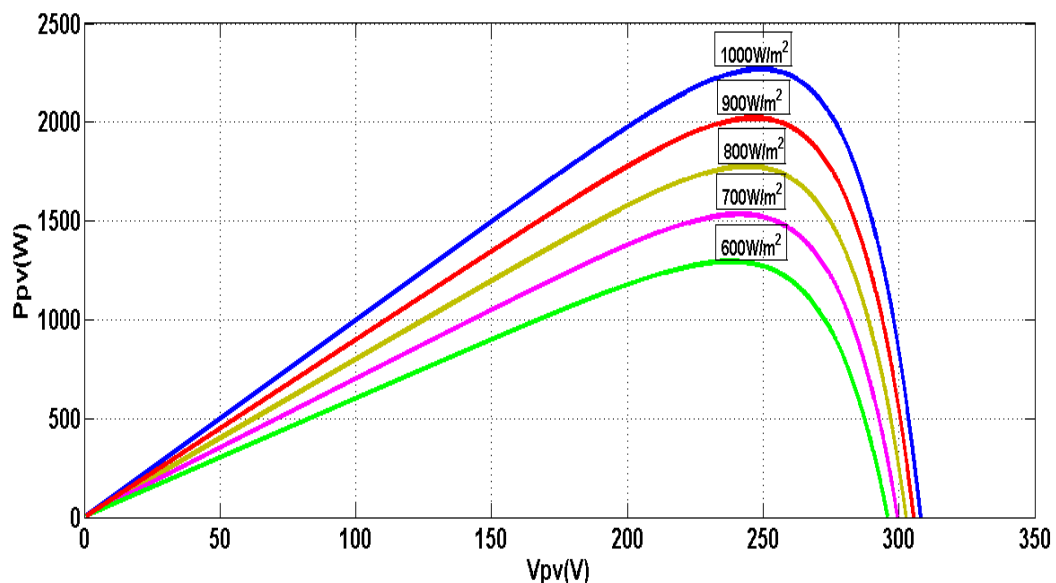
$N_{ss}$ : est le nombre de modules connectés en série.

## II-5- Influence de L'éclairement sur le GPV

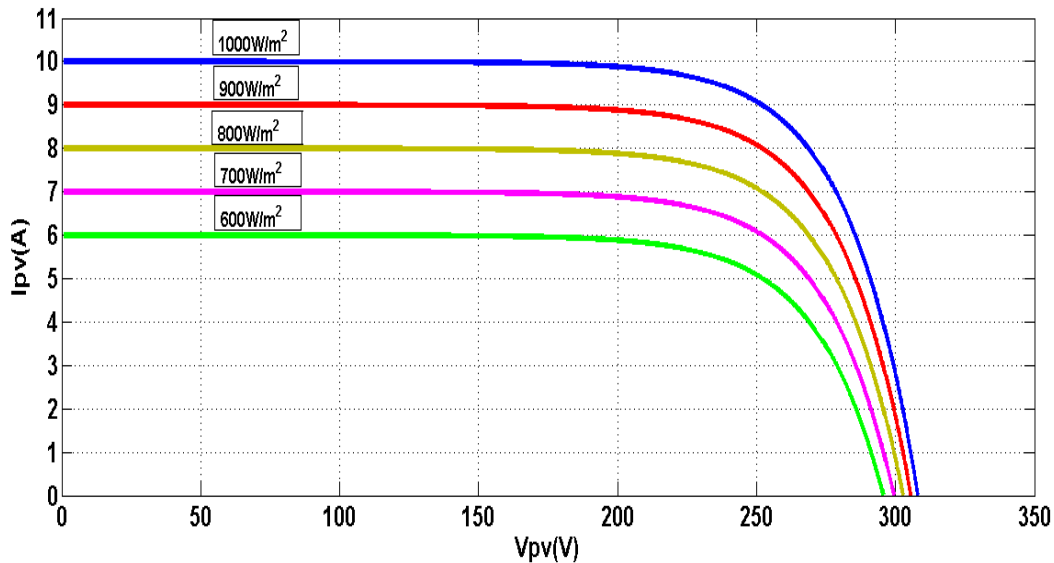
### II-5-1 Influence de L'éclairement

Une baisse de L'éclairement provoque une diminution de la création de paires électron-trou avec un courant à l'obscurité inchangée. Le courant du panneau solaire étant égal à la soustraction du photo-courant et du courant de diode à l'obscurité, il y'a une baisse du courant solaire  $I_{cc}$  proportionnelle à la variation de L'éclairement accompagnée d'une très légère diminution de la tension  $V_{co}$  et donc un décalage du point  $P_{max}$  du générateur photovoltaïque vers les puissances inférieures [4].

Les figures précédant montrent l'influence de l'éclairement sur les caractéristiques courant-tension et puissance-tension. A une température constante Il est clair que la valeur du courant de court-circuit est directement proportionnelle à l'intensité du rayonnement. Par contre, la tension en circuit ouvert ne varie pas dans les mêmes proportions, mais reste quasiment identique même à faible éclairement. Ceci implique que La puissance optimale du GPV ( $P_{max}$ ) est pratiquement proportionnelle à l'éclairement [4].



**Figure (II-9) :** Caractéristique  $P=f(V)$  d'un GPV pour une température constante de 25°C et un l'éclairement variable.



**Figure (II-10) :** Caractéristique  $I=f(V)$  d'un GPV pour une température constante de  $25^{\circ}\text{C}$  et un l'éclairage variable.

## II-6-modélisation d'un GPV soumis à un ombrage

### II-6-1-Description de l'ombrage

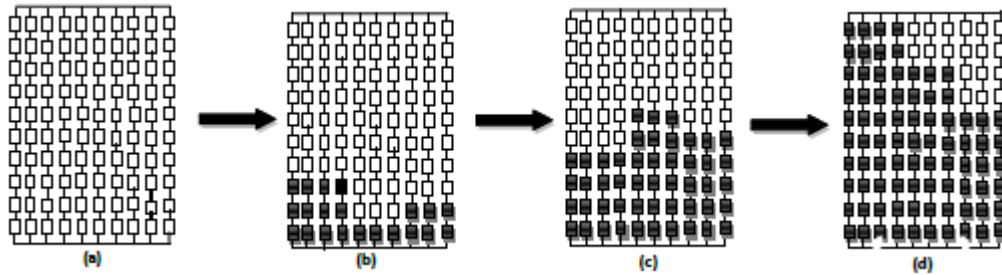
Les modules photovoltaïques sont très sensibles à l'ombrage. Les modules Photovoltaïques ne peuvent être occultés, principalement à cause des connexions Électriques (en série) entre les cellules et entre les modules. On distingue 2 types D'ombrage : l'ombrage total et l'ombrage partiel [7].

- **L'ombrage complet** empêche tout rayonnement (direct et indirect) d'atteindre une Partie de cellule photovoltaïque (Exemples : une déjection d'oiseau, une branche D'arbre sur le panneau, une couverture).
- **L'ombrage partiel** empêche seulement le rayonnement direct d'atteindre une partie de la cellule photovoltaïque (Exemples : une cheminée, un arbre, un nuage).

### II-6-2- Effet d'ombrage partiel

L'ombrage affect principalement la puissance générée par le GPV avec déformation des caractéristiques  $I=f(V)$  et  $P=f(V)$ .

La figure (II-11) représente différents type d'ombrage auxquels peu vent être soumis un GPV

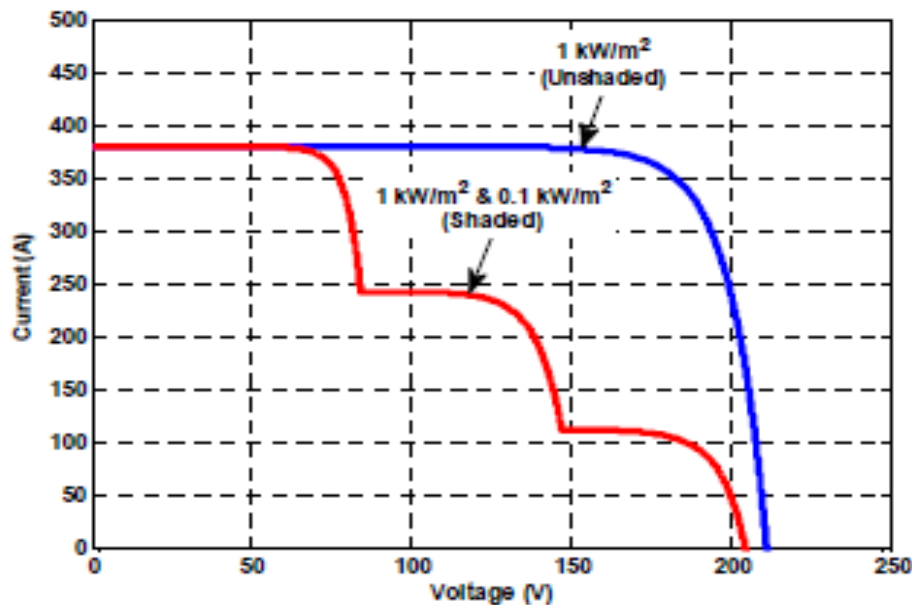


**Figure (II-11) :** Différentes configurations avec:

(a) irradiation uniforme, (b) ombrage léger, (c) ombrage moyen, (d) ombrage sévère

La tension de sortie d'une cellule photovoltaïque est assez faible. Pour augmenter la tension de sortie, une chaîne de cellules photovoltaïques connectées en série est nécessaire. Pendant ce temps, si une partie de la chaîne est ombrée, la tension générée par les cellules ombrées sera inférieure à celle générée par les cellules non ombrées, ce qui entraînera la consommation d'une partie de la puissance générée par les cellules ombragées [12].

La figure (II-12) et la figure (II-13) représente l'allure des caractéristiques  $I=f(V)$  et  $P=f(V)$  d'un GPV soumis à un ombrage partiel. On peut la conséquence d'un tel ombrage est l'apparition de plusieurs extremums sur la courbe.



**Figure (II-12) :** la caractéristique  $I=f(V)$  on ombrage partiel

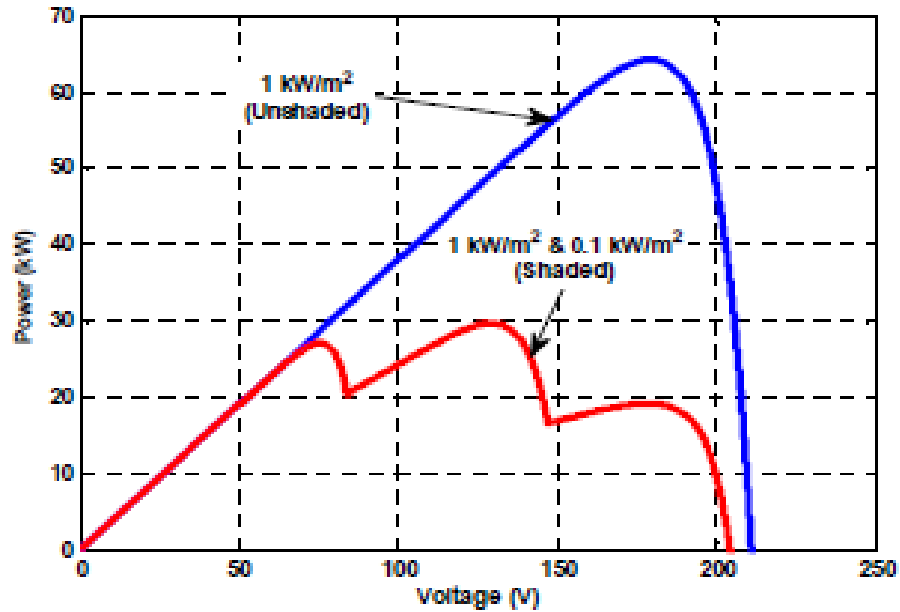


Figure (II-13) : la caractéristique P=f(V) on ombrage partial

Afin de calculer la chute de tension exacte dans un module PV, nous avons considéré ce qui suit:

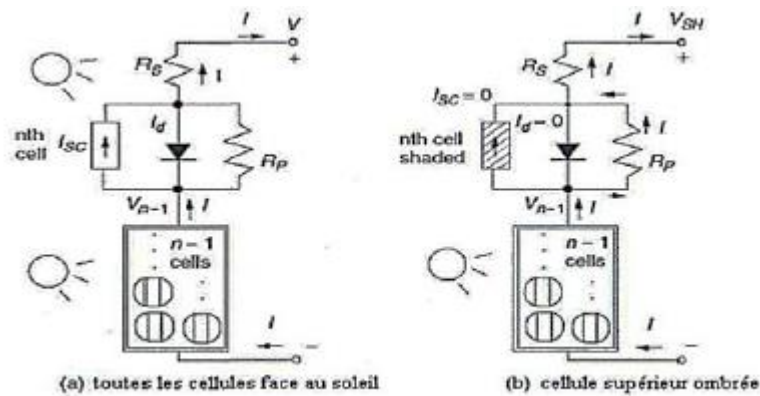


Figure (II-14): Module photovoltaïque avec une cellule touché par l'ombre.

$$V_{sh} = V_{n-1} - (R_p + R_s)I \tag{II-8}$$

Où:  $V_{sh}$  est la tension de la cellule ombrée

Nous pouvons écrire la tension de  $(n-1)$  cellule non ombrée sous la forme:

$$V_{n-1} = \left(\frac{n-1}{n}\right)V \tag{II-9}$$

Où: est le nombre d'éléments et V est la tension de sortie.



En remplaçant (II-9) dans (II-8) on obtient:

$$V_{sh} = \left(\frac{n-1}{n}\right)V - (R_p + R_s)I \quad (II-10)$$

En utilisant l'équation ci-dessus, nous pouvons calculer la chute de tension pour une seule cellule ombrée de la manière suivante:

$$\Delta V = V - V_{sh} = V - \left[\left(\frac{n-1}{n}\right)V - (R_p + R_s)I\right] \quad (II-11)$$

$$\Delta V = \frac{V}{n} + (R_p + R_s)I \quad (II-12)$$

### II-6-3-Protection du PV

Lorsque nous concevons une installation photovoltaïque, nous devons assurer la Protection électrique de l'installation afin d'augmenter sa durée de vie en évitant Notamment des pannes destructrices liées à l'association des cellules et leur fonctionnement en cas d'ombrage. Pour cela, deux types de protections sont classiquement Utilisés dans les installations actuelles [7]:

- la protection lors de la mise en série de modules PV permettant de ne pas perdre la totalité de la chaîne (**diode by-pass**) et éviter les points chauds.
- la protection en cas de connexion en parallèle de modules PV pour éviter les Courants négatifs dans les GPV (**diode anti-retour**).

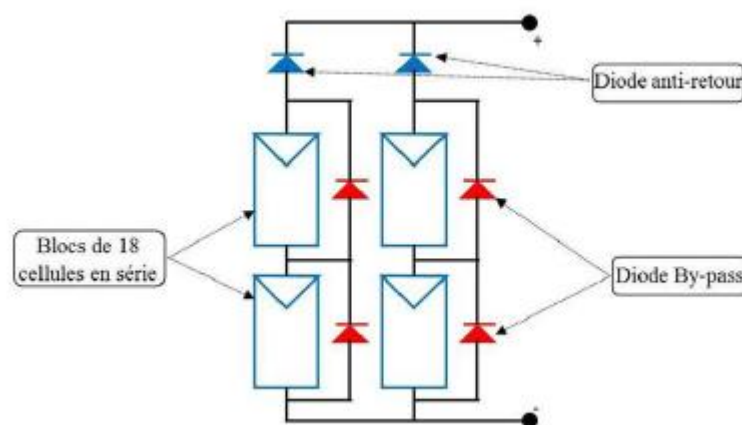


Figure (II-15) : Diodes de protection des modules

II-7-Convertisseur DC/DC (Hacheur)

Les hacheurs sont les convertisseurs statiques -continu- continu qui font transiter L'énergie électrique d'une source continue vers une autre source continue (fournir une tension Continue à la sortie à partir d'une tension continue de l'entrée). La figure suivant montre le Schéma synoptique du hacheur [8].

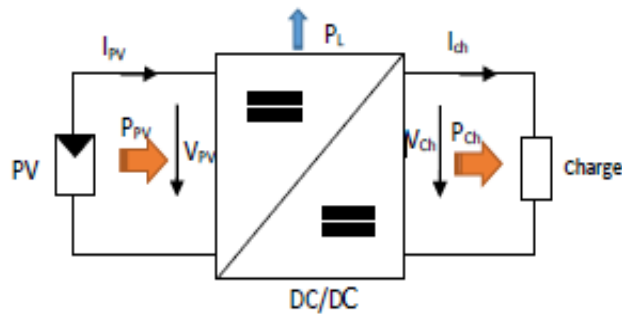


Figure (II-16) : Convertisseur DC/DC

- **Le rapport cyclique  $\alpha$**

Le rapport cyclique est défini comme le temps pendant lequel l'interrupteur est Fermé divisé par la période T de commutation de l'interrupteur du hacheur. Il varie entre 0 et 1. Il s'exprime comme suit [8]:

$$\alpha = \frac{\tau}{T_s} \quad ; \quad \tau = \alpha * T_s \tag{II-13}$$

$\alpha$ : le rapport cyclique

$\tau$  : temps à l'état fermé

$T_s$ : Période

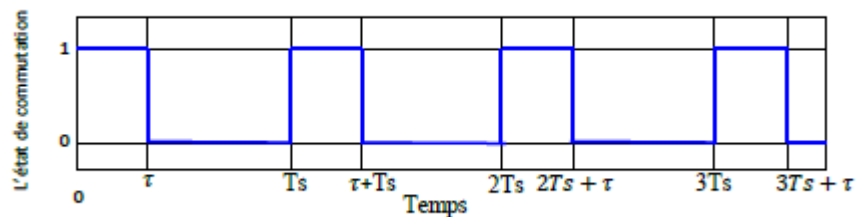


Figure (II-17) : La forme de variation en fonction du rapport cyclique

L'état de commutation: 0 pour l'interrupteur ouvert et 1 pour l'interrupteur fermé

II-7-1-Convertisseur Buck

Le convertisseur Buck est l'un des circuits électroniques de puissance les plus simples et consiste essentiellement en une inductance, un commutateur électronique de puissance (généralement un MOSFET ou un IGBT) et une diode. Il peut avoir un condensateur pour

lisser la sortie. Sa fonction est d'abaisser la tension continue et est illustré à la figure (II-16) [13].

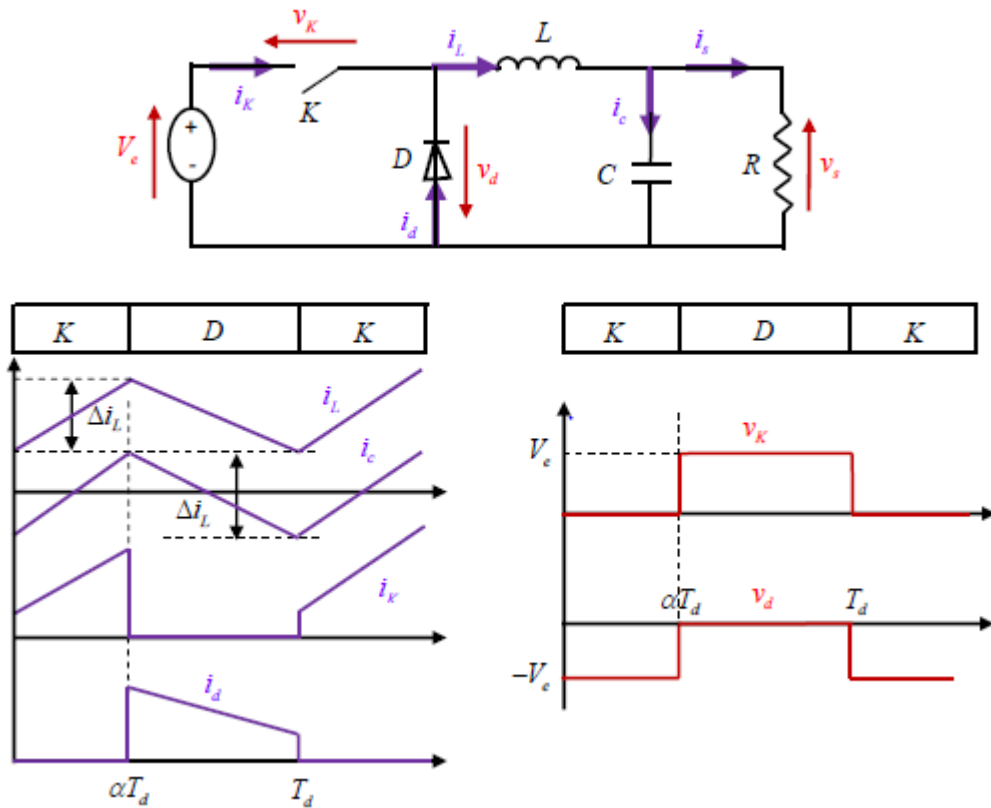


Figure (II-18) : Circuit fonctionnel d'un convertisseur Buck

Le principe de fonctionnement de ce hacheur est divisé en deux états (état de l'interrupteur) passant et bloqué.

Dans l'état passant, l'interrupteur est fermé, la tension aux bornes de l'inductance présentée Dans (II-14) Le courant traversant l'inductance augmente linéairement. La tension aux bornes

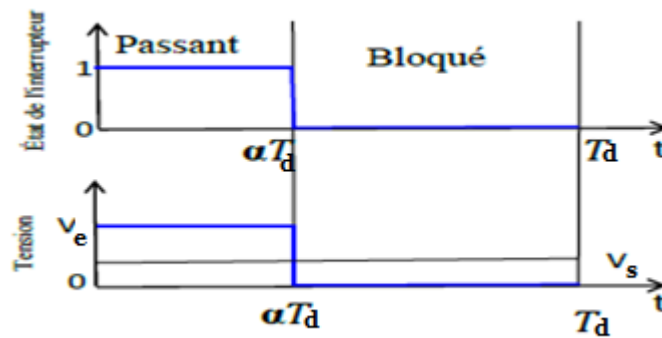
De la diode étant négative, aucun courant ne la traverse [8].

$$V_L = V_e - V_s \tag{II-14}$$

Dans l'état bloqué, l'interrupteur est ouvert. La diode devient passante afin d'assurer la Continuité du courant dans l'inductance. La tension aux bornes de l'inductance présentée dans (II-15). Le courant traversant l'inductance décroît [8].

$$V_L = -V_s \tag{II-15}$$

Les variations de tension présentée dans la Figure (II-17).



**Figure (II-19)** : formes d'ondes courant/tension dans un convertisseur Buck

A partir la Figure (II-17) :  $V_s = V_e$  dans l'état passant, et  $V_s = 0$  dans l'état bloqué

$$V_s = \frac{1}{T} \int_0^{\alpha T_d} V_e dt + \frac{1}{T} \int_{\alpha T_d}^{T_d} 0 dt = \frac{1}{T} V_e (\alpha T_d) \quad ; \quad V_s = \alpha V_e \quad (\text{II-16})$$

### II-7-2-Convertisseur Boost

Le convertisseur Boost est un autre convertisseur électronique de puissance simple et consiste essentiellement en une source de tension, une inductance, un commutateur électronique de puissance (généralement un MOS-FET ou un IGBT) et une diode. Il a généralement aussi un condensateur à filtre pour lisser la sortie. Sa fonction est d'augmenter la tension continue pour l'amener au niveau souhaité, comme le montre la figure (II-18) [13].

$D$  est ouvert ; et quand  $K$  est ouvert,  $D$  est fermé. Durant chaque période,  $K$  est fermé de l'instant 0 à  $\alpha T$  et ouvert de  $\alpha T$  à  $T$ . 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 (II-19) 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) [3].

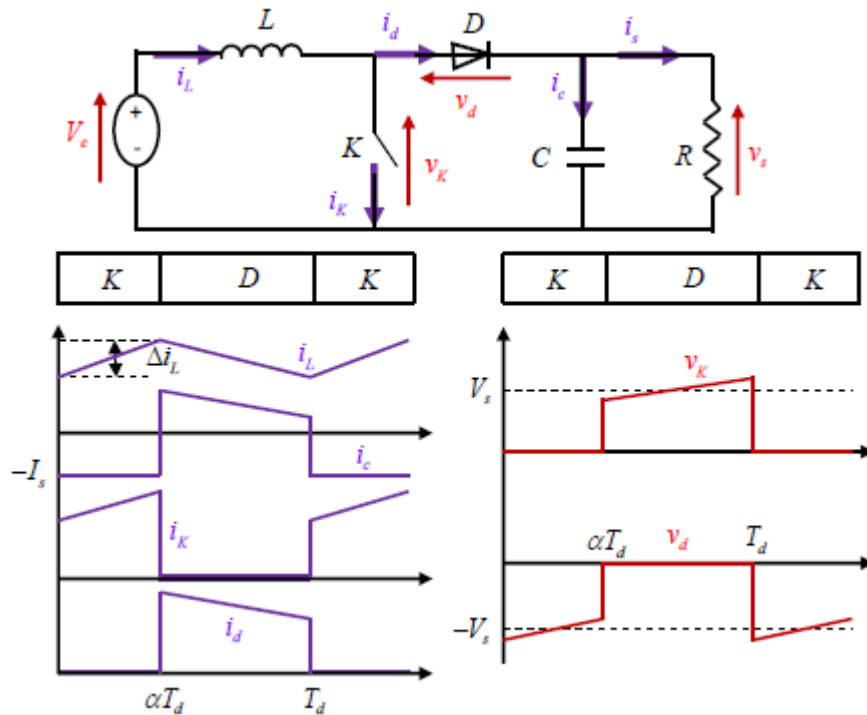
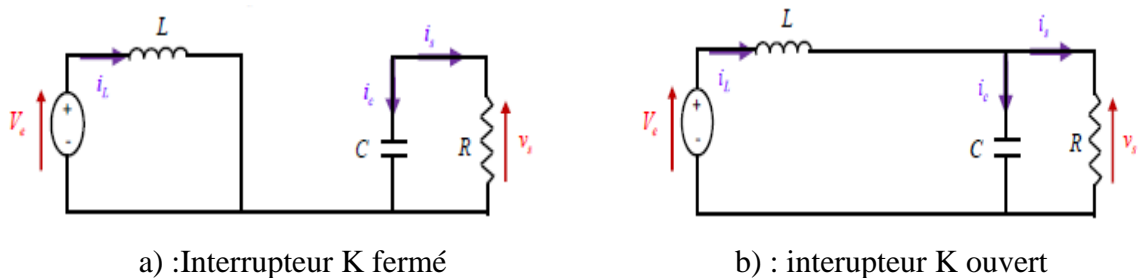


Figure (II-20) : Circuit fonctionnel d'un convertisseur Boost

Le modèle mathématique équivalent d'un convertisseur Boost : Lorsque l'interrupteur  $K$  est fermé ( $0 < t < \alpha T_d$ ), et l'interrupteur  $K$  est ouvert ( $\alpha T_d < t < T_d$ ), le circuit du convertisseur devient figure (II-19) [3].



a) :Interrupteur K fermé

b) : interrupteur K ouvert

Figure (II-21) : Circuit équivalent du Boost quand l'interrupteur

$$L \frac{di_L}{dt} = V_e \tag{II-17}$$

$$i_L = I_{min} + \frac{V_e}{L} t \tag{II-18}$$

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

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

$$I_{max} = I_{min} + \frac{V_e}{L} \alpha T_d \tag{II-19}$$

Lorsque l'interrupteur  $K$  est ouvert ( $\alpha T_d < t < T_d$ ), le circuit du convertisseur sera comme montré dans la Figure (II-19) (b)

$$L \frac{di_L}{dt} = V_e - V_s \quad (\text{II-20})$$

$$i_L = I_{max} + \frac{V_e - V_s}{L} (t - \alpha T_d) \quad (\text{II-21})$$

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

$$I_{max} + \frac{V_e - V_s}{L} (1 - \alpha) T_d \quad (\text{II-22})$$

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 (II-19) et (II-22), on peut déduire la valeur moyenne de la tension de sortie  $V_s$  [3]:

$$V_s = \frac{1}{1 - \alpha} V_e \quad (\text{II-23})$$

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 [3].

### **II-8-Conclusion**

Nous avons dans ce chapitre présenté la modélisation des les cellules PV et modèle PV et générateur PV avec et sans ombrage Influence de L'éclairement sur le GPV. Ensuite, nous avons étudié l'effluence des différents paramètres exogènes tel que la température et l'éclairement sur ces modèles .nous avons modèles aussi le convertisseur DC-DC associe au system photovoltaïque .dans le chapitre suivant une désorption des approches de commande des systèmes PV soumis à un ombrage partiel serer détaillée.

---

# **Chapitre III : Approche de commande adoptée**

**III-1-Introduction**

L'obtention automatique de la puissance maximale d'un module solaire ou, en d'autres termes, pour que le système fonctionne avec une efficacité maximale, dépend des algorithmes de commande basée sur le principe de le poursuit du point de puissance maximale dit MPPT (maximale point puissance tracking). Ces algorithmes prennent en compte la variation de l'irradiation et de la température dans le temps ainsi que l'impédance de charge. Ces facteurs affectent le MPP et se reflètent donc dans la quantité d'électricité produite. La méthode MPPT varie dans de nombreux aspects, notamment la complexité, le coût, la dépendance du capteur, la vitesse de convergence, le matériel de mise en œuvre, la compensation de capacité, la plage d'efficacité, la capacité de popularité d'échapper aux optima locaux et à leurs applications [18].

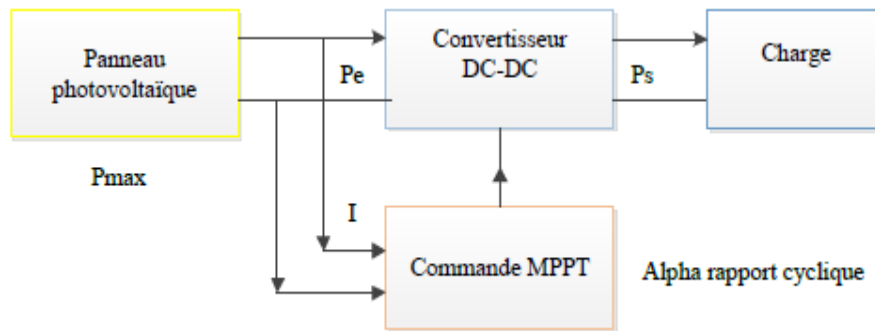
Il existe différents types d'algorithmes MPPT utilisés dans le but d'améliorer l'efficacité des panneaux solaires, mais les plus connus sont les perturbations et observations (P & O), la conductance incrémentale (IC), la tension de circuit ouvert, le contrôle de réseau V, le réseau de neurones, contrôle de la logique floue et plusieurs autres méthodes MPPT [18]. Toute fois beaucoup d'entre eux s'avèrent défaillants en cas d'ombrage partiel à cause de la présence de pluvieux optimums sur la combe caractéristiques. D'autres méthodes sont plus performants en cas d'ombrage comme ESC (extremum seeking control) on contrôle par recherche d'extremum. Dans ce chapitre nous exposons les algorithmes MPPT les plus populaires et la méthode proposé (ESC).

**III-2-Principe de MPPT**

Par définition, une commande MPPT, associée à un étage intermédiaire d'adaptation, permet de faire fonctionner un générateur PV de façon à produire en permanence le maximum de sa puissance. Ainsi, quels que soient les conditions météorologiques (température et l'éclairement), la commande du convertisseur place le système au point de fonctionnement maximum ( $V_{mpp}$ ,  $I_{mpp}$ ). [10]

L'adaptation d'impédance est souvent sous forme d'un convertisseur DC – DC comme Représenté sur la figure (III-1)





**Figure (III-1) :** Chaîne de conversion d'énergie solaire comprenant une commande MPPT.

### III-3-Types d'algorithme de MPPT

Il existe plusieurs méthodes d'algorithme MPPT, mais les algorithmes les plus utilisés et très connus dans le monde sont :

- algorithmes Perturber et Observer (P & O).
- algorithmes de la conductance incrémentale (INC).
- algorithmes Tension constante (CV : constant Voltage).
- algorithmes courant constante (CC : Constant Current).
- -algorithmes Capacité Parasite (PC : Parasite Capacitance).

Dans notre étude, on présente le fondement théorique de l'une de ces méthodes : Perturber et observer (P&O) [8].

### III-4-Technique de commande de MPPT de GPV

#### III-4-1-Méthode de perturber et d'observer (P&O)

La méthode P & O est l'une des méthodes MPPT les plus largement utilisées en raison de sa simplicité et de sa facilité de mise en œuvre. Elle agit en créant une perturbation de la tension continue terminale du générateur photovoltaïque et en observant les conséquences sur la puissance de sortie de celui-ci. Si la puissance augmente avec la perturbation incrémentielle, elle continue à faire la perturbation dans le même sens, sinon elle est inversée. En cas d'augmentation de puissance avec perturbation incrémentielle, le point de fonctionnement serait sur le côté gauche du point de puissance maximale, si une perturbation incrémentielle entraîne une diminution de la puissance, cela indique que le MPP a été traversé et que le point de fonctionnement se trouve quelque part sur le côté droit du MPP. Dans ce cas, il inverse sa

perturbation et commence à produire une perturbation préjudiciable de la tension du générateur PV afin de suivre le point de puissance maximale. Une fois que le MPP est atteint, Le point de fonctionnement serait au point de puissance maximale, comme indiqué dans la figure (III-2) [19].

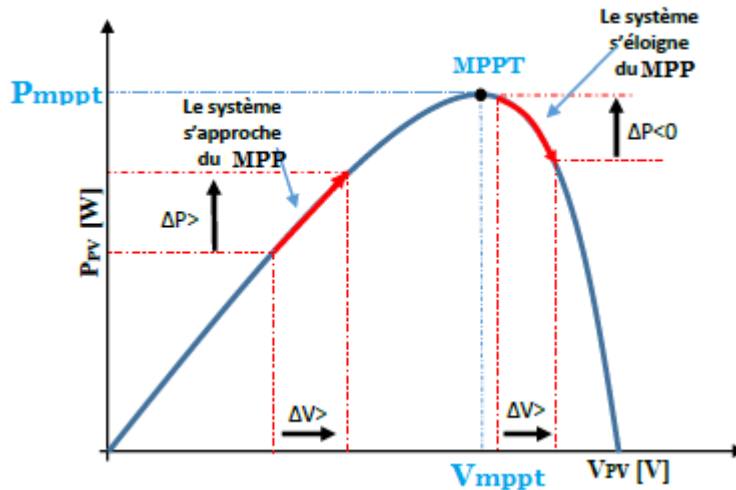


Figure (III-2) : caractéristique de puissance dans la P&O

Cas	dP	dV	Action
1	$P(k) > P(k-1)$	$V(k) > V(k-1)$	++
2	$P(k) > P(k-1)$	$V(k) < V(k-1)$	--
3	$P(k) < P(k-1)$	$V(k) > V(k-1)$	--
4	$P(k) < P(k-1)$	$V(k) < V(k-1)$	++

Tableau (III-1) : Résumé du fonctionnement de l’algorithme P&O

Le changement d’un point « k » à un point suivant « k+1 » se fait avec un pas Constante (méthode déterministe).

La Figure (III.3) représente l’organigramme de l’algorithme de la méthode P&O :

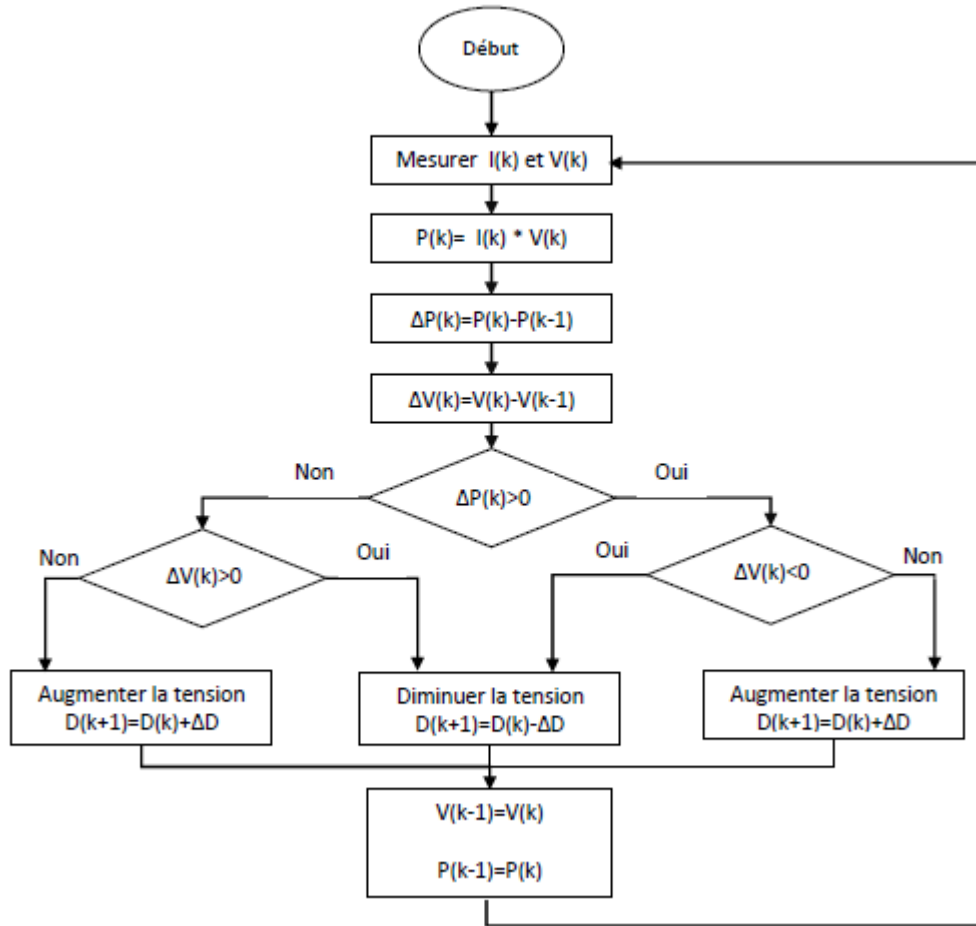


Figure (III-3) : Organigramme de la méthode P&O

Cette opération peut être synthétisée à l'aide du logiciel MATLAB-SIMULINK par la conception suivante :

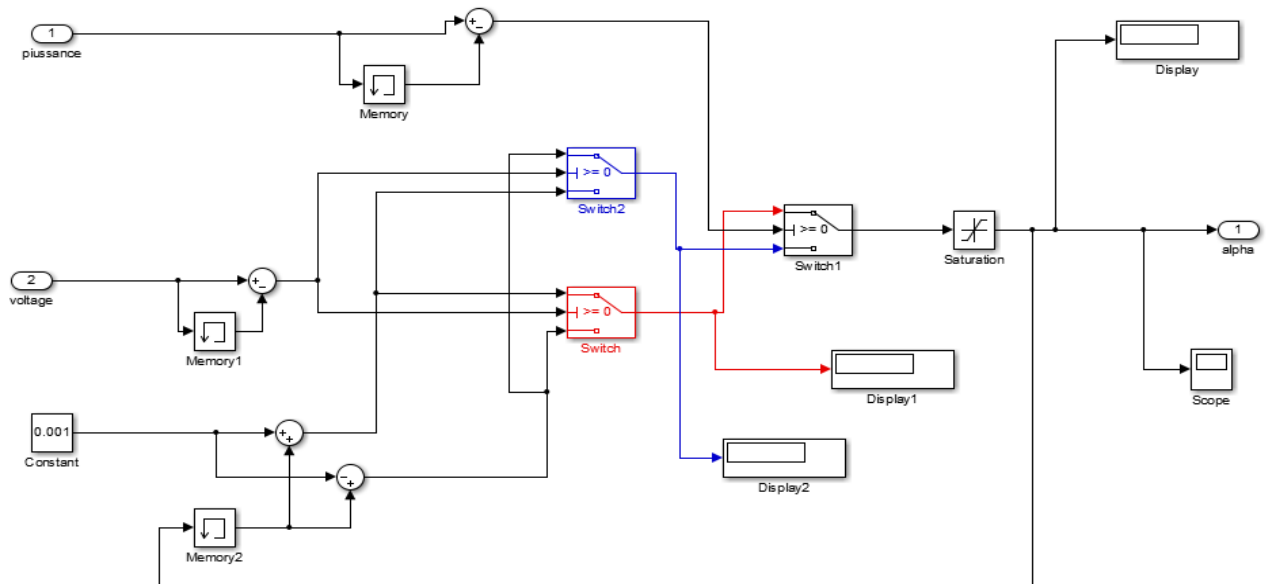


Figure (III-4) : Schéma de la commande MPPT P&O en MATLAB-SIMULINK

III-4-2-Méthode d'Incrémentale Conductance

La méthode de la conductance incrémentielle est basée sur le fait que la somme de la conductance instantanée ( $dI / dV$ ) et de la conductance incrémentielle est nulle en MPP. Parce que c'est négatif du côté droit du député et positif du côté gauche du député. Cette relation découle du fait que la pente de la courbe de puissance du générateur photovoltaïque est nulle au MPP, positive à gauche du MPP et négative à la droite. La figure (III-5) montre la pente de la courbe de puissance du réseau P-V. Ainsi, la conductance incrémentielle peut déterminer que le MPPT a atteint le MPP et cesser de perturber le point de fonctionnement du générateur photovoltaïque. Si cette condition n'est pas remplie, la relation dans laquelle le point de fonctionnement MPPT doit être perturbé peut être calculée [18].

$$P = V * I \tag{III-1}$$

D'ou en écrivant la dérivée

$$\begin{cases} \frac{dp}{dV} = V \frac{dI}{dV} + I \frac{dV}{dV} \\ \frac{dp}{dV} = V \frac{dI}{dV} + I \\ \frac{dp}{dV} \cong V \frac{\Delta I}{\Delta V} + I \end{cases} \tag{III-2}$$

Donc

$$\begin{cases} \frac{dP}{dV} = 0 \\ \frac{dP}{dV} > 0 \\ \frac{dP}{dV} < 0 \end{cases} \quad \text{Ou} \quad \begin{cases} \frac{\Delta I}{\Delta V} = -\frac{I}{V} & \text{(a) Au point MPP} \\ \frac{\Delta I}{\Delta V} > -\frac{I}{V} & \text{(b) A gauche du MPP} \\ \frac{\Delta I}{\Delta V} < -\frac{I}{V} & \text{(c) A droite du MPP} \end{cases} \tag{III-3}$$

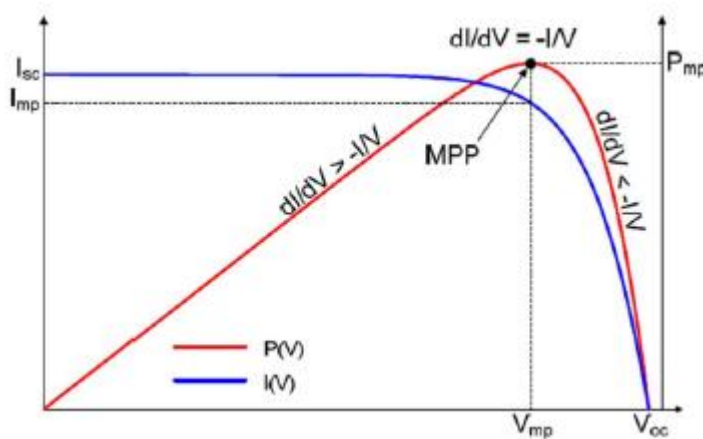


Figure (III-5) : Incrémentale Conductance (IncCond)

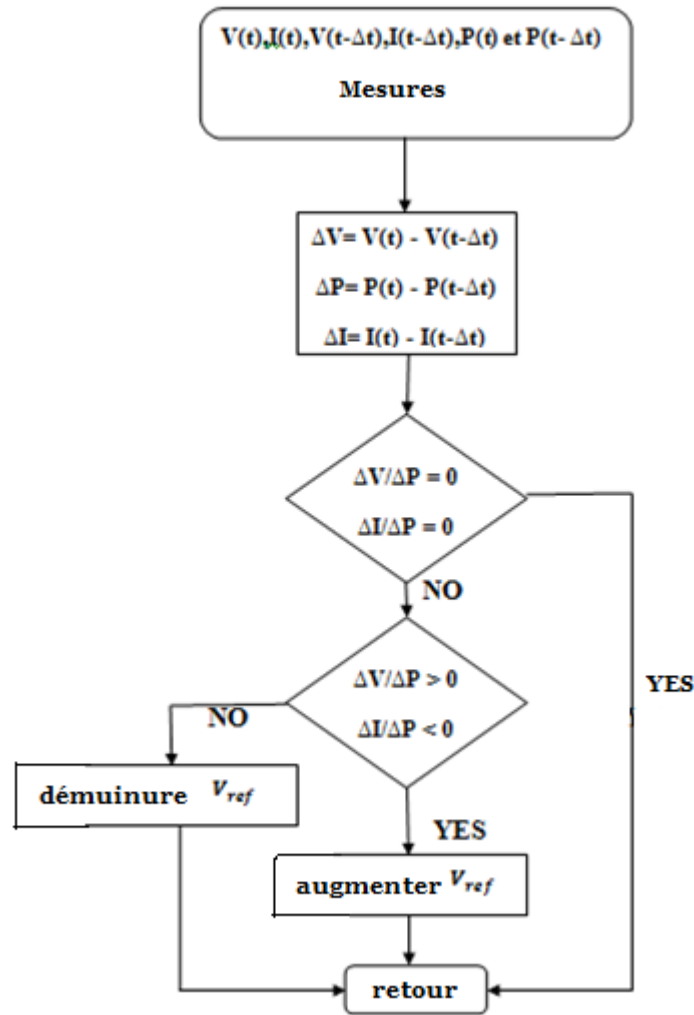


Figure (III-6) : Organigramme d'un algorithme de conductance incrémentielle

### III-4-3-Méthode La Tension de circuit ouvert fractionnaire (Voc)

La relation entre le  $V_{mpp}$  et les  $V_{oc}$  du générateur photovoltaïque, à des températures variables, a donné naissance à la méthode des  $V_{oc}$  fractionnaires. On observe

$$V_{mpp} \approx K_1 * V_{oc} \tag{III-4}$$

Que où  $K_1$  est une constante qui dépend des caractéristiques du panneau photovoltaïque. Cette technique de contrôle nécessite la mesure du  $V_{oc}$  et du  $V_{mpp}$  à différents niveaux d'irradiance et de température pour la détermination de la constante. Généralement, cette valeur est comprise entre 0,71 et 0,78. Avec la valeur déterminée de la constante, la tension au point de puissance maximale est facilement déterminée à partir de (III-4). Pour résoudre les problèmes liés à la déconnexion constante des bornes de sortie PV afin de prendre des mesures de  $V_{oc}$ , des cellules pilotes exposées aux mêmes conditions environnementales sont utilisées [20].

III-4-4-Méthode La court-circuit fractionné Courant de circuit (Isc)

L' $I_{sc}$  fractionnaire résulte du fait que, dans différentes conditions d'insolation,  $I_{mpp}$  est approximativement linéairement corrélé à  $I_{sc}$  du générateur photovoltaïque et est donné par

$$I_{mpp} \approx K_2 * I_{sc} \tag{III-5}$$

Où  $K_2$  est une constante de proportionnalité et  $I_{mpp}$  est le courant du panneau au niveau de MPP. Tout comme la technique des  $V_{oc}$  fractionnaires,  $K_2$  doit être déterminé en fonction du générateur PV utilisé. La constante  $K_2$  s'avère généralement comprise entre 0,78 et 0,92. Un commutateur supplémentaire est généralement ajouté à la PCU pour mettre périodiquement le champ PV pour mesurer  $I_{sc}$  [21].

III-4-5-Méthode logique floue

L'utilisation de la logique floue est devenue populaire au cours de la dernière décennie car elle permet de traiter des entrées imprécises, ne nécessite pas de modèle mathématique précis et peut gérer la non-linéarité. Les microcontrôleurs ont également contribué à la vulgarisation de la technologie de commande logique floue [22].

La logique floue comprend trois étapes: la fuzzification, le système d'inférence et la défuzzification. La fuzzification comprend le processus de transformation d'entrées numériques précises en variables linguistiques basées sur le degré d'appartenance à certains ensembles. Les fonctions d'appartenance, comme celles de la figure (III-7), permettent d'associer une note à chaque terme linguistique. Le nombre de fonctions d'appartenance utilisées dépend de la précision du contrôleur, mais il varie généralement entre 5 et 7 [22].

Dans la figure (III-7) sept niveaux flous sont utilisés: NB (Négative Big), NM (Négative Medium), NS (Négative Small), ZE (Zéro), PS (Positive Small), PM (Positive Medium) et PB (Positive Big). Il existe des commandes qui ajoutent aux valeurs précédentes deux autres valeurs qui sont : NM (Négative Means) et PM (Positive Means) [22].

Dans certains cas, les fonctions d'appartenance sont choisies moins symétriques, voire optimisées pour l'application pour une meilleure précision [22][23].

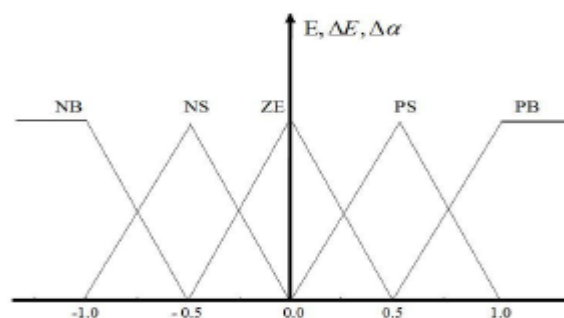
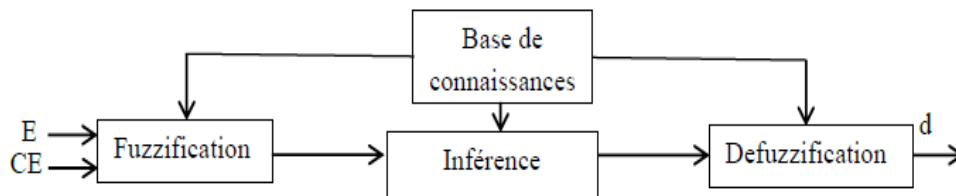


Figure (III-7) : Fonctions d'adhésion.

En général la présentation de la logique floue est adoptée en trois parties qui sont La Fuzzification qui permet de passer de variables réelles à des variables floues, le cœur du Régulateur représenté par les règles reliant les entrées et sorties, et enfin l'inférence et la Défuzzification qui permettent à partir des ensembles flous d'entrée de déterminer la valeur Réelle de sortie [8].

La figure suivante représente le schéma synoptique de base de l'algorithme flou



**Figure (III-8) :** Schéma bloc de l'algorithme à base de la logique floue

- **La fuzzification**

La fuzzification permet de rendre flou les variables d'entrée. Une étape préliminaire Consiste à définir un intervalle de variation maximale autorisée pour les variables d'entrées. Le but de la fuzzification est de transformer les variables d'entrée en variables linguistiques ou variables floues [24].

Généralement on utilise à deux variables d'entrées qui sont l'erreur E(k) et la variation d'erreur CE(k) à l'instant k qui sont définis comme suit [8]:

$$E(k) = \frac{P_{pv}(k) - P_{pv}(k-1)}{V_{pv}(k) - V_{pv}(k-1)} \tag{III-6}$$

$$CE(k) = E(k) - E(k-1) \tag{III-7}$$

- **L'inférence**

La stratégie de réglage dépend des inférences adoptées. Elles lient les variables D'entrée à une variable de sortie. Cette étape consiste à définir un rapport logique entre les Entrées et la sortie ( $\alpha$ ) [8].

Les règles d'inférence utilisée dans le cas de la logique floue sont illustrées dans le Tableau (III-2)

<b>CE</b>	<b>NB</b>	<b>NS</b>	<b>ZE</b>	<b>PS</b>	<b>PB</b>
<b>E</b>					
<b>NB</b>	<b>ZE</b>	<b>ZE</b>	<b>NB</b>	<b>NB</b>	<b>NB</b>
<b>NS</b>	<b>ZE</b>	<b>ZE</b>	<b>NS</b>	<b>NS</b>	<b>NS</b>
<b>ZE</b>	<b>NS</b>	<b>ZE</b>	<b>ZE</b>	<b>ZE</b>	<b>PS</b>
<b>PS</b>	<b>PS</b>	<b>PS</b>	<b>PS</b>	<b>ZE</b>	<b>ZE</b>
<b>PB</b>	<b>PB</b>	<b>PB</b>	<b>PB</b>	<b>ZE</b>	<b>ZE</b>

Tableau (III-2) : Tableau de réglage flou

- **La défuzzification**

La défuzzification est la réalisation de l’opération inverse de la fuzzification, c’est de Calculer une valeur numérique compréhensible par l’environnement extérieur à partir d’une Définition floue et c’est le but de la défuzzification [24]

### III-5-Technique de commande du GPV en cas d’ombrage partiel

#### III-5-1-Méthode de contrôle par recherche d’extremum (ESC)

##### III-5-1-1-Principe de la méthode (ESC)

Développé au 20ème siècle, l’ESC est une approche de contrôle adaptatif qui atteint la cible de contrôle via des signaux filtrés et conducteurs contenant des informations incertaines ou inconnues à certains égards. Un des principaux avantages de l’ESC est qu’il n’exige pas de modèle de système et qu’il est capable d’améliorer ses performances. Les applications de l’ESC peuvent être trouvées dans des problèmes de contrôle non linéaire, et des localisations locales non linéaires minimum et maximum. Il peut exister des extremums locaux pour une courbe caractéristique P-V à la sortie non linéaire dans le cas d’une cellule solaire ombrée [25].

Comme illustré à la figure (III-9), un schéma fonctionnel du système est composé d’un intégrateur, d’un différentiateur, d’un circuit logique et d’un amplificateur. ESC est ensuite appliqué pour suivre le MPP, c’est-à-dire pour localiser le point de puissance maximale sur une courbe y par rapport à x et surmonter le problème de maximum local. Il ressort de la figure (III-9) que [25]:

$$\frac{dx}{dt} = k \varepsilon \tag{III-8}$$

Où  $\varepsilon = \pm 1$  et K est une constante positive

$$g = \frac{dy}{dt} \tag{III-9}$$



Dans le cas où  $g < 0$ , le signal  $\varepsilon$  est modifié alors qu'il reste inchangé pour  $g > 0$ . Le système ESC de la figure (III-9) est représenté par l'équation ci-dessus et le circuit logique sert à déterminer s'il est nécessaire de modifier  $\varepsilon$  [25].

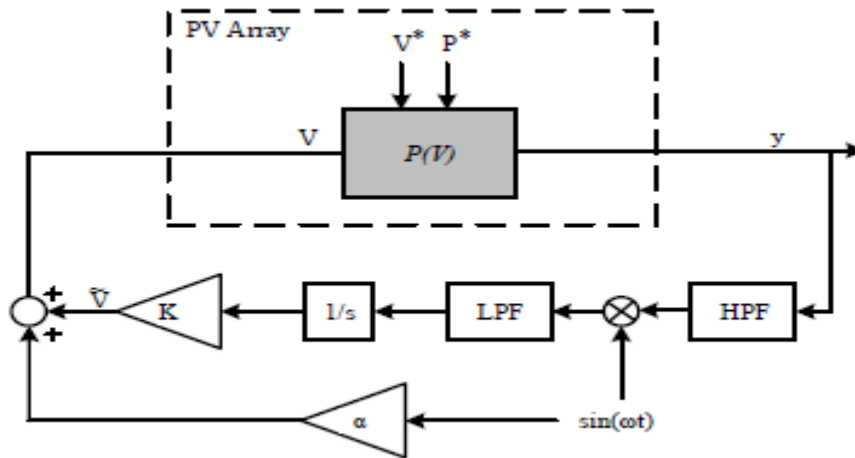


Figure (III-9): Un schéma de principe d'un système de contrôle ESC.

La figure (III-10) indique les variations de  $\frac{dx}{dt}$  et  $\frac{dy}{dt}$  des quatre points a, b, c, d :

$$a : \left(\frac{dx}{dt}\right)\Big|_{t=t^-} > 0, \left(\frac{dy}{dt}\right)\Big|_{t=t^-} > 0 \Rightarrow \left(\frac{dx}{dt}\right)\Big|_{t=t^+} = k$$

$$b : \left(\frac{dx}{dt}\right)\Big|_{t=t^-} > 0, \left(\frac{dy}{dt}\right)\Big|_{t=t^-} < 0 \Rightarrow \left(\frac{dx}{dt}\right)\Big|_{t=t^+} = -k$$

$$c : \left(\frac{dx}{dt}\right)\Big|_{t=t^-} < 0, \left(\frac{dy}{dt}\right)\Big|_{t=t^-} > 0 \Rightarrow \left(\frac{dx}{dt}\right)\Big|_{t=t^+} = -k$$

$$d : \left(\frac{dx}{dt}\right)\Big|_{t=t^-} < 0, \left(\frac{dy}{dt}\right)\Big|_{t=t^-} < 0 \Rightarrow \left(\frac{dx}{dt}\right)\Big|_{t=t^+} = k$$

Où

$$\left(\frac{dy}{dx}\right) = \left(\frac{dy}{dt}\right) / \left(\frac{dx}{dt}\right) \tag{III-10}$$

Les quatre cas ci-dessus peuvent être exprimés comme suit:

$$\text{Si } \left(\frac{dy}{dx}\right)\Big|_{t=t^-} > 0 \text{ puis } \left(\frac{dx}{dt}\right)\Big|_{t=t^+} = k \tag{III-11}$$

$$\text{Si } \left(\frac{dy}{dx}\right)\Big|_{t=t^-} < 0 \text{ puis } \left(\frac{dx}{dt}\right)\Big|_{t=t^+} = -k \tag{III-12}$$

À partir des équations ci-dessus, on peut obtenir que:

$$\frac{dx}{dt} = k * \text{sign}\left(\frac{dy}{dx}\right) \tag{III-13}$$

La figure (III-10) présente une courbe de sortie d'une cellule solaire avec les quatre points a, b, c, d, dans laquelle la mesure de l'algorithme est déterminée par  $dx/dt$ , tandis que la dynamique est par  $dy/dx$ . C'est noté d'après l'équation (III-13), le point d'équilibre  $\frac{dy}{dx} = 0$

correspond au point extrême de la courbe y par rapport à x sur la figure (III-9), et la dynamique du système dépend de la pente de cette courbe. Afin de prouver la stabilité à un tel point d'équilibre, une fonction de Lyapunov est sélectionnée comme suit [25]:

$$V_{Ly}(t) = \frac{1}{2} \left(\frac{dy}{dx}\right)^2 \tag{III-14}$$

Le premier dérivé de l'équation (III-14) donne:

$$V_{Ly}(t) = \frac{dy}{dx} \frac{d^2y}{dx} \frac{dy}{dt} = \frac{dy}{dx} \frac{d^2y}{dx} (k * \text{sign}\left(\frac{dy}{dx}\right)) \tag{III-15}$$

La figure (III-10) montre que:

$$\frac{d^2y}{dx} < 0 \tag{III-16}$$

$$\frac{dy}{dx} \text{sign}\left(\frac{dy}{dx}\right) > 0 \tag{III-17}$$

Par conséquent, un choix de K positif vérifie  $V_{Ly}(t) < 0$ , c'est-à-dire une stabilité validée

Par rapport aux approches conventionnelles MPPT, l'adoption de l'ESC permet une réponse plus sûre en cas de présence de plus d'un seul extremum [25].

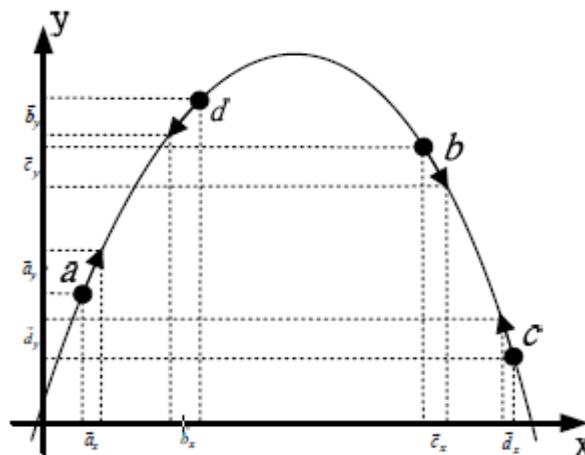


Figure (III-10) : Illustration de la dynamique de l'ESC.

### III-5-1-2- Conception du Contrôleur ESC sous SUMILINK

Comme illustré à la figure (III-11) ; le principe d'un contrôleur ECS utilise un filtre passe haut ; un filtre passe bas ; un intégrateur et générateur d'un signal sinusoïdal.

Le signal d'entrée utilise une onde sinusoïdale de perturbation qui pénètre d'une manière additive dans le système. La sortie mesurée Ppv est ensuite passée à travers un filtre passe-haut et multipliée par le même signal de perturbation générant une estimation de la dérivée à l'entrée de l'intégrateur. Le filtre passe-bas (LPF) utilisé après le bloc de démodulation n'est pas nécessaire, mais il est utile pour filtrer l'effet du signal de perturbation sinusoïdale [26].

La conception des paramètres ESC est généralement un processus de réglage plutôt qu'une conception analytique puisque la fonction objectif non linéaire est inconnue. Différents facteurs doivent être pris en compte dans le processus de réglage, tels que la vitesse requise du contrôleur de vitesse, la dynamique du système et la sensibilité au bruit [27].

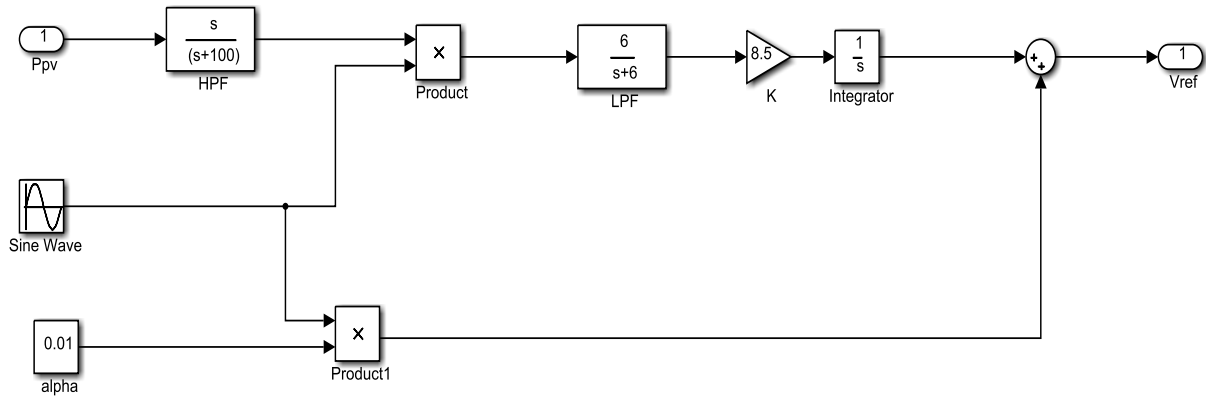


Figure (III-11) : Un schéma de SUMILINK d'un système ESC sinusoïdal

Le tableau suivant résume les paramètres du contrôleur ESC

Gain du intégrateur K	8.5
Gain du filter basse haut $w_H$ (rad/s)	100
Gain du filter basse bas $w_L$ (rad/s)	6
La plusation de signal de pertubation sinusoïdal $w_p$ (rad/s)	100
Amplitude de pertubation sinusoïdal	1
Gain du signal de pertubation alsinuisoid(alpha)	0.01

Tableau (III-3) : Les paramètres du contrôleur ESC

La figure III.13 représente le modèle Simulink du contrôleur ESC associé au GPV.

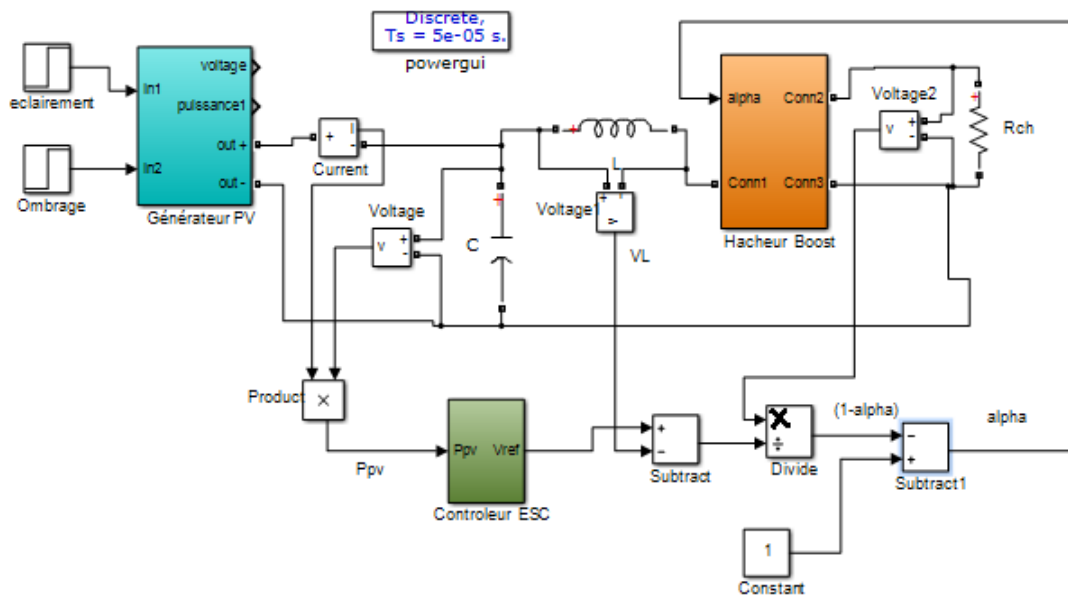


Figure (III-12) : Schéma de modèle SUMILINK du contrôleur ESC associé au GPV.

### III-6-Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les différentes techniques MPPT pour la commande de système photovoltaïque de plus nous avons présenté la méthode ESC (extremum seeking control) utilisée en cas d'ombrage partiel. Les résultats comparatifs de cette méthode avec une méthode conventionnelle (P & O) seront présentés dans le chapitre suivant.

---

# **Chapitre IV : Résultat de Simulation**

### IV-1-Introduction

Pour valider nos méthodes de régulation (Perturbe & Observe) et (ESC), nous choisissons des charges résistives qui simulent un éclairage domestique. La variation de ces charges est considérée comme des perturbations pour le GPV. L'éclairage est aussi une source de perturbation pour le GPV causée par l'intensité de l'éclairage variable durant la journée ou par ombrage partiel ou total [8].

Nous présentons dans ce chapitre l'application deux méthodes (perturbe & observe) et (ESC) dans pour deux cas sans ombrage et avec ombrage. Dans le cas sans ombrage on applique trois essais :

- Variation de l'éclairage avec charge constant
- Variation de la charge avec éclairage constant
- Variation de l'éclairage avec variation de charge

Dans le cas d'ombrage on applique les deux méthodes pour comparer les résultats. Les caractéristiques électriques de notre générateur photovoltaïque sont données dans le tableau suivant :

Eclairage standard (G)	1000W/ m <sup>2</sup>
Température standard (T)	25°C
Tension optimale (V <sub>op</sub> )	36 V
Courant optimal (I <sub>opt</sub> )	4,5 A
Tension à circuit ouvert (V <sub>co</sub> )	44 V
Courant de court-circuit (I <sub>cc</sub> )	5 A
Nombre des modules en séries	7
Nombre des modules en parallèle	2

**Tableau (IV-1) :** caractéristiques électriques de notre GPV

La figure (IV-1) représente le modèle simulation des générateur photovoltaïque

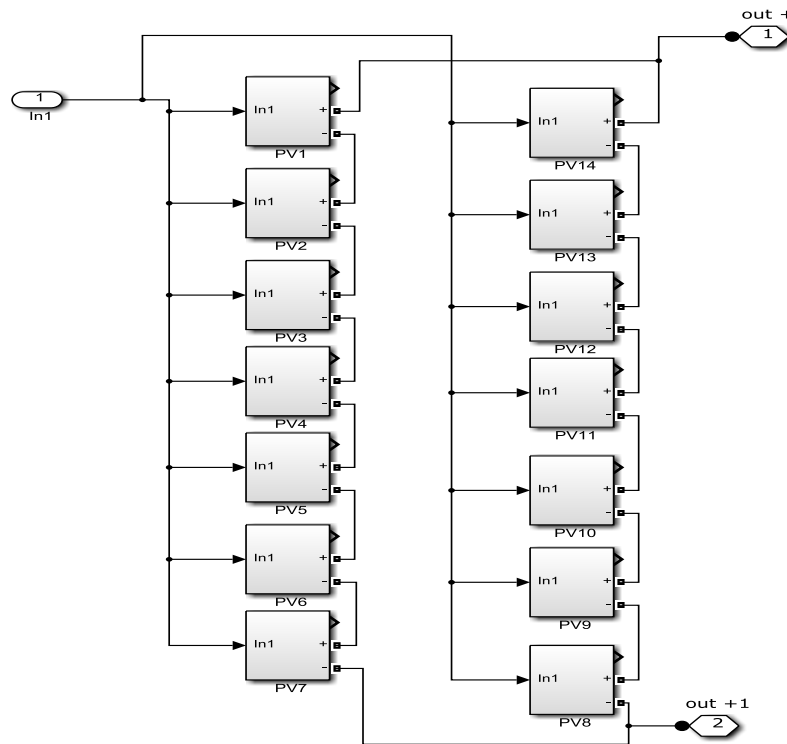


Figure (IV-1) : schéma de générateur photovoltaïque

IV-2-Résultata de simulation

La figure (IV-2) ci-après montre la caractéristique (I-V) de notre GPV

Le poit optimale represente la courbe corresponsed aux valeurs  $I_{op}=9A$  et  $V_{op}=252V$

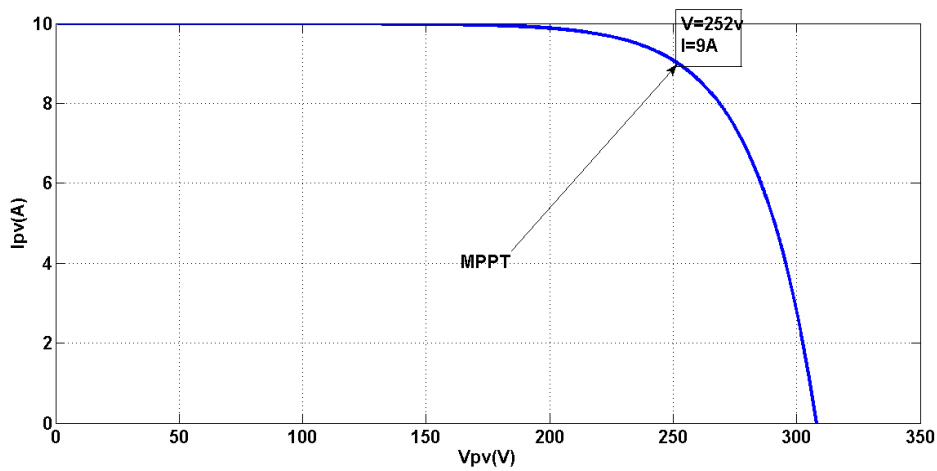


Figure (IV-2) : caractéristique  $I_{pv}=f(V_{pv})$  présente le point de puissance maximal MPPT

La figure (IV-3) représente la caractéristique (P-V) de GPV

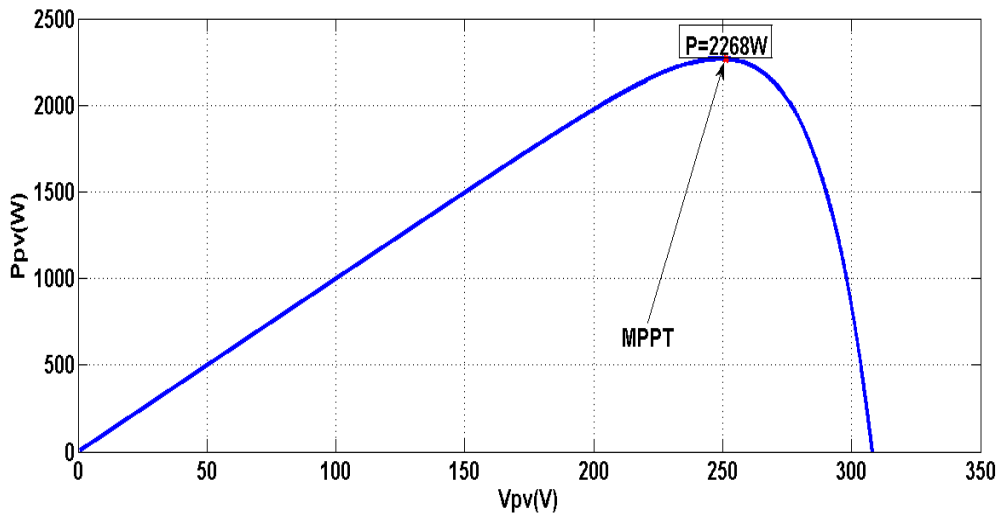


Figure (IV-3) : caractéristique  $P_{pv}=f(V_{pv})$  présente le point de puissance maximal MPPT

### IV-3-Régulation avec la commande MPPT (P&O) sans ombrage

#### IV-3-1-Variation d'éclairiments et charge constante

Nous considérons pour ce résultat de simulation une variation de l'éclairement de (1000 à 800W/m<sup>2</sup>) pour une charge constante de 15 Ω.

Nous constatons dans la figure (IV-4) que la variation de la puissance en fonction de temps est proportionnelle à l'éclairement. Pour un éclairement de 1000 W/m<sup>2</sup> la puissance produite vaut la puissance maximale (2170W), après la première perturbation à l'instant  $t=5s$  l'éclairement passe à la valeur de 800W/m<sup>2</sup> et la puissance produite vaut Aussi la puissance maximale de cet éclairement (1690W).

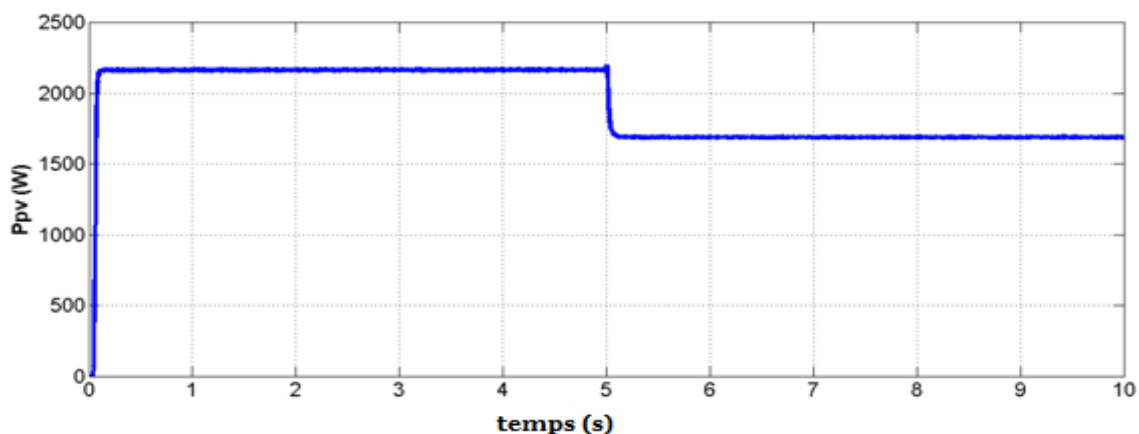


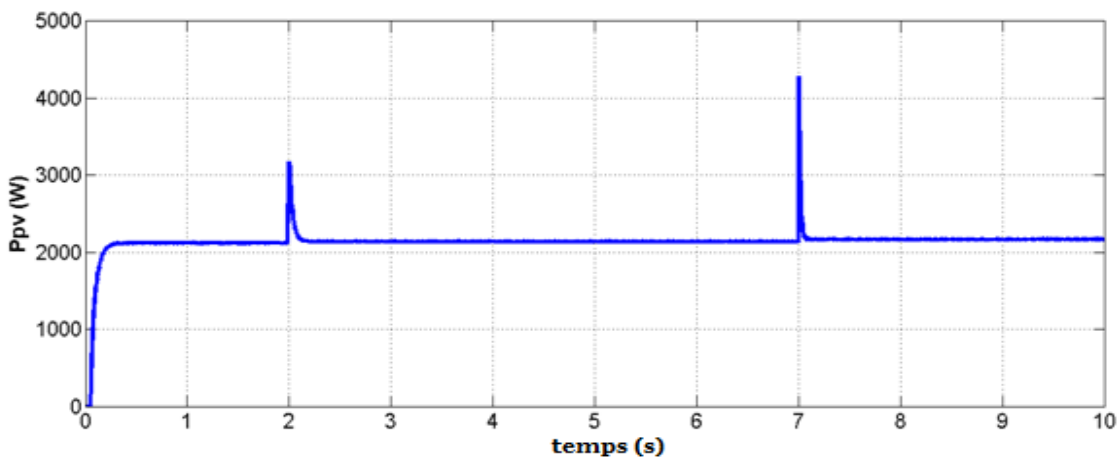
Figure (IV-4) : Allure de la puissance face à une variation d'éclairement par MPPT P&O pour une charge constante  $R = 15\Omega$ .



IV-3-2-Variation de charge  $45\Omega$  et  $30\Omega$  et  $15\Omega$  et éclairage constante

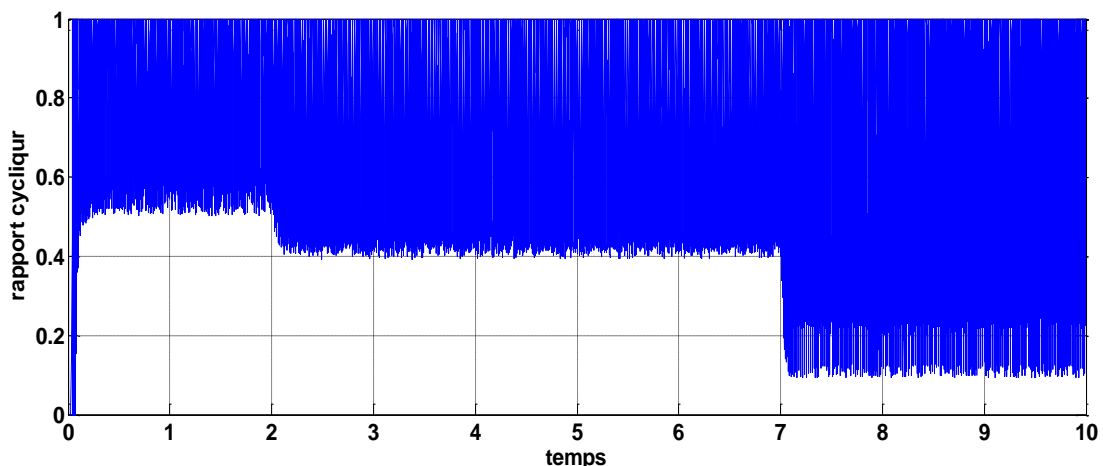
Dans la deuxième étape, afin de vérifier le comportement du système face à une Variation de charge, nous changeons cette dernière de  $45\Omega$  à  $30\Omega$  à l'instante  $t=2s$  et de  $30\Omega$  à  $15\Omega$  à l'instant  $t=7s$ .

En gardant l'éclairage constant ( $1000 \text{ W/ m}^2$ ). Les Résultats de la simulation sont présentés par la figure (IV-5). La variation de la charge provoque Un dépassement instantané de la puissance maximale. Mais avec un retour rapide à la Puissance maximal grâce au système de régulation basé sur l'algorithme MPPT (P&O).



**Figure (IV-5) :** Allure de la puissance face à une variation de charge par MPPT P&O Pour un éclairage constante  $G = 1000 \text{ W/ m}^2$ .

La figure (IV-6) représente la courbe de rapport cyclique qui commande le convertisseur boost, on remarque qu'il varie aux instants de perturbation  $t=2s$  et l'instant  $t=7s$ .

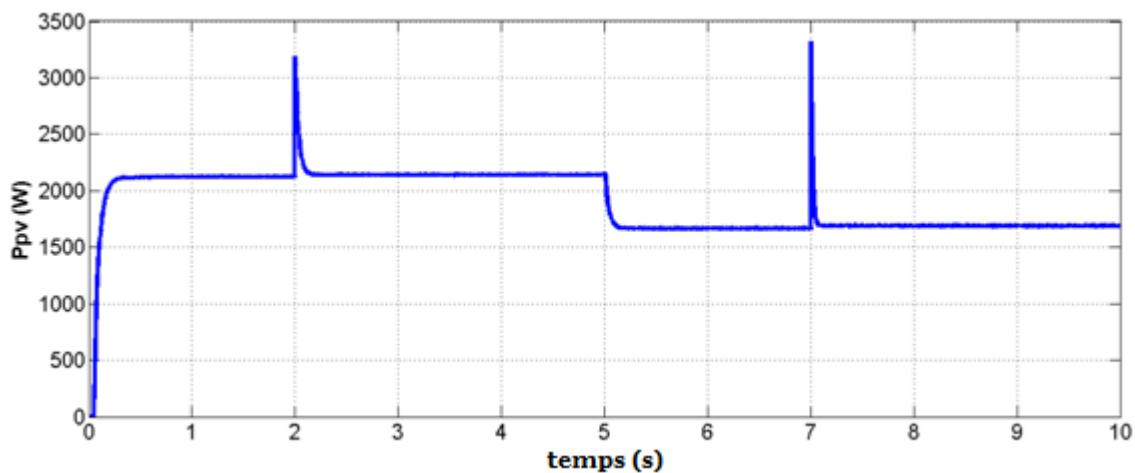


**Figure (IV-6) :** la courbe de rapport cyclique on commode le convertisseur boost par méthode P et O

### IV-3-3-Variation d'éclairement et variation de charge

Dans cette essai nous essayons vérifier le comportement du système face aux deux perturbations (éclairement et variation des charges), où nous avons changé la charge de  $45\Omega$  à  $30\Omega$  à l'instant  $t=2s$  et de  $30\Omega$  à  $15\Omega$  à l'instant  $t=7s$ , entre les deux Instantes ( $t=5s$ ) nous changeons l'éclairement de  $1000$  à  $800W/m^2$  (voir la figure (IV-7)).

Le résultat obtenu montre que durant l'éclairement  $1000W/m^2$  la puissance reste Maintenu à sa valeur maximale ( $2170W$ ) malgré la variation de la charge de  $45\Omega$  à  $30\Omega$ , et durant l'éclairement  $800$  la puissance aussi maximale de ce éclairement ( $1690W/m^2$ ) reste maintenue Malgré la variation de la charge de  $30\Omega$  à  $15\Omega$ .



**Figure (IV-7) :** Allure de la puissance face à une variation d'éclairement par MPPT P&O pour une charge variable.

## IV-4-Régulation avec la commande MPPT par méthode ESC sans ombrage

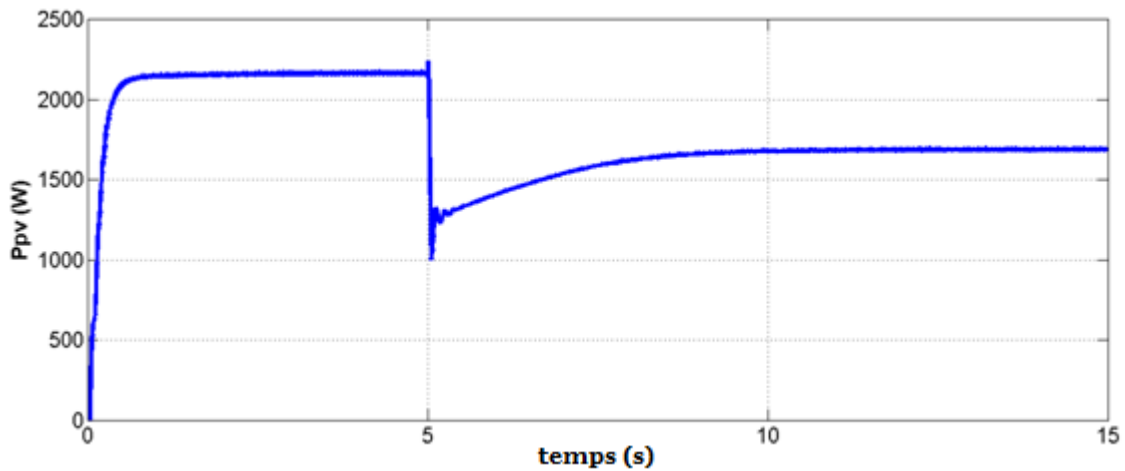
### IV-4-1-Variation d'éclairements et charge constante

Pour ce résultat de simulation on considère une variation de l'éclairement ( $1000$  à  $800W/m^2$ ) pour une charge constante de  $15\Omega$ .

Premièrement, nous avons soumis le système à un éclairement de  $1000 W/m^2$  durant à l'instant  $t=5s$ , puis on change l'éclairement à  $800 W/m^2$  le résultat obtenu dans la figure (IV-8) montre la variation de la puissance est proportionnelle à l'éclairement.

Pour Un éclairement de  $1000 W/m^2$  la puissance produite vaut la puissance maximale ( $2170W$ ), Après la première perturbation à l'instant  $t=5s$  on remarque que la puissance chuté

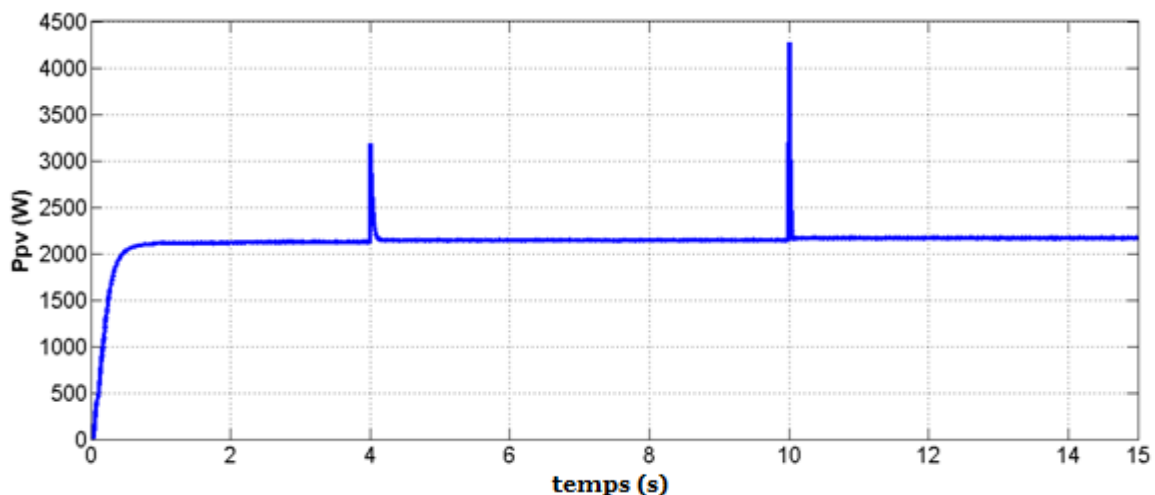
à la valeur (1000W) et mais revente a sa valeur optimale de 1670 W, Il est remarquable au le temps de réponse est un peu l'eut.



**Figure (IV-8) :** Allure de la puissance face à une variation d'éclairement par MPPT par méthode ESC pour une charge constante  $R = 15\Omega$ .

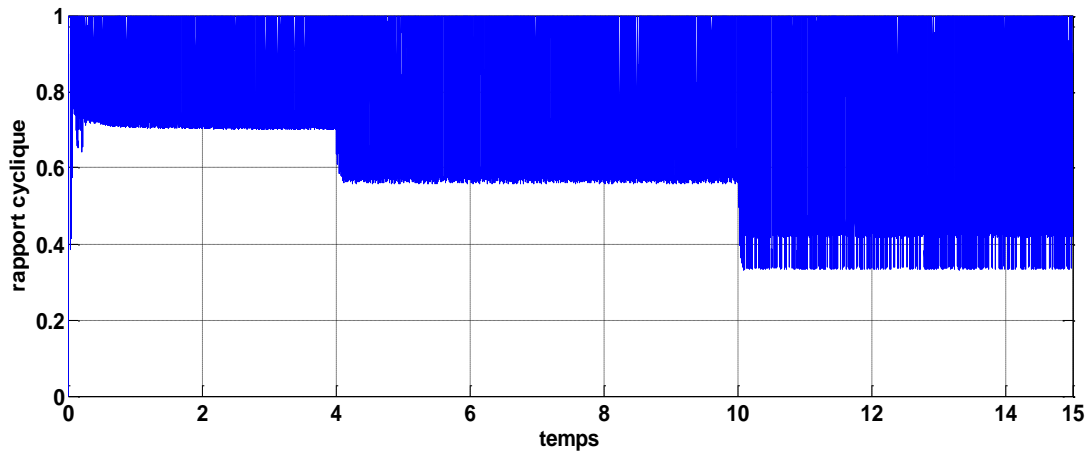
**IV-4-2-Variation de charge 45Ω et 30Ω et 15Ω et éclairement constante**

Deuxièmement, nous vérifions le comportement du système avec à une variation de Charge, nous changeons cette dernière de 45Ω à 30Ω à l'instante  $t=4s$  et de 30Ω à 15Ω à L'instant  $t=10s$ . Nous gardons l'éclairement constant (1000 W/ m<sup>2</sup>). Les résultats de la Simulation sont présentés dans la figure (IV-9). La variation de la charge provoque un dépassement instantané mais la puissance reste toujours à sa valeur maximale.



**Figure (IV-9) :** Allure de la puissance face à une variation de charge par MPPT par méthode de ESC pour un éclairement constante  $G = 1000 \text{ W/ m}^2$ .

La figure (IV-10) représente la courbe de rapport cyclique qui commande le convertisseur boost, on remarque qu'il varie aux instants de perturbation  $t=4s$  et l'instant  $t=10s$ .

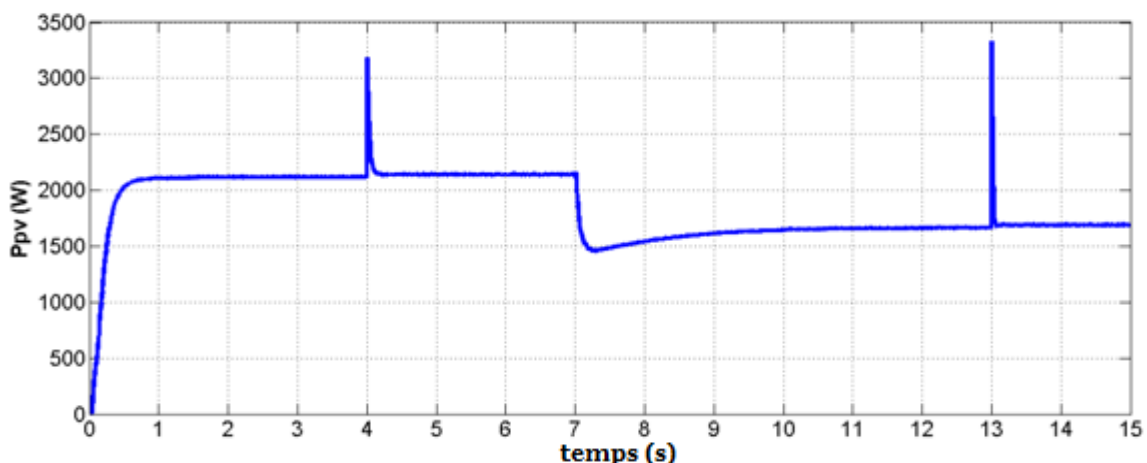


**Figure (IV-10) :** la courbe de rapport cyclique on commode le convertisseur boost par méthode ESC

#### IV-4-3-Variation d'éclairiments et variation de charge

Comme le cas précédent, dans cet essai nous essayons de vérifier le comportement du système face aux deux perturbations (éclairage et variation des charges), Où nous avons changé la charge de  $45\Omega$  à  $30\Omega$  à l'instant  $t=4s$  et de  $30\Omega$  à  $15\Omega$  à l'instant  $t=13s$ , entre les deux instantes ( $t=7s$ ) nous changeons l'éclairiment de  $1000$  à  $800W/m^2$ , (voir la figure (IV-11)).

Nous remarquons que la puissance a chuté à la valeur ( $1500W$ ) et augmente, et s'est stabilisé entre ( $t=10s$  et  $t=15s$ ), Le résultat obtenu montre que durant l'éclairiment  $1000W/m^2$  à  $800W/m^2$  la puissance reste maintenue a sa valeur maximale ( $2170$  à  $1690 W$ ) malgré la variation de la charge de  $45$  à  $30\Omega$  et de  $30$  à  $15\Omega$ .



**Figure (IV-11) :** Allure de la puissance face à une variation d'éclairiment par MPPT par méthode ESC pour une charge variable.

IV-5-Régulation avec ombrage partiel

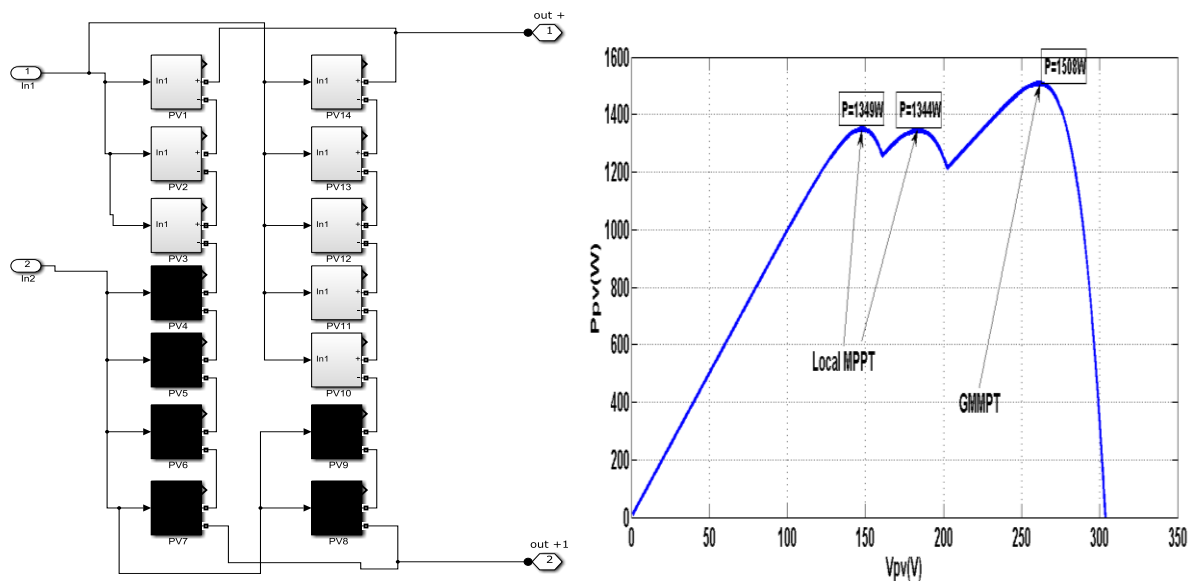
Pour démontrer la fiabilité de la méthode (P&O et ESC) en cas d’ombrage partiel nous allons considérer trois scenarios d’ombrages :

- Scenario 1 : ombrage sévère
- Scenario 2 : ombrage modère
- Scenario 3 : ombrage faible

IV-5-1-Scenario 1 sévère :

Dans le scenario six modules sont soumis à un éclairage de  $600\text{W}/\text{m}^2$  alors que les autres sont exposés à un éclairage de  $1000\text{W}/\text{m}^2$ .

La figure (IV-12) (a-b) représente le schéma simulation de l’ombrage du scenario 1 et la caractéristique (P-V) correspondant à cet ombrage. On remarque l’application sur la courbe (P-V) trois extremums (deux extremums locaux (1349W et 1344W) un extremum globale d’une valeur de 1508W).



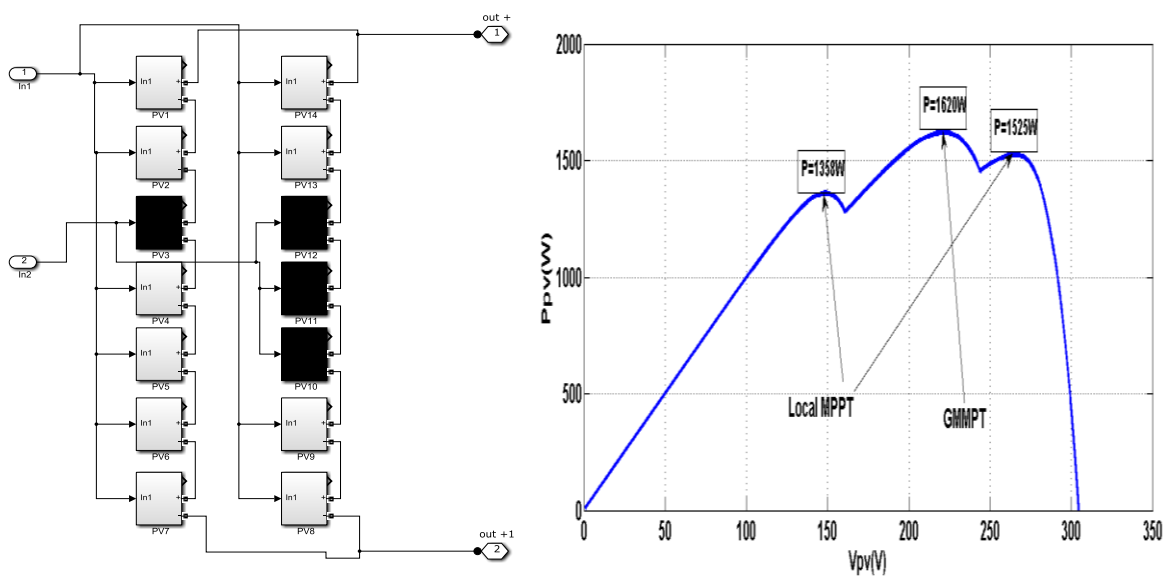
a -Schéma simulation d’ombrage (S1)      b -caractéristique (P-V) d’ombrage (S1)

Figure (IV-12) : résultat d’ombrage partiel de scenario 1

IV-5-2-Scenario 2 modéré :

Dans le scenario quatre modules sont soumis à un éclairement de  $600\text{W/m}^2$  alors que les autres sont exposés à un éclairement de  $1000\text{W/m}^2$ .

La figure (IV-13) (a-b) représente le schéma simulation de l'ombrage du scenario 1 et la caractéristique (P-V) correspondant à cet ombrage. On remarque l'application sur la courbe (P-V) trois extremums (deux extremums locaux ( $1358\text{W}$  et  $1525\text{W}$ ) un extremum globale d'une valeur de  $1620\text{W}$ ).



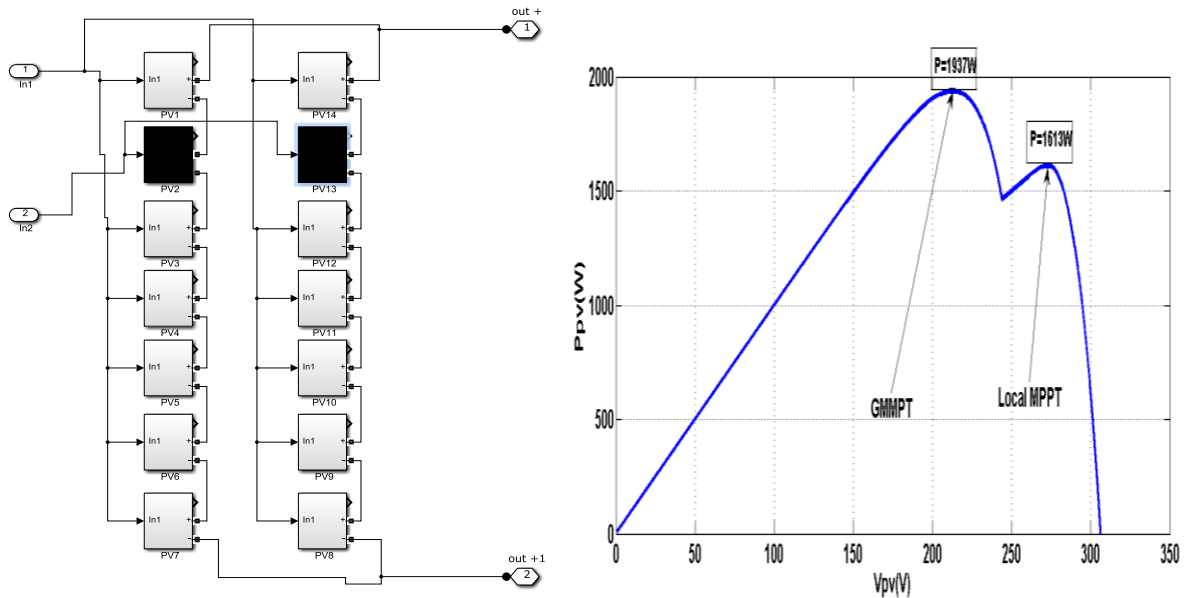
a -Schéma simulation d'ombrage (S2)      b -caractéristique (P-V) d'ombrage (S2)

Figure (IV-13) : résultat d'ombrage partiel de scenario 2

IV-5-3-Scenario 3 faible :

Dans le scenario deux modules sont soumis à un éclairement de  $600\text{W/m}^2$  alors que les autres sont exposés à un éclairement de  $1000\text{W/m}^2$ .

La figure (IV-14) (a-b) représente le schéma simulation de l'ombrage du scenario 1 et la caractéristique (P-V) correspondant à cet ombrage. On remarque l'application sur la courbe (P-V) deux extremums (un extremum locale  $1613\text{W}$  et un extremum globale d'une valeur de  $1937\text{W}$ ).



a -Schéma simulation d'ombrage (S3)      b -caractéristique (P-V) d'ombrage (S3)

Figure (IV-14) : résultat d'ombrage partiel de scenario 3

### IV-6- Applique la méthode (Perturbe & Observe) en trois scenarios

#### IV-6-1- Résultats de scenario 1 à charge constant

La figure (IV-15) représente la caractéristique (P-V) a pris l'application de la méthode (Perturbe & Observe) .on remarque le présente de trois extremum.

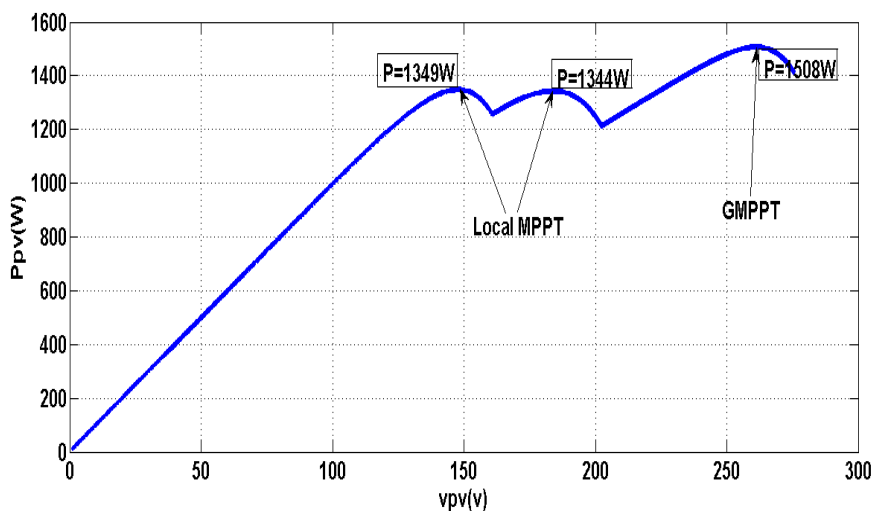
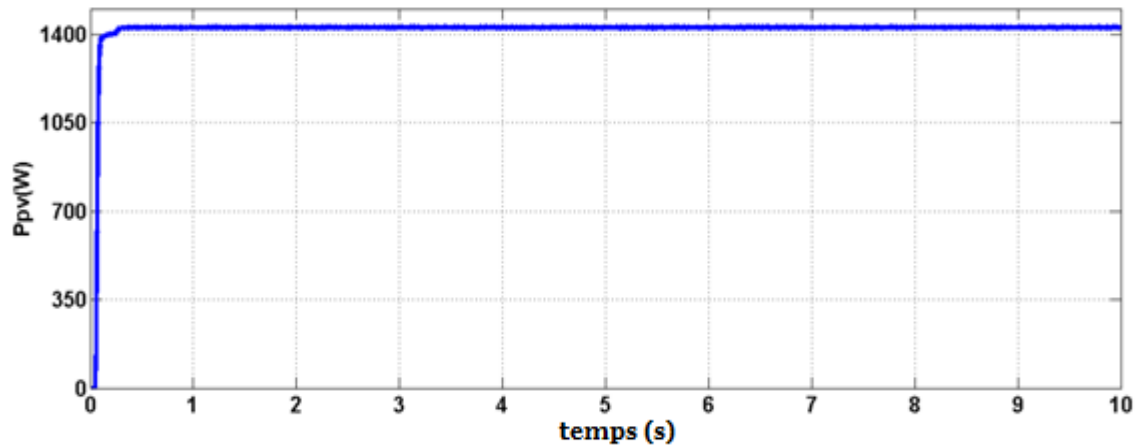


Figure (IV-15) : Caractéristique de  $P_{pv}=f(V_{pv})$  par méthode (Perturbe & Observe)

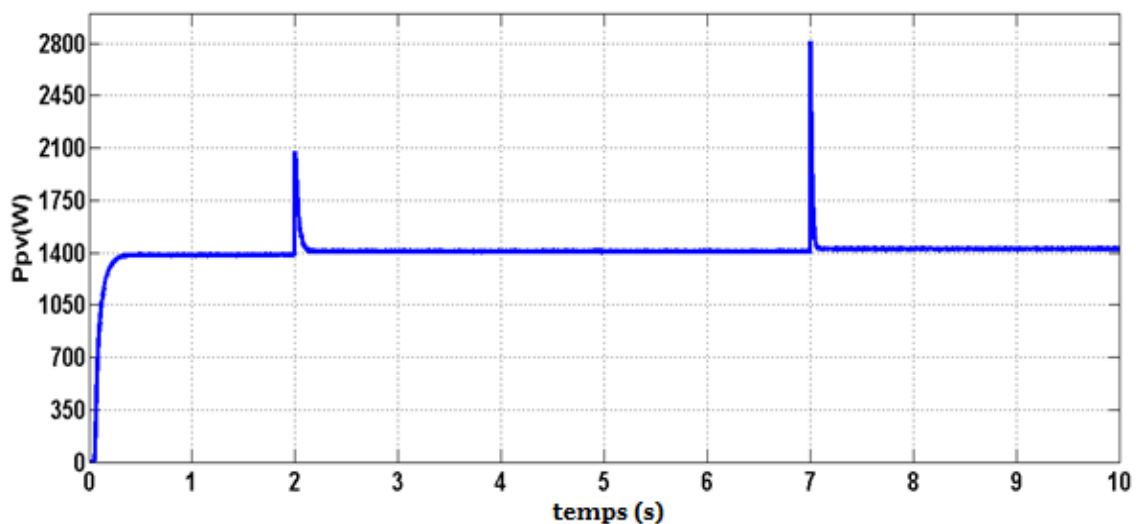
La figure (IV-16) représente la simulation de la puissance pour on charge constante  $15\Omega$  on remarque que sa valeur est  $1430W$  qui **correspond à l'extremum global**.



**Figure (IV-16) :** Caractéristique de  $P_{pv}=f(t)$  par méthode (Perturbe & Observe)

#### IV-6-1-1-Variation de charge

Nous vérifions le comportement du système avec à une variation de charge, nous changeons cette dernière de  $45\Omega$  à  $30\Omega$  à l'instante  $t=2s$  et de  $30\Omega$  à  $15\Omega$  à L'instant  $t=7s$ . Les résultats de la Simulation sont présentés dans la figure (IV-17). La variation de la charge provoque un dépassement instantané de la puissance maximale comme la méthode précédente (Perturbe & Observe) avec ombrage partial. Mais la puissance se maintient à sa valeur maximale de l'extremum globale



**Figure (IV-17) :** Allure de la puissance face à une variation de charge par MPPT méthode (Perturbe & Observe)



IV-6-2-Résultats de scenario 2 à charge constant

La figure (IV-18) représente la caractéristique (P-V) a pris l'application de la méthode (Perturbe & Observe) .on remarque le présente de trois extremum.

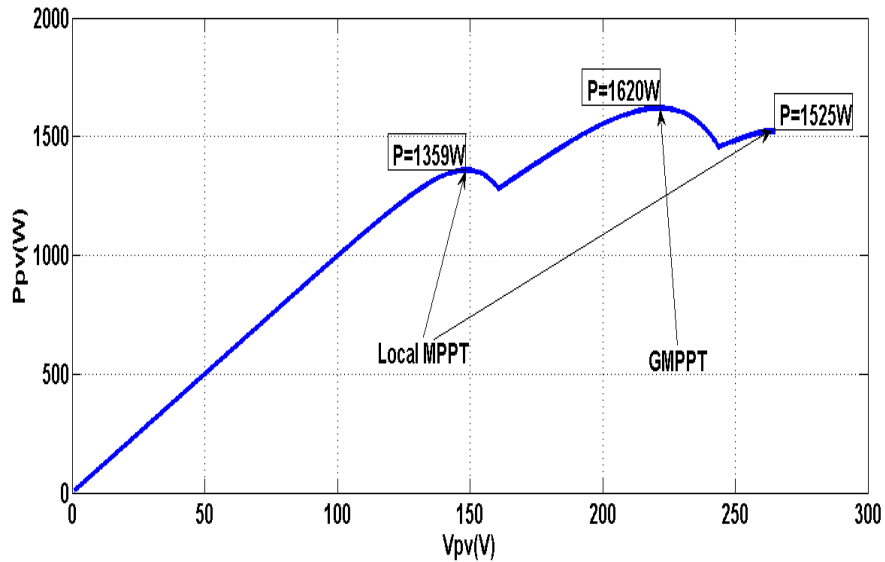


Figure (IV-18) : Caractéristique de  $P_{pv}=f(V_{pv})$  par méthode (Perturbe & Observe)

La figure (IV-19) représente la simulation de la puissance pour on charge constante  $15\Omega$  on remarque que sa valeur est 1450W qui **correspond à l'extremum locale**.

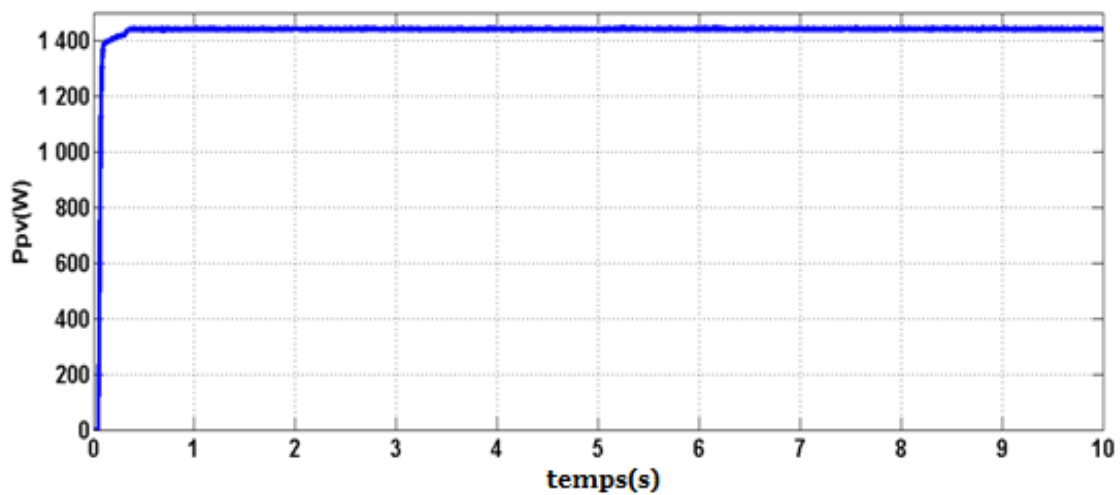
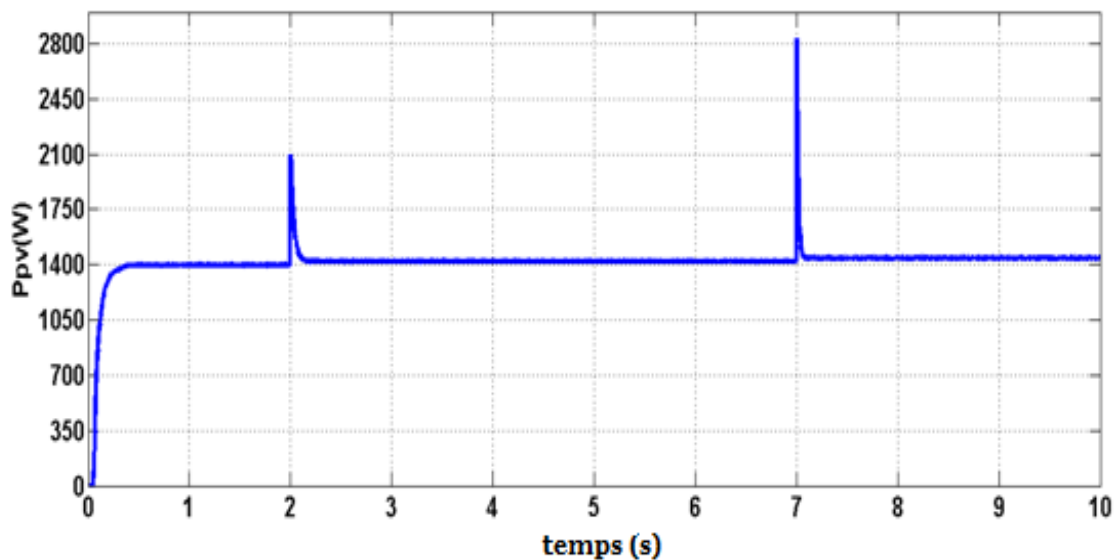


Figure (IV-19) : Caractéristique de  $P_{pv}=f(t)$  par méthode (Perturbe & Observe)

#### IV-6-2-1-Variation de charge

Nous vérifions le comportement du système avec à une variation de charge, nous changeons cette dernière de  $45\Omega$  à  $30\Omega$  à l'instante  $t=2s$  et de  $30\Omega$  à  $15\Omega$  à L'instant  $t=7s$ . Les résultats de la Simulation sont présentés dans la figure (IV-20). La variation de la charge provoque un dépassement instantané de la puissance maximale comme la méthode précédente (Perturbe & Observe) avec ombrage partial. Mais la puissance se maintient à sa valeur maximale de l'extremum globale



**Figure (IV-20) :** Allure de la puissance face à une variation de charge par MPPT méthode (Perturbe & Observe)

#### IV-6-3- Résultats de scenario 3 à charge constant

La figure (IV-21) représente la caractéristique (P-V) a pris l'application de la méthode (Perturbe & Observe) .on remarque le présente de deux extremum.

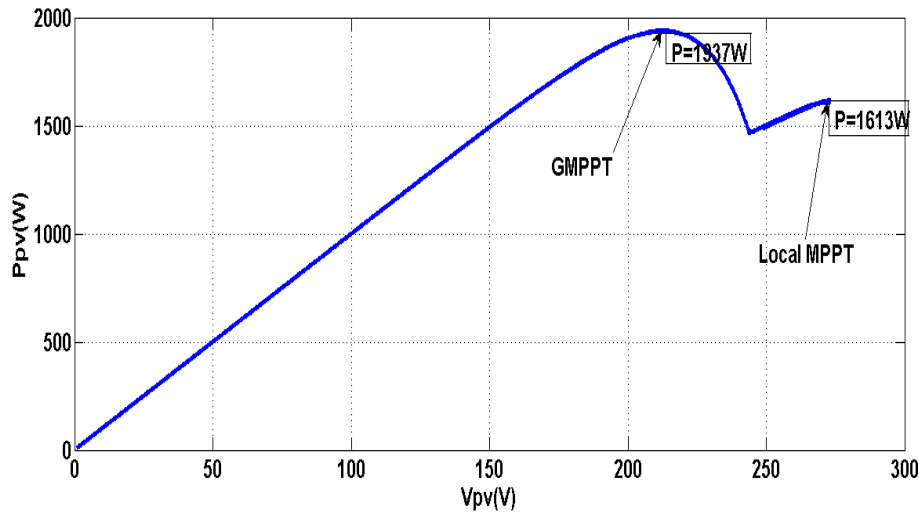


Figure (IV-21) : Caractéristique de  $P_{pv}=f(V_{pv})$  par méthode (Perturbe & Observe)

La figure (IV-22) représente la simulation de la puissance pour on charge constante  $15\Omega$  on remarque que sa valeur est  $1530W$  qui **correspond à l'extremum locale**

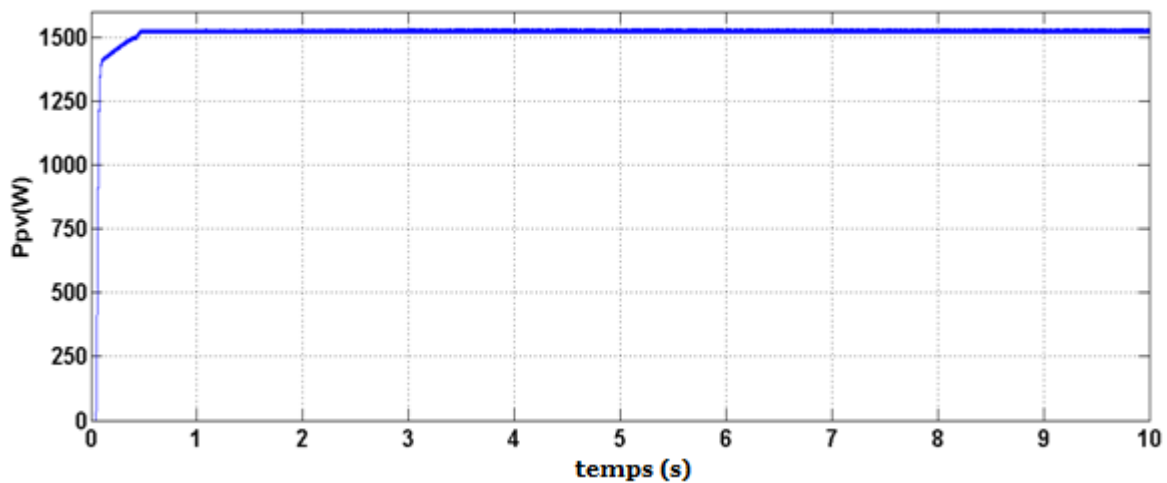


Figure (IV-22) : Caractéristique de  $P_{pv}=f(t)$  par méthode (Perturbe & Observe)

#### IV-6-3-1-Variation de charge

Nous vérifions le comportement du système avec à une variation de charge, nous changeons cette dernière de  $45\Omega$  à  $30\Omega$  à l'instante  $t=2s$  et de  $30\Omega$  à  $15\Omega$  à l'instant  $t=7s$ . Les résultats de la Simulation sont présentés dans la figure (IV-23). La variation de la charge provoque un dépassement instantané de la puissance maximale comme la méthode précédente (Perturbe & Observe) avec ombrage partiel. Mais la puissance se maintient à sa valeur maximale de l'extremum globale.

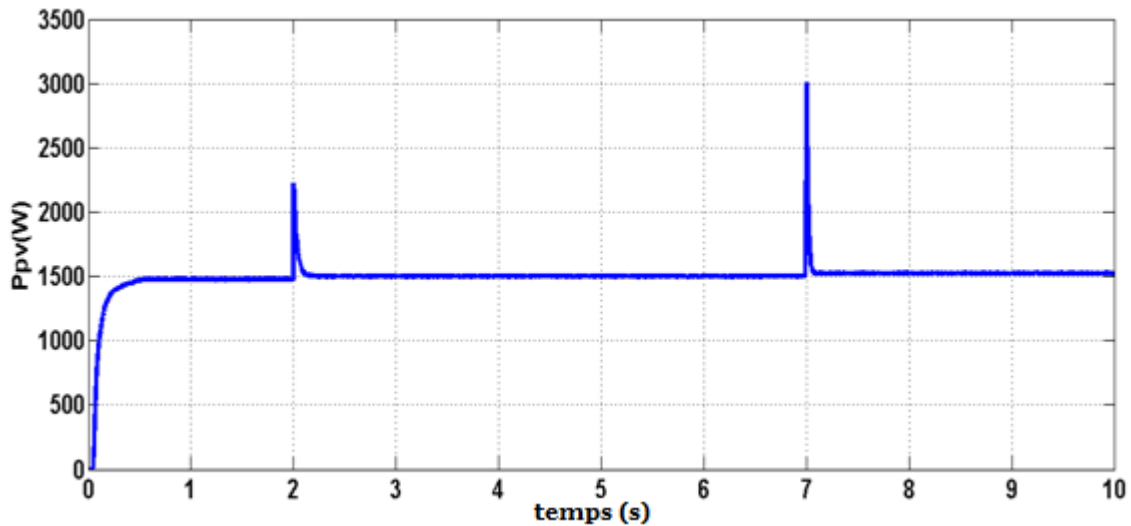


Figure (IV-23) : Allure de la puissance face à une variation de charge par MPPT méthode (P&O)

### IV-7- Applique la méthode ESC en trois scenarios

#### IV-7-1- Résultats de scenario 1 à charge constant

La figure (IV-24) représente la caractéristique (P-V) a pris l'application de la méthode (ESC) on remarque le présente de trois extremum.

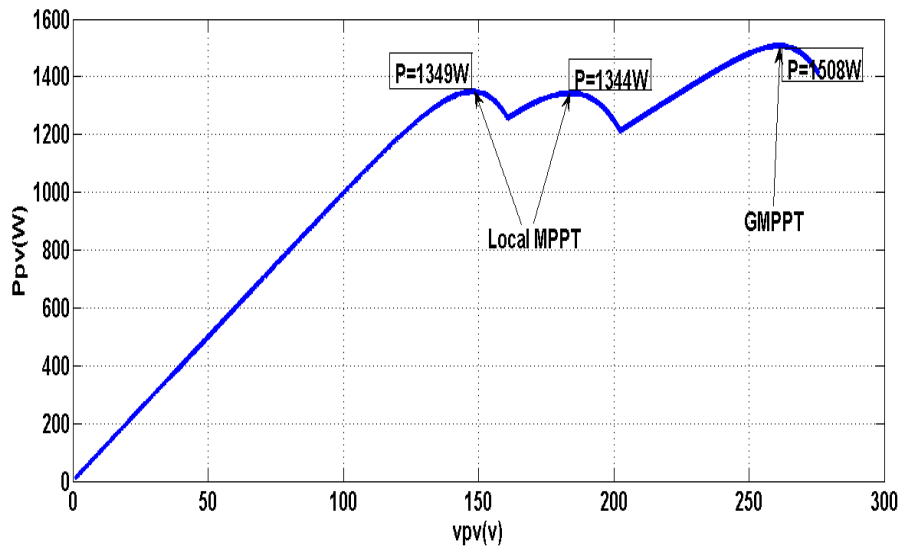


Figure (IV-24) : Caractéristique de  $P_{pv}=f(V_{pv})$  par méthode ESC

La figure (IV-25) représente la simulation de la puissance pour on charge constante  $15\Omega$  on remarque que sa valeur est  $1430W$  qui *correspond à l'extremum globale*.

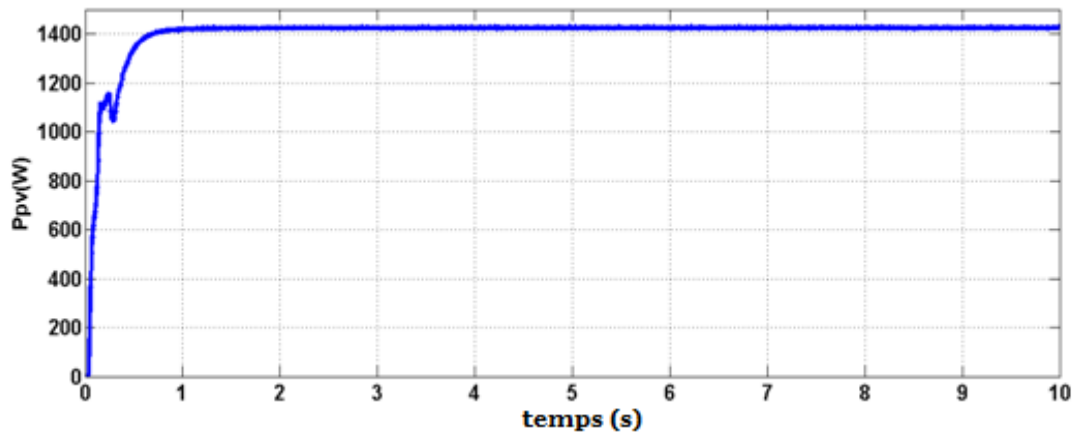


Figure (IV-25) : Caractéristique de  $P_{pv}=f(t)$  par méthode ESC

#### IV-7-1-1-Variation de charge

Nous vérifions le comportement du système avec à une variation de charge, nous changeons cette dernière de  $45\Omega$  à  $30\Omega$  à l'instante  $t=3s$  et de  $30\Omega$  à  $15\Omega$  à l'instant  $t=7s$ . Les résultats de la Simulation sont présentés dans la figure (IV-26). La variation de la charge provoque un dépassement instantané de la puissance maximale comme la méthode précédente (ESC) avec ombrage partiel. Mais la puissance se maintient à sa valeur maximale de l'extremum globale.

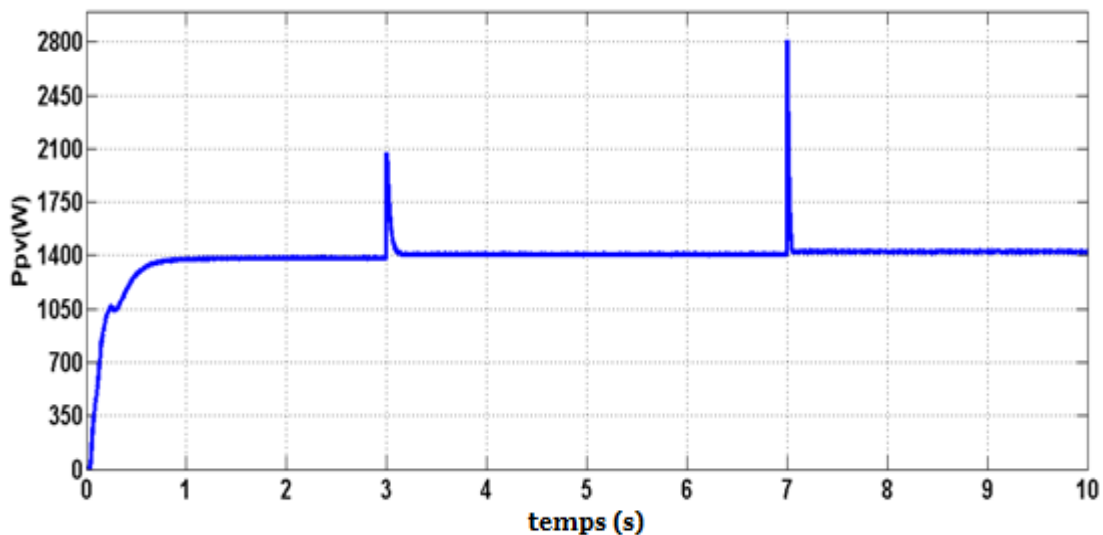


Figure (IV-26) : Allure de la puissance face à une variation de charge par MPPT méthode ESC

#### IV-7-2- Résultats de scénario 2 à charge constant

La figure (IV-27) représente la caractéristique (P-V) à pris l'application de la méthode (ESC) on remarque le présente de deux extremum.

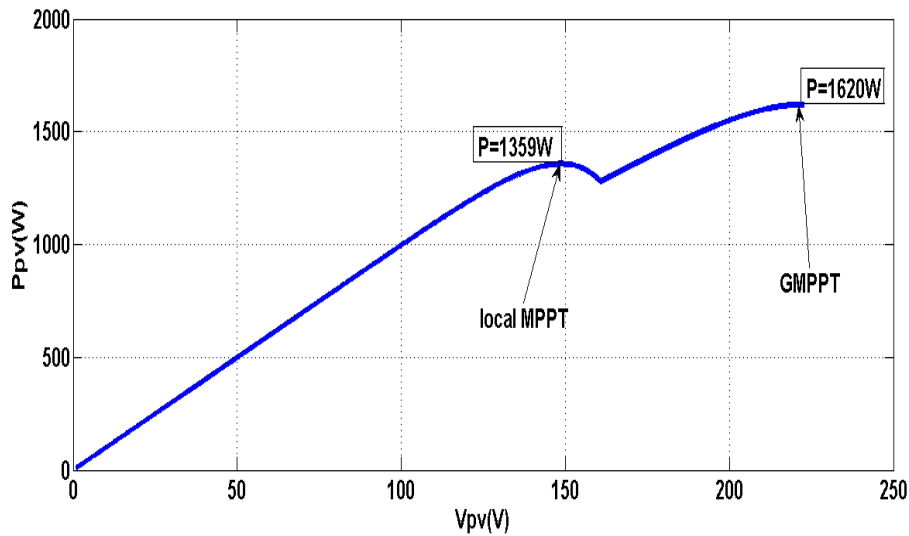


Figure (IV-27) : Caractéristique de  $P_{pv}=f(V_{pv})$  par méthode ESC

La figure (IV-28) représente la simulation de la puissance pour on charge constante  $15\Omega$  on remarque que sa valeur est  $1545W$  qui *correspond à l'extremum globale*.

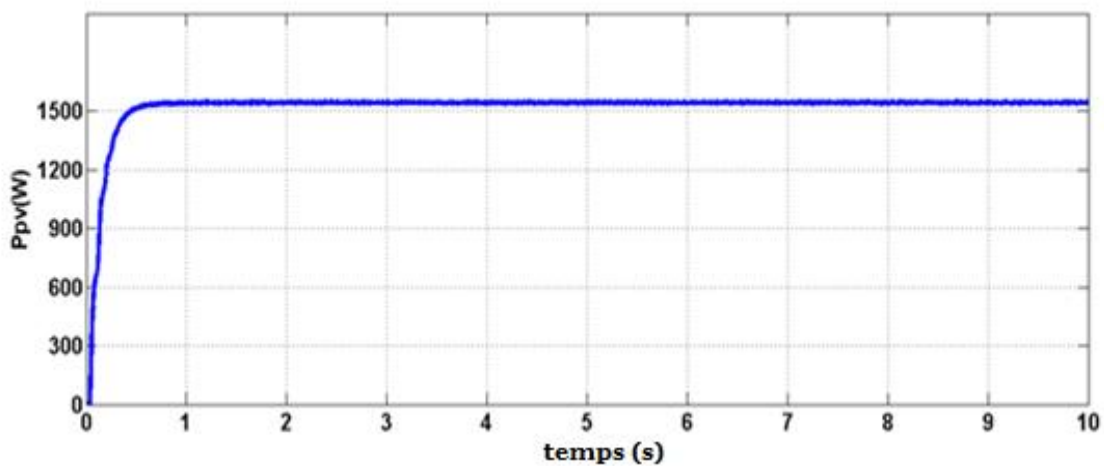


Figure (IV-28) : Caractéristique de  $P_{pv}=f(t)$  par méthode ESC

IV-7-2-1-Variation de charge

Nous vérifions le comportement du système avec à une variation de charge, nous changeons cette dernière de  $45\Omega$  à  $30\Omega$  à l'instante  $t=3s$  et de  $30\Omega$  à  $15\Omega$  à L'instant  $t=7s$ . Les résultats de la Simulation sont présentés dans la figure (IV-29). La variation de la charge provoque un dépassement instantané de la puissance maximale comme la méthode précédente (ESC) avec ombrage partial. Mais la puissance se maintient à sa valeur maximale d'extremum globale.

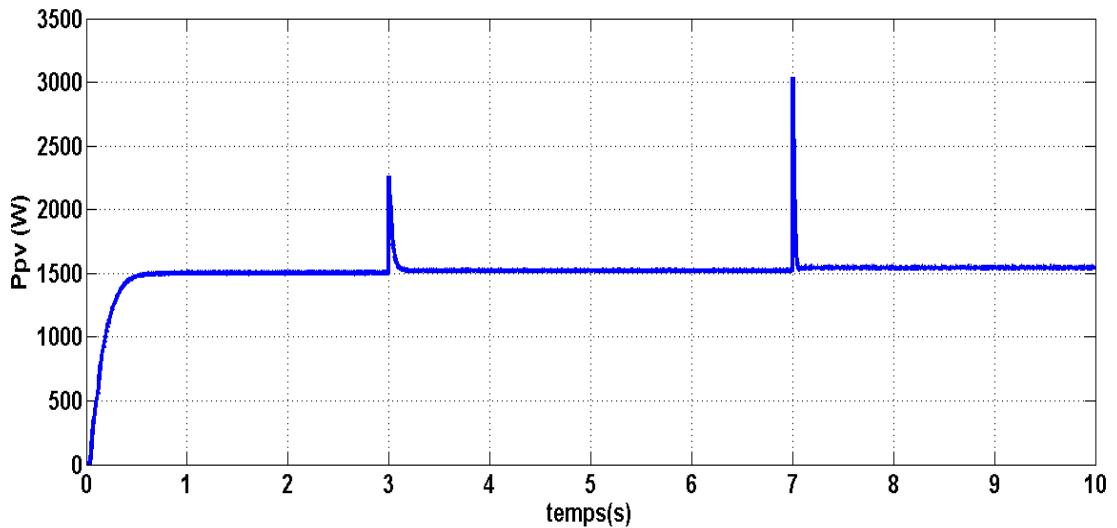


Figure (IV-29) : Allure de la puissance face à une variation de charge par MPPT méthode ESC

IV-7-3- Résultats de scenario 3 à charge constant

La figure (IV-30) représente la caractéristique (P-V) a pris l'application de la méthode (ESC) on remarque le présente de un extremum

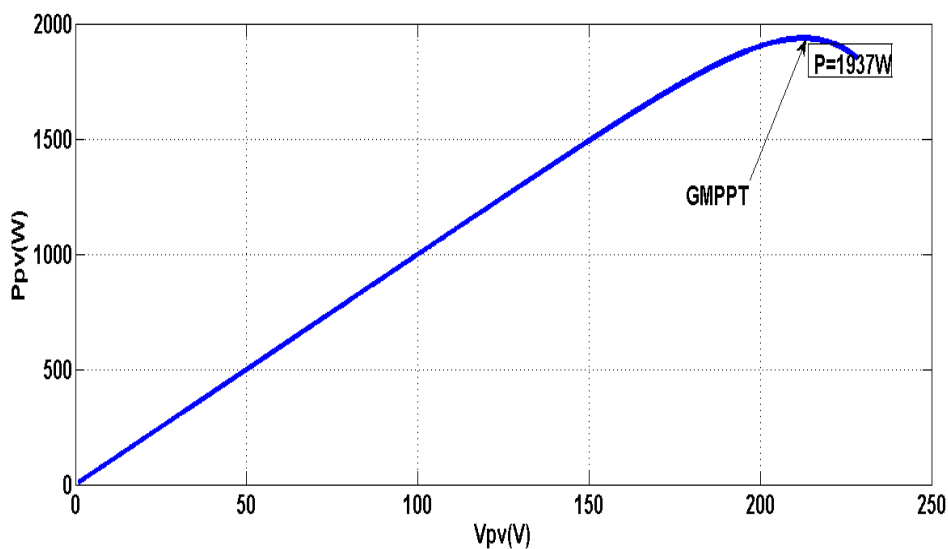


Figure (IV-30) : Caractéristique de  $P_{pv}=f(V_{pv})$  par méthode ESC

La figure (IV-31) représente la simulation de la puissance pour on charge constante  $15\Omega$  on remarque que sa valeur est 1850W qui *correspond à l'extremum globale*.

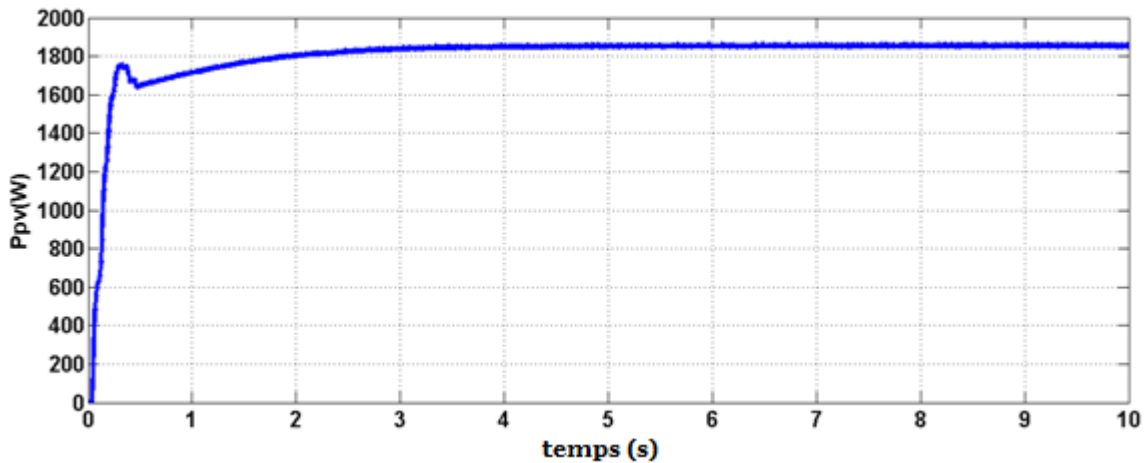


Figure (IV-31) : Caractéristique de  $P_{pv}=f(t)$  par méthode ESC

#### IV-7-3-1-Variation de charge

Nous vérifions le comportement du système avec à une variation de charge, nous changeons cette dernière de  $45\Omega$  à  $30\Omega$  à l'instante  $t=4s$  et de  $30\Omega$  à  $15\Omega$  à l'instant  $t=8s$ . Les résultats de la Simulation sont présentés dans la figure (IV-32). La variation de la charge provoque un dépassement instantané de la puissance maximale comme la méthode précédente (ESC) avec ombrage partiel. Mais la puissance se maintient à sa valeur maximale d'extremum globale.

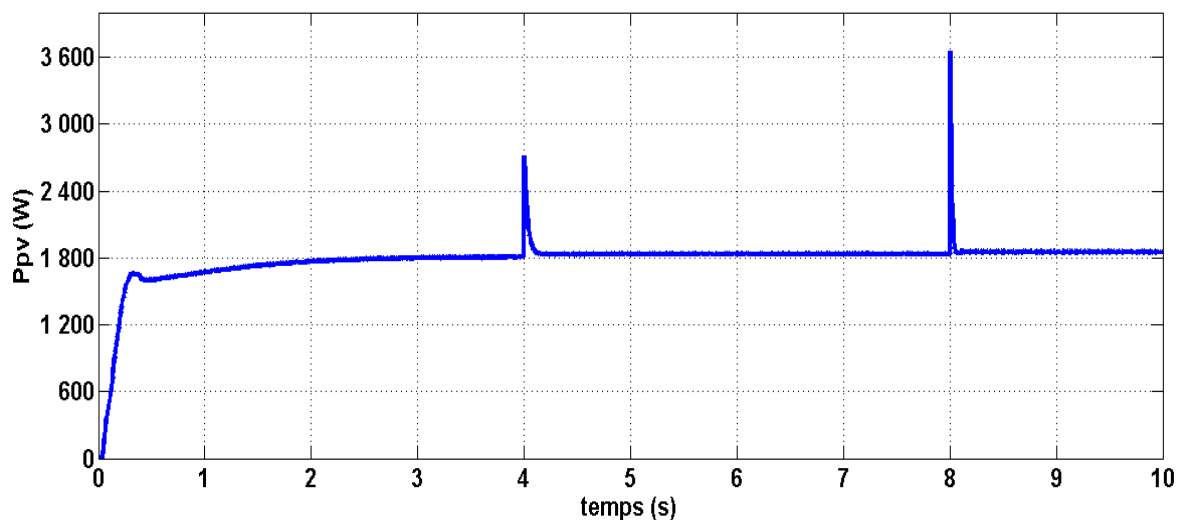


Figure (IV-32) : Allure de la puissance face à une variation de charge par MPPT méthode ESC



### IV-8-Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté les résultats de simulation de la commande de GPV par deux méthode (P&O et ESC), en considérant trois scénario d'ombrage. Les résultats obtenues révèlent la capacité de ces deux méthode de converge à l'extremum globale dit point de puissance maximale, dans la condition de fonctionnement ordinaires tout fois en présence, D'un ombrage partiel, l'algorithme P&O ne parvient pas toujours à se stabiliser au point de puissance maximal alors que l'algorithme ESC convergent toujours au l'extremum global par les trois scenarios étudiés.

## **Conclusion générale**

---

# **Conclusion générale**

## CONCLUSION GENERALE

---

### Conclusion générale

Afin d'améliorer l'efficacité des systèmes photovoltaïques, différents algorithmes de commandes MPPT pour la poursuite du point maximum de puissance ont été étudiées pour un système photovoltaïque autonome soumis à un ombrage partiel. Dans cet objectif, ce travail est une contribution pour la compréhension et la mise en œuvre d'une commande MPPT permettant de poursuivre la puissance maximale à tout moment et sous différentes conditions atmosphériques.

Nous avons dans ce travail introduit dans un premier paragraphe des généralités sur l'énergie solaire. Ensuite ; nous avons explicité la modélisation de la cellule, le module et le générateur PV avec et sans ombrage.

Dans ce travail nous avons également élaboré un modèle sous le logiciel Matlab Simulink du système photovoltaïque autonome qui nous a permis d'effectuer des essais de simulation sur le système avec et sans ombrage. Nous avons appliqué deux méthodes de commande MPPT : Perturbe et observe (P&O) et contrôle par recherche de l'extremum (ESC). Les résultats obtenus ont été comparés et analysés. Sur cette base, les points suivants ont été constatés :

Les deux méthodes permettent d'atteindre le point de puissance maximale de la caractéristique de (P-V) dans un essai sans ombrage.

Pour trois scénarios d'ombrage : faible ; modéré et sévère la commande (P&O) n'arrive pas toujours à converger à l'extremum global dans le cas du deuxième et troisième scénario.

Le contrôleur basé sur l'algorithme (ESC) converge toujours à l'extremum global pour les trois scénarios étudiés.

Les résultats mènent à conclure que le contrôle par l'algorithme ESC est mieux adapté que la technique P et O dans le cas d'un système photovoltaïque soumis à un ombrage partiel.

# **Bibliographes**

## BIBLIOGRAPHES

---

- [1] DJELLAL LEILA IMEMNE & DIB YASMINA, «Etude comparative de deux commandes MPPT appliquées à un Système Photovoltaïque», Université Abou-Bekr Belkaid de Tlemcen, Thèse de Master, 22 Juin 2017.
- [2] KALAJDI Farah et CHEKROUNI Nesrine «commande d'un générateur photovoltaïque débitant sur une pompe (MPPT)», Université ABOU BAKR BELKAID de Tlemcen, Thèse de Master, 2013/2014
- [3] Labani Imad Eddine riadh et Attig Abdelkrim, «modélisation simulation d'un system photovoltaïque adapte par une commande MPPT perturbation et observation (P&O)», Université Dr. Tahar Moulay de Saïda, Thèse de Master, 22/06/2017
- [4] BENADEL Faiza «Etude Et Simulation D'une Commande MPPT Pour Système PV», UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA, Thèse de Master, 2015 – 2016
- [5] BENSALAH Belqassim et FILALI Mohammed «Etude et réalisation d'un circuit de commande avec MPPT d'un hacheur pour système photovoltaïque», Université ABOU BAKR BELKAID de Tlemcen, Thèse de Master, 14 /06/2015
- [6] Touil Nacer Eddine Ghenbazi Slimane «Modélisation et Simulation d'un Système Photovoltaïque», Université Echahid Hama Lakhder d'El-Oued, Thèse de Master, Septembre 2015
- [7] IDIR Zahir et ADRAR Amazigh «Etude et simulation du comportement d'un générateur photovoltaïque en présence de problème de désadaptation», Université A.MIRA-BEJAIA, Thèse de Master, 26/06/2016
- [8] MESSAOUDI Mohammed Tahar «Simulation d'un système photovoltaïque autonome régulé par logique floue», UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA, Thèse de Master, 08/06/2015
- [9] Belaout Abdeslam «Etude et diagnostic des défauts fréquents aux systèmes photovoltaïques (PV) par emploi de la caractéristique courant-tension», UNIVERSITE – SETIF-1, Thèse de Magister, 28/10/2014
- [10] Slama Fateh «Modélisation d'un système multi générateurs photovoltaïques interconnectés au réseau électrique», UNIVERSITE FERHAT ABBAS – SETIF, Thèse de Magister, 01 /04/2011
- [11] Alain Bilbao Ierreta «Réalisation de commande MPPT Numériques», Université Rovira Virgil Toulouse, Rapport de stage projet fin d'études, septembre 2006

## BIBLIOGRAPHES

---

- [12] Soufi Ali et Mohammad Abdel Haq «Evaluation of Global MPPT for stand-alone PV System»,  
University M'Hamed BOUGARA – Boumerdes, This de Master, 2018
- [13] Gwinyai Dzimano, B.S « MODELING OF PHOTOVOLTAIC SYSTEMS»,  
University Ohio State, This Master, 2008
- [14] Andrew S Golder «Photovoltaic Generator Modeling for Large Scale Distribution System Studies», University Drexel, Master Thesis, Octobre 2006
- [15] JouiniTakwa et Trabelsi sondes «Réalisation et dimensionnement d'une installation Photovoltaïque raccordée au réseau», Institut Supérieur des Etudes Technologique de Siliana, tunisien, 11/06/2018
- [16] Youcef ABDELAZIZ «Contribution à l'Optimisation des Performances d'un Générateur Photovoltaïque en Présence d'Ombrage Partiel», UNIVERSITE DJILLALI LIABES DE SIDI-BEL-ABBES, Thèse de Doctorat, 14 /09/2017
- [17] FABRIZIO OLITA «ADVANCED CONTROL AND CONDITION MONITORING PV SYSTEMS», University Aalborg, Danemark, Master Thesis, **June** 2012
- [18] Khalid Hamooda Matter, «A Thesis Submitted to the Faculty of Engineering in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Master of Science in Electrical Engineering»The Islamic University of Gaza, Palestine, Master Thesis, June. 27, 2014
- [19] Farhan Mahmoud,« Improving the Photovoltaic Model in Power Factory »Electric Power Systems Second Level, Stockholm, Sweden, Master Thesis, 2012.
- [20] Polycarp Ifeanyi Muoka,« Control of Power Electronic Interfaces for Photovoltaic Power Systems for Maximum Power Extraction» University of Tasmania Australia, Doctorat Thesis, 4 November, 2014.
- [21] Sindhu Krishna Yarlagadda,« A MAXIMUM POWER POINT TRACKING TECHNIQUE FOR SINGLE-PHASE PHOTOVOLTAIC SYSTEMS WITH REDUCED DC-LINK CAPACITOR» the Faculty of the Department of Electrical and Computer Engineering University of Houston, Thesis Master of Science in Electrical Engineering, December 2012
- [22] David Sanz Morales,« Maximum Power Point Tracking Algorithms for Photovoltaic Applications» Aalto University school of science and Technology, Master Thesis, 14/12/2010
- [23] BELKAID ABDELHAKIM,« Conception et implémentation d'une commande MPPT de haute performance pour une chaine de conversion photovoltaïque autonome» UNIVERSITE FERHAT ABBAS - SETIF 1,Thèse de Doctorat, 19/10/2015

## BIBLIOGRAPHES

---

- [24] AOUMER Amel et HARFOUCHE Kenza « Maximisation de l'Energie d'un Système Photovoltaïque» Université Abderrahmane Mira de Bejaia, Thèse de Master, 2014-2015
- [25] Her-Terng Yau and Chen-Han Wu, «Comparison of Extremum-Seeking Control Techniques for Maximum Power Point Tracking in Photovoltaic Systems» Department of Electrical Engineering, National Chin-Yi University of Technology, Japan's, Thesis article Published: 8 December 2011
- [26] CHEDDADI Youssef and CHEDDADI Fatima and ERRAHIMI Fatima and ES-SBAI Najia, «Extremum Seeking Control-based Global Maximum Power Point Tracking algorithm for PV array under partial shading conditions», Sidi Mohamed Ben Abdallah University, Laboratory of Renewables Energy and Intelligent Systems, Morocco, Thesis article, April 2017.
- [27] Van Manh Hoang and Ngoc Viet Nguyen and Manh Thang Pham, « Extremum Seeking Control based MPPT for photovoltaic array under uniform and non-uniform irradiances», Faculty of Mechanics and Automation, University of Engineering and Technology, Thesis article, August 2016
- [28] www. <http://ren21.net/gsr-2019>.