

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
Université 8Mai 1945 – Guelma  
Faculté des Sciences et de la Technologie  
Département de Génie Electrotechnique et Automatique



Domaine : Sciences et Technologie  
Filière : Electrotechnique  
Spécialité : Réseaux Electriques

Mémoire de fin d'études  
Pour l'obtention du diplôme en Master académique

---

## Modélisation et Simulation sous Matlab/Simulink d'un Système Photovoltaïque adapté par une Commande MPPT

---

Présenté par :

**BENAICHE Houssam, BENKIRAT Mouhamed Amine**

Sous la direction de :

**Dr : FERAGA CHAMS-EDDINE**

Juin 2017



17/3478

بِسْمِ اللَّهِ

الرَّحْمَنِ

الرَّحِيمِ

# *Remerciements:*

*-Nous tenons à remercier tout d'abord le bon  
Dieu tout puissant qui nous guide vers  
Le bon Chemin et qui nous aide dans notre travail  
Malgré les difficultés rencontrées.*

*-Nous tenons à remercier notre encadreur  
« MR FERAGA CHAMS SDDINE » pour l'aide  
Qu'il nous a apporté, pour tous les conseils  
Qu'il nous a donné.*

*-Nous tenons à remercier également tous le  
Personnel enseignant du  
« Département de génie électriques »  
Qui nous ont permis  
D'acquérir beaucoup de connaissance dans  
Le domaine de génie électrique.*

**Titre : Modélisation et Simulation sous Matlab/Simulink d'un Système  
Photovoltaïque adapté par une Commande MPPT**

**Résumé :**

Dans ce travail, on traite la modélisation et la simulation d'un système photovoltaïque (PV) utilisant une commande MPPT « perturbation et observation » assurant la poursuite de la puissance maximale fournie par le générateur PV. Dans le premier chapitre on modélise la cellule PV. Ensuite on fait un rappel sur le générateur PV et ses performances. Dans le deuxième chapitre, on étudie les convertisseurs DC-DC utilisés dans les systèmes photovoltaïques et les commandes MPPT directe indirecte. Dans le dernier chapitre, on présente une modélisation et une simulation sous MATLAB/SIMULINK du générateur photovoltaïque, le hacheur survolteur et la commande MPPT « perturbation et observation »

**Mots clés :**

- Générateur PV
- Hacheur survolteur
- Commande MPPT
- Modélisation
- Simulation.

# Sommaire

## Liste des figures

Figure I-1	Définition de la position de soleil	6
Figure I-2	spectre solaire hors atmosphère	7
Figure I-3	Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque	9
Figure I-4	Éléments essentiels d'un système photovoltaïque	11
Figure I-5	Schéma simplifié d'un système photovoltaïque raccordé au réseau	13
Figure I-6-a	modèle simple de diode	13
Figure I-6-b	Le modèle de double diode	14
Figure I-7	la cellule idéale.	16
Figure I-8	Caractéristiques courant tension d'un générateur PV.	17
Figure I-9	Caractéristiques I-V d'un générateur PV.	19
Figure I-10	Caractéristiques de puissance d'un générateur PV.	19
Figure I-11	Caractéristique courant-tension d'une cellule en fonction de l'éclairement	20
Figure I-12	Caractéristique courant-tension d'une cellule en fonction de la température	20
Figure I-13	Fabrication d'un cellule, module et panneaux.	22
Figure I-14	Cellule monocristalline	23
Figure I-15	Cellule multi cristallin.	24
Figure I-16	Cellule amorphe.	25
Figure 1.17	Association de N modules solaires en série	27
Figure I-18	Caractéristique de nombre des modules en série	27
Figure I-19	Association de $N_p$ modules solaires en parallèle.	28
Figure I-20	Caractéristique de nombre des modules en parallèles	28
Figure I-21	Association mixte $N_s \times N_p$ modules solaires	29
Figure I-22	Caractéristique de nombre des modules en série et parallèle	29
Figure (II.1)	Schéma de principe d'un type d'alimentation à découpage	33
Figure (II.2)	Schéma d'un quadripôle électrique	33
Figure(II.3)	Périodes fermeture et ouverture d'un commutateur.	34
Figure (II.4)	Schéma de principe d'un convertisseur dévolteur.	34

## Liste des figures

Figure (II.5)	Schémas équivalents du hacheur dévolteur, (a) : K fermé, (b) : ouvert	35
Figure (II.6)	Schéma de principe d'un convertisseur Boost	36
Figure (II.7)	Schémas équivalents du hacheur survolteur, (a) : K fermé, (b) : ouvert	37
Figure (II.8)	Convertisseur dévolteur-survolteur	38
Figure (II.9)	Schémas équivalents du hacheur dévolteur-survolteur, (a) : K fermé, (b) : K ouvert	39
Figure (II.10)	Chaîne de conversion d'énergie solaire comprenant. une commande MPPT	40
Figure (II.11)	Recherche et recouvrement du Point de Puissance Maximale. a) suite à une variation d'éclairement, b) suite à une variation de charge, c) suite à une variation de température	41
Figure (II.12)	Principe de la méthode à contre réaction.  de tension avec tension de référence	42
Figure (II.13)	Principe de la méthode MPP1 à courant de référence en fonction de $I_{cc}$ .	43
Figure (II.14)	Signe de $\frac{dP}{dV}$ pour différentes zones de fonctionnement	45
Figure (II.15)	Organigramme de la méthode de perturbation et d'observation	46
Figure (III.1) :	Circuit électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque	49
Figure (III.2) :	Schéma de Module PV en MATLAB-SIMULINK	53
Figure (III.3) :	Résultats de simulation des caractéristiques Courant-Tension, pour différentes températures et un éclairement $G=1000W/m^2$ .	54
Figure (III.4) :	Résultats de simulation des caractéristiques Puissance-Tension, pour différentes températures et un éclairement $G=1000W/m^2$ .	54
Figure (III.5) :	Résultats de simulation des caractéristiques Courant-Tension pour différents éclairement et une température $T=25^{\circ}C$ .	55
Figure (III.6) :	Résultats de simulation des caractéristiques Puissance-Tension Pour différents Eclairement et une température $T=25^{\circ}C$ .	55
Figure (III.7) :	Convertisseur (DC/DC) survolteur de tension (type boost)	56
Figure(III.8) :	Schéma block d'un convertisseur survolteur	58
Figure (III.9) :	Signal commande du hacheur (gâchette du hacheur).	59

## Liste des figures

Figure (III.10) :	Résultats de simulation de la tension d'entrée du hacheur survolteur	59
Figure (III.11) :	Résultats de simulation de la tension de sortie du hacheur survolteur	60
Figure (III.12) :	Résultats de simulation du courant de sortie du hacheur survolteur	60
Figure (II.13) :	Algorithme de la commande MPPT « perturbation-observation »	61
Figure (III.14):	Schéma MATLAB SIMULINK d'un système photovoltaïque avec commande MPPT (P&O)	62
Figure (III.15-a) :	Résultats de simulation de puissance de sortie du générateur et du système pour $E=1200 \text{ W/m}^2$ et $T=25^\circ\text{C}$ avec MPPT	63
Figure (III.15-b) :	Résultats de simulation de puissance de sortie du générateur et du système pour $E=1200 \text{ W/m}^2$ et $T=25^\circ\text{C}$ sans MPPT	63
Figure (III.16-a) :	Résultats de simulation de puissance de sortie du générateur et du système pour $E=1000\text{W/m}^2$ et $T=25^\circ\text{C}$ avec MPPT	64
Figure (III.16-b) :	Résultats de simulation de puissance de sortie du générateur et du système pour $E=1000\text{W/m}^2$ et $T=25^\circ\text{C}$ sans MPPT	64
Figure (III.17-a) :	Résultats de simulation de puissance de sortie du générateur et du système pour $E=900 \text{ W/m}^2$ et $T=25^\circ\text{C}$ avec MPPT	65
Figure (III.17-b) :	Résultats de simulation de puissance de sortie du générateur et du système pour $E=900 \text{ W/m}^2$ et $T=25^\circ\text{C}$ sans MPPT	65
Figure (III.18-a) :	Résultats de simulation de puissance de sortie du générateur et du système pour $E=800 \text{ W/m}^2$ et $T=25^\circ\text{C}$ avec MPPT	66
Figure (III.18-b) :	Résultats de simulation de puissance de sortie du générateur et du système pour $E=800 \text{ W/m}^2$ et $T=25^\circ\text{C}$ sans MPPT	66



Liste des tableaux

Tableau(I.1)	Valeurs énergétiques des photons issus du spectre solaire.	8
Tableau (I.2)	Rendement de silicium utilisé [17].	26
Tableau (III.1)	Caractéristiques électriques du module photovoltaïque panneau MSX85 dans les conditions standards «CST»	52
Tableau (III-2)	Représentation les résultats des puissances de sorte de générateur et système avec différents éclairément avec et sans MPPT	67

<b>Introduction générale</b>	2	
<b>Chapitre I : Générateur photovoltaïque</b>		
I-1	Introduction	5
I.2.	Rayonnement solaire	5
I-2-1-	Rayonnement sur la Terre	5
I-2-2.	Trajectoire solaire	6
I-3	Spectre du rayonnement	6
I-4-	Principe de conversion photovoltaïque	8
I-4-1	Effet photovoltaïque	9
I-4-2-	Cellule photovoltaïque	9
I-4-2-1	Fonctionnement	10
I-5-	Le fonctionnement d'un système photovoltaïque	11
I-6-	Modèle De La Cellules Photovoltaïques	13
I-6-1	Modèle simplifié à une diode	15
I-7	Caractéristiques courant- tension	16
I-8-	Paramètre d'une cellule photovoltaïque	18
I.9.	Influence de l'éclairement	19
I.10.	Influence de la température	20
I-11-	Technique de fabrication des cellules photovoltaïque	21
I-12-	Les différents types des cellules solaires photovoltaïques	22
I-12-1-	Cellule photovoltaïque en silicium monocristallin	23
I-12-2-	Cellule photovoltaïque en silicium multi cristallin	24
I-12-3-	Cellule photovoltaïque en silicium amorphe	25
I-13-	Rendement d'un panneau Photovoltaïque	25
I.14.	Influence de l'association série des cellules PV	26
I.15.	Influence de l'association parallèle des cellules PV	27

I.16.	Influence de l'association mixte (Série + Parallèle) des cellules PV	28
I-17.	Conclusion	30

## Chapitre II : Principe des Hacheurs et de la Commande MPPT

II.1.	Introduction	32
II.2.	Les convertisseurs DC-DC (hacheurs)	32
II.2.1.	Hacheur dévolteur	34
II.2.2.	Hacheur survolteur	36
II.2.3.	Hacheur dévolteur-survolteur	38
II-3.	Recherche du point de puissance maximale du générateur photovoltaïque	39
II.3.1.	Principe du MPPT	40
II.3.2.	Synthèse des différentes techniques de maximisation de la puissance	41
II.3.2.1.	Les méthodes indirectes	42
II.3.2.1.1.	Méthode à contre réaction de tension	42
II.3.2.1.2.	Méthodes à contre réaction de courant	43
II.3.2.2.	Les méthodes directes	43
II.3.2.2.1.	Algorithme d'incrément de l'inductance	44
II.3.2.2.2.	Méthode de perturbation et d'observation (P&O)	45
II.4.	Conclusion	47

## Chapitre III : Modélisation et Simulation de la chaîne de conversion PV

III.1.	Introduction	49
III.2.	Modélisation et simulation du générateur photovoltaïque	49
III.2.1.	Modélisation du GPV	49
III.3.	Simulation du générateur PV	53

III.4.	Modélisation et simulation du hacheur survolteur	56
III.4.1.	Modélisation de hacheur survolteur	56
III.4.2.	Simulation de hacheur survolteur	58
III.5.	Structure de la commande MPPT perturbation et observation« P&O » et simulation du système global (GPV, convertisseur, MPPT)	61
III.5.1.	Structure de la commande « perturbation et observation »	61
III.5.2.	Simulation du Système globale (GPV, convertisseur, MPPT)	62
III.6.	Conclusion :	68
	Conclusion générale	70
	Bibliographie	73

**Introduction**  
**Générale**

## Introduction générale

La production d'énergie est considérée comme un sujet de grande importance pour les années à venir. La consommation d'énergie des sociétés industrialisées ainsi que les pays en voie de développement ne cessent de s'accroître. Cette production a triplé depuis les années 60 à nos jours. La totalité de production mondiale d'énergie provient de sources fossiles. La consommation de ces sources donne lieu à des émissions de gaz à effet de serre et donc une augmentation de la pollution. En plus la consommation excessive de stock de ressources naturelles réduit les réserves de ce type d'énergie de façon dangereuse pour les générations futures.

Les énergies renouvelables telles que l'énergie éolienne, l'énergie solaire, l'énergie biomasse la géothermie et l'énergie hydroélectrique, sont des solutions prometteuses pour concurrencer les sources d'énergies de masse telle que l'énergie fossile et nucléaire. A la différence des énergies fossiles, les énergies renouvelables sont des énergies à ressource illimitée.

Contrairement au pétrole qui est la cause de plusieurs conflits entre les pays du monde le rayonnement solaire est reparti sur toute la surface de la terre. En effet, les systèmes photovoltaïques semblent bien s'imposer comme moyen de conversion de l'énergie solaire en énergie électrique. Un tel système se compose d'un champ de modules et d'un ensemble de composants qui adaptent l'électricité produite par les modules aux spécifications des charges.

Dans ce mémoire, on traite la modélisation et la simulation du fonctionnement électrique d'un système photovoltaïque adapté par une commande MPPT, assurant la poursuite de la puissance maximale fournie par le générateur photovoltaïque. L'objectif de ce travail est d'améliorer les performances du hacheur adapté par la commande MPPT lors qu'il est couplé à un générateur photovoltaïque (PV) et améliorer sa tension de sortie afin d'obtenir une bonne source qu'on peut utiliser comme un générateur d'électricité.

Dans ce contexte, ce mémoire est présenté en trois chapitres :

Dans le premier chapitre, on présente une généralité sur les générateurs photovoltaïques, où on explique le principe de l'effet photovoltaïque, et on modélise la cellule PV. Ensuite on fait un rappel sur le générateur PV et ses performances.

Dans le deuxième chapitre, on étudie les types de convertisseurs DC-DC, utilisés dans les systèmes photovoltaïques. Aussi, on décrit la commande MPPT des convertisseurs DC-DC basée sur la méthode indirecte et la méthode directe.

Dans le troisième chapitre, on présente une modélisation et une simulation sous MATLAB/SIMULINK de chaque partie du système PV, à savoir : le générateur photovoltaïque (MSX85), le hacheur survolteur et la commande MPPT « perturbation et observation ».

A la fin, on termine ce mémoire par une conclusion générale.

**Chapitre I**  
**Générateur  
photovoltaïque**



**I.1.Introduction**

L'énergie solaire photovoltaïque est une énergie électrique renouvelable produite à partir du rayonnement solaire. Elle se base sur l'effet photoélectrique pour créer un courant électrique continu à partir d'un rayonnement électromagnétique. Cette source de lumière peut être naturelle (soleil) ou bien artificielle (une ampoule). L'énergie photovoltaïque est captée par des cellules photovoltaïques, un composant électronique qui produit de l'électricité lorsqu'il est exposé à la lumière. Plusieurs cellules peuvent être reliées pour former un module solaire photovoltaïque ou un panneau photovoltaïque. Une installation photovoltaïque connectée à un réseau d'électricité se compose généralement de plusieurs panneaux photovoltaïques, leur nombre pouvant varier d'une dizaine à plusieurs milliers. Cette installation produit de l'électricité qui peut être consommée sur place ou alimenter un réseau de distribution.

**I.2.Rayonnement solaire :**

Le rayonnement solaire est l'ensemble du rayonnement émis par le Soleil. En plus des rayons cosmiques, particules animées d'une vitesse et d'une énergie extrêmement élevées, le Soleil émet des ondes électromagnétiques dont le spectre s'étend des ondes radio aux rayons gamma, en passant par la lumière visible. Ce rayonnement transporte l'énergie solaire, indispensable à toute vie terrestre [9].

**I-2-1-Rayonnement sur la Terre :**

Une faible partie du rayonnement solaire parvient jusqu'à la surface de la Terre, des ondes radio décamétriques aux rayons ultraviolets les plus mous, le reste étant réfléchi ou absorbé par l'atmosphère et l'ionosphère. Lorsqu'il atteint la surface de la Terre, en fonction de l'albédo de la surface frappée, une partie plus ou moins importante du rayonnement est réfléchi. L'autre partie de ce

rayonnement est absorbée par la surface de la Terre (convertie en chaleur) ou par les êtres vivants qui y vivent, en particulier les végétaux (photosynthèse). Cette source d'énergie, appelée énergie solaire, est à la base de la vie.

### I-2.2 Trajectoire solaire :

Pour un observateur situé sur surface de la terre, le soleil décrit une trajectoire apparente qui dépend de la latitude et la longitude du lieu où il se trouve. Rappelons que la latitude est la distance angulaire d'un point quelconque du globe par rapport à l'équateur (de 0 à 90° dans l'hémisphère nord). Quant à la longitude, c'est également un angle, donné par rapport au méridien de Greenwich en se déplaçant vers l'Est [10].

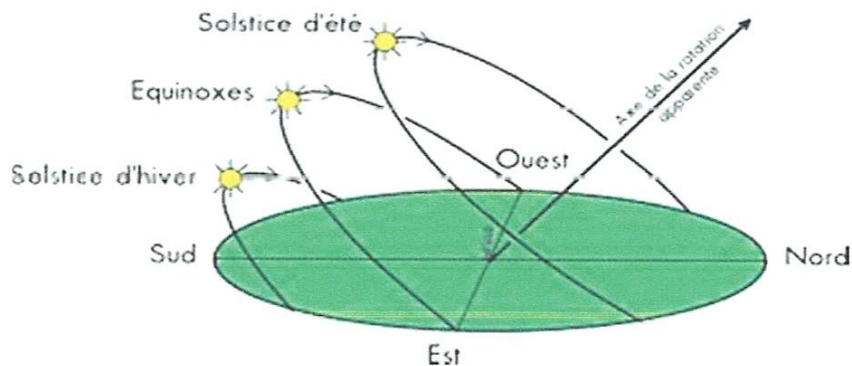


Figure I-1 Définition de la position de soleil

### I-3 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, la formule est donnée par :

$$E = h.c / \lambda \quad (I-1)$$

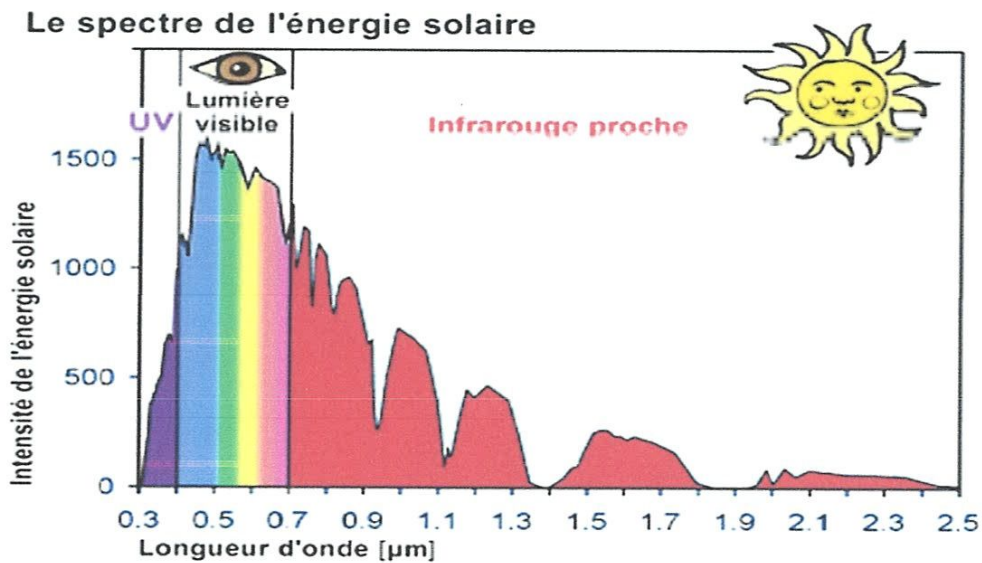
avec

**h** : est la constante de Planck

$C$  : la vitesse de la lumière.

$\lambda$  : sa longueur d'onde

Le spectre du rayonnement extraterrestre correspond environ à l'émission d'un corps noir porté à  $5800^{\circ}\text{K}$ . Une courbe standard, compilée selon les données recueillies par les satellites, est désignée sous le nom de AM0.



**Figure I-2 spectre solaire hors atmosphère [10]**

Les longueurs d'ondes du rayonnement solaire terrestre sont comprises entre  $0,2\ \mu\text{m}$  (ultra-violet) et  $4\ \mu\text{m}$  (infrarouge) avec un maximum d'énergie pour  $0,5\ \mu\text{m}$ . 97,5% de l'énergie solaire est comprise entre  $0,2\ \mu\text{m}$  et  $2,5\ \mu\text{m}$ . De  $0,4\ \mu\text{m}$  à  $0,78\ \mu\text{m}$ , le spectre correspond au domaine du visible. Les capteurs d'énergie solaire doivent donc être compatibles avec ces longueurs d'ondes pour pouvoir piéger les photons et les restituer sous forme de chaleur ou d'électrons. Le tableau (I.1) donne les valeurs énergétiques caractéristiques des photons pour diverses longueurs d'ondes, ainsi que les zones correspondantes au spectre lumineux.

$\lambda$ ( $\mu\text{m}$ )	$E_{ph}$ (eV)	Zone
0.2	6.2	Ultra-violet
0.4	3.1	Visible bleu
0.5	2.48	Visible jaune-vert
0.78	1.59	Visible rouge
1	1.24	Infrarouge
2	0.62	Infrarouge
4	0.31	Infrarouge

**Tableau.I.1 : Valeurs énergétiques des photons issus du spectre solaire.**

Pour que le rayonnement solaire produise un courant électrique dans un matériau donné, faisant alors office de capteur, il faut que les photons soient tout d'abord absorbés par un ou plusieurs matériaux sensibles à la longueur d'onde des photons. Puis, l'énergie des photons excite des électrons, qui sont ensuite collectés afin de constituer un courant électrique global [10].

#### **I-4-Principe de conversion photovoltaïque :**

Le mot « photovoltaïque » vient du grec « photos » qui signifie lumière et « volta » du nom du physicien italien qui, en 1800, découvrit la pile électrique. Mais c'est le savant français Antoine Becquerel qui est le premier, en 1839, mit en évidence cette conversion particulière de l'énergie : la variation de la conductivité d'un matériau sous l'effet de la lumière.

C'est dans les appareils photos que les premières « cellules » furent utilisées, pour mesurer le taux de la lumière. Avant l'arrivée du silicium, elles étaient à base de sélénium. Ceci établi, voyons comment se produit cette conversion d'énergie. Elle met en jeu trois phénomènes physiques intimement liés et simultanés :

-l'absorption de la lumière dans le matériau ;

- le transfert d'énergie des photons aux charges électriques ;
- la collecte des charges ;

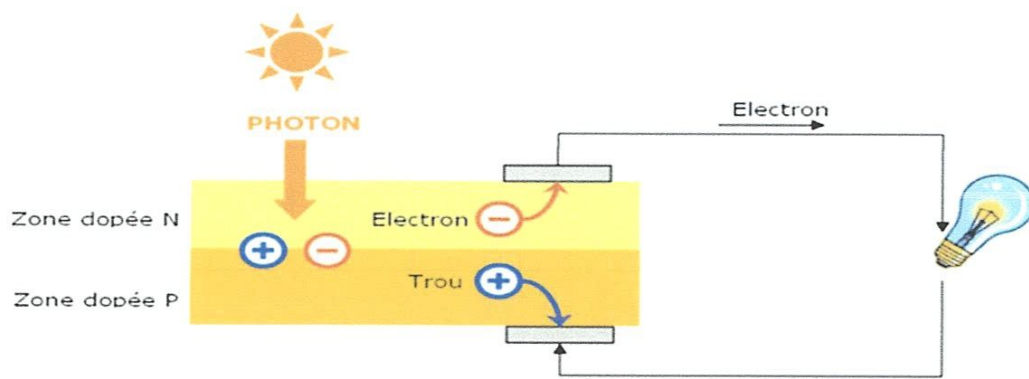
Il est donc clair qu'un matériau doit avoir des propriétés optiques et électriques spécifiques pour permettre la conversion photovoltaïque [11]. .

#### I-4-1 Effet photovoltaïque :

Découvert en 1839 par le physicien **A. Becquerel**, l'effet photovoltaïque a été peu utilisé jusqu'au début des années 60 où il a connu un développement important du fait de ses applications spatiales. L'électricité photovoltaïque, qui est aujourd'hui largement répandue notamment dans le domaine de l'électrification rurale, est obtenue par transformation directe de l'énergie lumineuse à travers un matériau semi-conducteur appelé cellule photovoltaïque ou photopile [11].

#### I-4-2-Cellule photovoltaïque

Le principe d'une cellule photovoltaïque est de transformer des photons absorbés par un semi-conducteur en porteurs de charges électriques (électrons et trous). Cette création de charges va entraîner la création d'une différence de potentiel aux bornes d'électrodes et d'un courant électrique dans un circuit connecté aux électrodes. La Figure (I-3) présente le principe de fonctionnement d'un générateur photovoltaïque d'électricité.



**Figure I-3 Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque**

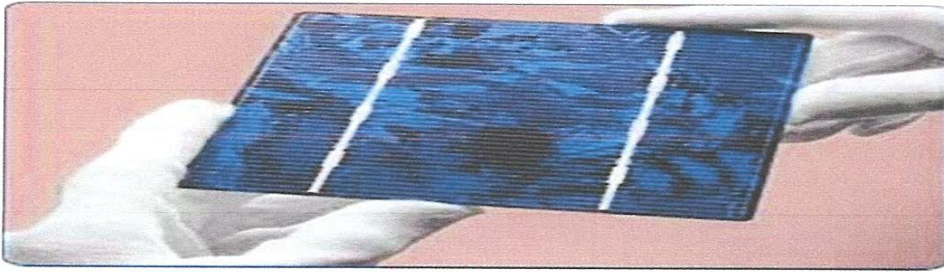
Une cellule photovoltaïque est un composant électronique qui, exposé à la lumière (photons), produit de l'électricité grâce à l'effet photovoltaïque qui est à l'origine du phénomène. La tension obtenue est fonction de la lumière incidente. La cellule photovoltaïque délivre une tension continue.

Les cellules photovoltaïques les plus répandues sont constituées de semi-conducteurs, principalement à base de silicium (Si) et plus rarement d'autres semi-conducteurs : séléniure de cuivre et d'indium ( $\text{CuIn}(\text{Se})_2$  ou  $\text{CuInGa}(\text{Se})_2$ ), tellure de cadmium (CdTe), etc. Elles se présentent généralement sous la forme de fines plaques d'une dizaine de centimètres de côté. Les cellules sont souvent réunies dans des modules solaires photovoltaïques ou panneaux solaires, en fonction de la puissance recherchée. [12]

#### I-4-2-1 Fonctionnement

Dans un semi-conducteur exposé à la lumière, un photon d'énergie suffisante arrache un électron, créant au passage un « trou ». Normalement, l'électron trouve rapidement un trou pour se replacer, et l'énergie apportée par le photon est ainsi dissipée. Le principe d'une cellule photovoltaïque est de forcer les électrons et les trous à se diriger chacun vers une face opposée du matériau au lieu de se recombiner simplement en son sein : ainsi, il apparaîtra une différence de potentiel et donc une tension entre les deux faces, comme dans une pile.

L'une des solutions, couramment utilisée, pour extraire sélectivement les électrons et les trous utilise un champ électrique au moyen d'une jonction PN, entre deux couches dopées respectivement P et N :



Cellule photovoltaïque



Panneau photovoltaïque



Champ photovoltaïque

Figure I-4 Eléments essentiels d'un système photovoltaïque

### I-5-Le fonctionnement d'un système photovoltaïque :

Un système photovoltaïque raccordé au réseau comprend les composants suivants :

- Un **générateur photovoltaïque** qui doit être exposé autant que possible de façon à

Recueillir le maximum d'ensoleillement sur l'année

-Un **onduleur** : son rôle est de transformer le courant continu fourni par le générateur photovoltaïque en un courant alternatif ayant toutes les caractéristiques du courant alternatif délivré par le réseau électrique

-**des organes de sécurité et de raccordement** au réseau qui assurent des fonctions de protection des personnes et des biens vis à vis de l'utilisateur et du réseau et de contrôle de production et de consommation

-Un **moyen de stockage de l'électricité éventuel** composé de batterie (Lithium-ion, etc....)

Il existe une difficulté technique lorsque la puissance crête dépasse une puissance de l'ordre de 5 mégawatts crête comme c'est généralement le cas des centrales PV de grande puissance. En effet, dans ce cas, le raccordement nécessite la connexion des onduleurs, au moyen de transformateurs, à un poste source Haute Tension (HT) de 63 kV (standard français). Ce raccordement peut être très coûteux si le poste HT n'est pas situé à proximité de la centrale. Pour des puissances plus réduites le raccordement au réseau se fait sans difficulté : en basse tension (220-380 volts/50 hertz) pour des puissances inférieures à 250 KWC et en moyenne tension (20 KV/50 Hertz), au moyen d'un transformateur, au-delà. La Fig. (I-5) montre le schéma simplifié d'un système photovoltaïque raccordé au réseau [13].



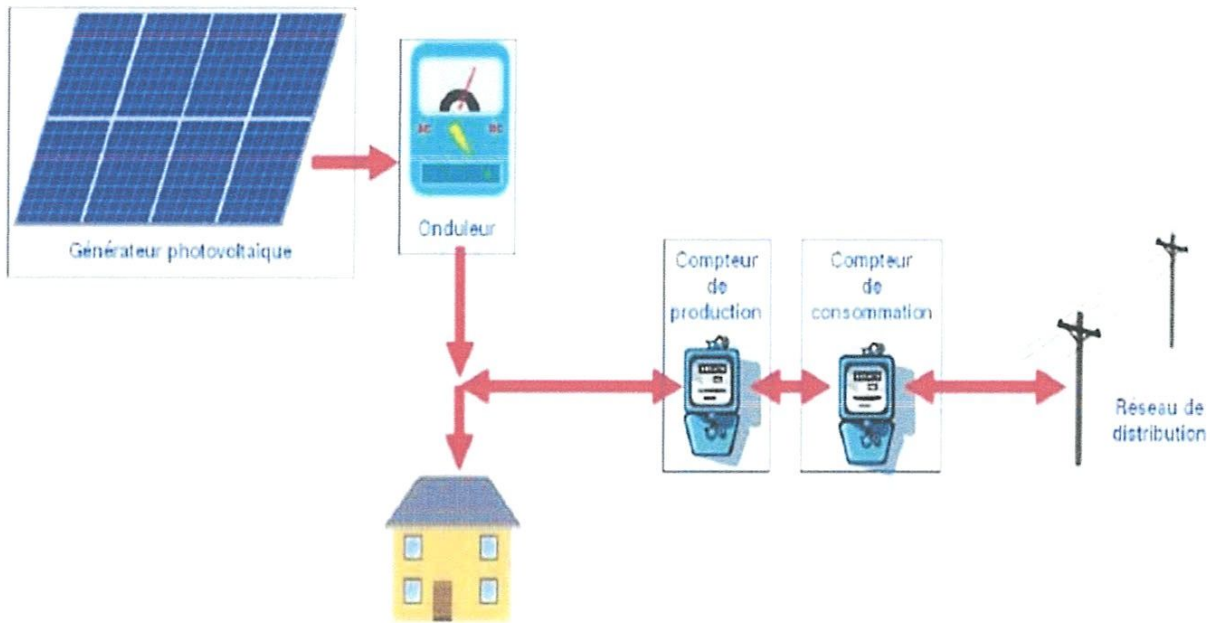


Figure I-5-Schéma simplifié d'un système photovoltaïque raccordé au réseau [13].

**I-6-Modèle De La Cellules Photovoltaïques :**

Les circuits équivalents traditionnels de la cellule solaire, représentés par une source de courant parallèlement à une ou deux diodes comme monter sur la figure (I-6-b). Le modèle simple de diode comprend quatre composants : une source de courant-photo, une diode parallèle à la source, une résistance en série  $R_s$  et une résistance de shunt  $R_p$ . Comme montré dans la figure (I-6-a) [6].

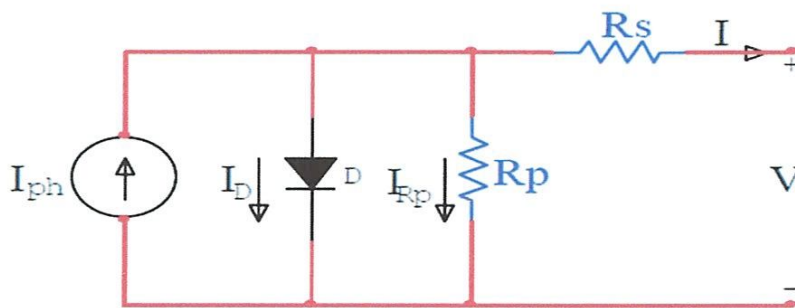


Figure I-6-a. modèle à simple de diode

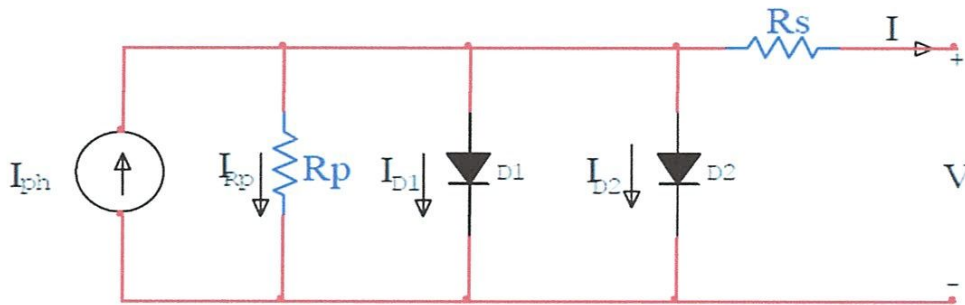


Figure I-6-b Le modèle à double diode

Le modèle de double diode inclut une diode additionnelle pour un meilleur ajustement de courbes. Ce modèle exige la connaissance de quatre Paramètres aux conditions standards de l'éclairement et de la température. Les paramètres sont généralement donnés par le fabricant ou peuvent être obtenus à partir des essais de module sous trois conditions : courant à court-circuit ( $I_{cc}$ ), tension à circuit ouvert ( $V_{oc}$ ) et la tension ( $V_{mpp}$ ) et le courant ( $I_{mpp}$ ) au point maximum de puissance.

Des coefficients de la température sont également nécessaires dans cette technique de modélisation pour considérer l'effet de la température sur les paramètres importants de la cellule solaire.

Le modèle mathématique qui associe une diode à jonction PN. On y ajoute le courant  $I_{ph}$  proportionnel à l'éclairement, ainsi qu'un terme modélisant les phénomènes internes. Le courant  $I$  issu de la cellule s'écrit alors :

$$I = I_{ph} - I_{od} \left( e^{\frac{q \cdot (V + R_s \cdot I)}{A \cdot K \cdot T}} - 1 \right) - ((V + R_s \cdot I) / R_p) \quad (I-2)$$

Avec :

$A$ : le facteur d'idéalité de la jonction ( $1 < A < 3$ ).

$I_{ph}$  : photo-courant, ou courant généré par l'éclairement (A).

$I_{od}$ : courant de saturation de la diode (A).

$R_s$ : résistance série (ohm) .

$R_p$ : résistance shunt (ohm).

$K$ : constante de Boltzmann ( $K = 1,38.10^{-23}$ ).

$q$ : charge de l'électron ( $q = 1,602.10^{-19}$  C).

$T$  : température de la cellule (°K).

### I-6-1 Modèle simplifié à une diode :

La diode modélise le comportement de la cellule dans l'obscurité. Le générateur de courant modélise le courant  $I_{ph}$  généré par un éclairement. Enfin, les deux résistances modélisent les pertes internes :

- Résistance série  $R_s$  : modélise les pertes ohmiques du matériau.
- Résistance shunt  $R_{sh}$  : modélise les courants parasites qui traversent la cellule.

Le schéma équivalent de la figure(I-7) correspondant est celui de la cellule idéale :

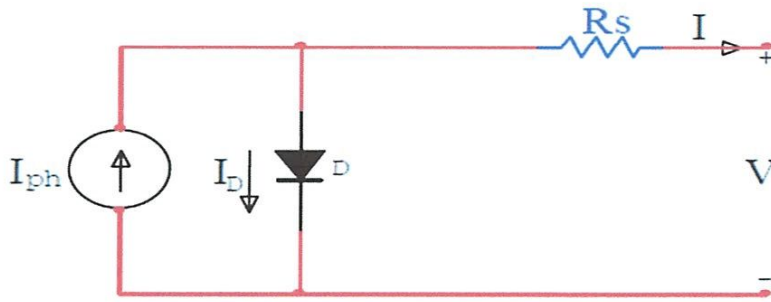


Figure I-7 la cellule idéale.

Idéalement, on peut négliger  $R_s$  et  $I$  devant  $V$ , puis travailler avec un modèle Simplifié:

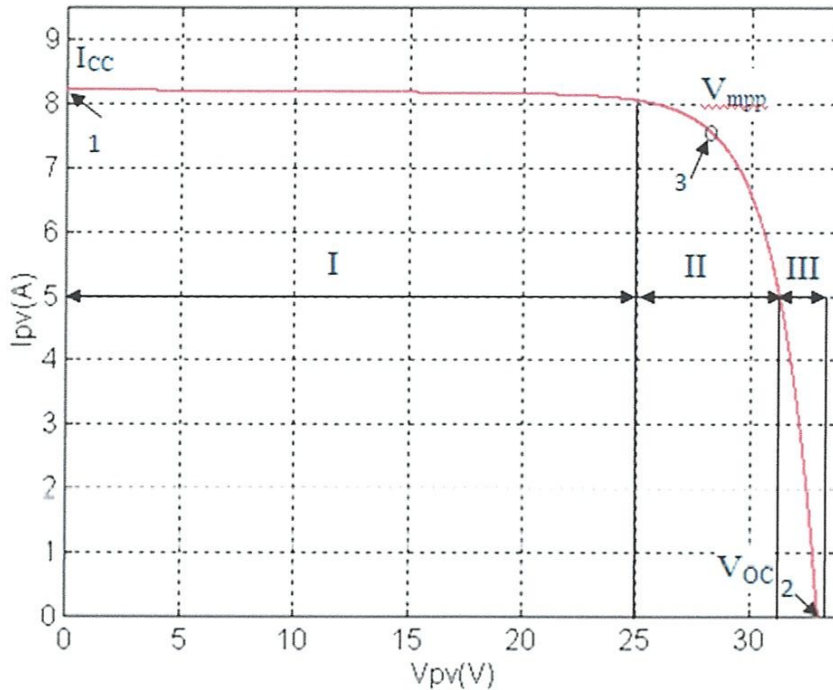
$$I = I_{ph} - I_{od} \left( e^{\frac{qV}{A.K.T}} - 1 \right) - \frac{V}{R_p} \quad (I-3)$$

Comme la résistance shunt est beaucoup plus élevée que la résistance série, on peut encore négliger le courant dévié dans  $R_{sh}$ . On obtient[14]:

$$I = I_{ph} - I_{od} \left( e^{\frac{qV}{A.K.T}} - 1 \right) \quad (I-4)$$

### I-7-Caractéristiques courant- tension

La caractéristique courant-tension d'une cellule solaire régie à toutes les charges possibles sous des conditions particulières d'ensoleillement et de température, est montrée sur la figure (I-8).



**Figure I-8** Caractéristiques courant tension d'un générateur PV.

Ci est la valeur de la charge aux bornes du générateur qui va déterminer le point de fonctionnement du système photovoltaïque. La figure (I.8) représente trois zones essentielles [7].

**La zone (I) :** où le courant reste constant quelle que soit la tension, pour cette région, le générateur photovoltaïque fonctionne comme un générateur de courant.

**La zone (II) :** correspondant au coude de la caractéristique, la région intermédiaire entre les deux zones précédentes, représente la région préférée pour le fonctionnement du générateur, où le point optimal (caractérisé par une puissance maximale) peut être déterminé.

**La zone (III) :** qui se distingue par une variation de courant correspondant à une tension presque constante, dans ce cas le générateur est assimilable à un générateur de tension.

### I-8-Paramètre d'une cellule photovoltaïque

Ces paramètres peuvent être déterminés à partir des courbes courant-tension ou de l'équation caractéristique. Les plus usuels sont les suivantes :

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

C'est le courant pour lequel la tension aux bornes de la cellule est nulle.

#### -tension de circuit ouvert $V_{oc}$

C'est la tension pour laquelle le courant débité par la cellule est nulle.

#### facteur de forme FF'

C'est le rapport ci-dessous :

$$FF = \frac{V_{mpp} I_{mpp}}{V_{oc} I_{cc}} \quad (I-5)$$

La valeur maximale de la puissance pouvant être extraite, au produit  $V_{oc} \times I_{cc}$

#### -le rendement $\eta$

Le rapport de la puissance électrique maximale pouvant être extraite, à la puissance du rayonnement incident sur la surface S de la cellule.

$$\eta = \frac{V_{mpp} I_{mpp}}{G \times S} \quad (I-6)$$

G : éclairement ( $W/m^2$ ) ;

S : surface active de la cellule ( $m^2$ ) ;

Pour une cellule du commerce, le facteur de forme est de l'ordre de 70% et le rendement de l'ordre de 12 à 14% l'examen des courbes des figures montre que cette résistance influence très vite sur la puissance maximale disponible.

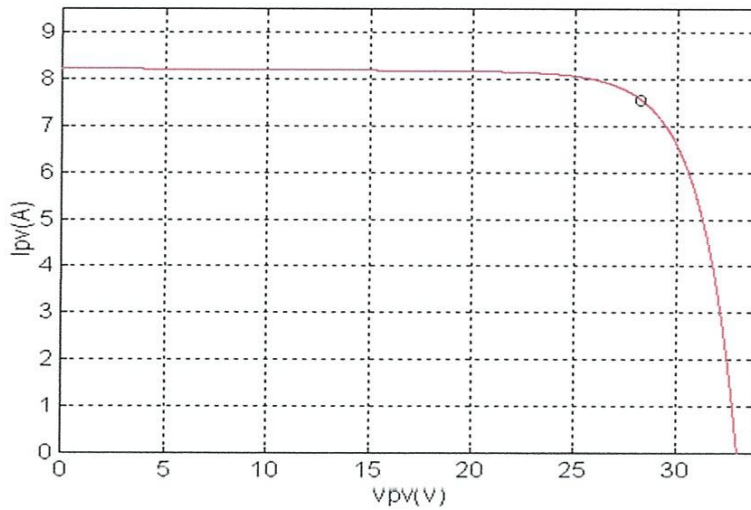


Figure I-9 Caractéristiques I-V d'un générateur PV.

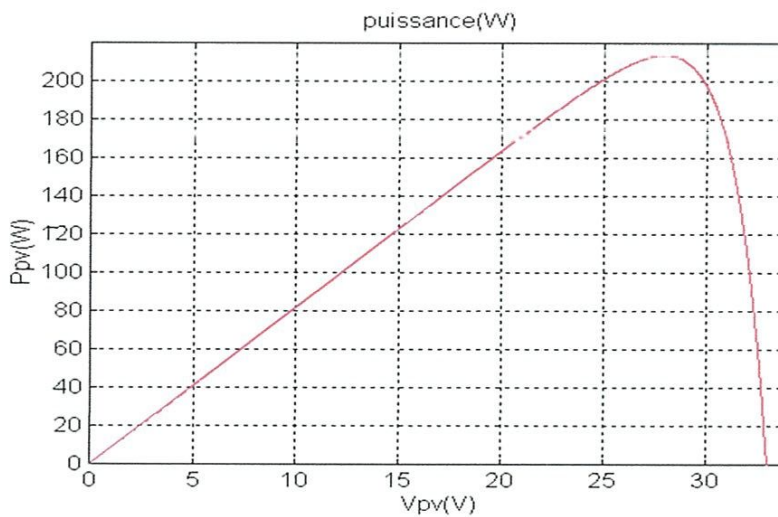


Figure I-10 Caractéristiques de puissance d'un générateur PV.

**I.9. Influence de l'éclairement**

En fonction de l'irradiante incidente (l'éclairement) sur les cellules PV, leur courbe de caractéristique V-I varie comme indiqué dans la Figure (I.11). Lorsque l'irradiante diminue, la génération de courant PV diminue proportionnellement, tandis que la variation de la tension à vide est très faible.

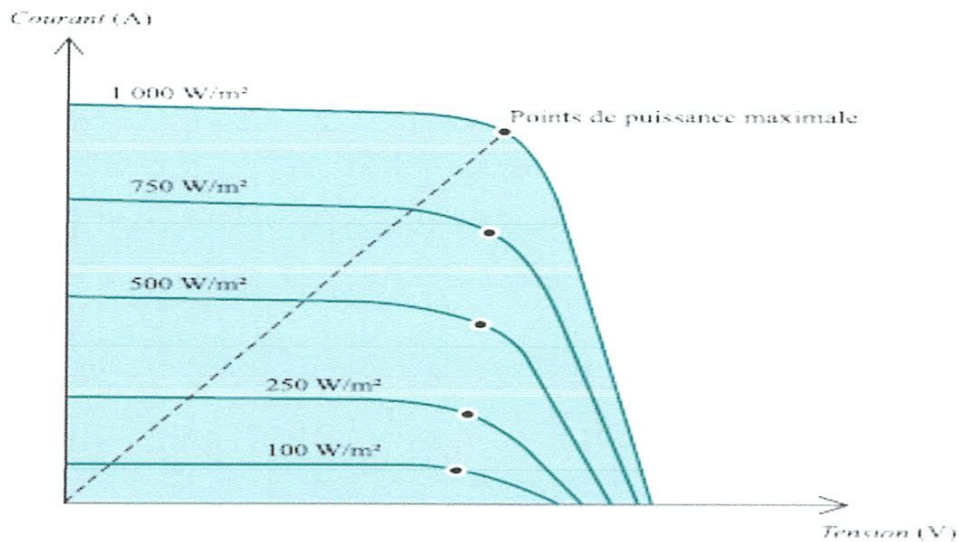


Figure I-11. Caractéristique courant-tension d'une cellule en fonction de l'éclairement.

### I.10. Influence de la température

Contrairement au cas précédent, en cas de hausse de la température des modules, le courant produit reste pratiquement inchangé, tandis que la tension diminue et entraîne une réduction des performances des panneaux en termes de production d'énergie électrique (Figure I.12).

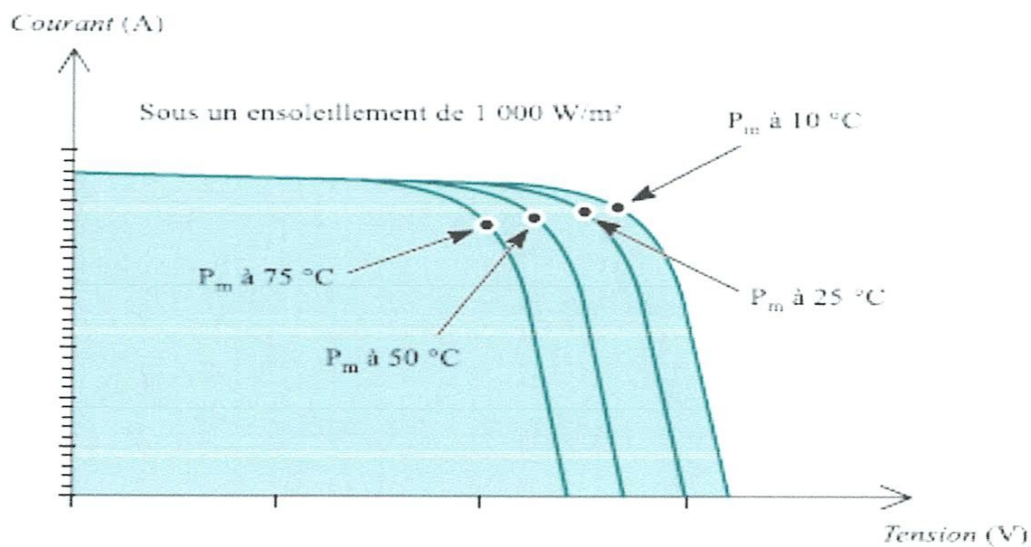


Figure I-12. Caractéristique courant-tension d'une cellule en fonction de la température



Par conséquent, pour éviter une réduction excessive des performances, il convient de contrôler la température de service en tentant de fournir une bonne ventilation aux panneaux en vue de limiter leur variation de température. De cette manière, il est possible de réduire la perte d'énergie due à la variation de température (par rapport à la température de 25°C dans des conditions standards) à une valeur de l'ordre de 7%.

### **I-11-Technique de fabrication des cellules photovoltaïque :**

Le silicium est actuellement le matériau le plus utilisé pour fabriquer les cellules photovoltaïques. On l'obtient par réduction à partir de silice, composé le plus abondant dans la croûte terrestre et notamment dans le sable ou le quartz. La première étape est la production de silicium dit métallurgique, pur à 98 % seulement, obtenu à partir de morceaux de quartz provenant de galets ou d'un gisement filonien (la technique de production industrielle ne permet pas de partir du sable). Le silicium de qualité photovoltaïque doit être purifié jusqu'à plus de 99,999 %, ce qui s'obtient en transformant le silicium en un composé chimique qui sera distillé puis retransformé en silicium. Le silicium est produit sous forme de barres nommées « lingots » de section ronde ou carrée. Ces lingots sont ensuite sciés en fines plaques mises au carré (si nécessaire) de 200 micromètres d'épaisseur qui sont appelées « wafers ». Après un traitement pour enrichir en éléments dopants (P, As, Sb ou B) et ainsi obtenir du silicium semi-conducteur de type P ou N, les wafers sont « métallisés » : des rubans de métal sont incrustés en surface et reliés à des contacts électriques. Une fois métallisés les wafers sont devenus des cellules photovoltaïques.

La production des cellules photovoltaïques nécessite de l'énergie, et on estime qu'un module photovoltaïque doit fonctionner environ deux à trois ans suivant sa

technique de fabrication pour produire l'énergie qui a été nécessaire à sa fabrication (retour énergétique du module).

Les techniques de fabrication et les caractéristiques des principaux types de cellules sont décrites dans les trois paragraphes suivants. Il existe d'autres types de cellules actuellement à l'étude, mais leur utilisation est pratiquement négligeable [16].

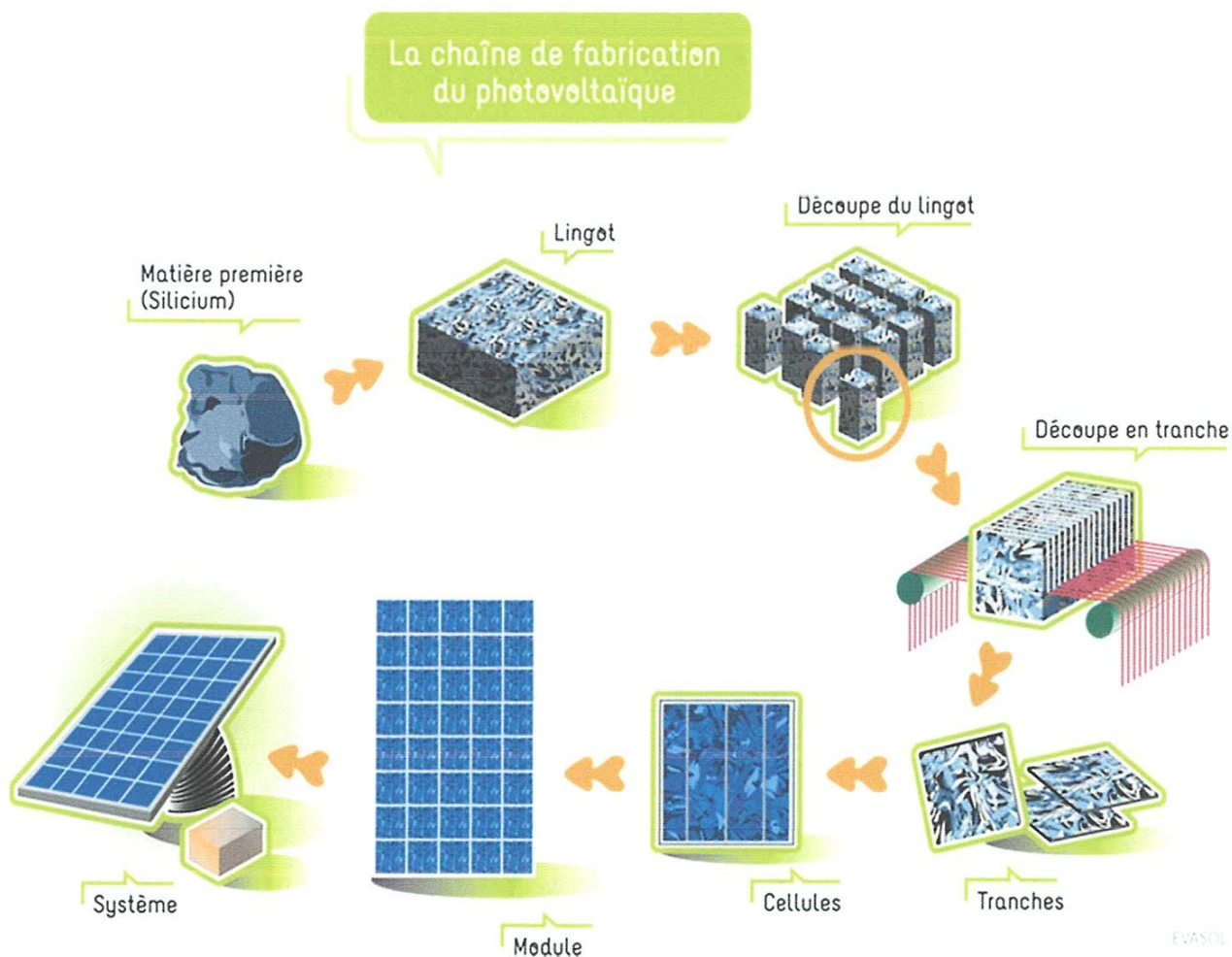


Figure I-13 Chaîne de fabrication d'un cellule, module et panneaux [16].

## I-12- Les différents types des cellules solaires photovoltaïques :

Plusieurs technologies sont actuellement développées pour réaliser des cellules photovoltaïques dont les degrés de maturité, de performance et de durée de vie sont très différents. Les principales technologies industrialisées en série à ce jour sont le silicium mono- ou poly cristallin et le silicium en couche mince.

### I-12-1-Cellule photovoltaïque en silicium monocristallin

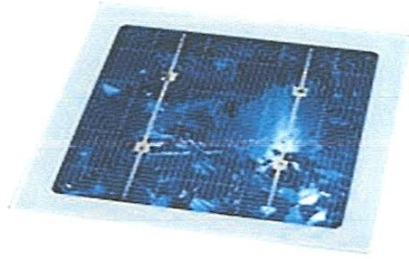


**Figure I-14 cellule monocristalline [17].**

Lors du refroidissement, le silicium fondu se solidifie en ne formant qu'un seul cristal de grande dimension. On découpe ensuite le cristal en fines tranches qui donneront les cellules. Ces cellules sont en général d'un bleu uniforme [17].

- **Avantage :**
  - bon rendement, de 14 % à 16 %,
  - bon ratio  $Wc/m^2$  ( $\sim 150 Wc/m^2$ ) ce qui permet un gain de place si nécessaire,
  - nombre de fabricants élevé.
- **Inconvénients :**
  - coût élevé.

### I-12-2-Cellule photovoltaïque en silicium multi cristallin

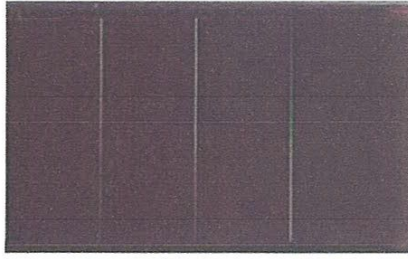


**Figure I-15 cellule multi cristallin [17].**

Pendant le refroidissement du silicium dans une lingotière, il se forme plusieurs cristaux. La cellule photovoltaïque est d'aspect bleuté, mais pas uniforme, on distingue des motifs créés par les différents cristaux.

- Avantage :
  - cellule carrée (à coins arrondis dans le cas du Si monocristallin) permettant un meilleur foisonnement dans un module,
  - bon rendement de conversion de 12 % à 15 %, environ  $100 \text{ Wc/m}^2$  (voire plus), mais cependant un peu moins bon que pour le monocristallin,
  - lingot moins cher à produire que le monocristallin.
- Inconvénients :
  - rendement faible sous un faible éclaircissement ou soleil diffus

### I-12-3-Cellule photovoltaïque en silicium amorphe



**Figure I-16 Cellule amorphe[17].**

Le silicium lors de sa transformation, produit un gaz, qui est projeté sur une feuille de verre. La cellule est gris très foncé. C'est la cellule des calculatrices et des montres dites « solaires ».

- **Avantage :**
  - fonctionne avec un éclairage faible ou diffus (même par temps couvert, y compris sous éclairage artificiel de 20 à 3000 lux),
  - un peu moins chère que les autres techniques,
  - intégration sur supports souples ou rigides.
- **Inconvénients :**
  - rendement faible en plein soleil, de 5 % à 7 %,
  - nécessité de couvrir des surfaces plus importantes que lors de l'utilisation de silicium cristallin (ratio Wc/m<sup>2</sup> plus faible, environ 60 Wc/m<sup>2</sup>),
  - \* Performances qui diminuent avec le temps dans les premiers temps d'exposition à la lumière naturelle (3-6 mois), pour se stabiliser ensuite (-10 à 20 % selon la structure de la jonction)

### I-13-Rendement d'un panneau Photovoltaïque :

Le rendement d'un module photovoltaïque est lié à la technologie des cellules le constituant et en particulier au silicium utilisé. Il existe sous plusieurs formes

dont les plus utilisées sont le silicium monocristallin et le silicium multicristallin.

Rendement commercial d'un module suivant le type de cellule :

Silicium utilisé	Rendement
silicium monocristallin	de 14 à 16%
silicium multi cristallin	de 12 à 15%
silicium amorphe	de 5 à 7%

**Tableau I.2 Rendement de silicium utilisé [17].**

#### **I.14. Influence de l'association série des cellules PV**

La cellule individuelle, unité de base d'un système photovoltaïque, ne produit qu'une très faible puissance électrique, typiquement de 0.5 W avec une tension de moins d'un volt.

Pour produire plus de puissance, les cellules sont assemblées pour former un module (ou panneau).

Un module de 36 cellules en série (Type GTO136 - 80/2) est suffisant pour obtenir une tension compatible avec la charge. Pour avoir plus de tension, il faut assembler  $N_s$  modules en série, par contre pour le courant généré, un nombre  $N_p$  de modules en parallèle permet d'en ajouter, les diodes de protection série et parallèles protègent le circuit contre le retour de courant [6].

L'association en série des cellules délivre une tension égale à la somme des tensions individuelles et un courant égal à celui d'une seule cellule [6].

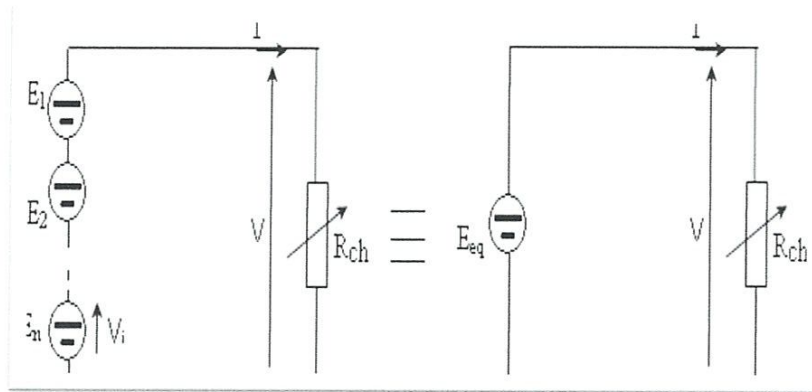


Figure 1.17 : Association de N modules solaires en série

La caractéristique d'un groupement de  $N_s$  modules solaires en série est représentée par la figure suivante :

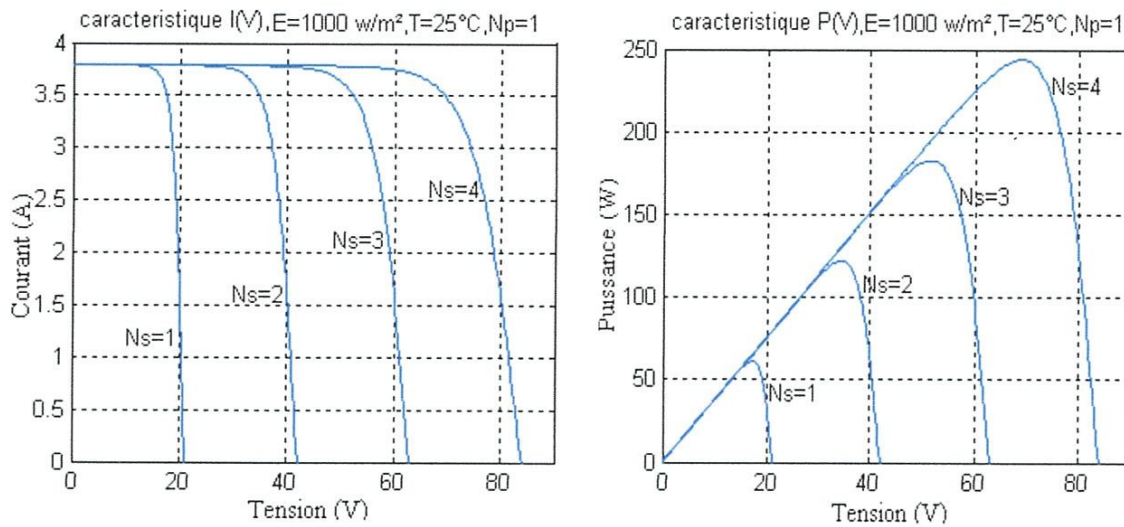


Figure I-18 : Caractéristique de nombre des modules en série

**I.15. Influence de l'association parallèle des cellules PV :**

L'association en parallèle des photopiles délivre un courant égal à la somme des courants individuels et une tension égale à celui d'une seule cellule [6].

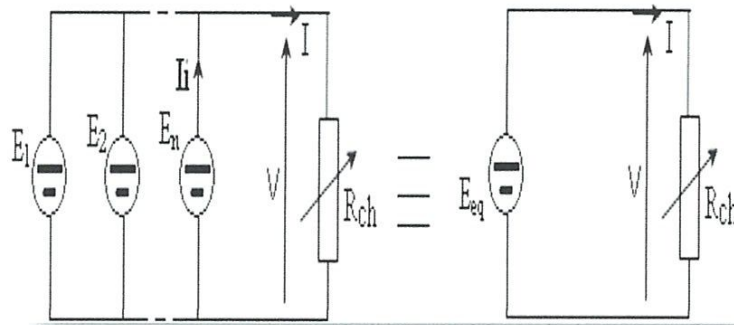


Figure I-19 : Association de  $N_p$  modules solaires en parallèle.

La caractéristique d'un groupement de  $N_p$  modules solaires en parallèle est représentée par la figure suivante :

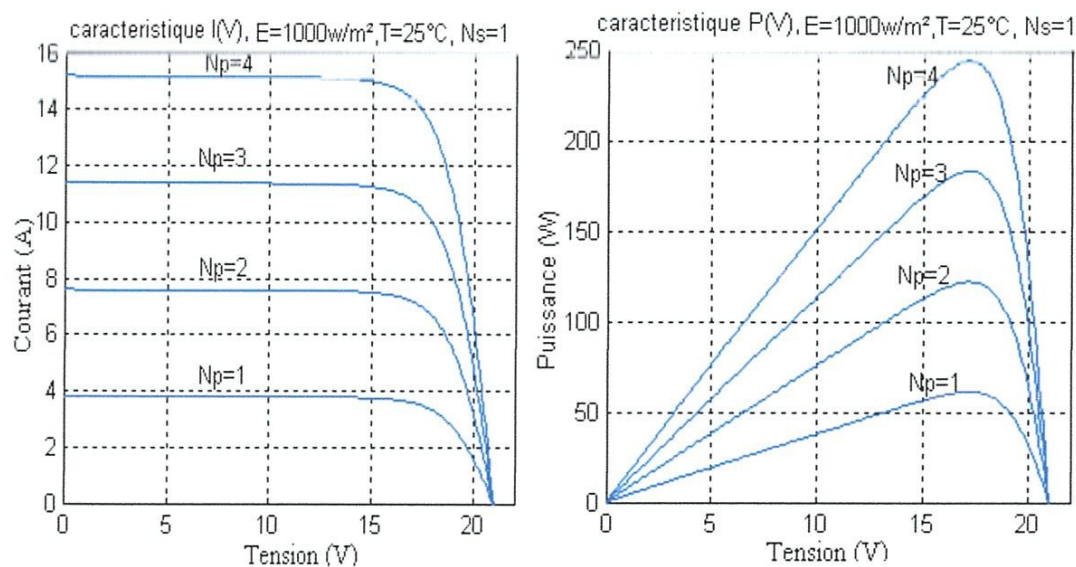


Figure I-20 : Caractéristique de nombre des modules en parallèles

**I.16. Influence de l'association mixte (Série + Parallèle) des cellules PV:**

Pour avoir une satisfaction en courant et en tension, on est obligé d'utiliser un groupement mixte, c'est à dire Série-Parallèle [6].



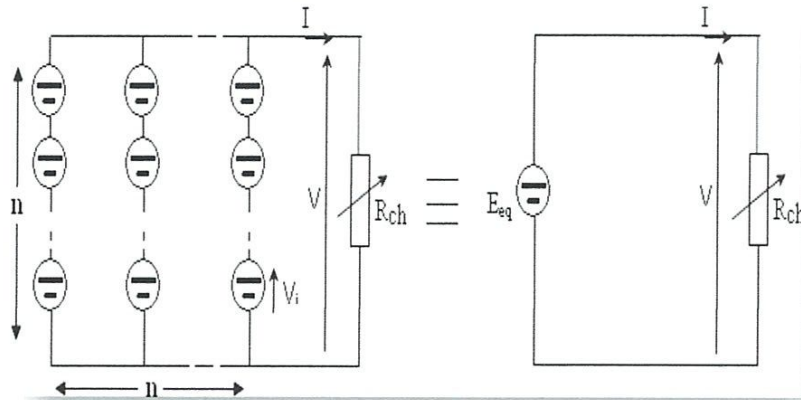


Figure I 21 : Association mixte  $N_s \times N_p$  modules solaires

La caractéristique d'un groupement de  $N_p$  et  $N_s$  modules solaires en mixte est représentée par la figure suivante :

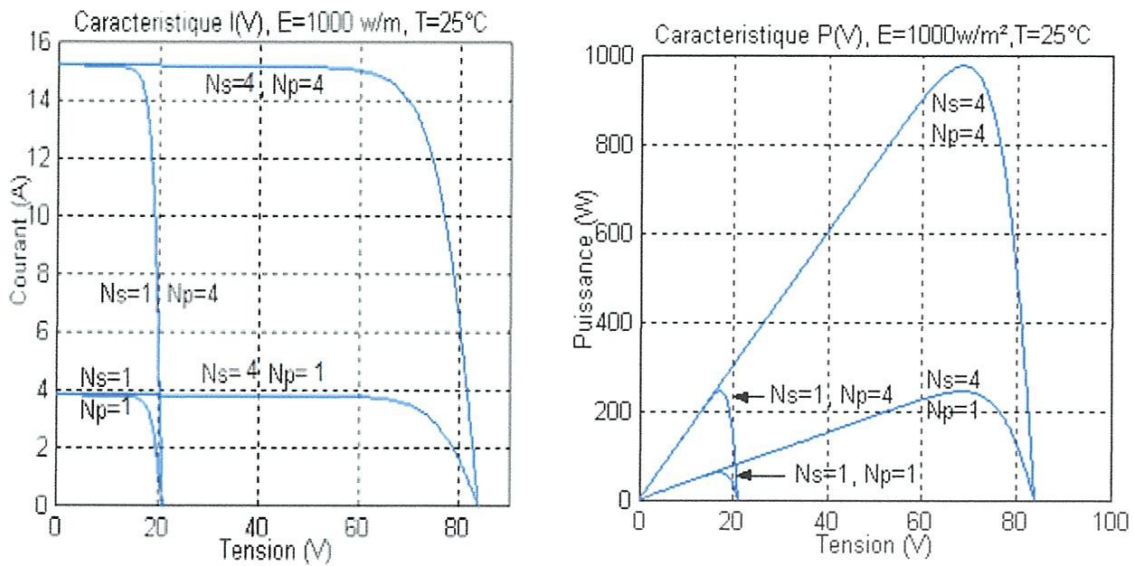


Figure I-22 : Caractéristique de nombre des modules en série et parallèle

**I-17. Conclusion :**

Dans ce chapitre nous avons présenté les principales caractéristique et les technologiques des éléments constitutifs du générateur PV et nous avons montré comment augmenter le courant ou la tension générateur photovoltaïque.

Nous avons également montre bien l'influence de la température et l'éclairement sur le rendement de la cellule, on constate que la puissance ne dépende pas seulement de la température mais dépende aussi de l'éclairement.

Enfin, soulignons que, pour en faire une source d'énergie propre proprement dite, rendre plus abordable en termes de flexibilité, de rendement et le cout.

# **Chapitre II**

## **Principe des Hacheurs et de la Commande MPPT**

### II.1. Introduction

On a vu précédemment à travers les caractéristiques d'un module solaire que la puissance maximale générée dépend fortement de l'éclairement solaire ainsi que de la température. Suite à ces dépendances, le module solaire ne peut fournir sa puissance maximale que pour une certaine tension et courant de fonctionnement, la position de ce point de fonctionnement dépendant à son tour de l'ensoleillement et de la température ainsi que de la nature de la charge. Dans ce contexte et afin que le module fournisse sa puissance maximale disponible, il faut une adaptation permanente de la charge avec le générateur photovoltaïque.

Cette adaptation pourra être réalisée par l'insertion d'un hacheur (convertisseur DC-DC) piloté par un technique de poursuite dite : «Maximum Power Point Tracking» (MPPT) [1,2,7,8].

Dans ce présent chapitre on présente le principe de fonctionnement de quelques types de convertisseurs DC-DC, utilisés dans les systèmes photovoltaïques, à savoir : le hacheur dévolteur, le hacheur survolteur et le hacheur mixte (dévolteur-survolteur).

Ainsi, on décrit la commande MPPT des convertisseurs DC-DC. On présente dans ce chapitre, quelques méthodes MPPT directes et indirectes..

### II.2. Les convertisseurs DC-DC (hacheurs)

Les hacheurs sont des convertisseurs du type continu-continu permettant de contrôler la puissance électrique dans des circuits fonctionnant en courant continu avec une très grande souplesse et un rendement élevé [7].

Le hacheur se compose de condensateurs, d'inductance et de commutateurs. Dans le cas idéal, tous ces dispositifs ne consomment aucune puissance active, c'est la raison pour laquelle on a de bons rendements dans les hacheurs [7].

La technique du découpage, apparue environ dans les années soixante, a apporté une solution au problème du mauvais rendement et de l'encombrement des alimentations séries.

Dans une alimentation à découpage (Figure II.1), la tension d'entrée est "hachée" à une fréquence donnée par un transistor alternativement passant et bloqué. Il en résulte une onde carrée de tension qu'il suffit de lisser pour obtenir finalement une tension continue [7].

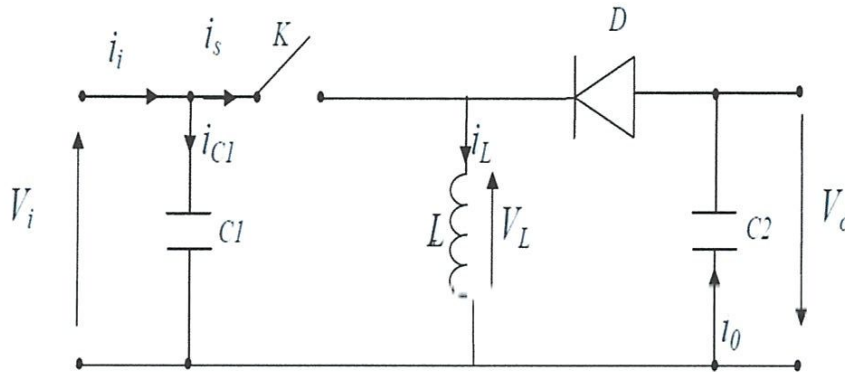


Figure (II.1) : Schéma de principe d'un type d'alimentation à découpage

D'un point de vue circuit, le hacheur apparaît comme un quadripôle (figure II.2), jouant le rôle d'organe de liaison entre deux parties d'un réseau. On peut le considérer comme un transformateur de grandeurs électriques continues [7].

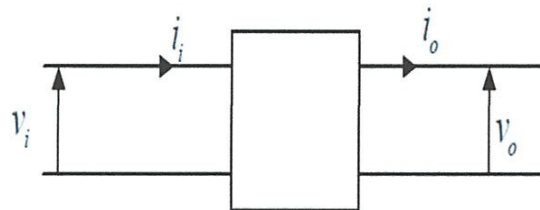
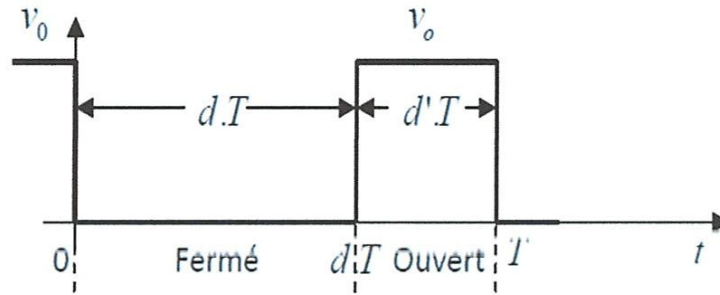


Figure (II.2) : Schéma d'un quadripôle électrique

La régulation de la tension de sortie à un niveau constant est réalisée par une action sur le "rapport cyclique", défini comme la fraction de la période de découpage où l'interrupteur est passant (figure II.3). L'interrupteur est un dispositif semi-conducteur en mode tout-rien (bloqué-saturé), habituellement un transistor MOSFET. Si le dispositif semi-conducteur est bloqué, son courant est zéro et par conséquent sa dissipation de puissance est nulle. Si le dispositif est dans l'état saturé la chute de tension à ses bornes sera presque zéro et par conséquent la puissance perdue sera très petite [7].

Pendant le fonctionnement du hacheur, le transistor sera commuté à une fréquence constante  $f_s$  avec un temps de fermeture  $=d T_s$  et un temps d'ouverture  $= (1-d) T_s$ . Où:

- $T_s$  est la période de commutation qui est égale à  $\frac{1}{f_s}$ .
- $d$  le rapport cyclique du commutateur ( $d \in [0, 1]$ ).



Figure(II.3) : périodes fermeture et ouverture d'un commutateur.

Il existe plusieurs types des convertisseurs DC-DC. Parmi les quels, on présente le principe des trios types des convertisseurs à découpage (dévolteur, survolteur et mixte), utilisés fréquemment dans les systèmes photovoltaïques pour générer les tensions et les courants souhaités ainsi que pour l'adaptation des panneaux solaires avec les déférentes charges [1,2,7,8].

### II.2.1. Hacheur dévolteur

Le convertisseur dévolteur peut être souvent trouvé dans la littérature sous le nom de hacheur buck ou hacheur série. La figure (II.4) présente le schéma de principe du convertisseur dévolteur [7]. Son application typique est de convertir sa tension d'entrée en une tension de sortie inférieure, où le rapport de conversion  $M = \frac{V_o}{V_i}$  change avec le rapport cyclique du commutateur.

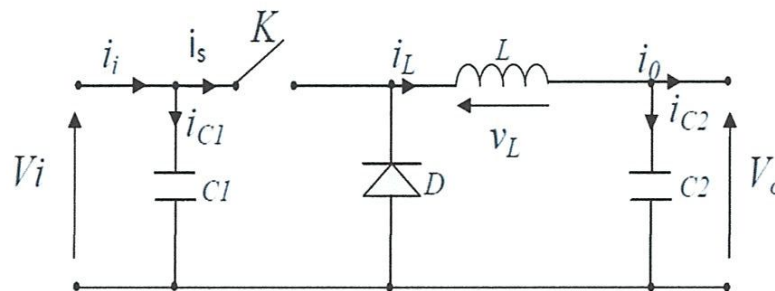


Figure (II.4) : Schéma de principe d'un convertisseur dévolteur.

Savoir le comportement réel de ce convertisseur, nécessite de connaître en détail son modèle mathématique. Pour cela nous devons faire la représentation du circuit équivalent par les deux états du commutateur et de tirer par suite le modèle mathématique reliant les variables d'entrée/sortie. La figure (II.5) montre les schémas des circuits équivalents d'un convertisseur dévolteur dans les deux cas : l'interrupteur fermé pendant  $dT_s$  et l'interrupteur ouvert pendant  $(1-d)T_s$  [1,2,7,8].

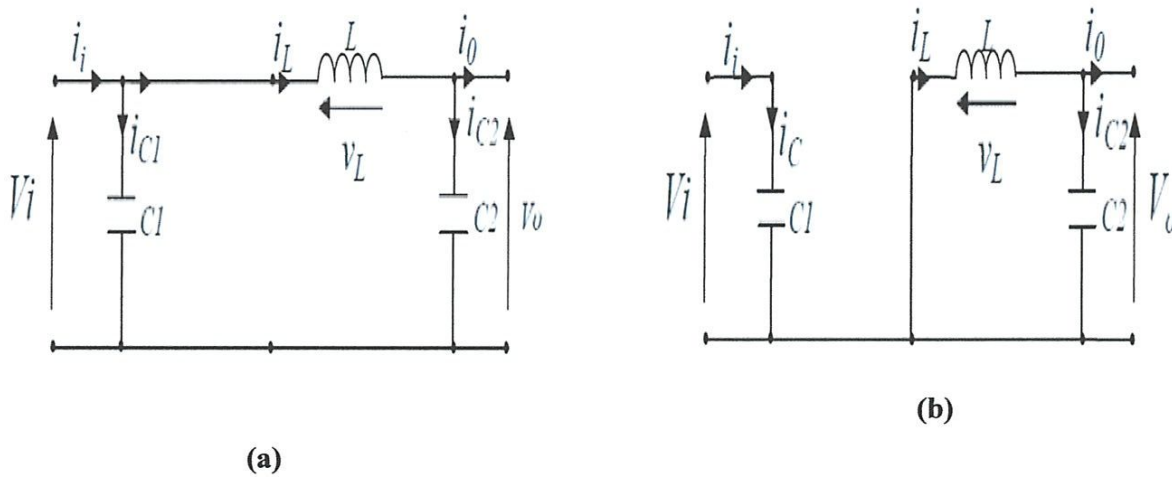


Figure (II.5) : Schémas équivalents du hacheur dévolteur,

(a) : K fermé, (b) : ouvert

En appliquant les lois de Kirchhoff sur les deux circuits de la figure (II.5), on obtient les systèmes d'équations suivants :

Pour la première période  $d.T_s$  :

$$\begin{cases} i_{c1}(t) = C_1 \frac{dv_i(t)}{dt} = i_i(t) - i_L(t) \\ i_{c2}(t) = C_2 \frac{dv_o(t)}{dt} = i_L(t) - i_o(t) \\ V_L(t) = L \frac{di_L}{dt} = V_i(t) - V_o(t) \end{cases} \quad (II.1)$$

Pour la deuxième période  $(1-d)T_s$  :

$$\begin{cases} i_{c1}(t) = C_1 \frac{dv_i(t)}{dt} = i_i(t) \\ i_{c2}(t) = L \frac{di_L(t)}{dt} = i_L(t) - i_o(t) \\ V_L(t) = L \frac{di_L}{dt} = -V_o(t) \end{cases} \quad (II.2)$$

Pour trouver une représentation dynamique valable pour tout la période  $T_s$ , on utilise généralement l'expression suivante [7] :

$$\left\langle \frac{dx}{dt} \right\rangle T_s = \frac{dx}{dt_{DT_s}} dT_s + \frac{dx}{dt_{(1-d)T_s}} (1-d)T_s \quad (II.3)$$

En appliquant la relation (II.3) sur les systèmes d'équations (II.1) et (II.2), on obtient les équations qui régissent le système sur une période entière :

Pour la première période  $d.T_s$

$$\begin{cases} C_1 \frac{dv_i(t)}{dt} T_s = dT_s(i_i - i_L) + (1-d)T_s i_i \\ C_2 \frac{dv_o(t)}{dt} T_s = dT_s(i_L - i_o) + (1-d)T_s(i_L - i_o) \\ L \frac{di_L}{dt} = dT_s(V_i - V_o) + (1-d)T_s(-V_o) \end{cases} \quad (II.4)$$

Après arrangement, on obtient :

$$\begin{cases} i_o(t) = i_L(t) - C_2 \frac{dv_o(t)}{dt} \\ i_L(t) = \frac{1}{d} (i_i(t) - C_1 \frac{dv_i(t)}{dt}) \\ V_i(t) = \frac{1}{d} (L \frac{di_L(t)}{dt} + V_o(t)) \end{cases} \quad (II.5)$$

### II.2.2. Hacheur survolteur

Ce dernier est un convertisseur survolteur, connu aussi sous le nom de « boost » ou hacheur parallèle ; son schéma de principe de base est celui de la figure (II.6). Son application typique est de convertir sa tension d'entrée en une tension de sortie supérieure [7].

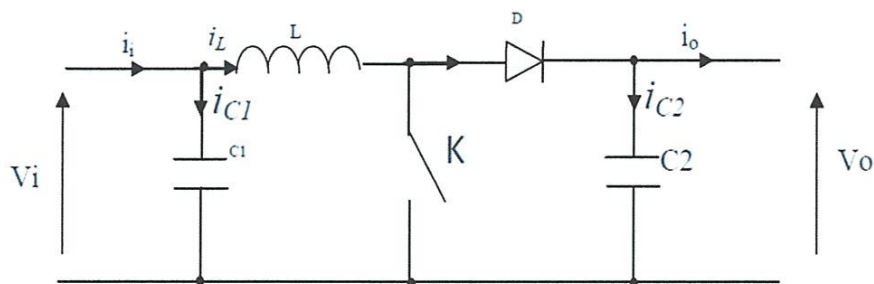


Figure (II.6) : Schéma de principe d'un convertisseur Boost



Comme pour le convertisseur dévolteur, l'application des lois de Kirchhoff sur les circuits équivalents du convertisseur survolteur (voir figure II.7) des deux phases de fonctionnement donne [7] :

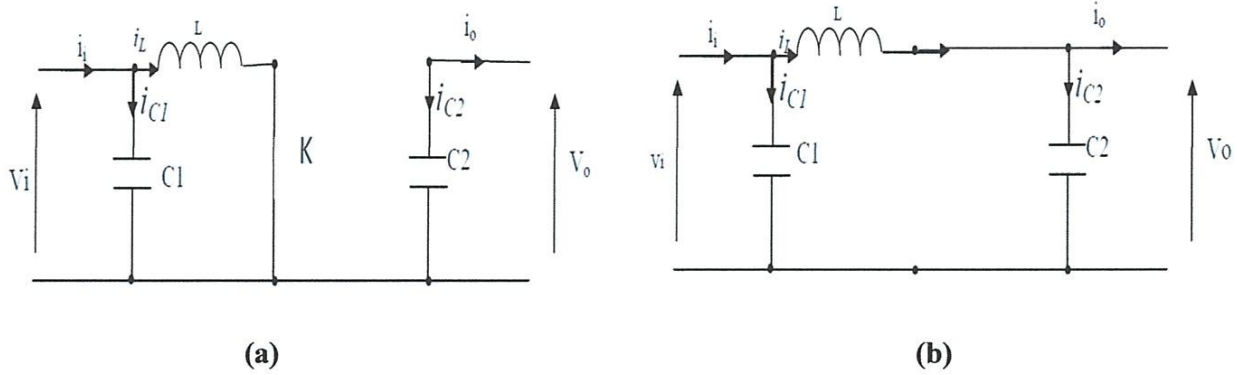


Figure (II.7) : Schémas équivalents du hacheur survolteur,

(a) : K fermé, (b) : ouvert

Pour la première période d.Ts :

$$\begin{cases} i_{c1}(t) = C_1 \frac{dv_i(t)}{dt} = i_i(t) - i_L(t) \\ i_{c2}(t) = C_2 \frac{dv_o(t)}{dt} = -i_o(t) \\ V_L(t) = L \frac{di_L}{dt} = -V_i(t) \end{cases} \quad (II.6)$$

Pour la deuxième période (1-d)Ts

$$\begin{cases} i_{c1}(t) = C_1 \frac{dv_i(t)}{dt} = i_i(t) - i_L(t) \\ i_{c2}(t) = C_2 \frac{dv_o(t)}{dt} = i_L(t) - i_o(t) \\ V_L(t) = L \frac{di_L}{dt} = V_i(t) - V_o(t) \end{cases} \quad (II.7)$$

En appliquant la relation (II.3) sur les systèmes d'équations (II.6) et (II.7), Comme pour le convertisseur dévolteur, on trouve le modèle approximé du convertisseur survolteur [7] :

$$\begin{cases} i_L = i_i - C_1 \frac{dv_i(t)}{dt} \\ i_o = (1 - d)i_L - C_2 \frac{dv_o(t)}{dt} \\ V_i = L \frac{di_L}{dt} + (1 - d)V_o \end{cases} \quad (II.8)$$

II.2.3. Hacheur dévolteur-survolteur

Le convertisseur dévolteur-survolteur combine les propriétés des deux convertisseurs précédents, il est utilisé comme un transformateur idéal de n'importe quelle tension d'entrée pour n'importe quelle tension de sortie désirée ; son schéma de base est illustré par la figure (II.8) [7] :

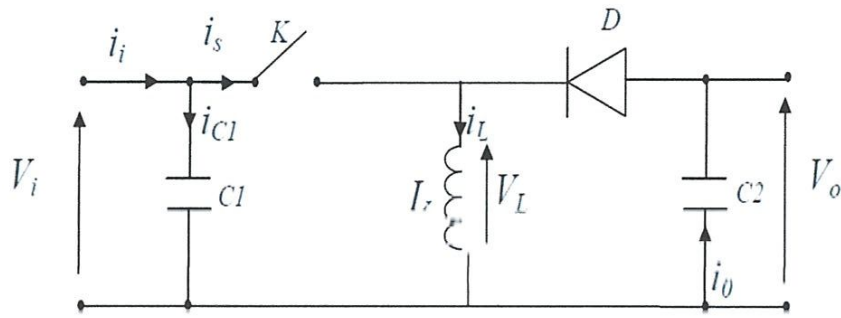


Figure (II.8) : Convertisseur dévolteur-survolteur

La figure (II.9) montre les deux schémas équivalents du convertisseur dévolteur-survolteur pour les deux cycles deux fonctionnements [7].

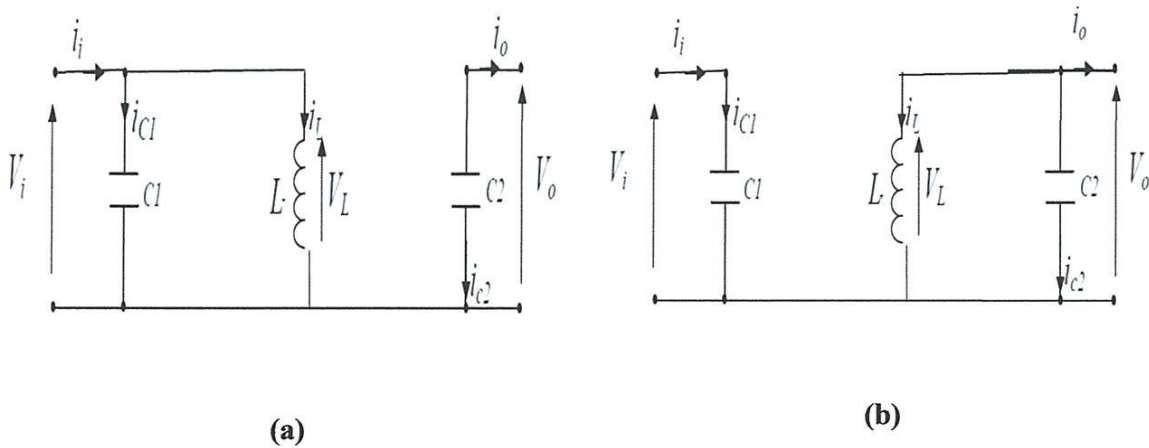


Figure (II.9) : Schémas équivalents du hacheur dévolteur-survolteur,

(a) : K fermé, (b) : K ouvert

En appliquant la loi de Kirchhoff sur les deux circuits équivalents du convertisseur dévolteur-survolteur des deux phases de fonctionnement, on obtient:

Pour la première période  $d.T_s$  :

$$\begin{cases} i_{c1}(t) = C_1 \frac{dV_i(t)}{dt} = i_i(t) - i_L(t) \\ i_{c2}(t) = C_2 \frac{dV_o(t)}{dt} = -i_o(t) \\ V_L(t) = L \frac{di_L}{dt} = V_i(t) \end{cases} \quad (\text{II.9})$$

Pour la deuxième période  $(1-d)T_s$

$$\begin{cases} i_{c1}(t) = C_1 \frac{dV_i(t)}{dt} = i_i(t) \\ i_{c2}(t) = C_2 \frac{dV_o(t)}{dt} = i_L(t) - i_o(t) \\ V_L(t) = L \frac{di_L}{dt} = V_o(t) \end{cases} \quad (\text{II.10})$$

En appliquant la relation (II.3) sur les systèmes d'équations (II.9) et (II.10), on trouve le modèle approximé du convertisseur dévolteur survolteur [7] :

$$\begin{cases} i_L = \frac{1}{d} (i_i - C_1 \frac{dV_i(t)}{dt}) \\ i_o = -(1-d)i_L - C_2 \frac{dV_o(t)}{dt} \\ V_i = \frac{1}{d} (-(1-d)V_o + L \frac{di_L}{dt}) \end{cases} \quad (\text{II.11})$$

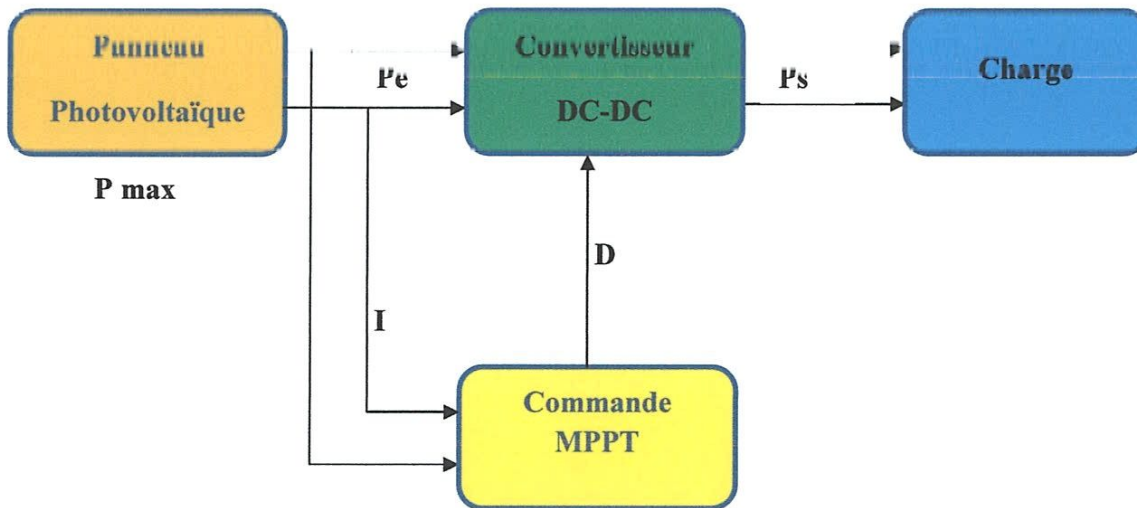
### II-3. Recherche du point de puissance maximale du générateur photovoltaïque

La poursuite du point maximum de la puissance (MPPT) est une partie essentielle dans les systèmes photovoltaïques. Plusieurs techniques sont développées depuis 1968 date de publication de la première loi de commande de ce type adaptées à une source d'énergie renouvelable de type PV. Ces techniques se différencient entre elles par leur complexité, nombre de capteurs requis, la vitesse de convergence, coût, rendement et domaine d'application [16] .

### II.3.1. Principe du 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 ( $V_{mpp}$ ,  $I_{mpp}$ ) [16].

L'adaptation d'impédance est souvent sous forme d'un convertisseur DC – DC comme représenté sur la figure (II.10).



**Figure (II.10) : Chaîne de conversion d'énergie solaire comprenant une commande MPPT.**

La technique de contrôle communément utilisée consiste à agir sur le rapport cyclique de manière automatique pour amener le générateur à sa valeur optimale de fonctionnement qu'elles que soient les instabilités météorologiques ou variations brutales de charges qui peuvent survenir.

La figure (II.11) illustre trois cas de perturbations. Suivant le type de perturbation, le point de fonctionnement bascule du point de puissance maximal PPM1 vers un nouveau point P1 de fonctionnement plus ou moins éloigné de l'optimum.

-*Pour une variation d'ensoleillement (cas a)*, Il suffit de réajuster la valeur du rapport cyclique pour converger vers le nouveau point de puissance maximum PPM2.

-*Variations de température de fonctionnement du GPV(cas c)*. Bien qu'il faille également agir au niveau de la commande.

-*Pour une variation de charge (cas b)*. On peut également constater une modification du point de fonctionnement qui peut retrouver une nouvelle position optimale grâce à l'action d'une commande.

-En résumé, le suivi du PPM réalisé au moyen d'une commande spécifique nommée MPPT agit essentiellement sur le rapport cyclique du convertisseur statique (CS) pour rechercher et atteindre le PPM du GPV.

Il existe plusieurs principes de fonctionnement des commandes MPPT plus ou moins performantes basées sur les propriétés du GPV [12].

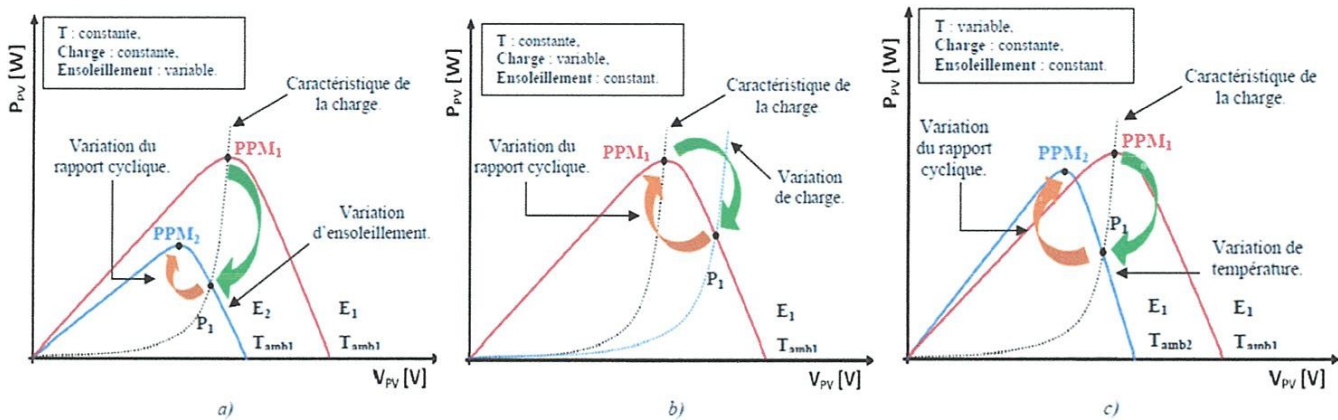


figure (II.11) : Recherche et recouvrement du Point de Puissance Maximale a) suite à une variation d'éclairement, b) suite à une variation de charge, c) suite à une variation de température.

### II.3.2. Synthèse des différentes techniques de maximisation de la puissance

Ces dernières années plusieurs dispositifs ont été développés, aussi élaborés les uns que les autres. En effet, les différentes méthodes de maximisation de puissance sont classées en deux catégories : les méthodes indirectes et les méthodes directes.

II.3.2.1. Les méthodes indirectes

Les méthodes indirectes utilisent des bases de données regroupant les caractéristiques des panneaux photovoltaïques (PV) dans différentes conditions climatiques (température, ensoleillement...), mais aussi des équations mathématiques empiriques permettant de déterminer le point de puissance maximum. Ces méthodes sont souvent propres à chaque type de panneau et donc difficile à généraliser. Parmi elles, on peut citer :

- Méthode à contre réaction de tension (Algorithme de la Tension Constante)
- Méthode à contre réaction de courant (Algorithme du Courant constant)

II.3.2.1.1. Méthode à contre réaction de tension :

Dans ce cas on se repose sur la commande de la tension de fonctionnement des panneaux, par la comparaison de cette tension avec une tension de référence. Cela génère une tension d'erreur qui fait varier le rapport cyclique de la commande PWM afin d'annuler cette erreur [16].

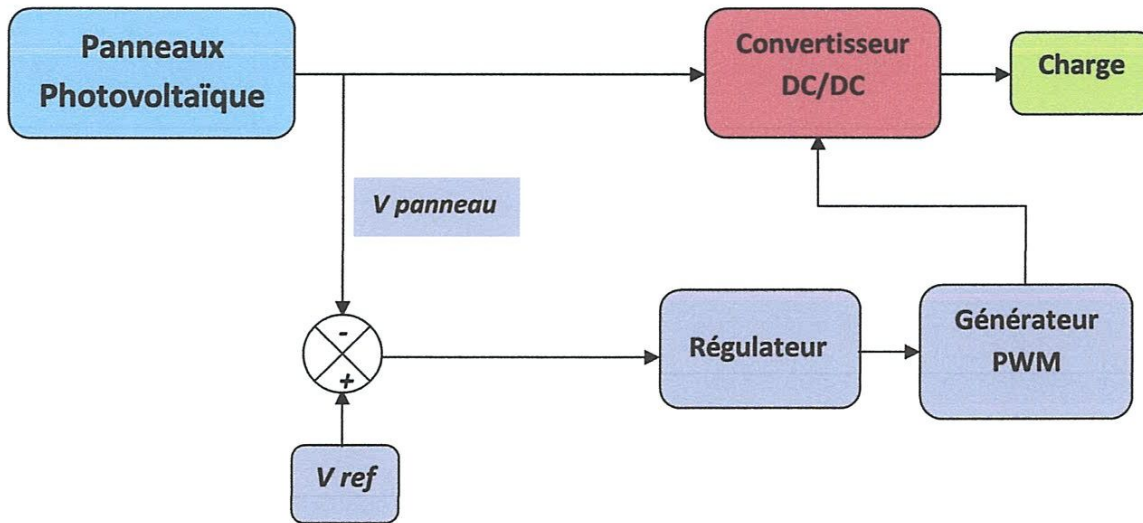


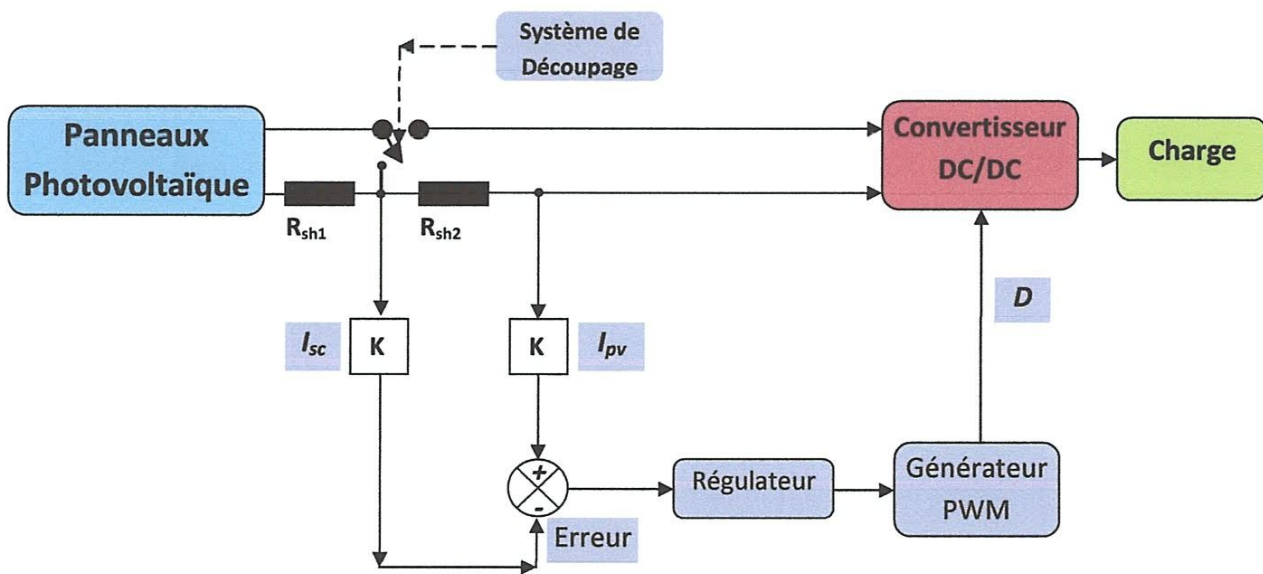
Figure (II.12) : Principe de la méthode à contre réaction de tension avec tension de référence.

On a trois types de cette méthode selon la nature de la tension de référence (fixe ou variable, interne ou externe).

- Référence fixe.
- Référence en fonction de  $V_{oc}$ .
- Tension de référence externe (Cellule pilote).

**II.3.2.1.2. Méthodes à contre réaction de courant :**

Par analogie avec les méthodes de contre réaction de tension on a le schéma décrit par la figure (II.13) [16].



**Figure (II.13) : Principe de la méthode MPPT à courant de référence en fonction de  $I_{cc}$ .**

Ainsi nous avons présenté les méthodes suivantes :

- Référence en fonction du courant de court-circuit  $I_{cc}$  .
- Référence externe (Cellule pilote).

**II.3.2.2. Les méthodes directes**

Les méthodes directes sont des méthodes qui utilisent les mesures de tension et de courant des panneaux et dont l’algorithme est basé sur la variation de ces mesures. L’avantage de ces algorithmes est qu’ils ne nécessitent pas une connaissance préalable des caractéristiques des panneaux PV. Parmi ces méthodes, on retrouve :

- Méthode de Perturbation et Observation (P&O, Perturb and Observe)
- Méthode de Conductance Incrémentale (IncCond, Incremental Conductance)

### II.3.2.2.1. Algorithme d'incrémental de l'inductance

Dans cet algorithme la dérivée de la puissance de sortie du panneau est calculée d'une autre manière. Elle est calculée en fonction de la tension  $V$  et sa différence  $dV$  et du courant  $I$  et sa différence  $dI$ . Cette dérivée est nulle au point de puissance maximale, positive à gauche du point MPP et négative à droite [4,8].

La puissance du panneau solaire est donnée par :

$$P = IV \quad (\text{II.12})$$

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

$$\frac{dP}{dV} = I + V \frac{dI}{dV} \quad (\text{II.13})$$

$$\frac{1}{V} \frac{dP}{dV} = \frac{I}{V} + \frac{dI}{dV} \quad (\text{II.14})$$

On définit la conductance de la source  $G = \frac{I}{V}$  et l'incrémentale conductance  $\Delta G = \frac{dI}{dV}$

Puisque la tension  $V$  du panneau est toujours positive, les relations (II.15) explique que le point de puissance maximale MPP est atteint si la conductance de la source  $G$  égale l'incrémentale conductance  $\Delta G$  de la source avec un signe moins, et qu'elle est à gauche de ce point lorsque la conductance  $G$  est supérieure à l'incrémentale conductance  $\Delta G$  et vice-versa, comme suit :



$$\begin{cases} \frac{dP}{dV} > 0 & \text{si } \frac{I}{V} > -\frac{dI}{dV} \\ \frac{dP}{dV} = 0 & \text{si } \frac{I}{V} = -\frac{dI}{dV} \\ \frac{dP}{dV} < 0 & \text{si } \frac{I}{V} < -\frac{dI}{dV} \end{cases} \quad (\text{II.15})$$

La figure (II.14) présente le signe de  $\frac{dP}{dV}$  pour différentes zones de fonctionnement

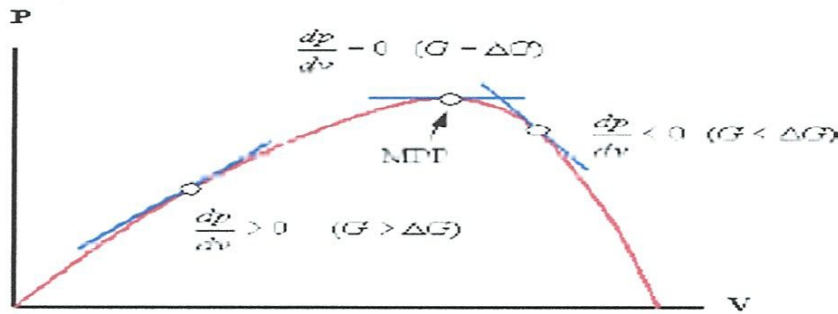


Figure (II.14): Signe de  $\frac{dP}{dV}$  pour différentes zones de fonctionnement

Les tensions et courants du panneau sont monitorés, de telle manière que le contrôleur peut calculer la conductance et la conductance incrémentale, et décider de son comportement. Cet algorithme implique un nombre important de calculs de dérivées [4].

### II.3.2.2.2. Méthode de perturbation et d'observation (P&O)

La méthode de perturbation et d'observation « P/O » est une approche largement répandue dans la recherche du MPPT parce qu'elle est simple et exige seulement des mesures de tension et du courant du panneau photovoltaïque  $V_{pv}$  et  $I_{pv}$  respectivement. Elle peut déduire le point de puissance maximale même lors des variations de l'éclairement et la température [11].

Comme son nom l'indique, la méthode P&O fonctionne avec la perturbation de la tension  $V_{pv}$  et l'observation de l'impact de ce changement sur la puissance de sortie du générateur PV. Au début on fait définir les valeurs initiales :  $I_{réf}$ ,  $\Delta I_{réf}$ ,  $P_{old}$  à chaque cycle,  $V_{pv}$  et  $I_{pv}$  sont mesurés afin de calculer  $P_{pv}$ .

Cette valeur de  $P_{pv}$  est comparée à la valeur  $P_{old}$  calculée au cycle précédent. Si la puissance de sortie a augmenté,  $I_{ref}$  est ajustée dans la même direction que dans le cycle précédent et  $I_{ref} = I_{ref} + \Delta I_{ref}$ ,  $P_{old} = P_{pv}$ .

Si la puissance de sortie a diminué,  $I_{ref}$  est ajustée dans la direction opposée que dans le cycle précédent  $I_{ref}$  est ainsi perturbée à chaque cycle de MPPT quand le point de puissance maximale est atteint,  $I_{ref}$  oscille autour de la valeur optimale  $I_{ref} - \Delta I_{ref}$  Ceci cause une perte de puissance qui augmente avec le pas d'incrément de la perturbation.

Si l'incrément est large, l'algorithme du MPPT répond rapidement aux changements soudains des conditions de fonctionnement [13].

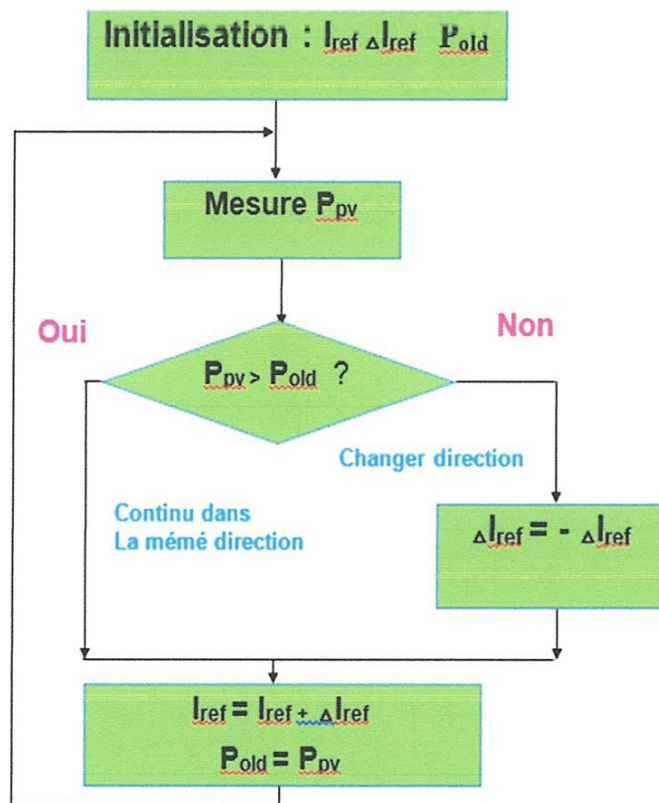


Figure (II.15) : Organigramme de la méthode de perturbation et d'observation

Si une augmentation brutale de l'ensoleillement est produite, on aura une augmentation de la puissance du panneau. L'algorithme précédent réagit comme si cette augmentation est produite par l'effet de perturbation précédente, alors il continue dans la même direction qui est une mauvaise direction, ce qui l'éloigne du vrai point de puissance maximale. Ceci cause un

retard de réponse lors des changements soudains de fonctionnement et des pertes de puissance [8].

Pour remédier à l'inconvénient majeur de la déviation de cette méthode lors de la recherche du MPP durant l'augmentation rapide des niveaux d'insolation, une version améliorée de cet algorithme est proposée, où on introduit une nouvelle condition dans la branche « *Oui* » de condition  $\Delta P(k) > 0$  dans la structure de l'organigramme de l'algorithme de P&O [1,2,8].

#### II.4. Conclusion

Dans ce chapitre, on a exposé les principales topologies de base des convertisseurs continus-continus tels que : le convertisseur dévolteur, convertisseur survolteur et convertisseur dévolteur-survolteur. On a présenté aussi quelques méthodes de commande MPPT des convertisseurs DC-DC pour rechercher le point où la puissance du générateur photovoltaïque est maximale, sous différentes conditions de fonctionnement, à savoir : méthode à contre réaction de tension et méthode à contre réaction de courant. Ainsi que l'algorithme d'incrémentement de l'inductance et méthode de perturbation et observation.

## **Chapitre III**

# **Modélisation et Simulation de la chaine de conversion PV**

### III.1. Introduction :

Dans ce chapitre, on présentera une étude de modélisation et de simulation d'un système photovoltaïque adapté par une commande MPPT numérique « perturbation et observation ». Ce système comprend un générateur photovoltaïque, un convertisseur survolteur « boost », une commande MPPT « perturbation et observation ».

Le contrôle de la puissance, ainsi que la modélisation et la simulation ont été effectués sous le logiciel MATLAB/Simulink.

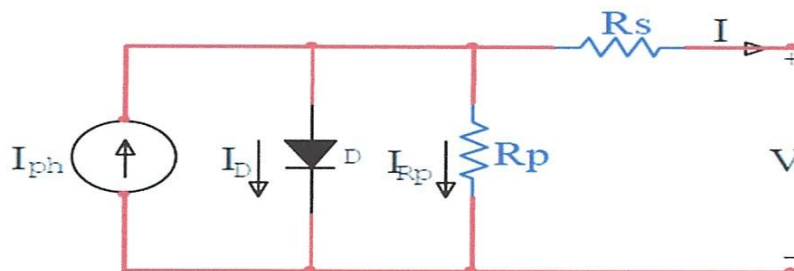
### III.2. Modélisation et simulation du générateur photovoltaïque

#### III.2.1. Modélisation du GPV

De nombreux modèles mathématiques de générateurs photovoltaïques, ont été développés pour représenter leur comportement très fortement non linéaire qui résulte de celui des jonctions semi-conductrices qui sont à la base de leurs réalisations.

Ainsi le modèle adopté fait intervenir un générateur de courant, une diode pour les phénomènes de polarisation de la cellule, une résistance série  $R_s$  représentant les diverses résistances de contacts et de connexions et une résistance parallèle  $R_p$  caractérisant les divers courants de fuites dus à la diode et aux effets de bords de la jonction (voir figure. I.6.a).

En effet, le générateur photovoltaïque est représenté par un modèle standard à une seule diode, établi par une seule cellule PV, et généralisé à un module PV en le considérant comme un ensemble de cellules identiques branchées en série-parallèle. Le schéma du circuit électrique est représenté par la figure (III.1) :



**Figure (III.1) : Circuit électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque**

Plusieurs modèles mathématiques sont utilisés pour simuler le fonctionnement d'un générateur photovoltaïque. Ces modèles se différencient par la méthode de calcul et le nombre des paramètres intervenants dans la caractéristique courant-tension.

Dans ce cas, on a choisi un modèle simple ne nécessitant que les paramètres donnés par le fabricant, la caractéristique I-V de ce modèle est donnée par (chapitre équation (I.3)):

$$I_{pv} = I_{ph} - I_{sat} \left[ \exp\left(\frac{q(V_{pv} + (I_{pv} * R_s))}{nKT}\right) - 1 \right] - \frac{V_{pv} + (I_{pv} * R_s)}{R_p} \quad (\text{III.1})$$

Où :

$V_{pv}$ ,  $I_{pv}$  sont la tension (V) et le courant (A) de sortie du panneau,  $I_{ph}$  est le photo courant en ampère,  $I_{sat}$  Courant dans la diode en ampère,  $R_s$  est la résistance série en ohm,  $R_p$  est la résistance shunt en ohm.  $q$  est la charge de l'électron  $q=1.602.10^{-19}$  coulomb,  $k$  est la constante de Boltzmann  $k=1.381.10^{-23}$  J/K,  $n$  est le facteur de qualité de la diode, normalement compris entre 1 et 2.

Si l'on suppose que la résistance parallèle (shunt) est infinie ( $R_p=\infty$ ), l'équation (III.1) devienne :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_{sat} \left( \exp\left(\frac{V_{pv} + R_s I_{pv}}{nV_T}\right) - 1 \right) \quad (\text{III.2})$$

Où  $I_{pv}$  est le courant fourni par la cellule PV et  $V_{pv}$  est la tension au bornes de la cellule PV.

On peut calculer la résistance série dans le point  $V_{CO}$ :

$$dI_{pv} = 0 - I_{sat} \left( \exp\left(\frac{V_{pv} + R_s I_{pv}}{nV_T}\right) \right) \left( \frac{dV_{pv} + R_s dI_{pv}}{nV_T} \right) \quad (\text{III.3})$$

La résistance série influe largement sur la pente de la courbe des caractéristique (I-V) au voisinage de  $V_{CO}$ .

Elle peut être calculée par la formule suivante :

$$R_s = - \frac{dV_{pv}}{dI_{pv}} - \frac{nV_T}{I_{sat} \left( \exp\left(\frac{V_{pv} + R_s I_{pv}}{nV_T}\right) \right)} \quad (\text{III.4})$$

L'équation de la caractéristique  $I=f(V)$  (III.1) non linéaire est résolue par des méthodes d'itération simple. Généralement la méthode de Newton-Raphson est choisie pour la convergence rapide de la réponse. La méthode de Newton-Raphson est décrite comme suit:

$$x_{n+1} = x_n - \frac{f(x_n)}{f'(x_n)} \quad (\text{III.5})$$

Où  $f'(x_n)$  est la dérivée de la fonction  $f(x_n)$ ,  $x_n$  est la présente itération et  $x_{n+1}$  est l'itération suivante.

La réécriture de l'équation (III.5) donne la fonction suivante :

$$f(I_{pv}) = I_{cc} - I_{pv} - I_{sat} \left( \exp\left(\frac{V_{pv} + R_{ser} \cdot I_{pv}}{nV_T}\right) - 1 \right) = 0 \quad (\text{III.6})$$

En remplaçant dans l'équation (III.5), on calcule le courant (I) par les itérations :

$$I_{n+1} = I_n - \frac{I_{cc} - I_{sat} \left( \exp\left(\frac{V_{pv} + R_{ser} \cdot I_n}{nV_T}\right) - 1 \right) - I_n}{-1 - I_{sat} \left( \left(\frac{R_{ser}}{nV_T}\right) \exp\left(\frac{V_{pv} + R_{ser} \cdot I_n}{nV_T}\right) \right)} \quad (\text{III.7})$$

Les équations précédentes ne sont valables que pour un mode de fonctionnement optimal. Pour généraliser notre calcul pour différents éclaircissements et températures, nous utilisons le modèle qui déplace la courbe de référence à de nouveaux emplacements [11].

Le photo courant dépend aussi de la température, son expression est donnée par :

$$I_{cc}(T) = I_{cco}(T_{ref}) \cdot [1 + \alpha(T - T_{ref})] \quad (\text{III.8})$$

Le photo courant  $I_{ph}$  est directement proportionnel à l'éclaircissement. Si  $I_{cco}$  est donnée sur le catalogue en STC, alors le photo courant généré pour n'importe quel autre valeur de  $G$ , est donné par :

$$I_{ph} = I_{cc} \left( \frac{G}{G_o} \right) \quad (\text{III.9})$$

Le courant de saturation dépend de la température. Sa valeur pour une température donnée est calculée par l'équation suivante :

$$I_{sat}(T) = I_{sat}(T_{ref}) \cdot \left(\frac{T_{ref}}{T}\right)^{\frac{3}{n}} \left[ \exp\left(\frac{q \cdot E_g}{nk}\right) \cdot \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}}\right) \right] \quad (III.10)$$

Où :

$\alpha$  est le coefficient de variation du courant en fonction de la température (habituellement donné par le fabricant sur le fiche technique en pourcentage de changement par degré Celsius),  $T_{ref}$  est la température de référence, 298k (25°C) ,  $G$  est l'irradiation solaire et  $G_o$  est l'irradiation solaire sous conditions STC.

### III-2-2 Caractérisation du module PV

Dans ce travail nous avons simulé le module **MSX85** qui comporte 36 cellules solaires de silicium monocristallin de 125.125mm connectées en série.

Le **MSX85** peut produire une puissance maximale de 85 watts à 17 volts. Ceci nous a permis de déterminer la puissance en fonction de la tension et le courant en fonction de la tension du module étudié pour un éclairage de 1000 W/m<sup>2</sup>. Les caractéristiques électriques du module Photovoltaïque **MSX85** en conditions de test standards sont représentées sur le **Tableau III.1**.

éclairage standard, G	1000W/m <sup>2</sup>
Température standard, T	25°C
Puissance maximale $P_{max}$	85.14 W
Tension à $P_{max}$ ou tension optimale ( $V_{opt}$ )	17.2 V
Courant à $P_{max}$ ou courant optimal ( $I_{opt}$ )	4.95 A
Courant de court-circuit $I_{sc}$	5.45A
Tension à circuit ouvert $V_{CO}$	22.2 V
Nombre des cellules en séries	36
Energie de la bande interdite	1.12ev
Coefficient de température de $I_{sc}$	65 mA/ °C
Coefficient de température de $V_{CO}$	-80mV/ °C
Coefficient de température de puissance	(0.5±0.05)% /°C
Courant de saturation $I_{sat}$	20 nA

**Tableau (III.1) : caractéristiques électriques du module photovoltaïque panneau MSX85 Dans les conditions standards «CST»**



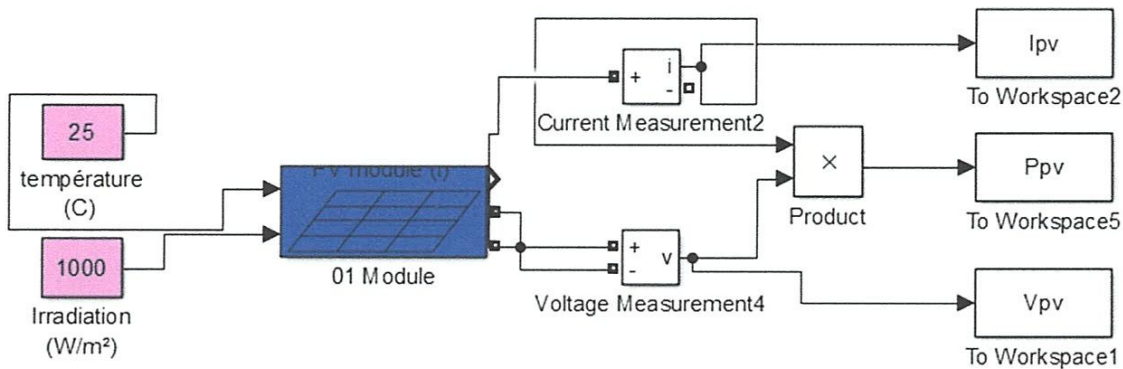
### III.3. Simulation du générateur PV

En se basant sur le modèle mathématique décrit dans la partie (II.2), nous avons établi un modèle de simulation sous Matlab/Simulink

Simulink est un logiciel de simulation, qui fournit une interface graphique permettant de construire des modèles sous forme de diagrammes blocs. Il offre l'avantage de construire des modèles hiérarchisés qui offrent la possibilité de voir le système à différents niveaux.

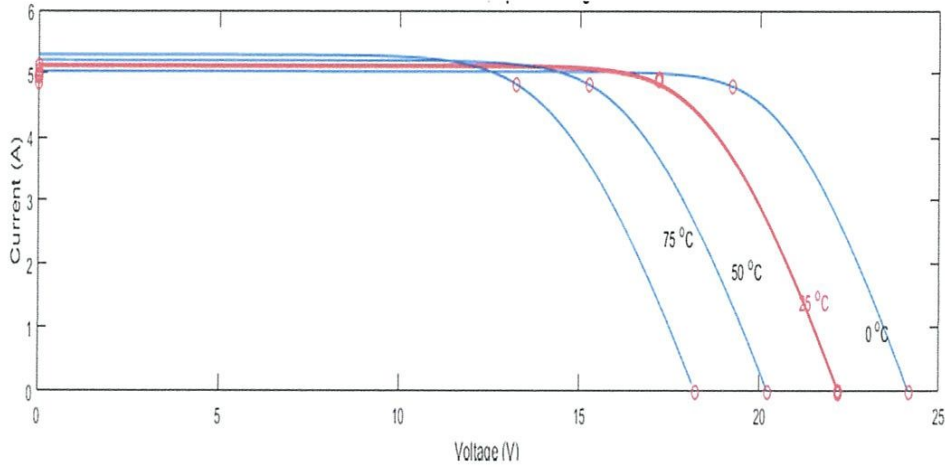
Simulink offre également la possibilité de construire des modèles modulaires, qui ont l'avantage d'être facilement reliés entre eux un à un de simuler un certain système. Ces modèles permettent également aux concepteurs de systèmes d'optimiser la taille des composants du système PV.

L'implémentation sous Simulink du modèle mathématique du GPV est illustrée sur la figure ci-dessous.

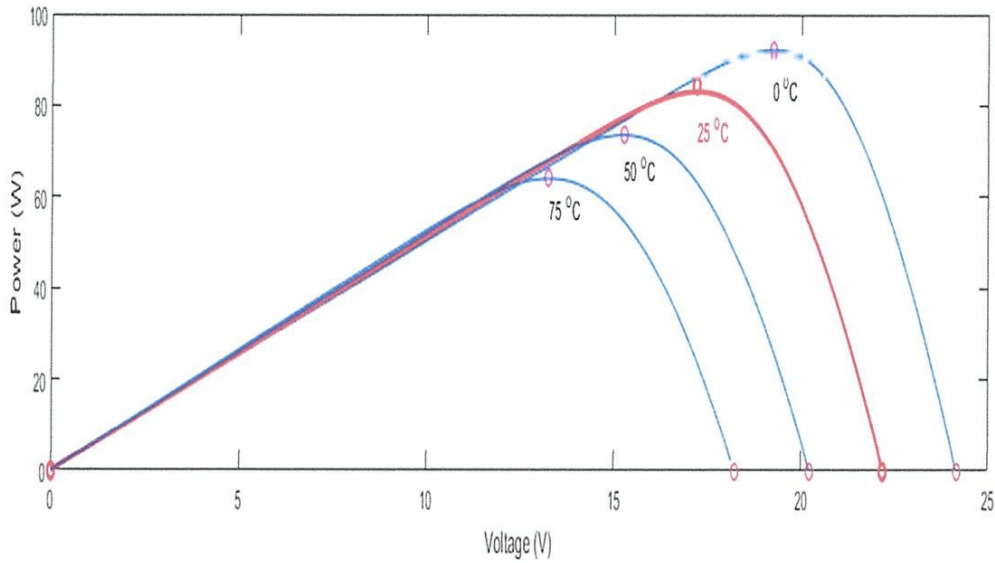


**Figure (III.2) : Schéma de Module PV en MATLAB-SIMULINK**

Les résultats de simulation du module photovoltaïque représentés par les figures (III.3) à (III.6). Ces figures représentent les caractéristiques Courant-Tension et Puissance-Tension pour différents températures et différents éclaircements [9].



**Figure (III.3) : Résultats de simulation des caractéristiques Courant Tension, pour différentes températures et un éclairement  $G=1000W/m^2$ .**



**Figure (III.4) : Résultats de simulation des caractéristiques Puissance-Tension, pour différentes températures et un éclairement  $G=1000W/m^2$ .**

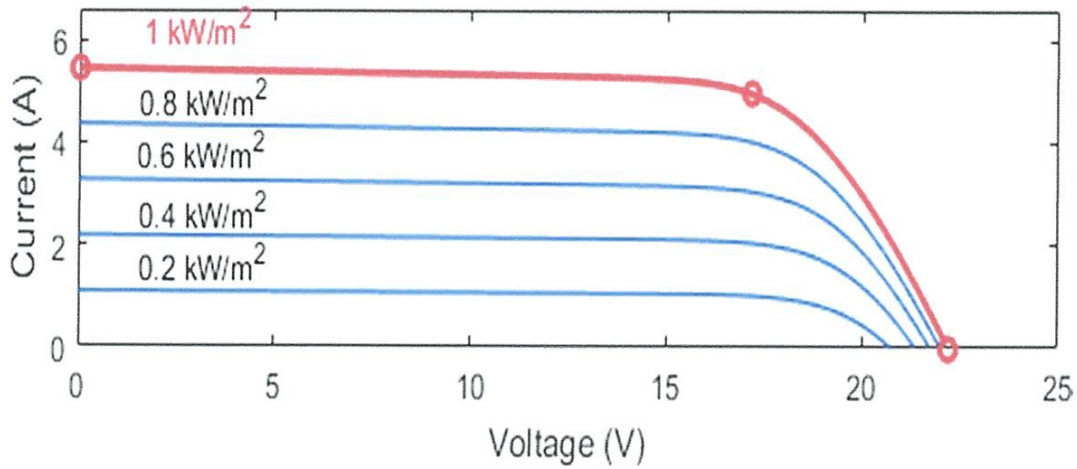


Figure (III 5) : Résultats de simulation des caractéristiques Courant-Tension pour différents éclairement et une température T=25°C.

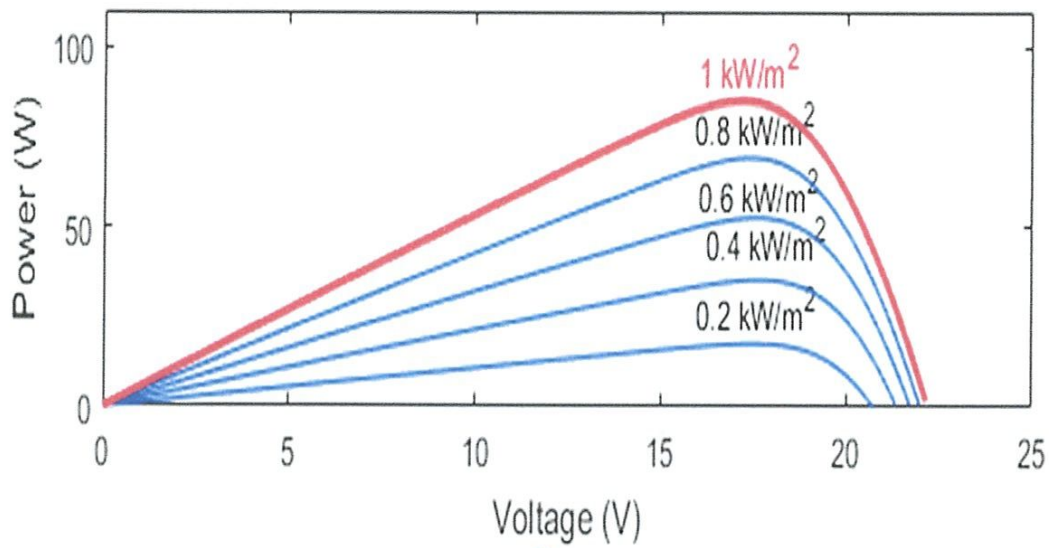


Figure (III.6) : Résultats de simulation des caractéristiques Puissance-Tension Pour différents Eclairment et une température T=25°C.

Les figures (III.3) et (III.4) ci dessus montrent que la tension à vide d'un module photovoltaïque (une cellule solaire) diminue avec l'augmentation de la température du module PV (de la cellule).

Dans la figure (III.3) Le courant de court-circuit par contre diminue légèrement avec la température du module PV (de la cellule solaire).

Sur la figure (III.4) que l'augmentation de la température se traduit aussi par une diminution largement de puissance maximale disponible, ces figures montrent clairement la baisse du rendement causée par l'augmentation de la chaleur sur la cellule.

Les figures (III.5) et (III.6) montrent l'influence de l'éclairement sur les caractéristiques courant-tension et puissance-tension. A une température constante, on constate que le courant et la puissance subissent une variation importantes, mais par contre la tension varie légèrement. Car le courant de court-circuit est une fonction linéaire de l'éclairement alors que la tension de circuit ouvert est une fonction logarithmique aussi [1].

### III.4. Modélisation et simulation du hacheur survolteur

#### III.4.1. Modélisation de hacheur survolteur

C'est un convertisseur DC/DC parallèle inséré entre le générateur photovoltaïque GPV et le reste de la chaîne de conversion. Il est caractérisé par son rapport cyclique  $d$  ( $0 < d < 1$ ) avec lequel on peut exprimer les valeurs moyennes des grandeurs de sortie avec celles de l'entrée. Le schéma électrique du hacheur survolteur est donné par la figure (III.7) [12].

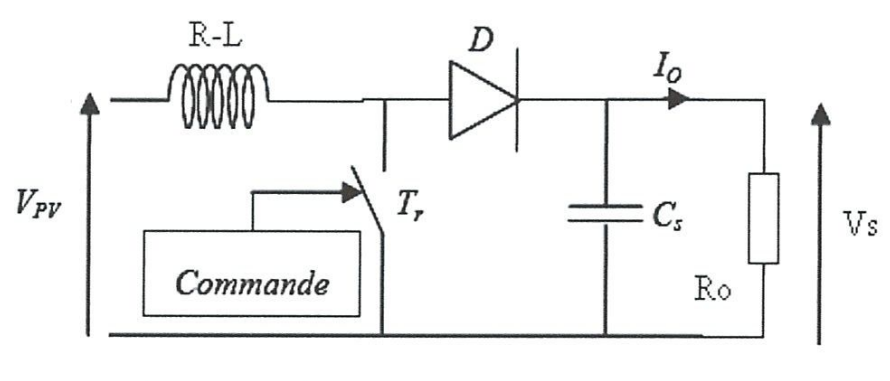


Figure (III.7) : Convertisseur (DC/DC) survolteur de tension (type boost)

Pour une étude en régime continu, en éliminant les dérivées des variables dynamiques, dans le système d'équations (II.7) du chapitre précédent, et en remplaçant ces signaux par leurs valeurs moyennes. Le système d'équations devient :

$$\begin{cases} I_L = I_e \\ I_s = (1 - d)I_L \\ V_e = (1 - d)V_s \end{cases} \quad (\text{III.11})$$

Alors, les grandeurs électriques de sorties ( $V_S$  et  $I_S$ ) dans le convertisseur survolteur sont liées à celles d'entrées ( $V_{pv}$  et  $I_{pv}$ ) en fonction du rapport cyclique  $d$  du signal qui commande l'interrupteur du convertisseur (Figure(III.7)) par le système d'équations :

$$\begin{cases} V_s = \frac{V_e}{1-d} = \frac{V_{pv}}{1-d} \\ I_s = (1 - d)I_e = (1 - d)I_{pv} \end{cases} \quad (\text{III.12})$$

A partir le système d'équations (III.12), on peut déduire la résistance à la sortie du panneau PV ( $R_{pv}$ ) en fonction de  $d$  et  $R_S$ , ( $R_S$ : la résistance à la sortie le convertisseur survolteur) :

$$R_{pv} = \frac{V_{pv}}{I_{pv}} = \frac{(1-d)V_s}{I_s/(1-d)} = R_S(1 - d)^2 \quad (\text{III.13})$$

Alors, le rapport cyclique  $d$  s'écrit en fonction des résistances  $R_{pv}$  et  $R_S$  :

$$\frac{R_{pv}}{R_S} = (1 - d)^2 \Rightarrow d = 1 - \sqrt{\frac{R_{pv}}{R_S}} \quad (\text{III.14})$$

Puisque le rapport  $d$  est vérifié l'inégalité ( $0 < d < 1$ ), le convertisseur ne joue le rôle d'un élévateur que si la charge  $R_S$  remplit la condition suivante :

$$R_S > R_{pv} \quad (\text{III.15})$$

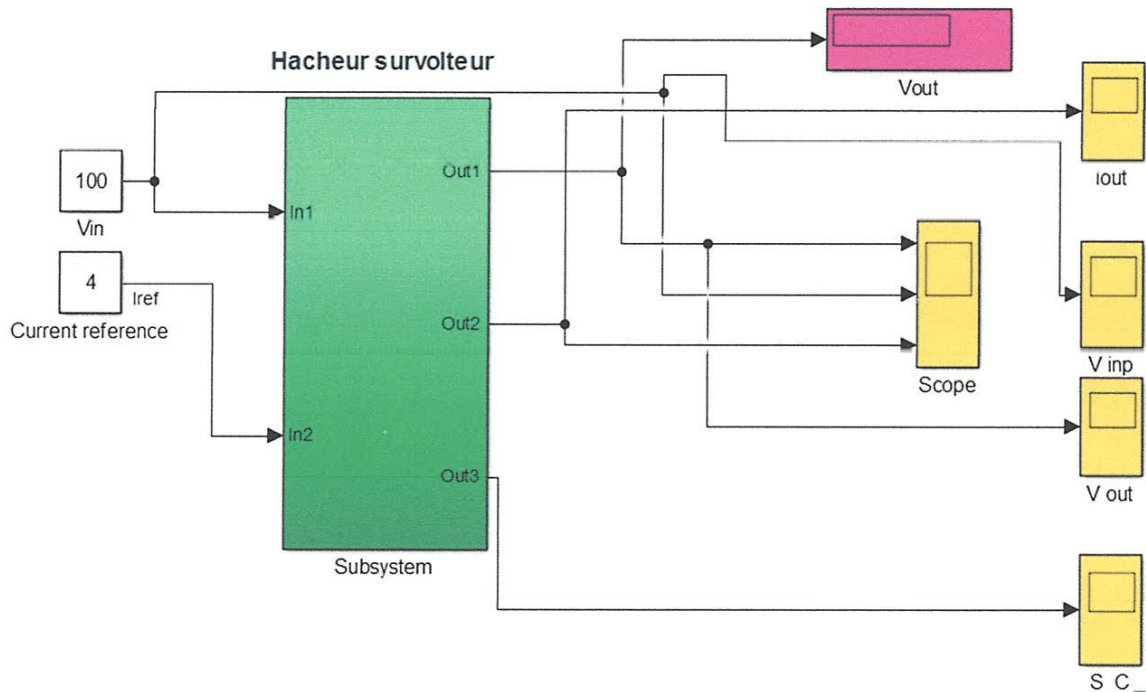
Dans les conditions optimales et pour une charge  $R_S$  donnée, la résistance interne du panneau ( $R_{pv} = R_{opt}$ ) et le rapport cyclique ( $d = d_{opt}$ ) obtient donc à l'équation :

$$R_{opt} = (1 - d_{opt})^2 R_S \quad (\text{III.16})$$

La relation (III.16) montre que, pour une puissance incidente  $P$ , la puissance optimale transférée à la charge ne pourrait être maximale que pour un rapport cyclique bien défini ( $d_{opt}$ ) (point PPM) [3].

III.4.2. Simulation de hacheur survolteur

La figure (III.8) représente le schéma block d'un hacheur survolteur



Figure(III.8) : Schéma block d'un convertisseur survolteur

Après simulation du hacheur on obtient en sortie le signal de commande illustré dans la figure (III.9).

Les résultats de simulation du convertisseur statique DC-DC sont représentés par les figures (III.10) à (III.12).

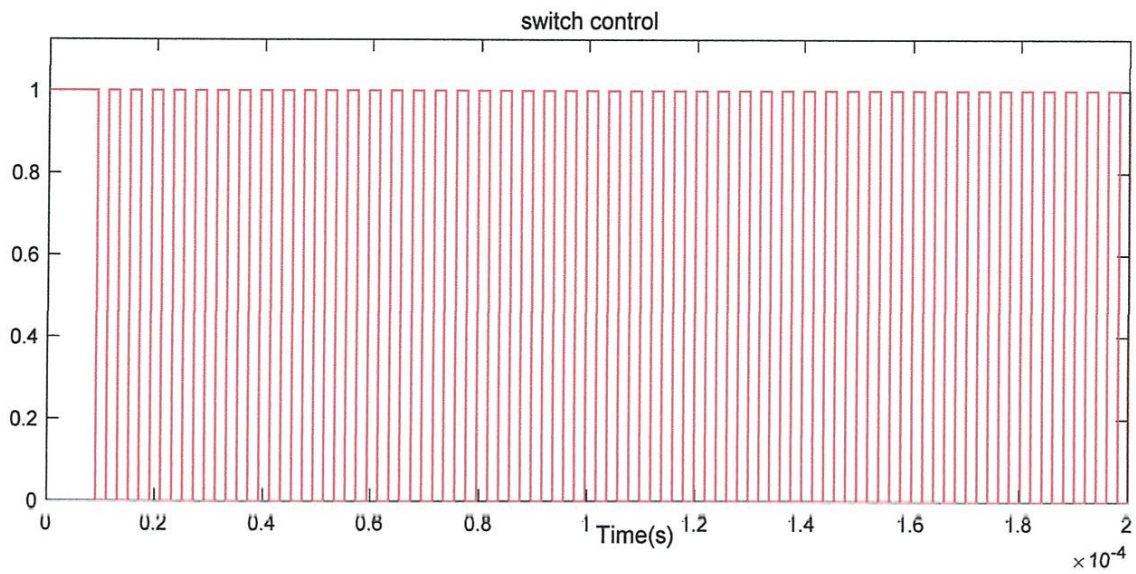


Figure (III.9) : Signal commande du hacheur (gâchette du hacheur).

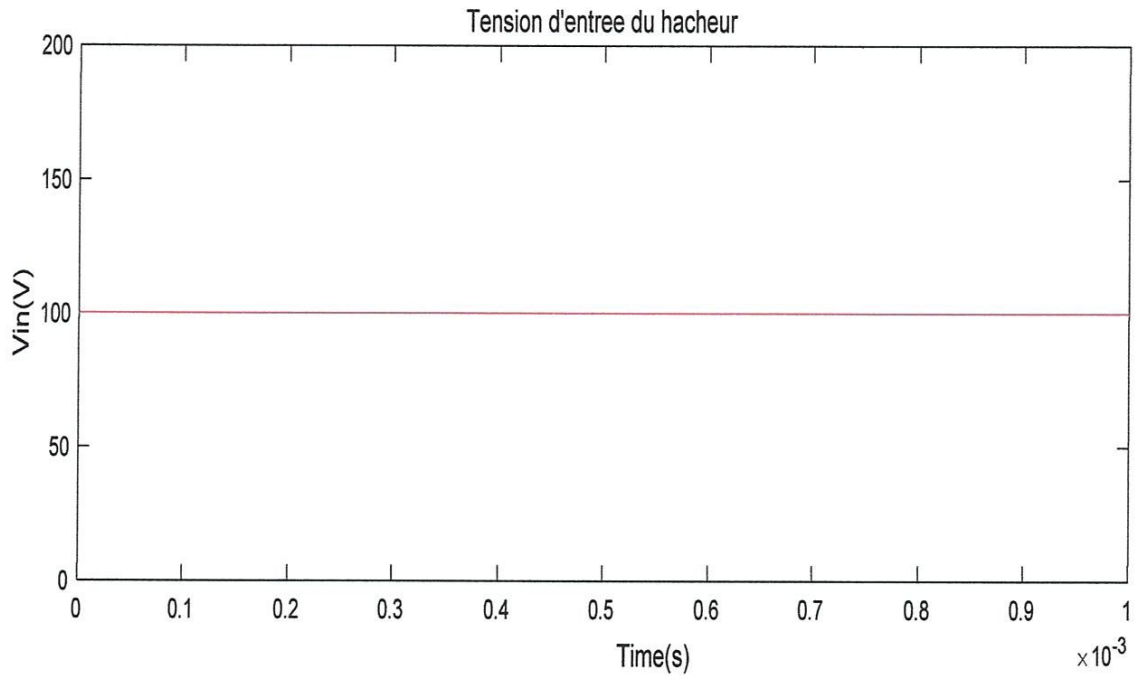


Figure (III.10) : Résultats de simulation de la tension d'entrée du hacheur survolteur

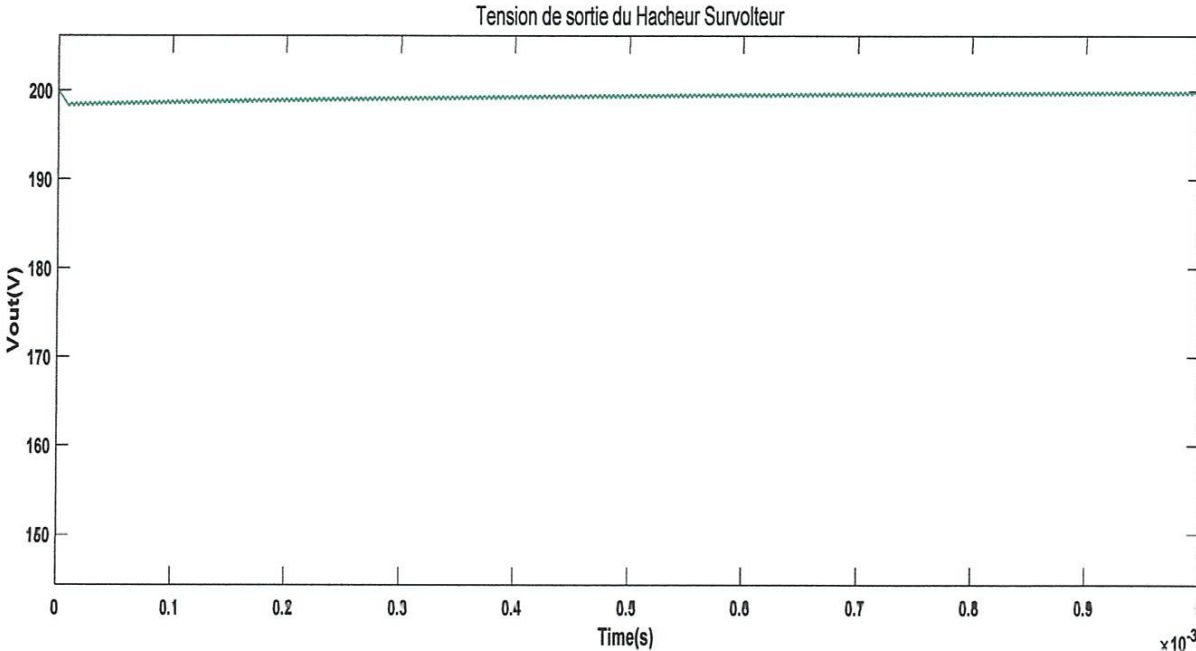


Figure (III.11) : Résultats de simulation de la tension de sortie du hacheur survolteur

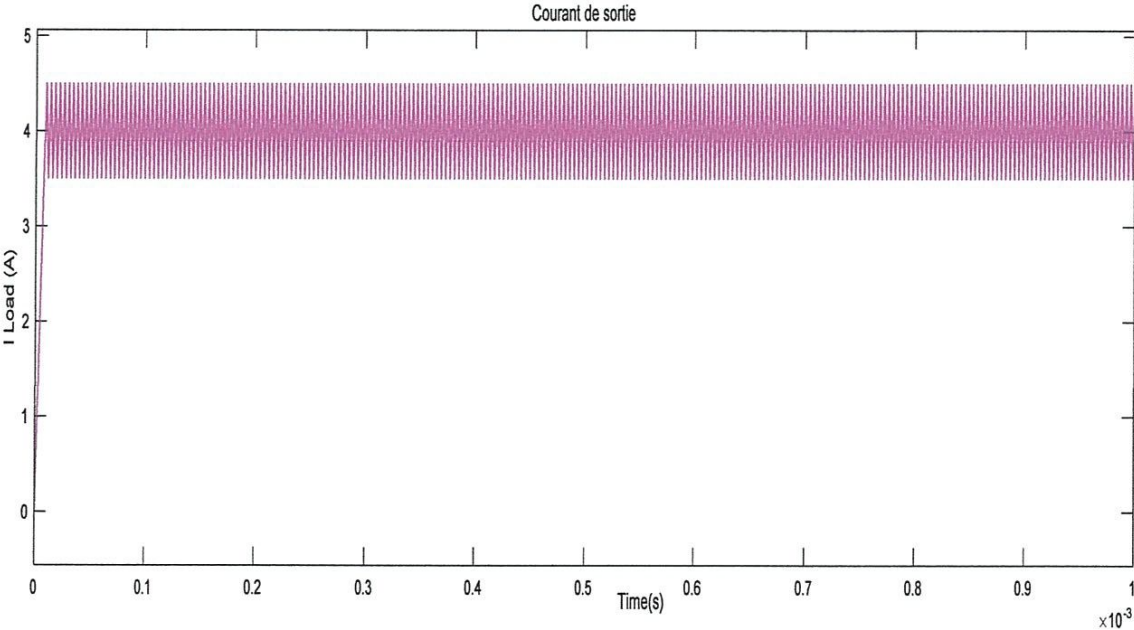


Figure (III.12) : Résultats de simulation du courant de sortie du hacheur survolteur



Les figures ci-dessus représentent les tensions d'entrée et de sortie d'hacheur survolteur ainsi le courant de sortie du hacheur. Ces résultats montrent que la tension de sortie du hacheur survolteur est supérieure à celle d'entrée. Donc l'hacheur survolteur effectue correctement son rôle.

**III.5. Structure de la commande MPPT perturbation et observation « P&O » et simulation du système globale (GPV, convertisseur, MPPT) .**

**III.5.1. structure de la commande « perturbation et observation »**

Pour avoir la meilleure connexion entre le « GPV » une source non linéaire et une charge pour produire la meilleure puissance, le Maximum Power Point Tracking (MPPT) est développé. Il forcera le générateur à travailler à son Maximum Power Point (MPP), induisant une amélioration globale du rendement du système.

Ce point de fonctionnement varie car les conditions de travail varient ou/et la charge varie à tout moment. C'est pourquoi, souvent, on n'opère pas au MPP, et la puissance fournie à la charge est inférieure à la puissance maximale [9].

La méthode de perturbation et d'observation « P&O » est une approche largement répandue dans la recherche du MPPT parce qu'elle est simple et exige seulement des mesures de tension et du courant du panneau photovoltaïque  $V_{pv}$  et  $I_{pv}$  respectivement. Elle peut déduire le point de puissance maximale même lors des variations de l'éclairement et la température.

Sur la figure (III.13), on a représenté le schéma synoptique de la méthode de perturbation et d'observation.

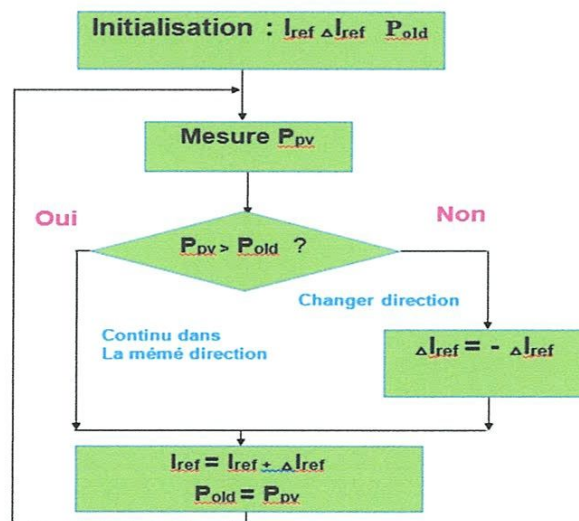


Figure (II.13) : Algorithme de la commande MPPT « perturbation-observation »

Dans le cadre de ce travail, on analyse la conception et la simulation d'une commande MPPT numérique « perturbation-observation » qu'on applique aux hacheurs survolteur.

III.5.2. Simulation du Système globale (GPV, convertisseur, MPPT)

La figure (III.14) illustre le bloc schématique de SIMULINK du système photovoltaïque adapté par la commande MPPT « perturbation et observation »:

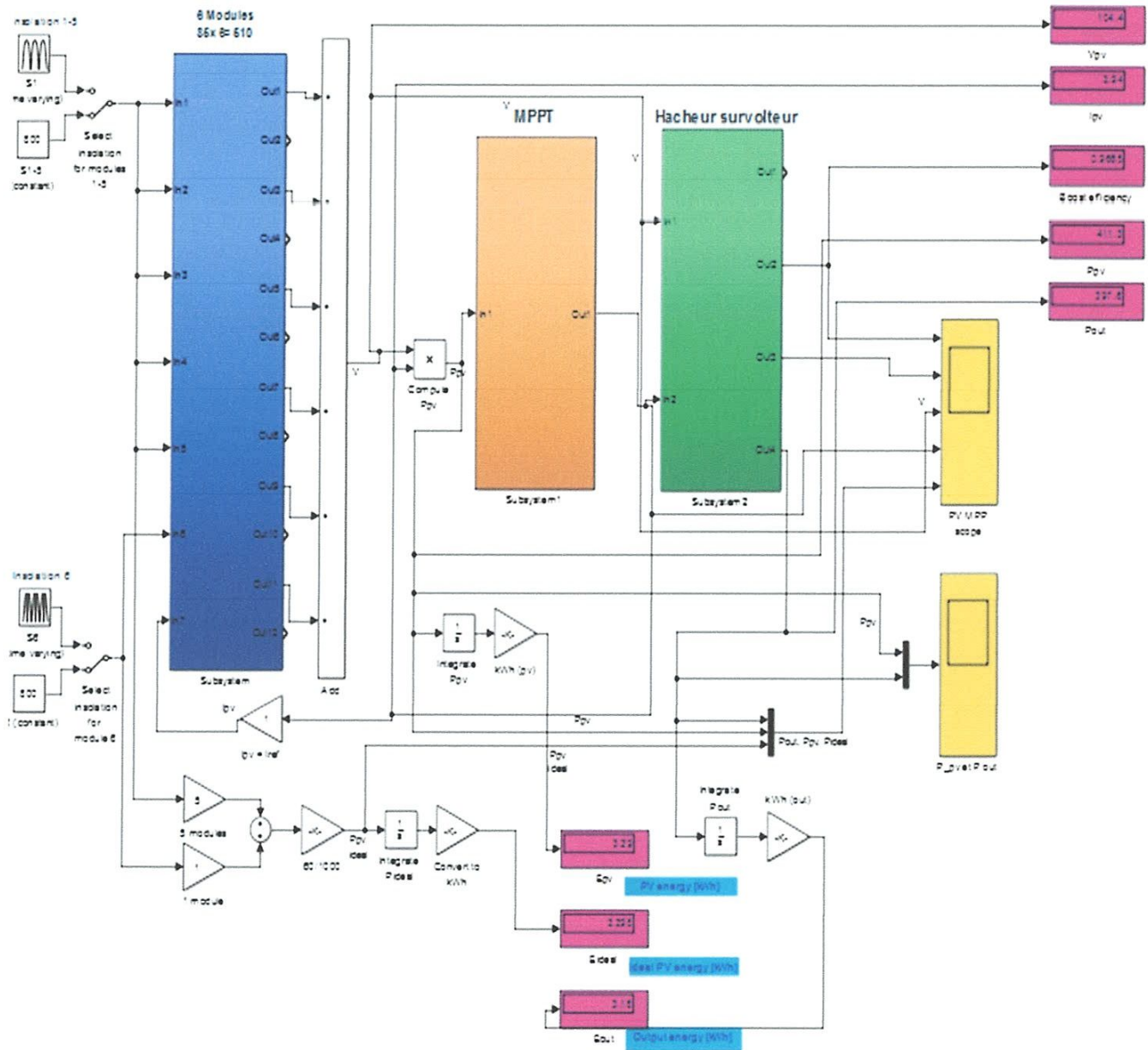
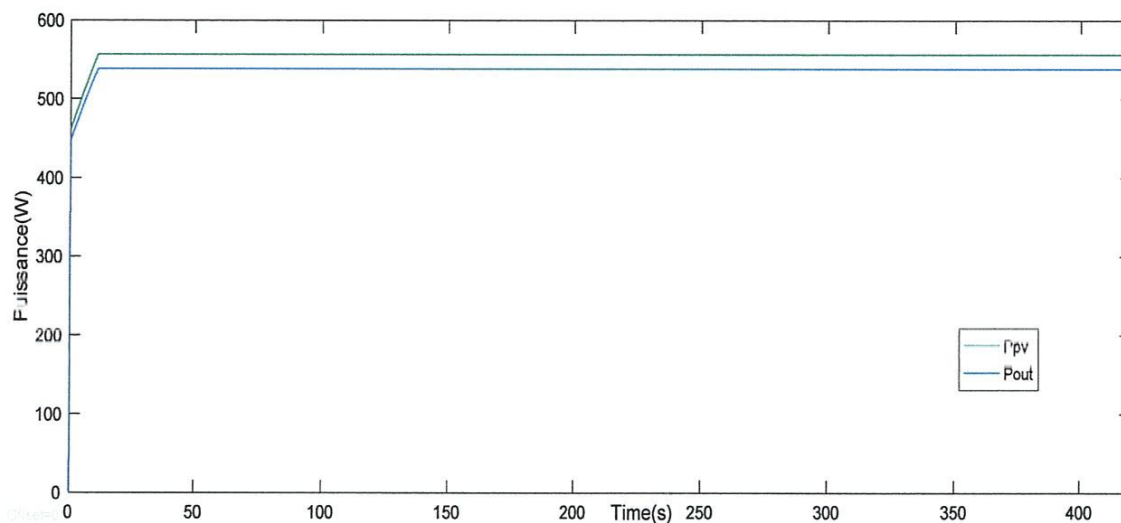


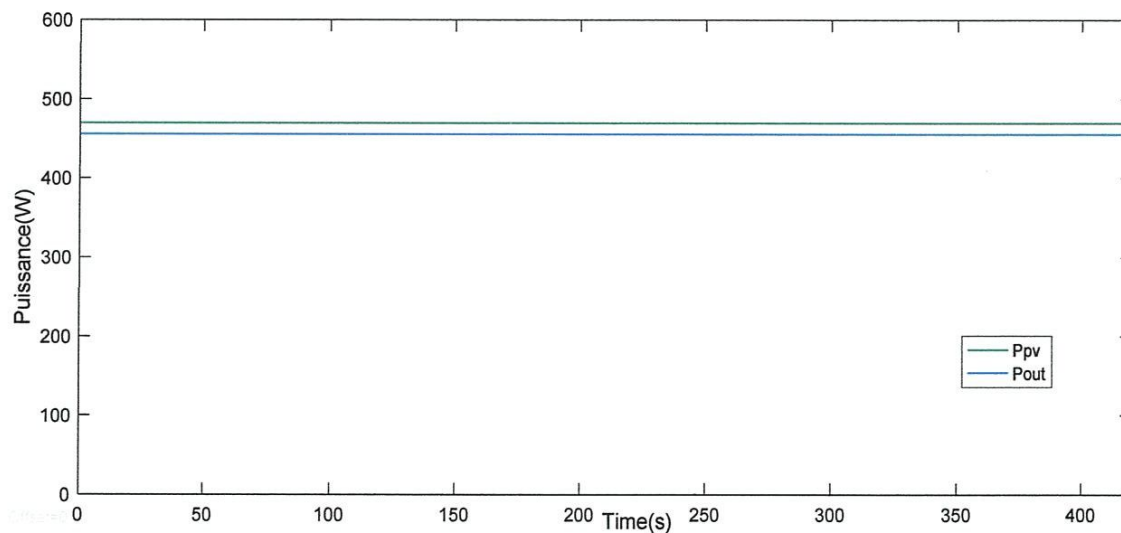
Figure (III.14): Schéma MATLAB SIMULINK d'un système photovoltaïque avec commande MPPT (P&O)

Les résultats de simulation du système photovoltaïque adapté par la commande MPPT « perturbation et observation » représentent par les figures (III.15) à (III.18).

Les figures ci-dessous représentent la puissance générée par le générateur photovoltaïque et la puissance de sortie de système PV pour différents éclairagements.



**Figure (III.15-a) : Résultats de simulation de puissance de sortie du générateur et du système pour  $E=1200 \text{ W/m}^2$  et  $T=25^\circ\text{C}$  avec MPPT**



**Figure (III.15-b) : Résultats de simulation de puissance de sortie du générateur et du système pour  $E=1200 \text{ W/m}^2$  et  $T=25^\circ\text{C}$  sans MPPT**

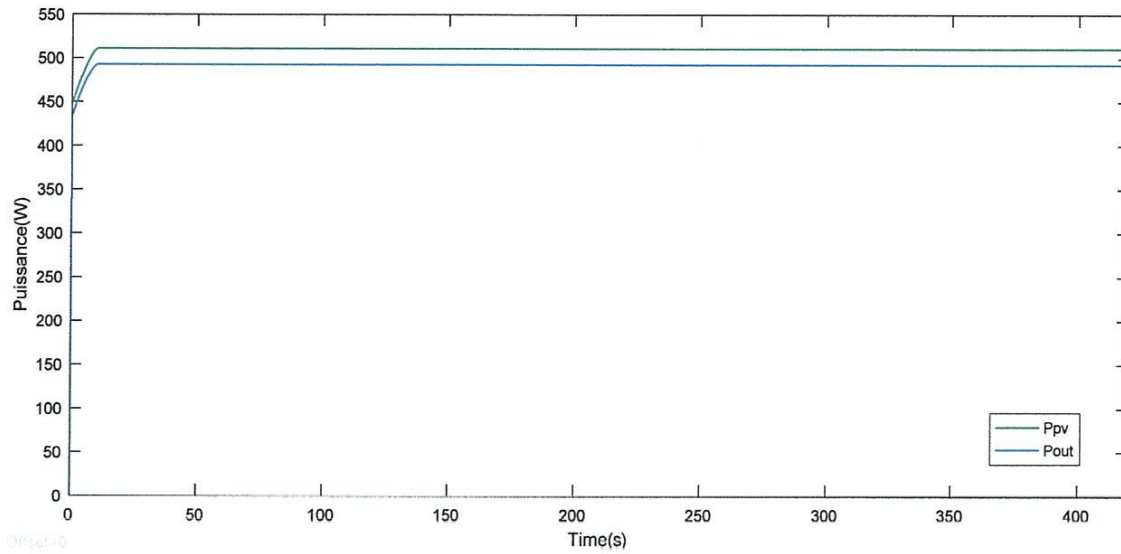


Figure (III.16-a) : Résultats de simulation de puissance de sortie du générateur et du système pour  $E=1000W/m^2$  et  $T=25^{\circ}C$  avec MPPT

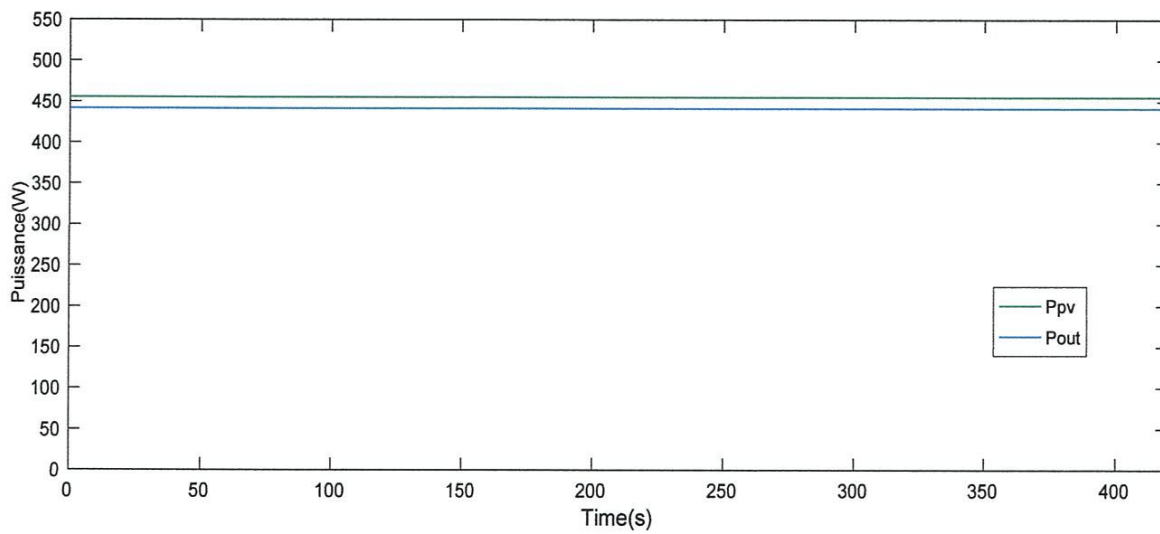


Figure (III.16-b) : Résultats de simulation de puissance de sortie du générateur et du système pour  $E=1000W/m^2$  et  $T=25^{\circ}C$  sans MPPT

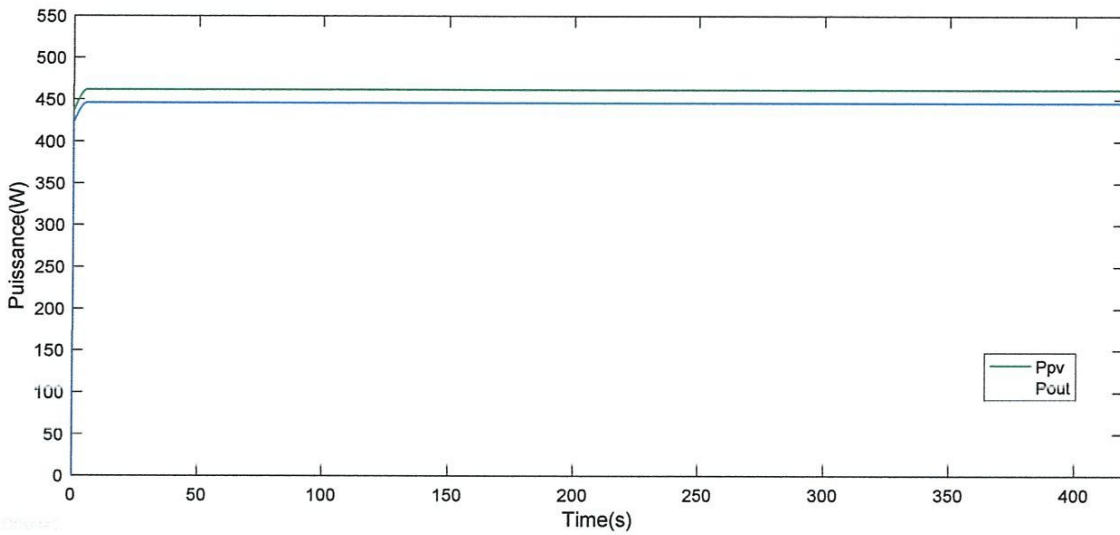


Figure (III.17-a) : Résultats de simulation de puissance de sortie du générateur et du système pour  $E=900 \text{ W/m}^2$  et  $T=25^\circ\text{C}$  avec MPPT

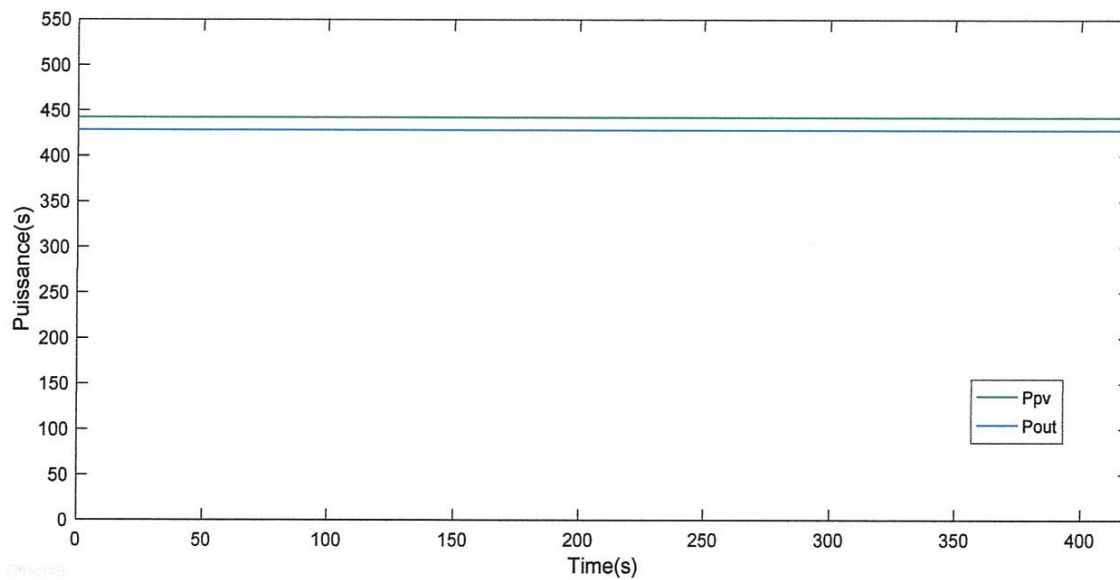
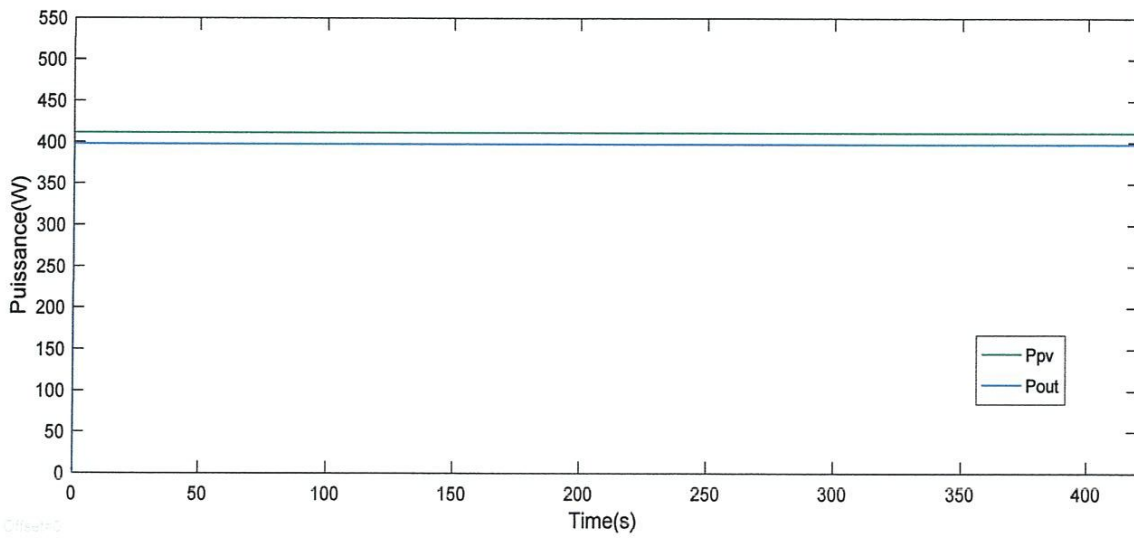
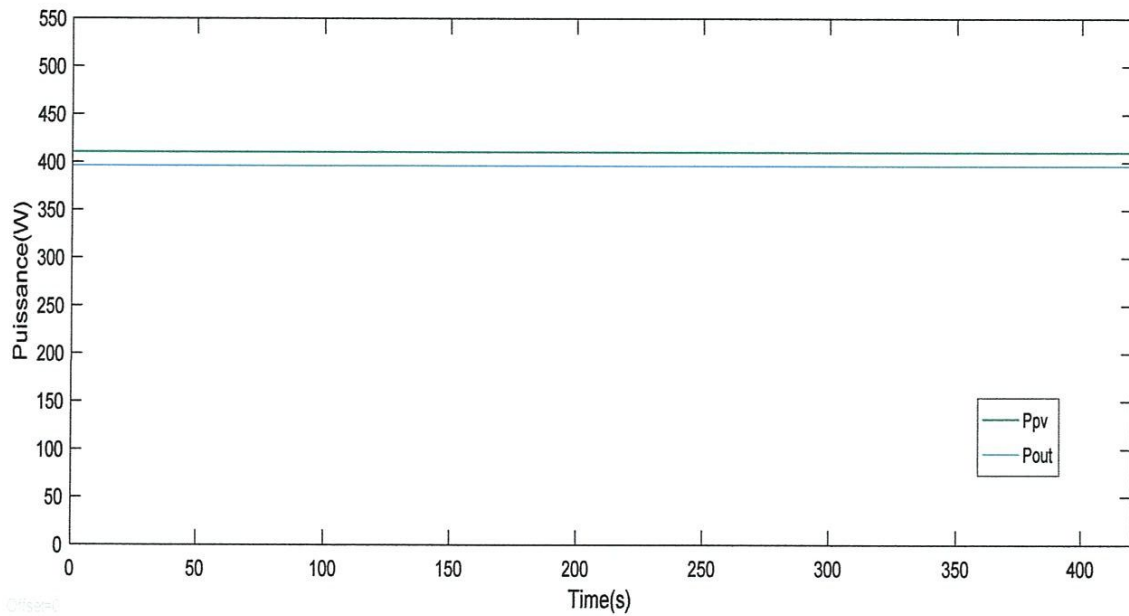


Figure (III.17-b) : Résultats de simulation de puissance de sortie du générateur et du système pour  $E=900 \text{ W/m}^2$  et  $T=25^\circ\text{C}$  sans MPPT



**Figure (III.18-a) : Résultats de simulation de puissance de sortie du générateur et du système pour  $E=800 \text{ W/m}^2$  et  $T=25^\circ\text{C}$  avec MPPT**



**Figure (III.18-b) : Résultats de simulation de puissance de sortie du générateur et du système pour  $E=800 \text{ W/m}^2$  et  $T=25^\circ\text{C}$  sans MPPT**

On a fait des simulations pour différents éclairagements, à savoir : 1200 W/m<sup>2</sup> , 1000 W/m<sup>2</sup>, 900W/m<sup>2</sup>, 800 W/m<sup>2</sup>.

L'éclairement (W/m <sup>2</sup> )	Les puissances avec MPPT (W)		Les puissances sans MPPT (W)	
	$P_{pv}$	$P_{out}$	$P_{pv}$	$P_{out}$
1200	556.4	538.4	469.4	455.4
1000	510.8	492.6	455.2	441.2
900	461.6	445.7	442.4	428.4
800	411.3	397.6	410.3	396.3

**Tableau (III-2) : représentation des résultats des puissances de sortie du générateur PV et du système PV pour différents éclairément avec et sans MPPT.**

Les résultats de simulation du système photovoltaïque adapté par la commande MPPT perturbation et observation représenté par les figures (III.15-a) à (III.18-b). Ces figures montrent : la commande du hacheur, la tension d'entrée et de sortie du hacheur survolteur, le courant de charge ainsi que la puissance générées par le générateur photovoltaïque et la puissance à la sortie du système photovoltaïque. Ces résultats montrent que le hacheur survolteur et la commande MPPT « perturbation et observation » effectuent correctement leurs rôles.

Le hacheur survolteur fournit une tension à sa sortie supérieure à celle fournie par le générateur photovoltaïque et la commande MPPT adapte le générateur PV pour transfert de la puissance maximale fournie par le générateur PV.

### III.6. Conclusion :

Dans ce chapitre, la modélisation de l'ensemble composé de : générateur photovoltaïque, hacheur survolteur et la commande MPPT perturbation et observation sont présentées. Les modèles SIMULINK sont construits pour les différentes composantes du système photovoltaïque. En effet, d'après les résultats de simulation obtenus, on remarque :

- Les performances du générateur PV se dégradent avec l'augmentation de la température, la diminution de l'intensité de l'éclairement, Les performances du générateur PV sont évaluées à partir des conditions standards (CST) : éclairement  $1000\text{W/m}^2$  température  $25^\circ\text{C}$ .
- Le hacheur survolteur et la commande MPPT effectuent correctement leurs rôles. Le convertisseur fournit dans les conditions optimales une tension à sa sortie supérieure à celle fournie par le générateur PV.
- La commande MPPT adapte le générateur et transfère de la puissance maximale fournie par le générateur PV



**Conclusion**  
**Générale**

## Conclusion générale

Le travail qu'on a présenté porte sur l'analyse d'une modélisation et simulation du fonctionnement électrique d'un système photovoltaïque (PV) adapté par une commande numérique (commande MPPT) assurant la poursuite de la puissance maximale fournie par le générateur PV. Dans un premier temps, on a donné des généralités sur les systèmes PV, principe de l'effet PV, cellule PV. Ainsi le générateur photovoltaïque et ses performances.

On a étudié, dans un deuxième temps, les types de convertisseurs DC-DC, utilisés dans les systèmes photovoltaïques. Comme le hacheur dévolteur, le hacheur survolteur et le hacheur mixte (dévolteur-survolteur). Ainsi, on a décrit le principe d'extraction de la puissance maximale sous différentes conditions de fonctionnement. On a présenté les méthodes MPPT, à savoir : les méthodes indirectes et les méthodes directes. Notons que, dans ce travail que nous avons opté pour l'algorithme de perturbation et observation cause de sa simplicité, et du fait qu'elle exige seulement des mesures de tension et du courant du panneau photovoltaïque.

Dans le troisième chapitre, on a présenté la modélisation et la simulation du système global (GPV, Hacheur, commande MPPT). Pour cela, on a traité d'abord le générateur PV par la résolution de son équation caractéristique non linéaire en utilisant la méthode de Newton-Raphson, ainsi que se résultats de simulation. Puis, on a abordé l'adaptation par le hacheur survolteur. Ensuite, on a représenté la structure de la commande MPPT numérique « perturbation et observation ». Cette commande MPPT numérique utilise directement la tension et le courant du panneau photovoltaïque pour chercher le point de fonctionnement correspondant à la puissance maximale. D'après les résultats de simulation obtenus, on a pu tirer les remarques suivantes:

- Les performances du générateur PV se dégradent avec l'augmentation de la température, et la diminution de l'intensité de l'éclairement. Les performances du générateur PV sont évaluées à partir des conditions standards (STC) : éclairement  $1000\text{W/m}^2$  et température  $25^\circ\text{C}$ .

## Conclusion générale

- Le hacheur survolteur et la commande MPPT effectuent correctement leurs rôles. Le hacheur fournit dans les conditions optimales une tension à sa sortie supérieure à celle fournie par le générateur PV. Tandis que, la commande MPPT procure au générateur PV un transfert de puissance maximale.
- De par ces résultats, on pu constater que l'utilisation de la commande MPPT permet d'améliorer d'une manière considérable le rendement des installations photovoltaïques.

Comme perspective nous proposons de développé notre système pour des puissances assez élevée en utilisant cette méthode « perturbation et observation ».

Ainsi, l'utilisation des techniques d'intelligence artificielle comme la logique floue, les réseaux de neurones artificiels et les réseaux neuro-flous pour la commande du convertisseur.

# **Bibliographie**

## Bibliographie

- [1] S. m. ait-cheikh, «étude, investigation et conception d'algorithmes de commande appliqués aux systèmes photovoltaïques», thèse de doctorat d'état, école nationale polytechnique, alger, algerie, 2007.
- [2] S. issaadi, «commande d'une poursuite du point de puissance maximum (mppt) par les réseaux de neurones », mémoire de magister, école nationale polytechnique, alger, algerie, 2006.
- [3] M. adouane, «étude et conception d'une stratégie de commande d'un onduleur connecté au réseau électrique», mémoire de magistère, école nationale polytechnique, alger, algerie, 2008.
- [4] F. chekired, « étude et implémentation d'une commande mppt neuro-floue sur fpga », mémoire de magister, école nationale polytechnique, alger, algerie, 2008.
- [5] S. bellakehal, «conception & commande des machines à aimants permanents dédiées aux énergies renouvelables», thèse de doctorat, université de constantine, algerie, 2010.
- [6] M. makhlouf, «étude et optimisation d'un modèle de conversion d'énergie photovoltaïque application au pompage», mémoire de magister, université mentouri constantine, algerie, 2006.
- [7] N. abouchabana, « étude d'une nouvelle topologie buck-boost appliquée à un mppt », mémoire de magistère, école nationale polytechnique, alger, algerie, 2009.
- [8] M. moulay-amar et m. loghouini, «étude et réalisation d'un système de poursuite de point de puissance maximale à base de microcontrôleur destiné à une installation photovoltaïque », mémoire d'ingénieur, université de ouargla, algerie, 2005.
- [9] M. Djarallah, « Contribution à l'étude des systèmes photovoltaïques résidentiels couplés au réseau électrique », Thèse de Doctorat, Université de Batna, Algérie, 2008.
- [10] M. djarallah, « contribution à l'étude des systèmes photovoltaïques résidentiels couplés au réseau électrique », thèse de doctorat, université de batna, algerie, 2008.
- [11] B. gori, « modélisation et simulation d'un système pv adapté par une commande mppt analogique », mémoire d'ingénieur, université ouargla, algerie, 2011.
- [12] L. abbassen, «étude de la connexion au réseau électrique d'une centrale photovoltaïque», mémoire de magistère, université de tizi ouzou, algerie, 2011.

- [13] Power electronics and control in grid-connected pv systems.
- [14] K. Sobaihi " étude et réalisation d'un hacheur de Tracking du point de puissance Maximale (MPPT) a contre réaction " Mémoire de Magister Ecole Nationale polytechnique 10, Avenue Hassen Badi El -Harrach Alger.
- [15] BOUKAROURA Abdelkader" Modélisation et Diagnostic d'un Onduleur Triphasé Par l'Approche Bond Graph "Mémoire de Magister UNIVERSITE FERHAT ABBAS D E SETIF 02/12/2009.
- [16] F. Slama " Modélisation d'un système multi générateurs photovoltaïques interconnectés au réseau électrique " Mémoire de Magister UNIVERSITE FERHAT ABBAS - SETIF 01/04/2011.
- [17] C. Cabal " Optimisation énergétique de l'étage d'adaptation électronique dédié à la conversion photovoltaïque " Mémoire de doctorat Université Toulouse III-Paul Sabatier le 15 décembre 2008.