

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République Algérienne démocratique et populaire

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

جامعة سعد حطاب البليدة  
Université SAAD DAHLAB de BLIDA

كلية التكنولوجيا  
Faculté de Technologie

قسم الإلكترونيك  
Département d'Électronique



## Mémoire de Master

Mention Électronique  
Spécialité système de vision et robotique

présenté par

Ouchfoun Omar

&

Bouda Islam

---

# Etude de l'effet de la variation de Fréquence PWM sur le rendement Du panneau photovoltaïque

---

Proposé par : Mr. TADRISTR

Co promoteur : Mr MAAMOUN M

Année Universitaire 2017-2018







## *Dédicaces*

*Avec tout l'amour qui se trouve dans mon cœur,  
Jedédie mon travail  
A les Plus chères personnes de ma vie, mes parents pour  
son amour,  
Sa confiance et ses orientations tout au long de mes études.*

*A mes frères, et  
Qui ont été toujours présents de mes côtés.*

*A ma sœur  
Et belle-sœur, pour leur  
Soutien et encouragement.*

*À ma chère femme  
Pour leur soutien*

*A mon binôme Omar.*

*Et A toute mes chers amis  
Que j'aime et qui m'aiment*

*Islam*

# Dédicaces :

Je dédie ce modeste travail :

A ma mère qui m'a tout donné durant ma vie, et tous les mots de l'univers ne  
Suffisent pas pour la remercier

A mes frères Imad Edin et Ali

A mes sœur Abir et Khaoula

A tous les membres de la famille Ouchfoun et la famille Henni

A mon binôme Islam

Et a une personne très spéciale pour moi et qui nous a quittés pour toujours, Mon père,  
que dieux l'accueil dans son vaste paradis

*OUCHFOUN OMAR*



# Remerciements

---

Nous remercions Dieu de nous avoir donnée patience et courage pour accomplir ce travail. Nous remercions nos parents pour leurs sacrifices et leur encouragement durant toute notre scolarité.

Nous remercions surtout notre encadreur Mr TADRIST REZKI pour son aide et soutien durant toute la période de travail, et nous sommes très reconnaissant pour tout ce qu'il nous a fait.

Nous tenons aussi à exprimer nos plus vifs remerciements à MONSIEUR MAAMOUN MOUNTASAAR pour sa précieuse aide et ses encouragements.

Nous tenons aussi à exprimer notre gratitude à nos professeures qui nous ont formés durant notre cycle universitaire, ainsi que tout le staff du département d'électronique. Sans oublier tous nos amis et camarades qui font toujours notre bonheur. Aux membres de jury qui nous ont fait l'honneur d'accepter de juger ce modeste travail. Enfin, nous espérons que ce mémoire servira d'exemple et de support pour les années à venir.

---

**ملخص:** إن الطاقة الكهربائية من أهم موارد الطاقة لأنها نظيفة، خالية من التلوث وبلا نهاية. تتبع الاستطاعة القصوى MPPT تستعمل الكهربائية من أجل الحصول على أقصى إنتاج لأصفائح الكهروضوئية PV مع التغيرات للحرارة والأشعة الشمسية.

في إطار هذا العمل قمنا بدراسة تأثير تباين التردد PWM على الصفيحة الكهروضوئية PV، من أجل المحاكات،

استخدمنا بيئة MATLAB/SUMILNK.

**كلمات المفاتيح:** MPPT ,PV ,MATLAB/SIMULINK ,MPP.

---

**Résumé :** L'énergie photovoltaïque (PV) est l'une des ressources les plus importantes d'énergie car il est propre, sans pollution et sans fin. Le Maximum power point Tracking (MPPT) est utilisé dans le photovoltaïque (PV) afin de maximiser la puissance à la sortie des panneaux solaires pour des variations météorologiques de la température et du rayonnement.

Dans ce travail on étudie l'effet de la variation de la fréquence (PWM) sur le rendement du panneau(PV). Pour la simulation du system, nous utilisons l'environnement MATLAB/SIMULINK.

**Mots clés :** PV, MPPT, MPP, MATLAB/SIMULINK

---

**Abstract:** photovoltaic (PV) energy is one of the most important energy resources because it is clean, pollution-free and endless. Maximum Power Tracking (MPPT) is used in photovoltaics (PV) to maximize the output power of solar panels for weather variations in temperature and radiation.

In this work we study the effect of the variation of the frequency (PWM) on the efficiency of the panel (PV). For simulation of the system, we use the SIMULINK environment.

**Keywords :** PV,MPPT,MPP,MATLAB/SIMULINK.

---



# Sommaire

Remerciements.....I	
Résumé.....II	
Liste des acronymes .....III	
Liste des figures.....XII	
Liste des tableaux..... XVI	
Introduction générale..... 1	
<b>CHAPITRE 1 : Généralités sur le systèmes Photovoltaïque</b>	
1-1) Introduction .....5	
1.2 les panneaux.....5	
1.2.1Le générateur photovoltaïque.....6	
1.2.2 Durabilité et fiabilité d'un panneau solaire .....6	
1.2.3Les différents types de cellules solaires et leur rendement.....7	
a)Les cellules monocristallines .....7	
b)Les cellules poly - cristallines .....7	
c) Les cellules en silicium amorphe.....8	
1.3 Les convertisseurs DC/DC.....9	
1.3.1 Le convertisseur survolteur (BOOST).....10	
1.3.2dimensionnement d'un convertisseur DC/DC (Boost).....11	
a) Rapport cyclique D.....11	
b) L'inductance L.....11	
c)La charge R.....11	
d) CondensateurC .....11	
1.5Les commandes MPPT.....12	
1.6 Les Méthodes MPPT..... 13	
1.7 Méthode incrémental conductance (IncCond).....14	
1.8 Méthode l'algorithme perturbation et observation (P&O).....18	
1.9 Conclusion.....20	

## CHAPITRE 2 : modélisation d'un générateur photovoltaïque

2.1 Introduction .....	21	
2.2 Systèmes photovoltaïques.....	21	
2.2.1 Le module photovoltaïque.....	21	
2.2.2 Le principe de fonctionnement des photopiles .....	21	
2.3 Modélisation des cellules solaires.....	22	
2.3.1 Représentation électronique des cellules PV.....	22	
2.3.2 Les caractéristiques électriques d'une cellule PV.....	22	
a) La tension en circuit ouvert.....	24	
b) Le courant de court-circuit.....	24	c) La
puissance.....	24	d) Le
rendement.....	25	
2.4 Modèle de panneau adopté .....	27	2.5
Association des modules photovoltaïques.....	26	
2.5.1 Association en série.....	27	
2.5.2 Association en parallèle.....	28	
2.5.3 Association en série-parallèle.....	28	
2.6 Conclusion.....	3	

0

## CHAPITRE 3 : Simulation et évaluation des résultats

3.1) Introduction.....	31
3.2 Simulation du générateur photovoltaïque.....	31
3.2.1 Les caractéristique d'un générateur photovoltaïque.....	32
3.2.2 l'influence des paramètres internes et externes.....	33
a)paramètres internes .....	33
b)paramètres externes.....	34
3.3 Simulation de convertisseur BOOST.....	36
3.4 simulation de la commande MPPT incrémental conductance « IncCond » et la commande MPPT numérique « P&O » .....	38
3.5 la charge .....	40
3.6 Système globale (GPV, convertisseur, MPPT, charge) .....	40
3.7 L'effet de la variation de la fréquence PWM sur la puissance .....	41
3.8L'effet de la variation de la fréquence PWMle rendement .....	43
3.8.1 calcule de rendement .....	43
3.9 conclusion.....	47
<b>Conclusion générale .....</b>	<b>48</b>

## Bibliographie



# Liste des figures

## Chapitre 01 : systèmes photovoltaïques et leurs composantes

Figure 1.1 : panneau photovoltaïque .....	3
Figure 1.2 :Générateur photovoltaïque.....	4
Figure 1.3 : Cellule silicium monocristallin.....	5
Figure 1.4 : Cellule de silicium multicristallin.....	6
Figure 1.5 : silicium amorphe. ....	6
Figure1.6 :convertisseurs DC/DC.....	7
Figure 1.7 :schéma de principe d'un convertisseur Boost.....	8
Figure 1.8 : chaine élémentaire de la conversation photovoltaïque .....	11
Figure 1.9 :Caractéristiques de fonctionnement de la méthode par incrémentation de conductibilité .....	13
Figure 1.10 : Organigramme de l'algorithme IncCond.....	15
Figure 1.11 :L'algorithme perturbe et observe P&O.....	17

## CHAPITRE 2 : modélisation d'un système photovoltaïque

Figure 2.1 :Exemples de modules photovoltaïques.....	22
Figure 2.2 :Représentation d'une cellule PV idéale.....	22
Figure 2.3 :Représentation la cellule PV réelle .....	23
Figure 2.4Caractéristique courant-tension électriques d'une cellule PV (une photopile.....	25
Figure 2.5 : Modules en série avec diodes by-pass.....	27
Figure 2.6 :Modules en parallèle avec diodes anti-retour.....	28
Figure 2.7.Modules série-parallèle de modules photovoltaïques.....	29
Figure 2.8 : Commutation des 12 modules de 50 Wc dans un champ PV.....	29

## CHAPITRE 3 : simulation et évaluation des résultats

Figure 3.1Schéma de générateur PV dans l'environnement MATLAB/SIMULINK.....	30
Figure 3.2caractéristique courant-tension de module photovoltaïque ATERSA-250.....	32
Figure 3.3caractéristique puissance-tension de module photovoltaïque ATERSA-250.....	32
Figure 3.4 l'influence de résistance série sur la caractéristique ( $I_{pv}$ - $V_{pv}$ ) .....	33
Figure 3.5) l'influence de résistance parallèle sur la caractéristique ( $I_{pv}$ - $V_{pv}$ ) .....	34
Figure 3.6)l'influence de ensoleillement sur la caractéristique ( $I_{pv}$ - $V_{pv}$ ) à $T^{\circ}$ cte.....	35
Figure 3.7)l'influence d'ensoleillement sur la caractéristique ( $P_{pv}$ - $V_{pv}$ ) à $T^{\circ}$ cte .....	35
Figure 3.8)l'influence de la $T^{\circ}$ sur la caractéristique $I_{pv}$ - $v_{pv}$ à un ensoleillement cnt..	36
Figure 3.9)l'influence de la $T^{\circ}$ sur la caractéristique $P_{pv}$ - $v_{pv}$ à un ensoleillement cnt...	
Figure 3.10Architecture adopté dans l'environnement Simulink du convertisseur BOOST..	37
Figure 3.11 la tension de sortie du convertisseur boost .....	37
Figure 3.12Architecture adopté du contrôleur (P&O) l'environnement Simulink.....	38
Figure 3.13 Architecture adopté du contrôleur(IncCond) dans l'environnement Simulink..	39
Figure 3.14Modèle Simulink de générateur de signal PWM.....	39
Figure 3.15 signal commande DC/DC (switch de BOOST) .....	40
Figure 3.16Le système global sous l'environnement Simulink.....	41
Figure 3.17 Puissance générée par le panneau PV pour $T=25^{\circ}\text{C}$ et $f=50\text{khz}$ et éclairément variable de $200\text{W}/\text{m}^2$ à $1000\text{W}/\text{m}^2$ .....	43
Figure 3.18 la variation de rendement en fonction de fréquence PWM dans le cas de commande MPPT (P&O).....	46
Figure 3.19)la variation de rendement en fonction de fréquence PWM dans le cas de commande MPPT (P&O).....	46
Figure 3.20 la variation de rendement en fonction de fréquence PWM avec deux méthode (inCond et P&O).....	47







# Liste des abréviations

I <sub>ph</sub>	Le photo-courant(A)
PV	photovoltaïque
I <sub>d</sub>	Courant de la diode (A)
I <sub>s</sub>	Courant de saturation (A)
q	La charge de l'électron
K	Coefficient de Boltzmann
T	Température (C°)
V	La tension (V)
I	Le courant (A)
N	La facteur de d'idéalité de la diode
R <sub>s</sub>	Résistance sérié ( $\Omega$ )
R <sub>sh</sub>	Résistance de shunt (parallèle) ( $\Omega$ )
V <sub>oc</sub>	Tension en circuit ouvert (V)
I <sub>cc</sub>	Courant de court-circuit (A)
P <sub>max</sub>	Puissance maximum(Watts)
V <sub>m</sub>	Tension optimal(V)
I <sub>m</sub>	intensité optimal(A)
MPPT	Maximum Power Point Tracking
STC	Les condition normalisées d'ensoleillement
W <sub>c</sub>	Watts-crête
$\eta$	Rendement (%)
S	La surface (m <sup>2</sup> )
G	L'irradiation(l'éclairement) de référence (1000 W/m <sup>2</sup> )
I <sub>pv</sub>	Courant de générateur photovoltaïque (A)
V <sub>pv</sub>	Tension de générateur photovoltaïque (V)
P <sub>m</sub>	Puissance optimal (Watts)

CC	courant continu
DC	Direct courent
DC/DC	Direct Courent/Direct Courent Converter
D	Rapport cyclique (%)
Ts	Période de de commutation(KHz)
FS	Fréquence de commutation (KHz)
MOSFET	transistors à effet champ d'oxyde de métal
PWM	Pulse width modulation
L	Bobine (H)
C	Capacité du condensateur(F)
R	Résistance ( $\Omega$ )
P&O	Perturbation et Observation
Vref	Tension de référence (V)
GPV	GénérateurPhotovoltaïque
Ipv	Courant de Générateurphotovoltaïque
Vpv	Puissance d Générateurphotovoltaïque(Watts)
MPPMaximum PowerPoint	
P(K)	Puissance à instant actuel
P(K-1)	Puissance à instant passé
GPV	Générateur photovoltaïque

# Conclusion général

Les énergies renouvelables constituent une excellente alternative aux énergies fossiles et Nucléaires vue leurs différents avantages :

Inépuisables, non polluante, et décentralisées.

Parmi ces énergies renouvelables, l'énergie solaire photovoltaïque connaît un intérêt grandissant ces dernières années.

Un générateur photovoltaïque présente une caractéristique tension-puissance en cloche qui dépend de plusieurs paramètres extérieure et intérieure.

En d'autres termes, il existe un seul point de fonctionnement pour extraire la puissance maximale du générateur et ce point n'est pas fixe, il change avec les conditions extérieures, donc plus on est loin de lui, plus la puissance délivrée par le module photovoltaïque est élevée et plus le rendement de panneau (PV) est bon.

Dans le but de maximiser le rendement du module photovoltaïque, on a étudié la variation de puissance fournie par ce dernier en fonction de la fréquence PWM du PWM.

Le travail présenté dans ce mémoire est divisé en trois chapitres :

Dans le premier chapitre, nous avons vu le module photovoltaïque et les différents types des cellules solaires, les principes de fonctionnement de notre convertisseur, et on présente le rôle des algorithmes de contrôleur MPPT. Ainsi, on a décrit le mécanisme de la poursuite pour l'extraction de la puissance maximale sous différentes conditions de fonctionnement.

Parmi ces algorithmes qui existent dans la littérature, nous avons choisi deux méthodes, l'incrémental conductance et (perturbe et observation). Nous avons utilisé ces dernières méthodes dans ce travail à cause de sa simplicité, et son exigence seulement des mesures de tension et du courant du panneau photovoltaïque. Dans le deuxième chapitre, nous avons présenté la modélisation de panneaux photovoltaïques et leurs caractéristiques électriques.

Le troisième chapitre de notre travail, nous avons consacré à la simulation de notre système photovoltaïque, l'étage d'adaptation et le contrôleur MPPT (incCond) sur MATLAB/SIMULINK.

En conclusion que la variation de puissance du panneau en fonction de la fréquence PWM, produit un bon rendement de ce dernier dans les hautes fréquences. Dans le cas de la

commande MPPT (P&O) est le rendement meilleur à celui dans le cas de la commande MPPT(IncCond).

## Liste des tableaux

Tableau 2.1 :caractéristique électrique du module photovoltaïque panneau ATERSA 250W dans les condition standards « STS ».....

Tableau 3.1 : la variation de puissance en fonction de fréquence PWM.....42

Tableau 3.2 : la puissance moyenne fournie par le panneau avec leur rendement en fonction de fréquence PWM avec MPPT et P&O.....44

Tableau 3.3 : la puissance moyenne fournie par le panneau avec leur rendement en fonction de fréquence PWM avec MPPT InCound.....44

# Introduction Générale

Le rendement c'est un facteur très important dans tous les systèmes de productions, son idée générale qualifie la manière dont une action, un procédé de transformation, un processus dans lequel on a initialement entré quelque chose retourne le résultat prévu ou attendu, avec l'idée que ce rendu, retour, renvoi peut être plus ou moins performant du fait de l'existence d'imperfection, de gaspillage, de déchets, d'inertie.

On peut le trouver dans plusieurs domaines, nous citons quelques secteurs:

- En physique, le rendement désigne le rapport entre l'efficacité énergétique réelle d'une machine thermique et son efficacité théorique maximale.
- En mécanique, le rendement d'un moteur à explosion exprime le ratio de la puissance mécanique restituée par rapport à la puissance thermique fournie par le carburant.
- En chimie, le rendement chimique d'une réaction est le nombre de moles de produit formé divisé par le nombre de moles de réactif limitant présent au début de la réaction.
- En électronique, le rendement exprime le rapport entre la puissance consommée et la puissance fournie par un circuit.
- En électrotechnique, le rendement d'un moteur électrique est donné par le rapport entre la puissance mécanique délivrée et la puissance électrique absorbée.
- Dans l'industrie pétrolière, le rendement est le pourcentage en poids de chacun des produits pétroliers intermédiaires ou finis, après passage d'un brut ou d'une charge dans une ou plusieurs unité(s) de traitement.

En pratique, les rendements sont généralement croissants pour de petites quantités, pour devenir constants, puis décroissants pour de très grandes quantités.

La Technologie d'aujourd'hui se développe de plus en plus, et la consommation d'énergie fossiles augmente d'une façon élevée, donc on été obligé de chercher d'autres sources d'énergie plus adéquate et plus rentable. L'une des solutions convenables est l'énergie solaire qu'on peut exploité par des panneaux photovoltaïques. Mais le rendement dans ce dernier Demeure a present Est faible.

Le rendement des panneaux solaires en puissance a toujours été jugé insuffisant (entre 15 et 20 %). Pour que ces derniers puissent produire une énergie importante capable d'assurer l'alimentation d'un système plus au moins puissant, le rendement de ces panneaux doit être le maximum possible. Des recherches actuelles se sont consacrées au développement de plusieurs matériaux afin d'obtenir un meilleur rendement.

A nos jours les technologies employées donnent des rendements qui n'excèdent pas les 20 %. Le tableau ci-dessous résume les différentes technologies et les rendements correspondants.

Type	Cellule (labo)	Module (labo)	Module (commercial)	Niveau Développement
1ère génération				
Silicium Monocristallin	27.70 %	27.70 %	12-20%	Production Industriel
Silicium Polycristallin	20.30 %	16.20 %	11-15 %	Production Industriel
2eme génération				
Silicium Amorphe	13.40 %	10.40 %	5-9 %	Production Industriel
Silicium cristallin En couche mince		9.40 %	7 %	Production Industriel
3eme génération				
Cellule Organique	5.70			Au stade de la Recherche
Cellule de Gratzel	11 %	8.40 %		Au stade de la Recherche

Cellules Multi-jonctions	39 %	5-30 %		Au stade de la Recherche, Production Exclusivement Applications spatiales
-----------------------------	------	--------	--	--

**Tableau:** Comparatif des rendements des différents types de cellules.

Néanmoins le rendement des panneaux dépend de plusieurs paramètres extérieurs. Assavoir l'insolation est le paramètre le plus s'influent sur la production de la puissance d'un panneau photovoltaïque. Le deuxième facteur est la température, ce dernier est plus ou moins influant la puissance de panneau.

D'un autre côté, le rendement des panneaux dépend des paramètres du système. Par exemple la fréquence de la PWM.

La diversification des méthodes MPPT Cela donne un changement de la production de la puissance d'un panneau photovoltaïque.

Pour améliorer le rendement des panneaux et de profiter ainsi au maximum de la puissance obtenue plusieurs études ont été faites, la filière est en extension.

La commande MPPT délivre un signal de commande du système est toujours piloté avec une fréquence bien déterminée au paravent. En pratique cette dernière varie sous l'influence des paramètres de l'environnement externes et internes.

Une fréquence mal choisi doit une perte de puissance dans le système photovoltaïque.

Ce mémoire comporte trois chapitres :

Dans le premier chapitre, nous présentons d'une manière générale les systèmes photovoltaïques ou nous étudierons les différents types des cellules et le convertisseur DC/DC, ainsi que les méthodes de poursuite du point maximum de puissance MPPT.

Le deuxième chapitre sera consacré à l'étude et à la modélisation d'un générateur photovoltaïque.

Un choix est porté sur le panneau ATERSA250. C'est un panneau utilisé dans la station de production d'énergie électrique à Ghardaïa.



Dans le troisième chapitre, nous envisagerons la modélisation et la simulation du système (Hacheur, commande et la charge) en utilisant dans un premier temps une source de tension afin de valider le modèle. Après la vérification de l'efficacité des différents modules, l'ensemble est accouplé au générateur PV. Pour étudier et tester l'effet de variation de la fréquence PWM sur le rendement du panneau nous avons fait varier cette dernière dans une plage allant de Cinq à mille Kilo Hertz. Notre travail sera complété par une conclusion générale et perspectives.

## 1-1) INTRODUCTION

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

Dans ce chapitre nous définissons les panneaux solaires d'une façon générale, ces derniers nécessitent un étage d'adaptation (convertisseur DC/DC). On étudie leur principe de fonctionnement, le dimensionnement de ses différents composants, ainsi que les modèles mathématiques simplifiés.

Dans la dernière partie nous abordons la problématique de la recherche du PPM (point de puissance maximale).

## 1.2) Les panneaux :

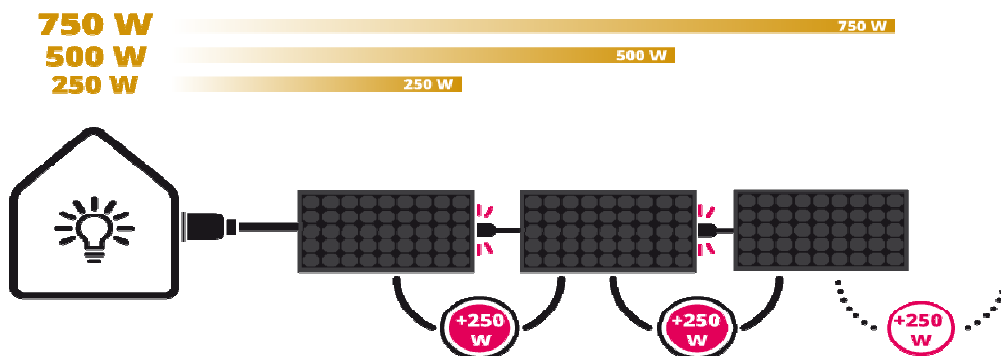
La cellule individuelle, unité de base d'un système photovoltaïque, ne produit qu'une très faible puissance électrique, typiquement de 1 à 3 W avec une tension de moins d'un volt. Pour produire plus de puissance, les cellules sont assemblées pour former un panneau. Les connexions en série de plusieurs cellules augmentent la tension pour un même courant, tandis que la mise en parallèle accroît le courant en conservant la tension. La puissance crête, obtenue sous une insolation maximale sera proportionnelle à la surface du module.



*Figure 1.1: panneau photovoltaïque*

## 1.2.1 Le générateur photovoltaïque

Le générateur Photovoltaïque se compose de plusieurs modules et d'un ensemble de composants qui adapte l'électricité produite par les modules aux spécifications des récepteurs. L'interconnexion des modules entre eux, en série ou en parallèle nous permet d'obtenir une puissance plus grande, elle définit la notion du générateur photovoltaïque.



*Figure1.2 : générateur photovoltaïque.*

## 1.2.2 Durabilité et fiabilité d'un panneau solaire

Soumis aux rayonnements du Soleil (ultra-violets, infrarouge...) et aux intempéries, les matériaux des panneaux solaires se dégradent peu à peu.

Actuellement, la durée de vie d'un panneau solaire photovoltaïque est garantie par les constructeurs pour 20 à 25 ans. Au-delà de cette durée, le panneau continue à fonctionner mais sa productivité décroît avec le temps.

Dans le cas des panneaux solaires thermiques, la durée de vie garantie est plus faible, aux alentours de 10 à 15 ans. On considère que ce type de panneau solaire peut fonctionner de manière optimale une vingtaine d'années.

En revanche, les autres équipements des installations solaires peuvent avoir une durée de vie inférieure à celle des panneaux. Les onduleurs, par exemple, sont garantis en général entre 5 et 10 ans.

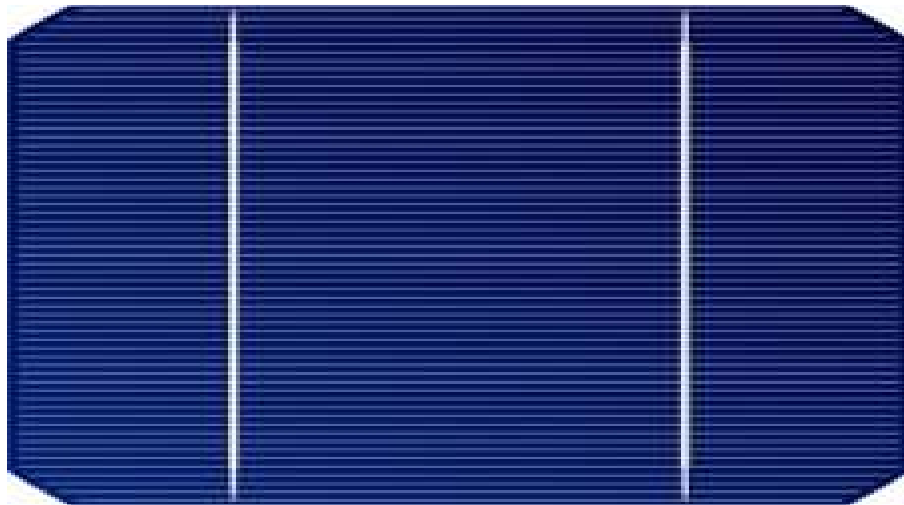
## 1.2.3 Les différents types de cellules solaires et leur rendement

Les cellules photovoltaïques sont des composants optoélectroniques qui transforment directement la lumière solaire en électricité, elles sont réalisées à l'aide des matériaux semi-conducteurs. [1]

Il existe trois principaux types de cellules à l'heure actuelle :

### a) Les cellules monocristallines

Les cellules monocristallines sont les photopiles de la 1<sup>ère</sup> génération, elles sont élaborées à partir d'un bloc de silicium cristallisé en un seul cristal. Les cellules sont rondes ou presque carrées, et vues de près, elles sont de couleur uniforme. Elles ont un taux de rendement de 12 à 16 %, mais la méthode de production est difficile, donc très cher, car il faut une grande quantité d'énergie pour obtenir un cristal pur.



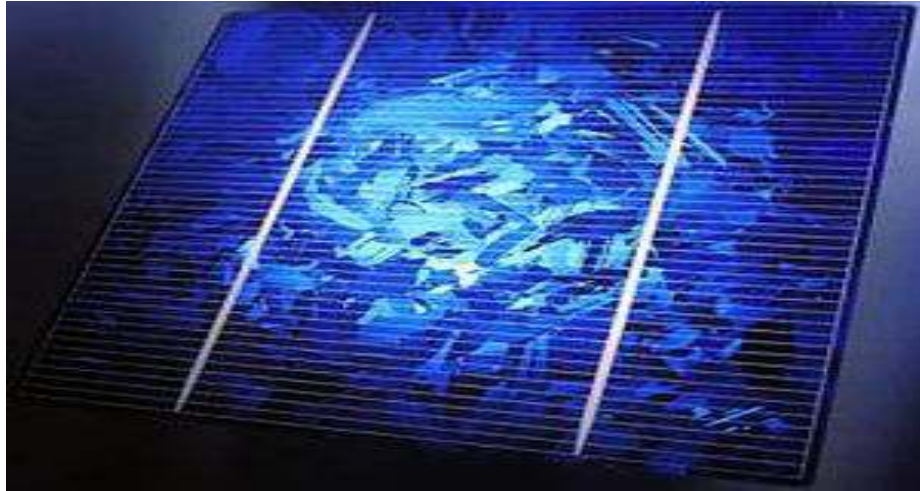
**Figure 1.3 :** Cellule silicium monocristallin.

### b) Les cellules poly - cristallines

Les cellules poly-cristallines sont élaborées à partir d'un bloc de silicium cristallisé en forme de cristaux multiples. Vu de près, on peut voir les orientations différentes des cristaux. Elles ont

## Chapitre 1 Systèmes photovoltaïques et leurs composants

un rendement de 11 à 13 %, mais leur coût de production est moins élevé que les cellules monocristallines.



**Figure 1.4:** Cellule de silicium multicristallin.

### c) Les cellules en silicium amorphe

Cette fois le silicium n'est pas cristallisé, mais transformé sous forme de gaz, puis projeté et étalé sur une feuille de verre fine. D'apparence foncée, gris ou marron les panneaux sont souples. Du fait de cette souplesse, ils sont plus faciles à installer et permettent d'optimiser l'espace disponible. Le rendement des cellules en silicium amorphe est moins affecté par la lumière et la température, les panneaux équipés avec ce type de cellules sont donc plus adaptés aux régions peu ensoleillées car ils sont plus performants que les cristallins par temps nuageux. Ces cellules fonctionnent même avec de la lumière artificielle, reste l'inconvénient du rendement (entre 5 et 9%) et la puissance (60Wc/m<sup>2</sup>).



**Figure 1.5:** cellule silicium amorphe.

## 1.3 Les convertisseurs DC/DC

L'utilisation des convertisseurs DC-DC permet le contrôle de la puissance électrique dans les circuits fonctionnant en courant continu avec une très grande souplesse avec un rendement élevé.

Les convertisseurs se composent essentiellement de condensateurs, d'inductances et de commutateurs (MOSFET OU IGBT).

Dans le cas idéal, tous ces dispositifs ne consomment aucune puissance active, c'est la raison pour laquelle ils sont dotés d'un bon rendement.

Le commutateur est réalisé avec un dispositif semi-conducteur, habituellement un transistor MOSFET ou un IGBT fonctionnant en mode (bloqué/saturé).

Si le dispositif semi-conducteur est bloqué, son courant est zéro d'où une dissipation de puissance nulle. Si le dispositif est dans l'état saturé, la chute de tension à ses bornes sera presque nulle et par conséquent la puissance perdue sera très faible [2].

La figure(1-6) montre la représentation d'un convertisseurs DC/DC, que peut être utilisé comme interface entre la source et la charge

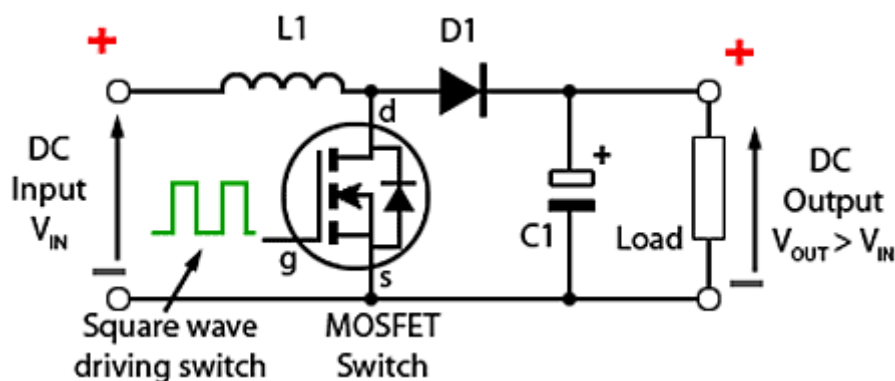


Figure 1.6 : convertisseurs DC/DC

## 1.3.1 Le convertisseur survolteur (BOOST)

Le convertisseur Boost est connu par le nom d'élevateur de tension. Le schéma de la figure ci-dessous, représente le circuit électrique du Boost. Au premier temps ( $\alpha T$ ), le transistor (S) est fermé, le courant dans l'inductance croît progressivement, et au fur et à mesure, elle emmagasine de l'énergie, jusqu'à la fin de la première période.

Ensuite, le transistor (S) s'ouvre et l'inductance (L) s'opposant à la diminution de courant ( $I_L$ ), génère une tension qui s'ajoute à la tension de source, qui s'applique sur la charge (R) à travers la diode (D). [3]

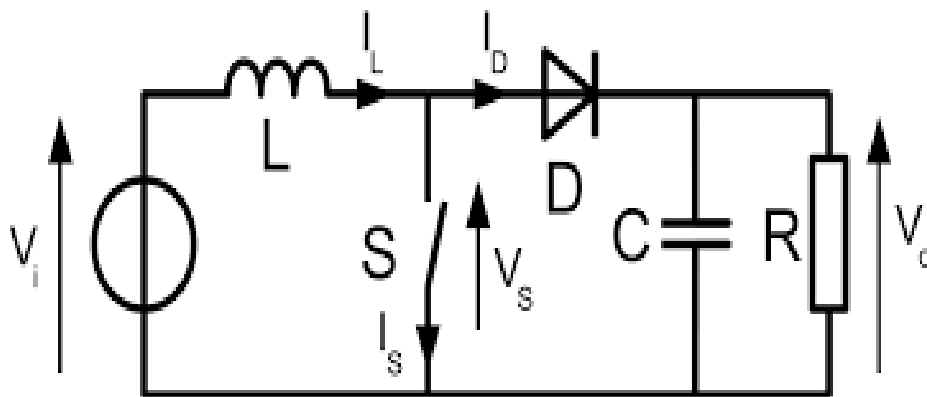


Figure 1.7 : Schéma de principe d'un convertisseur Boost.

## 1.3.2 Dimensionnement d'un convertisseur DC/DC (Boost)

La tension d'entrée du convertisseur est celle délivrée par le panneau PV, donc  $V_{in}=30V$ .

Nous désirons une tension de sortie de  $V_o=48\text{ v}$ ,  $P_o=250W$ . La Fréquence de travail est fixée à  $50\text{kHz}$ .

### a) Rapport cyclique :

Il représente la durée pendant laquelle l'interrupteur S conduit.

Il est défini comme suit :

$$D = \frac{t_{on}}{t_{on}+t_{off}} = \frac{t_{on}}{T} \text{ Est compris entre '0' (S ne conduit jamais) et '1' (S conduit tous le temps).}$$

$$D = [D_{min}, D_{max}] = \frac{V_o + V_{in}}{V_{in}} = \frac{48 + 30}{30} = [0, 0.375]$$

### b) L'inductance L :

$$V_{pv} = [0, V_{cc}] = [0, 37.6]$$

$$I_{pv} = [0, I_{cc}] = [0, 8.91]$$

$$L = \frac{V_{pv} \cdot D}{2 \cdot I_{pv} \cdot f_s} = \frac{37.6 \cdot 0.375}{2 \cdot 8.91 \cdot 50000} = 15.834 \mu\text{H}$$

### c) La résistance R :

$$R = \frac{V_{out}}{I_{out}} = \frac{48}{5.6} = 9.23$$

$$\text{Avec } I_{out} = \frac{P_{out}}{V_{out}} = \frac{250}{48} = 5.6A$$

### d) capacités C :



$$C = \frac{I_{out} \cdot D}{f_s \cdot \Delta v} = \frac{5.6.0.375}{50000.2} = 19.5 \mu F$$

### 1.5 Les commandes MPPT

Aujourd'hui, compte tenu du prix élevé des générateurs PV et du faible rendement de dispositifs de conversion photons-électrons mis en œuvre (entre 12% et 17 %), le développement de cette énergie à grande échelle nécessite avant tout une amélioration de ces systèmes de telle sorte qu'ils puissent fonctionner, à tous instant, à leur puissance maximale.

Le point de puissance maximale MPP (Maximum Power point), qui correspond au point de fonctionnement optimal, se déplace en fonction des conditions de fonctionnement du Module photovoltaïque.

Les conditions de fonctionnement les plus significatives l'ensoleillement qu'il subit et la température de module.

Ces conditions atmosphériques subissent des variations au cours du temps et peuvent parfois changer brusquement.

On peut rencontrer une variation brutale de l'ensoleillement dans un panneau lors du passage de nuages par exemple, ou dans les véhicules solaires lorsqu'ils passent dans une zone ombrée par des arbres ou des constructions.

On rencontre le cas d'une diminution rapide de la température lorsqu'il y'a des averses soudaines par exemple, mais le cas d'une augmentation brutale de la température ne se produit pratiquement jamais.

Pour que le panneau fournisse sa puissance maximale disponible, il faut donc une adaptation permanente de la charge avec le générateur photovoltaïque.

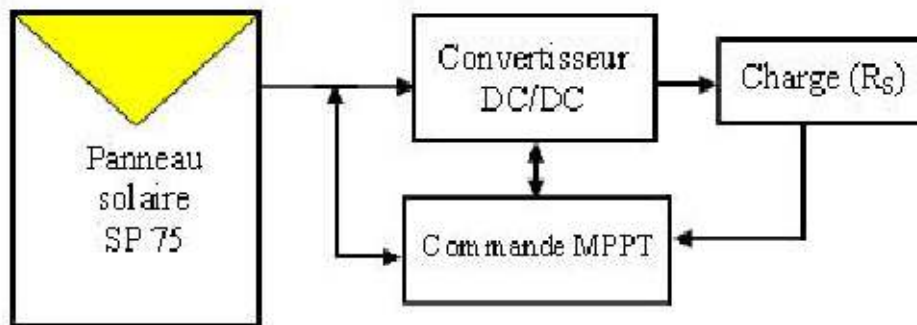
Pour suivre les variations du point MPP, on doit utiliser un dispositif de poursuite automatique appelé MPPT (Maximum Power Point Tracker).

Ce dispositif consiste en un Contrôleur qui a pour rôle de rechercher continuellement le point MPP quelque soient les conditions tel que la stabilité et la rapidité de la réponse.

# Chapitre 1 Systèmes photovoltaïques et leurs composants

Il existe plusieurs MPPT.

Dans cette mémoire, on s'est intéressé à les méthode Incremental Conductance et perturbation et observation (P&O).



**Figure 1.8** Chaîne élémentaire de la conversion photovoltaïque.

## 1.6 Les Méthodes MPPT

Il existe plusieurs méthodes de la poursuite de puissance maximale. Les références [4] et [5] expliquent en détail un grand nombre de ces méthodes.

On en donne ce qui suit un Bref aperçu :

- Adaptation manuel :

Elle consiste à adapter manuellement la charge au générateur photovoltaïque, s'est-il dire Choisir la charge suivant la valeur du courant et de la tension obtenue expérimentalement Pour des conditions normales de fonctionnement.

- Méthodes à contre réaction de tension :

La tension de référence peut être fixe, Variable en fonction de la tension à circuit ouvert  $V_{oc}$  ou externe par l'utilisation d'une Cellule pilote.

- Méthodes à contre réaction de courant :

Là aussi le courant peut être variable en fonction du courant de court-circuit  $I_{sc}$ , ou externe Par l'utilisation d'une cellule pilote.

# Chapitre 1 Systèmes photovoltaïques et leurs composants

- Méthodes à contre réaction de puissance :

Plusieurs algorithmes sont utilisés comme l'algorithme (perturbation et observation) (P&O)

Et l'algorithme (incrémental conductance).

- méthode de poursuite analogique.

- Utilisation d'un contrôleur flou.

Parmi les méthodes citées ci-dessus, dans notre travail nous nous sommes intéressés aux deux méthodes les plus populaires. A savoir la méthode P&O et Incrémentale conductance. Une comparaison entre les résultats obtenus par les deux méthodes sera envisagée.

Nous allons expliquer dans ce qui suit le principe de fonctionnement de chacune des deux méthodes.

## 1.7 Méthode de la conductance incrémentale (IncCond)

Cette méthode s'intéresse directement aux variations de la puissance en fonction de la tension. La conductance est une grandeur physique relativement connue : il s'agit du quotient de l'intensité par la tension ( $G=I/V$ ). La conductance incrémentielle est beaucoup plus rarement définie, il s'agit du quotient de la variation, entre deux instants, de l'intensité par celle de la tension ( $G = dI / dV$ ). En comparant la conductance  $G$  à la conductance incrémentielle  $\Delta G$ , nous allons déterminer le maximum de la courbe figure (1.9) en cherchant le point d'annulation de la dérivée de la puissance. [6]

Précisément la puissance en sortie de la source peut s'écrire comme suit :

$$P = V \times I \quad (1.7)$$

$$\frac{dp}{dv} = v \frac{dI}{dV} + \frac{dv}{dv} I \quad (1.8)$$

$$\frac{dp}{dv} = v \frac{dI}{dV} + I \quad (1.9) \quad \frac{dp}{dv} \cong v \frac{\Delta I}{\Delta V} + I$$

(1.10)

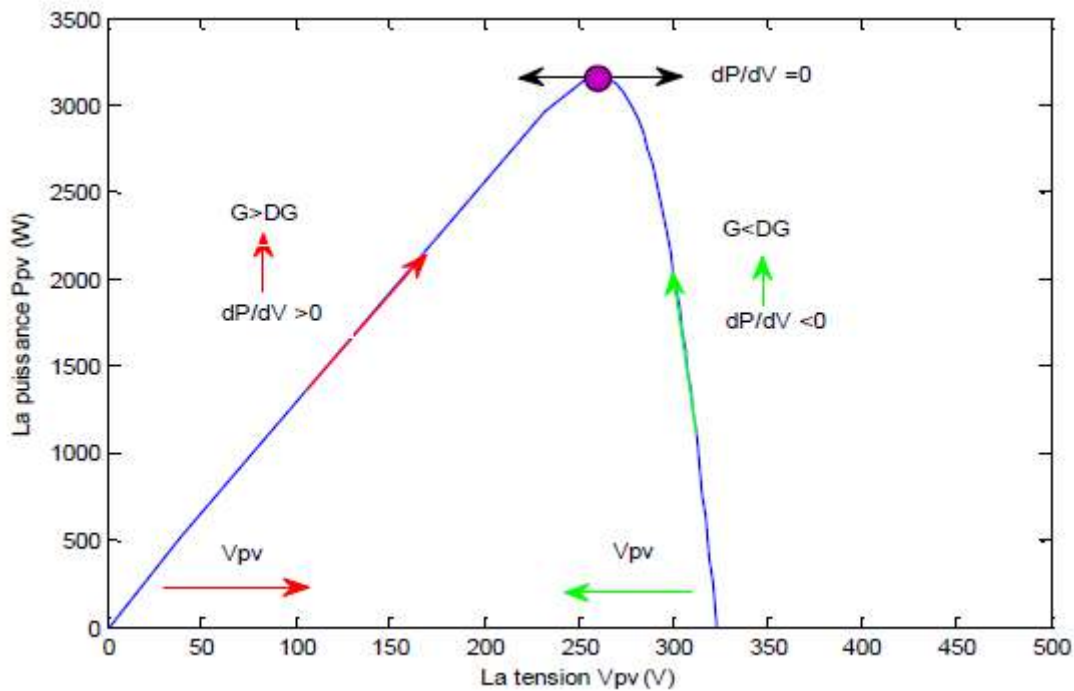
Donc :

# Chapitre 1 Systèmes photovoltaïques et leurs composants

$$\frac{dp}{dv}=0 \quad \frac{\Delta I}{\Delta V} = -\frac{I}{V} \text{(a) Au point MPP}$$

$$\frac{dp}{dv}>0 \quad \text{ou} \quad \frac{\Delta I}{\Delta V} > -\frac{I}{V} \text{(b) A gauche du MPP}$$

$$\frac{dp}{dv}<0 \quad \frac{\Delta I}{\Delta V} < -\frac{I}{V} \text{(c) A droite du MPP}$$



**Figure 1.9 :** Caractéristiques de fonctionnement de la méthode par incrémentation de conductibilité.

Les équations (b) et (c) sont employées pour déterminer la direction dans laquelle une perturbation doit se produire pour déplacer le point de fonctionnement vers le MPP.

Cette perturbation est répétée jusqu'à ce que l'équation (a) soit satisfaite. Une fois le MPP est atteint, le MPPT continue à fonctionner avec cette valeur jusqu'à ce qu'un changement de la valeur du courant soit détecté, ce dernier résulte d'un changement au niveau de l'éclairement.

Quand l'éclairement augmente, le MPP se déplace vers la droite de la tension de fonctionnement.

Pour compenser ce mouvement du MPP, le MPPT doit augmenter la tension de fonctionnement.

## Chapitre 1 Systèmes photovoltaïques et leurs composants

La même chose pour le cas contraire, quand l'éclairement diminue, le MPPT doit diminuer cette dernière.

Les valeurs actuelles et précédentes de la tension et du courant sont utilisées pour calculer  $(\Delta V)$  et  $(\Delta I)$ . Si  $\Delta V=0$  et  $\Delta I=0$ , alors les conditions atmosphériques n'ont pas changé et le MPPT fonctionne toujours au MPP.

Si  $\Delta V=0$  et  $\Delta I>0$ , alors l'éclairement a augmenté. Ceci exige à l'algorithme une augmentation de la tension du fonctionnement pour retrouver de nouveau MPP. Contrairement si  $\Delta I<0$ , l'éclairement a diminué tout en exigeant à l'algorithme de diminuer la tension de fonctionnement. Si le changement de la tension n'est pas nul, les rapports dans les équations (4.4.b) et (4.4.c) peuvent être employés pour déterminer la direction dans laquelle la tension doit être changée afin d'atteindre le MPP.

Si  $\frac{dI}{dV} < -\frac{I}{V}$  (c'est-à-dire le rapport  $\frac{dp}{dv} < 0$ ) donc le point de fonctionnement est à gauche du MPP. Ainsi, la tension de fonctionnement doit être augmentée pour atteindre le MPP.

De même, si  $\frac{dI}{dV} > -\frac{I}{V}$  (c'est-à-dire le rapport  $\frac{dp}{dv} > 0$ ) donc le point de fonctionnement se trouve à droite du MPP tout en signifiant que la tension doit être réduite pour atteindre le MPP. [7]

Le schéma de la figure (1.10) montre l'organigramme de l'algorithme INC :

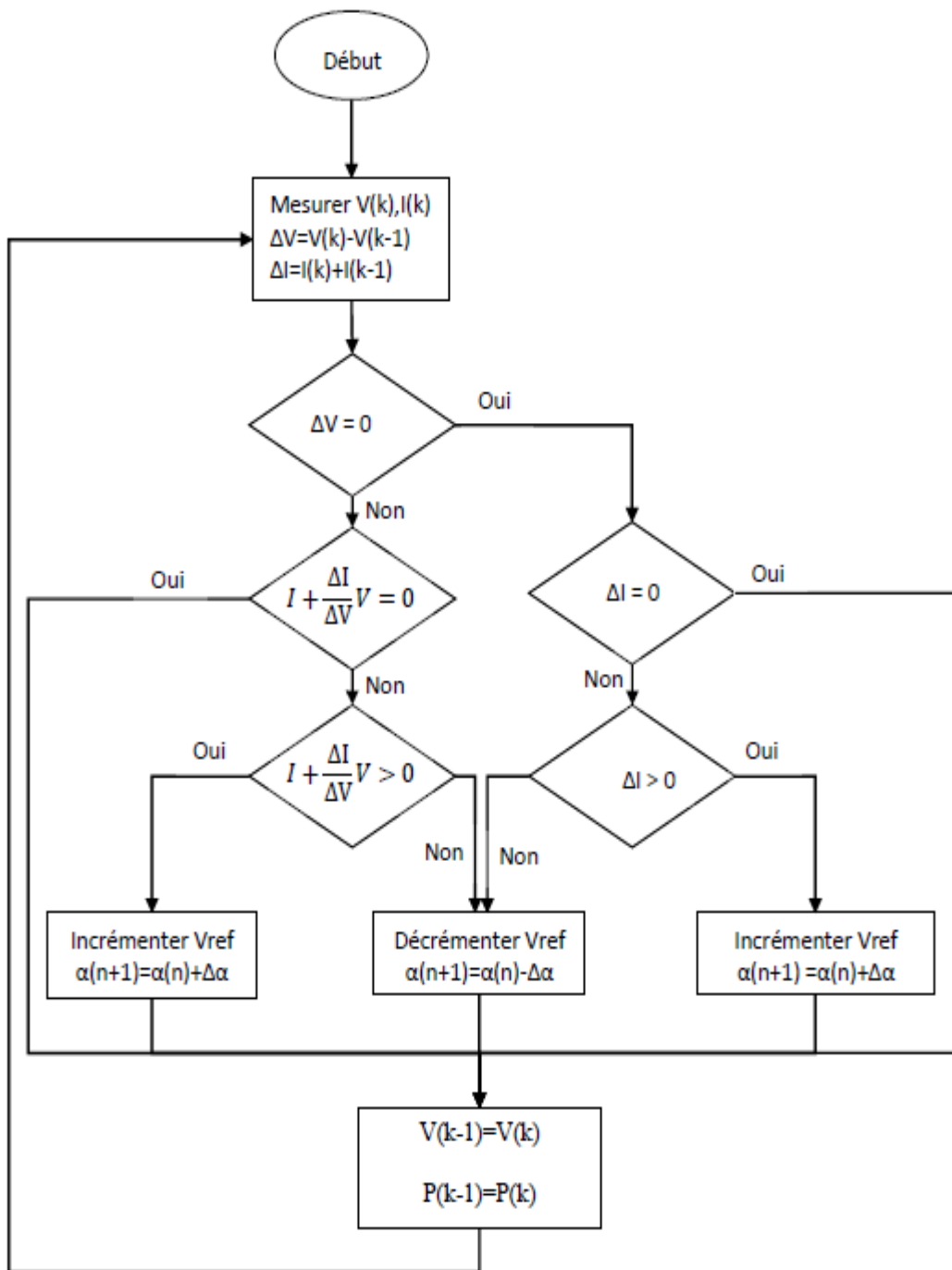


Figure 1.10: Organigramme de l’algorithme IncCond.

**1.8 Méthode l’algorithme perturbation et observation (P&O)**

## Chapitre 1 Systèmes photovoltaïques et leurs composants

L'algorithme perturbé et observe (P&O) est souvent utilisé, en raison de sa facilité de mise en œuvre. Il est basé sur le critère suivant : si la tension de fonctionnement du générateur photovoltaïque est perturbée dans une direction donnée et si la puissance tirée de panneaux PV augmente, cela signifie que le point de fonctionnement a évolué vers le Mpp, par conséquent, la tension doit être plus perturbée dans la même direction. Sinon, si la puissance tirée de GPV diminue, le point de fonctionnement est éloigné de la Mpp, par conséquent, la direction de la perturbation de la tension doit être inversée. La figure 2-9 présente le déroulement de l'algorithme P&O [8].

Le principal inconvénient de cette méthode est que la tension de réseau est perturbée à chaque cycle de commande. Par conséquent, l'algorithme P&O va osciller autour de la tension optimale lorsque le point de fonctionnement de puissance maximale est atteint. Une taille constante de pas de perturbation, est également un problème majeur dans les algorithmes hill climbing, un pas petit rend l'algorithme lent et un pas large mène à la grande fluctuation de puissance de sortie.

Par conséquent, le pas doit être grand au cours de changement transitoire de l'insolation alors qu'il devrait être petit pendant l'état d'équilibre. Par conséquent, deux tailles de pas dépendent d'une valeur de seuil de puissance peuvent être utilisées. La petite taille de pas est utilisée lorsque la différence de puissance est inférieure à la valeur de seuil, et le grand pas est appliqué lorsque la différence de puissance est supérieure à la valeur de seuil.

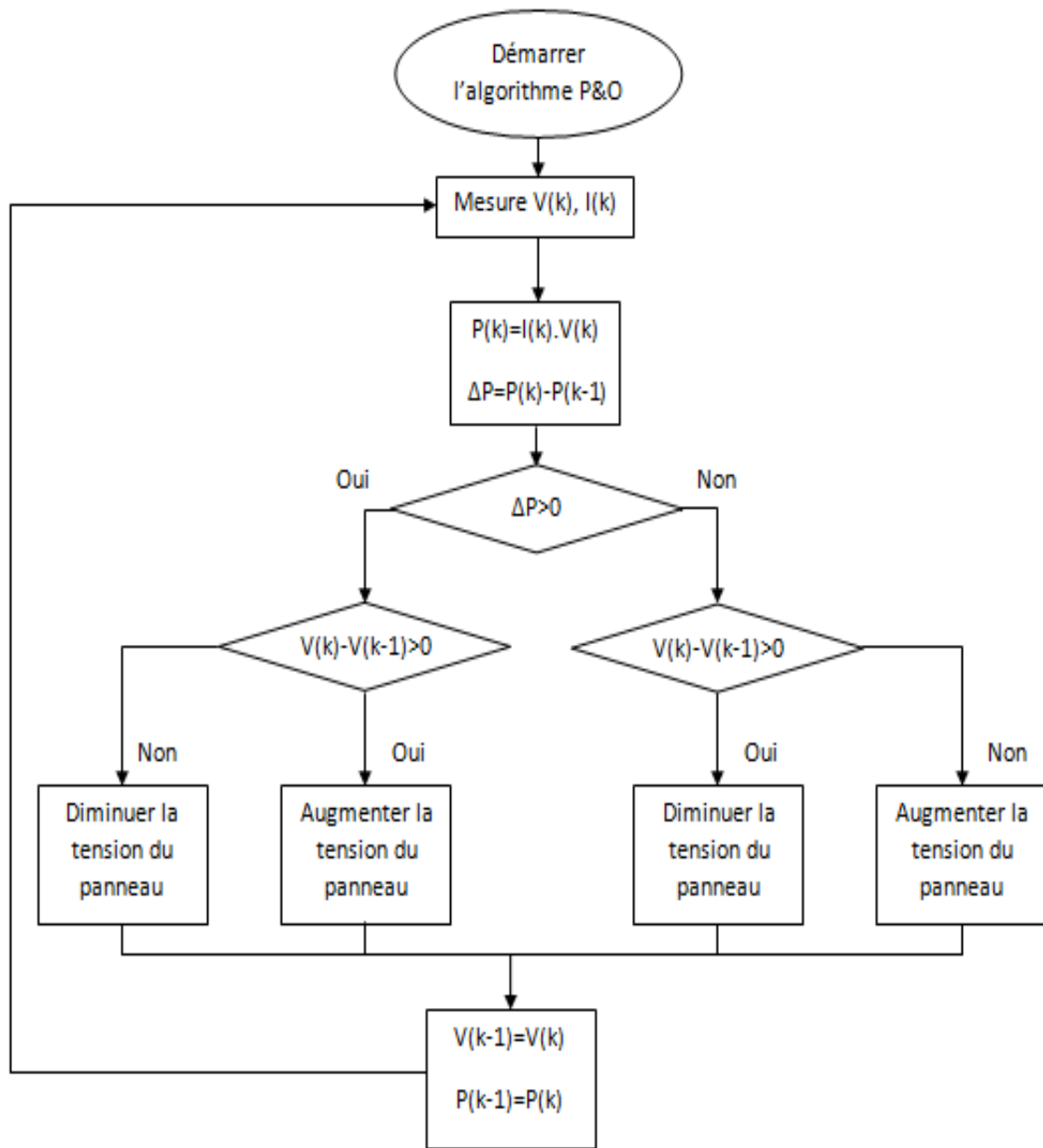


Figure 1.11 L'algorithme perturbe et observe P&O.



## 1.9 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté dans un premier temps les panneaux photovoltaïques, suivi de l'état d'art sur les convertisseurs DC/DC d'une manière générale. Le principe du fonctionnement du convertisseur adopté à savoir le BOOST a été développé ainsi que le calcul de ces composants.

Enfin nous avons cité les différentes techniques MPPT. Les méthodes les plus populaires « IncCond » et « P&O » ont été présentées.

### 2.1 Introduction

Il existe différentes sources d'énergie renouvelables disponibles sur la planète dont les principales sont : l'énergie solaire, l'énergie éolienne, l'énergie hydraulique, la biomasse et la géothermie. Elles peuvent être converties, selon les besoins, en électricité ou en chaleur. La cogénération d'électricité et de chaleur est possible dans le cas de la géothermie, de la biomasse et de l'énergie solaire. Dans le cadre de notre étude, nous nous sommes concentrés sur la production d'électricité à partir de l'énergie photovoltaïque. Nous détaillons dans les paragraphes suivants les éléments ayant trait à cette ressource et sa transformation en énergie électrique.

### 2.2 Systèmes photovoltaïques

#### 2.2.1 Le module photovoltaïque

Un module photovoltaïque est tout d'abord un convertisseur d'énergie lumineuse en électricité. Par définition, c'est un ensemble de photopiles assemblées pour générer une puissance électrique suffisante lors de son exposition à la lumière. En effet, une photopile seule ne génère qu'une tension faible : de 0,5 à 1,5 V selon les technologies. Il est donc nécessaire d'associer plusieurs photopiles en série pour pouvoir produire une tension exploitable. On réalise ainsi un module dont la puissance va dépendre de la surface mise en œuvre. Celui-ci va produire un courant continu en basse tension lorsqu'il sera exposé à la lumière, et il constitue la seule partie productrice d'énergie de notre générateur photovoltaïque[9]. Par ailleurs, il ne faut pas oublier que ce module sera aussi exposé aux rigueurs du climat et de l'environnement (variations de température, humidité, salinité, etc.). Etant un assemblage fragile et sensible à la corrosion, il conviendra donc de le protéger mécaniquement et efficacement.



Figure 2.1 :Exemples de modules photovoltaïques.

### 2.3 Modélisation des cellules solaires

#### 2.3.1 Représentations électroniques des cellules PV

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

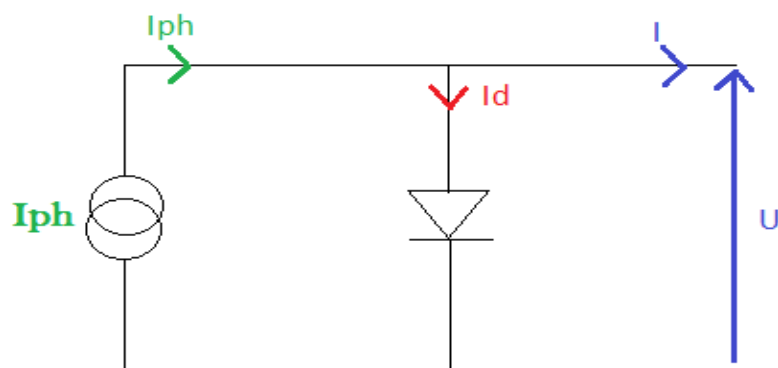


Figure 2.2 :Représentation d'une cellule PV idéale.

## Chapitre 2 modélisation d'un générateur photovoltaïque

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

$$I = I_{ph} - I_d(2.1)$$

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

$I_d$  : Courant de la diode exprimée par :

$$I_d = I_s \left[ \exp\left(\frac{qV}{nKT}\right) - 1 \right](2.2)$$

Où :  $I_s$  : courant de saturation inverse de la diode ;

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

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

$T$  : température de la jonction ;

$V$  : tension de sortie de la cellule ;

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

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

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

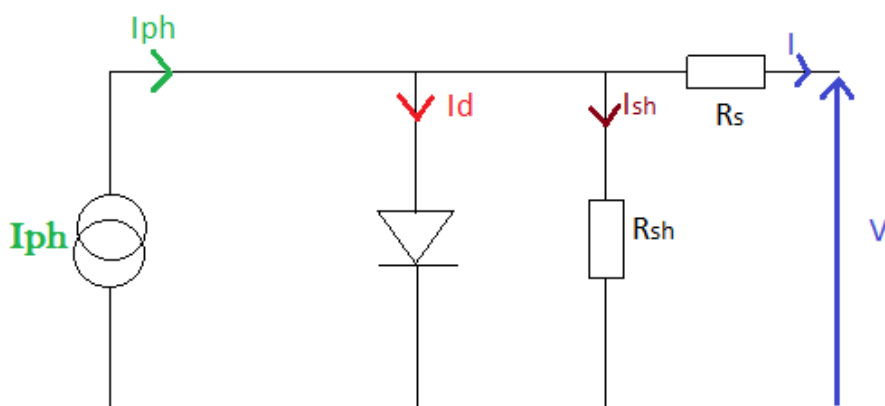


Figure 2.3 : Représentation la cellule PV réelle.

## Chapitre 2 modélisation d'un générateur photovoltaïque

La nouvelle équation modélisant la cellule sera :

$$I = I_{ph} - I_d - I_{sh} \quad (2.3)$$

Où :

$$I_{sh} = \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \quad (2.4)$$

Et :

$$I_d = I_s \left[ \exp \left( q \left( \frac{V + IR_s}{nKT} \right) - 1 \right) \right] \quad (2.5)$$

L'équation (1.3) sera donc :

$$I = I_{ph} - I_s \left[ \exp \left( \frac{q(V + IR_s)}{nKT} \right) - 1 \right] - \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \quad (2.6)$$

### 2.3.2. Les caractéristiques électriques d'une cellule PV

Une cellule photovoltaïque, en tant que dipôle électrique, dispose de sa propre caractéristique courant-tension (I-V), ainsi qu'illustré ci-dessous :

#### a) *La tension en circuit ouvert*

Si l'on place une photopile sous une source lumineuse constante, sans aucun récepteur à ses bornes, celle-ci va produire une tension continue d'environ 0,6V, appelée tension en circuit ouvert  $V_{co}$  (elle varie légèrement avec la technologie et l'éclairement) [9] [10]. Cette valeur correspond à la tension de coupure d'une diode, ce qui confirme le fait que l'on puisse assimiler une cellule solaire à une jonction P-N. +-

#### b) *Le courant de court-circuit*

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

#### c) *La puissance*

Le but recherché par tout utilisateur de générateur photovoltaïque est que l'énergie produite soit la plus optimale possible. La figure ci-dessous représente la caractéristique puissance-tension d'une photopile sous illumination ainsi qu'une courbe théorique de puissance constante (puissance = tension × intensité).

## Chapitre 2 modélisation d'un générateur photovoltaïque

Pour l'éclairement considéré, le point  $P_{max}$  représente le point où la puissance de la photopile est maximale. Ce point, dit puissance maximale, est associé à une tension optimale

$V_m$  et à une intensité optimale  $I_m$ . C'est cette puissance par la suite qui sera toujours recherchée par notre commande (MPPT), Chapitre 2.

Par ailleurs, lorsqu'il est question de puissance maximale dans les conditions normalisées d'ensoleillement STC (définition du rendement ci-dessous), on parle alors de puissance crête, mesurée en watts-crête ( $W_c$ ).[2]

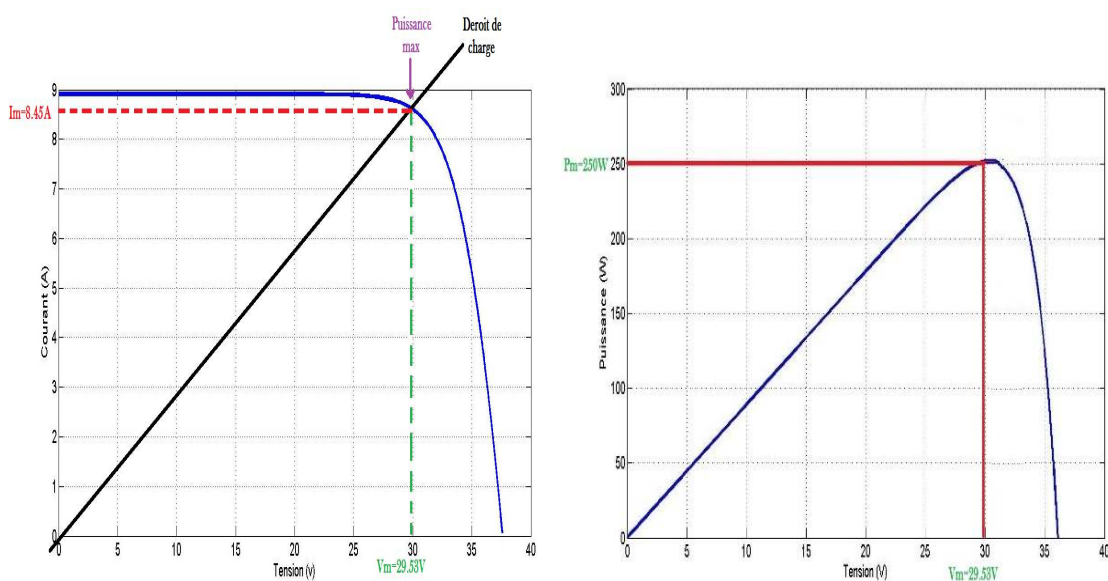


Figure 2.4 :Caractéristique courant-tension électriques d'une cellule PV (une photopile).

### d) Le rendement

Le rendement énergétique est défini comme étant le rapport entre la puissance maximale produite et la puissance du rayonnement solaire parvenant au module. Soit  $S$  la surface du module et  $G$  l'éclairement en  $W/m^2$ , ce rendement a pour formule :

$$\eta = \frac{P_{max}}{G \times S} \quad (2.7)$$

Il est généralement évalué dans des conditions de référence : sous un ensoleillement de  $1000W/m^2$ , à la température de  $25^\circ C$  et sous un spectre AM 1,5 (Air Masse). Ces conditions normalisées sont dites « STC » pour Standard Test Conditions [9].

## 2.4 Modèle de panneau adopté:

Le générateur PV ATERSA 250W est en silicium poly cristallin est constitué de 60 cellules photovoltaïques élémentaires. Il peut délivrer dans les conditions standards de test (STC) une puissance de 250W.

Les caractéristiques électriques de ce module photovoltaïque sont regroupées dans le tableau suivant :

éclairage standard, G	<b>1000W/m<sup>2</sup></b>
Température standard, T	<b>25°C</b>
Puissance maximale (Pmax)	<b>250W</b>
Tension à Pmax (Vmax)	<b>29.53V</b>
Courant à Pmax ( $I_{max}$ )	<b>8.45A</b>
Tension à circuit ouvert ( $V_{oc}$ )	<b>37.6V</b>
Courant de court-circuit ( $I_{cc}$ )	<b>8.91A</b>
Nombre des cellules en séries	<b>60</b>
Nombre des cellules en parallèle	<b>1</b>
Facteur	<b>15.35</b>

**Tableau 2.1.** Caractéristiques électriques du module photovoltaïque panneau ATERSA 250W dans les conditions standards «STC».

### 2.5 Association des modules photovoltaïques

Les modules peuvent également être connectés en série et en parallèle afin d'augmenter la tension et l'intensité du courant d'utilisation. Toutefois, est important de prendre quelques précautions car l'existence de cellules moins efficaces ou l'occlusion d'une ou plusieurs cellules (dus à de l'ombrage, de la poussière, etc.) peuvent endommager les cellules de façon permanente.

#### 2.5.1 Association en série

En additionnant des cellules ou des modules identiques en série, le courant de la branche reste le même mais la tension augmente proportionnellement au nombre de cellules (modules) en série.

Si les cellules des modules en série ne sont pas identiques ou si certaines cellules sont partiellement ombragées, la tension d'utilisation des modules en série sera légèrement diminuée. Pour une impédance de charge faible, les cellules moins efficaces peuvent devenir réceptrices si le courant d'utilisation est inférieur au courant produit par ces cellules. Ainsi, pour une impédance nulle (court-circuit), une cellule ombragée sera soumise à ses bornes à une tension inverse importante et la puissance qu'elle devra dissiper sera trop grande. En fonctionnant ainsi, on provoque l'échauffement de la cellule (*hot spot*), ce qui est susceptible de la détruire par claquage. Il convient donc de limiter la tension inverse maximale susceptible de se développer aux bornes d'une cellule en plaçant une diode parallèle (*by-pass*) au niveau de chaque module (voir figure 2.5)[12].

La diode parallèle limite la tension inverse par sa tension directe puisqu'elle devient passante. En court-circuit, la puissance dissipée par la cellule moins efficace se limite à l'ordre du watt, ce qui évite toute destruction. La diode parallèle est inopérante en fonctionnement normal et ne diminue donc pas le rendement des modules[12].



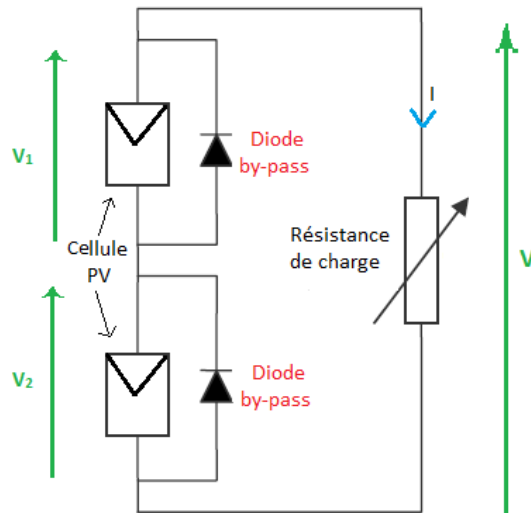


Figure 2.5 : Modules en série avec diodes by-pass.

### 2.5.2 Association en parallèle

En additionnant des modules identiques en parallèle, la tension de la branche est égale à la tension de chaque module et l'intensité augmente proportionnellement au nombre de modules en parallèle dans la branche.

Lorsque les cellules sont ombragées, le courant d'utilisation total des modules sera plus faible. Pour une impédance de charge élevée, les modules moins performants deviendront récepteurs si la tension d'utilisation est supérieure à la tension produite par ces modules. Une dissipation de puissance importante peut devenir dangereuse au niveau de la cellule la plus faible de ces modules. Ainsi pour le cas le plus critique où la charge est nulle et le circuit ouvert, le courant des branches des modules performants se dissipera dans la branche la moins performante.

Bien que la cellule puisse dissiper un courant important sans être altérée, il est préférable de disposer d'une diode anti-retour. Celle-ci empêche aussi de gaspiller dans le module occulté une partie de la puissance produite par les modules fonctionnant normalement. Cette solution n'est valable que si la chute de tension provoquée par cette diode est négligeable devant la tension produite par les modules de la branche. En effet, cette diode est traversée, en fonctionnement normal, par le courant de la branche, ce qui introduit une perte de puissance permanente [12].

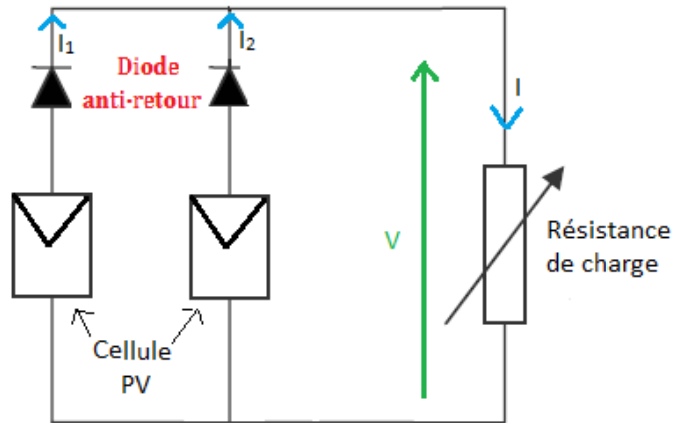


Figure 2.6 : Modules en parallèle avec diodes anti-retour

### 2.5.3 Association série-parallèle

Généralement, on utilise un montage série-parallèle qui nous permet de régler à la fois la tension et le courant selon les caractéristiques de la charge. Les cellules photovoltaïques sont associées entre elles en série, et les modules sont associés en parallèle. On utilise alors les diodes (*by-pass*) pour éviter que les cellules les moins performantes deviennent consommatrices, et les diodes anti-retour pour éviter le retour du courant des autres modules lorsqu'un module est mal ensoleillé.

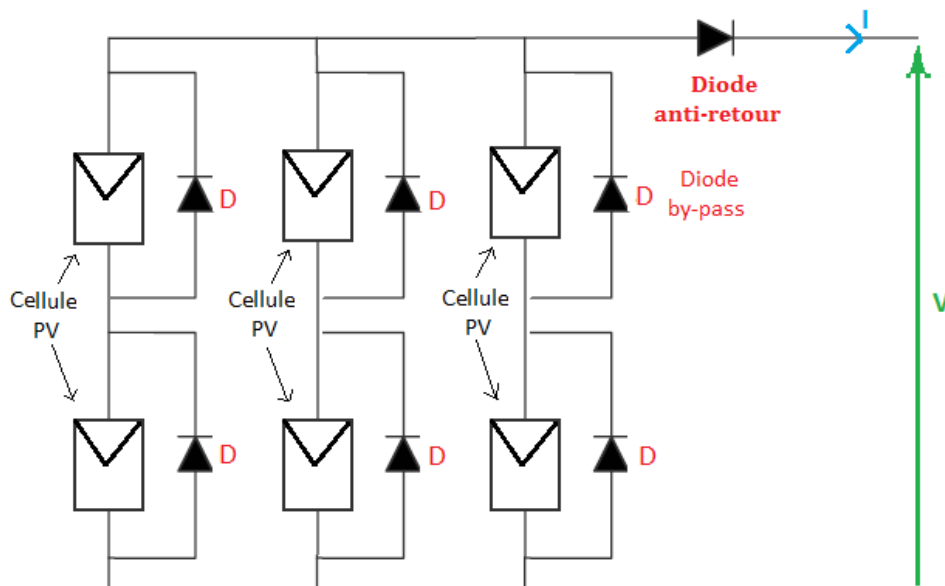


Figure 2.7 : Modules série-parallèle de modules photovoltaïques.

## Chapitre 2 modélisation d'un générateur photovoltaïque

La figure 2.8 montre les cinq courbes courant-tension possibles pour douze modules PV typiques de 50 Wc, ces courbes sont obtenues pour différentes commutations des modules dans le champ PV [13].

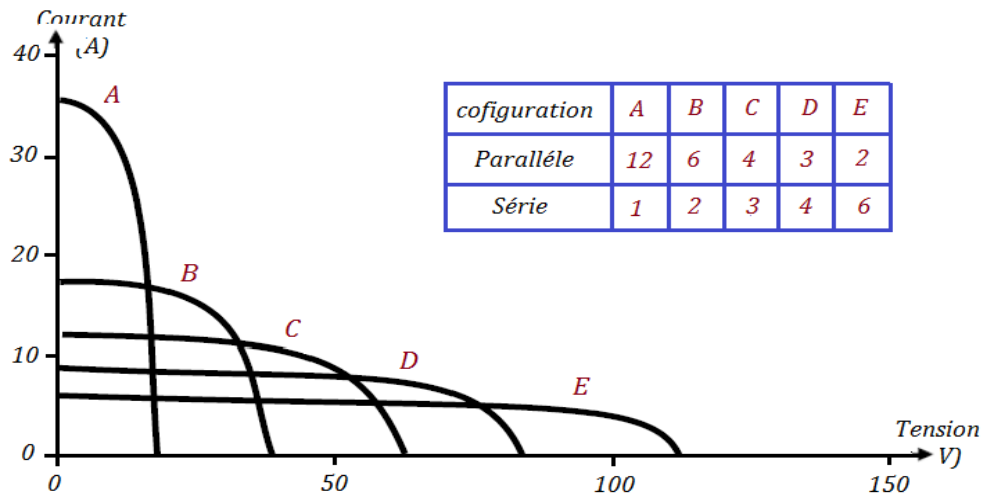


Figure 2.8 Commutation des 12 modules de 50 Wc dans un champ PV.

### 2.6 conclusion

Dans ce chapitre, nous avons donné un aperçu général sur les différents moyens de production d'énergie électrique.

L'étude et la modélisation d'une cellule photovoltaïque a été développée, les caractéristiques de celle-ci sont présentées.

## 3.1) Introduction

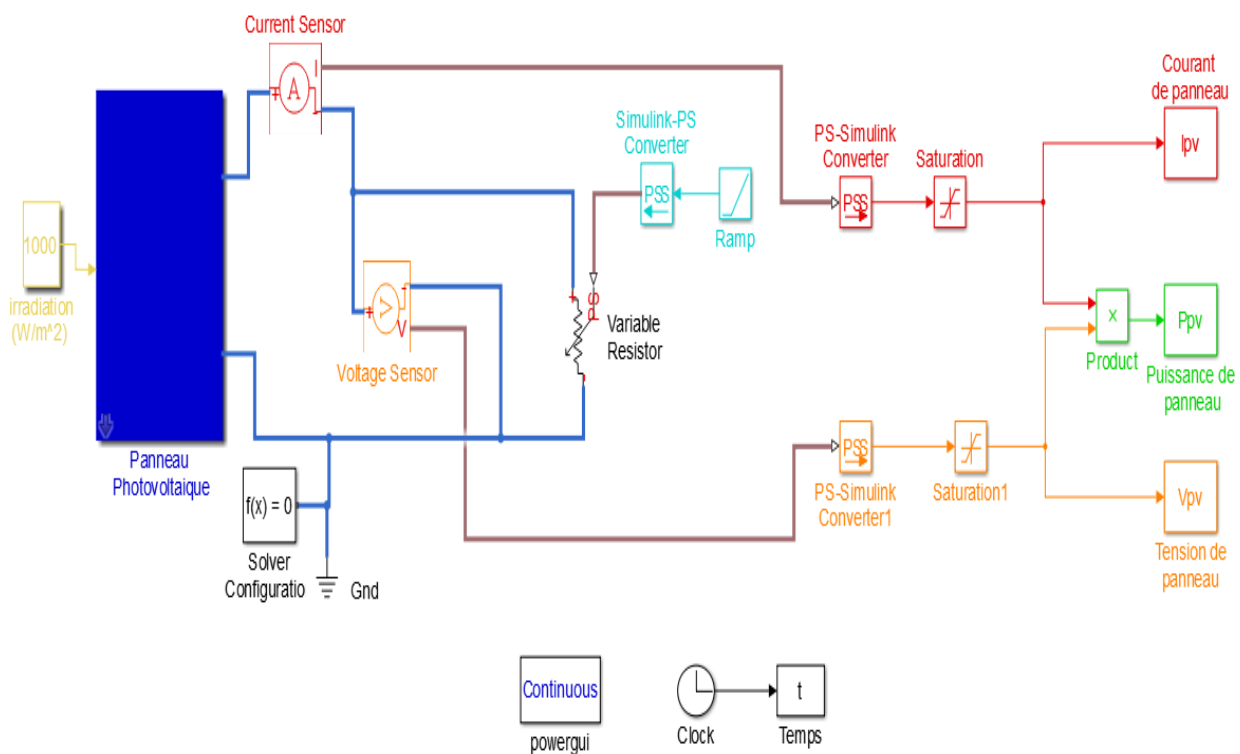
Les logiciels de simulations sont des outils puissants pour tester et évaluer l'exécution théorique des systèmes. Les conditions d'exécution du dispositif à tester peuvent être facilement contrôlables.

La simulation nous permet de passer de la conception du système théorique à la réalisation pratique avec plus d'assurance car les changements lors de la conception peuvent être faits facilement dans un système simulé. Ceci nous permet d'expérimenter un ensemble large de variations et de choisir enfin la solution optimale.

Pour une simplification de la simulation, nous allons établir des sous-ensembles physiques comme le panneau solaire, le convertisseur DC/DC, la commande MPPT et la charge. Dans notre étude, nous avons opté pour l'environnement MATLAB/SIMULINK pour la simulation.

## 3.2 Simulation du générateur photovoltaïque

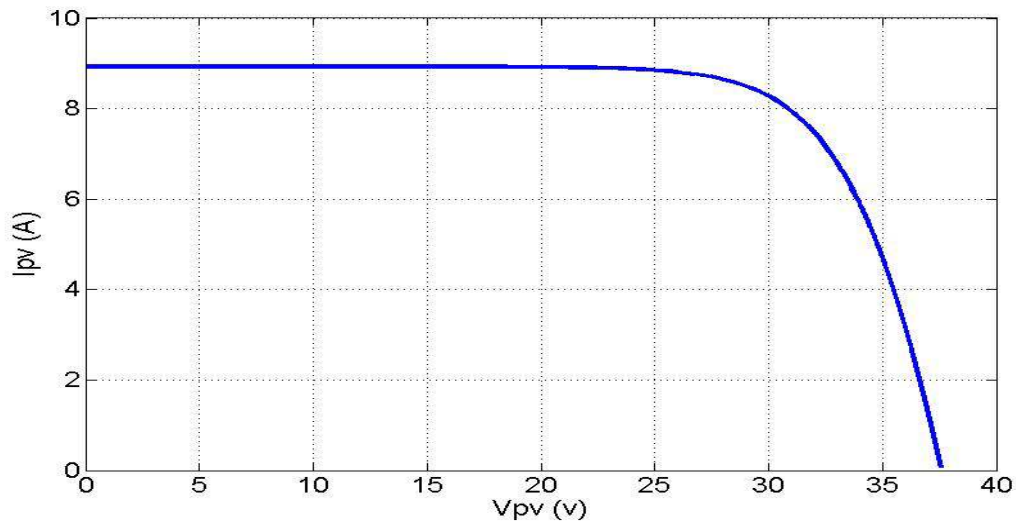
Pour tester notre système, l'architecture adoptée est représentée dans la figure 3.1 ci-dessus.



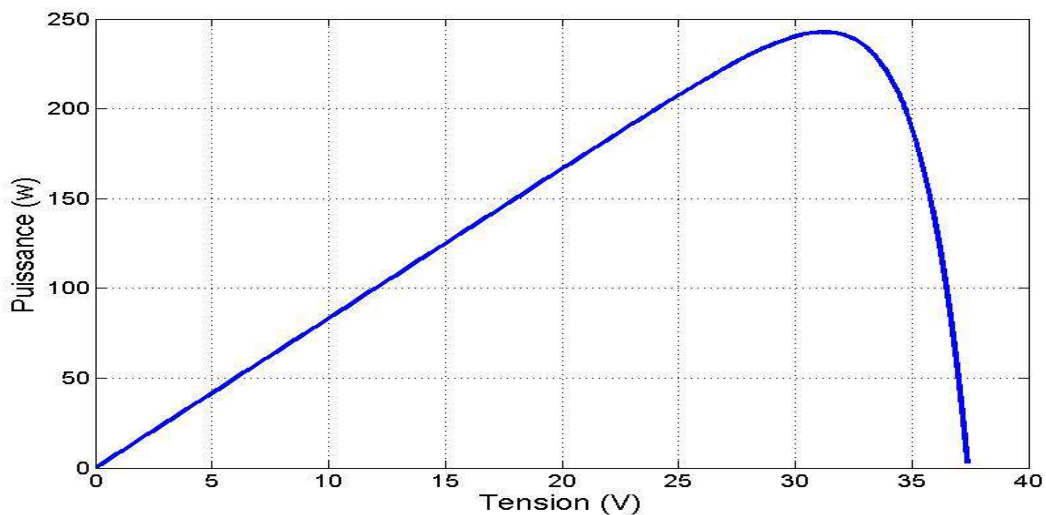
**Figure 3.1.** Schéma de générateur PV dans l'environnement MATLAB/SIMULINK.

## 3.2.1 Les caractéristiques du générateur photovoltaïque

Les caractéristiques essentielles d'un générateur photovoltaïque sont Courant-Tension et Puissance-Tension. On se basant sur les caractéristiques électriques données par le constructeur du panneau adopté (voir le tableau 2.1). les caractéristiques obtenues sont illustrés dans les figure 3.4 et 3.5 au conditions standards( $G=1000 \text{ W/m}^2$  ;  $T=25 \text{ }^\circ\text{C}$ ).



**Figure 3.2.** Caractéristique courant-tension de module photovoltaïque ATERSA-250.



**Figure 3.3.** Caractéristique puissance-tension de module photovoltaïque ATERSA-250

Il clair que les résultantes obtenues sont semblables à celle données par le constructeur.

### 3.2.2 L'influence des paramètres internes et externes sur la caractéristique ( $I_{pv}$ - $V_{pv}$ ) d'un panneau photovoltaïque

Pour voir l'influence des paramètres internes et externes sur les caractéristiques d'un panneau photovoltaïque, deux scénarios peuvent être simulés pour chaque cas :

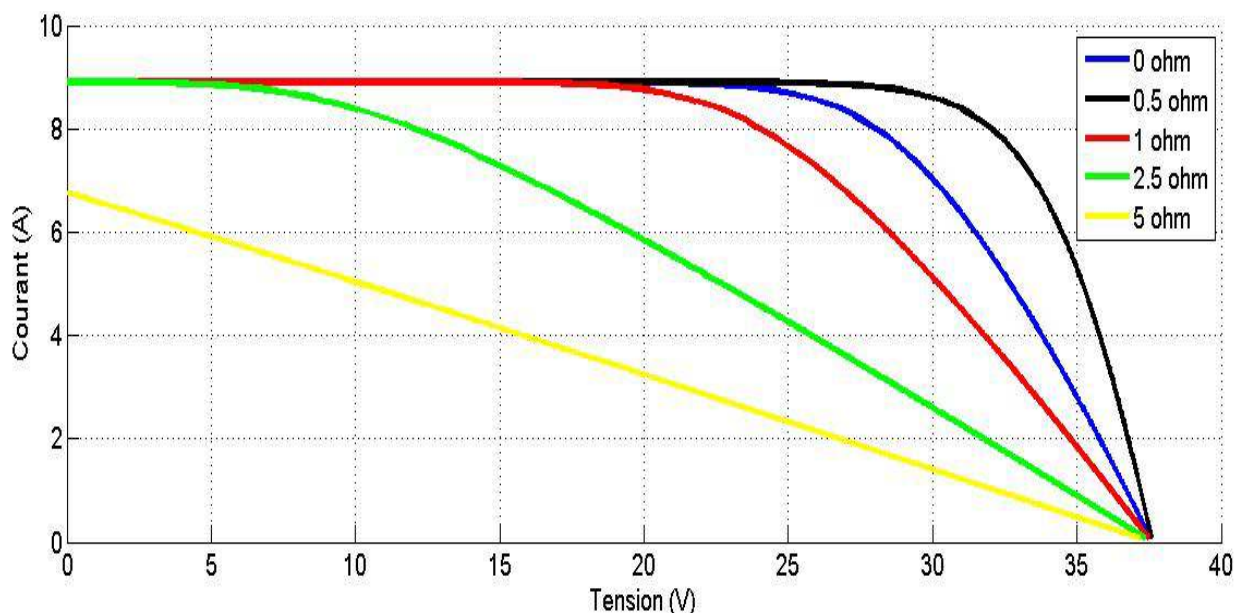
Pour les paramètres internes, dans le premier scénario, les paramètres externes sont fixés à  $T=25^{\circ}\text{C}$  et l'insolation  $1000\text{w}/\text{m}^2$  et faisons varier la résistance série. Dans le deuxième, nous gardons les paramètres externes toujours fixe, et faisons varier la résistance parallèle.

Pour les paramètres externes, dans le premier scénario, nous fixons la température ambiante ( $T=25^{\circ}\text{C}$ ) est on fait varier l'insolation dans une gamme allant de  $200$  à  $1000\text{w}/\text{m}^2$ . Dans le deuxième nous fixons l'insolation à  $1000\text{W}/\text{m}^2$  et faisons varier la température de  $0$  à  $60^{\circ}\text{C}$ .

#### a) paramètres internes

##### -Influence de la résistance série et parallèle

Les figures 3.4 et 3.5 montrent l'influence de la résistance respectivement série et parallèle sur la caractéristique ( $I_{pv}$ - $V_{pv}$ ).



**Figure 3.4** L'influence de la résistance série sur la caractéristique ( $I_{pv}$ - $V_{pv}$ ).

En analysant les courbes de la figure, nous remarquons l'influence de la résistance sur la pente de la caractéristique I-V. La pente est alors inversement proportionnelle à

l'augmentation de la résistance série. Tandis que le courant de court-circuit et la tension à circuit ouvert restent inchangés.

Les mêmes remarques sont valables dans le cas de la résistance parallèle.

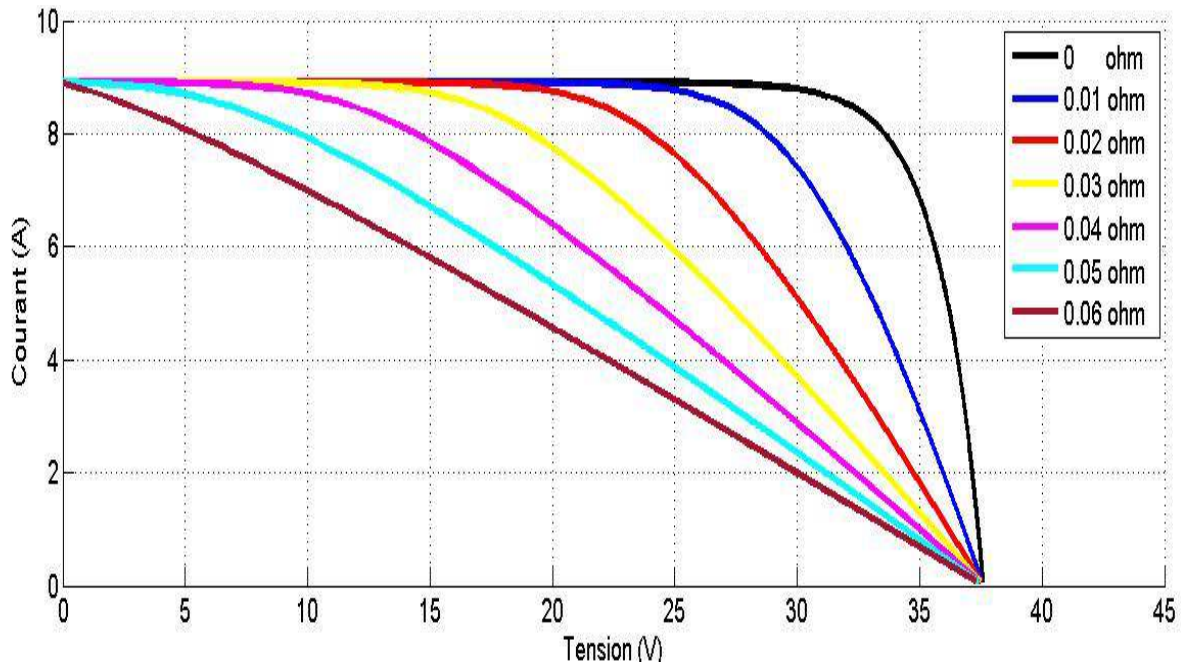
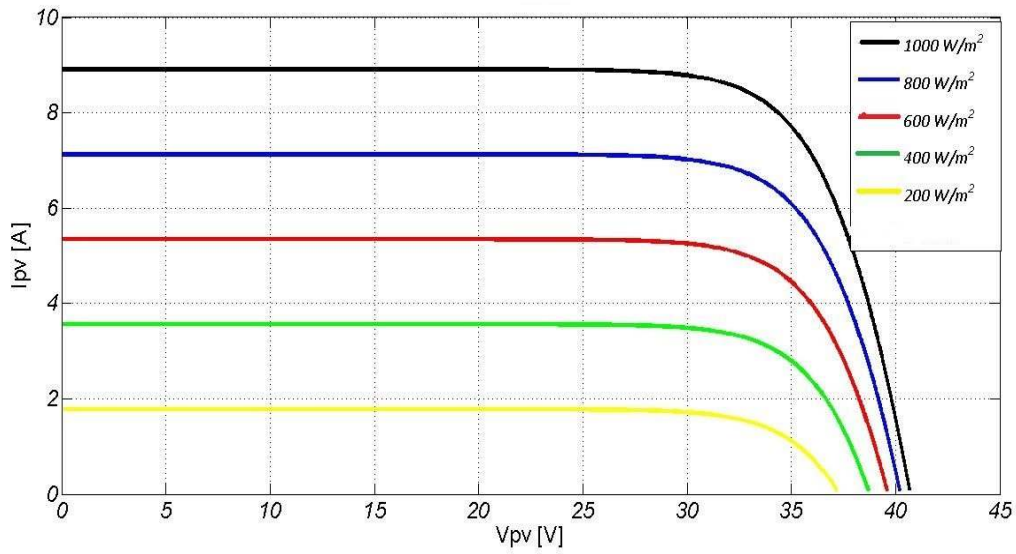


Figure 3.5. L'influence de la résistance parallèle sur la caractéristique ( $I_{pv}$ - $V_{pv}$ ).

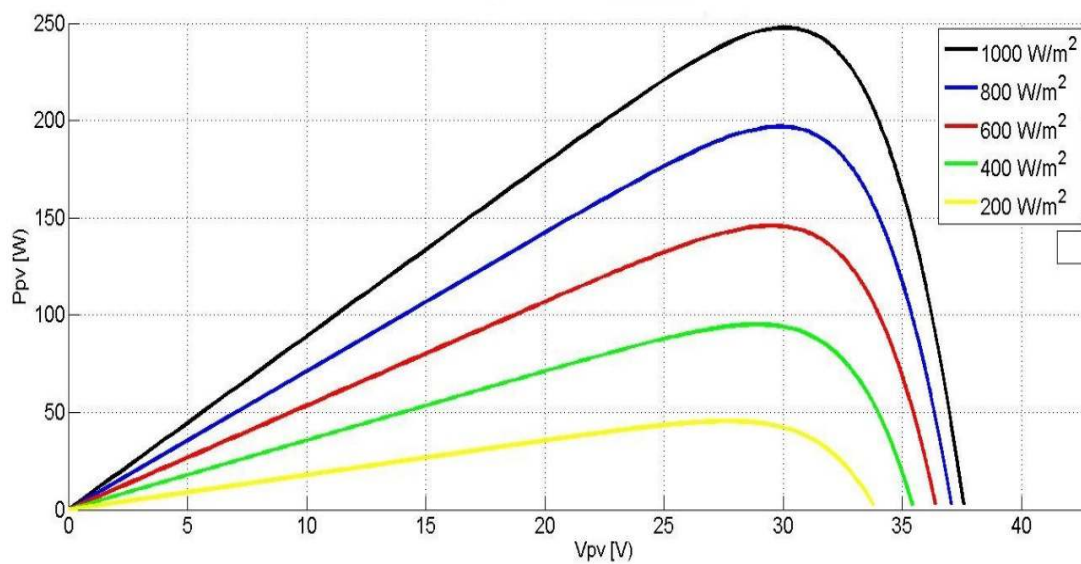
### b) paramètres externes

#### - Influence de de l'insolation et de la température

En examinant les courbes des figures ( 3.6 ; 3.7) nous remarquons que le courant produit par la photopile  $I_{ph}$  est pratiquement proportionnel à l'éclairement solaire  $G$ . par contre, la tension  $V_p$  aux bornes de la jonction varie peu car elle est fonction de la différence de potentiel à la jonction P-N du matériau lui-même. La tension de circuit ouvert ne diminue que légèrement avec l'éclairement. Ceci implique donc que la puissance optimale du panneau  $P_m$  est pratiquement proportionnelle à l'éclairement. Le point de puissance maximal se situent à peu près à la même tension.



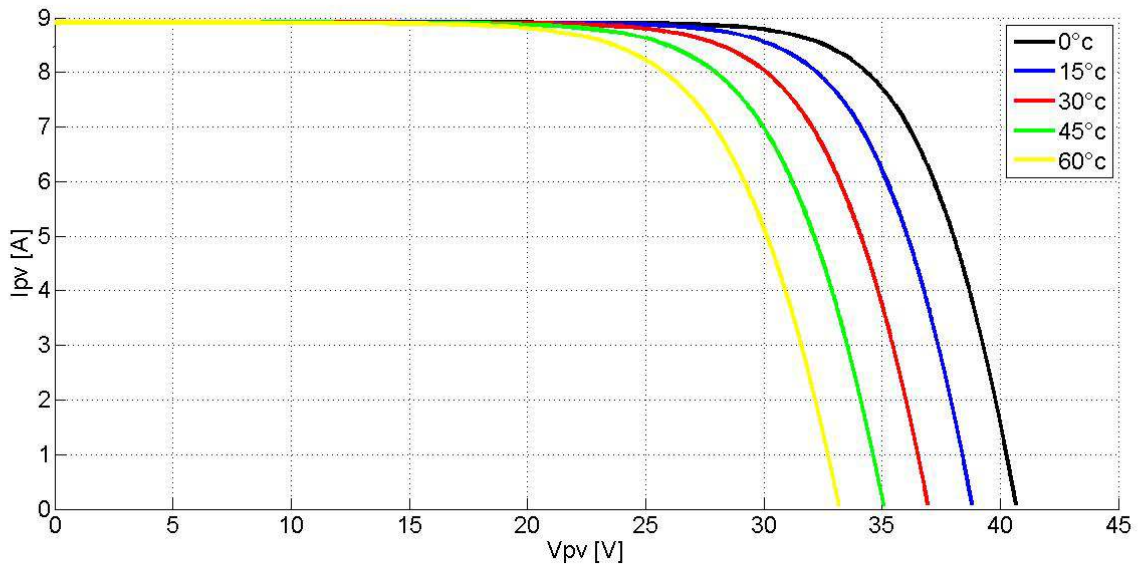
**Figure 3.6.** L'influence de l'insolation sur la caractéristique  $I_{pv}$ - $V_{pv}$  à température constante.



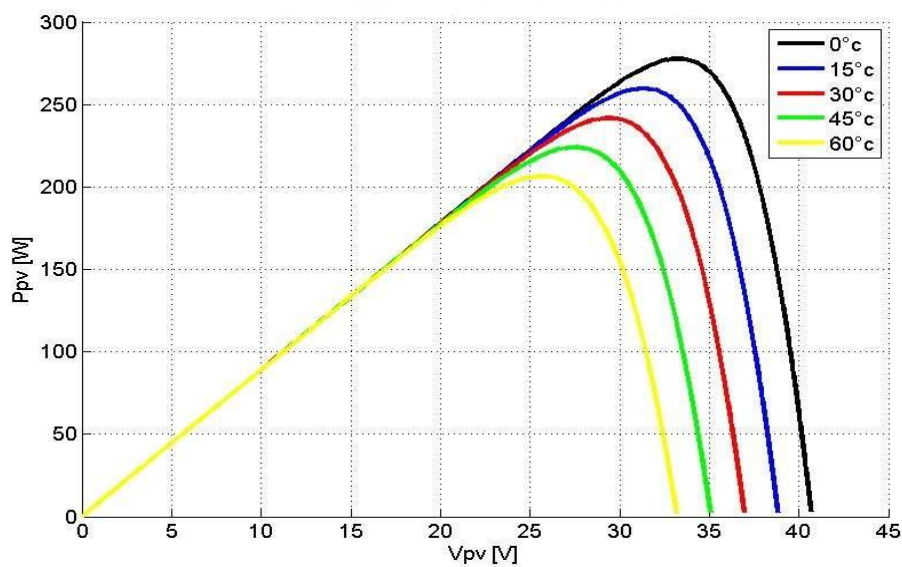
**Figure 3.7.** L'influence de l'insolation sur la caractéristique  $P_{pv}$ - $V_{pv}$  à température constante

Quand à l'influence de la température, elle est non négligeable sur la tension à circuit ouvert, par contre le courant et la puissance demeurent (voir figure 3.8 ; 3.9).





**Figure 3.8.** L'influence de la température sur la caractéristique  $I_{pv}$ - $V_{pv}$  à un ensoleillement constant.

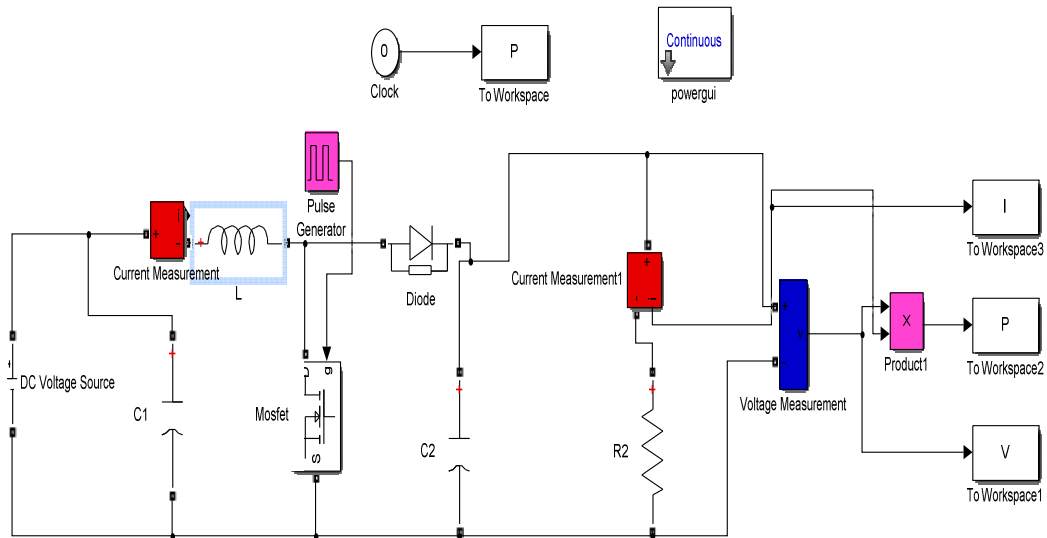


**Figure 3.9.** L'influence de la température sur la caractéristique  $P_{pv}$ - $V_p$  à un ensoleillement constant.

### 3.3 Simulation du convertisseur BOOST

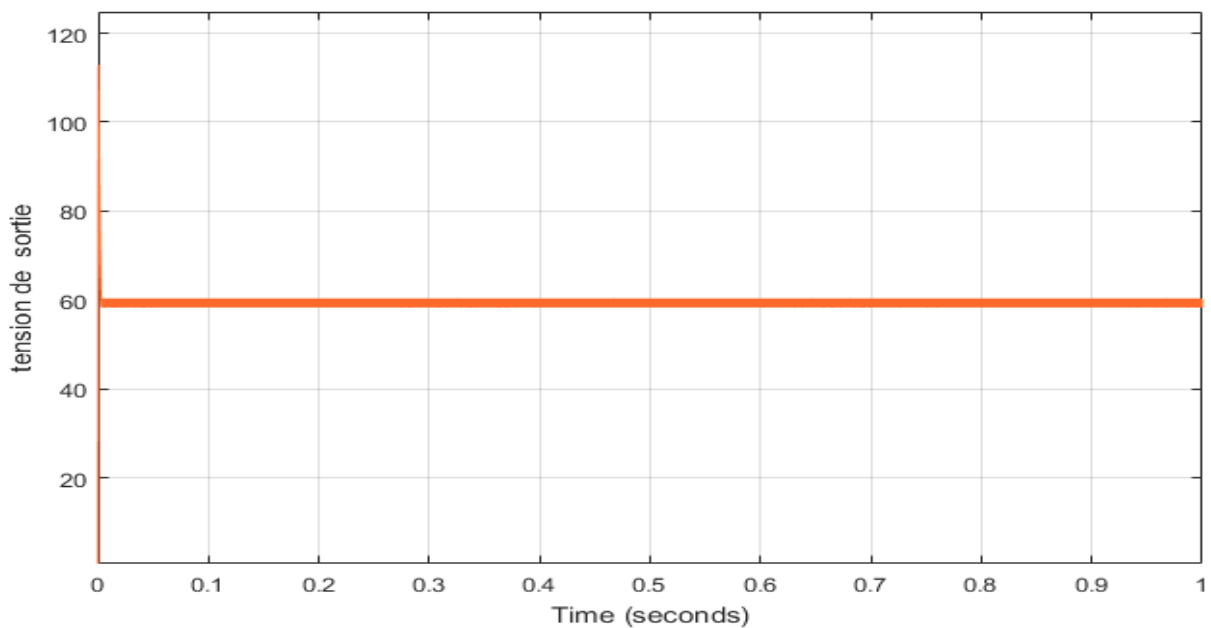
Pour simuler le convertisseur, dans un premier temps, nous appliquons une source de tension continue aux bornes d'entrées de celui-ci  $V_e=30V$  et une fréquence de 50kHz générée par le bloc pulse générateur pour piloter le MOSFET.

Le schéma de simulation adopté pour le fonctionnement de notre convertisseur est illustré par la figure 3.10 ci-dessous :



**Figure 3.10.** Architecture adopté dans l'environnement Simulink du convertisseur BOOST.

La tension de sortie du convertisseur BOOST est d'une valeur moyennede 60V. Donc le convertisseur BOOST assure correctement son rôle, le résultat est représenté dans la figure3.11 suivante :

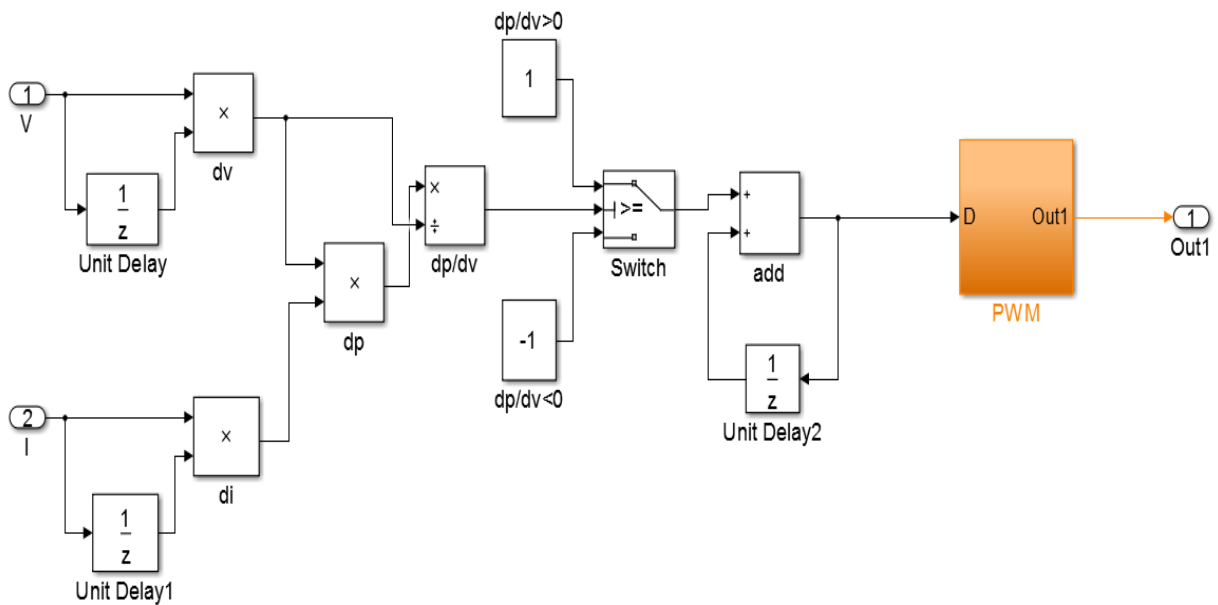


**Figure .3.11.**La tension de sortie du convertisseur BOOST

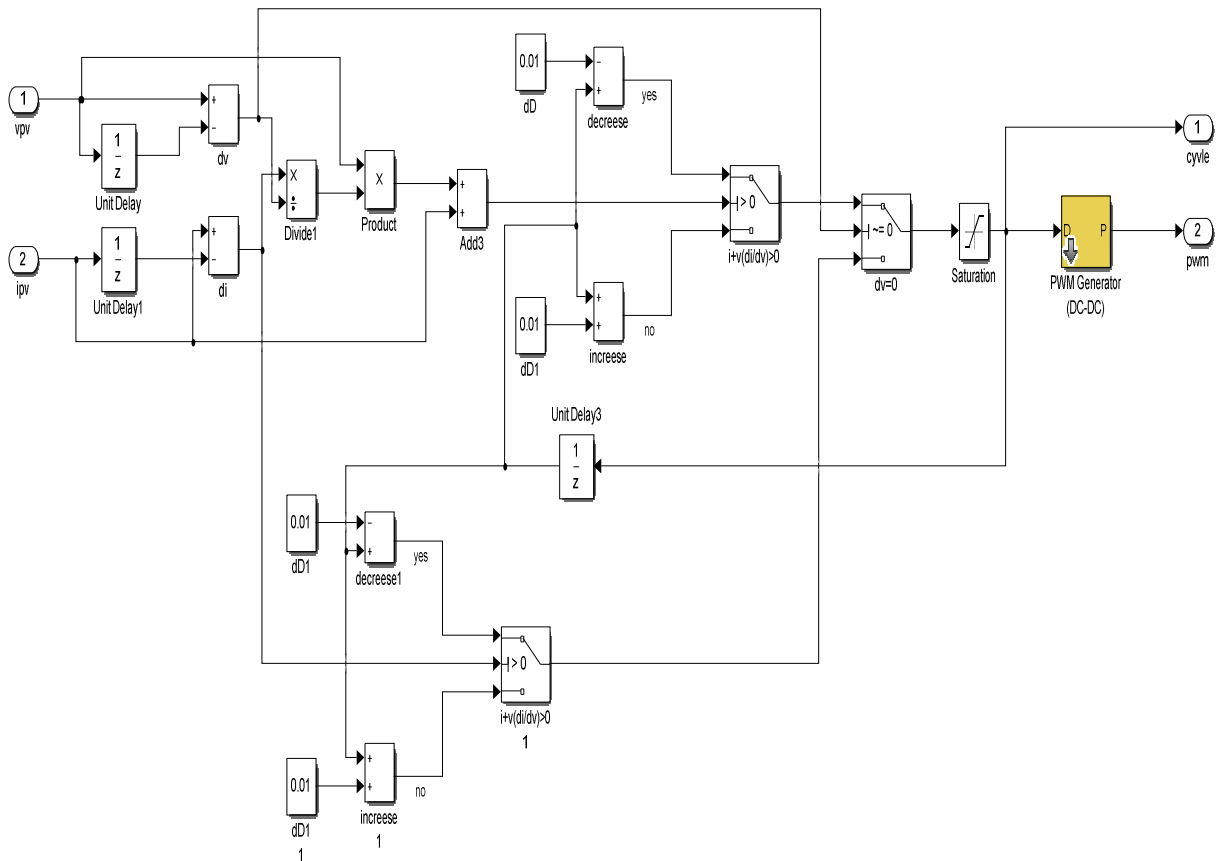
## 3.4 simulation de la commande MPPT incrémental conductance « IncCond »et la commande MPPT « P&O »

## Chapitre 3 Simulation et évaluation des résultats

En se référant aux algorithmes MPPT des deux méthodes (IncCond) et (P&O) représentés dans les figures (1.10 ;1.11) nous concevons les architectures des deux circuits qui simulent les deux méthodes, figures 3.12et 3.13. Les deux circuits sont construits à bas des blocs de la bibliothèque de Simulink.

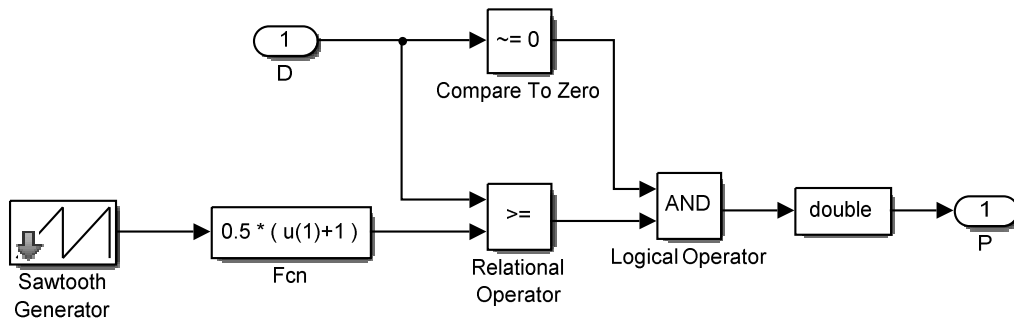


**Figure 3.12** Architecture adoptée du contrôleur (P&O) l'environnement Simulink.

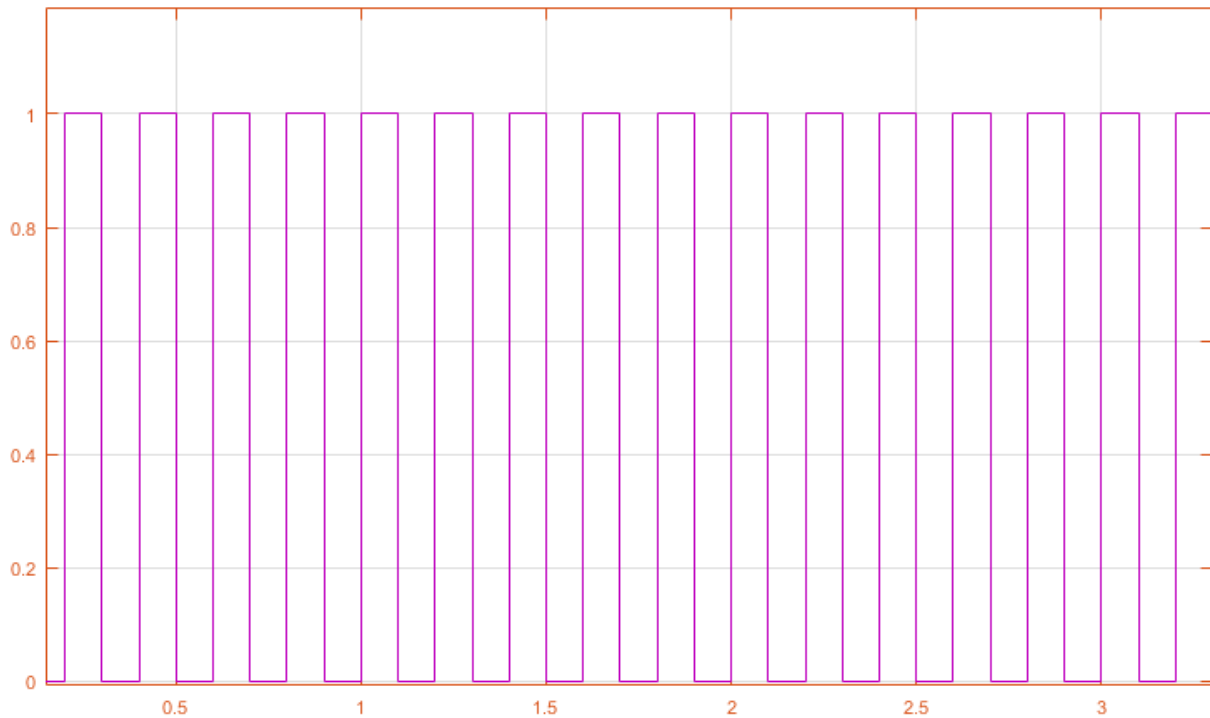


**Figure 3.13** Architecture adopté du contrôleur(IncCond) dans l'environnement Simulink.

Le signal de commande PWM est obtenu en comparant le signal de la porteuse avec un autre en dent de scie figure 3.14, on obtient en sortie la forme illustrée dans la figure 3.15.



**Figure 3.14** Modèle Simulink de générateur de signal PWM.



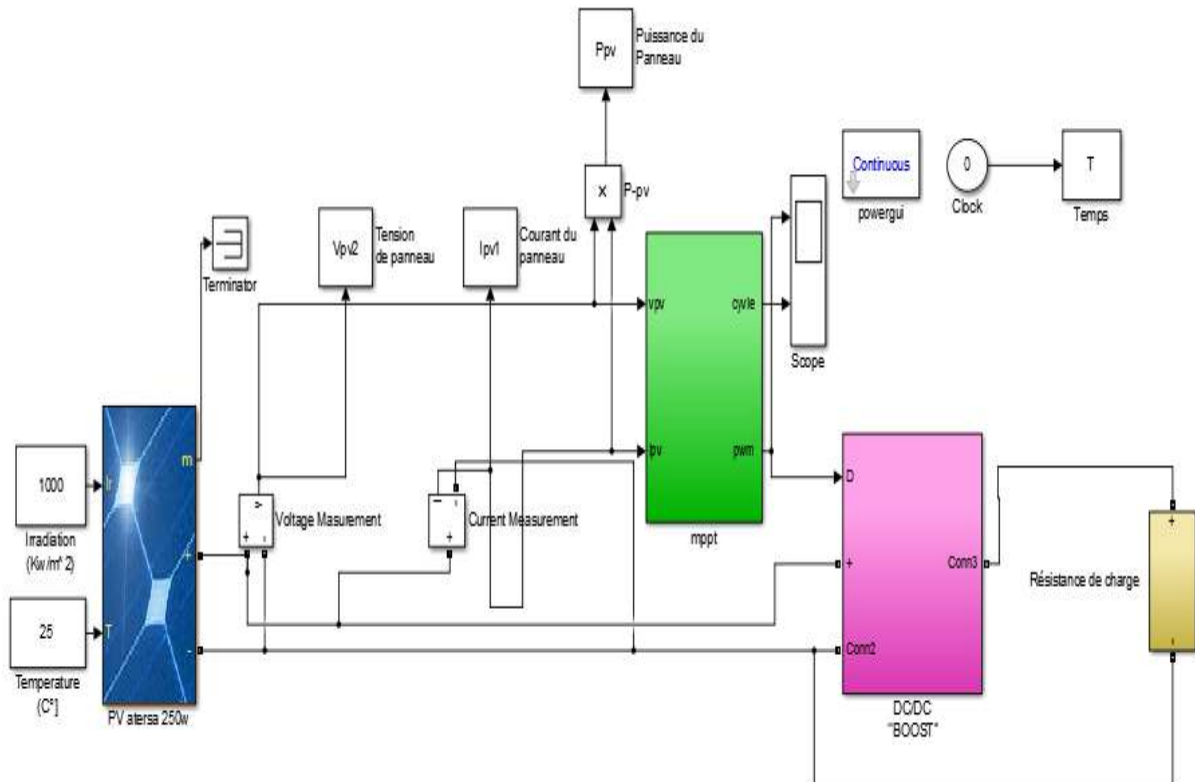
**Figure 3.15.**Signal commande DC/DC (switch de BOOST)

### 3.5 la charge

Le convertisseur alimente une charge purement résistive de valeur ( $R=9.23 \Omega$ ) calculée au chapitre 1 paragraphe 1.3.2 c)

### 3.6 Système globale (GPV, convertisseur, MPPT, charge)

Le système global implémenté sur Simulink est constitué de plusieurs étages. Le générateur photovoltaïque, la commande MPPT utilisé, le convertisseur DC/DC(BOOST) et la charge. Ces étages sont raccordés entre eux pour constituer un système photovoltaïque, figure 3.16.



**Figure 3.16** Le système global sous l'environnement Simulink.

Les résultats de simulation du système photovoltaïque pour tester l'influence de la fréquence PWM sont représentés pour les deux cas de la commande MPPT (P&O) et (InCd).

### 3.7 L'effet de la variation de la fréquence PWM sur la puissance :

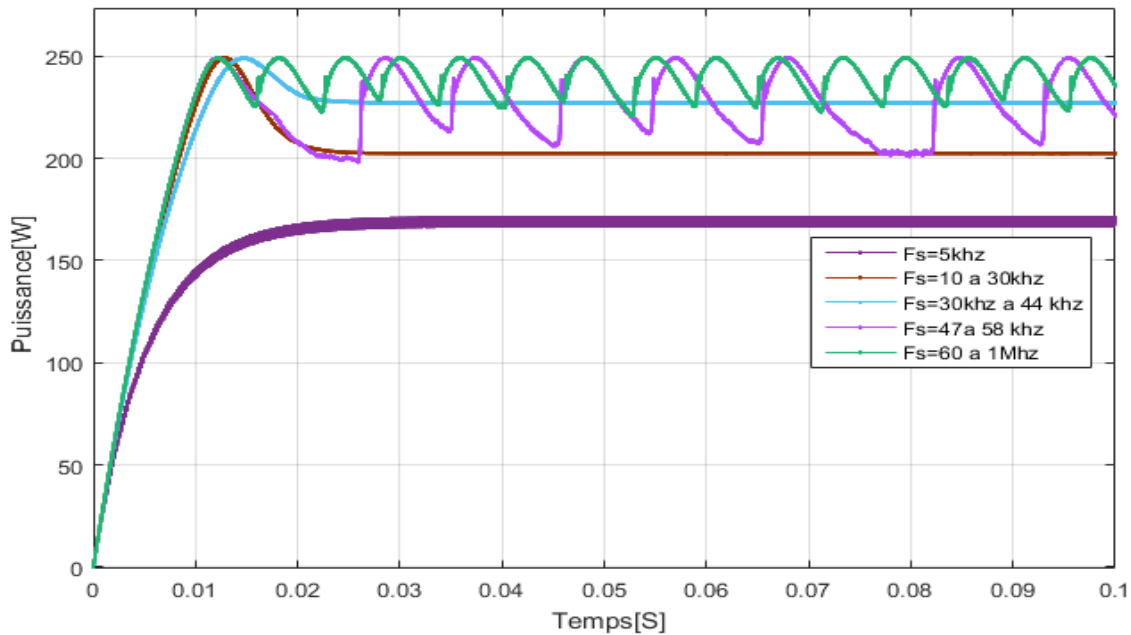
Dans cette partie nous nous sommes limités au cas standard des conditions météorologiques ( $G=1000 \text{ w/m}^2$  et  $T= 25^\circ\text{C}$ ) et nous faisons varier la fréquence dans une plage allant de 5 à 1000 KHz. Les résultats obtenus sont illustrés par la figure 3.17

En examinant les courbes de la figure citée ci-dessus, nous remarquons une génération de la puissance aux bornes du panneau PV de l'ordre de 169 W pour les fréquences qui ne dépassent pas 5 KHz. Lorsque la fréquence se situe dans l'intervalle 10 à 30 KHz, la puissance oscille entre 191 et 215 W. La puissance croît légèrement pour atteindre une valeur moyenne entre 215 et 219 W dans l'intervalle de fréquence 30 à 44 KHz. Dans la plage de variation entre 47 et 58 KHz, la puissance oscille entre 231 et 236 W. Au-delà d'une fréquence de 60 KHz, la puissance à la sortie du panneau se stabilise à une valeur moyenne de 239 W.

Pour mieux lire ces résultats nous les avons classés dans le tableau 3.1 ci-dessous.

Frequence[khz]	La puissance moyen fournie par le panneau [W]
5	169
10	191
20	202.4
30	215.1
40	219.8
50	231.75
51	230.35
52	232.9
53	233
54	234.65
55	234.9
56	235.65
57	236.4
58	236
59	237.05
60	238.05
70	239.15
80	238.9
90	239.85
100	239.6
200	239.8
400	239.7
600	239.775
800	239.675
1000	239.75

*Tableau 3.1 la variation de la puissance en fonction de fréquence*



**Figure 3.17** : Puissance générée par le panneau PV pour  $G=1000W/m^2$  et  $T=25^\circ C$  et Fréquence de 5Khz a 1Mh avec MPPT « P&O ».

### 3.8 L'effet de la variation de la fréquence PWM sur le rendement :

Après les mesures des valeurs de la puissance pour cas de commande, nous nous intéressons maintenant au calcul du rendement pour chaque cas de commande précédents.

#### 2.8.1 Calcule de rendement :

Le rendement d'un panneau photovoltaïque est exprimé comme étant le rapport entre la puissance crête délivrée et la puissance absorbée par le panneau. Cette dernière est donnée par le produit de la surface d'un mètre carré utile du panneau et la quantité d'insolation.

Le rendement est exprimé alors par la relation suivant :

$$\eta = \frac{P_{crt}}{G * S}$$

Dans notre cas, le panneau ATERSA a une surface de  $1.62855m^2$ . Pour une insolation  $G=1000W/m^2$ , la puissance absorbée est donc  $G*S= 1628.55W/m^2$ .

En exploitant cette relation, les valeurs du rendement sont dressées dans les deux tableaux (3.2 ;3.3) ci-dessous respectivement pour les deux cas de commande MPPT (P&O) et (InCd).



Frequence[khz]	La puissance moyen fournie par le panneau [W]	Rendemen t[%]
5	169	10.37
10	191	11.72
20	202.4	12.42
30	215.1	13.20
40	219.8	13.49
50	231.75	14.23
51	230.35	14.14
52	232.9	14.30
53	233	14.30
54	234.65	14.40
55	234.9	14.42
56	235.65	14.46
57	236.4	14.51
58	236	14.49
59	237.05	14.55
60	238.05	14.61
70	239.15	14.68
80	238.9	14.66
90	239.85	14.72
100	239.6	14.71
200	239.8	14.72
400	239.7	14.71
600	239.775	14.72
800	239.675	14.71
1000	239.75	14.72

*Tableau3.2 : la puissance moyen fournie par le panneau avec leur rendement en fonction de frequencePWM avec MPPT « P&O ».*

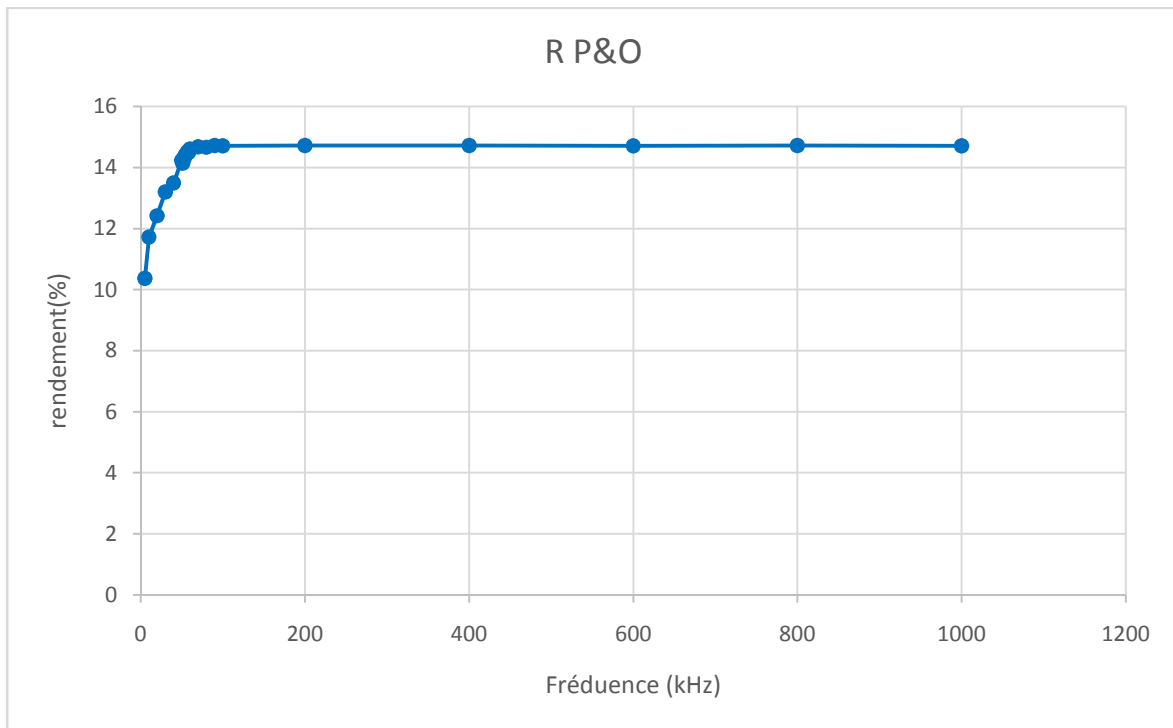
Frequence[khz]	La puissance moyen fournie par le panneau [W]	Rendemen t[%]
5	152	9.33
10	174	10.68
20	182	11.1
30	193	13.20
40	197	12.09
50	210	12.89
51	209.55	12.86
52	212.7	13.06
53	213	13.07
54	214.85	13.19
55	214.9	13.19
56	215.73	13.24
57	216.24	13.27
58	216.11	13.27
59	217.03	13.32
60	218.06	13.38
70	219.157	13.45
80	218.7	13.42
90	219.2	13.45
100	219.4	13.47
200	219.7	13.49
400	219.6	13.48
600	219.775	13.49
800	219.675	13.48
1000	219.75	13.48

**Tableau 3.3 :** la puissance moyen fournie par le panneau avec leur rendement en fonction de frequencePWM avec MPPT « IncCond ».

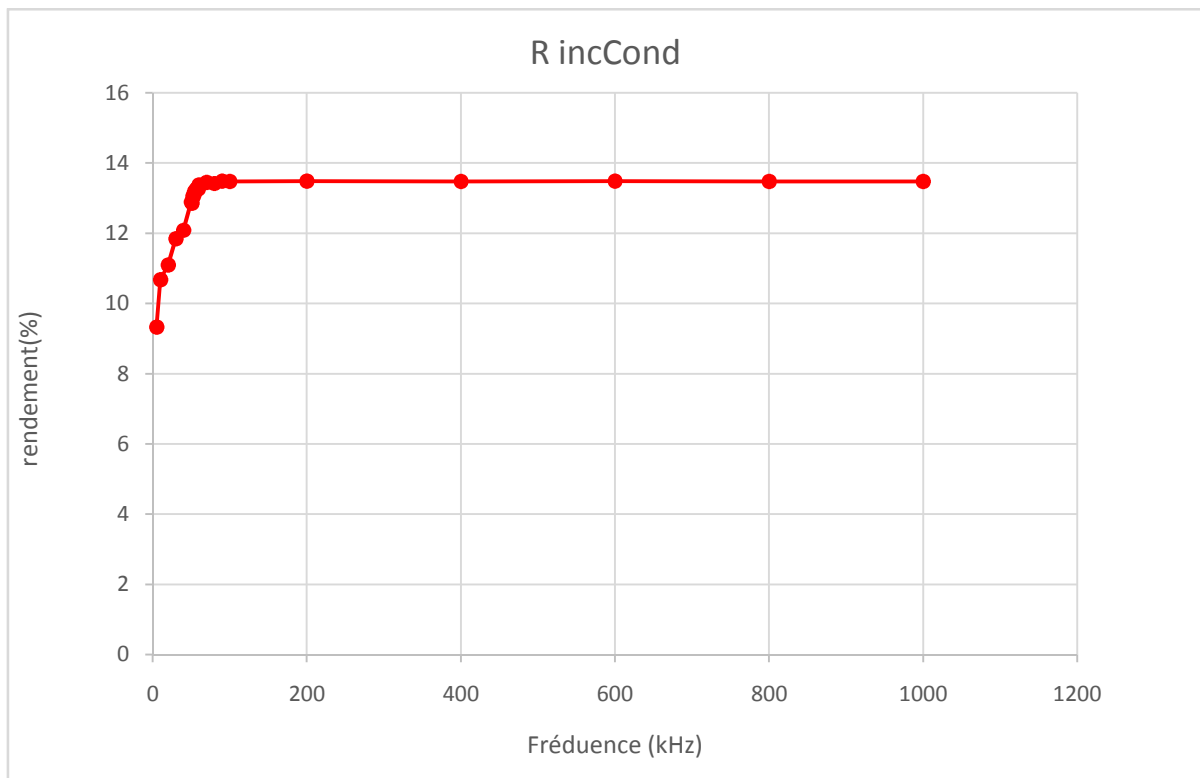
On se servant des tableaux ci-dessus, nous traçons les variations du rendement en foction de la fréquence dans une plage allant de 5 à 1000Khz respectivement pour les deux cas de commande. Les résultats sont représentés par les figures (3.18 3.19)

On examinant ces deux courbes, nous constatons que le rendement grimpe à partir de la valeur de 10.37% pour les fréquences allant de 5Khz pour atteindre sa valeur maximale d'environ 14.5% à partir de 50Khz, ceci pour le cas de commande (P&O).

Les mêmes remarques pour le cas de la commande (InCd), celement dans ce cas le rendement démarre de la valeur de 9.33 à la fréquence 5Khz pour atteindre sa valeur maximale d'environ 13.5%.

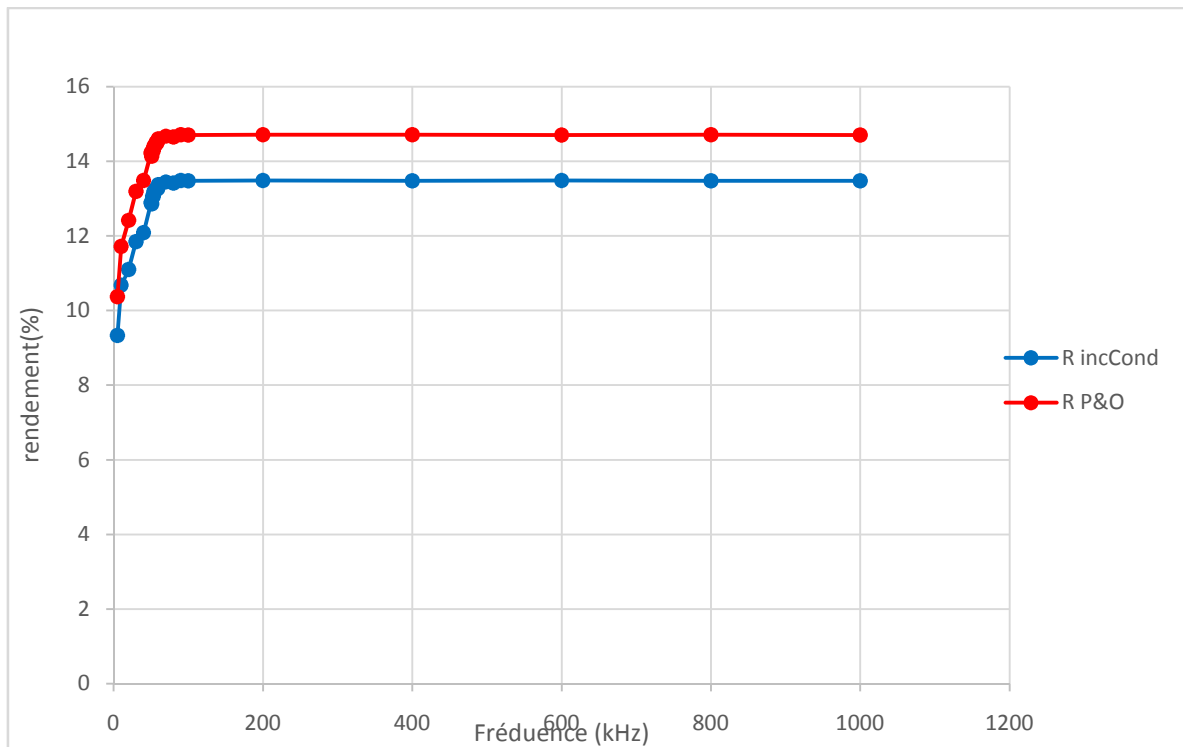


**Figure 3.18** : la variation de rendement en fonction de fréquence PWM dans cas de commande MPPT (P&O).



**Figure 3.19** : la variation de rendement en fonction de fréquence PWM avec IncCond

Pour avoir une meilleure comparaison entre les deux cas de commande, nous avons tracé les variations du rendement en fonction de la fréquence sur un même graphe. La figure 3.20 montre que l'évolution du rendement en fonction de la fréquence est presque la même pour toute la plage de la variation de la fréquence. La seule différence est la valeur atteinte du rendement pour des fréquences supérieures à 50 kHz. Dans le cas de la commande MPPT (P&O) est le rendement meilleur à celui dans le cas de la commande MPPT (IncCond).



**Figure 3.20** : la variation de rendement en fonction de fréquence PWM avec les deux méthodes (IncCond et P&O)

### 3.9 Conclusion

Dans ce chapitre, la simulation du système composé de : générateur photovoltaïque, convertisseur DC/DC et la commande MPPT est développée. On examine les résultats de simulation obtenus et on remarque :

La tension de sortie désirée est assurée aux bornes du convertisseur. La puissance fournie par le panneau est changeable par rapport aux variations des effets externes (éclairage, température) par conséquent lorsque la variation dans la fréquence du PWM.

La plage dans les hautes fréquences est le bon choix pour qu'on obtient un bon rendement.



## Références bibliographiques

- [1] M. Moulay-Amar et M. Loghouini, « *Etude 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, Algérie, 2005.
- [2] J. Ferrieux, F. Forest, « *Alimentations à découpage convertisseurs à résonance : principes composants modélisation* ». Paris, France: Dunod, 1999.
- [3] Mme. OBEIDI, "Commande des hacheurs MPPT par logique floue", Ecole Nationale Polytechnique Mémoire de Magister, 2006.
- [4] K. SOBAIHI, *Etude et réalisation d'un hacheur de tracking (MPPT) à contre réaction de la tension*, Mémoire de Magister, Ecole Nationale Polytechnique, Algérie, 2003.
- [5] G.F. TCHOKETCH KEBIR, *Commande des hacheurs MPPT par la logique floue*, Mémoire de Magister, Ecole Nationale Polytechnique, Algérie, 2005.
- [6] C. S. B. J. Surya Kumari, "COMPARISON OF MAXIMUM POWER POINT TRACKING ALGORITHMS FOR PHOTOVOLTAIC SYSTEM," *International Journal of Advances in Engineering & Technology (@IJAET)*, vol. 1, no. 5, pp. 133-148, 2011.
- [7] R. K. N. G. A. Savita Nema, "Matlab / Simulink based study of photovoltaic cells / modules / Array and their experimental verification," *INTERNATIONAL JOURNAL OF ENERGY AND ENVIRONMENT*, vol. 1, no. 3, pp. 487-500, 2010.
- [8] Sonali SURAWDHANIWAR, Ritesh DIWAN, 'An Improved Approach of Perturb and Observe Method Over Other Maximum Power Point Tracking Methods', *International Journal of Recent Technology and Engineering (IJRTE) ISSN: 2277-3878, Volume-1, Issue-3, pp 137-144, August 2012.*
- [9] J. Royer, T. Djiako, E. Schiller, B. SadaSy, *le pompage photovoltaïque : Manuel de cours à l'intention des ingénieurs et des techniciens*. Université d'Ottawa, institut de l'énergie des pays ayant en commun l'usage du français.
- [10] F. Bouchtoucherfa « *Etude et réalisation d'une centrale photovoltaïque connectée au réseau de distribution électrique BT* ». Mémoire de magister, Ecole Nationale Polytechnique
- [11] M. Makhlof, « *Etude et optimisation d'un modèle de conversion d'énergie photovoltaïque application au pompage* », mémoire de magister, université Mentouri Constantine, Algérie, 2006.

[12]. Pankow, « Etude de l'intégration de la production décentralisé dans un réseau basse tensio ». Thèse de doctorant de l'école National supérieure d'Art de Métiers, décembre 2004.

[13] S. M. Ait-Cheikh, « *Etude, Investigation et conception d'algorithmes de commande appliqués aux systèmes photovoltaïques* », Thèse de Doctorat d'état, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, Algérie, 2007.