



République Algérienne Démocratique et  
Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de  
la Recherche Scientifique  
Université Ahmed Draïa-Adrar  
Faculté des Sciences et de la Technologie  
Département des Sciences et Technologies



MEMOIRE DE FIN D'ETUDE EN VUE L'OBTENTION DU DIPLOME EN  
MASTER ACADEMIQUE  
Domaine : Sciences et Technologies  
Filière : Electrotechnique  
Spécialité : Commande Electriques.  
Sur le Thème :

*Commande MPPT pour les panneaux  
photovoltaïques en ombrage*

Présenté par :

- KHAREF Fatima Zohra

**Président**

**Promoteur**

**Examineur**

Membres de jury :

Iliace ARBAOUI

Ramadhan MASMUDI

Salem CHABACHI

Année universitaire 2020-2021

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République algérienne populaire et démocratique

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

UNIVERSITE AHMED DRAYA - ADRAR  
BIBLIOTHÈQUE CENTRALE  
Service de recherche bibliographique  
N°.....B.C/S.R.B//U.A/2021



جامعة احمد دراية - ادرار  
المكتبة المركزية  
مصاحفة البحث البيبليوغرافي  
الرقم.....م.م.ب.ب.ب /ج.أ/2021

## شهادة الترخيص بالإيداع

أنا الاستاذة(ة) مصوودي رمضان

المشرف. مذكرة المسز.

الموسومة بـ: **Commande MPPT pour les panneaux photovoltaïque en ombrage**

من الخلو الطالب(ة) جارف فاطمة الزهراء

الكلية: العلوم والتكنولوجيا

التقسيم: علوم التكنولوجيا

التخصص: تحكم كهربائي

تاريخ تقييم / مناقشة: 22 جوان 2021

أشهد ان الطلبة قد قاموا بالاعديلات والتصحيحات المطلوبة من طرف لجنة التقييم / المناقشة، وان المطابقة بين النسخة الورقية وال لكترونية اس توفت جميع شروطها.

و با مكنهم ايداع النسخ الورقية (02) والالكترونية (PDF)

- امضاء المشرف:

ادرار في 2021/07/07

مساعد رئيس القسم:



مصوودي رمضان  
مساعد رئيس قسم علوم التكنولوجيا مكتب التكوين  
والتعليم في الفروع بكلية العلوم والتكنولوجيا

ملاحظة: لا تقبل أي شهادة بدون التوقيع والمصافحة.

# Remerciement

*Avant tout, nous remercions Dieu le tout puissant de nous avoir donné courage, patience et force durant toutes ces années d'étude et que grâce à lui ce travail a pu être réalisé.*

*Nous tenons à exprimer notre remerciement et notre gratitude à notre encadreur : **Dr. MASMOUDI Ramadhan** pour la confiance qu'il nous a prodigué pour la direction de ce travail, sans cesser de nous encourager et de nous pousser vers les horizons de recherche scientifique.*

*Nos remerciements au département de Science et Technologie de l'université d'Adrar et à tous les enseignants qui nous enseignés durant les années du cursus.*

*Nos remerciements sont également adressés aux membres de jury qui ont accepté de juger ce travail.*

*Enfin nous remercions aussi toutes les nos familles et les personnes qui nous ont aidés de près ou de loin à la rédaction de ce travail.*

*Dédicace*

*Je dédie ce modeste travail à :*

*Mes très chers parents*

*Qui n'ont jamais cessé de m'encourager et de me pousser vers les horizons.*

*Mes frères et ma sœur*

*Vous avez de près ou de loin contribué à ma formation. Tous mes meilleurs vœux de succès dans vos études et dans votre vie.*

*À mes oncles, tantes, cousins, cousines et à toute ma famille.*

*Mes vifs remerciements. Vous m'avez soutenu et aidé quand j'avais besoin de vous*

*À tous mes enseignants, du primaire à l'université.*

*À tous mes amis et collègues de cette promotion*

*À tous ceux qui ont participé de près ou de loin pour la réalisation de ce travail*

*KHARËF Fatima Zohra*



## Résumé :

La plupart des systèmes photovoltaïques à grande échelle sont généralement installés dans les zones disposant de ressources solaires adéquates et de vastes terres.

Cependant, Il arrive qu'un panneau PV ne soit pas complètement exposé à la lumière, à cause de l'ombre, à cause de certains blocs, tels que les feuilles et les excréments d'oiseaux du milieu naturel, les ombres des poteaux métalliques, les bâtiments de distribution d'énergie ou même les ombres des panneaux photovoltaïques de première rangée sur les modules en raison de la conception incorrecte ou des limitations condition naturelle, aura un impact considérable sur les performances des panneaux photovoltaïques.

Dans ce projet, on va établir un modèle de simulation pour les modules PV exposées à un éclairage non uniforme (en présence de l'ombrage partiel).

En mesurons les caractéristiques I-V et P-V d'un panneau photovoltaïque par l'utilisation d'un logiciel de simulation PSIM (Power Simulation), pour analyser les impacts de différents types d'ombrage partiel.

Enfin, nous essayons d'utiliser un certain command MPPT robuste à l'effet d'ombrage lors du fonctionnement du système PV dans une telle région.

### **Mots clés :**

MPPT, P&O , INC, Partiel Ombrage, PV.

## Abstract

Most large-scale PV systems are usually installed in areas with adequate solar resources and large land areas. However, there are times when a PV panel is not fully exposed to light, because of the shade, because of some blocks, such as leaves and bird droppings from the natural environment, shadows from metal poles, power distribution buildings or even the shadows of the first row photovoltaic panels on the modules due to incorrect design or natural condition limitations, will have a considerable impact on the performance of photovoltaic panels.

In this project, we will establish a simulation model for PV modules exposed to non-uniform illumination (in the presence of partial shading), by measuring the characteristic I-V and P-V of a photovoltaic panel using PSIM(Power Simulation) as simulation software, to analyse the impacts of different types of partial shading.

Finally, we try to use some robust MPPT command with shading effect when operating the PV system in such a region.

**Keywords:** MPPT, P&O; INC, Partial Shading, PV.

## الملخص

عادةً ما يتم تثبيت معظم الأنظمة الكهروضوئية واسعة النطاق في مناطق بها موارد شمسية كافية ومساحات كبيرة.

ومع ذلك ، هناك أوقات لا تتعرض فيها اللوحة الكهروضوئية بالكامل للضوء ، بسبب الظل ، بسبب بعض الكتل ، مثل أوراق الشجر وروث الطيور من البيئة الطبيعية ، أو الظلال من الأعمدة المعدنية ، أو مباني توزيع الطاقة أو حتى ظلال الصف الأول من الألواح الكهروضوئية على الوحدات بسبب التصميم غير الصحيح أو قيود الظروف الطبيعية ، كل هذه العوامل سيكون لها تأثير كبير على أداء الألواح الضوئية.

في هذا المشروع، سنقوم بإنشاء نموذج محاكاة للوحدات الكهروضوئية المعرضة لإضاءة متباينة (في وجود تظليل جزئي)، عن طريق قياس خصائص I-V و P-V للوحة الكهروضوئية باستخدام برنامج محاكاة PSIM (Power Simulation) ، لتحليل تأثيرات الأنواع المختلفة من التظليل الجزئي.

أخيراً سنحاول استخدام بعض أوامر MPPT القوية مع تأثير التظليل عند تشغيل نظام PV في مثل هذه المنطقة.

الكلمات المفتاحية: MPPT، P&O، INC ، تظليل جزئي ، PV.

## Table des matières

Remerciement.....	III
Résumé .....	V
Abstract .....	VI
المخلص .....	VII
Table des matières .....	VIII
Liste des Figures.....	X
Liste des Tables .....	XII
Nomenclature (unité et symbole) .....	XIII
Liste des abréviations .....	XV
Introduction générale.....	1
Chapitre 01 : Effet de l’ombrage sur les systèmes photovoltaïques .....	3
I.1. Introduction : .....	4
I.2. l’énergie solaire photovoltaïque : .....	4
I.2.1 Description d’un système PV .....	4
I.3. L’effet photovoltaïque .....	6
I.4. La cellule solaire .....	7
I.4.1. Fonctionnement de la cellule photovoltaïque.....	8
I.4.2 Caractéristiques électrique d’une cellule photovoltaïque : .....	9
I.4.3. Les différents types de cellules photovoltaïques .....	10
I.4.4 Influence de l’éclairement et de la température .....	11
I.4.5.Circuit électrique équivalent .....	13
I.5. Définition d’un ombrage : .....	14
I.5.1 Effet de l’ombrage.....	15
I.5.2 Circuit électrique équivalent d’une cellule sous ombrage : .....	16
I.5.3 Caractéristiques électrique d’une cellule photovoltaïque sous ombrage.....	17
I.6 Conclusion : .....	19
Chapitre 02 : Commande MPPT conçu pour les systèmes PV sous ombrage .....	20
II.1.Introduction.....	21
II.2.Poursuite du point de puissance maximale .....	21
II.2.1 Définition: .....	21
II.2.2.Explications sur le MPPT (Maximum Power Point Tracking) : .....	22
II.2.3 Principe de la Recherche du MPP : .....	22



II.3.Classification Des Commandes MPPT Selon Le Type De Recherche .....	23
II.3.1 Méthodes indirectes.....	23
II.3.2 Méthodes directes .....	23
II.4 Les différents algorithmes de commandes MPPT .....	24
II.4.1. Algorithme Perturber et Observer (P&O) .....	24
II.4.2.Algorithmes Perturber et Observer (P&O) avec pas variable .....	25
II.4.3.Algorithme Incrément de la Conductance (INC) .....	26
II.4.4.Algorithme “Hill Climbing” .....	28
II.4.5.Algorithme de Fraction de la Tension Vco (FCO).....	29
II.4.5.Algorithme de Fraction du Courant Icc(FCC) .....	30
II.5.Comparaison entre les différents algorithmes [33].....	31
II.6.Algorithme MPPT sous ombrage (Algorithmes évolués).....	33
II.6.1.MPPT À Base De Logique Floue.....	33
II.6.2.MPPT avec l’optimisation par essais des particules .....	38
II.6.3.Les commandes MPPT de réseaux de neurones artificiels (ANN).....	41
II.7.Conclusion .....	42
Chapitre 03: Simulation de l'effet d'ombre sur des panneaux photovoltaïques.....	43
III.1.Introduction .....	44
III.2. Description du logiciel PSIM .....	44
III.2.1.Prise en main sur le logiciel PSIM.....	44
III.3.Description du système à simuler .....	46
III.4.Implémentation de la commande MPPT .....	47
III.4.1.Comportement du système MPPT conventionnel à l’ombre .....	50
III.4.2.Algorithme P&O modifié pour un système PV sous ombrage .....	52
III.5. Conclusion .....	54
Conclusion générale .....	55
Annexe A : datasheet du panneau PV MSX60 .....	57
Références .....	59

## Liste des Figures

Figure I- 1 1 les différents éléments du système photovoltaïque .....	5
Figure I- 2: 1 système photovoltaïque plus détaillé .....	6
Figure I- 3: Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque.....	7
Figure I- 4 Structure d'une cellule photovoltaïque au silicium (8).....	8
Figure I- 5 Fonctionnement de la cellule photovoltaïque.....	8
Figure I- 6: Caractéristique électrique d'une cellule photovoltaïque .....	9
Figure I- 7: Les différents types de cellules photovoltaïques.....	11
Figure I- 9: caractéristiques I(V) d'un panneau solaire pour différents éclairément. ....	12
Figure I- 9: influence de la température sur la caractéristique I(V). ....	13
Figure I- 10 Circuit électrique équivalent (12).....	14
Figure I- 11: Shémas équivalent d'un panneau photovoltaïque ombragé.....	15
Figure I- 12: circuit équivalent d'un module PV partielement ombragé .....	16
Figure I- 13 Courbe I-V pour panneau PV sous ombrage.....	17
Figure I- 14: panneau photovoltaïque sous ombrage avec diode by-pass.....	18
Figure I- 15 Courbe I-V pour panneau PV sous ombrage avec bypass diodes .....	18
Figure I- 16 Courbe P-V pour panneau PV sous ombrage avec diodes bypass .....	19
Figure II- 1 Schéma de principe du convertisseur mppt .....	22
Figure II- 2 Organigramme de l'algorithme FCO .....	24
Figure II- 3 Algorithme d'une commande MPPT basée sur la méthode perturber et observer	25
Figure II- 4: partiel organigramme d'algorithme P&O variable.....	26
Figure II- 5 Positionnement du point de fonctionnement suivant la valeur de $\Delta IPV/\Delta VPV$ sur les caractéristiques de I-V [16].....	27
Figure II- 6 Algorithme d'une commande MPPT basée sur la méthode Incrément de Conductance .....	28
Figure II- 7 Organigramme de l'algorithme Hill Climbing. ....	29
Figure II- 8 Organigramme de l'algorithme FCO. ....	30
Figure II- 9: structure de base d'un contrôleur MPPT flou.....	33

Figure II- 10 Représentation des fonctions d'appartenance ; (a) : l'erreur, (b) : variation de l'erreur, (c) : variation du rapport cyclique .....	35
Figure II- 11 règles d'inférence.....	37
Figure II- 12 1Stratégie de déplacement d'une particule .....	39
Figure II- 13: Organigramme de la MPPT par PSO.....	40
Figure II- 14: Exemple d'un réseau de neurones [16]. .....	41
Figure III- 1: Modélisation d'un panneau PV sous ombrage avec une diode bypass.....	46
Figure III- 2: Courbes I-V (a) et P-V (b) pour un panneau MSX60 sous ombrage avec la diode bypass .....	47
Figure III- 3: Organigramme de l'algorithme P&O modifié.....	49
Figure III- 4: système PV sous éclairage uniforme.....	49
Figure III- 5: Puissance de sortie (P1) et puissance de la charge(P0) .....	50
Figure III- 6: Puissance de sortie du système PV en cas de charge égale à 50Ω.....	51
Figure III- 7: Puissance de sortie du système PV en cas de charge égale à 20Ω.....	51
Figure III- 8:système PV sous ombrage partiel.....	52
Figure III- 9: Puissance de sortie de PV dans le cas où la charge égale 50Ω.....	53
Figure III- 10: Puissance de sortie de PV dans le cas où la charge égale 15 Ω.....	53

## Liste des Tables

Table I- 1 Différents types des cellules avec leur rendement.....	11
Table II- 1 Caractéristiques majeures des commandes MPPT.....	32
Table II- 2 Matrice d'inférence .....	36

# Nomenclature (unité et symbole)

<b>A</b>	La facteur d'idéalité de la diode.
<b>C</b>	Condensateur.
<b>D</b>	Diode
<b>dI<sub>PV</sub></b>	La dérivée de courant PV.
<b>dP<sub>PV</sub></b>	La dérivée de la puissance PV
<b>dV<sub>PV</sub></b>	La dérivée de la tensionPV.
<b>di<sub>L</sub></b>	La dérivée du courant de l'inductance.
<b>f</b>	fréquence de commutation (Hz)
<b>G</b>	L'éclairement de référence (1000 W/m <sup>2</sup> ).
<b>I<sub>cel</sub></b>	Le courant de la sortie d'une cellule PV.
<b>I<sub>CC</sub></b>	Courant de court-circuit d'une cellule ou d'un module solaire (A).
<b>I<sub>MPP</sub></b>	Le courant au point de puissance maximale
<b>I<sub>PV</sub></b>	Le courant que peut délivrer un GPV.
<b>I<sub>PH</sub></b>	Photo courant
<b>I<sub>s</sub></b>	Le courant de saturation de Diode.
<b>K</b>	Constante de Boltzmann( $1.381 \times 10^{-23}$ J/k)
<b>K<sub>i</sub></b>	Constante( $1.2 \text{ A/cm}^2 \text{ K}^3$ )
<b>K<sub>v</sub></b>	facteur de tension d'une cellule PV
<b>K<sub>i</sub></b>	facteur de courant d'une cellule PV
<b>L</b>	L'inductance (H)
<b>n<sub>p</sub></b>	nombre de cellules connectées en parallèle.
<b>n<sub>s</sub></b>	nombre de cellules connectées en série.
<b>P<sub>MPP</sub></b>	Puissance Maximale d'un Générateur Photovoltaïque
<b>P<sub>PV</sub>/P<sub>GPV</sub></b>	La puissance disponible en sortie du GPV.
<b>q</b>	Charge d'électron
<b>R<sub>s</sub></b>	La résistance série du panneau PV.
<b>R<sub>SH</sub></b>	Résistance shunt.
<b>T</b>	Température effective de la cellule en Kelvin.

<b>T<sub>STC</sub></b>	Température aux conditions de teste standard.
<b>V</b>	Volt.
<b>V<sub>CEL</sub></b>	La tension de la sortie d'une cellule PV.
<b>V<sub>CO</sub></b>	La tension du circuit ouvert (V).
<b>V<sub>g</sub></b>	Energie de gap (eV)
<b>V<sub>MPP</sub></b>	La tension au point de puissance maximale
<b>V<sub>PV</sub></b>	La tension aux bornes du GPV.
<b>V<sub>ripple</sub></b>	L'ondulation de tension.
<b>V<sub>th</sub></b>	La tension thermique
<b>W</b>	watt.
<b>\$</b>	Dollar.
<b><math>\alpha</math></b>	Le rapport cyclique.
<b><math>\Delta i_{max}</math></b>	L'ondulation du courant maximale.
<b><math>\Delta V_{cmax}</math></b>	L'ondulation de tension maximale.
<b><math>\eta_{MPPT}</math></b>	Le rendement d'un module PV.

## Liste des abréviations

<b>ANN</b>	Artificial Neural Network
<b>DC-DC</b>	Direct Courent-Direct Courent (Courant Continu-Courant Continu)
<b>FCC</b>	Fraction Du Courant De Court-Circuit
<b>FCO</b>	Fraction De La Tension De Circuit Ouvert
<b>FLC</b>	FuzzyLogic Controller
<b>f.é.m</b>	La force Électromotrice
<b>GPV</b>	Générateur Photovoltaïque.
<b>ICI</b>	Input Characteristic Impedance
<b>INC</b>	Conductance Incrémentielle.
<b>MPPT</b>	Maximum Power Point Tracking.
<b>MPP/PPM</b>	Maximum Power Point/ Point De Puissance Maximal.
<b>P&amp;O</b>	Perturbation Et Observation.
<b>PV</b>	Photovoltaïque
<b>STC</b>	Standard Teste Conditions.
<b>SEPIC</b>	Single Ended Primary Inductor Converter
<b>SPPMD</b>	Suivi du point de puissance Maximum distribué
<b>OEP</b>	L'optimisation par essais particulaires
<b>WC</b>	Watt crête
<b>PSO</b>	Optimization by particle swarms (ou OEP en français )

## Introduction générale

Le développement du domaine photovoltaïque a besoin de connaître idéalement la production électrique de ces systèmes sur différents sites en particulier pour estimer sa rentabilité économique. Il est bien connu que la puissance électrique générée par un module photovoltaïque peut être fortement minimisée par rapport à l'énorme optimale de production (point maximum de puissance) pour des conditions météorologiques données par de nombreux facteurs, on prend comme exemple l'ombrage, fonctionnement indésirable du MPPT, déséquilibres, etc... Ce sont surtout les secteurs résidentiels en particulier, en milieu urbain, qui peuvent être créés le phénomène d'ombrage parfois très difficiles à éviter, liées au tour des autres habitations et meubles urbains. Cela représente les conditions de fonctionnement où l'effet des ombrages sur le productible est le plus important.

Ainsi, les ombrages portés dus aux cheminées, aux antennes, aux arbres, aux nuages ou encore toute ombre mobile se déplaçant sur les modules au cours de la journée ne peuvent parfois pas être évitées. De même, on peut ajouter à la liste des ombres localisées qui seront fixées à une ou plusieurs cellules : celles liées principalement aux salissures, aux défécations de volatiles, aux feuilles d'arbres ou tout autre dépôt apporté par les diverses conditions météorologiques. Ces ombrages vont avant tout engendrer des pertes de productible en générant une puissance électrique plus ou moins éloignée de son potentiel théorique mais si ces obstacles à l'ensoleillement persistent, ils peuvent aussi conduire à la détérioration prématurée du générateur PV [1].

Un module photovoltaïque (PV) consiste en l'association série de plusieurs cellules PV. Ainsi, si toutes les cellules sont identiques, la courbe I-V résultante sera aisément déterminée en sommant les tensions de chaque cellule. Sous des conditions réelles de fonctionnement, si les cellules PV sont légèrement différentes les unes des autres ou si elles ne sont pas uniformément éclairées, la courbe I-V résultante n'est pas facilement calculable et dépend alors d'une combinaison complexe du comportement individuel de chaque cellule. [2].

Une synthèse descriptive du phénomène d'ombrage a été présentée dans cette étude comment se comporte et comment il influence sur les caractéristiques électriques de module PV. Ensuite, nous présentons une modélisation de la courbe de courant en fonction de la tension sous différentes conditions d'éclairement et une autre sur des cellules partiellement ombrées, cela nous a permis de montrer l'effet de l'ombrage quel que soit total ou partiel depuis une cellule à un champ PV.

Pour cela, le mémoire est structuré en trois chapitres détaillés comme suit :



## Introduction générale

---

Le premier se contene d'abord sur les différentes généralités indispensables des principes du photovoltaïque solaire puis qu'est-ce que veut dire l'ombrage et quel est son impact.

Le second chapitre est consacré au principe des commandes MPPT, ainsi que ses différents algorithmes classiques et sous ombrages (évolués).

Les résultats obtenus ont été analysés et discutés dans le dernier chapitre. Finalement, les conclusions seront ensuite présentées avant de suggérer des perspectives pour une extension de ce travail.

# **Chapitre 01 : Effet de l'ombrage sur les systèmes photovoltaïques**

# Chapitre 01 : Effet de l'ombrage sur les systèmes photovoltaïques

---

## I.1. Introduction :

La recherche sur les énergies renouvelables a récemment reçu une grande attention. Surtout pour le photovoltaïque(PV), l'énergie renouvelable a gagné en popularité comme l'une des avenues potentielles parce qu'elle représente une ressources énergétiques illimitées à un fonctionnement non pollué. Dans ce chapitre on va parler d'abord sur l'énergie solaire puis on va faire une description d'un système PV et tous concernant les cellules photovoltaïques après on donnera une détaille sur l'ombrage et son effet en ce système.

## I.2. l'énergie solaire photovoltaïque :

L'énergie solaire photovoltaïque provient de la conversion de la lumière du soleil en électricité au sein de matériaux semi-conducteurs comme le silicium ou recouverts d'une mince couche métallique. Ces matériaux photosensibles ont la propriété de libérer leurs électrons sous l'influence d'une énergie extérieure. C'est l'effet photovoltaïque. L'énergie est apportée par les photons, composants de la lumière) qui heurtent les électrons et les libèrent, induisant un courant électrique. Ce courant continu de micro-puissance calculé en watt crête (WC) peut être transformé en courant alternatif grâce à un onduleur.

L'électricité produite est disponible sous forme d'électricité directe ou stockée en batteries (énergie électrique décentralisée) ou en électricité injectée dans le réseau.

Un générateur solaire photovoltaïque est composé de modules photovoltaïques eux même composés de cellules photovoltaïques connectées entre elles.

Les performances d'une installation photovoltaïque dépendent de l'orientation des panneaux solaires et des zones d'ensoleillement. [3]

### I.2.1Description d'un système PV

Dès l'année 1839, le physicien français Alexandre Edmond Becquerel découvre que certains matériaux produisent de l'électricité lorsqu'ils sont exposés à la lumière. Il faut attendre 1905 pour qu'Albert Einstein explique concrètement ce phénomène, Toutefois, ce n'est qu'au cours des années 1950 que les chercheurs de la compagnie Bell Téléphone, parvinrent à fabriquer la première photopile, l'élément primaire d'un système photovoltaïque [4] [5]La transformation de la lumière en énergie électrique porte aussi le nom d'effet photovoltaïque.

# Chapitre 01 : Effet de l'ombrage sur les systèmes photovoltaïques

Le mot « photovoltaïque » vient de grec « photos » et signifiant lumière et de « volta » du nom du physicien italien qui en 1800 découvrit la pile électrique.

Bien que fondamental dans la chaîne que représente un système, le module photovoltaïque à lui seul ne peut pas grand-chose : pour répondre à un besoin défini, il faut en fait l'associer étroitement à un système complet correspondant à une application bien spécifique. Un système photovoltaïque sera donc constitué du générateur précédemment décrit, généralement associé à l'un ou plusieurs des éléments suivants: - un système d'orientation ou de suivi (rencontré assez rarement sous nos latitudes), - une gestion électronique (stockage, mise en forme du courant, transfert de l'énergie), - un stockage palliant la nature aléatoire de la source solaire, - un convertisseur DC/AC -une charge en courant continu basse tension ou en courant alternatif standard. La Figure I-1 représente symboliquement les divers éléments du système le plus général. Dans la pratique, bien sûr, les systèmes utilisent les éléments appropriés au type de charge et aux conditions locales.

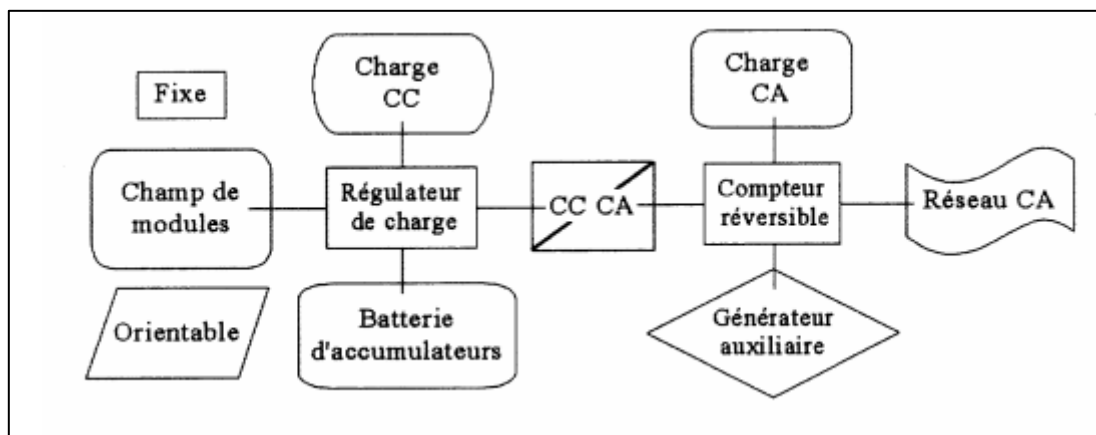


Figure I-1 : Les différents éléments du système photovoltaïque.

**Les systèmes PV les plus couramment utilisés sont de trois types :**

1. Les systèmes PV avec stockage électrique (batterie d'accumulateurs électrochimiques).  
Ceux-ci alimentent des appareils d'utilisation :

- soit directement en courant continu
- soit en courant alternatif par l'intermédiaire d'un convertisseur continu - alternatif (onduleur)

2. Les systèmes à couplage direct sans batterie (fonctionnement dit aussi "au fil du soleil"). Les appareils d'utilisation sont branchés soit directement sur le générateur solaire, soit,

# Chapitre 01 : Effet de l'ombrage sur les systèmes photovoltaïques

éventuellement, par l'intermédiaire d'un convertisseur continu - continu (adaptateur d'impédance).

Pour les systèmes sans batterie, il y a possibilité d'avoir recours à une forme de stockage qui ne soit pas de nature électrochimique.

**Exemples :** Pompage: stockage par réservoir d'eau, Réfrigération: stockage de froid (stockage de glace ou eutectique), Electrolyse de l'eau : stockage d'hydrogène. Le choix de tel ou tel système se fera en fonction de différents critères simplicité, application, environnement, etc.

3. Les systèmes connectés au réseau local par l'intermédiaire d'un onduleur piloté à la fréquence du réseau, le réseau servant de stockage.

L'étude de systèmes photovoltaïques se ramène à l'étude de l'adaptation de la charge. On recherchera à optimiser le système pour avoir le meilleur rendement d'adaptation du système (rapport de l'énergie électrique fournie à l'utilisation à l'énergie électrique qu'aurait pu fournir le générateur fonctionnant toujours à son point de puissance maximum). [6]

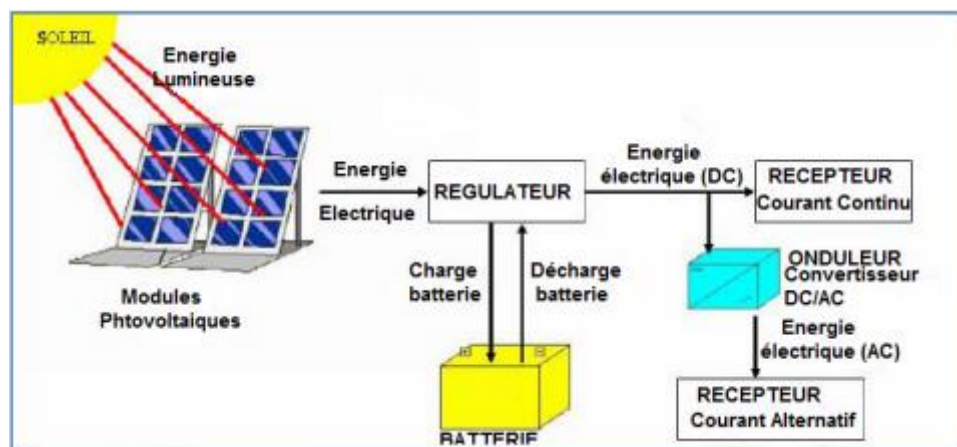


Figure I-2 : Système photovoltaïque plus détaillé.

## I.3. L'effet photovoltaïque

La conversion photovoltaïque est la transformation directe d'une énergie électromagnétique (rayonnement) en énergie électrique de type continu directement utilisable à travers un matériau semi-conducteur appelé cellule photovoltaïque [7].

L'effet photovoltaïque utilisé dans les cellules solaires permet de convertir directement l'énergie lumineuse des rayons solaires en électricité par le biais de la production et du transport

# Chapitre 01 : Effet de l'ombrage sur les systèmes photovoltaïques

dans un matériau semi-conducteur de charges électriques positives et négatives sous l'effet de la lumière. Ce matériau comporte deux parties, l'une présentant un excès d'électrons et l'autre un déficit en électrons, dites respectivement dopée de type N et dopée de type P. Lorsque la première est mise en contact avec la seconde, les électrons en excès dans le matériau N diffusent dans le matériau P [8].

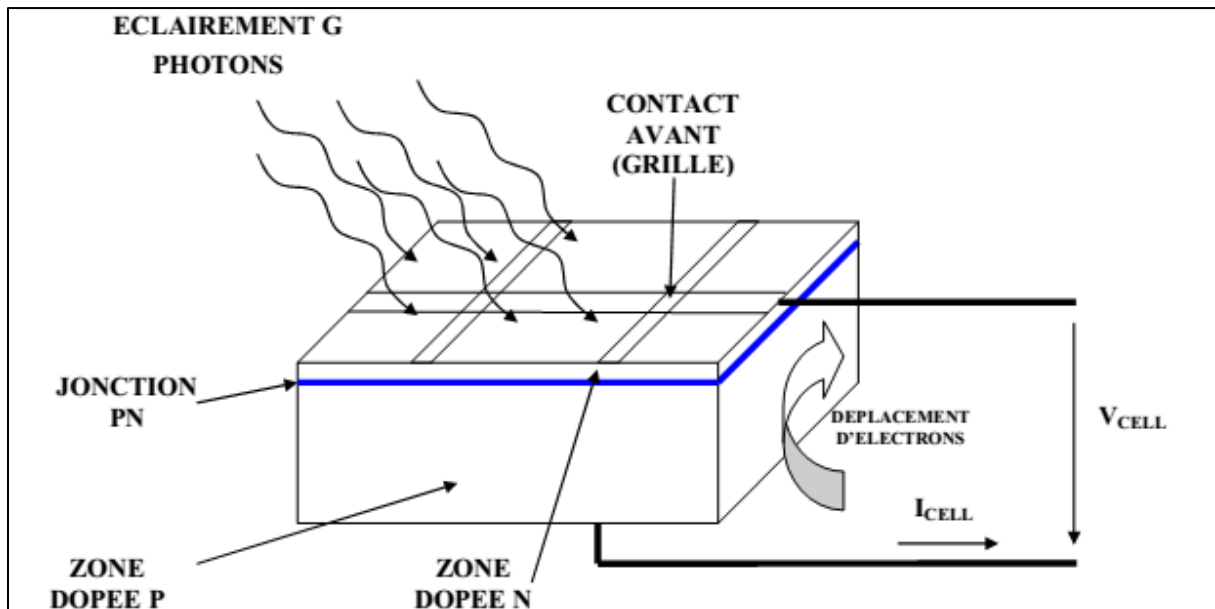


Figure I- 3: Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque.

## I.4. La cellule solaire

La cellule photovoltaïque, est un composant optoélectronique qui est la base des installations produisant cette énergie. Elle fonctionne sur le principe de l'effet photoélectrique. Plusieurs cellules sont reliées entre elles sur un module solaire photovoltaïque, plusieurs modules sont regroupés pour former une installation solaire. Cette installation produit de l'électricité qui peut être consommée sur place ou alimenter un réseau de distribution. 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 ( $CuInGa(Se)_2$ ), tellure de cadmium ( $CdTe$ ), etc.

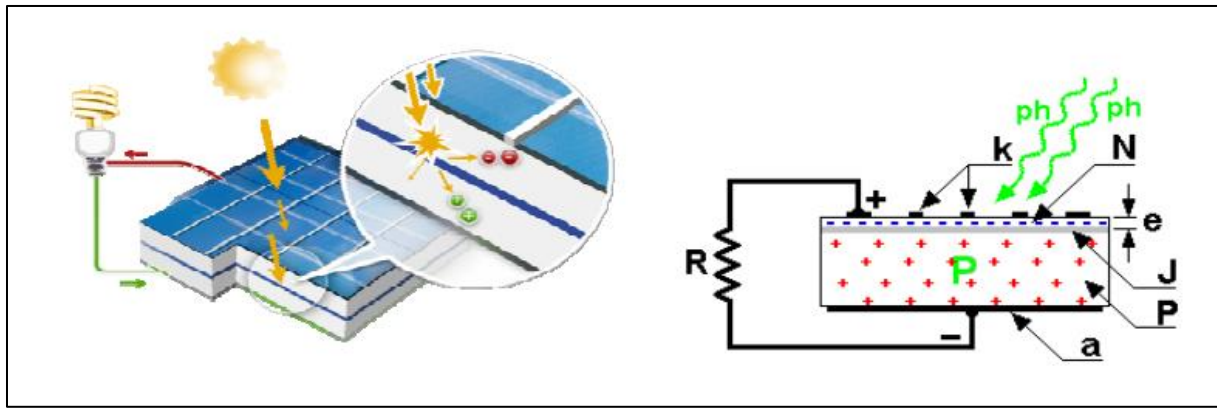


Figure I- 4 : Structure d'une cellule photovoltaïque au silicium [9]

## I.4.1. Fonctionnement de la cellule photovoltaïque

En fait, la photopile est composée de matériaux semi-conducteurs dopés P (manque d'électrons) et N (excès d'électrons) dont la jonction de type P-N permet aux électrons excédentaires de la zone N de traverser la jonction et d'occuper les trous de la zone P.

Ainsi, lorsque la lumière frappe la surface (dopée N) d'une cellule photovoltaïque, les photons constituant cette lumière communiquent leur énergie aux atomes du matériau en libérant les électrons des atomes qui génèrent ainsi des charges N (les électrons) et des charges P (les trous). Or le déplacement d'électrons (créé par l'énergie des photons) est synonyme de production d'électricité. Pour une photopile, la production d'électricité est liée à la production d'électrons (et de trous) par les photons de la lumière qui éclaire le dispositif. Plus de photons frappent la cellule, plus la quantité d'électricité produite est importante. Pour un éclairage donné, cette quantité dépend du rendement de conversion de la photopile (énergie produite/énergie reçue) [10].

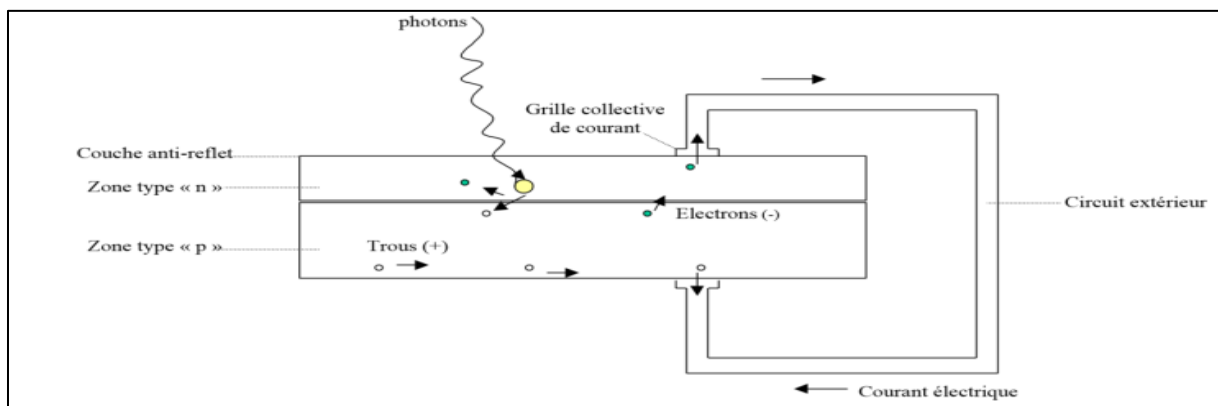


Figure I- 5 : Fonctionnement de la cellule photovoltaïque.

# Chapitre 01 : Effet de l'ombrage sur les systèmes photovoltaïques

## I.4.2 Caractéristiques électrique d'une cellule photovoltaïque :

Sous un éclairage donné, toute cellule photovoltaïque est caractérisée par une courbe courant-tension

(I-V) représentant l'ensemble des configurations électriques que peut prendre la cellule. Trois grandeurs physiques définissent cette courbe:

- Sa tension à vide :  $V_{oc}$ . Cette valeur représenterait la tension générée par une cellule éclairée non raccordée.
- Son courant court-circuit:  $I_{cc}$ . Cette valeur représenterait le courant généré par une cellule éclairée raccordée à elle-même.
- Son point de puissance maximal: MPP (en anglais : *maximal power point*) obtenu pour une tension et un courant optimaux :  $V_{opt}$ ,  $I_{opt}$  (parfois appelés aussi  $V_{mpp}$ ,  $I_{mpp}$ ).

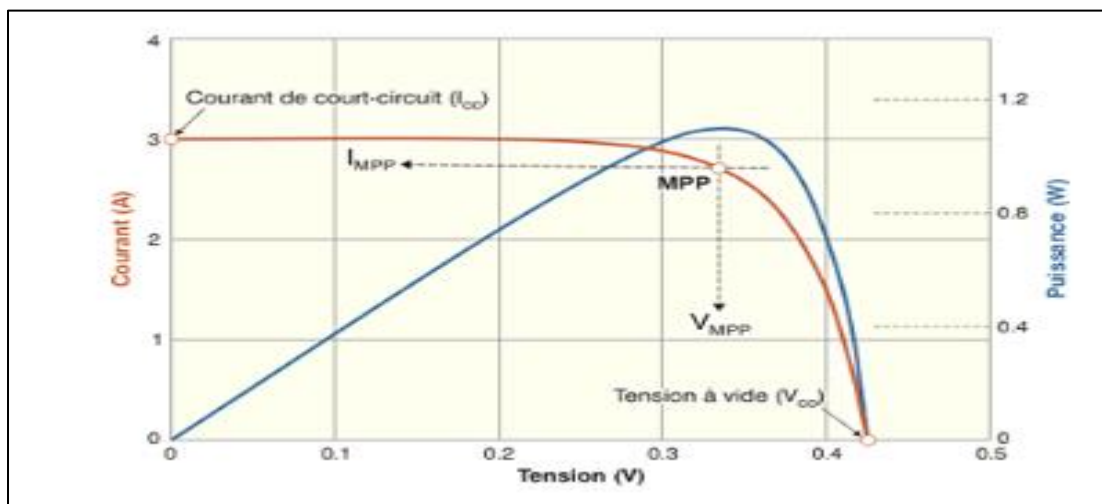


Figure I- 6: Caractéristique électrique d'une cellule photovoltaïque.



# Chapitre 01 : Effet de l'ombrage sur les systèmes photovoltaïques

---

**Remarque** : Pour permettre une comparaison de l'efficacité de différentes cellules, on définit ces caractéristiques dans des conditions de test bien précises (STC = Standard Test Conditions). Ces conditions sont : émission lumineuse de  $1\,000\text{ W/m}^2$ , température de  $25\text{ °C}$ , **conditions spectrales Air Mass 1.5** (composition du spectre identique au spectre solaire lorsqu'il traverse une épaisseur et demie d'atmosphère, ce qui correspond à un angle d'incidence de  $41.8^\circ$  par rapport à l'horizontale).

Actuellement, les cellules présentent des valeurs de l'ordre de  $0.5\text{V}-3.5\text{A}-2.1\text{ Wc}$ . [11]

## I.4.3. Les différents types de cellules photovoltaïques

Les cellules photovoltaïques sont des dispositifs électronique réalisées à l'aide des composants semi-conducteurs qui possèdent la particularité de produire l'électricité quand ils sont éclairés. Elles sont généralement faites du silicium sous ses différentes formes [8]. La plupart des cellules solaires disponibles sur le marché mondial, sont à base de silicium, soit du type monocristallin, poly cristallin ou amorphe [12].

### **Silicium Mono-cristallin**

La cellule de silicium monocristallin est historiquement la plus largement utilisée et commercialisée. La fabrication de cellules de silicium commence avec l'extraction du cristal de dioxyde de silicium. Ce matériel est désoxydé dans de grands fours, purifié et solidifié. Ce processus a atteint une pureté de 98 et 99% ce qui permet un rendement énergétique fort (en effet, plus le revêtement de la cellule est pur, plus l'effet photovoltaïque est facilité). Le silicium est alors fusionné avec une petite quantité de dopant, normalement le bore qui est de type P puis coupé en fines tranches d'environ  $300\text{ }\mu\text{m}$ . Après la coupe et le nettoyage des impuretés des tranches, des impuretés de type N sont introduites via un processus de diffusion contrôlée. Parmi les cellules photovoltaïques utilisant le silicium comme matériau de base, les monocristallins sont, en général, celles qui ont les meilleures performances.

### **Silicium poly-cristallin**

Les cellules en silicium poly-cristallin sont moins coûteuses que celles en silicium monocristallin car les processus de préparation des cellules sont moins stricts. Leur efficacité est cependant plus faible. Le processus de production est semblable à celui présenté précédemment dans le cas de la fabrication de cellule en silicium mais avec un contrôle moins

# Chapitre 01 : Effet de l'ombrage sur les systèmes photovoltaïques

rigoureux. Il en résulte que les cellules obtenues sont moins coûteuses mais aussi moins efficaces. Leur intérêt réside dans la multiplicité des formes sous laquelle le revêtement peut se présenter : lingots à découper, ruban ou fil à déposer,... Chaque technique permet de produire des cristaux ayant des caractéristiques spécifiques, compris la taille, la morphologie et la concentration des impuretés.

## Silicium amorphe

Les cellules de silicium amorphe diffèrent des cellules présentées précédemment puisque leur structure présente un haut degré de désordre dans la structure des atomes. L'utilisation de silicium amorphe pour les cellules solaires a montré de grands avantages à la fois au niveau des propriétés électriques et le processus de fabrication (processus simple, faiblement consommateur d'énergie, peu coûteux, possibilité de produire des cellules avec grands secteurs). Mais, même avec un coût réduit pour la production, l'utilisation du silicium amorphe a deux inconvénients: le premier est le rendement de conversion faible par rapport aux cellules de mono et poly cristallin de silicium. Le deuxième est le fait que les cellules sont affectées par un processus de dégradation dans les premiers mois d'opération, réduisant ainsi leur durabilité.

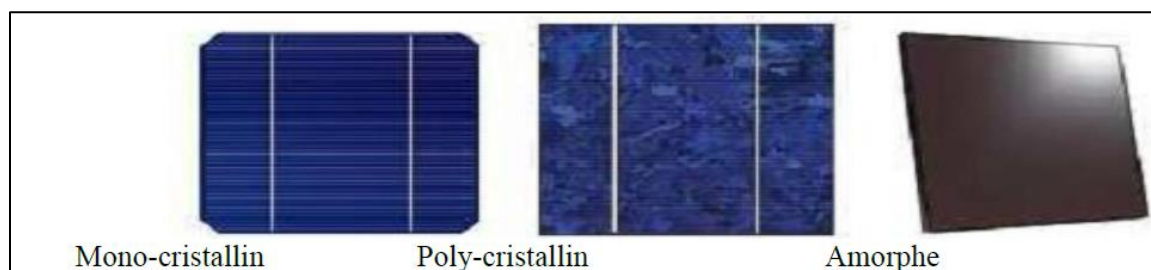


Figure I- 7: Les différents types de cellules photovoltaïques.

**Tableau 1.2 :** Différents types des cellules avec leur rendement

Technologie de cellules	Rendement en laboratoire [%]	Rendement production [%]
Silicium amorphe (a-Si)	13	5-9
Silicium poly cristallin (p-Si)	19.8	11 à 15
Silicium monocristallin (m-Si)	24.7	13 à 17

Table I- 1 Différents types des cellules avec leur rendement.

## I.4.4 Influence de l'éclairement et de la température

## Chapitre 01 : Effet de l'ombrage sur les systèmes photovoltaïques

La Figure I-8 présente les caractéristiques d'une cellule solaire type, pour plusieurs intensités de rayonnement solaire. On remarque que le courant électrique, est directement proportionnel au rayonnement à ces niveaux d'éclairement. Par contre la tension est dégradée légèrement par rapport au courant, lorsque l'intensité de la lumière baisse.

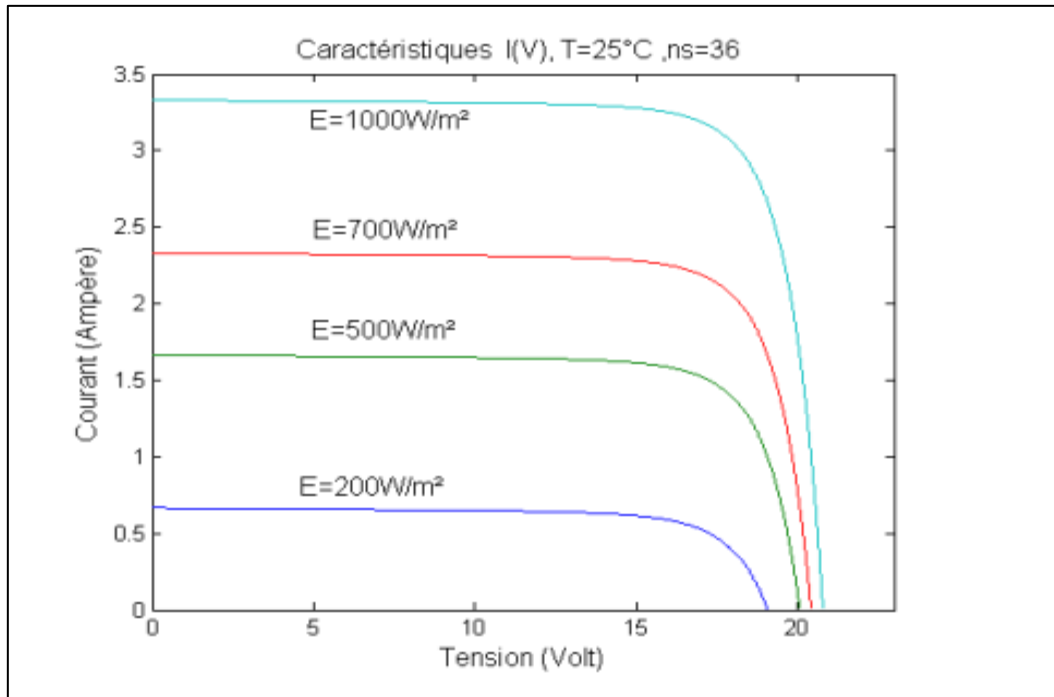


Figure I- 8: Caractéristiques I(V) d'un panneau solaire pour différents éclairement.

L'influence de la température est très significative, ce qui nous conduit à une considération soignée, lors de la mise en marche des systèmes photovoltaïques. Sur la Figure 1-9, on illustre l'effet de la température sur le comportement des photopiles. Elle montre une diminution considérable de la tension électrique délivrée avec l'augmentation de la température. Tandis que, le courant gagne quant à lui de l'intensité. Ceci peut être expliqué par la baisse du gap, ce qui provoque l'accroissement de la concentration des porteurs de charge, puisque la transition entre les niveaux devienne plus probable.

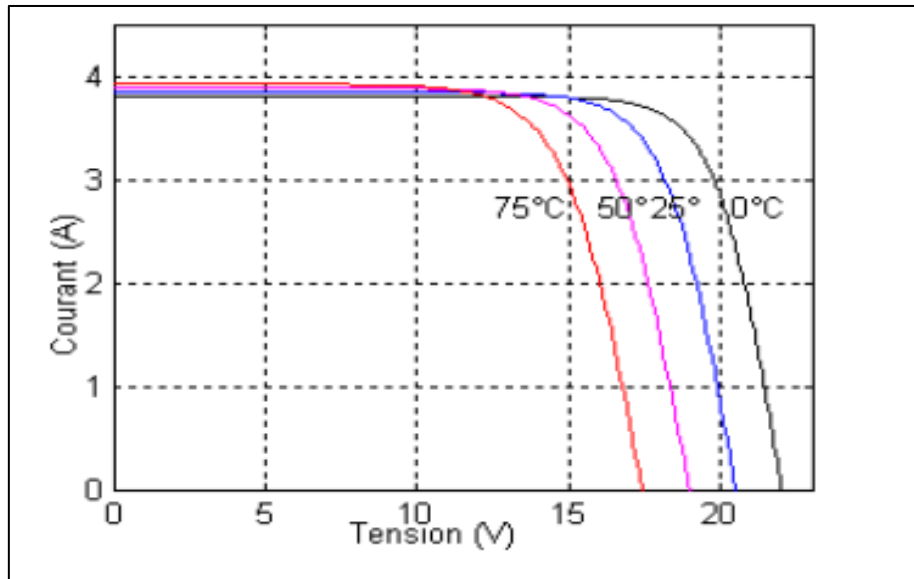


Figure I- 9: Influence de la température sur la caractéristique I(V).

Il faut signaler que l'accroissement du courant sous l'effet d'une hausse température, peut être négligé au point de puissance maximale, et le comportement global de la cellule en température est une perte de 0,4 à 0,5 %/°C.

### I.4.5. Circuit électrique équivalent [13] :

Le tracé du circuit électrique équivalent d'un système, est fréquemment utilisé afin de décrire son comportement électrique à l'aide de composants électriques (Source, résistance, diode). Nous allons décrire ici par cette méthode, une diode PV dans l'obscurité et sous illumination. Lorsqu'on expose la surface d'une cellule solaire à la lumière, elle présente la particularité de pouvoir fonctionner comme étant un générateur d'énergie, en délivrant un courant électrique continue [13]. En effet, ce comportement électrique de la cellule n'est d'autre que celui d'une diode sous éclairage. Ainsi, le régime électrique d'une photopile constitué d'une jonction PN, peut être décrit via l'équation suivante :

$$I = I_{ph} - \left[ \exp\left(\frac{\beta}{n}(V + IR_s)\right) - 1 \right] - \frac{(V + IR_s)}{R_{sh}} \quad (I.1)$$

$$\beta = \frac{q}{kT}$$

Où :

:La charge de l'électron en *Coulomb*,

# Chapitre 01 : Effet de l'ombrage sur les systèmes photovoltaïques

: La constante de Boltzmann Joule par Kelvin,

: La température en Kelvin,

: La tension aux bornes de la cellule photovoltaïque en Volt,

: Le courant délivré par la photopile en Ampère,

$I_p$ : Le photo courant en Ampère,

$I$ : Le courant de saturation en Ampère,

: Le facteur de non idéalité de la jonction,

$R$ : Résistance série caractérisant les diverses résistances de contacts et de connexion, en  $\Omega$ ,

$R_{sh}$ : Résistance shunt qui modélise les courants de fuites de la jonction, en  $\Omega$

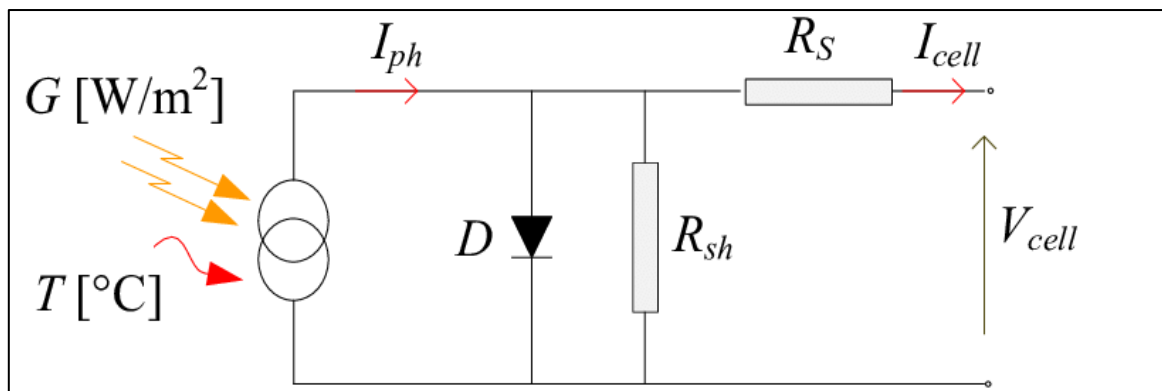


Figure I- 10 : Circuit électrique équivalent [14].

## I.5. Définition d'un ombrage :

Il se peut qu'un obstacle, de quelque nature qu'il soit (bâtiment, arbre, etc.) Fasse de l'ombre aux panneaux solaires.

Un ombrage sur les capteurs photovoltaïques entraîne une perte de production d'énergie. Cette perte de production varie en fonction de la taille et de la densité de l'obstacle. Mieux vaut quantifier l'importance de la perte avant d'entreprendre de poser ses panneaux photovoltaïques.

On peut distinguer deux types d'ombrages: l'un partiel et l'autre total.

On appelle ombrage total ou complet ce qui vient couvrir le panneau (couverture, branche, cassée, saleté de toute nature, etc.).

L'ombrage partiel laisse passer en partiels rayons du soleil. [15]

# Chapitre 01 : Effet de l'ombrage sur les systèmes photovoltaïques

Il faut savoir que les cellules photovoltaïques sont montées en série. La cellule la plus faible va donc avoir un impact sur le rendement des autres cellules. Ainsi, l'ombrage total d'une rangée de cellules peut rendre l'ensemble du module photovoltaïque inefficace.

Toutefois, les panneaux photovoltaïques sont aujourd'hui équipés de diodes by-pass, ce qui permet de limiter l'impact d'une ombre sur une partie du panneau.

Par exemple pour un panneau équipé d'un jeu de 3 diodes by-pass, si une ombre affecte une cellule alors la série de cellules branchée sur la même diode by-pass est court-circuitée et le reste du panneau continue de produire. [16]

## I.5.1 Effet de l'ombrage

La figure I-11 montre une connexion série d'un ensemble de cellules éclairées avec un ensemble de cellules ombrées. Notez que le photo-courant  $I_{phs}$  des cellules ombrées est assez petit que le courant photonique  $I_{phi}$  des cellules éclairées. Par conséquent, si le courant du module  $I_{ms}$  est faible par rapport aux  $I_{phs}$  alors, la diode  $D_s$  est polarisée en direct et il n'y a aucun risque. Mais, si  $i_{ms}$  est élevé par rapport à  $I_{phs}$  alors, les  $I_D$  de courant de diode =  $I_{phs} I_{ms} < 0$ . En conséquence, la diode est polarisée en inverse; La diode polarisée en inverse  $D_s$  offre une résistance élevée consomme de l'énergie et réduira considérablement la charge courant  $I$  lui-même. Cela provoque une baisse de la tension de sortie.

Si la différence des niveaux d'éclairage est élevée,  $D_s$  peut être endommagé en raison d'une surchauffe [17].

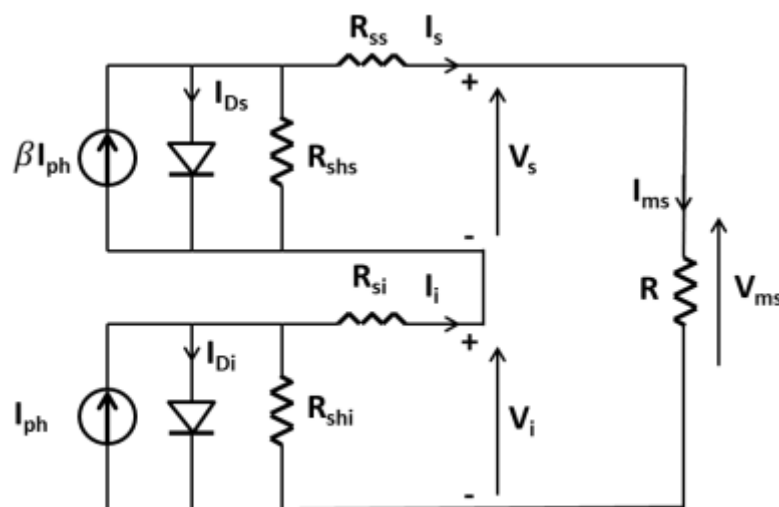
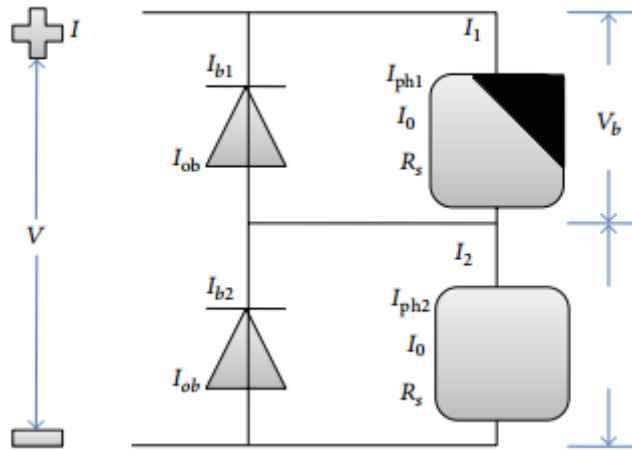


Figure I- 11: Schémas équivalent d'un panneau photovoltaïque ombragé.

## I.5.2 Circuit électrique équivalent d'une cellule sous ombrage :

Comme le montre la figure I-12, le circuit équivalent d'un module PV est simplifié en deux cellules en série avec deux diodes by-pass. Les paramètres de ces on suppose que deux cellules et diodes sont constantes, et les diodes de dérivation s'éteignent si les deux cellules recevant des irradiations. Basé sur le solaire à diode unique couramment utilisé modèle de cellule, le courant de sortie  $I$  à travers la charge est donné par (I.2), où l'effet de la très grande résistance shunt  $R_{SH}$  est ignoré [18]. [19]



**Figure I- 12 : Circuit équivalent d'un module PV partiellement ombragé**

$$I = I_{ph} - I_0 \left\{ \exp \left[ \frac{q(v + IR_s)}{AKT} \right] - 1 \right\} \quad (I.2)$$

Où  $I_{ph}$  et  $I_0$  sont le photo-courant et l'inverse courant de saturation, respectivement.  $R_s$  est la résistance série.  $AetT$  sont le facteur d'idéalité de la diode et la température en Kelvin, respectivement ;  $q$  est la charge électronique ( $1,6 \times 10^{-19}$  C) et  $k$  est la constante de Boltzmann ( $1,38 \times 10^{-23}$  J / K).

Le courant  $I_b$  à travers la diode by-pass est donnée par

$$I_b = I_{ob} \left\{ \exp \left[ \frac{-qV}{A_bKT_b} \right] - 1 \right\} \quad (I.3)$$

Comme le montre la figure I-12, une ombre tombant sur la cellule 1 a réduit l'apport d'énergie à la cellule et par conséquent augmenté la perte d'énergie dans cette cellule ombrée partielle,

## Chapitre 01 : Effet de l'ombrage sur les systèmes photovoltaïques

alors que la cellule 2 est connectée avec cellule 1 en série et sous un éclairage complet. D'où le courant photoélectrique,  $I_{ph2}$ , est supérieur à celui de la cellule ombrée,  $I_{ph1}$ . Les états de la diode de dérivation se connectant en parallèle avec la cellule 1 sont dans deux cas en fonction du niveau de sortie différent tension  $V$ .

Dans le cas de  $I_{ph1} < I \leq I_{ph2}$ , le courant de sortie  $I$  est presque égal au courant de court-circuit  $I_{SC}$  lorsque la tension de sortie  $V$  est relativement faible. S'il y avait pas de diodes de dérivation, la cellule ombrée partielle 1 serait polarisé en inverse et offre une résistance élevée dans le circuit, ce qui entraîne une consommation d'énergie et une réduction de le courant de sortie  $I$ . Dans ce cas, la diode de dérivation 1 connecté à la cellule 1 en parallèle est polarisée en direct. Puis le courant redondant  $I - I_{ph1}$  traverse la diode de dérivation pour protéger la cellule ombrée 1 contre les effets d'ombrage et points chauds. La puissance de sortie est principalement contribué par la cellule solaire 2 qui est sous pleine éclairage.

### I.5.3 Caractéristiques électrique d'une cellule photovoltaïque sous ombrage

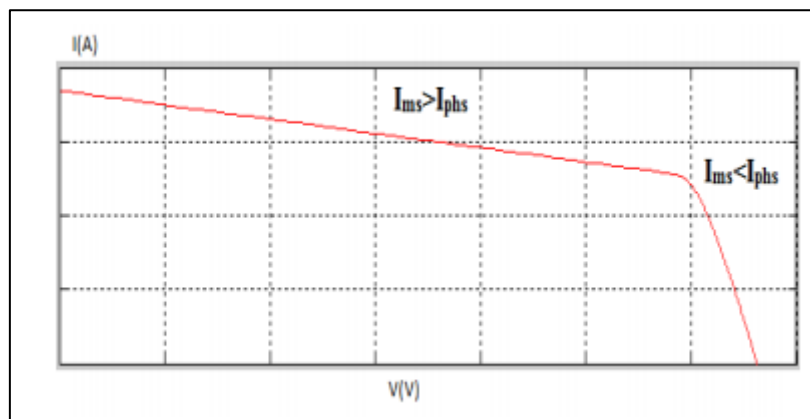


Figure I- 13 : Courbe I-V pour panneau PV sous ombrage

Comme le montre la figure I-13, une fois qu' $I_{ms}$  est supérieur à  $I_{phs}$ , la courbe I-V perd sa caractéristique exponentielle comme si elle était présentée dans l'équation (I.3).

La puissance perdue dans les cellules ombrées est convertie en chaleur qui peut conduire à un phénomène de point chaud provoquant dommages permanents au panneau. Une méthode pour protéger le module contre ce problème est lorsqu'on a la diode de dérivation connectée en parallèle aux cellules solaires [20].

Comme mentionné dans la spécification MSX 60, ce panneau est composé de 36 cellules PV en silicium poly cristallin disposés électriquement sous forme de deux chaînes en série de 18 cellules. Cette conception permet également l'implantation de diodes de dérivation sur les



## Chapitre 01 : Effet de l'ombrage sur les systèmes photovoltaïques

chaînes de 18 cellules, comme le montre la figure I-14. Ainsi, afin de simuler l'impact de l'ombrage partiel avec diodes by-pass, le string1 est exposé à  $700 \text{ W/m}^2$  et string2 par  $1000 \text{ W/m}^2$ .

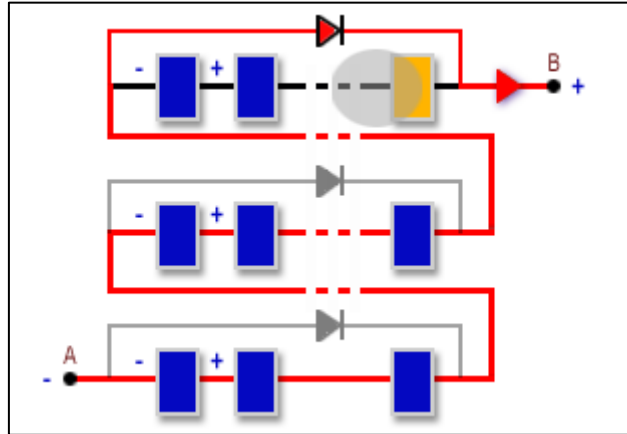


Figure I- 14: Panneau photovoltaïque sous ombrage avec diode by-pass

Sous un ensoleillement uniforme, les diodes de dérivation sont biais inverse et n'ont aucun impact. Cependant, sous ombrage, la diode de dérivation est directement polarisée et le courant passe à travers la diode au lieu de l'ombré cellules. Seules les cellules qui ne sont pas influencées par l'ombre génèrent de l'énergie. Les figures I-15 et I-16 montrent l'impact de la diode by-pass sur les caractéristiques du PV panneau.

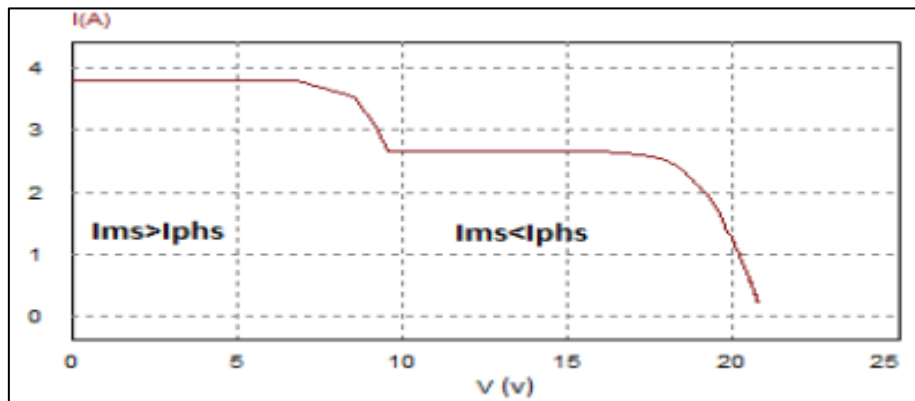


Figure I- 15 : Courbe I-V pour panneau PV sous ombrage avec by-pass diodes.

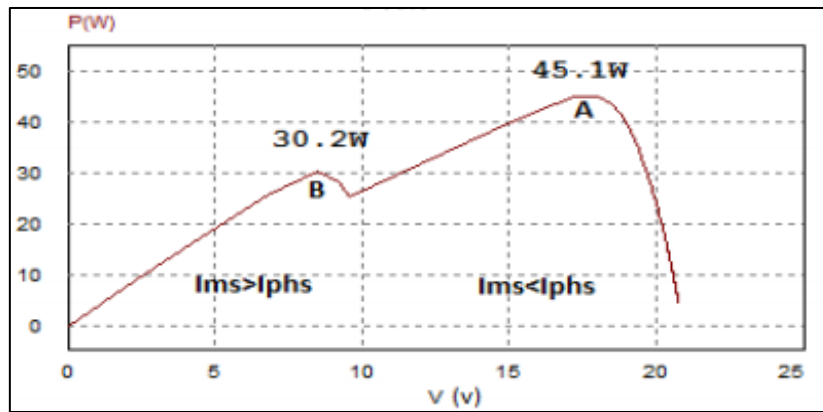


Figure I- 16 : Courbe P-V pour panneau PV sous ombrage avec diodes by-pass

Comme le montrent les figures I-15 et I-16, si  $I_{ms}$  est supérieur à  $I_{phs}$ , seules les cellules éclairées sont fonctionnelles. Cependant, une fois  $I_{ms}$  est inférieur à  $I_{phs}$ , toutes les cellules sont fonctionnelles.

### I.6 Conclusion :

Dans ce chapitre on a parlé de plusieurs points concernant l'énergie solaire d'une part, on a donné un état de l'art sur le système photovoltaïque son instruction et son fonctionnement et d'autre part l'effet de la variation météorologique (température et insolation) sur l'énergie produite ainsi qu'on a défini le phénomène d'ombrage et son effet sur le module PV.

# **Chapitre 02 : Commande MPPT conçu pour les systèmes PV sous ombrage**

# Chapitre02: commande MPPT conçu pour les systèmes PV sous ombrage

---

## II.1.Introduction

Le photovoltaïque (PV) est considéré comme une source d'énergie renouvelable populaire en raison de plusieurs avantages, principalement un faible coût d'exploitation, presque sans entretien et respectueux de l'environnement. Pour optimiser l'utilisation de grands réseaux de modules photovoltaïques, le suivi du point de puissance maximale est normalement utilisé en conjonction avec le convertisseur de puissance. L'objectif de MPPT est de s'assurer que le système peut toujours récolter la puissance maximale générée par les panneaux photovoltaïques. Cependant, en raison des conditions environnementales variables, à savoir la température et l'ensoleillement, la courbe caractéristique P-V présente un point de puissance maximale (MPP) qui varie de manière non linéaire avec ces conditions, ce qui pose un défi pour l'algorithme de suivi. À ce jour, diverses méthodes de suivi des MPP ont été proposées. Ces techniques varient en complexité, précision et vitesse. Chaque méthode peut être classée en fonction du type de variable de contrôle qu'elle utilise. Ci-dessous, nous passons aux éléments les plus importants concernant l'MPPT.

## II.2.Poursuite du point de puissance maximale

### II.2.1 Définition:

La commande MPPT « Maximum Power Point Tracking » est une méthode permet au générateur PV de travailler à sa puissance maximale quel que soit les conditions météorologiques d'irradiations et de température Le principe de cette commande est basé sur la variation automatique du rapport cyclique  $\alpha$  d'un convertisseur DC-DC à la valeur adéquate de manière à maximiser continuellement la puissance à la sortie du panneau PV.

Les hacheurs sont utilisé comme interface de puissance à contrôler par le régulateur MPPT, afin d'adapter la tension de sortie du hacheur à la tension requise par la charge. A partir de cette règle et selon le type de contrôleur, on peut raisonner sur plusieurs et différentes méthodes, afin d'extraire le maximum de puissance d'un panneau solaire [21].

Le rendement du point de fonctionnement ( $\eta_{MPPT}$ ), permet de mesurer l'efficacité de la commande qui a en charge le contrôle du convertisseur de puissance.

$$\eta_{MPPT} = \frac{P_{pv}}{P_{mpp}} \quad (II.1)$$

## Chapitre02: commande MPPT conçu pour les systèmes PV sous ombrage

Les performances d'une commande MPPT ne se résument pas à ce seul paramètre ( $\eta_{MPPT}$ ). D'autres critères utiliser pour évaluer la qualité de ce type de commande tels que les capteurs nécessaires, la complexité, le coût, la portée de l'efficacité, la vitesse de convergence, le suivi correct lors de changement l'irradiation et / ou le changement de température et le matériel nécessaire pour la mise en œuvre. [22]

### II.2.2.Exlications sur le MPPT (Maximum Power Point Tracking) :

C'est un montage électronique au niveau du régulateur qui permet de tirer le maximum d'énergie d'une installation solaire photovoltaïque.

- Le régulateur **MPPT** permet d'optimiser le rendement des panneaux solaires jusqu'à **30%** : pour un panneau photovoltaïque donné, les batteries recevront 30% d'électricité en plus par rapport à un régulateur solaire classique [23]

### II.2.3 Principe de la Recherche du MPP :

La figure II-1 représente le schéma de principe d'un convertisseur MPPT classique. La commande **MPPT** fait varier le rapport cyclique du convertisseur statique (CS), à l'aide d'un signal électrique approprié, pour tirer le maximum de puissance que le GPV peut fournir. L'algorithme MPPT peut être plus ou moins compliqué pour rechercher le MPP. En général, il est basé sur la variation du rapport cyclique du CS en fonction de l'évolution des paramètres d'entrée de ce dernier (I et V et par conséquent de la puissance du GPV) jusqu'à se placer sur le MPP. Plusieurs algorithmes sont disponibles [23].

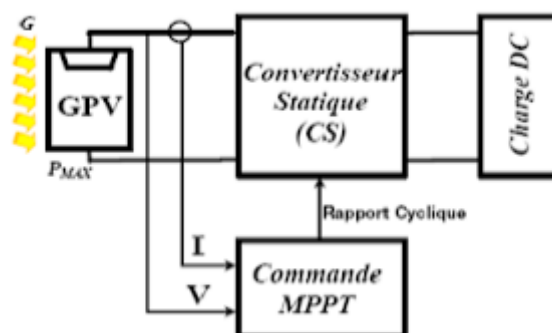


Figure II- 1: Schéma de principe du convertisseur MPPT [23].

# Chapitre02: commande MPPT conçu pour les systèmes PV sous ombrage

---

## II.3. Classification Des Commandes MPPT Selon Le Type De Recherche

### II.3.1 Méthodes indirectes

Ce type de commandes MPPT utilise le lien existant entre les variables mesurées ( $I_{cc}$  ou  $V_{co}$ ), qui peuvent être facilement déterminées, et la position approximative du MPP. Il compte aussi les commandes se basant sur une estimation du point de fonctionnement du GPV réalisée à partir d'un modèle paramétrique défini au préalable. Il existe aussi des commandes qui établissent une poursuite de la tension optimale en prenant en compte uniquement les variations de la température des cellules donnée par un capteur. Ces commandes ont l'avantage d'être simples à réaliser. Elles sont plutôt destinées à des systèmes peu coûteux et peu précis devant fonctionner dans des zones géographiques où il y a peu de changements climatiques. Parmi ces méthodes, on retrouve la méthode de la tension de circuit ouvert du générateur, la méthode de court-circuit etc... [24]

### II.3.2 Méthodes directes

Ce type de commande MPPT détermine le point de fonctionnement optimal (MPP) à partir des courants, tensions ou puissances mesurés dans le système. Il peut donc réagir à des changements imprévisibles du fonctionnement du GPV. Généralement, ces procédures sont basées sur un algorithme de recherche, avec lequel le maximum de la courbe de puissance est déterminé sans interruption du fonctionnement. Pour cela, la tension du point de fonctionnement est incrémentée dans des intervalles réguliers. Si la puissance de sortie est plus grande, alors la direction de recherche est maintenue pour l'étape suivante, sinon elle sera inversée. Le point de fonctionnement réel oscille alors autour du MPP. Ce principe de base peut être préservé par d'autres algorithmes contre des erreurs d'interprétation. Ces erreurs peuvent survenir, par exemple, à cause d'une mauvaise direction de recherche, résultant d'une hausse de puissance qui, est due à une augmentation rapide du niveau de rayonnement. La détermination de la valeur de la puissance du générateur PV, indispensable pour la recherche du MPP, nécessite la mesure de la tension et du courant du générateur, ainsi que la multiplication de ces deux variables. Parmi ces méthodes, on retrouve la méthode de différenciation, la méthode Perturbe & Observe (P&O), l'incrément de conductance, etc.... [24]

# Chapitre02: commande MPPT conçu pour les systèmes PV sous ombrage

## II.4 Les différents algorithmes de commandes MPPT

Au cours des dernières décennies, de nombreuses méthodes pour trouver le MPP ont été développées. Parmi ces méthodes, Les méthodes les plus couramment rencontrées sont communément appelées : Perturb & Observ (P&O), l'incrément de conductance (INC), Hill Climbing, Fraction de la Tension  $V_{co}$  (FCO), Fraction du Courant  $I_{cc}$  (FCC) et les commandes MPPT basées sur des défirrent méthode d'intelligence artificielle.

Afin de faire une comparaison des performances de ces commandes selon les précédentes recherches, nous rappelons brièvement leurs différents principes dans les paragraphes suivants :

### II.4.1. Algorithme Perturber et Observer (P&O)

La méthode P&O est généralement la plus utilisée en raison de sa simplicité et sa facilité de réalisation. Cet Algorithme utilisée comme entrée les valeurs de tension  $V_{pv}$  et de courant  $I_{pv}$ , et comme sortie la valeur de rapport cyclique  $\alpha$  [25]. Le principe de cet algorithme (Comme son nom l'indique et comme représente la figure II-2 est d'effectuer une perturbation sur la tension  $V_{pv}$  tout en agissant sur le rapport cyclique  $\alpha$  puis suite à cette perturbation, on calcule la puissance fournie par le panneau  $P(k)$  et la compare à la précédente  $P(k-1)$  [24] :Si la puissance augmente, on s'approche du (MPP) et la variation du rapport cyclique est maintenue dans le même sens. Au contraire si la puissance diminue, on s'éloigne du MPP. Alors, on doit inverser le sens de la variation du rapport cyclique. Comme illustre la figure II-3 [26].

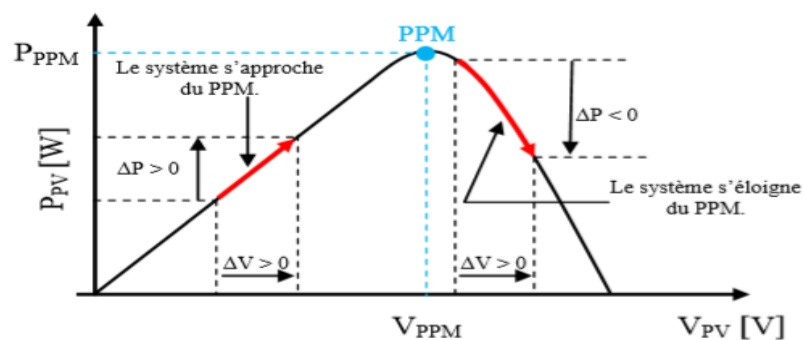


Figure II- 2 : Organigramme de l'algorithme FCO.

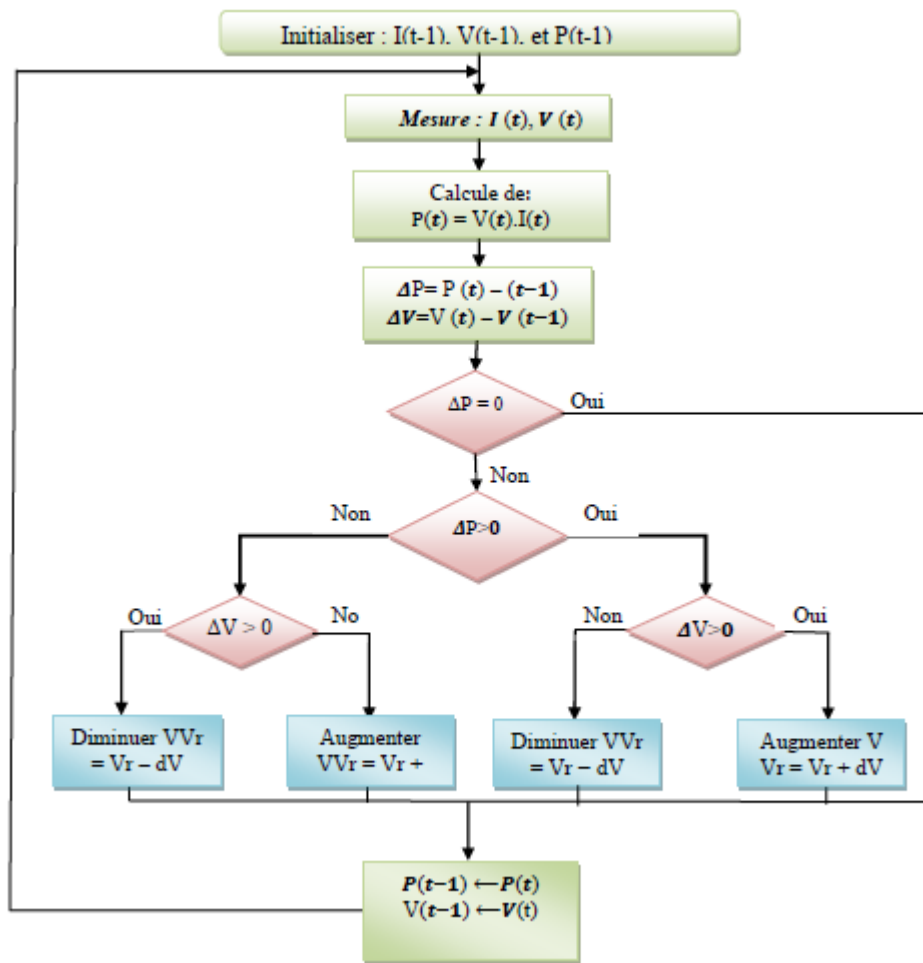


Figure II- 3 : Algorithme d'une commande MPPT basée sur la méthode perturber et observer.

## II.4.2. Algorithmes Perturber et Observer (P&O) avec pas variable

Le choix de pas ( $d\alpha$ ) d'algorithme P&O influe sur l'oscillation autour le point de puissance maximal et le temps de convergence d'algorithme vers cette point. Pour cela, on trouve des algorithmes P&O avec pas variable entre deux ou plusieurs valeurs afin de faire une combinaison adéquate entre la précision et la rapidité, l'un de ces algorithmes est celle proposé par [27]. Dans cet algorithme le pas est varié entre deux valeurs  $C_1$  et  $C_2$  selon la comparaison entre la valeur absolue de variation de puissance et une certaine valeur comme illustre dans le partiel organigramme suivant :



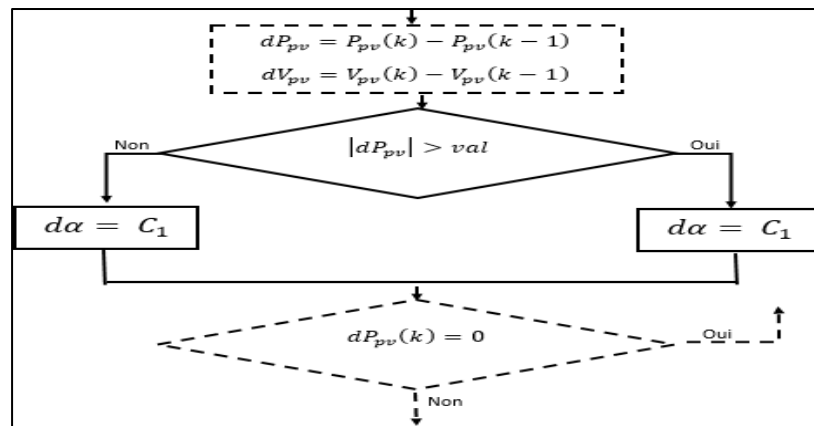


Figure II- 4: Partiel organigramme d'algorithmes P&O variable.

Un autre algorithme P&O avec pas variable est proposé par [28]. Dans cet algorithme le pas va changer son valeur dans chaque itération selon la variation de puissance et de tension suivant l'équation (2.1) :

$$d\alpha(k) = d\alpha_{fixe} * \frac{dp}{dv} \quad (2.1)$$

La différence entre les deux algorithmes précédant est le nombre des valeurs qui peut le pas prendre. Dans le premier algorithme le pas peut prendre deux valeurs uniquement mais dans le deuxième algorithme le pas peut prendre plusieurs valeurs (un nombre indéterminé de pas).

### II.4.3.Algorithme Incrément de la Conductance (INC)

L'algorithme de la conductance incrémentale est un algorithme qui s'adapte bien aux variations rapides des conditions météorologiques du site, il est relativement plus stable que la méthode P&O, cependant son implémentation pratique est plus difficile [29]. Le principe de cet algorithme est basé sur la connaissance de la valeur de la conductance  $G=I/V$  et l'incrément de la conductance  $(\Delta I/\Delta V)$  pour en déduire la position du point de fonctionnement par rapport MPP.

- Si l'incrément de conductance  $(\Delta I/\Delta V)$  est supérieur à l'opposé de la conductance  $(-G)$ , on diminue le rapport cyclique.
- Si l'incrément de conductance est inférieur à l'opposé de la conductance, on augmente le rapport cyclique.

Ce processus est répété jusqu'à atteindre le MPP, ou la dérivée de la puissance est égale à zéro (figure (2.1)) comme indiqué dans l'Equation (2.2) [30]:

$$\frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} = 0 \quad (2.2)$$

## Chapitre02: commande MPPT conçu pour les systèmes PV sous ombrage

Cette équation peut être réécrite comme suit :

$$\frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} = \frac{d(I_{pv} \times V_{pv})}{dV_{pv}} = \frac{V_{pv} \times dI_{pv}}{dV_{pv}} + \frac{I_{pv} \times dV_{pv}}{dV_{pv}} \quad (2.3)$$

$$\frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} = V_{pv} \frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} + I_{pv} \quad (2.4)$$

Ce qui implique que :

$$\frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} + \frac{I_{pv}}{V_{pv}} = 0 \quad (2.5)$$

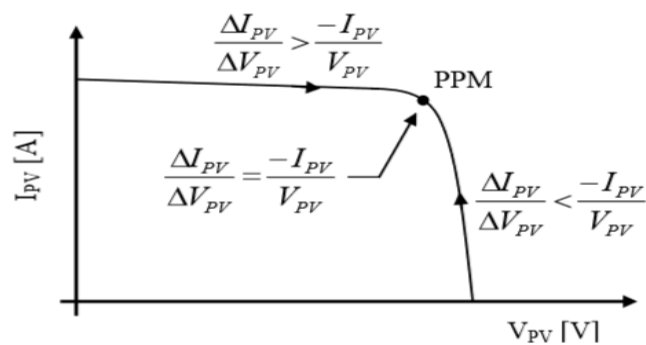


Figure II- 5 : Positionnement du point de fonctionnement suivant la valeur de  $\Delta I_{PV}/\Delta V_{PV}$  sur les caractéristiques de I-V [22]

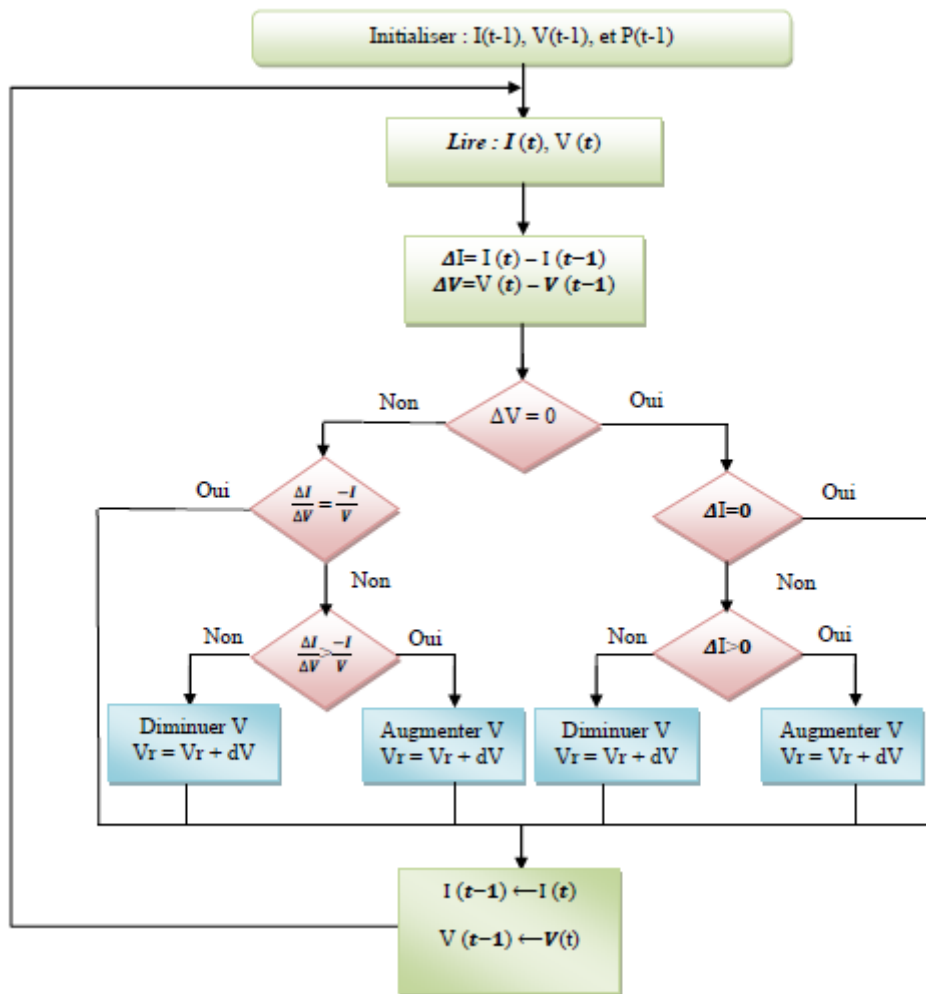


Figure II- 6 : Algorithme d'une commande MPPT basée sur la méthode Incrément de Conductance.

#### II.4.4.Algorithme "Hill Climbing"

La technique de contrôle nommée Hill Climbing est l'un des techniques les plus utilisés pour la commande MPPT grâce à sa simplicité à mettre en œuvre [31] mais elle possède des oscillations autour du PPM en régime établi et une perte occasionnelle de la recherche du PPM lors de changement rapide des conditions climatiques [22]. L'algorithme de cette méthode est illustré sur la figure (II.7) [31]:

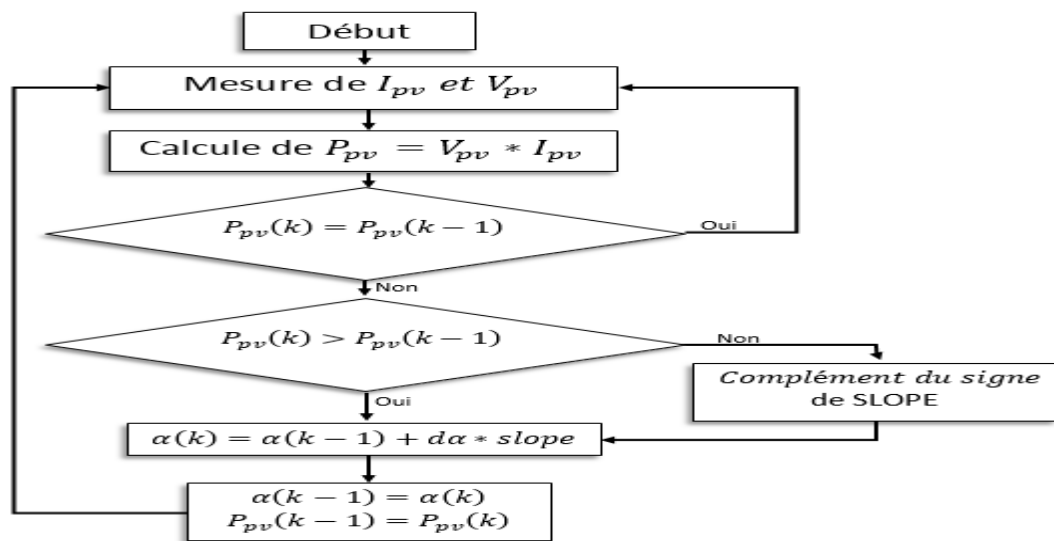


Figure II- 7 Organigramme de l'algorithme Hill Climbing.

Avec :

- Slope : correspond à une variable qui prend la valeur « 1 » ou « -1 » suivant la direction que l'on doit donner à la recherche pour augmenter la puissance en sortie du panneau.

Périodiquement, la puissance de panneau est comparé à la valeur déterminée précédemment, en fonction du résultat de comparaison, le signe de la valeur Slope change ou reste identique. Une fois le PPM atteint, le système oscille autour de ce dernier indéfiniment [22].

### II.4.5.Algorithme de Fraction de la Tension Vco (FCO)

Cette technique de recherche du PPM est consistée à comparer la tension du panneau  $V_{PV}$  avec une tension de référence qui correspond à la tension optimale  $V_{mpp}$ . L'erreur de tension est alors utilisée pour ajuster le rapport cyclique du convertisseur. La tension de référence est obtenue à partir de la connaissance de la relation linéaire existante entre  $V_{mpp}$  et  $V_{co}$  d'un module PV [22] :

$$V_{mpp} = k_v * V_{co} \quad (2.6)$$

Où  $k_v$  est un facteur de tension dépendant des caractéristiques de la cellule PV et qui varie entre 0.73 et 0.8 [32].

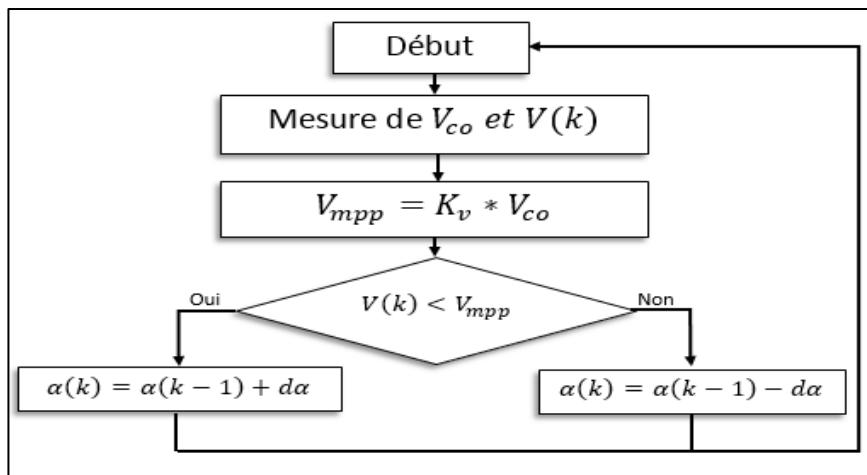


Figure II- 8: Organigramme de l’algorithme FCO.

Pour en déduire la tension optimale, on doit mesurer la tension du circuit ouvert  $V_{co}$ . Par conséquent, le point de fonctionnement du panneau est maintenu proche de point optimal en ajustant la tension de panneau à la tension optimale calculée. Le processus permet d’agir cycliquement sur le rapport cyclique pour atteindre la tension optimale [32].

L’inconvénient majeur de cette technique réside dans la nécessité d’effectuer la mesure de  $V_{co}$  de temps en temps et l’obligation de déconnecter la charge du PV durant cette mesure impliquant une perte de transfert de puissance à chaque mesure [22].

### II.4.5.Algorithme de Fraction du Courant $I_{cc}(FCC)$

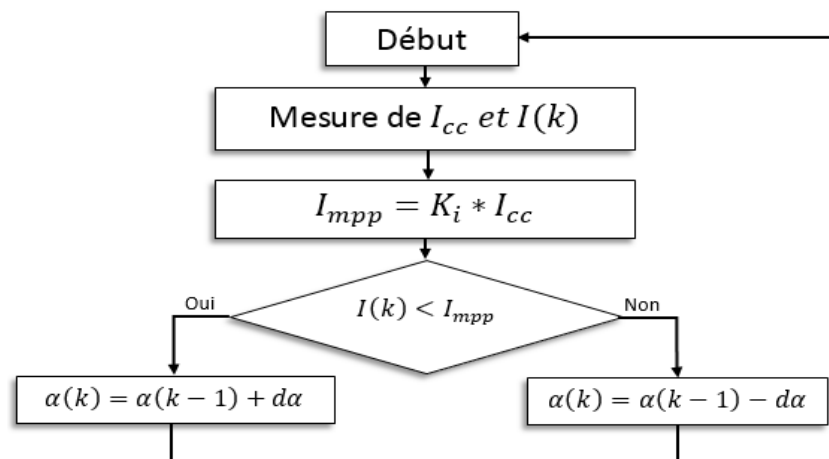


Figure (II-9) : Organigramme de l’algorithme FCC.

## Chapitre02: commande MPPT conçu pour les systèmes PV sous ombrage

---

Cette technique est basée sur la relation linéaire entre le courant de court-circuit et le courant optimal donné par l'équation suivante :

$$I_{mpp} = k_i I_{cc} \quad (2.7)$$

Où  $k_i$  est un facteur de courant dépendant des caractéristiques de la cellule PV et qui varie entre 0.85 et 0.92.

En effet, le PPM est obtenue en amenant le courant du panneau au courant optimal. L'équation (2.5) montre que le courant  $I_{mpp}$  peut être déterminé par une mesure d' $I_{CC}$ . La mesure de  $I_{CC}$  implique une perte de transfert de puissance du à la mise en court-circuit du GPV. Cependant, cette méthode peut s'avérer plus précise que la précédente car la température n'influence pas trop ce coefficient [22] [32].

### II.5.Comparaison entre les différents algorithmes [33]

## Chapitre02: commande MPPT conçu pour les systèmes PV sous ombrage

MPPT Technique	P&O (pas fixe)	P&O (pas variable)	INC (pas fixe)	INC (pas variable)	Hill Climbing	FCO	FCC	ICI	ADC
$\eta_{MPPT}(\%)$	99.3%	99.7%	99.75%	99.75%	99.3%	96%	97.9%	99.8%	variable
Connaissance technologique du GPV nécessaire	Non	Non	Non	Non	Non	Oui	Oui	Non	Non
Vitesse de convergence	Moyenne	Très rapide	Moyenne	Très rapide	Moyenne	Rapide	Rapide	Rapide	Très rapide
Complexité	Basse	Basse	Moyenne	Moyenne	Basse	Basse	Basse	Moyenne	Moyenne
Nombre et type de capteurs	1 Tension 1 Courant	1 Tension 1 Courant	1 Tension 1 Courant	1 Tension 1 Courant	1 Tension 1 Courant	1 Tension	1 Courant	1 Tension	1 Tension 1 Courant

Table II- 1: Caractéristiques majeures des commandes MPPT

# Chapitre02: commande MPPT conçu pour les systèmes PV sous ombrage

## II.6.Algorithme MPPT sous ombrage (Algorithmes évolués)

### II.6.1.MPPT À Base De Logique Floue

La logique floue a fait son apparition en 1965 avec les travaux de L. Zadeh. La commande floue a les mêmes objectifs de régulation et de poursuite qu'une commande réalisée en automatique classique. Cependant, il est possible de se passer d'un modèle explicite du procédé à commander. C'est le plus souvent, le savoir-faire d'un expert ou d'opérateurs qualifiés manipulant le procédé qui est pris en compte pour l'élaboration de la loi de commande. La poursuite du point PPM par la logique floue est divisée en deux phases, la première sera la recherche rapide, avec un pas important, la seconde sera une phase fine avec un pas très petit, ce qui assure une stabilité du système en diminuant les oscillations autour du point PPM. [34] La mise en place d'un contrôleur flou se réalise en trois étapes, qui sont : la fuzzification, l'inférence et la défuzzification.

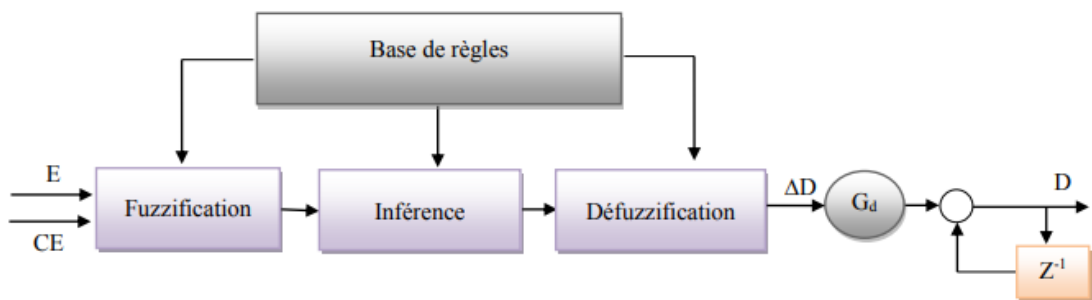


Figure II- 9: Structure de base d'un contrôleur MPPT flou

➤ **Fuzzification:** La fuzzification permet de rendre flou les variables d'entrée. Une étape préliminaire consiste à définir un intervalle de variation maximale autorisée pour les variables d'entrées. Le but de la fuzzification est de transformer les variables d'entrée en variables linguistiques ou variables floues. Dans notre cas, on a deux variables d'entrées qui sont l'erreur  $E(k)$  et la variation d'erreur  $\Delta E(k)$  à l'instant  $k$  qui sont définis comme suit :

$$E(K) = \frac{Ppv(K) - Ppv(K-1)}{Vpv(K) - Vpv(k-1)} = \frac{\Delta P}{\Delta V} \quad (2.8)$$

$$\Delta E(K) = Epv(K) - Epv(K - 1) \quad (2.9)$$



## Chapitre02: commande MPPT conçu pour les systèmes PV sous ombrage

Où  $P_{pv}(k)$  et  $V_{pv}(k)$  sont respectivement : la puissance et la tension du générateur photovoltaïque.

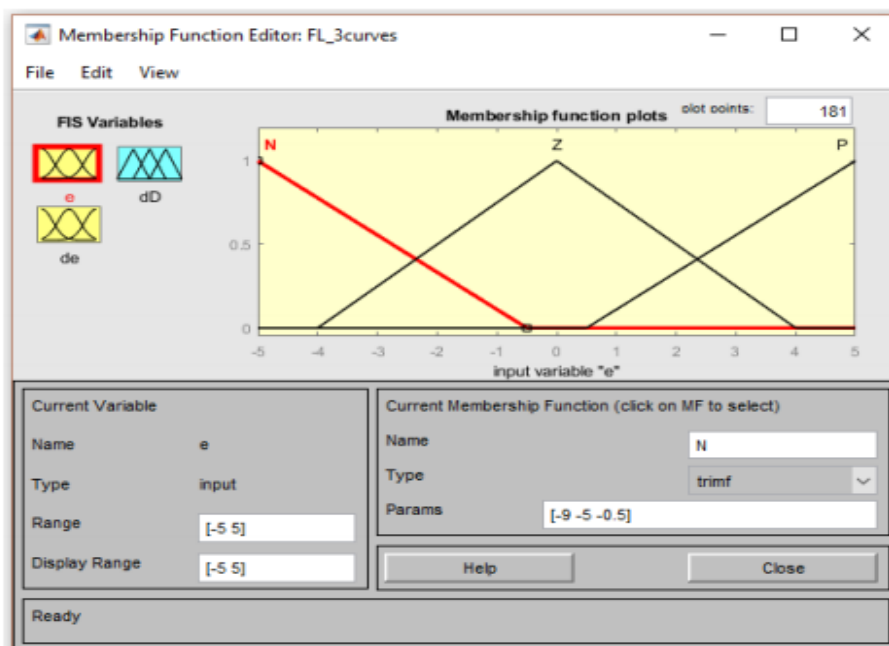
Ainsi ses variables seront qualifiés : Négatif, Zéro, Positif.

$$E(k) \in \{N, Z, P\}$$

$$\Delta E(K) \in \{D, S, C\}$$

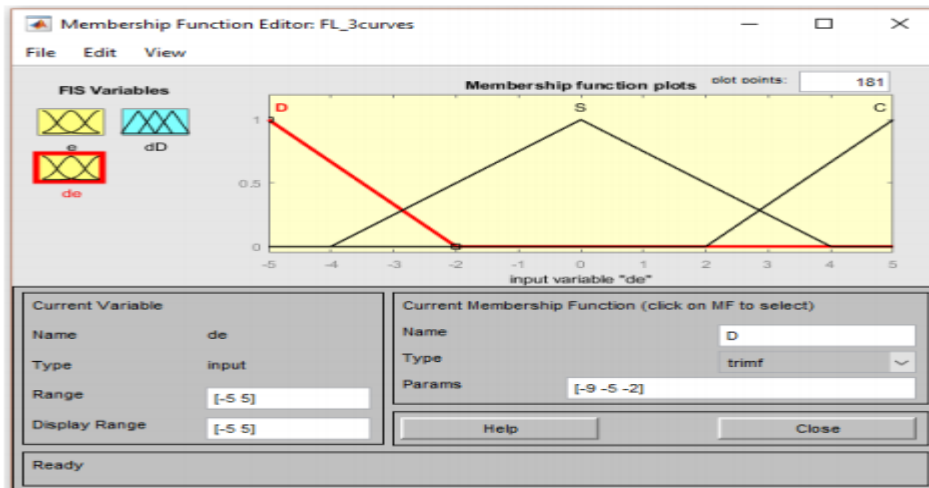
Ainsi la sortie peut être dressée.

Les fonctions d'appartenance sont représentées p la Figure suivante. Afin de simplifier notre exemple, on prend des fonctions d'appartenance triangulaires et trapézoïdales.

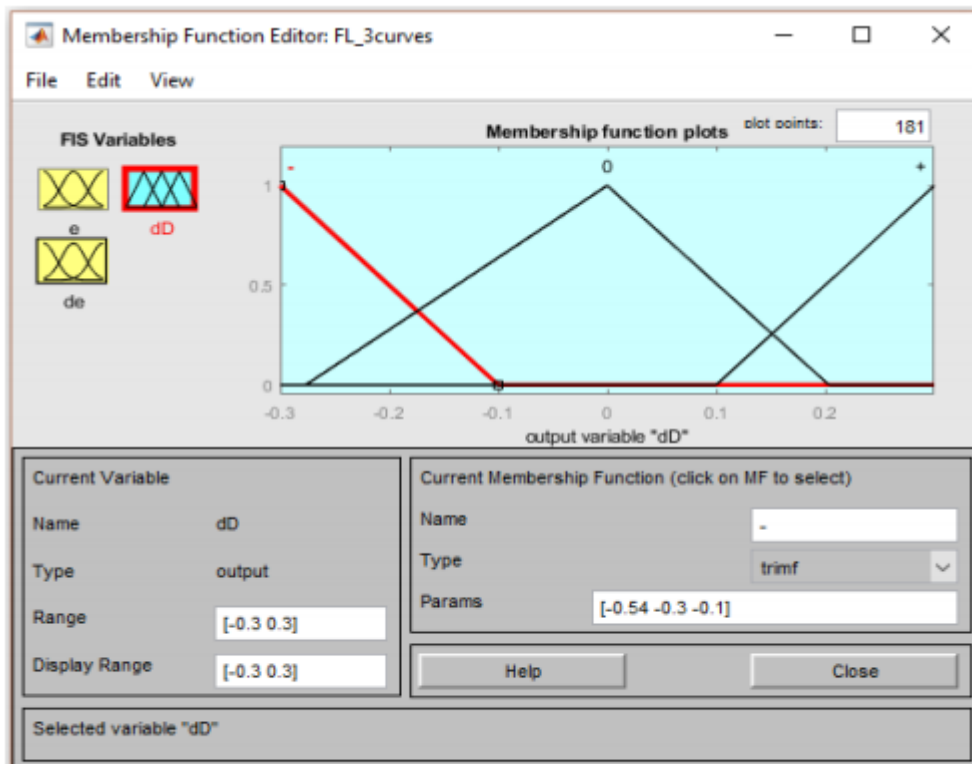


(a)

## Chapitre02: commande MPPT conçu pour les systèmes PV sous ombrage



(b)



(c)

Figure II-10 : Représentation des fonctions d'appartenance ; (a) : l'erreur, (b) : variation de l'erreur, (c) : variation du rapport cyclique

➤ **Raisonnement flou ou bien Inférence:** L'inférence est une étape qui consiste à définir un rapport logique entre les entrées et la sortie. En effet, des règles

## Chapitre02: commande MPPT conçu pour les systèmes PV sous ombrage

---

d'appartenance vont être définies pour la sortie comme ça était fait pour les entrées, grâce à ces règles un tableau d'inférence peut être dressé. En effet, les systèmes utilisant la logique floue utilisent des règles du type : SI ... ALORS ... Lorsque on utilise des règles du type : SI ... ET ... ALORS... (Comme dans notre cas) ces dernières peuvent s'écrire sous forme d'une matrice que l'on nomme "matrice d'inférence", lorsque le nombre d'entrées et de sorties est petit ce tableau permet une lecture plus facile des règles, le tableau suivant représente la matrice d'inférence :

$\Delta V$		$\Delta e$		
		<b>D</b>	<b>S</b>	<b>C</b>
<b>e</b>	<b>N</b>	-	-	<b>0</b>
	<b>Z</b>	-	<b>0</b>	+
	<b>P</b>	<b>0</b>	+	+

Table II- 2 Matrice d'inférence.

Dans notre cas, les règles sont comme les montre la Figure suivante :

## Chapitre02: commande MPPT conçu pour les systèmes PV sous ombrage

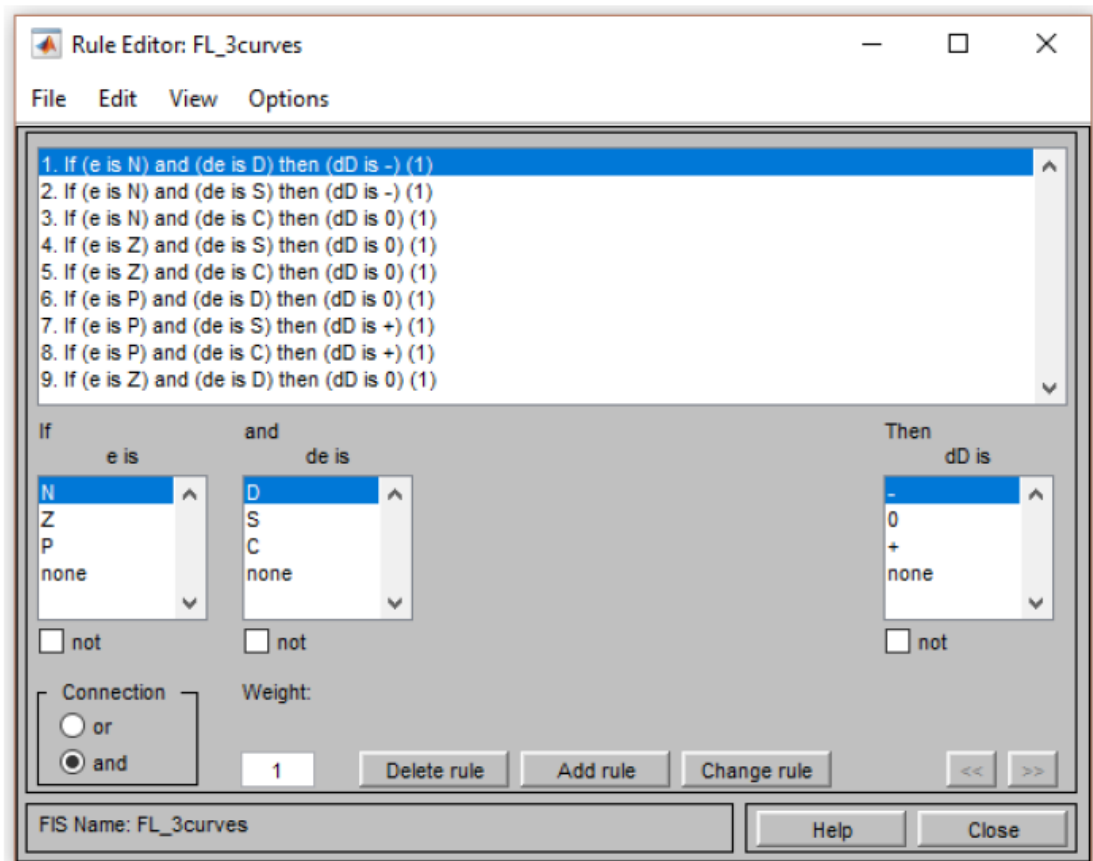


Figure II- 10 Règles d'inférence.

Il est évident qu'une bonne connaissance du système est requise pour le développement d'un tel régulateur. En effet, en règle générale, une valeur d'entrée est définie par deux fonctions floues avec des degrés différents, ainsi la sortie sera elle aussi définie par plusieurs fonctions, la question étant de savoir avec quels degrés d'appartenance. Plusieurs méthodes peuvent répondre à cette question. De notre part, nous avons utilisé la méthode MAX-MIN, la méthode de Mamdani (l'une des plus répandues) qui consiste à utiliser un "min" ("et") pour l'évaluation des prémisses des règles et à utiliser un "max" ("ou") pour l'agrégation des règles.

➤ **Défuzzification:** Enfin, il nous faut réaliser l'opération inverse de la fuzzification, ici nous devons calculer une valeur numérique compréhensible par l'environnement extérieur à partir d'une définition floue est c'est le but de la défuzzification. [35]

## Chapitre02: commande MPPT conçu pour les systèmes PV sous ombrage

---

### II.6.2.MPPT avec l'optimisation par essaims des particules

Principe :

L'Optimisation par Essaim de Particules (**OEP**), connu sous le nom anglophone de Particle Swarm Optimization (**PSO**), est un algorithme inscrit dans la famille des algorithmes évolutionnaires. Il a été proposé par Russel Eberhart (ingénieur en électricité) et James Kennedy (socio psychologue) en 1995.

Cette méthode trouve sa source dans les observations faites lors des simulations informatiques de vols groupés d'oiseaux et de bancs de poissons de Reynold, Heppner & Grenader. Autrement-dit, elle s'inspire fortement de l'observation des relations grégaires d'oiseaux migrateurs, qui pour parcourir de « longues distances » (migration, quête de nourriture, parades aériennes, etc.), doivent optimiser leurs déplacements en termes d'énergie dépensée, de temps, (etc.)

La population dans l'algorithme PSO est nommée essaim, chaque individu du groupe est dit particule. Le déplacement de toute particule (comme indiqué ci-dessus) est régi par des règles et conditions bien spécifiques, influencé par le mouvement des autres particules du voisinage.

Dans un tel contexte ce déplacement à une signification et doit parallèlement répondre à une logique, fondement même du PSO. Il consiste à chercher un optimum dans un voisinage donné, ce déplacement est influé par les trois composantes suivantes :

- Une composante d'inertie : la particule s'efforce de suivre instinctivement son cap de déplacement.
- Une composante cognitive : la particule fait tout pour se diriger vers la meilleure position rencontrée jusqu'à présent.
- Une composante sociale : la particule s'inspire également de l'expérience, du parcours des autres particules, pour se diriger vers la meilleure position rencontrée par ses voisins. [36]

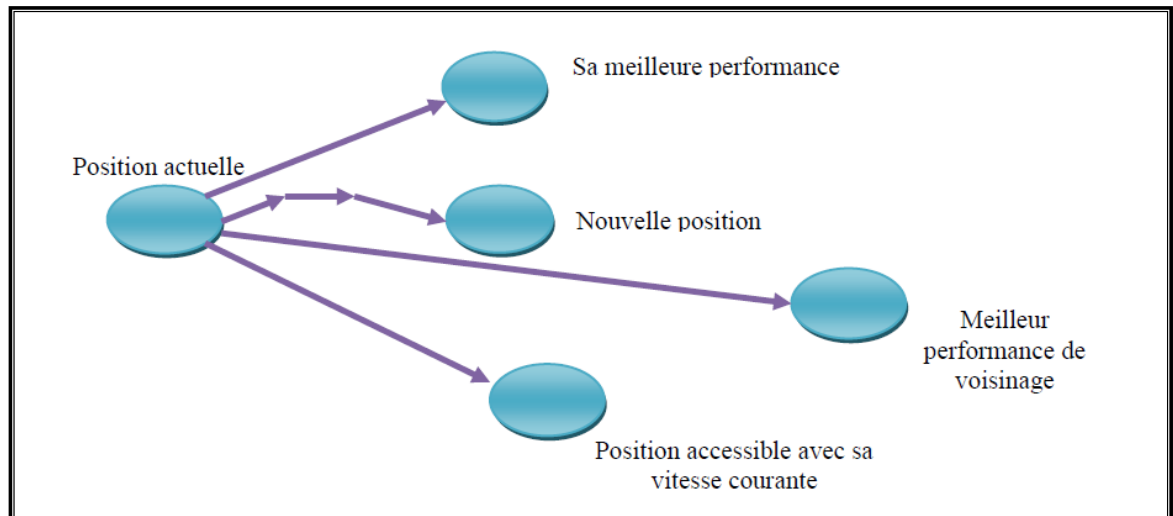


Figure II- 11 : Stratégie de déplacement d'une particule [36]

### ➤ Utilisation de la PSO pour le MPPT:

Dans la recherche du point de puissance maximale on peut prendre le rapport cyclique  $\alpha$  (qui définit le signal de commande du convertisseur DC/DC) à la place de la position de la particule  $x$ , la variation du rapport cyclique  $\Delta\alpha$  comme étant la vitesse du déplacement  $v$ , et la fonction fitness étant la puissance correspondante à chaque rapport cyclique, en résumé :

Les équations d'évaluation sont :

$$D_i(t+1) = D_i(t) + \Delta D_i(t+1), i \in \{1, \dots, np\} \quad (2.10)$$

$$\Delta D_i(t+1) = w \Delta D_i(t) + c_1 r_1 (Dop\_i - D_i(t)) + c_2 r_2 (Dop\_g - D_i(t)) \quad (2.11)$$

Où,

$D_i(t+1)$  : Le rapport cyclique de la particule  $ii$  à l'instant  $(tt+1)$  ;

$D_i(t)$  : Le rapport cyclique de la particule  $i$  à l'instant  $t$  ;

$\Delta D_i(t+1)$  : La variation du rapport cyclique de la particule  $i$  à l'instant  $(t+1)$  ;

$\Delta D_i(t)$  : La variation du rapport cyclique de la particule  $i$  à l'instant  $t$  ;

$Dop\_i$ : Le meilleur rapport cyclique de la particule  $i$  ;

$Dop\_g$  : Le meilleur rapport cyclique global (de toutes les particules de l'essaim).

A chaque itération on détermine la puissance correspondante à la position de chaque particule de l'essaim, on définit alors la fonction Objectif «Fitness » qui donne le poids

## Chapitre02: commande MPPT conçu pour les systèmes PV sous ombrage

chaque rapport cyclique (position d'une particule), la position est meilleure si la puissance correspondante est supérieure, on peut donc écrire :

$$\text{Si } P(D_i(t+1)) > P(D_{Dop\_i}) \Rightarrow Dop\_i = D_i(t+1) \quad (2.12)$$

$$\text{Si } P(D_i(t+1)) > P(Dop\_g) \Rightarrow Dop\_g = D_i(t+1) \quad (2.13)$$

Le logigramme de la Figure II-13 donne les étapes de la poursuite du MPP avec PSO.

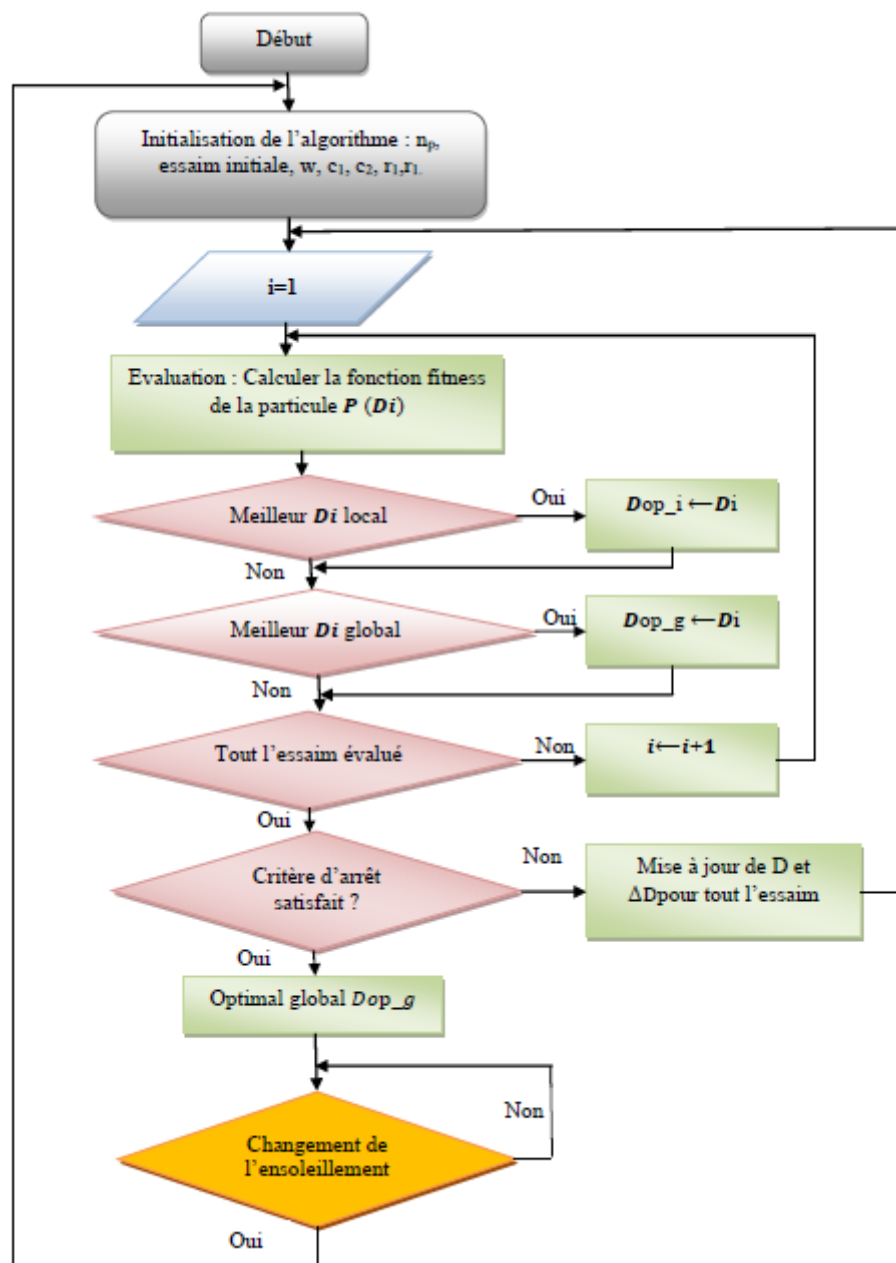


Figure II- 12: Organigramme de la MPPT par PSO

## Chapitre02: commande MPPT conçu pour les systèmes PV sous ombrage

### II.6.3. Les commandes MPPT de réseaux de neurones artificiels (ANN)

L'idée de base d'ANN est de faire un modèle artificiel du cerveau humain Afin de produire un ordinateur qui peut prendre des décisions comme un être humain.

Les réseaux de neurones sont composés généralement de trois couches différenciées : Couche d'entrée (Input layer), Couche cachée (Hidden layer), Couche de sortie (Output layer). Comme le montre la figure (II-14) [22].

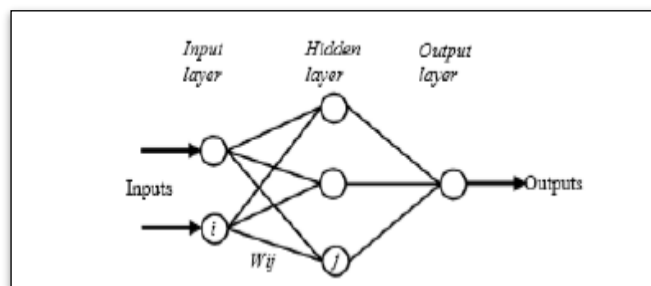


Figure II- 13: Exemple d'un réseau de neurones [22].

Le nombre de nœuds au niveau des différentes couches est variable en fonction du degré d'apprentissage souhaité et de la précision de la commande souhaitée. Pour une commande MPPT, les variables d'entrées peuvent donc être les paramètres caractéristiques d'un GPV (VCO, ICC) associées ou non à des données atmosphériques. La sortie est généralement un ou plusieurs signaux de référence comprenant au moins le rapport cyclique permettant de commander le convertisseur pour fonctionner le plus souvent possible au PPM.

La qualité de la recherche du PPM dépend essentiellement de [22]:

- l'algorithme utilisé dans la couche cachée et de la construction proprement dite du réseau.
- Le choix de la valeur du poids  $W_{ij}$  : Pour identifier avec précision les différents PPM éventuels, les poids  $W_{ij}$  doivent être initialement déterminés avec le plus de soin possible à travers des procédures d'apprentissage laborieuses et spécifiques à chaque GPV, chaque site d'implantation et chaque type de charge. De plus, cet apprentissage doit être révisé régulièrement (typiquement chaque mois) pour mettre à jour les relations entre les entrées et les sorties du réseau. Ce qui rend cette commande fastidieuse en entretien et en maintenance.



## Chapitre02: commande MPPT conçu pour les systèmes PV sous ombrage

---

### Autres méthodes MPPT

Dans la littérature, Il existe d'autres algorithmes MPPT qui font parfois appel à des techniques nouvelles. On peut citer :

- P&O avec pas variable [22] [37],
- P&O améliorer par la logique floue [38],
- INC avec pas variable [22],
- l'algorithme de la capacité parasite (Parasitic Capacitance) [39].
- la méthode de l'oscillation forcée [39]
- ...etc

### II.7.Conclusion

Dans ce chapitre on a fait une étude du principe de la recherche du point de puissance maximum MPP pour différents méthodes a été envisagée.

Ainsi qu'un rappelle sur les différents algorithmes de cette commande qui existe dans le cas normal et sous ombrage et aussi un tableau de comparaison entre eux.

# **Chapitre 03: Simulation de l'effet d'ombre sur des panneaux photovoltaïques**

# Chapitre 03:Simulation de l'effet d'ombre sur des panneaux photovoltaïques

---

## III.1.Introduction

La simulation est un outil puissant pour l'évaluation des performances théoriques d'un système. En effet, ce dernier peut être testé sous des conditions facilement contrôlables et ses performances peuvent être aisément surveillées. La procédure de simulation lie les deux principales parties de la conception d'un système, à savoir, l'étude théorique et la réalisation d'un prototype. Vu que des changements dans la conception peuvent facilement être faits à l'étape de la simulation, il est possible d'expérimenter avec un large ensemble de variations des conditions de fonctionnement afin d'aboutir à une solution optimale [39].

Ce chapitre est consacré à la simulation de l'effet ombrage sur les panneaux PV en utilisant PSIM (PowerSIM) comme logiciel de simulation.

## III.2. Description du logiciel PSIM

Il existe de nombreux logiciels de simulation électrique. Le logiciel mis à votre disposition PSIM est un progiciel de simulation de circuits électroniques, conçu spécifiquement pour une utilisation dans l'électronique de puissance et les simulations d'entraînement de moteur, mais peut être utilisé pour simuler n'importe quel circuit électronique.

PSIM est un ensemble logiciel formé de trois modules liés :

- ✚ Un éditeur de schéma, SIMCAD, servant à décrire l'ensemble du système à simuler.
- ✚ Le simulateur électrique proprement dit, PSIM.
- ✚ Un programme d'affichage graphique des résultats de simulation, SIMVIEW. Le logiciel permet de dessiner le schéma du montage, à partir des éléments de la bibliothèque (éléments de commande et de contrôle, machines, transformateurs, interrupteurs électroniques,...).

### III.2.1.Prise en main sur le logiciel PSIM

La description du système à simuler est réalisée graphiquement sous forme de schéma électrique.

## Chapitre 03:Simulation de l'effet d'ombre sur des panneaux photovoltaïques

---

Une barre d'outils, en bas de l'écran, permet d'accéder rapidement à la plupart des éléments nécessaires.

Voici quelques éléments parmi les plus fréquemment employés :

- Sources de tension, triangulaire, sinusoïdale et continue :
- Éléments passifs, inductance, condensateur et résistance.
- Interrupteur, IGBT, diode, thyristor.
- Éléments propres au circuit de commande, comparateur, additionneur-soustracteur, intégrateur,
- Capteurs pour l'interfaçage du circuit de puissance vers le circuit de commande
- Sondes de tension et de courant pour rendre les résultats de simulation accessibles dans le logiciel d'affichage SIMVIEW.
- Paramètres de simulation, pas de calcul et longueur de la simulation.
- Sources de courant et de tension dépendant, il faut suivre le chemin suivant :  
Éléments > Sources >Voltage >Current-controlled
- Transformateur monophasé, triphasé .... Elements> Power >Transformers.
- Machine électrique cc, ca, synchrone, asynchrone,.... Elements> Power >Motor Drive Module
- Orienter un élément, en cliquant à droite avant de le placer.
- Double clic sur le composant pour faire entrer sa valeur.
- Relier les composants entre elles par la souris en cliquant sur la touche WIRE
- Avant de lancer la simulation, vous devrez ajouter le contrôle de simulation  
Simulate> Simulation Control puis fixer le pas de calcul ainsi que la durée de simulation.
- Lancer la simulation Simulate>Run simulation ou en cliquant sur RUN SIMULTE
- Visualiser les résultats de simulation sous forme signal en cliquant sur la touche RUN SIMVIEW
- Vous pouvez copier le schéma du circuit de simulation ainsi que les courbes obtenues et les coller dans le logiciel WORLD, en utilisant Edit > Copy to CLIPBOARD.

# Chapitre 03: Simulation de l'effet d'ombre sur des panneaux photovoltaïques

## III.3. Description du système à simuler

Nous avons choisie de simuler un panneau photovoltaïque mentionné dans la spécification MSX 60, ce panneau est composé de 36 cellules photovoltaïques en silicium poly-cristallin disposées électriquement en deux chaînes en série de 18 cellules chacune. Cette conception permet également l'implantation de diodes bypass sur des strings de 18 cellules, comme le montre la figure 3.1 .

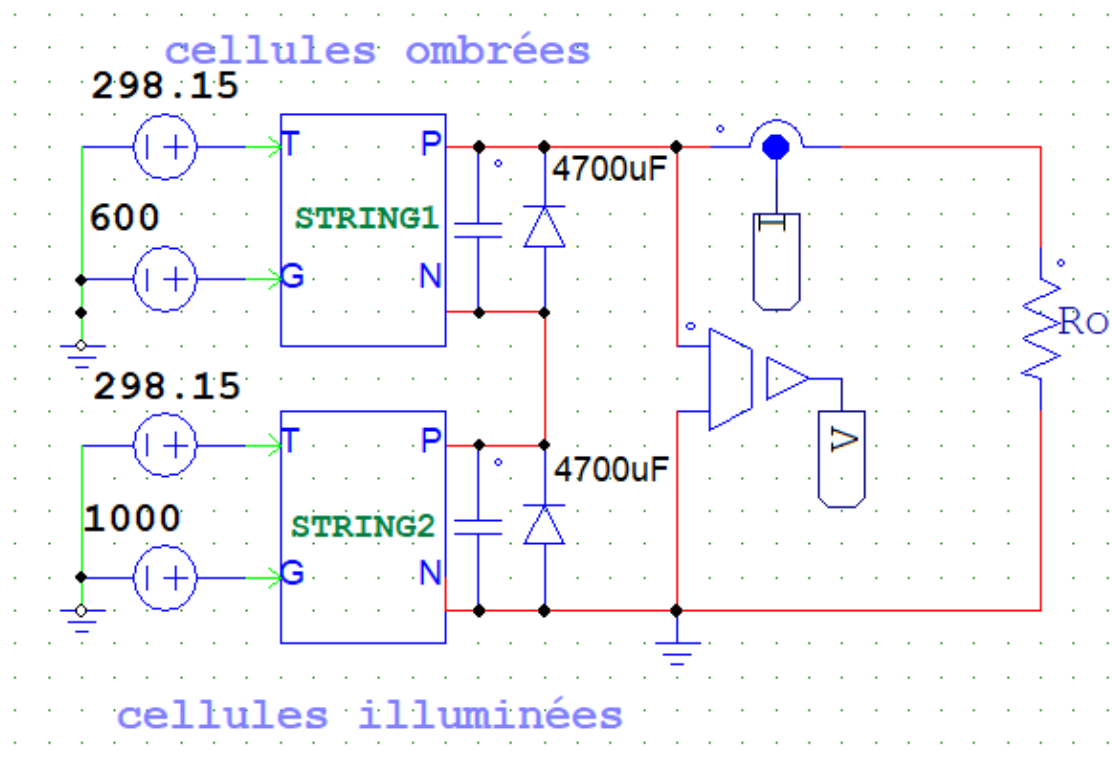


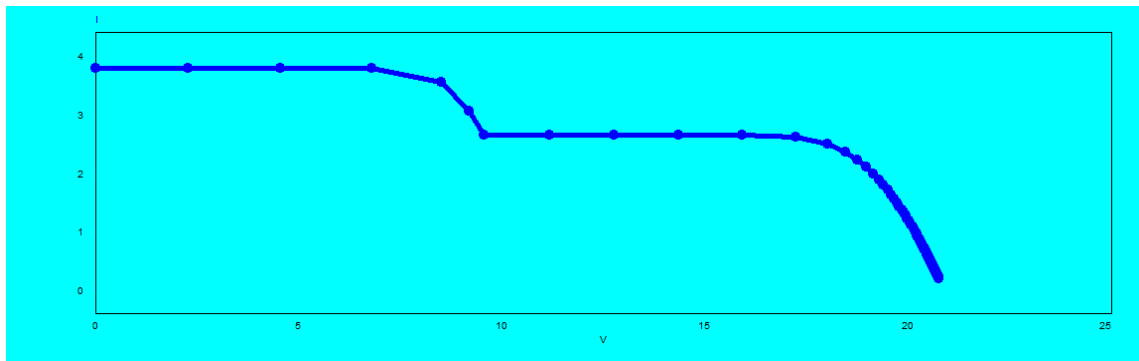
Figure III- 1: Modélisation d'un panneau PV sous ombrage avec une diode bypass.

Ainsi, afin de simuler l'impact de l'ombrage partiel avec des diodes bypass, le string1 est exposé de 600 W/m<sup>2</sup> et le string2 de 1000 W /m<sup>2</sup>.

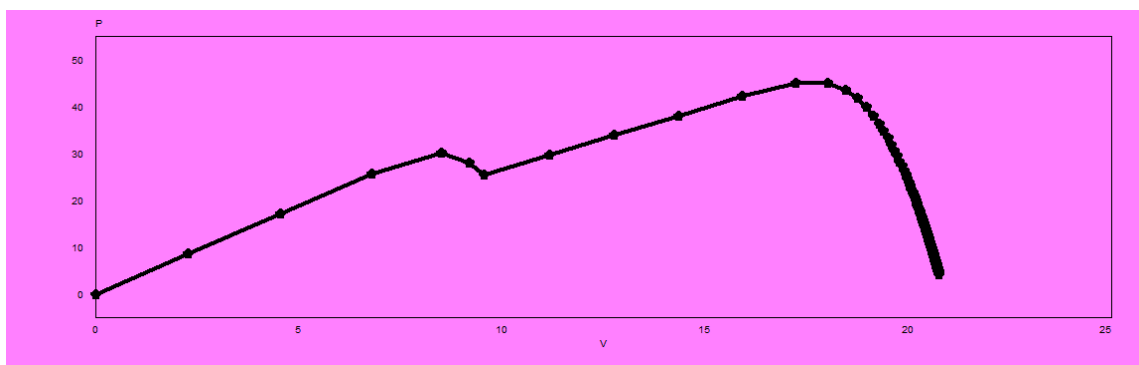
Sous une insolation uniforme, les diodes de dérivation sont polarisées en inverse et n'ont aucun impact. Cependant, sous ombrage, la diode de dérivation est

## Chapitre 03: Simulation de l'effet d'ombre sur des panneaux photovoltaïques

directement polarisée et le courant traverse la diode au lieu des cellules ombrées. Seules les cellules qui ne sont pas influencées par l'ombre génèrent de l'énergie. Les figures 3.2 (a et b) montrent l'impact de la diode bypass sur les caractéristiques du panneau photovoltaïque.



(a)



(b)

Figure III- 2: Courbes I-V (a) et P-V (b) pour un panneau MSX60 sous ombrage avec la diode bypass.

Comme le montrent la figure 3.2 si  $I_{ms}$  est supérieur à  $I_{phs}$ , seules les cellules illuminées sont fonctionnelles. Cependant, une fois que  $I_{ms}$  est inférieur à  $I_{phs}$ , toutes les cellules sont fonctionnelles.

### III.4. Implémentation de la commande MPPT

## Chapitre 03: Simulation de l'effet d'ombre sur des panneaux photovoltaïques

---

Pour faire fonctionner le panneau PV au MPP, le convertisseur DC-DC de type BOOST contrôlé par la commande MPPT est inséré entre le panneau et la charge. Il existe plusieurs algorithmes MPPT pour localiser le MPP [40], le plus utilisé dans la littérature concerne la méthode Perturb and Observe (P&O) [41], [42]. Le motif derrière cela est la capacité de mise en œuvre de P&O sur des appareils numériques, bon marché en plus d'assurer une grande robustesse.

Cependant, cette méthode présente des oscillations autour du MPP [43], car les oscillations en régime permanent sont proportionnelles à la taille du pas (Offset), si le pas de la taille est élevée, alors les oscillations sont élevées, sinon, les oscillations sont faibles mais, la variation du rapport cyclique sera très faible, c'est-à-dire que la réponse temporelle ne sera pas optimale. En conséquence, avec une taille de pas fixe, il existe un problème de compromis entre une réponse plus rapide et une oscillation en régime permanent. Par conséquent, pour améliorer les performances, une taille de pas variable est utilisée dans l'algorithme modifié [43].

Comme illustré sur la figure 3.3, deux ajouts sont utilisés dans l'algorithme P&O modifié :

- Le rapport cyclique ne sera modifié qu'après toutes les 5 périodes
- La taille du pas est déterminée selon l'équation (3.1) :

$$Offset = Offset_0 * (\Delta P / \Delta V) \quad (3.1)$$

Où  $Offset_0$  est la valeur constante égale à 3 dans notre cas, donc selon (3.1), si la variation de puissance est élevée, alors Offset est élevé, sinon, l'Offset est faible. Ces ajouts peuvent minimiser l'oscillation de la puissance de sortie et la réponse temporelle sera optimale, ainsi que l'efficacité sera améliorée.

## Chapitre 03: Simulation de l'effet d'ombre sur des panneaux photovoltaïques

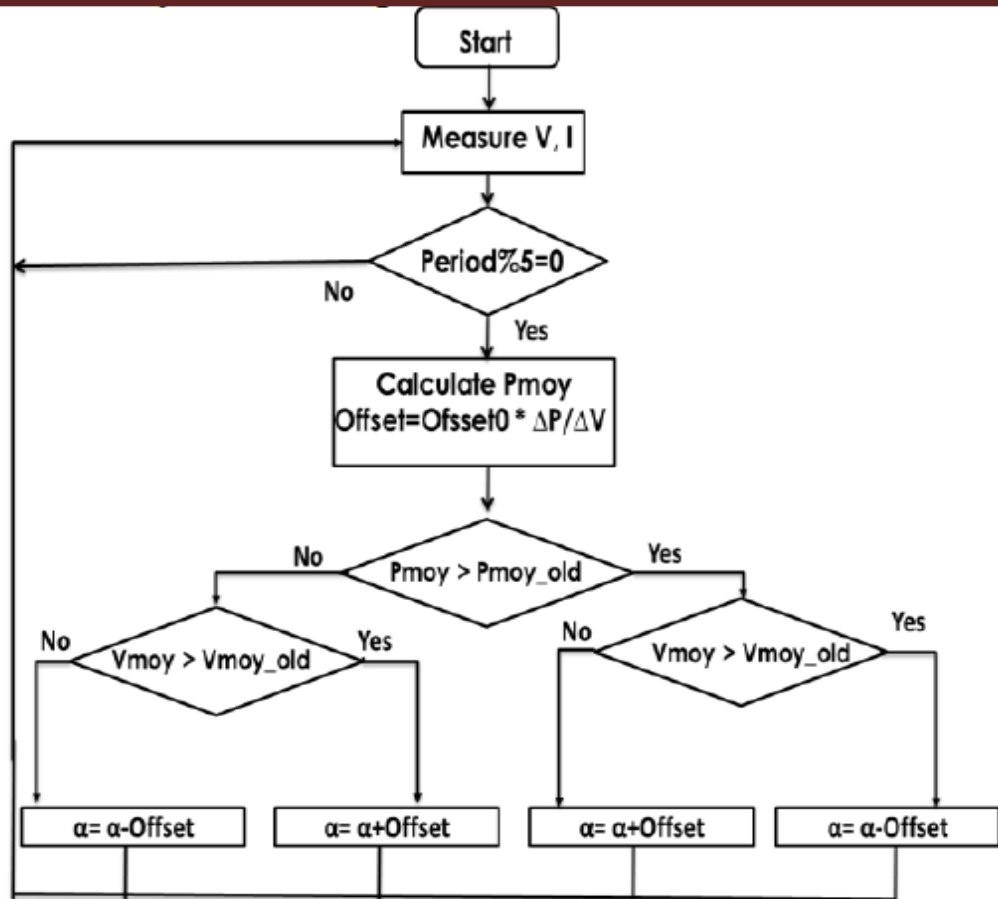


Figure III- 3: Organigramme de l'algorithme P&O modifié

De plus, la figure 3.4 décrit le système PV implémentant l'algorithme P&O modifié en utilisant le langage C intégré afin de contrôler le convertisseur BOOST. Le résultat de la simulation est également présenté dans la figure 3.5

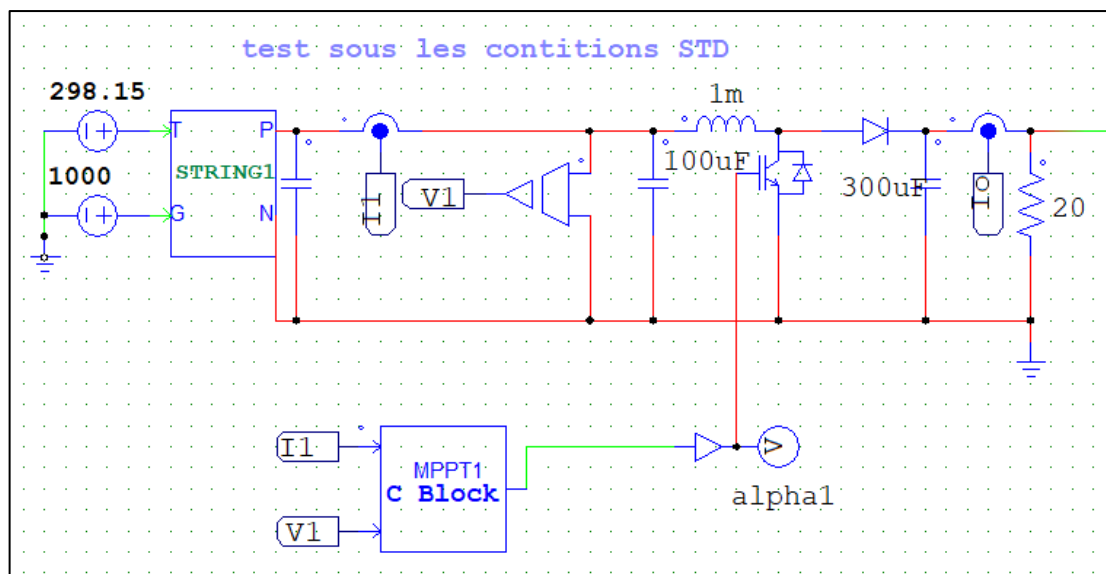


Figure III- 4: Système PV sous éclairage uniforme



## Chapitre 03: Simulation de l'effet d'ombre sur des panneaux photovoltaïques

Comme le montre la figure 3.5, en utilisant l'algorithme modifié, les oscillations de la puissance de sortie sont diminuées. De plus, notre système ne prend que 0,01 s pour se stabiliser autour de la puissance maximale avec un rendement de  $((P_0/P_{max}) * 100 = 98,99\%)$ .

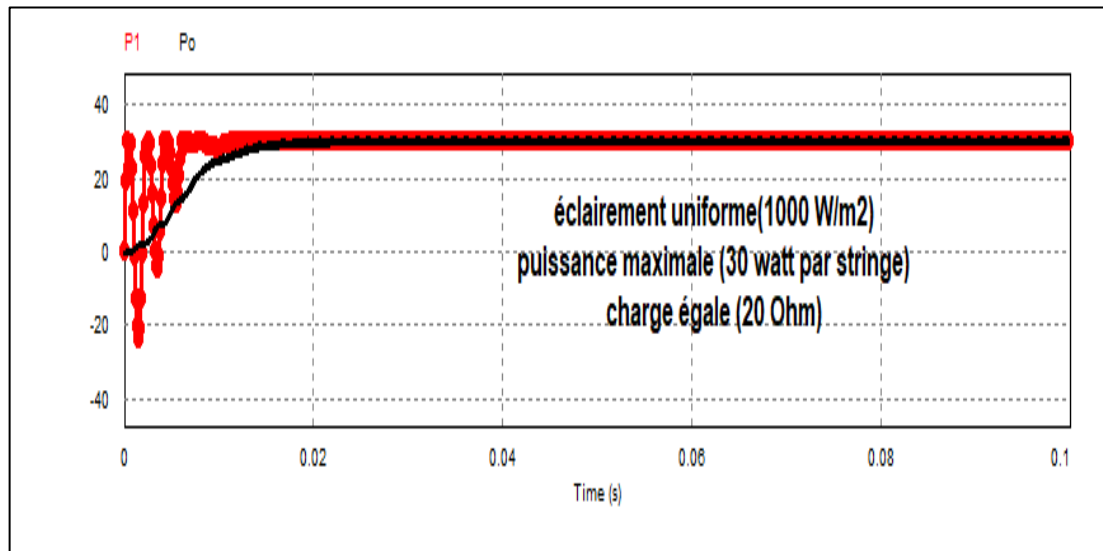


Figure III- 5: Puissance de sortie (P1) et puissance de la charge(P0)

A noter que ces bonnes performances sont obtenues en utilisant un algorithme basé sur une méthode MPPT simple qui est l'algorithme P&O, en le modifiant afin d'éviter ses inconvénients. Cependant, nous démontrons que cette méthode peut ne pas suivre le MPP réel puisque plusieurs maxima (MPP global et MPP local) peuvent exister sur la courbe de puissance PV sous ombrage.

### III.4.1. Comportement du système MPPT conventionnel à l'ombre

Les diodes de dérivation sont utilisées pour réduire la perte d'énergie dans les cellules ombragées. Cependant, comme le montre la figure 3.2, des maxima multiples peuvent se produire sur la caractéristique PV en utilisant cette solution (diodes de dérivation), comme dans notre cas il y a deux points de puissance maximale, le point A (global) et le point B (local), donc les commandes MPPT classique peut échouer à suivre le MPP réel qui dépend de la valeur de la charge [44].

Afin de présenter cette problématique, la simulation a été réalisée pour deux valeurs de charge. A noter que la deuxième chaîne est exposée à une irradiation plus élevée (1000W/m²) que la première (600 W/m²).

## Chapitre 03: Simulation de l'effet d'ombre sur des panneaux photovoltaïques

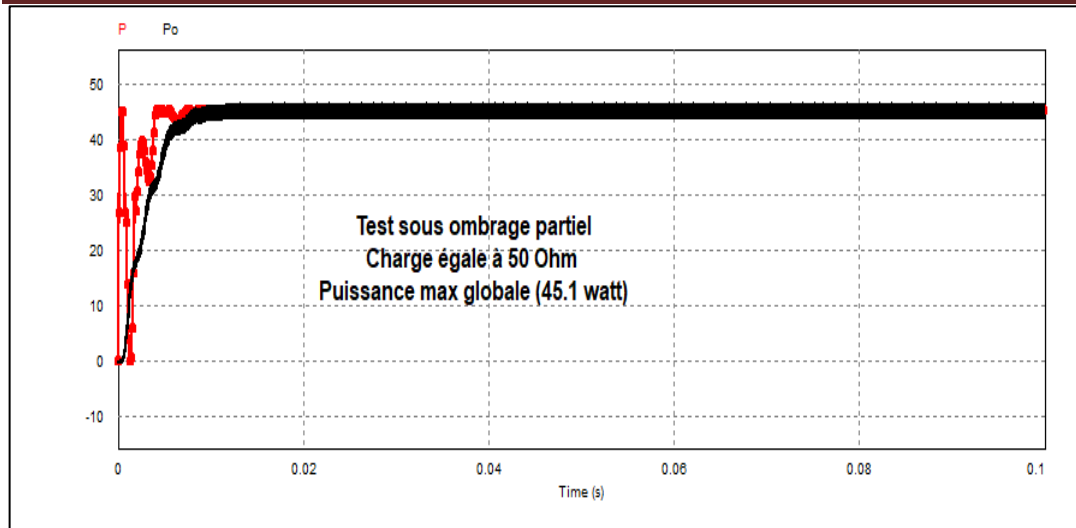


Figure III- 6: Puissance de sortie du système PV en cas de charge égale à  $50\Omega$

Comme le montre la figure 3.6, la première valeur ( $50\Omega$ ) mène le système photovoltaïque au MPP global, cependant, comme le montre la figure 3.7, la deuxième valeur ( $20\Omega$ ) mène le système photovoltaïque au MPP local.

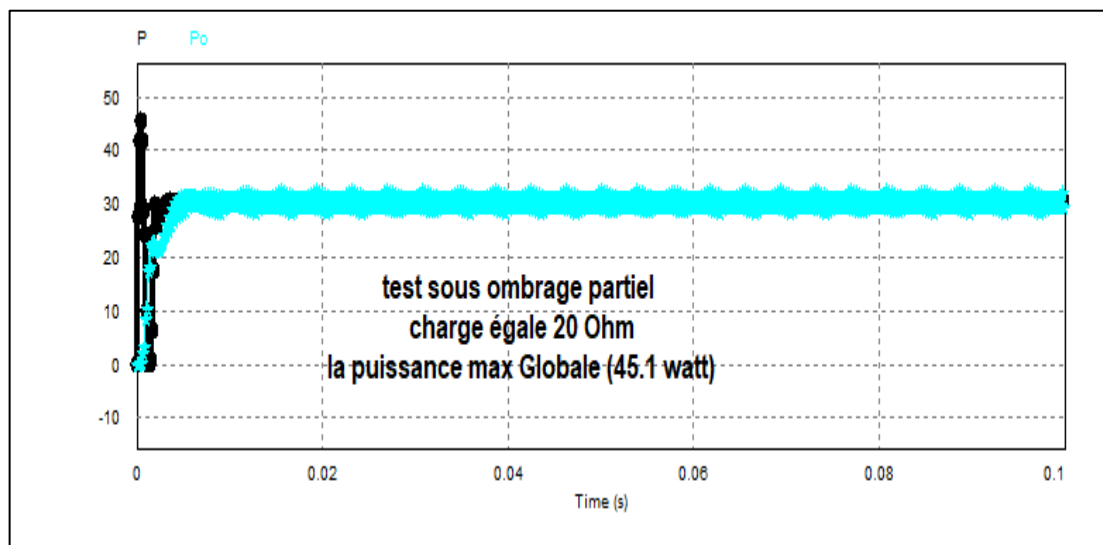


Figure III- 7: Puissance de sortie du système PV en cas de charge égale à  $20\Omega$

Comme le montre la figure 3.7, lorsque la charge utilisée conduit le système PV au MPP local, la commande MPPT se bloque sur ce point.

Pour résoudre cette problématique, la méthode MPPT distribué est donc utilisée [45], [46].

# Chapitre 03: Simulation de l'effet d'ombre sur des panneaux photovoltaïques

## III.4.2. Algorithme P&O modifié pour un système PV sous ombrage

Afin de simuler l'ombrage dans notre système, nous avons choisie d'exposé les deux chaines de panneaux PV (string 1 et 2) à un éclairage différent. Par conséquent, pour obtenir le point de puissance maximum, chaque string de PV peut être associé à un BOOST pour extraire le MPP de chaque string et la puissance de sortie est la somme des puissances générées par les deux strings. Ce type de solution est appelé suivi du point de puissance maximale distribué (SPPMD). La figure 3.8 montre une structure de méthode SPPMD établie sur des convertisseurs DC/DC (BOOST), alors que les sorties des BOOSTS sont en série.

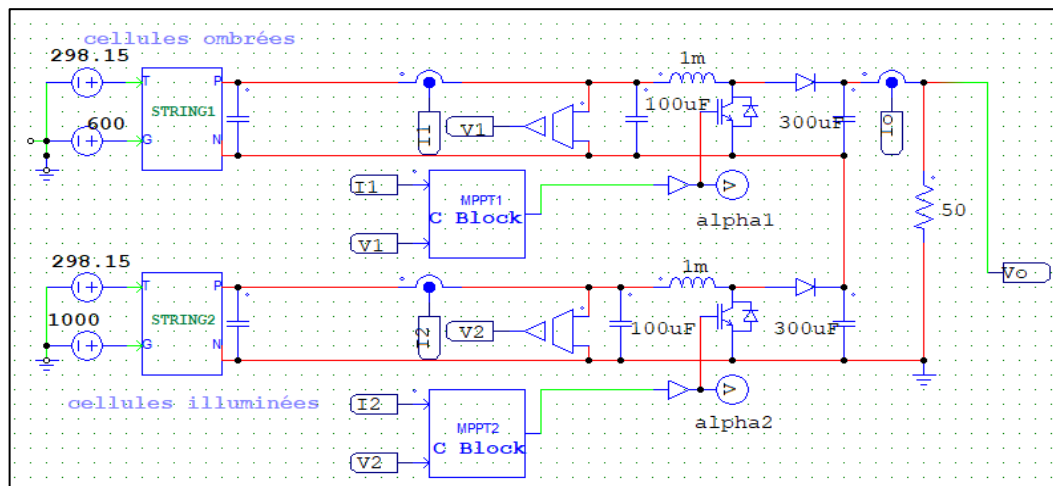


Figure III- 8: système PV sous ombrage partiel

Comme présenté dans la figure 3.9 et la figure 3.10, en utilisant les valeurs de charge  $50\Omega$  et  $15\Omega$ , avec des diodes bypass et des MPPT classiques la puissance dissipée par les deux charges est identique ( $51,07W$ ) au lieu de  $45,1W$  (maximum globale) ou  $30,2W$  (maximum locale).

## Chapitre 03: Simulation de l'effet d'ombre sur des panneaux photovoltaïques

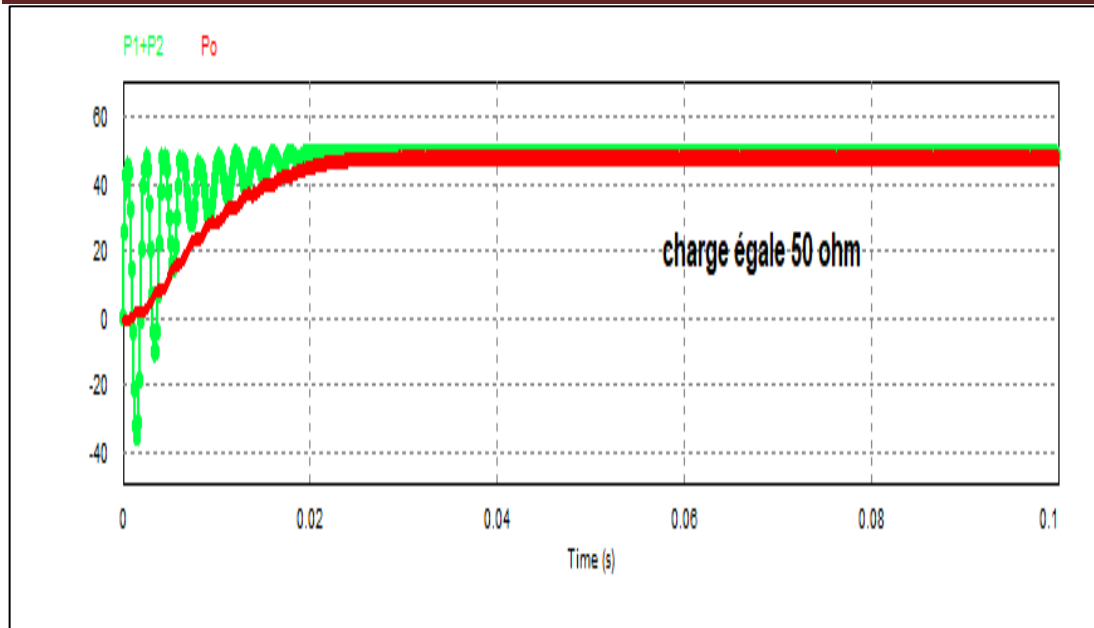


Figure III- 9: Puissance de sortie de PV dans le cas où la charge égale 50Ω

Par conséquent, en adoptant la méthode SPPMD, le problème dû aux multiples maxima locaux est résolu, car, dans le système amélioré, la puissance de sortie est la somme des puissances générées par les deux chaînes. Donc, en conséquence, en utilisant SPPMD, nous avons gagné en termes de puissance 5,97 W en cas de 50Ω en charge et 20,87 W en cas de 20 Ω.

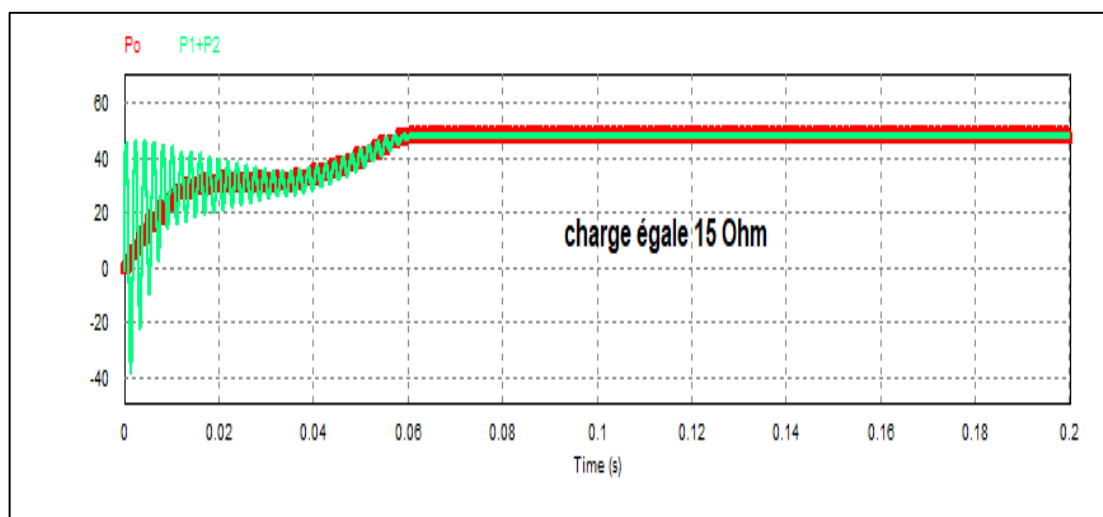


Figure III- 10: Puissance de sortie de PV dans le cas où la charge égale 15 Ω

Précisons qu'avec cette méthode, il n'y a aucun risque d'avoir des courants  $I_{ms}$  élevés par rapport aux  $I_{phs}$  car les deux chaînes ne sont pas connectées directement.

## Chapitre 03: Simulation de l'effet d'ombre sur des panneaux photovoltaïques

---

Le convertisseur DC/DC connecté aux cellules hachurées adapte leur courant  $I_s$  au courant absorbé par la charge.

Notez qu'en utilisant cette méthode, nous extrayons une valeur de puissance supérieure au MPP global. Cependant, cette méthode nécessite plus de ressources par rapport aux méthodes conventionnelles (deux BOOSTS et deux microcontrôleurs sont utilisés), mais la puissance gagnée en utilisant la méthode SPPMD mérite ces ressources supplémentaires.

Cependant, comme mentionné précédemment, la plus grande solution est d'utiliser une seule commande MPPT robuste à l'ombrage dans chaque BOOST de l'architecture SPPMD, afin d'éviter également le cas où une chaîne est partiellement ombrée.

### III.5. Conclusion

Ce chapitre est consacré à la simulation sous le logiciel PSIM d'un système PV contrôlé par une commande P&O modifiée et conçue pour suivre le PPM dans le cas où le système PV est exposé à l'ombrage partiel.

Un modèle mathématique de panneau photovoltaïque sous ombrage partiel complexe est construit. De plus, les dommages dus à cet effet sont présentés et les diodes de dérivation sont utilisées pour protéger le panneau du problème de point chaud.

D'après les résultats de simulations obtenus dans ce chapitre, on peut conclure que :

- La commande MPPT (quel que soit), permet de mieux exploiter la puissance fournie par le PV que l'utilisation directe GPV-Charge.
- L'algorithme MPPT conventionnel peut ne pas suivre le MPP global en raison des multiples maxima qui peuvent se produire sur la courbe de puissance PV en cas d'ombrage partiel.

## Conclusion générale

L'effet d'ombrage est l'un des facteurs d'influence entraînant une réduction de la puissance de sortie des modules PV et des panneaux. Pour se protéger contre les points chauds émergents dans les modules PV partiellement ombragés, la connexion d'une diode de dérivation à polarité inversée en parallèle à un groupe de cellules solaires en connexion série du module est l'une des stratégies les plus courantes appliquées dans le produit commercial actuel.

Dans ce mémoire, la modélisation des panneaux PV a été réalisée en utilisant le modèle d'une cellule à deux diodes se basant sur le data-sheet de modèle MSX-60 (voir annexe A). Ce modèle est ensuite utilisé pour étudier l'effet de l'ombrage sur les configurations photovoltaïques.

Nous avons choisie dans ce projet de résoudre le problème d'ombrage partiel en implémentant la méthode SPPMD avec l'algorithme P&O modifié. En conséquence, il est prouvé que la puissance générée peut être considérablement augmentée par rapport au MPP global.

Dans un premier temps, nous avons étudié l'influence de l'ombrage sur le générateur photovoltaïque (cellules, modules et panneaux). Puis, nous avons fait la modélisation et la simulation du module photovoltaïque sur le logiciel PSIM.

Ensuite dans le chapitre 02, nous avons détaillé sur les commandes MPPT conventionnels utilisés pour suivre le MPPT en présentant le principe de la recherche du point de puissance maximale tout en donnant les différentes classifications des commandes MPPT. Nous avons détaillé les différentes méthodes MPPT sous ombrage rencontrées le plus souvent dans la littérature.

En utilisant le modèle PV MSX60, un algorithme P&O modifié a été implémenté dans le chapitre 03 pour simuler l'effet de l'ombrage partiel. En conséquence, une bonne efficacité (98,99%) et un bon temps de réponse (0,005s) sont obtenus dans des conditions uniformes en raison de la modification apportée à l'algorithme.

## Conclusion générale

---

### **Perspective**

Nous avons étudié et mis en œuvre la méthode SPPMD dans le cas où l'ombrage est considéré comme uniforme sur les cellules et les chaînes PV (string), mais presque pas toujours le cas, la raison pour laquelle nous nous sommes fixés comme perspective de concevoir et mettre en œuvre une nouvelle méthode de command SPPMD en utilisant un contrôle MPPT robuste à l' ombrage dans chaque convertisseur DC / DC.

## Annexe A : datasheet du panneau PV MSX60



### BP MSX 60

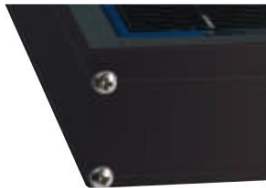
60-Watt Multicrystalline Photovoltaic Module

BP Solar's MSX series is a premium line of PV modules with a 25-year performance warranty, tightly controlled electrical parameters, and labeling showing each module's tested electrical characteristics. The MSX 60 provides 60 watts of nominal maximum power, and is well-suited to traditional applications of photovoltaics such as telecommunications, remote villages and clinics, pumping, and land-based aids to navigation. Its attractive bronze-anodized frame also suits it well for architectural applications.

#### Proven Materials and Construction

BP Solar's quarter-century of field experience shows in every aspect of these module's construction and materials:

- 36 multicrystalline silicon solar cells configured as two 18-cell series strings;
- Cells are laminated between sheets of ethylene vinyl acetate (EVA) and high-transmissivity low-iron 3mm tempered glass;
- Frame strength exceeds requirements of certifying agencies.



Bronze Anodized Universal Frame

#### High-Capacity Versatile Junction Box

The junction box is raintight (IP54 rated) and accepts PG13.5 or 1/2" nominal conduit or cable fittings. Its volume (411cc, 25 cubic inches) and 6-terminal connection block enable most system array connections (putting modules in series or parallel) to be made right in the junction box.

Options include:

- blocking and bypass diodes;
- an oversize terminal block which accepts conductors up to 25mm<sup>2</sup> (AWG #4); standard terminals accept up to 6mm<sup>2</sup> (AWG #10);
- a Solarstate™ charge regulator.

Shipped in 12V configuration, modules may easily be switched to 6V configuration by moving leads in the junction box. Six-volt modules are intended to support 6V loads, and are not recommended as series elements in higher voltage arrays.

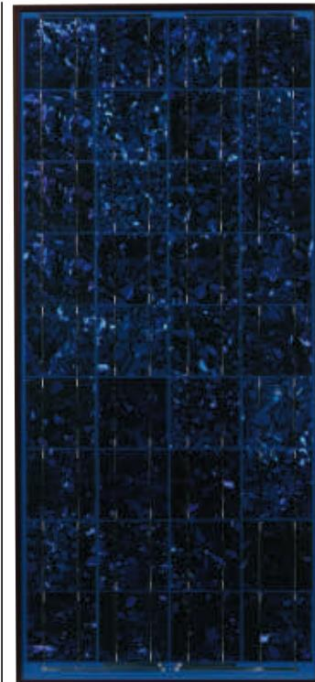
#### Quality and Safety

- Manufactured in ISO 9001-certified factories;
- Certified by PowerMark Corporation;
- Listed by Underwriter's Laboratories for electrical and fire safety (Class C fire rating);
- Certified by TUV Rheinland as Class II equipment;
- Approved by Factory Mutual Research for application in NEC Class 1, Division 2, Groups C & D hazardous locations;
- Compliant with the requirements of IEC 61215 including:
  - repetitive cycling between -40°C and 85°C at 85% relative humidity;
  - simulated impact of 25mm (one-inch) hail at terminal velocity;
  - a "damp heat" test, consisting of 1000 hours of exposure to 85°C and 85% relative humidity;
  - a "hot-spot" test, which determines a module's ability to tolerate localized shadowing (which can cause reverse-biased operation and localized heating);
  - static loading, front and back, of 2400 pascals (50 psf); front loading (e.g. snow) of 5400 pascals (113 psf).

#### Limited Warranties

- Power output for 25 years;
- Freedom from defects in materials and workmanship for 5 years.

See our website or your local representative for full terms of these warranties.



BP MSX 60

#### Individually Tested and Labeled

Each module tested and labeled with its actual output—voltage, current, and power at maximum power point ( $P_{max}$ )—at Standard Test Conditions and Standard Operating Conditions.





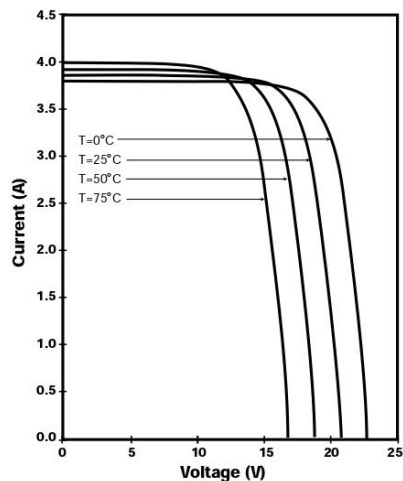
## Electrical Characteristics<sup>1</sup>

	BP MSX 60	BP MSX 64 <sup>4</sup>
Maximum power ( $P_{max}$ ) <sup>2</sup>	60W	64W
Voltage at $P_{max}$ ( $V_{mp}$ )	17.1V	17.5V
Current at $P_{max}$ ( $I_{mp}$ )	3.5A	3.66A
Minimum $P_{max}$	58W	62W
Short-circuit current ( $I_{sc}$ )	3.8A	4.0A
Open-circuit voltage ( $V_{oc}$ )	21.1V	21.3V
Temperature coefficient of $I_{sc}$	(0.065±0.015)%/°C	
Temperature coefficient of $V_{oc}$	-(80±10)mV/°C	
Temperature coefficient of power	-(0.5±0.05)%/°C	
NOCT <sup>3</sup>	47±2°C	
Maximum system voltage	600V (U.S. NEC rating) 1000V (TÜV Rheinland rating)	
Maximum series fuse rating	20A	

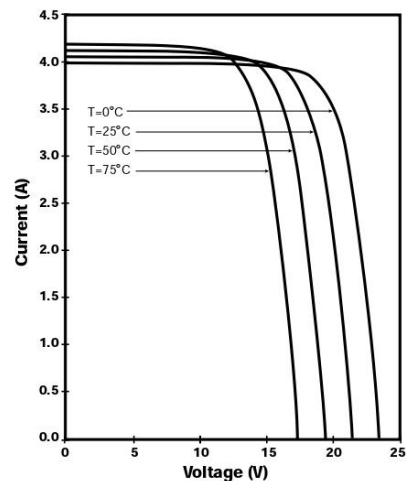
## Notes

- These data represent the performance of typical MSX 60 and MSX 64 modules as measured at their output terminals, and do not include the effect of such additional equipment as diodes or cables. The data are based on measurements made in accordance with ASTM E1036 corrected to SRC (Standard Reporting Conditions, also known as STC or Standard Test Conditions), which are:
  - illumination of 1 kW/m<sup>2</sup> (1 sun) at spectral distribution of AM 1.5 (ASTM E892 global spectral irradiance);
  - cell temperature of 25°C.
- During the stabilization process which occurs during the first few months of deployment, module power may decrease approximately 3% from typical  $P_{max}$ .
- The cells in an illuminated module operate hotter than the ambient temperature. NOCT (Nominal Operating Cell Temperature) is an indicator of this temperature differential, and is the cell temperature under Standard Operating Conditions: ambient temperature of 20°C, solar irradiation of 0.8 kW/m<sup>2</sup>, and wind speed of 1 m/s.
- The power of solar cells varies in the normal course of production; the MSX 64 is assembled in limited quantities using cells of slightly higher power than the MSX 60.

### MSX 60 I-V Curves



### MSX 64 I-V Curves



### Références

- [1] Y. EL BASRI, Architecture de puissance distribuée reconfigurable dédiée à l'optimisation de l'énergie photovoltaïque, Toulouse: Université de Toulouse, 2013.
- [2] [En ligne]. Available: [https://www.cder.dz/vlib/revue/pdf/v013\\_n1\\_texte\\_4.pdf](https://www.cder.dz/vlib/revue/pdf/v013_n1_texte_4.pdf) .
- [3] [En ligne]. Available: [http://www.energies-renouvelables.org/solaire\\_photovoltaique.asp](http://www.energies-renouvelables.org/solaire_photovoltaique.asp).
- [4] E. Schiller , le pompage photovoltaïque: manuel de cours a l' intention des ingénieurs et des techniciens, Ottawa: Université d'Ottawa, 1998.
- [5] . P. Saint, électricité solaire avenir solaire, PARIS: Sma solar technology ag, 2012.
- [6] [En ligne]. Available: [https://www.cythelia.fr/images/file/Syst%C3%A8mes%20PV\\_Polytech\\_Alain%20Ricaud\\_Oct-11.pdf](https://www.cythelia.fr/images/file/Syst%C3%A8mes%20PV_Polytech_Alain%20Ricaud_Oct-11.pdf).
- [7] B. Salaheddine , effets de la température sur les paramètres caractéristiques des cellules solaires, setif: universite ferhat abbas, setif, 2011.
- [8] N. Debili, Etude et optimisation en environnement Matlab/Simulink d'un système de pompage Photovoltaïque, Constantine: université Constantine, 2015.
- [9] O. Gergaud, Modélisation énergétique et optimisation économique d'un système de production éolien et photovoltaïque couple au réseau et associe a un accumulateur, France: PhDThesis, Ecole Normale Supérieure de Cachan, 2002.
- [10] D. Thematique, « effet photovoltaïque et fonctionnement des installations solaires isolées,» energies solidaires courrier es n°03 – janvier 2000, france, 2000.
- [11] [En ligne]. Available: <https://energieplus-lesite.be/theories/photovoltaique6/caracteristiques-electriques-des-cellules-et-des-modules-photovoltaiques/#:~:text=des%20modules%20photovolta%C3%AFques-,Caract%C3%A9ristiques%20%C3%A9lectriques%20des%20cellules%20et%20des%20modules%2>.
- [12] D. Ghilas, Modélisation des systèmes photovoltaïques avec des techniques du soft, Bejaia: Mémoire de Master, université de Bejaia, 2012.

## Références

---

- [13] A. Zerga, B. Boumediene et J.-P. Charles, «Insufficiencies of the Single Exponential Model and Efficiency of the Double Exponential Model in the Optimization of Solar Cells Efficiency,» <https://www.researchgate.net/>, 1998.
- [14] [En ligne]. Available: [https://www.google.com/search?q=sch%C3%A9ma+%C3%A9lectrique+d%27une+cellule+photovoltaïque&sxsrf=ALeKk01Q7uBalsRyPDDJrkKkfMcfC9iE6Q:1622543536539&tbm=isch&source=iu&ictx=1&fir=5fUpSFjybNz5kM%252CQRK5Kuh8t\\_umvM%252C\\_&vet=1&usg=AI4\\_-kT4Z0LTdORiYpsXjwM\\_8iUYP](https://www.google.com/search?q=sch%C3%A9ma+%C3%A9lectrique+d%27une+cellule+photovoltaïque&sxsrf=ALeKk01Q7uBalsRyPDDJrkKkfMcfC9iE6Q:1622543536539&tbm=isch&source=iu&ictx=1&fir=5fUpSFjybNz5kM%252CQRK5Kuh8t_umvM%252C_&vet=1&usg=AI4_-kT4Z0LTdORiYpsXjwM_8iUYP).
- [15] B. Houssam et A. KERKAR , Etude de l'effet de l'ombrage sur un système photovoltaïque, BLIDA: Université Saad Dahleb de Blida, 2015.
- [16] [En ligne]. Available: <https://www.edfenr.com/lexique/ombrages/> .
- [17] R.Ramaprabha et B.L.Mathur, «Impact of Partial Shading on Solar PV Module Containing Series Connected Cells,» vol. II, n° % 107, 2009.
- [18] K. Karatepe, B. M et O. C. M, «Development of a suitable model for characterizing photovoltaic arrays with shaded solar cells,» *sollar energy*, vol. 81, n° % 108, pp. 977-992, 2007.
- [19] S. Silvestre, B. A et C. A, «Study of Bypass diodes configuration on PV modules,» *Applied Energy* , vol. 86, n° % 19, pp. 1632-1640, 2009.
- [20] M. m. Seyedmahmoudian , S. Mekhilef, R. Rahmani, Y. Rubiyah et E. R. Taslimi, «Analytical Modeling of Partially Shaded Photovoltaic Systems,» vol. 6, n° % 11, pp. 128-144, 2013.
- [21] A. e. M. A.GUELLAL, «La Commande MPPT Basée sur les Algorithmes Intelligents Destinée aux Applications Photovoltaïques : Etude comparative et implémentation sur FPGA, Le 4ème Séminaire International sur les Energies Nouvelles et renouvelable,» 2016.
- [22] C.CABAL, «Optimisation énergétique de l'étage d'adaptation électronique dédié à la conversion photovoltaïque.», Thèse Doctorat, UNIVERSITE DE TOULOUSE, 2008..
- [23] [En ligne]. Available: <http://energie28.blogspot.com/2016/11/definition-et-explications-sur-le-mppt.html>.
- [24] F.BENADEL, Etude Et Simulation D'une Commande MPPT Pour Système PV,mémoire de Master Académique, M'SILLA: département de génie électrique: université de Mohamed Boudiaf - M'SILLA, 2016.
- [25] A.Talha, Développement d'une Méthode MPPT pour un Système Photovoltaïque, Premier Séminaire International sur les Energies Nouvelles

## Références

---

- et Renouvelables, Ghardaïa, Algeria: SIENR'2010, Ghardaïa, Algeria, 2010.
- [26] H. Abbes, H. Abid et A. Toumi, «Etude comparative de cinq algorithmes de commande MPPT pour un système photovoltaïque, Tunisie,» 2013.
- [27] S. H. M. Elyaquouti, "Implementation in ARDUINO of MPPT using variable step size P&O algorithm in PV installations", International Journal of power Electronics and drive system, March 2017.
- [28] H.Bahri et A.Harrag, Variable Step Size P&O MPPT Controller to Improve Static and Dynamic PV System Performances,.
- [29] A.Rhif, Etudes et Applications sur les Energies Renouvelables, International Centre for Innovation & Development –ICID– , -PET- Vol. 60 ISSN : 1737-9934..
- [30] M. H. HORSIN et B.MULTON, "Energie électrique: génération photovoltaïque", v éd., paris: Culture Sciences de l'Ingénieur, 2020.
- [31] A. e. A. BENSLIMANE, "Acomparative study between hill climbing algorithm and fuzzy logic controller algorithm of MPPT for GPV system", EasyChair perprint, 2020.
- [32] H. K. A. M. A.Hanen, "Etude comparative de cinq algorithmes de commande MPPT pour un système photovoltaïque", Tunisie: Conférence Internationale des Energies Renouvelables (CIER'13) , 2013.
- [33] [En ligne]. Available: [http://ipco-co.com/CEEE\\_Journal/CIER'13-CEEE/ID\\_003.pdf](http://ipco-co.com/CEEE_Journal/CIER'13-CEEE/ID_003.pdf).
- [34] M. A. K. M. G. Amar, «La Commande MPPT Basée sur les Algorithmes Intelligents Destinée aux Applications Photovoltaïques,», 25 octobre 2016: Etude comparative et implémentation sur FPGA, 2016.
- [35] A. B. H. S. B. B. H. M. A. B. Z. Ayache, Commande MPPT et Contrôle d'un Système Photovoltaïque par la Logique Floue, Commande MPPT et Contrôle d'un Systèmen Photovoltaïque par la Logique Floue.
- [36] B. a. Anes, Gestion de spectre dans un réseau de radio cognitive en utilisant l'algorithmed'optimisation par essaim des particules, 23 JUIN 2015.
- [37] M. Elyaquouti, S. Hakim, S. Farhat, L. Bouhouch et A. Ihlal, «Implementation in ARDUINO of MPPT using variable step size P&O algorithm in PV installations,» March 2017.
- [38] T. e. O. LAMOUDI, Etude et Réalisation d'un Système Photovoltaïque Optimisé par Logique Floue,mémoire de Master Académique, Ouargla: département de génie électrique: université Kasdi Merbah Ouargla, 2018.

## Références

---

- [39] M. Farid, Etude comparative entre quelques méthodes de poursuite du point de puissance maximale dans les systèmes photovoltaïques, Bejaia: Université Abderrahmane MIRA de Bejaia, 2013.
- [40] S. A. S. Deepak Verma, «Recapitulation in solar photovoltaic systems,» vol. 54, pp. 1018-1034, 2016.
- [41] B. M. B. F. Djawad Khelfi, «Three Phase 5-Level PWM Inverter for Grid Connected Photovoltaic System,» vol. 6, n° 11, pp. 1-8, 2013.
- [42] Z. S. Jubaer Ahmed, «An improved perturb and observe (P&O) maximum power point tracking (MPPT) algorithm for higher efficiency,» vol. 150, pp. 97-108, 2015.
- [43] J. C. Y. L. Y. C. B.R. Peng, «Comparison between Three Different Types of Variable Step-Size P&O MPPT Technique,» 2015.
- [44] a. J.-H. K. Rae-Young Kim, «An Improved Global Maximum Power Point Tracking Scheme under Partial Shading Conditions,» vol. 2, n° 101, pp. 65-68, 2013.
- [45] S. T. C. A. D. D.-G. R. C. P.-P. Shubin Qin, «A Distributed Approach to Maximum Power Point Tracking for Photovoltaic Sub-Module Differential Power Processing,» vol. 30, n° 104, pp. 2024-2040, 2014.
- [46] M. E. J. Solórzano, «Hot-spot mitigation in PV arrays with distributed MPPT (DMPPT),» vol. 101, pp. 131-137, 2014.