



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 :

*Etude comparative des performances de  
différentes commandes MPPT*

Présenté par :

- BOULHARES Ikhlas.
- KADIRI Hanane.

Encadrée par :

R. MASMOUDI

Année universitaire 2019-2020





## *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 : **Mr. MASMUDI 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 spécifiquement à **Dr. NSAIBIA Amar** Docteur dans l'Unité de recherche d'énergies renouvelables au milieu saharienne- **ADRAR**,*





## *Dédicace*

*Je dédie ce modeste travail à :*

*Mes très chers parents*

*Qui n'ont jamais cessé d'être à l'écoute et pour tous leurs sacrifices*

*A mes sœurs*

*Vous avez de près ou de loin contribué à ma formation.  
Affectueuse reconnaissance Meilleurs vœux de succès dans  
vos études et dans votre vie.*

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

*Vous m'avez encouragée et aidée quand j'avais besoin de  
vous. Je n'aurais jamais pu le faire sans vous. Mes sincères  
remerciements.*

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

*A tous mes amis et collègues de cette promotion*

*A tous ceux qui ont participé de près ou de loin pour la  
réalisation de ce travail et ceux qui m'espèrent la réussite.*

*Et à tous ceux qui leurs revient du droit*

*Boulhares Ikhlās*





## *Dédicace*

*À Mes très chers parents ma mère et mon père, pour leur sacrifices, et qui n'ont jamais cessé de m'encourager que Dieu me les garde.*

*À Mes très chères sœurs*

*À Ma famille*

*À tous mes enseignants*

*À Tous mes amis (es)*

*Kadiri Hanane*



---

---

## Résumé

Dans ce mémoire, nous nous sommes concentrés sur l'amélioration des performances et de l'efficacité des systèmes photovoltaïques. L'objectif principal est d'étudier et comparer les performances des différentes méthodes MPPT et de trouver les méthodes les plus efficaces (en terme de rapidité de convergence vers le point MPP avec des oscillations réduites) permettant ainsi d'extraire la puissance maximale fournie par le générateur photovoltaïque. Les points essentiels traités dans cette étude sont : la modélisation d'un système photovoltaïque intégrant le MPPT (par l'utilisation de carte ARDUINO), la simulation de deux types de convertisseur DC-DC (BOOST et SEPIC), et l'utilisation des différents algorithmes MPPT adaptés avec ces deux derniers convertisseurs.

Les résultats de simulation sont obtenus sous PROTEUS avec l'utilisation du programme d'ARDUINO.

**Mots clé :** Générateur photovoltaïque GPV, Simulation, MPPT, SEPIC, BOOST, ARDUINO, PROTEUS.

## Abstract

In this thesis, we focused on improving the performance and efficiency of photovoltaic systems. The main objective is to study and compare the performance of different MPPT methods and to find the most efficient methods (in term of speed of convergence towards the point MPP with reduced oscillations) thus making it possible to extract the maximum power supplied by the photovoltaic generator. The essential points dealt with in this study are : modelling of a photovoltaic system integrating the MPPT (by the use of ARDUINO card), Simulation of two types of DC-DC converter (BOOST and SEPIC), the use of different MPPT algorithms adapted with these last two converters.

The simulation results are obtained under PROTEUS with the use of the ARDUINO program.

**Keywords :** Photovoltaic Generator, Simulation, MPPT, SEPIC, BOOST, ARDUINO, PROTEUS.

---

---

---

## ملخص

في هذه المذكرة سنقوم بالتركيز على تحسين أداء ومردودية النظام الكهروضوئي، الهدف الرئيسي سيكون القيام بمقارنة مجموعة من الطرق المختلفة التي تسمح بتعقب نقطة الإستطاعة القصوى MPP للمولد الكهروضوئي، بغرض تحديد الطريقة الأحسن والأكثر فعالية من ناحية سرعة الوصول الى نقطة الاستطاعة الاعظمية مع اقل تذبذب حول هذه النقطة. النقاط الأساسية التي تم تناولها في هذه الدراسة هي: نمذجة النظام الكهروضوئي الذي يعمل باستعمال نظام التحكم MPPT (باستخدام لوحة الأردوينو)، ومحاكاة نوعين من محولات التيار مستمر-مستمر DC-DC (BOOST و SEPIC) واستعمال مختلف طرق التحكم MPPT المكيفة مع هذين المحولين. تم الحصول على نتائج المحاكاة باستعمال برنامجي ARDUINO و PROTEUS.

**الكلمات المفتاحية:** مولد كهروضوئي، محاكاة، تعقب نقطة الاستطاعة القصوى MPPT،  
PROTEUS، BOOST، SEPIC، لوحة أردوينو،

---

# Table des matières

Remerciement.....	III
Dédicace .....	IV
Résumé .....	VI
Table des figures .....	XI
Nomenclature (unité et symbole).....	XIV
Liste des abréviations .....	XVI
Introduction générale.....	1

## Chapitre 01 : Généralité sur les systèmes photovoltaïques

1.1. Introduction.....	5
1.2. L'énergie photovoltaïque « Historique » .....	5
1.2.1. les avantages d'énergie photovoltaïque.....	7
1.2.2. Les inconvénient d'énergie photovoltaïque.....	7
1.3. Le rayonnement solaire.....	7
1.4. L'effet photovoltaïque .....	9
1.5. Cellule photovoltaïque .....	10
1.5.1. Types de cellules photovoltaïques.....	11
1.5.1.1. Les cellules monocristallines.....	11
1.5.1.2. Les cellules poly-cristallines .....	11
1.5.1.3. Cellule en silicium amorphe.....	11
1.5.2. Modélisation de cellule PV .....	12
1.5.2.1. Modèle idéal .....	12
1.5.2.2. Modèle réel à une diode .....	13
1.6. Générateur photovoltaïque (GPV) .....	14
1.7. Protection classique de GPV .....	16
1.8. Panneau photovoltaïque 80M(36).....	17
1.8.1. Modélisation et Simulation du module 80M(36) sous logiciel PROTEUS .....	18
1.8.2. Influence de température et d'éclairement sur les caractéristiques de cellule PV	19
1.9. Couplage direct source-charge.....	20
1.10. Conclusion .....	22

## Chapitre 02 : Convertisseur DC-DC et commande MPPT

2.1. Introduction.....	24
------------------------	----

2.2.	Convertisseurs DC-DC .....	24
2.2.1.	Convertisseur de type BOOST .....	25
2.2.1.1.	Principe de fonctionnement.....	25
2.2.1.2.	Choix des composants de convertisseurs BOOST .....	27
2.2.2.	Convertisseur de type SEPIC .....	28
2.2.2.1.	Principe de fonctionnement.....	28
2.2.2.2.	Dimensionnement de convertisseur de type SEPIC .....	29
2.3.	Poursuite du point de puissance maximale (MPPT).....	31
2.3.1.	Classification Des Commandes MPPT Selon Le Type De Recherche .....	32
2.3.1.1.	Méthodes indirectes.....	32
2.3.1.2.	Méthodes directes.....	32
2.3.2.	Les différents algorithmes de commandes MPPT .....	32
2.3.2.1.	Algorithme Perturber et Observer (P&O) .....	33
2.3.2.2.	Algorithme Perturber et Observer (P&O) avec pas variable .....	34
2.3.2.3.	Algorithme Incrément de la Conductance (INC) .....	34
2.3.2.4.	Algorithme "Hill Climbing" .....	36
2.3.2.5.	Algorithme de Fraction de la Tension $V_{co}$ (FCO) .....	36
2.3.2.6.	Algorithme de Fraction du Courant $I_{cc}$ (FCC).....	37
2.3.2.7.	Les commandes MPPT basées sur le principe de la logique floue (FLC) .....	38
2.3.2.8.	Les commandes MPPT de réseaux de neurones artificiels (ANN).....	39
2.3.2.9.	Autres méthodes MPPT.....	40
2.4.	Conclusion .....	42

## **Chapitre 03 : Simulation, résultats et discussion.**

3.1.	Introduction.....	44
3.2.	Description du système .....	44
3.3.	Simulation de système .....	45
3.3.1.	Module de générateur photovoltaïque GPV .....	45
3.3.2.	Simulation de Convertisseur DC-DC type BOOST .....	45
3.3.3.	Simulation de Convertisseur DC-DC type SEPIC .....	47
3.4.	ARDUINO MEGA2560 .....	48
3.4.1.	Caractéristiques techniques de la carte Arduino MEGA 2560.....	49
3.4.2.	la programmation d'ARDUINO.....	50
3.5.	les capteurs de courant et de tension.....	50
3.5.1.	Capteur de courant.....	51

3.5.2.	Capteur de tension .....	51
3.6.	Résultats et discussion .....	52
3.6.1.	Etude d'influence de choix de pas sur les algorithmes P&O et INC .....	52
3.6.2.	Etude comparative des performances de différentes commandes MPPT .....	53
3.6.2.1.	Fonctionnement sous des conditions climatiques standards .....	53
3.6.2.2.	Fonctionnement avec des changements brusques du niveau de rayonnement .....	54
3.6.2.3.	Fonctionnement avec des changements progressif du niveau de rayonnement ...	55
3.6.2.4.	Discussion .....	56
3.6.3.	Influence de choix de type convertisseur DC-DC sur les performances de différentes méthodes MPPT.....	58
3.7.	Conclusion .....	60
	<b>Conclusion générale .....</b>	<b>61</b>
	<b>Bibliographie .....</b>	<b>64</b>
	<b>ANNEXE.....</b>	<b>67</b>

# Table des figures

Figure (1. 1) : Évolution de la puissance photovoltaïque installée au niveau mondial suivant les différentes zones géographiques. [9].....	6
Figure (1.2) : courbes d'ensoleillement avec différent condition atmosphérique et métrologique a la wilaya d'Adrar (latitude 30°) [13].....	8
Figure (1. 3) : courbes d'ensoleillement avec différent latitude a la wilaya d'Adrar (l'année 2018) [13].....	9
Figure (1. 4) : Caractéristique électrique d'une cellule photovoltaïque .....	10
Figure (1. 5) : Les principaux types de cellule.....	12
Figure (1. 6) : circuit équivalent du modèle idéal d'une cellule.....	12
Figure (1. 7) : circuit équivalent du modèle réel d'une cellule PV. ....	13
Figure (1. 8) : Générateur photovoltaïque.....	14
Figure (1. 9) : les caractéristiques électriques d'une association de ns cellules PV identiques en série. ....	15
Figure (1. 10) : les caractéristiques électriques d'une association de np cellules PV identiques en parallèle.....	15
Figure (1. 11) : les caractéristiques électriques d'un module PV par rapport de celle de cellules. ..	16
Figure (1. 12) : Association des modules PV avec les diodes de protections. ....	16
Figure (1. 13) : Caractéristique I-V d'un module dont certaines cellules ombragées sont isolées par une diode de by-pass .....	17
Figure (1. 14) : la modélisation de panneau 80M(36) sous logiciel PSIM.....	18
Figure (1. 15) : Schéma équivalent du module 80M(36) dans PROTEUS .....	18
Figure (1. 16) : Les variations de caractéristiques électriques de panneau 80M(36) pour différents niveaux d'éclairiments à T= 25°C, (a) caractéristiques I-V, (b) caractéristiques P-V .....	19
Figure (1. 17) : Les variations de caractéristiques I-V et P-V de cellule pour différents niveaux de température à G= 1000w/m2, (a) caractéristiques I-V, (b) caractéristiques P-V .....	20
Figure (1. 18) : couplage direct entre un GPV et une charge résistive.....	20
Figure (1. 19) : Points de fonctionnement d'un GPV en connexion directe, en fonction de la charge [16].....	21
Figure (1. 20) : Connexion d'un GPV à une charge DC à travers un étage d'adaptation. ....	21
Figure (1. 21) : Schéma synoptique du système PV adapté par le convertisseur DC-DC.....	22
Figure (2. 1) : Symbole d'un convertisseur DC-DC .....	24
Figure (2. 2) : convertisseur DC-DC de type BOOST .....	25
Figure (2. 3) : le schéma équivalent de convertisseur DC-DC de type BOOST l'interrupteur K est fermé. ....	26
Figure (2. 4) : le schéma équivalent de convertisseur DC-DC de type BOOST l'interrupteur K est ouvert.....	26
Figure (2. 5) : Schéma de convertisseur SEPIC .....	28
Figure (2. 6) : le schéma équivalent de convertisseur DC-DC de type SEPIC l'interrupteur K est fermé .....	29
Figure (2. 7) : le schéma équivalent de convertisseur DC-DC de type SEPIC l'interrupteur K est ouvert.....	29
Figure (2. 8) : Recherche du PPM par la méthode P&O [16]. ....	33
Figure (2. 9) : Organigramme de l'algorithme P&O.....	33
Figure (2. 10) : partiel organigramme d'algorithme P&O variable. ....	34
Figure (2. 11) : Positionnement du point de fonctionnement suivant la valeur de $\Delta IPV/\Delta VPV$ sur les caractéristiques de I-V [16]. ....	35
Figure (2. 12) : Organigramme de l'algorithme INC. ....	35

Figure (2. 13) : Organigramme de l'algorithme Hill Climbing.....	36
Figure (2. 14) : Organigramme de l'algorithme FCO.....	37
Figure (2. 15) : Organigramme de l'algorithme FCC.....	37
Figure (2. 16) : Les commandes MPPT basées sur le principe de la logique floue (a)exemple de structure de base de la commande floue.(b) exemple d'une table de vérité pour une commande logique floue [16].....	38
Figure (2. 17) : Exemple d'un réseau de neurones [16].....	39
Figure (2. 18) : Organigramme de l'algorithme ADC.....	41
Figure (2. 19) : Organigramme de l'algorithme ICI.....	41
Figure (3. 1) : Schéma synoptique du système étudié.....	44
Figure (3. 2) : le modèle de simulation sous ISIS PROTEUS.....	45
Figure (3. 3) : Simulation d'un convertisseur DC-DC de type BOOST alimenté par GPV sous PROTEUS.....	46
Figure (3. 4) : courbe résultant de test de convertisseur BOOST.....	46
Figure (3. 5) : Simulation d'un convertisseur DC-DC de type SEPIC alimenté par GPV sous PROTEUS.....	47
Figure (3. 6) : courbe résultant de test de convertisseur SEPIC, (a) $\alpha=0.25$ , (b) $\alpha=0.75$ .....	47
Figure (3. 7) : Présentation de la carte ARDUINO Méga 2560.....	49
Figure (3. 8) : l'interface visuelle du logiciel ARDUINO IDE.....	50
Figure (3. 9) : le capteur de courant ACS712-20A et son schéma de simulation sous PROTEUS..	51
Figure (3. 10) : Schéma de simulation de diviseur de tension sous PROTEUS.....	52
Figure (3. 11) : Puissance à la sortie de GPV pour l'algorithme P&O avec différent pas.....	52
Figure (3. 12) : Puissance à la sortie de GPV pour l'algorithme INC avec différent pas.....	52
Figure (3. 13) : Puissance à la sortie de GPV avec différentes commandes MPPT sous STC.....	53
Figure (3. 14) : Puissance à la sortie de GPV avec différentes commandes MPPT sous des changements brusques du niveau de rayonnement.....	54
Figure (3. 15) : Puissance à la sortie de GPV avec différentes commandes MPPT sous des changements progressifs du niveau de rayonnement.....	55
Figure (3. 16) : Puissance à la sortie de GPV pour l'algorithme P&O avec différent pas avec convertisseur type SEPIC.....	58
Figure (3. 17) : Puissance à la sortie de GPV pour l'algorithme INC avec différent pas avec convertisseur type SEPIC.....	58
Figure (3. 18) : Puissance à la sortie de GPV pour les algorithmes P&O, ICI et P&O pas variable avec convertisseur type SEPIC sous un éclairnement variable.....	58
Figure (3. 19) : Puissance à la sortie de GPV pour les algorithmes ADC, FCC et FCO avec convertisseur type SEPIC sous un éclairnement variable.....	59
Figure (3. 20) : Puissance à la sortie de GPV pour les algorithmes INC, Hill Climbing et INC pas variable avec convertisseur type SEPIC sous un éclairnement variable.....	59

# Liste de tableaux

Tableau (1. 1) : les paramètres du panneau photovoltaïque 80M(36).....	17
Tableau (2. 1) : la complexité de quelque type de convertisseur [19].....	25
Tableau (2. 2) : Niveaux de puissance et fréquence de commutation des semi-conducteurs [22] .....	27
Tableau (3. 1) : les composants de convertisseur BOOST.....	46
Tableau (3. 2) : les composants de convertisseurs DC-DC type SEPIC .....	47
Tableau (3. 3) : Caractéristiques techniques de la carte Arduino MEGA 2560 [33]. .....	49
Tableau (3. 4) : Caractéristiques majeures des commandes MPPT. ....	57

# Nomenclature (unité et symbole)

<b>A</b>	La facteur d'idéalité de la diode.
<b>C</b>	Condensateur.
<b>DZD</b>	Dinar algérien.
<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 tension PV.
<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 (1.381×10 <sup>-23</sup> J/k)
<b>K<sub>1</sub></b>	Constante (1.2 A/cm <sup>2</sup> K <sup>3</sup> )
<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>ADC</b>	Adaptative Duty Cycle
<b>ANN</b>	Artificial Neural Network
<b>CAO</b>	Conception assistée par ordinateur
<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>	Fuzzy Logic Controller
<b>f.é.m</b>	La force Électromotrice
<b>GPV</b>	Générateur Photovoltaïque.
<b>ICI</b>	Input Characteristic Impedance
<b>IDE</b>	Integrated Development Environment
<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

## Introduction générale

---

Tout au long de l'histoire, l'énergie a toujours été présentée dans la vie de la planète. L'évolution de nos sociétés humaines est très étroitement liée à la découverte d'énergie. Durant toute l'Antiquité, le Moyen-Âge et jusqu'au XVIII<sup>e</sup> siècle, à la veille de la révolution industrielle, la quasi-totalité des besoins d'énergie de l'humanité était assurée par des énergies renouvelables traditionnelle (bois, moulins à vent, bateaux à voile ...etc.)

À la fin du XVIII<sup>e</sup> siècle, le couple charbon- vapeur donne le coup d'envoi à la révolution industrielle. Dès le début du XX<sup>e</sup> siècle, l'utilisation du gaz, du pétrole et de l'électricité change radicalement le mode de vie. Ce qui a affaibli l'utilisation des énergies renouvelables.

Aujourd'hui, une grande partie de la demande mondiale en énergie est assurée à partir de ressources fossiles. Cependant, ces réserves de combustibles fossiles sont limitées et ses prix ne cesse pas à augmente et en plus ce sont le cause principale de problème d'échauffement climatique qui menacent la planète. Le débat sur le futur de notre approvisionnement énergétique a repris toute sa vigueur ces dernières années. A ces conditions, un intérêt s'est manifesté pour les énergies renouvelables. Ce dernier est reprend progressivement sa place comme la principale source d'énergie car tous ces formes d'énergie sont inépuisables, propres et plus respectueuses à l'environnement.

À l'ère du développement durable, l'énergie photovoltaïque connaît une progression rapide en raison de son potentiel significatif comme source d'énergie renouvelable. Cette énergie est de plus en plus appliquée dans différents domaines allant des installations résidentielles et commerciales jusqu'aux systèmes spatiaux, en raison de nombreux avantages tels que l'absence de pollution, elle est sans bruit, facile à installer, et nécessite une courte période de construction [1]. Cependant, son inconvénient majeur est le faible rendement de la conversion photovoltaïque. Pour cela l'optimisation d'énergie générée par un module photovoltaïque reste encore un sujet d'étude attrayant pour les chercheurs.

La MPPT (Maximum Power Point Tracking), qui se traduit par poursuite du point de puissance maximale, reste une bonne approche dans la résolution des problèmes de la conversion de l'énergie solaire, elle consiste à faire fonctionner les systèmes photovoltaïques dans leur zone de puissance maximale [2].

Notre mémoire est consacré à l'étude et la comparaison de différentes techniques de commandes MPPT à partir du générateur photovoltaïque (GPV), pour une bonne exploitation, quel que soient les conditions météorologiques (température et éclairement). L'étude sera faite sur un système constitué d'un panneau photovoltaïque, d'une charge résistive et un convertisseur DC-DC. Nous allons considérer quelques techniques de poursuite du point de puissance maximale à savoir : les techniques perturb and observe (P&O), incrémentation de la conductance (INC), Algorithme de Fraction de la courant de court-circuit (FCC), Algorithme de Fraction de la Tension de circuit ouvert (FCO), hill climbing, Input Characteristic Impedance (ICI), P&O et INC avec pas variable et un algorithme était proposé par Dr. Bechouat [3] qui nous l'avons appelé Adaptive Duty Cycle (ADC).

### **Organisation du mémoire**

Ce travail est scindé en trois chapitres :

Dans le premier chapitre, nous donnons des généralités sur les systèmes photovoltaïques. En présentant dans un premier temps l'énergie photovoltaïque, l'effet photovoltaïque et le générateur photovoltaïques. La modélisation et la simulation sous PROTEUS d'un panneau photovoltaïque sont présentées dans un second temps.

Dans le deuxième chapitre nous présentons les caractéristiques des convertisseurs DC- DC et spécialement les deux types BOOST et SEPIC utilisé dans notre système PV. Ensuite on a parlé sur les différentes techniques MPPT existant dans la littérature.

Dans le troisième chapitre, nous exposerons la simulation du circuit électrique de notre projet puis nous présenterons les résultats de simulation de quelques algorithmes étudiés dans le chapitre 02.

Nous terminons notre mémoire par une conclusion générale.

## Chapitre 01

---

### Généralité sur les systèmes photovoltaïques

## 1.1. Introduction

Le soleil est une source énergétique quasiment illimitée, il pourrait couvrir plusieurs milliers de fois les besoins énergétiques que l'humanité consomme. C'est pourquoi, l'homme cherche depuis longtemps à mettre à profit le maximum de cette gratuite énergie. [4]

Il existe différents types d'énergies solaires : on trouve l'énergie passive qui utilisé pour le chauffage, l'éclairage naturel et la climatisation des locaux. L'énergie solaire thermique qui transforme les rayons du soleil en énergie thermique (chaleur), l'énergie thermodynamique qui consiste à concentrer le rayonnement solaire à l'aide de collecteurs pour chauffer un fluide à haute température qui va produire de vapeur à haute pression qui est ensuite turbinée et l'énergie photovoltaïque qui désigne l'énergie récupérée et transformée directement en électricité à partir de la lumière du soleil par des panneaux photovoltaïques [5]. Ce dernier type est le type étudié dans ce mémoire.

Dans ce chapitre, nous allons présenter brièvement le rayonnement solaire et l'énergie photovoltaïque. Nous étudions le rayonnement solaire et sa conversion par effet PV, la cellule PV, sa modélisation et ces caractéristiques ainsi que les différents paramètres influents sur ces caractéristiques.

## 1.2. L'énergie photovoltaïque « Historique »

L'énergie solaire photovoltaïque provient de la transformation directe d'une partie du rayonnement solaire en énergie électrique. Cette conversion d'énergie s'effectue par le biais d'une cellule dite photovoltaïque basée sur un phénomène physique appelé effet photovoltaïque [6] [7].

L'effet photovoltaïque a été découvert par le physicien français Edmond Becquerel (1788-1878) en 1839. Mais il faudra attendre près d'un siècle pour que les scientifiques approfondissent et exploitent ce phénomène de la physique. [7] [8]

En 1949, William B.Shockley (1910–1989) a établi la théorie de la jonction PN et a lancé les bases théoriques des cellules solaires utilisées aujourd'hui. [7]

Sur cette base, Daryl Chapin, Calvin Fuller et Gerald Pearson ont développé, dans les laboratoires Bell, la première cellule solaire de silicium d'une superficie de 2 cm<sup>2</sup> et un rendement allant jusqu'à 6 % et l'ont présenté au public le 25 Avril 1954. [7]

L'énergie photovoltaïque s'est développée dans les années 50 pour l'équipement de vaisseaux spatiaux et le premier a été lancé dans l'espace en 1958. C'était le seul procédé non-nucléaire d'alimenter des satellites en énergie [6].

A cause de prix élevés du module solaire, elle était utilisée uniquement pour des applications spatiales et pas pour les applications terrestres, le prix par Watt était environ 1000 fois plus que le prix d'aujourd'hui [6] [7] (en 1955 était 1800 \$/W environ 232500 DZD/W) [9].

Pendant les années 70 et 80, des efforts ont été faits pour réduire les coûts de sorte que l'énergie photovoltaïque soit également utilisable pour des applications terrestres.

Depuis le début des années 80, la quantité de modules photovoltaïques expédiés par an a augmenté et le prix des modules diminuait au fur et à mesure que le nombre de modules fabriqués augmentait.

Dans le monde, le parc solaire photovoltaïque croît en moyenne de 35 % par an depuis 1998 [7]. Le photovoltaïque poursuit sa progression dans le secteur de l'énergie avec une capacité installée au niveau mondial qui a pratiquement doublé entre 2015 et 2017 (405 GW fin 2017 contre 229 GW fin 2015). [9]

La figure (1.1) donne l'évolution de la puissance photovoltaïque installée au niveau mondial suivant les différentes zones géographiques de 2008 à 2018, cela confirme l'augmentation exponentielle de l'énergie produite de nature photovoltaïque.

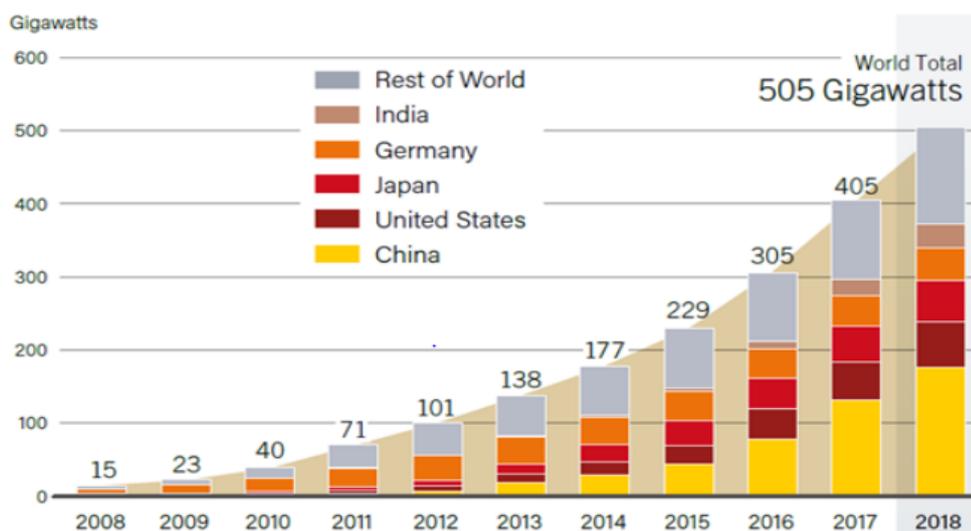


Figure (1. 1) : Évolution de la puissance photovoltaïque installée au niveau mondial suivant les différentes zones géographiques. [9]

### 1.2.1. les avantages d'énergie photovoltaïque

Les principaux avantages de l'énergie photovoltaïque sont [4] [7] [10] :

- pas de pollution et de bruits (silencieux).
- la fiabilité et la flexibilité.
- L'installation ne comporte pas de pièces mobiles qui la rendent particulièrement appropriée aux régions isolées. C'est la raison de son utilisation sur les engins spatiaux.
- Ils n'exigent presque aucun entretien.
- une longue durée de vie.
- Le délai de réalisation d'une centrale photovoltaïque est minimal.
- Ils sont des systèmes décentralisés.

### 1.2.2. Les inconvénient d'énergie photovoltaïque

Les inconvénients de l'énergie photovoltaïque sont [4] [7] [10]:

- le cout d'investissement des panneaux photovoltaïques est élevé.
- Le rendement réel de conversion d'un module est faible et diminue avec le temps.
- Lorsque le stockage de l'énergie électrique par des batteries est nécessaire, le coût du système photovoltaïque augmente.
- Les panneaux contiennent des produits toxiques et la filière de recyclage n'existe pas encore.
- La puissance est réduite lorsque les conditions climatiques sont défavorables (nuages).
- Difficulté à recycler les composants du système
- Même si l'électricité produite par une installation photovoltaïque est sans pollution, la fabrication des panneaux ont un impact sur l'environnement.

## 1.3. Le rayonnement solaire

Afin de quantifier l'énergie développée par le générateur photovoltaïque dans une application donnée, il est nécessaire de connaître le spectre du rayonnement solaire reçu sur sol [4] [2]. En effet, quatre types de rayonnement ont été répertoriés dans la littérature :

- **Le rayonnement direct** est le rayonnement reçu directement du soleil. Il peut être mesuré par un pyrhéliomètre [5].

- **Le rayonnement diffus** est le rayonnement provenant de toute la voûte céleste. Ce rayonnement est dû à l'absorption et à la diffusion d'une partie du rayonnement solaire par l'atmosphère et à sa réflexion par les nuages [2]. Il peut être mesuré par un pyranomètre avec écran masquant le soleil. [5]
- **Le rayonnement solaire réfléchi ou l'albédo du sol** est le rayonnement qui est réfléchi par le sol ou par des objets se trouvant à sa surface. Cet albédo peut être important lorsque le sol est particulièrement réfléchissant (eau, neige). [5]
- **Le rayonnement global** est la somme de tous les rayonnements reçus. Il est mesuré par un pyranomètre ou un solarimètre sans écran. [5]

L'intensité du rayonnement solaire reçu sur un plan quelconque à un moment donné est appelée irradiation ou éclaircissement (noté généralement par la lettre G), il s'exprime en watts par mètre carré (W/m<sup>2</sup>) [4] [2]. Le rayonnement solaire reçu par une surface au sol dépend essentiellement de la période (condition métrologique), du lieu (altitude et latitude) et de l'environnement (condition atmosphérique) [11] [12]. Il est possible de représenter les courbes correspondant aux variations de l'ensoleillement selon ces différents paramètres. On prend comme exemple l'ensoleillement dans la wilaya d'Adrar [13]:

La figure (1.2) représente l'éclaircissement mesuré dans la wilaya d'Adrar à quatre jours avec différents conditions atmosphériques et métrologiques. Et la figure (1.3) représente le moyen d'ensoleillement dans chaque mois d'année 2018 à la même région avec deux différentes latitudes.

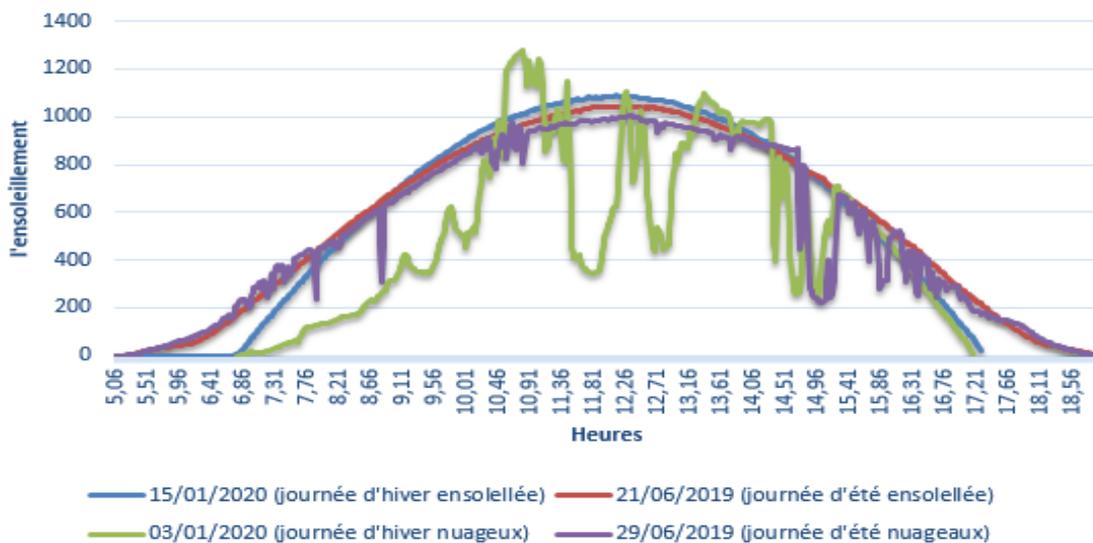


Figure (1.2) : courbes d'ensoleillement avec différentes conditions atmosphériques et météorologiques à la wilaya d'Adrar (latitude 30°) [13]

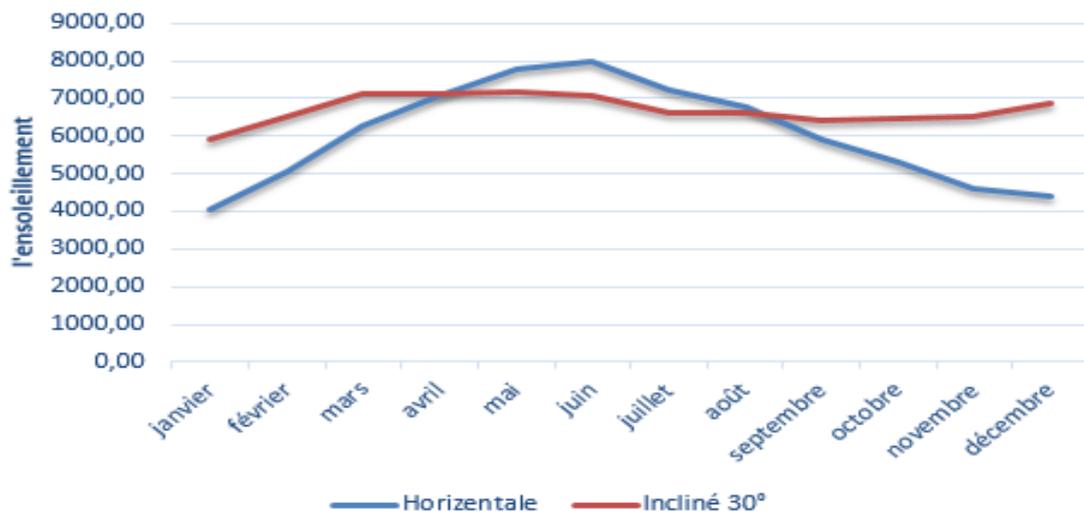


Figure (1. 3) : courbes d'ensoleillement avec diffèrent latitude a la wilaya d'Adrar (l'année 2018) [13]

Selon les deux figures précédemment, L'utilisation du rayonnement solaire comme source d'énergie pose donc un problème bien particulier. En effet, le rayonnement solaire n'est pas toujours disponible, en outre, on ne peut l'emmagasiner ni le transporter. Le concepteur d'un système qui emploie le rayonnement solaire comme source d'énergie doit donc déterminer la quantité d'énergie solaire disponible à l'endroit visé et le moment où cette énergie est disponible [12].

#### 1.4. L'effet photovoltaïque

Le mot « photovoltaïque » vient des grecques « photos » qui signifie lumière et de « volta » du nome physicien italien "Alessandro Volta" qui découvrit la pile électrique et donna son nom à l'unité de mesure de la tension électrique, le volt. [8]

L'effet photovoltaïque constitue la conversion directe de l'énergie du rayonnement solaire en énergie électrique de type continu au moyen de cellules photovoltaïques généralement à base de silicium cristallin. [1]

Cette phénomène est réalisée dans la cellule PV à partir de deux couches de silicium, une dopée P (dopée au bore) et l'autre dopée N (dopée au phosphore), la collection de ces deux types de semi-conducteur créer une jonction PN.

Lorsqu'un photon est absorbé par le matériau, il passe une partie de son énergie par collision à un électron l'arrachant littéralement de la matière. Ce dernier étant précédemment à un niveau d'énergie inférieur où il était dans un état stable passe alors

vers un niveau d'énergie supérieur, créant un déséquilibre électrique au sein de la matière se traduisant par une paire électron-trou, de même énergie électrique. La paire électron-trou revient rapidement à l'équilibre en transformant son énergie électrique en énergie thermique. [1]

## 1.5. Cellule photovoltaïque

La cellule PV ou encore photopile est le plus petit élément d'une installation photovoltaïque. Elle est composée de matériaux semi-conducteurs et transforme directement l'énergie lumineuse en énergie électrique. [14]

Le fonctionnement de la cellule photovoltaïque est basée sur l'effet photovoltaïque et générée une tension peut varier entre 0.3 V et 0.7 V en fonction du matériau utilisé et de sa disposition ainsi que de la température et du vieillissement de la cellule [14] [6].

Sous un éclairage et une température donnée, chaque cellule photovoltaïque est caractérisée par une courbe courant-tension ( $I=f(V)$ ) et une courbe puissance-tension ( $P=f(v)$ ), figure (1.4) représentant l'ensemble des configurations électriques que peut prendre une cellule PV.

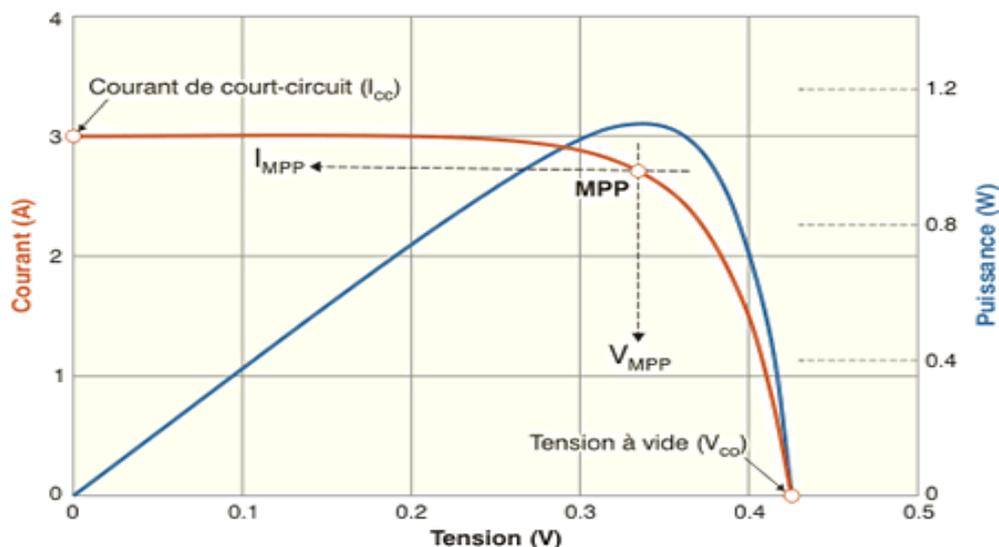


Figure (1.4) : Caractéristique électrique d'une cellule photovoltaïque

Trois paramètres physiques définissent ces courbes [2]:

- La tension à vide ou le point de circuit ouvert ( $V_{co}$ ) : Cette valeur représenterait la tension générée par une cellule éclairée non raccordée (un courant nulle aux bornes de cellule PV).

- le courant court-circuit ( $I_{cc}$ ) : Cette valeur représenterait le courant généré par une cellule éclairée raccordée à elle-même (court-circuité).
- Le point de puissance maximal (MPP en anglais : maximum power point) à lequel la puissance est le maximum que la cellule PV peut fournir ( $P_{mpp}$ ). Cette puissance est obtenu pour une tension et un courant optimaux appelés  $V_{mpp}$ ,  $I_{mpp}$ .

Les caractéristiques d'une cellule PV est directement dépendante de l'éclairement et de la température. Pour permettre une comparaison de l'efficacité de différentes cellules, ces caractéristiques sont définies dans des conditions de test bien précises (STC = Standard Test Conditions). Ces conditions sont : éclairement de  $1\ 000\ \text{W/m}^2$  et température de  $25\ ^\circ\text{C}$ , le changement de l'un de ces deux paramètres va influencer sur les trois paramètres de cellule cités précédemment.

### 1.5.1. Types de cellules photovoltaïques

Il existe différents types de cellules PV en fonction de la nature et des caractéristiques des matériaux utilisés, figure (1.5). Le type le plus commun est la cellule de silicium cristallin (Si). On trouve :

#### 1.5.1.1. Les cellules monocristallines

Les cellules monocristallines, figure (1.5.a), sont les photopiles de la première génération. Elles sont élaborées à partir d'un bloc de silicium cristallisé en une seule pièce, Ces cellules sont en général d'un bleu uniforme, Elles ont un bon rendement entre 12 et 20% pour les cellules industrielles mais la méthode de production est laborieuse et coûteuse.

#### 1.5.1.2. Les cellules poly-cristallines

Les cellules poly-cristallines, figure (1.5.b), sont élaborées à partir d'un bloc de silicium composé de cristaux multiples. Ce genre de cellule est également bleu, Elles ont un rendement plus faible entre 10 et 14% selon les fabricants, mais leur coût de production est moindre.

#### 1.5.1.3. Cellule en silicium amorphe

Le silicium n'est pas cristallisé, figure (1.5.c), il est déposé sur une feuille de verre. La cellule est grise très foncée, Leur rendement (10% environ), C'est la cellule des calculatrices et des montres dites "solaires". [15]



a. Cellule monocristalline    b. Cellule poly-cristalline    c. Cellule amorphe

Figure (1. 5) : Les principaux types de cellule.

### 1.5.2. Modélisation de cellule PV

Il existe plusieurs modèles électriques caractérisant le fonctionnement de la cellule photovoltaïque, et ils ont comme facteur commun la considération de la cellule PV comme générateur du courant idéal. Dans ce travail on va définir deux modèles de cellule PV :

#### 1.5.2.1. Modèle idéal

C'est le modèle le plus simple pour représenter la cellule solaire. Dans ce modèle toutes les pertes sont négligeables, il ne tient compte que du phénomène de diffusion. La cellule solaire dans ce modèle se compose d'une source idéale de courant qui produit un courant  $I_{ph}$  proportionnel à la puissance lumineuse incidente, en parallèle avec une diode qui correspond à l'aire de transition PN de la cellule PV [11]. Le schéma électrique équivalent de la cellule PV pour ce modèle est représenté par la figure (1.6) :

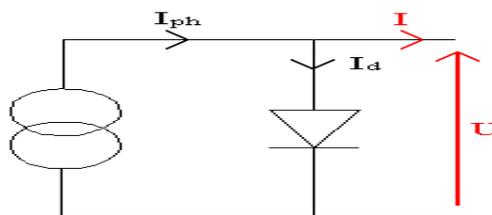


Figure (1. 6) : circuit équivalent du modèle idéal d'une cellule

L'équation caractéristique de ce modèle est déduite d'une manière directe à partir de la loi de Kirchhoff [11] :

$$I = I_{ph} - I_d \quad (1.1)$$

La diode étant un élément non linéaire, sa caractéristique I-V est donnée par la relation :

$$I_d = I_s (e^{V_d/V_{th}} - 1) \quad (1.2)$$

Alors :

$$I = I_{ph} - I_s(e^{V_d/A \cdot V_{th}} - 1) \quad (1.3)$$

Où :

$I_{ph}$  est le photo-courant

$A$  : est le facteur d'idéalité de la diode.

$I_s$  : courant de saturation de la diode donné par :  $I_s = k_1 T^3 e^{-\frac{V_g}{kT}}$

$V_{th}$  : tension thermique à la température  $T$  :  $V_{th} = \frac{kT}{q}$

Avec :

$q$  : charge d'électron ( $1.602 \times 10^{-19}$  C),

$K$  : constante de Boltzmann ( $1.381 \times 10^{-23}$  J/k)

$K_1$  : constante ( $1.2$  A/cm<sup>2</sup> K<sup>3</sup>)

$T$  : température effective de la cellule en Kelvin

$V_g$  : énergie de gap (pour le silicium cristalline est égale à 1.12 eV)

### 1.5.2.2. Modèle réel à une diode

Ce modèle est le plus utilisé dans des nombreuses recherches grâce à son comportement qui est plus proche à une cellule PV par rapport au modèle idéal d'une part, et sa simplicité pour le calcul mathématique par rapport au d'autres modèle comme le modèle à deux diodes d'une autre part.

Dans ce modèle la cellule PV est représentée comme une source de courant produit le photo-courant  $I_{ph}$ , modélise la conversion du flux lumineux en énergie électrique, monté en parallèle avec une diode qui modélise la jonction PN. Pour optimiser la modélisation de quelques phénomènes au niveau de la cellule, ce modèle comme le montre la figure (1.7) contient une résistance série  $R_s$  modélise les pertes ohmiques du matériau et une Résistance shunt  $R_{sh}$  modélise les courants parasites qui traversent la cellule [1].

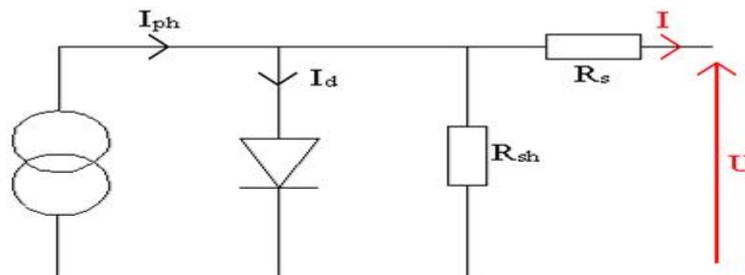


Figure (1. 7) : circuit équivalent du modèle réel d'une cellule PV.

Le courant généré par ce modèle est donné par [11]:

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

$$I_{Rsh} = \frac{V_d}{R_{sh}} \quad (1.5)$$

$$V_d = U + R_s I \quad (1.6)$$

Le courant électrique produit par la cellule est alors donné par l'expression suivante :

$$I = I_{ph} - I_s \left( e^{\frac{(U+R_s I)}{A \cdot V_{th}}} - 1 \right) - \frac{U+R_s I}{R_{sh}} \quad (1.7)$$

Ce modèle est connu aussi sous le nom L5P (Lumped, 1Mechanism model with 5 Paramètres). Il fait donc intervenir les cinq paramètres inconnus suivants : ( $I_{PH}$ ,  $I_S$ ,  $A$ ,  $R_S$  et  $R_{SH}$ ) [11].

## 1.6. Générateur photovoltaïque (GPV)

La cellule photovoltaïque élémentaire constitue un générateur de très faible puissance de quelques dizaines de centimètres carrés délivre, au maximum, quelques watts sous une tension inférieure au un volt. Cette puissance est insuffisante pour les applications électriques courantes. [6]

Pour produire plus de puissance, plusieurs cellules doivent être connectées en série et en parallèles afin de créer ce qu'on appelle un module photovoltaïque. Ces modules sont raccordés entre eux pour former des champs de manière à pouvoir satisfaire différents niveaux de besoins en énergie. [6]

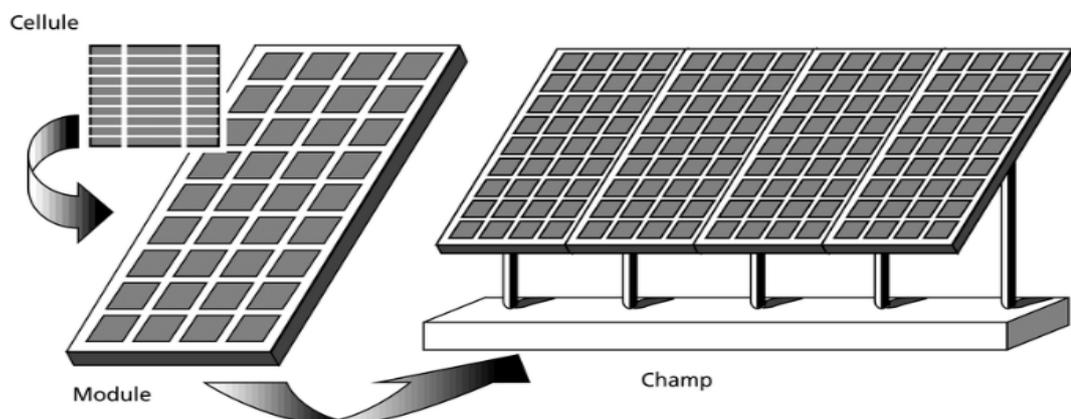


Figure (1. 8) : Générateur photovoltaïque.

La connexion en série des cellules permet d'augmenter facilement la tension de l'ensemble. Une association en série de  $n_s$  cellules identiques permet de générer une tension  $V_s$  plus grand  $n_s$  fois que la tension générée par une cellule, figure (1.9) [14]:

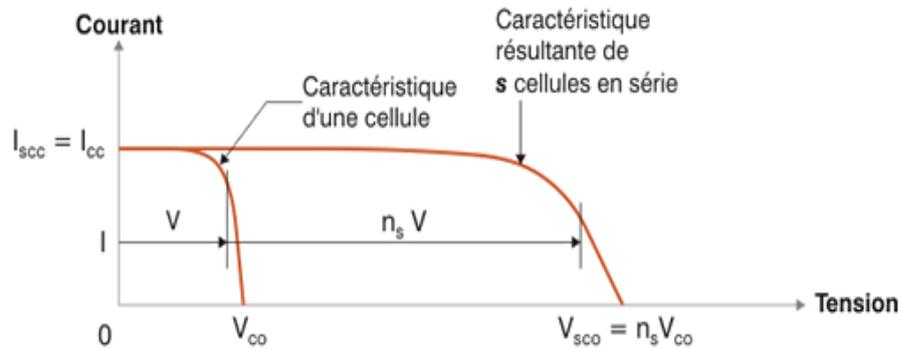


Figure (1. 9) : les caractéristiques électriques d'une association de  $n_s$  cellules PV identiques en série.

Tandis que la mise en parallèle des cellules PV permet d'accroître le courant. Le courant obtenu par une association en parallèle de  $n_p$  cellules identiques est plus grand  $n_p$  fois que le courant généré par une cellule, figure (1.10) [14]

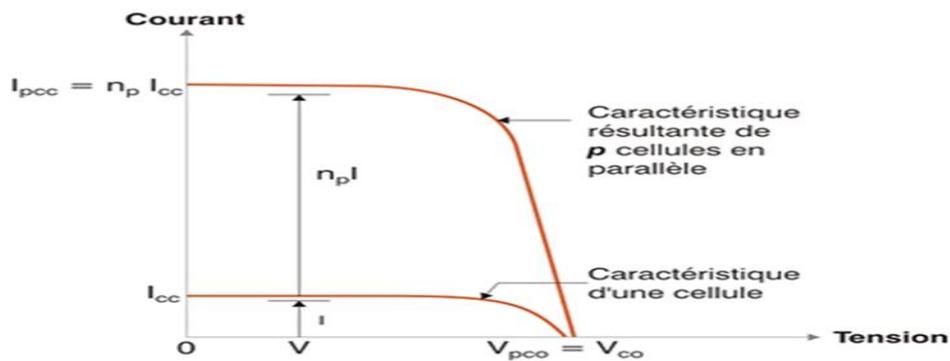


Figure (1. 10) : les caractéristiques électriques d'une association de  $n_p$  cellules PV identiques en parallèle.

Le câblage série/parallèle est donc utilisé pour obtenir globalement un générateur PV aux caractéristiques souhaitées [6]. La puissance disponible en sortie du générateur PV est donnée par l'équation (1.8) [14]:

$$P_{GPV} = n_s * n_p * V_{cel} * I_{cel} \tag{1.8}$$

Avec :

$P_{GPV}$ : la puissance disponible en sortie du GPV.

$V_{cel}$ : la tension à la sortie d'une cellule.

$I_{cel}$  : le courant de sortie d'une cellule.

La figure (1.11) représente la différence entre les caractéristiques I-V d'une cellule photovoltaïque et celui d'un module photovoltaïque composé de  $n_s$  cellules en série et  $n_p$  cellules en parallèles :

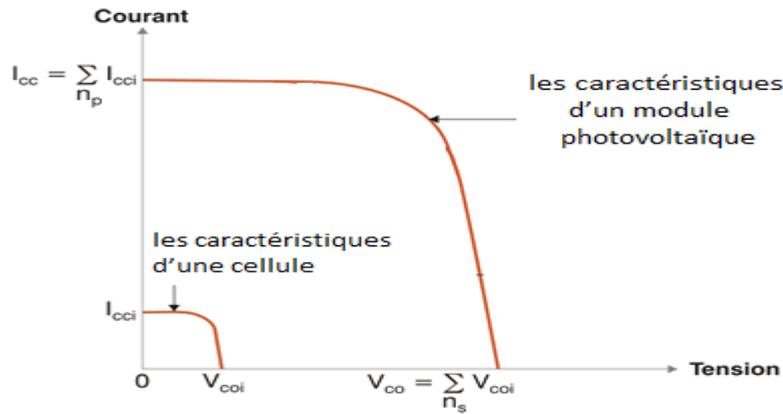


Figure (1. 11) : les caractéristiques électriques d'un module PV par rapport de celle de cellules.

### 1.7. Protection classique de GPV

Un éclairage non homogène sur un groupement des cellules photovoltaïque (ou lorsque un module est partiellement à l'ombre) présente un effet indésirable et peut diminuer la durée de vie de l'installation photovoltaïque, pour résoudre ce problème des protections électriques doivent être ajoutées aux modules commerciaux afin d'éviter des pannes destructrices liées à l'association de cellules en séries et de panneaux en parallèle [14]. Dans les installations photovoltaïques actuelles, on trouve deux types des diodes (diodes anti-retour et diode by-pass) qui sont dans la plupart des cas identiques physiquement mais ils sont installés différemment comme illustré la figure (1.12) :

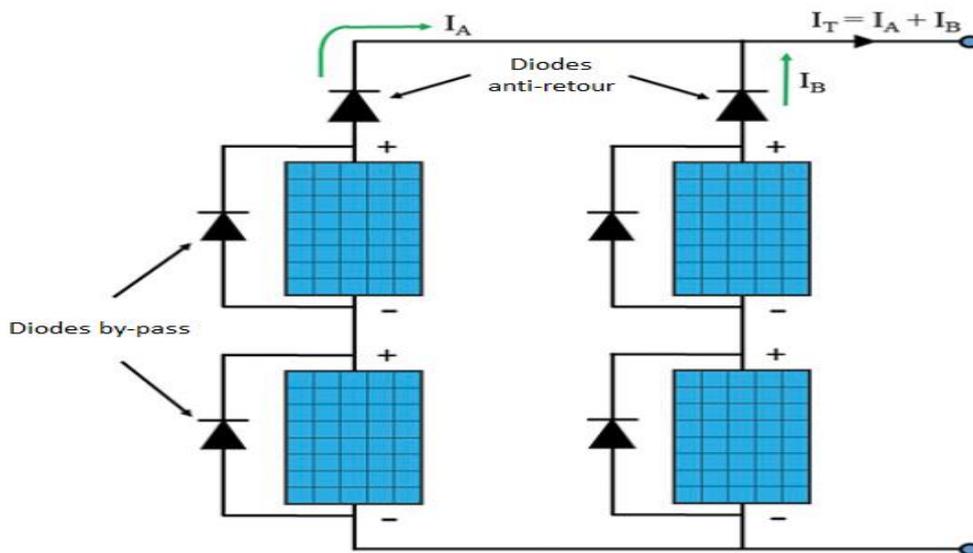


Figure (1. 12) : Association des modules PV avec les diodes de protections.

L'utilisation de ces diodes assure deux types de protections :

- Une protection contre les courants négatifs qui apparaît lorsque plusieurs modules sont connectés en parallèle, ou bien quand une charge en connexion directe peut basculer du mode récepteur au mode générateur, par exemple une batterie durant la nuit. ce type de protection est assuré par les diodes anti-retour. [14]
- Une protection contre les points chauds lors la mise en série de modules. Ce type de protection est assuré par les diodes by-pass qui est installé en dérivation et en polarité inverse. Si une cellule ou un groupe de cellule est ombragé, le courant passera par la diode de by-pass et on évite ainsi un échauffement trop intense de ces cellules .La mise en conduction de ces diodes affecte la caractéristique de sortie du générateur, [15] comme illustré la figure (1.13) :

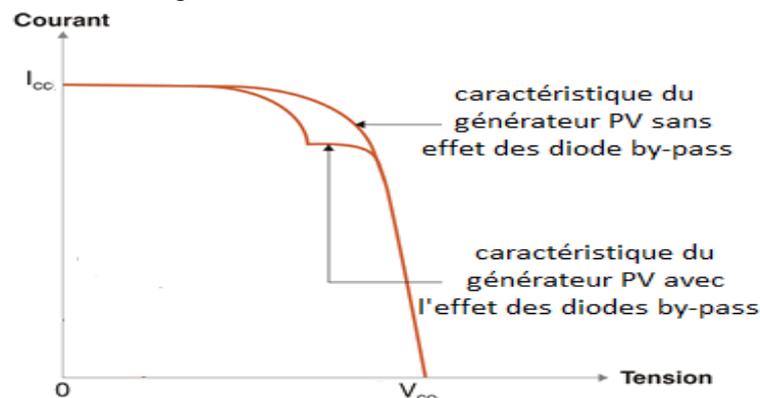


Figure (1. 13) : Caractéristique I-V d'un module dont certaines cellules ombragées sont isolées par une diode de by-pass

## 1.8. Panneau photovoltaïque 80M(36)

Dans ce travail on a choisi le module photovoltaïque 80M(36) de chez STE FRI-SOL constitué de 36 cellules photovoltaïques élémentaires en silicium monocristallin. Il peut délivrer dans les conditions standards de test (STC) et une puissance maximale de 80W, un courant optimal de 4.58A sous une tension optimale de 17.45V. Les caractéristiques électriques de ce module photovoltaïque sont données dans le tableau suivant :

Tableau (1. 1) : les paramètres du panneau photovoltaïque 80M(36).

Puissance maximale	80 W
Tension à puissance maximale	17.45V
Courant à puissance maximale	4.58A
Courant de court-circuit	4.78A
Tension de circuit ouvert	21.87V

1.8.1. Modélisation et Simulation du module 80M(36) sous logiciel PROTEUS

Pour obtenir un modèle réel approximatif de panneau 80M(36) on a utilisé l’outil « Solar Module (physical model) » de logiciel PSIM pour calculer les cinq paramètres nécessaire comme illustre la figure (1.14) :

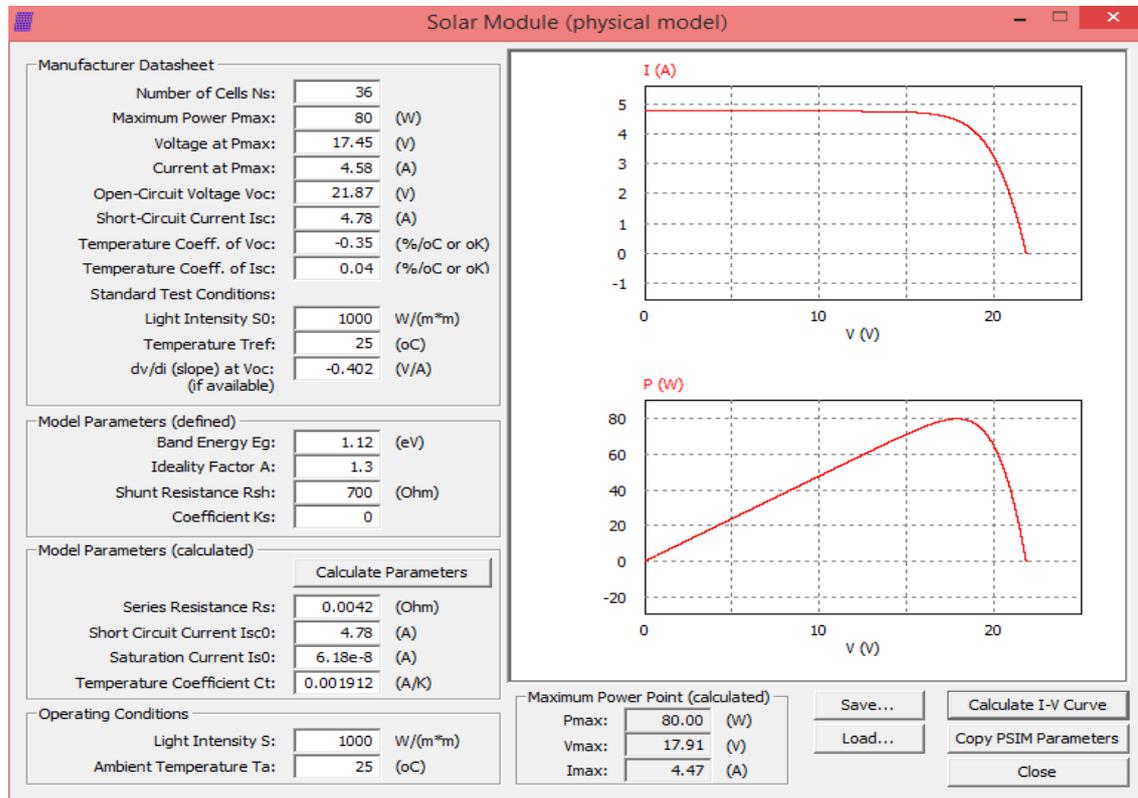


Figure (1. 14) : la modélisation de panneau 80M(36) sous logiciel PSIM

Dans notre étude on va utiliser le logiciel PROTEUS pour la simulation des résultats, Pour cela on a utilisé les résultats obtenu par PSIM pour simuler le panneau PV dans le logiciel PROTEUS, (figure (1.15)) :

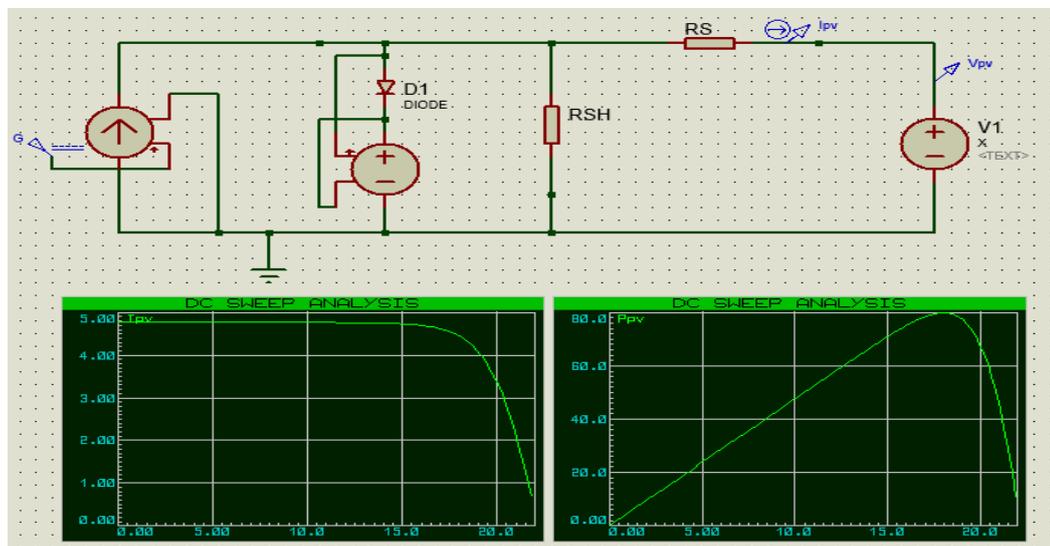


Figure (1. 15) : Schéma équivalent du module 80M(36) dans PROTEUS

Pour simuler le panneau PV dans PROTEUS, on a utilisé :

- Un bloc "Linear Voltage Controlled Current Source" est utilisé pour simuler la source de courant  $I_{ph}$ .
- Une diode avec Script Spice modifié est utilisée dans ce modèle, car il est nécessaire de changer les valeurs du courant de saturation  $I_s$ , la température et le facteur d'idéalité  $A$ .
- Un bloc "Linear Voltage Controlled Voltage Source" pour simuler le nombre de cellules.
- Deux résistances sont utilisées pour modéliser la résistance shunt et la résistance série.
- Un bloc "DC Voltage Source" est connecté au modèle de panneau PV en tant que charge variable. Sa valeur est égale à la valeur de "Sweep variable" du graphique "DC SWEEP ANALYSIS" qui utilisé pour varier la tension  $V_{pv}$  dans notre modèle sous PROTEUS, notez que la plage de la variable "Sweep variable" doit être comprise entre 0V et la tension en circuit ouvert  $V_{co}$ .

### 1.8.2. Influence de température et d'éclairement sur les caractéristiques de cellule PV

Comme on a dit précédemment, Les caractéristiques d'une cellule PV sont définit dans des conditions de test bien précises (éclairage de 1 000 W/m<sup>2</sup> et température de 25 °C). Pour étudier l'influence de variation de ces deux conditions atmosphériques sur les caractéristiques de cellule PV on a utilisé le modèle de panneau 80M(36) sous logiciel PROTEUS. La figure (1.16) représente Les variations de caractéristiques I-V et P-V pour différents niveaux d'éclairiments à température maintenue constante à 25°C.

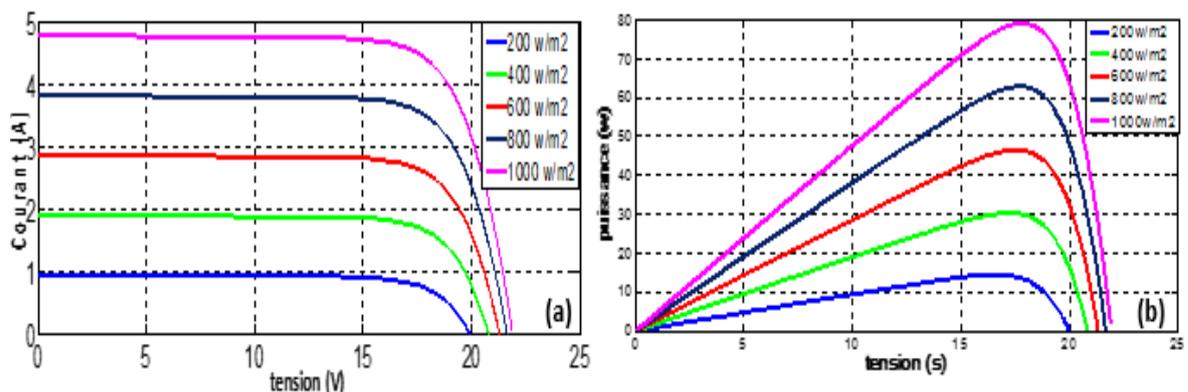


Figure (1.16) : Les variations de caractéristiques électriques de panneau 80M(36) pour différents niveaux d'éclairiments à T= 25°C, (a) caractéristiques I-V, (b) caractéristiques P-V

Lorsque l'irradiation varie pour une température donnée, le courant de court-circuit  $I_{cc}$  varie proportionnellement à l'irradiation. Dans un même temps, la tension de circuit ouvert  $V_{co}$  varie très peu [2] [14]. Par contre du cas précédent, lorsque la température croît à irradiation constante, figure (1.17), la tension à vide  $V_{co}$  décroît avec la température. Plus l'augmentation de la température est importante plus la tension de circuit ouvert est faible et le courant de court-circuit  $I_{cc}$  augmente. Cette hausse est nettement moins importante que la baisse de tension. L'influence de la température sur  $I_{cc}$  peut être négligée dans la majorité des cas. [11]

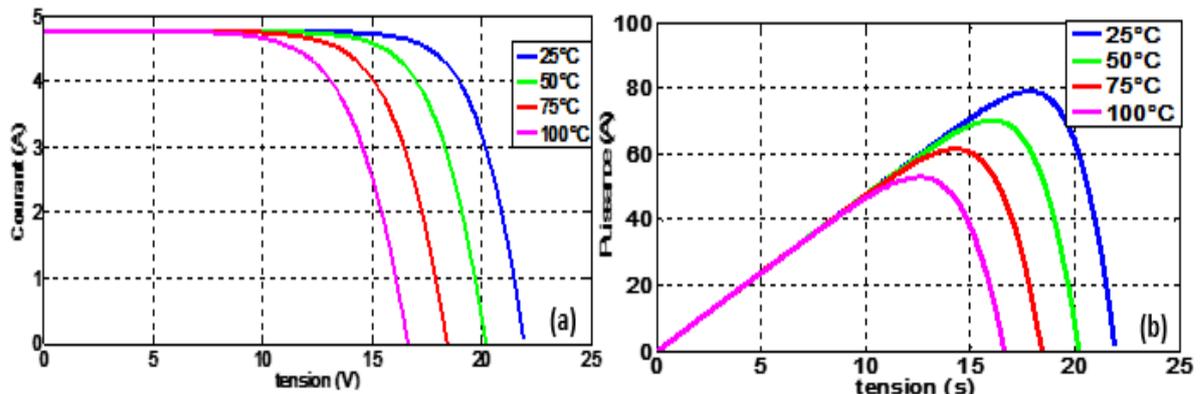


Figure (1. 17) : Les variations de caractéristiques I-V et P-V de cellule pour différents niveaux de température à  $G= 1000\text{w/m}^2$ , (a) caractéristiques I-V, (b) caractéristiques P-V

La température et l'éclairement sont donc les deux principaux paramètres qui vont modifier la caractéristique d'une cellule solaire. Ces deux paramètres devront donc être étudiés avec soin lors de la mise en place d'une installation PV [14].

### 1.9. Couplage direct source-charge

L'installation PV la plus simple que l'on puisse concevoir se compose d'un champ photovoltaïque, formé d'un ou plusieurs modules connectés en série ou en parallèle, et une charge DC qui utilise directement l'énergie produit, figure (1.18) [2].

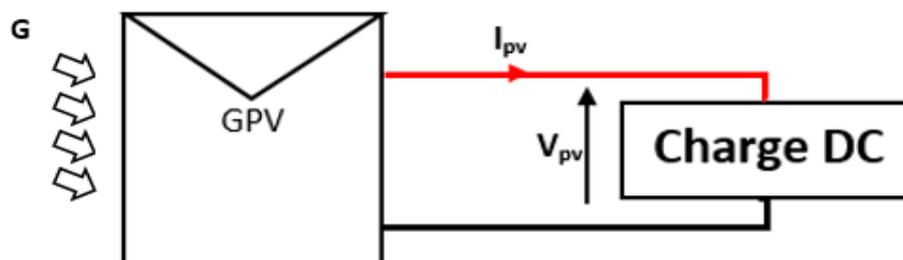


Figure (1. 18) : couplage direct entre un GPV et une charge résistive

Dans ce type d'installation qui est aujourd'hui l'utilisation terrestre la plus répandue de l'énergie solaire grâce à leur simplicité, fiabilité et leur faible coût, le point

de fonctionnement du GPV dépend de l'impédance de la charge à laquelle il est connecté, figure(1.19) [16].

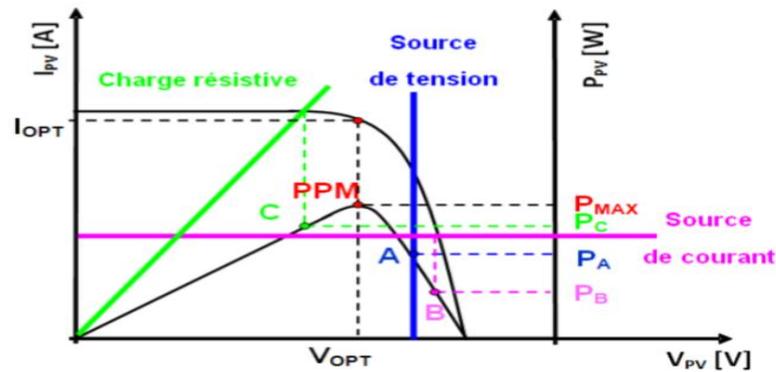


Figure (1. 19) : Points de fonctionnement d'un GPV en connexion directe, en fonction de la charge [16]

Comme le schématise la figure (1.19), un GPV peut être connecté directement à trois types de charges [16]:

- une charge de type source de tension continue,
- une charge de type source de courant continue,
- une charge purement résistive.

Trois points de fonctionnement A, B, C respectifs peuvent être identifiés fournissant une puissance  $P_A$ ,  $P_B$  et  $P_C$  qui ont différent à la puissance maximale  $P_{mpp}$  de GPV.

Donc l'inconvénient major de cette installation, c'est qu'elle n'offre aucun type de réglage de fonctionnement. Le transfert de la puissance optimale disponible aux bornes du GPV vers la charge n'est pas non plus garanti. D'autre part, certains types de charges ont besoin de tensions et courants alternatifs. [2]

Pour résoudre ce problème et afin d'extraire, à chaque instant, le maximum de puissance disponible aux bornes du GPV et de la transférer à la charge, un étage d'adaptation est utilisé. Cet étage joue le rôle d'interface entre les deux éléments, figure (1.20). Il assure, à travers une action de contrôle, le transfert du maximum de puissance fournie par le générateur [2].

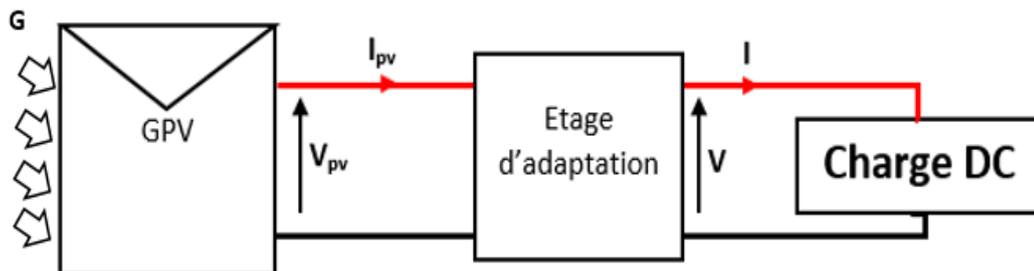


Figure (1. 20) : Connexion d'un GPV à une charge DC à travers un étage d'adaptation.

En générale, L'étage d'adaptation utilisé en PV est un convertisseur statique (convertisseur de puissance DC-DC) commandé par une commande qui permet de poursuivre le MPP appelé MPPT «Maximum Power Point Tracking» [17], comme illustre la figure (1.21) :

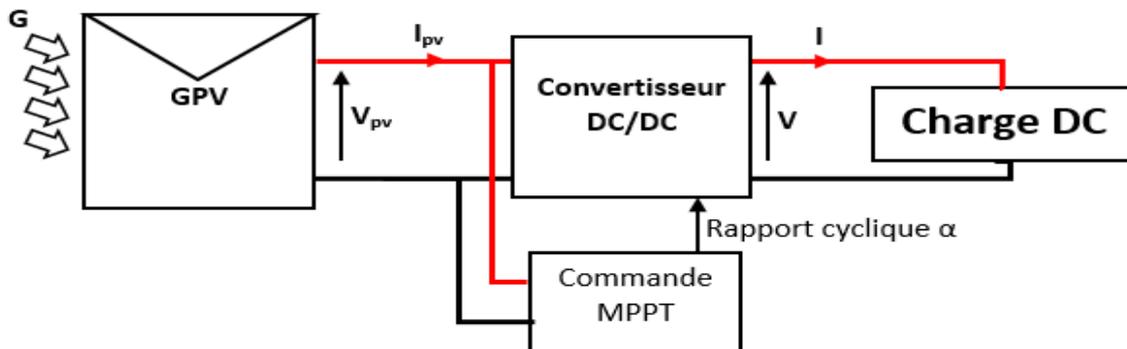


Figure (1. 21) : Schéma synoptique du système PV adapté par le convertisseur DC-DC

## 1.10. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté l'énergie solaire et son rayonnement, en suit le principe de l'effet photovoltaïque et la cellule PV, ainsi que le générateur photovoltaïque, nous avons étudiée l'influence d'éclairement et de la température sur la puissance produite par le GPV. En fin, le problème de couplage direct source-charge et leur solution (l'étage d'adaptation) est également abordée.

Dans le chapitre qui suit, nous allons présenter une étude sur les composants d'étage d'adaptation (convertisseurs DC-DC et leurs commande MPPT) pour chercher la puissance maximale du générateur photovoltaïque.

**Chapitre 02**

---

**Convertisseur DC-DC et commande MPPT**

## 2.1. Introduction

Comme on a vu dans le chapitre précédent, pour un GPV la production de la puissance varie fortement en fonction de l'éclairement, de la température et de la nature de la charge. Les variations climatiques ou la variation du comportement de la charge entraînent une dégradation des performances de GPV.

À cause de cette dégradation et pour qu'un GPV fournisse sa puissance maximale disponible, il faut une adaptation permanente de la charge avec le générateur photovoltaïque. Cette adaptation peut être réalisée par l'insertion d'un convertisseur DC-DC contrôlé par un mécanisme de poursuite MPPT.

Dans ce chapitre on considère deux types de convertisseurs DC-DC à savoir ; le convertisseur BOOST et SEPIC, et on va étudier différents algorithmes de commande MPPT.

## 2.2. Convertisseurs DC-DC

Le convertisseur continu - continu ou le hacheur est un dispositif de l'électronique de puissance placés entre un générateur et un récepteur, tous deux à courant continu [18], il permet de régler la tension appliquée au récepteur ou le courant qui y circule avec un rendement élevé et une très grande souplesse [11] [19].

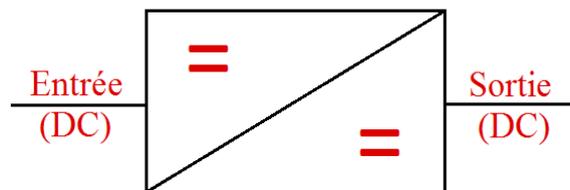


Figure (2. 1) : Symbole d'un convertisseur DC-DC

Les hacheurs peuvent être directs ou indirects [18]:

- **Les hacheurs directs** relient un générateur et un récepteur qui comportent l'un comme une source de tension, l'autre comme source de courant. Ils ne comportent que des interrupteurs qui permettent d'agir sur les connexions entre le générateur et le récepteur.
- **Les hacheurs indirects** relient un générateur et un récepteur de même nature. Ils comportent des interrupteurs et un élément de stockage d'énergie qui reçoit l'énergie du générateur puis la transmet au récepteur en fonction des connexions établies par les interrupteurs.

Dans le littérature on trouve plusieurs convertisseurs DC-DC. Le tableau suivant donne une idée sur la complexité de quelque type de convertisseur :

Tableau (2. 1) : la complexité de quelque type de convertisseur [19]

Type	Fonction	Interrupteur	Diode	Transformateur	Complexité
Buck	Abaisseur	1	1	Non	Faible
Boost	Élévateur	1	1	Non	Faible
Buck-boost	Abaisseur/ Elévateur	1	1	Non	Faible
Flyback	Abaisseur/ Elévateur	1	1	Oui	Moyen
Half Forward	Abaisseur/ Elévateur	1	1	Oui	Moyen
Push pull	Abaisseur/ Elévateur	2	2	Oui	Forte
Half Bridge	Abaisseur/ Elévateur	2	2	Oui	Forte
Full Bridge	Abaisseur/ Elévateur	4	4	Oui	Très Forte

Dans ce travail, on va présenter le principe des deux types des convertisseurs BOOST et SEPIC. Ces convertisseurs sont utilisés fréquemment dans les systèmes photovoltaïques pour générer les tensions et les courants souhaités. Ces types de convertisseurs ne sont constitués que par des éléments réactifs (Selfs, Capacités) qui, dans le cas idéal, ne consomment aucune énergie. C’est pour cette raison qu’ils sont caractérisés par un grand rendement [2].

### 2.2.1. Convertisseur de type BOOST

BOOST, connu aussi sous le nom de hacheur parallèle, est un convertisseur direct DC-DC survolteur (élévateur) représenté dans la figure (2.2). Son application typique est de convertir sa tension d’entrée en une tension de sortie de plus forte valeur. La source d’entrée est de type courant continu (inductance en série avec une source de tension) et la charge de sortie est de type tension continue (condensateur en parallèle avec une charge résistive) [11].

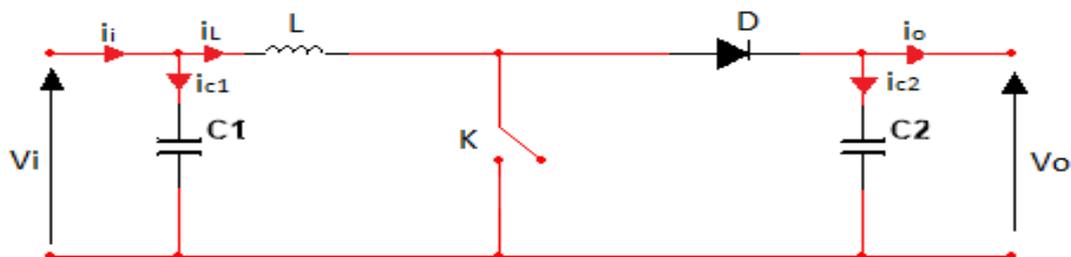


Figure (2. 2) : convertisseur DC-DC de type BOOST

#### 2.2.1.1. Principe de fonctionnement

L’étude se fait en deux parties selon l’état de conduction de l’interrupteur K pendant un période de commutation T :

D’abord on définit la valeur  $\alpha$  appelé le rapport cyclique, Il représente la durée de la période T pendant laquelle l’interrupteur K conduit.  $\alpha$  est compris entre 0 (K ne conduit jamais) et 1 (K conduit tout le temps).

- **Mode continu de 0 à  $\alpha T$  :** (Une phase d'accumulation d'énergie) :

Si l'interrupteur K est fermé le schéma équivalent de convertisseur devient comme représente la figure (2.3), cela entraîne l'augmentation du courant dans l'inductance, donc le stockage d'une quantité d'énergie sous forme d'énergie magnétique. La diode D est alors bloquée et la charge est alors déconnectée de l'alimentation [20].

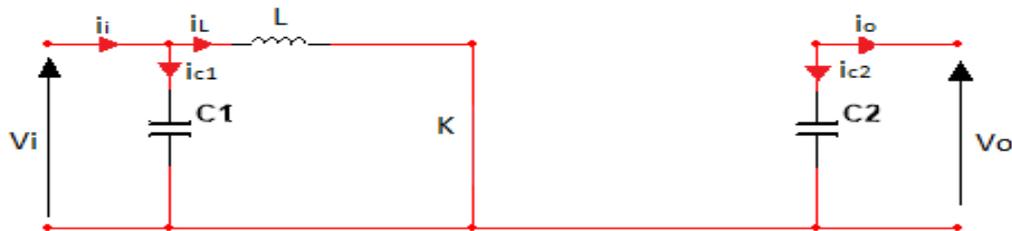


Figure (2. 3) : le schéma équivalent de convertisseur DC-DC de type BOOST l'interrupteur K est fermé.

Le convertisseur, dans ce cas, peut modéliser par les équations suivant [21]:

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

$$\frac{dV_o}{dt} = -\frac{1}{C_2} i_o \tag{2.2}$$

- **Mode discontinu de  $\alpha T$  à T :** (phase de roue libre) :

Lorsque l'interrupteur K est ouvert, figure (2.4), l'inductance se trouve alors en série avec le générateur et sa f.e.m s'additionne à celle du générateur (effet survolteur).Le courant traversant l'inductance traverse ensuite la diode, le condensateur et la charge. Il en résulte un transfert de l'énergie accumulée dans l'inductance vers la capacité [19].

La diode D permet d'éviter la décharge du condensateur C, lorsque le commutateur est activé. Le condensateur est supposé assez grand pour pouvoir lisser la tension de la charge.



Figure (2. 4) : le schéma équivalent de convertisseur DC-DC de type BOOST l'interrupteur K est ouvert

Le convertisseur, dans ce cas, peut modéliser par les équations suivant [21]:

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{V_i - V_0}{L} \quad (2.3)$$

$$\frac{dV_0}{dt} = \frac{i_L}{C_2} - \frac{1}{C_2} i_0 \quad (2.4)$$

La tension et le courant de sortie de convertisseur BOOST est donnée par [3]:

$$V_0 = \frac{1}{1-\alpha} V_i \quad (2.5)$$

$$i_0 = (1 - \alpha) i_i \quad (2.6)$$

### 2.2.1.2. Choix des composants de convertisseurs BOOST

Puisque le courant est toujours positif et que les commutations doivent être commandées (au blocage et à l'amorçage), L'interrupteur K peut être remplacé par un transistor tels que les transistors bipolaires ou à effet de champ à grille isolée IGBT ou les thyristors GTO fonctionnant en régime commutation (tout ou rien). Les commutateurs de puissance utilisés dépendent du niveau de la puissance à convertir et de la fréquence de commutation [2]. Comme illustre le tableau (2.2) :

Tableau (2. 2) : Niveaux de puissance et fréquence de commutation des semi-conducteurs [22]

Semi-conducteur	Niveaux de puissance pouvant manipuler	Vitesse de commutation « fréquences »
BJT	Moyen	Moyen
MOSFET	Faible	Rapide
GTO	Fort	Lent
IGBT	Moyen	Moyen
MCT	Moyen	Moyen

L'inductance et les capacités ( $L$ ,  $C_1$ ,  $C_2$ ) sont calculées pour permettre essentiellement de filtrer le courant et de minimiser le taux d'ondulation de la tension à l'entrée et à la sortie des convertisseurs [23]. Ces valeurs sont calculées par les expressions suivantes [19] :

$$L \geq \frac{V_0}{4 \Delta i_{max} f} \quad (2.7)$$

$$C_1 \geq \frac{I_i}{\Delta V_{imax} f} \quad (2.8)$$

$$C_2 \geq \frac{\Delta i_{Lmax}}{8 \Delta V_{cmax} f} \quad (2.9)$$

Avec :  $\Delta i_{max}$  : l'ondulation du courant maximale,  $\Delta V_{cmax}$  : l'ondulation de tension maximale,  $f$  : fréquence de commutation.

La diode D est une diode « roue libre ». Elle permet d'évacuer l'énergie stockée dans la self pendant le blocage de l'interrupteur. Selon [23] il est préféré une diode Schottky de puissance dont la chute de tension à l'état passant est faible pour minimiser les pertes en conduction. Son choix se fait en fonction du courant  $I_d$  moyen, du courant  $I_{dmax}$  crête susceptible de la traverser et de la tension inverse  $V_R$  à supporter.

**2.2.2. Convertisseur de type SEPIC**

Le convertisseur SEPIC (Single Ended Primary Inductor Converter), figure (2.5), est un type de convertisseur DC-DC qui permet au potentiel électrique (tension) à sa sortie soit supérieure à, inférieure à ou égale à celle à son entrée. Ce convertisseur a été conçu à la fin des années 1970 par Slobodan Cuk [20].

Un SEPIC est essentiellement un convertisseur élévateur de tension suivi d'un convertisseur abaisseur-élévateur, il est donc similaire à un traditionnel convertisseur abaisseur-élévateur, mais présente des avantages d'avoir la sortie non-inversée (la sortie a la même polarité de tension de l'entrée).

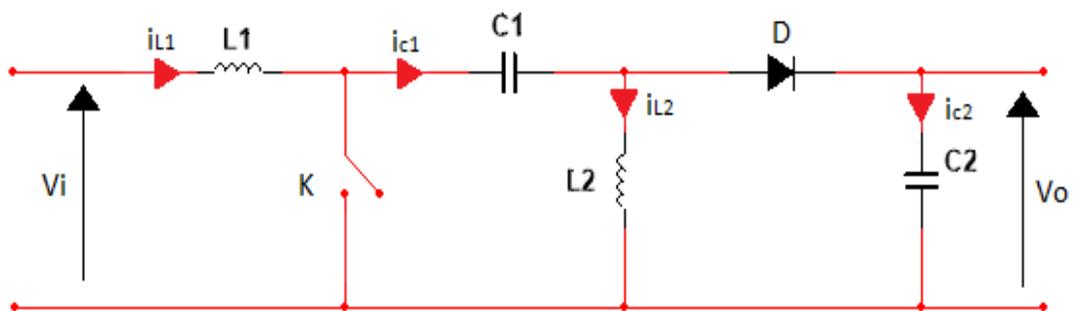


Figure (2. 5) : Schéma de convertisseur SEPIC

La valeur de la tension de sortie dépend du rapport cyclique de fermeture de l'interrupteur (transistor). Cette relation peut s'exprimer de la façon suivante [20]:

$$V_0 = \frac{\alpha}{1-\alpha} V_i \tag{2.10}$$

Avec  $\alpha$  : le rapport cyclique.

**2.2.2.1. Principe de fonctionnement**

L'étude de principe de fonctionnement se fait en deux parties selon l'état de conduction de l'interrupteur K :

- **Mode continu de 0 à  $\alpha T$  :** (Une phase d'accumulation d'énergie) :

Si on ferme l'interrupteur K le schéma équivalent de convertisseur devient comme représente la figure (2.6), La diode D est en polarisation inverse donc bloquée. La tension aux bornes de l'inductance L1 est égale à  $V_e$ . Le courant traversant L1 va augmenter linéairement donc l'énergie est stockée dans L1. Le condensateur C1 est connecté en parallèle avec L2. L'énergie contenue dans le condensateur C1 passe dans l'inductance L2, et celle du condensateur C2 vers la charge [20].

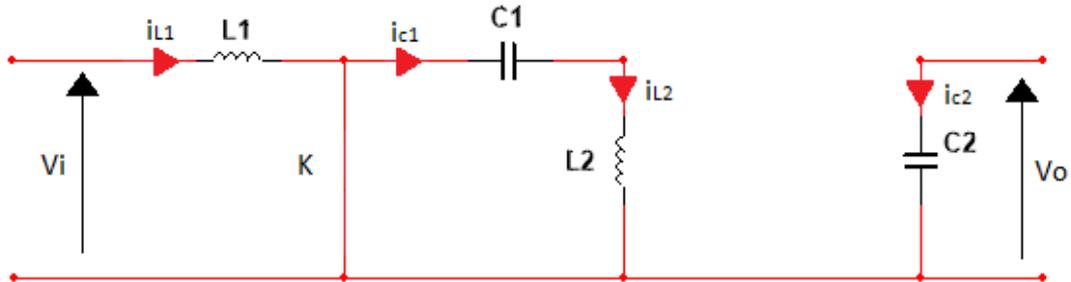


Figure (2. 6) : le schéma équivalent de convertisseur DC-DC de type SEPIC l'interrupteur K est fermé

- **Mode discontinu de  $\alpha T$  à T :** (phase de roue libre) :

Lorsque on ouvre l'interrupteur K, La diode D est en polarisation direct donc il est passant. Le schéma équivalent de convertisseur devient comme représente la figure (2.7). L'énergie emmagasinée dans l'inductance L1 est restituée dans le condensateur C1. L'énergie dans L2 est transférée vers C2 [20].

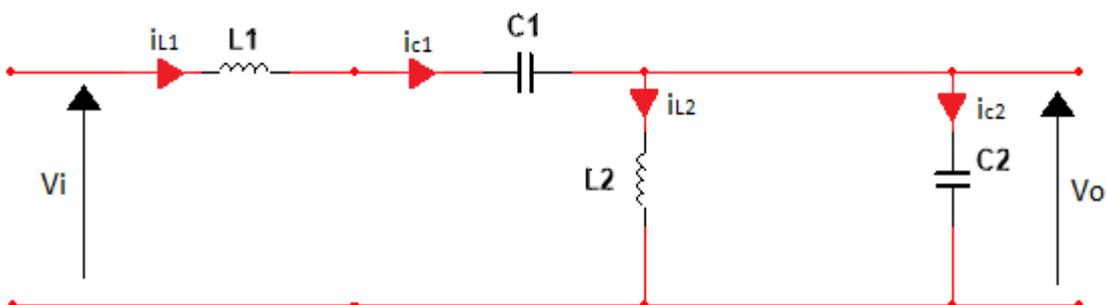


Figure (2. 7) : le schéma équivalent de convertisseur DC-DC de type SEPIC l'interrupteur K est ouvert.

### 2.2.2.2. Dimensionnement de convertisseur de type SEPIC

- **Rapport cyclique :**

Le rapport cyclique est donné par :

$$\alpha = \frac{V_o + V_D}{V_i + V_o + V_D} \tag{2.11}$$

Avec  $V_i$  la tension d'entrée,  $V_o$  la tension de sortie et  $V_D$  la tension de seuil de la diode.

Le rapport cyclique varie en fonction de la tension d'entrée appliquée afin d'avoir une tension de sortie constante. Ainsi le rapport cyclique maximal est :

$$\alpha_{max} = \frac{V_o + V_D}{V_{i(min)} + V_o + V_D} \quad (2.12)$$

- **Inductances :**

Les valeurs d'inductances sont déterminées principalement par l'ondulation de courant acceptée. Généralement, on autorise une ondulation de 40% le courant d'entrée maximal pour la tension d'entrée minimale. L'ondulation de courant est définie par l'équation suivante :

$$\Delta I_L = I_i * 40\% = I_o * \frac{V_o}{V_{i(min)}} * 40\% \quad (2.13)$$

Soit les valeurs d'inductances calculées par [24] :

$$L_1 = L_2 = L \geq \frac{V_o}{\Delta I_L * f} * \alpha \quad (2.14)$$

Avec f la fréquence de découpage.

- **Condensateur de couplage :**

Le condensateur de couplage doit être capable de laisser passer le courant efficace donné par :

$$I_{c1(rms)} = I_{out} * \sqrt{\frac{V_o + V_D}{V_{i(min)}}} \quad (2.15)$$

Le condensateur est dimensionné à partir de l'ondulation de tension crête à crête voulue définie par la formule suivante [24] :

$$\Delta V_{c1} = \frac{I_o * \alpha_{max}}{c_1 * f} \quad (2.16)$$

$$C_1 \geq \frac{\alpha}{\frac{\Delta V_{c1}}{V_o} * R * f} \quad (2.17)$$

- **Condensateur de filtrage :**

Le condensateur C<sub>2</sub> à la sortie du convertisseur SEPIC permet de filtrer la tension et de maintenir celle-ci constante. La formule permettant de dimensionner le condensateur est donné par [24]:

$$C_2 \geq \frac{\alpha}{\frac{\Delta V_o}{V_o} * R * f} \quad (2.18)$$

- **Transistor :**

Le transistor doit être capable de supporter une tension  $V_k = V_{out} + V_{in}$ , et être traverser par un courant crête égal à  $I_{k(peak)} = I_{L1(peak)} + I_{L2(peak)}$ . Le courant efficace est donné par :

$$I_{k(rms)} = I_{out} * \sqrt{\frac{(V_o + V_{i(min)} + V_D) * (V_o + V_D)}{V_{i(min)}^2}} \quad (2.19)$$

- **Diode :**

La diode possède les mêmes contraintes que le transistor, elle doit supporter un courant  $I_{D(peak)} = I_{k(peak)}$ . Elle doit résister à une tension inverse de  $V_D = V_{in(min)} + V_{out(max)}$ . Le courant moyen dans la diode est égal au courant de sortie  $I_{OUT}$ . Il est recommandé de choisir des diodes Schottky pour limiter les pertes.

### 2.3. Poursuite du point de puissance maximale (MPPT)

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 [25].

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.

$$\eta_{MPPT} = \frac{P_{pv}}{P_{mpp}} \quad (2.20)$$

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 [16].

### 2.3.1. Classification Des Commandes MPPT Selon Le Type De Recherche

#### 2.3.1.1. 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... [5]

#### 2.3.1.2. 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.... [5]

### 2.3.2. 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 différentes méthodes 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 :

**2.3.2.1. 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 utilise comme entrée les valeurs de tension  $V_{pv}$  et de courant  $I_{pv}$ , et comme sortie la valeur de rapport cyclique  $\alpha$  [26]. Le principe de cet algorithme (Comme son nom l'indique et comme représente la figure (2.9)) 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  $P(k-1)$  [5] : 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 (2.8) [21]

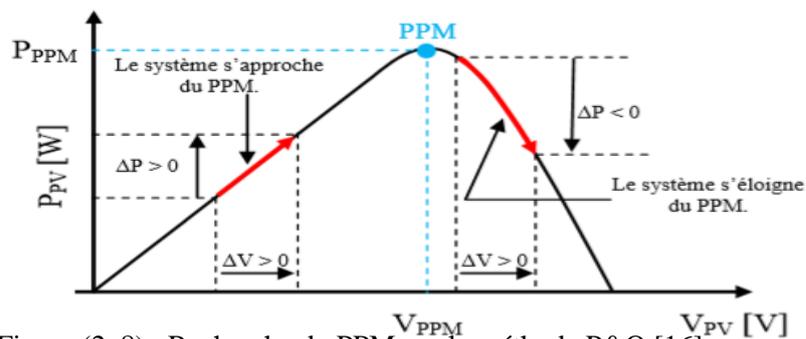


Figure (2. 8) : Recherche du PPM par la méthode P&O [16].

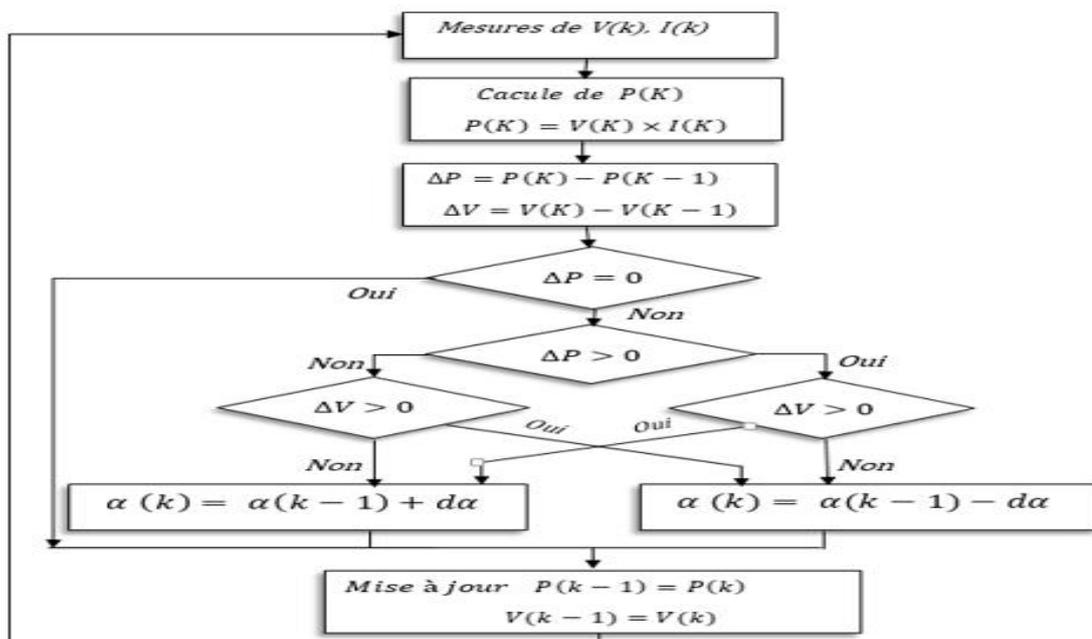


Figure (2. 9) : Organigramme de l'algorithme P&O.

### 2.3.2.2. 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 :

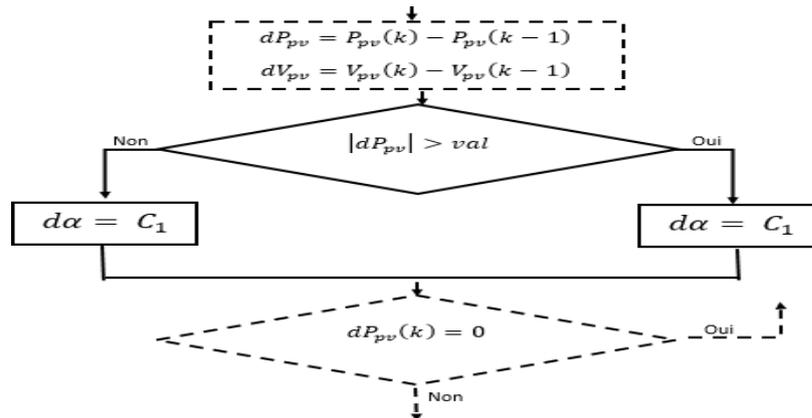


Figure (2. 10) : partiel organigramme d'algorithme P&O variable.

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 (2.21) :

$$d\alpha(k) = d\alpha_{fixe} * \frac{dp}{dv} \quad (2.21)$$

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).

### 2.3.2.3. 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 (2.11)) comme indiqué dans l'Equation (2.22) [9]:

$$\frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} = 0 \tag{2.22}$$

Cette équation peut être réécrite comme suit :

$$\frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} = \frac{d(I_{pv} \times V_{pv})}{dV_{pv}} = \frac{V_{pv} \times dI_{pv}}{dV_{pv}} + \frac{I_{pv} \times dV_{pv}}{dV_{pv}} \tag{2.23}$$

$$\frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} = V_{pv} \frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} + I_{pv} \tag{2.24}$$

Ce qui implique que :

$$\frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} + \frac{I_{pv}}{V_{pv}} = 0 \tag{2.25}$$

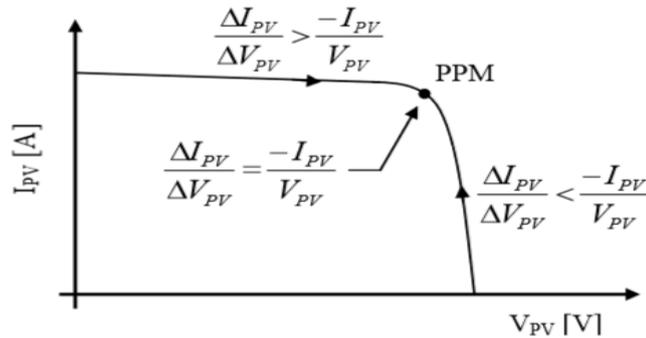


Figure (2.11) : Positionnement du point de fonctionnement suivant la valeur de  $\Delta I_{pv}/\Delta V_{pv}$  sur les caractéristiques de I-V [16].

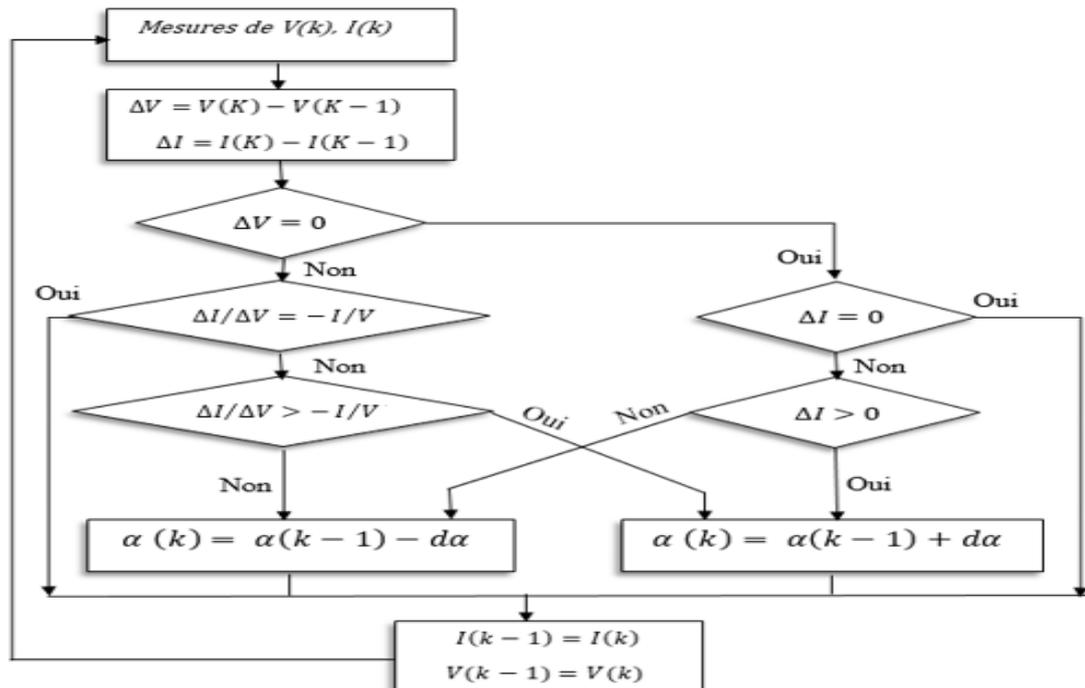


Figure (2.12) : Organigramme de l'algorithme INC.

### 2.3.2.4. Algorithme "Hill Climbing"

La technique de contrôle nommée Hill Climbing est l'un des techniques les plus utilisées pour la commande MPPT grâce à sa simplicité à mettre en œuvre [30] 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 [16]. L'algorithme de cette méthode est illustré sur la figure (2.13) [30]:

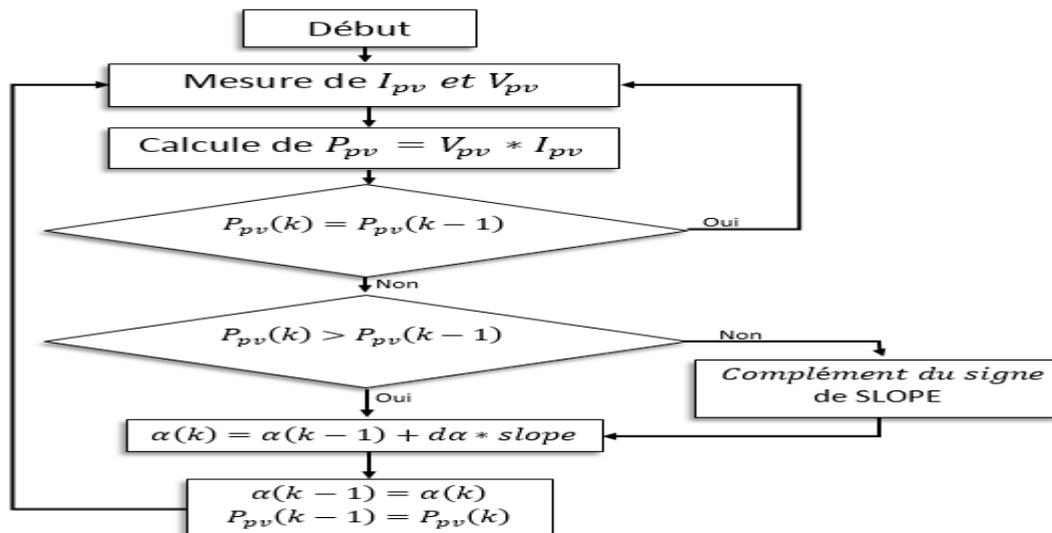


Figure (2.13) : Organigramme de l'algorithme Hill Climbing.

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 [16].

### 2.3.2.5. Algorithme de Fraction de la Tension V<sub>co</sub> (FCO)

Cette technique de recherche du PPM est consistée à comparer la tension du panneau V<sub>PV</sub> avec une tension de référence qui correspond à la tension optimale V<sub>mpp</sub>. 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<sub>mpp</sub> et V<sub>co</sub> d'un module PV [16] :

$$V_{mpp} = k_v * V_{co} \quad (2.26)$$

Où  $k_v$  est un facteur de tension dépendant des caractéristiques de la cellule PV et qui varie entre 0.73 et 0.8 [21].

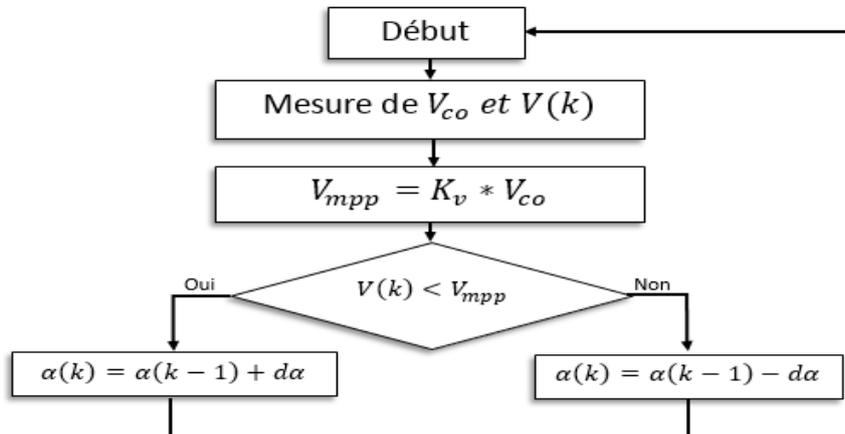


Figure (2. 14) : Organigramme de l’algorithme FCO.

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 [21].

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 [16].

**2.3.2.6. Algorithme de Fraction du Courant  $I_{cc}$  (FCC)**

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

$$I_{mpp} = k_i I_{cc} \tag{2.27}$$

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

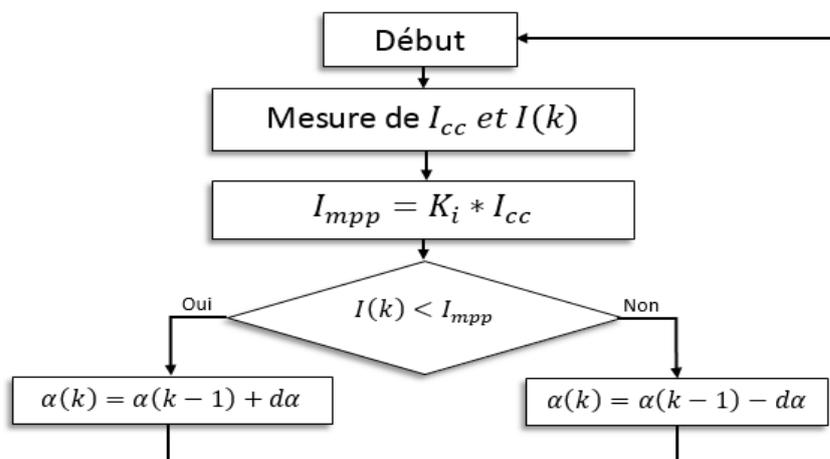


Figure (2. 15) : Organigramme de l’algorithme FCC.

En effet, le PPM est obtenue en amenant le courant du panneau au courant optimal. L'équation (2.25) 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 [16] [21].

**2.3.2.7. Les commandes MPPT basées sur le principe de la logique floue (FLC)**

Les commandes basées sur la logique floue sont utilisée dans les systèmes de poursuite du point à maximum de puissance, cette commande offre l'avantage d'être une commande robuste et qui ne nécessite pas la connaissance exacte du modèle mathématique du système. De plus, elles peuvent traiter des non linéarités [16] [21].

Le fonctionnement de cet algorithme se fait en trois étapes :

- La fuzzification : permet la conversion des variables physiques d'entrée en ensembles flous. Durant cette étape, les variables d'entrées numériques sont converties en variable linguistique pouvant prendre les cinq valeurs suivantes : NB (Negative Big), NS (Negative Small), ZE (Zero), PS (Positive Small), PB (Positive Big). par l'utilisation de la structure de base de la commande logique floue. comme illustre la figure (2.16.a).

Les paramètres d'entrées E et  $\Delta E$  sont liées aux équations suivantes [16]:

$$E = \frac{P(k)-P(k-1)}{V(k)-V(k-1)} \tag{2.28}$$

$$\Delta E = E(k) - E(k-1) \tag{2.29}$$

- L'inférence : Dans l'étape d'inférence, on prend des décisions à partir des variable d'entrées E et  $\Delta E$  sur le variable de sortie  $\Delta\alpha$  à l'aide de tableau de règles d'inférence représenté dans la figure (2.16.b) [16]. En effet, on établit des relations logiques entre les entrées et la sortie tout en définissant les règles d'appartenance. Par la suite, on dresse le tableau de règles d'inférence [21].

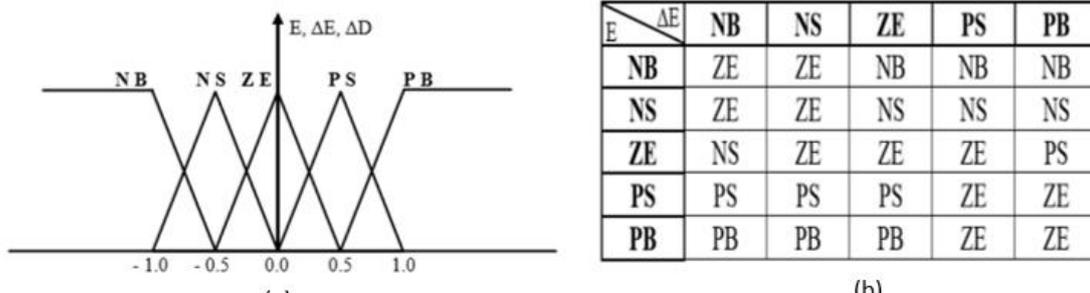


Figure (2.16) : Les commandes MPPT basées sur le principe de la logique floue (a)exemple de structure de base de la commande floue.(b) exemple d'une table de vérité pour une commande logique floue [16]

- La defuzzification : Cette étape ne s'applique qu'à la variable de sortie  $\Delta\alpha$ . Durant cette étape,  $\Delta\alpha$  sera convertir d'une variable linguistique à une variable numérique afin de pouvoir piloter le convertisseur de puissance pour atteindre le PPM. [21]

Cette commande présente les meilleures performances en termes de précision et de rapidité de recouvrement de PPM. Mais l'inconvénient de cette commande est que sa précision est liée à la complexité de la table de vérité employée donc la nécessité du choix obligatoire d'un microcontrôleur ayant une grande capacité de calculs cela entraîne obligatoirement une consommation énergétique non négligeable liée au microprocesseur ainsi qu'un surcoût [16].

### 2.3.2.8. 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 (2.17) [16].

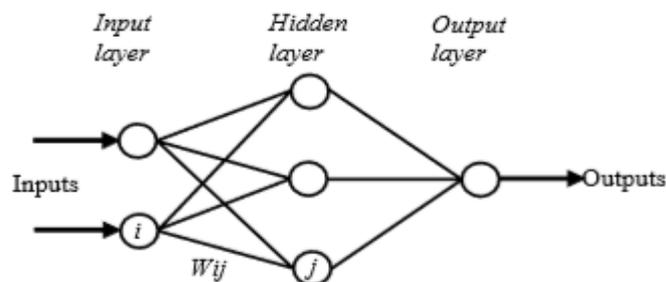


Figure (2. 17) : Exemple d'un réseau de neurones [16].

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 ( $V_{CO}$ ,  $I_{CC}$ ) 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 [16]:

- 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.

### 2.3.2.9. 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 [16] [27],
- P&O amélioré par la logique floue [6],
- INC avec pas variable [16],
- l'algorithme de la capacité parasite (Parasitic Capacitance) [31].
- la méthode de l'oscillation forcée [31]
- ...etc

Et d'autres algorithmes qui ne sont pas très connus comme l'algorithme qui nous l'avons appelé Adaptive Duty Cycle (ADC) proposé par Dr. bechouat dans leurs thèse de doctorat [3] qui basée sur le calcul d'une relation entre le rapport cyclique  $\alpha$ , la puissance  $P_{pv}$ , la tension  $V_{pv}$  et la charge  $R$ . si on prend un convertisseur DC-DC de type BOOST et selon la loi d'Ohm l'expression de la charge  $R$  sera comme suit :

$$R = \frac{V_{out}}{I_{out}} \quad (2.30)$$

En remplaçant les équations (2.5) et (2.6) dans l'équation (2.30), on obtient :

$$R = \frac{V_{pv}}{I_{pv}*(1-\alpha)^2} \quad (2.31)$$

En multipliant le numérateur et le dénominateur par la tension  $V_{pv}$ , on obtient :

$$R = \frac{V_{pv}^2}{P_{pv}*(1-\alpha)^2} \quad (2.32)$$

Et donc :

$$\alpha = 1 - \frac{V_{pv}}{\sqrt{P_{pv}*R}} \quad (2.33)$$

Cette dernière relation est utilisée pour faire la mise à jour de la valeur de rapport cyclique  $\alpha$ .

L'organigramme de cet algorithme est présenté par la figure (2.18) :

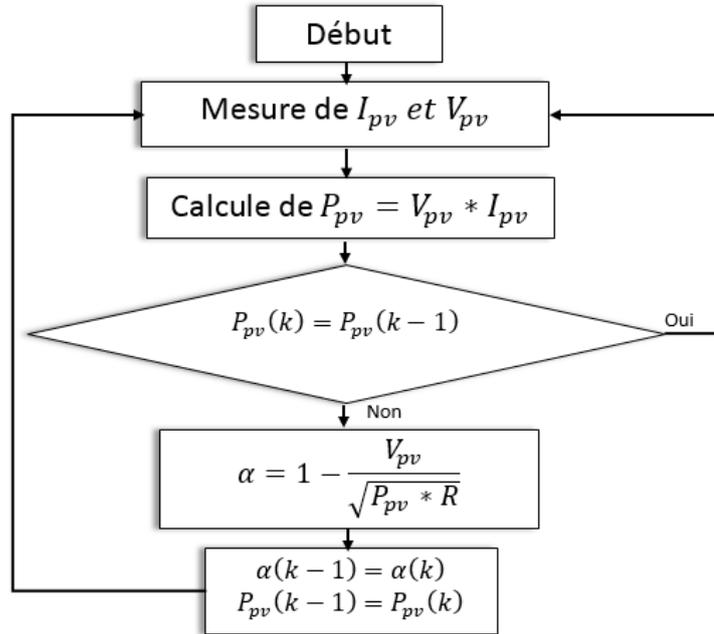


Figure (2. 18) : Organigramme de l'algorithme ADC.

Un autre algorithme présent une amélioration de l'algorithme P&O est proposée par [32] et connu sous le nom ICI (Input Characteristic Impedance). Cet algorithme utilise un seul capteur de tension est implémenté comme indiqué sur la figure (2.19).

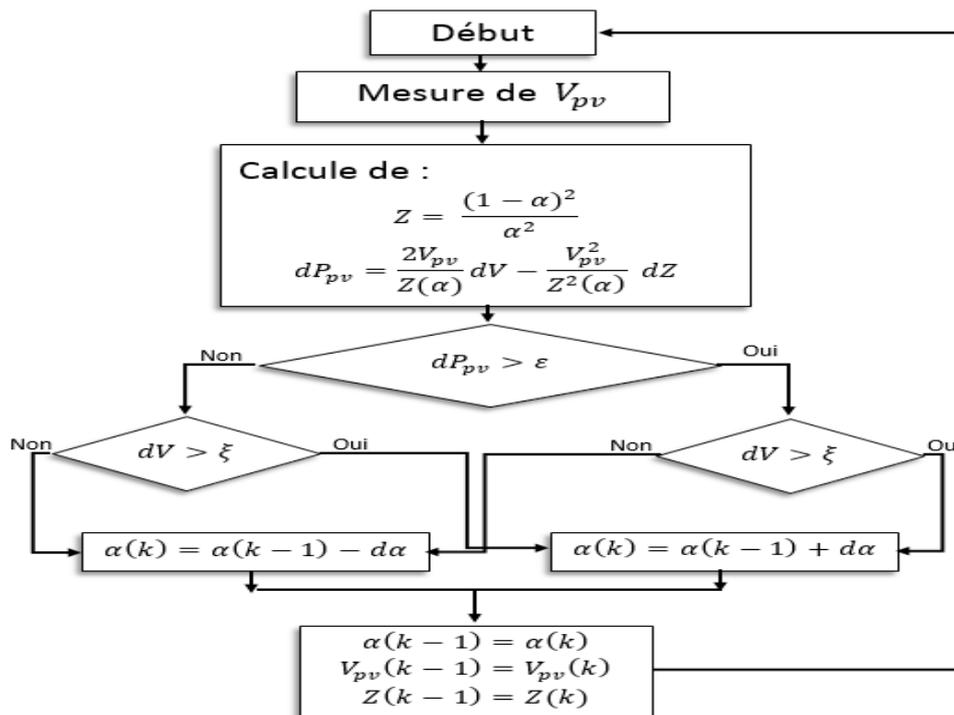


Figure (2. 19) : Organigramme de l'algorithme ICI.

Le principe de cet algorithme est de tirer à partir de l'impédance qui caractérise l'entrée ( $R_s$  de GPV) le comportement en régime permanent du convertisseur DC-DC et calculé la dérivée de puissance en fonction d'une telle impédance  $Z(\alpha)$  comme indiqué l'organigramme. Deux variables doivent être connues, le rapport cyclique, tiré d'un registre de microcontrôleur et la tension d'entrée de convertisseur, qui est la seule variable détectée. L'initialisation des variables est la suivante :

$$\alpha(k - 1) = 0 \quad (2.34)$$

$$V_{pv}(k - 1) = 0 \quad (2.35)$$

$$Z(k - 1) = \text{grand nombre} \quad (2.36)$$

## 2.4. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudié l'adaptation de puissance entre la source et la charge pour profiter mieux la puissance délivrée par le GPV. Pour cela, nous avons parlé et discuté sur les convertisseurs DC-DC statique (Hacheur).

Deux types de convertisseur ont été étudiés en détail, à savoir : le convertisseur BOOST et SEPIC.

Dans la deuxième partie nous avons parlé de la commande MPPT qui pilote les convertisseurs DC-DC.

Le chapitre qui suit présente les différents résultats de simulation des algorithmes étudiés et discutés dans ce chapitre.

## Chapitre 03

---

Simulation, résultats et discussion.

### 3.1. 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 [31].

La CAO (Conception Assistée Par Ordinateur) électronique PROTEUS est une suite logicielle, éditée par la société Labcenter Electronics et revendue en France exclusivement par Multipower. Proteus est actuellement (2020) la seule CAO électronique qui permet la conception d'un système électronique complet et de le simuler, y compris avec le code des microcontrôleurs. Il est donc bien adapté pour mettre en œuvre, tester et évaluer les systèmes de conversion d'énergie photovoltaïque.

Ce chapitre est consacré à l'étude comparative par simulation entre les différents algorithmes de poursuite du point de puissance maximale, détaillées dans le chapitre précédent.

### 3.2. Description du système

La figure (3.1) représente le schéma synoptique du système utilisé dans notre travail pour étudier les performances de différentes commandes MPPT afin de faire une comparaison entre ces commandes. Ce système est composé d'une GPV alimentant une charge résistive à l'intermédiaire d'un convertisseur DC-DC commandé par un ARDUINO.

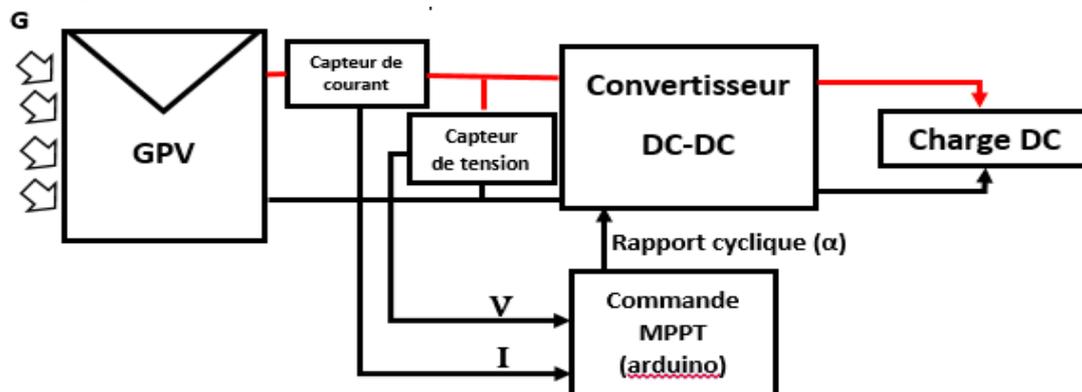


Figure (3. 1) : Schéma synoptique du système étudié.

### 3.3. Simulation de système

L'utilisation de la simulation est une étape très importante dans l'étude des systèmes PV, elle permet de modifier les paramètres du système très facilement et tester les performances des méthodes d'optimisation sous différentes conditions. Dans ce mémoire on a utilisé le logiciel ISIS PROTEUS pour simuler le système représenté précédemment. La Figure (3.2) représente le modèle, sous ISIS PROTUES, de système photovoltaïque qui est composé d'un générateur PV suivi par un convertisseur DC-DC connecté à une résistance de 20Ω et commandé par la carte ARDUINO MEGA 2560.

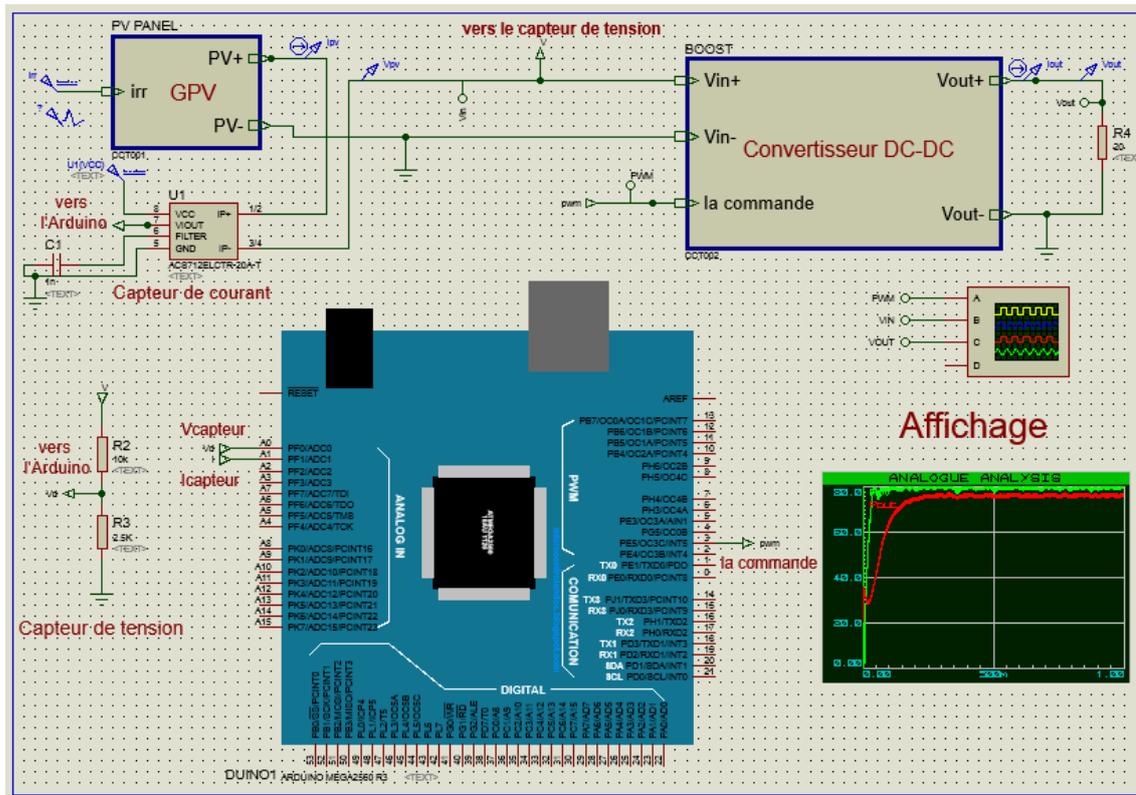


Figure (3. 2) : le modèle de simulation sous ISIS PROTEUS

#### 3.3.1. Module de générateur photovoltaïque GPV

La simulation de GPV utilisé est représentée dans le premier chapitre par la figure (1.15). Il s'agit d'un module de 36 cellules de silicium monocristallin, d'une puissance maximale de 80 W.

#### 3.3.2. Simulation de Convertisseur DC-DC type BOOST

Pour un charge résistive de 20Ω et avec une fréquence de commutation de 20kHz,  $\Delta i_{max} = 0.5 \text{ A}$  et  $\Delta V_{cmax} = 0.5 \text{ v}$  et selon les équations (2.7), (2.8) et (2.9) on a choisi les composants de convertisseur type BOOST comme illustre le tableau (3.1) :

Tableau (3. 1) : les composants de convertisseur BOOST.

Transistor	IRF540
Diode	15ETH06
Fréquence	20k
L	284 $\mu$ H
C1	4700 $\mu$ F
C2	4700 $\mu$ F

La figure (3.3) représente le schéma de simulation de convertisseur de type BOOST alimenté par un GPV sous ISIS PROTEUS.

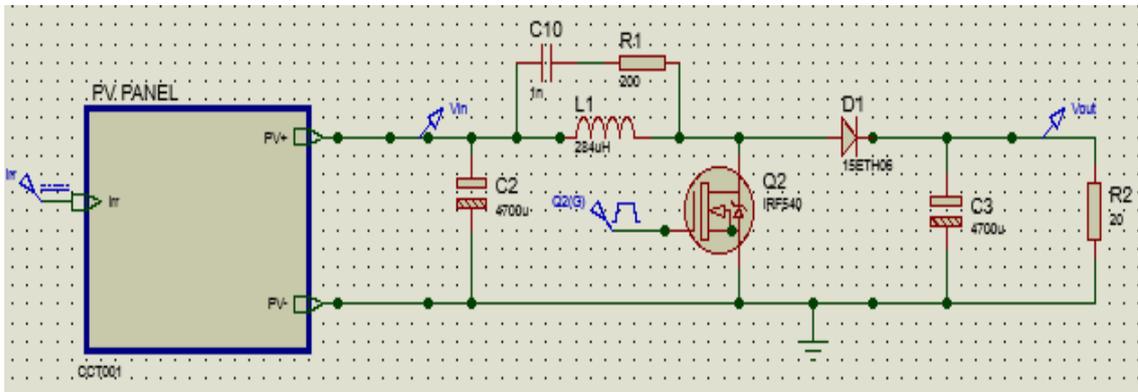


Figure (3. 3) : Simulation d'un convertisseur DC-DC de type BOOST alimenté par GPV sous PROTEUS

Pour tester ce convertisseur on a appliqué un signal carré de fréquence de 20KHz et un rapport cyclique de 50% sur la gâchette de transistor. Les courbes résultant sont représenté par la figure (3.4)

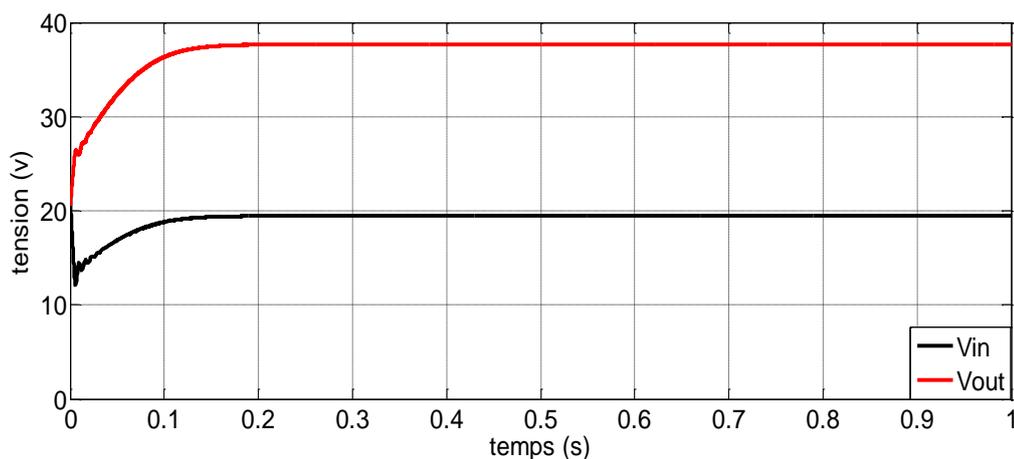


Figure (3. 4) : courbe résultant de test de convertisseur BOOST

On remarque que la tension de sortie  $V_{out}$  deux fois supérieure à la tension d'entrée  $V_{in}$ , puisque le rapport cyclique  $\alpha=0.5$ . Alors, le convertisseur survolteur sous PROTEUS est bien fonctionné.

### 3.3.3. Simulation de Convertisseur DC-DC type SEPIC

Pour la simulation de convertisseur SEPIC on a choisi les composants suivant (le tableau (3.2)) :

Tableau (3. 2) : les composants de convertisseurs DC-DC type SEPIC

Transistor	IRF540
Diode	15ETH06
Fréquence	20k
L1	284 $\mu$ H
L2	274 $\mu$ H
C1	1000 $\mu$ F
C2	4700 $\mu$ F

La figure (3.5) représente le schéma de simulation de convertisseur de type SEPIC alimenté par un GPV sous ISIS PROTEUS.

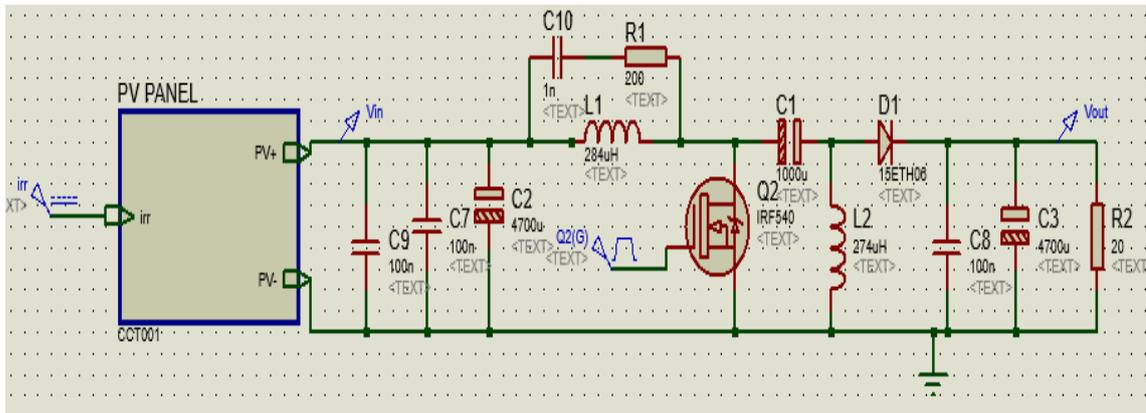


Figure (3. 5) : Simulation d'un convertisseur DC-DC de type SEPIC alimenté par GPV sous PROTEUS.

Pour tester ce convertisseur on a appliqué un signal carré de fréquence de 20KHz et un rapport cyclique de 25% puis de 75% sur la gâchette de transistor. Les courbes résultant sont représenté par la figure suivant :

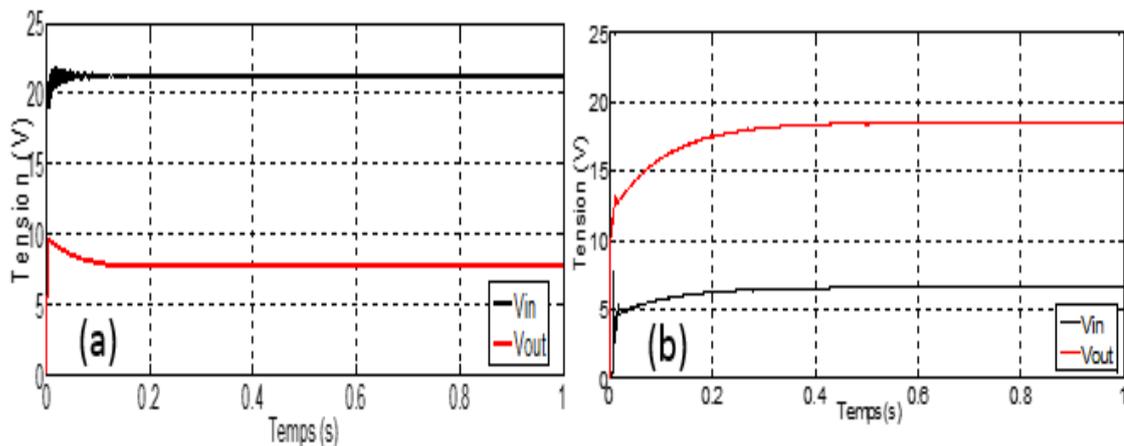


Figure (3. 6) : courbe résultant de test de convertisseur SEPIC, (a)  $\alpha=0.25$ , (b)  $\alpha=0.75$

Selon les courbes on remarque que :

- Pour  $\alpha=0.25$  la tension de sortie  $V_{out}$  est trois fois inférieure à la tension d'entrée  $V_{in}$ ,
- Pour  $\alpha=0.75$  la tension de sortie  $V_{out}$  est trois fois supérieure à la tension d'entrée  $V_{in}$ .

Alors, le convertisseur SEPIC sous PROTEUS est bien fonctionné.

### 3.4. ARDUINO MEGA2560

La carte d'ARDUINO est une carte électronique programmable permet d'apprendre l'électronique (en s'amusant) tout en se familiarisant avec la programmation informatique [33]. Ces cartes permettent un accès simple et peu coûteux à l'informatique embarquée. De plus, elles sont entièrement libres de droit, autant sur l'aspect du code source (Open Source) que sur l'aspect matériel (Open Hardware). Ainsi, il est possible à tout utilisateur de refaire sa propre carte ARDUINO dans le but de l'améliorer ou d'enlever des fonctionnalités inutiles à son projet. Le langage ARDUINO se distingue des langages utilisés dans l'industrie de l'informatique embarquée par sa simplicité. En effet, beaucoup de bibliothèques et de fonctionnalités de base sont disponibles ce qui permet de faciliter la réalisation des prototypes ou des petites applications [6].

Au fil des ans, les concepteurs d'ARDUINO ont mis au point un certain nombre de modèles de cartes nous citons la Diecimila (La première carte Arduino sortie en 2007), Nano en 2008, Mega en 2009, Uno et Mega2560 en 2010, Mega ADK en 2011, Micro en 2012...etc.

Dans notre système on a utilisé l'ARDUINO Mega2560 comme une unité de commande ou de décisions. Elle permet d'effectuer les calculs correspondants et commander l'interrupteur du convertisseur par un algorithme MPPT.

La carte ARDUINO Mega2560 est basée sur un ATMega2560 cadencé à 16 MHz. Elle dispose de 54 E/S dont 14 PWM, 16 analogiques et 4 UARTs (hardware serial ports). Elle est idéale pour des applications exigeant des caractéristiques plus complètes que l'Uno. Des connecteurs situés sur les bords extérieurs du circuit imprimé permettent d'enficher une série de modules complémentaires [33].

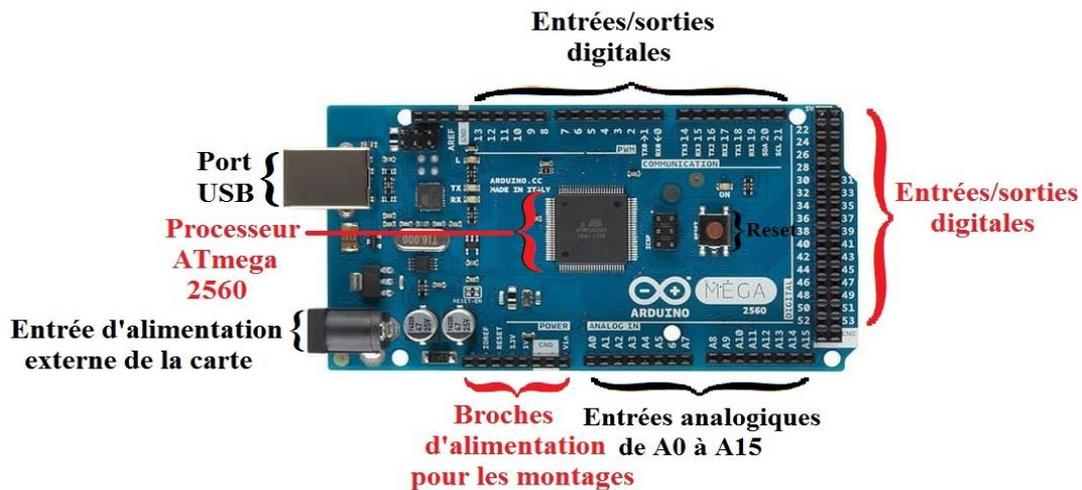


Figure (3. 7) : Présentation de la carte ARDUINO Méga 2560

Cette carte dispose :

- de 54 broches numériques d'entrées/sorties (dont 14 peuvent être utilisées en sorties PWM (largeur d'impulsion modulée)),
- de 16 entrées analogiques (qui peuvent également être utilisées en broches entrées/sorties numériques),
- de 4 UART (port série matériel),
- d'un quartz 16Mhz,
- d'une connexion USB,
- d'un connecteur d'alimentation jack,
- d'un connecteur ICSP (programmation "in-circuit"),
- et d'un bouton de réinitialisation (reset).

Elle contient tout ce qui est nécessaire pour le fonctionnement du microcontrôleur, Pour pouvoir l'utiliser et se lancer, il suffit simplement de la connecter à un ordinateur à l'aide d'un câble USB (ou de l'alimenter avec un adaptateur secteur ou une pile, mais ceci n'est pas indispensable, l'alimentation étant fournie par le port USB).

### 3.4.1. Caractéristiques techniques de la carte Arduino MEGA 2560

Tableau (3. 3) : Caractéristiques techniques de la carte Arduino MEGA 2560 [33].

Microcontrôleur	ATmega2560
Tension de fonctionnement	5V
Tension d'alimentation (recommandée)	7-12V
Tension d'alimentation (limites)	6-20V
Broches E/S numériques	54 (dont 14 disposent d'une sortie PWM)

Broches d'entrées analogiques	16 (utilisables en broches E/S numériques)
Intensité maxi disponible par broche E/S (5V)	40 mA (ATTENTION : 200mA cumulé pour l'ensemble des broches E/S)
Intensité maxi disponible pour la sortie 3.3V	50 mA
Intensité maxi disponible pour la sortie 5V	Fonction de l'alimentation utilisée - 500 mA max si port USB utilisé seul
Mémoire Programme Flash	256 KB dont 8 KB sont utilisés par le bootloader
Mémoire SRAM (mémoire volatile)	8 KB
Mémoire EEPROM (mémoire non volatile)	4 KB
Vitesse d'horloge	16 MHz

### 3.4.2. la programmation d'ARDUINO

L'environnement de programmation de la carte Arduino est un IDE (Integrated Development Environment) dédié au langage Arduino, le logiciel Arduino IDE permet d'écrire les programmes, appelés « Sketch » de les compiler et de les transférer dans la carte Arduino à travers une liaison USB [6].

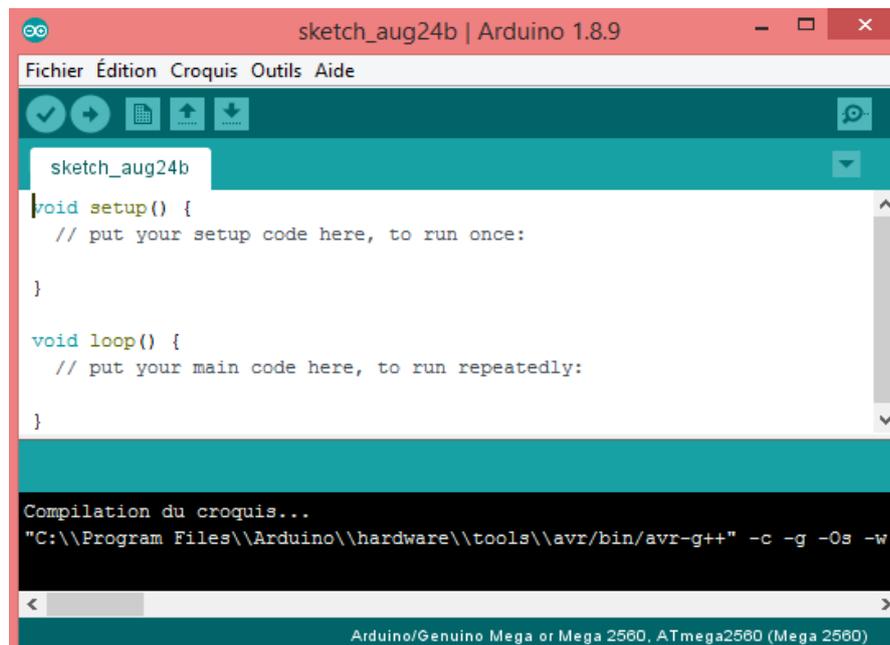


Figure (3. 8) : l'interface visuelle du logiciel ARDUINO IDE.

Le langage de l'ARDUINO IDE est un mélange entre le C et le C++, il possède un jeu d'instruction très riche. En plus de très nombreuses bibliothèques sont disponibles, gratuitement, pour communiquer avec le matériel connecté à la carte [6].

### 3.5. les capteurs de courant et de tension

Il existe toute sorte de mini-cartes qui sont utilisables avec ARDUINO. Il sera alors facile de réaliser et d'expérimenter un montage spécifique avec des cartes précâblées

comme des capteurs de température, un module de détection à ultra-sons, un afficheur à LED...pour notre travail, seulement deux capteurs sont nécessaires : capteur de courant et capteur de tension.

### 3.5.1. Capteur de courant

Nous avons utilisé le capteur de courant à effet Hall de type ACS712 qui nous fournit une tension exploitable. Les capteurs de courant ACS712 ont différentes gammes de mesure de  $\pm 5A$ ,  $\pm 20$  et  $\pm 30$ . La seule différence entre ces gammes de mesure est dans leur sensibilité. [6]

Nous utilisons le capteur ACS712-20A qui mesurent le courant allant  $+20A$ , et que nous avons trouvé d'avoir une sensibilité de  $100mV/A$

Le capteur génère une tension de sortie qui est directement proportionnel au courant circulant à travers le circuit. C'est un dispositif actif qui signifie qu'elle a besoin d'une alimentation de tension  $V_{cc}$  pour son fonctionnement. En fonctionnement à vide, la tension de sortie est égale à  $V_{CC}/2$  et lorsque la charge est connectée, la tension de sortie est égale à [6]:

$$V_{cc}(V) = \frac{V_{cc}(V)}{2} + \text{sensibilité} \left(\frac{mV}{A}\right) * \text{courant} (A) \quad (3.1)$$

La valeur  $V_{CC}/2$  est l'offset de notre capteur qui compense les valeurs négatives instantanées du courant, donc nous avons à la sortie du capteur de courant une tension qui varie entre 0 et 5V.

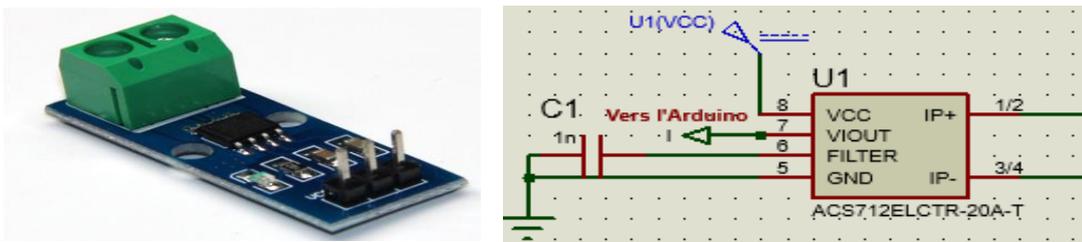


Figure (3. 9) : le capteur de courant ACS712-20A et son schéma de simulation sous PROTEUS.

### 3.5.2. Capteur de tension

Pour les différents algorithmes MPPT la mesure de tension est importante pour calculer la valeur de puissance PV. La tension à mesurer pour notre application aller jusqu'à 21.9V donc elle dépasse le seuil de tolérance de la carte ARDUINO qui est 5V. Pour éviter la destruction de la carte à cause d'une tension supérieure à 5V, il convient d'utiliser un diviseur de tension qui abaissera la tension à mesurer vers le seuil de tolérance de l'ARDUINO. La tension de sortie du diviseur est donnée par la formule suivante :

$$V_d = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_{pv} \quad (3.2)$$

Le schéma de simulation de diviseur de tension est représenté sur la figure suivante :

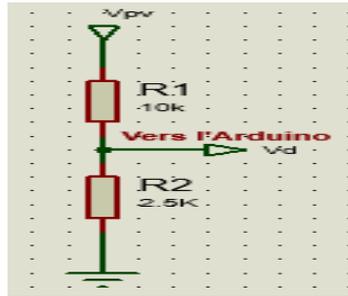


Figure (3. 10) : Schéma de simulation de diviseur de tension sous PROTEUS.

### 3.6. Résultats et discussion

#### 3.6.1. Etude d'influence de choix de pas sur les performances des algorithmes P&O et INC

Pour cette partie, l'objectif est de faire une étude comparative entre les résultats de la méthode P&O avec différents pas de perturbation du rapport cyclique. La figure (3.11) illustre les résultats obtenus par la simulation de système PV contrôlé par l'algorithme P&O avec pas de 0.01, de 0.001, un pas variable entre les deux valeurs (0.01 et 0.001) selon l'algorithme proposé par [27] et un pas variable entre plusieurs valeurs selon l'algorithme proposé par [28], les deux algorithmes de pas variable sont présentés dans le chapitre précédent (les résultats sont représentés par logiciel MATLAB).

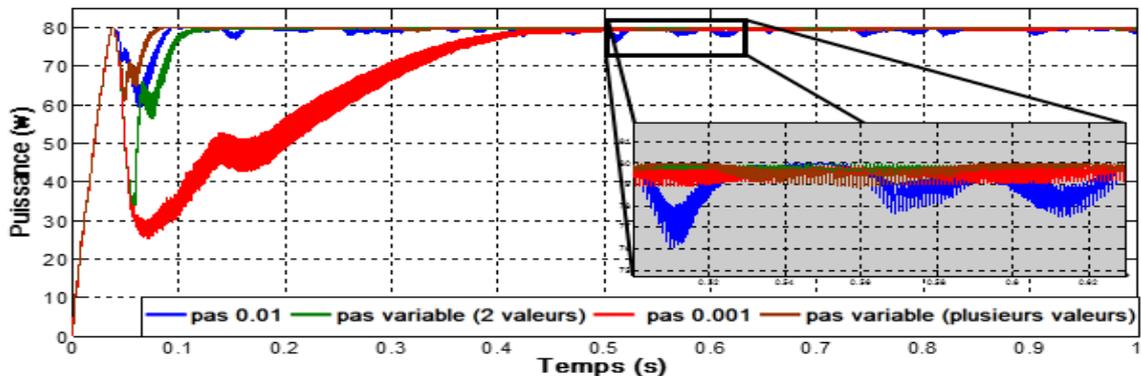


Figure (3. 11) : Puissance à la sortie de GPV pour l'algorithme P&O avec différents pas.

La figure (3.12) représente les résultats obtenus par le même travail mais avec l'algorithme INC.

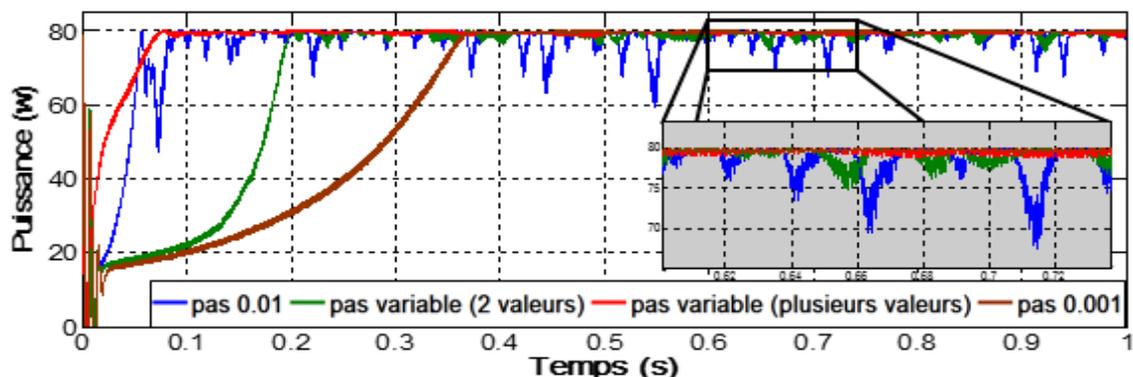


Figure (3. 12) : Puissance à la sortie de GPV pour l'algorithme INC avec différents pas.

Selon les résultats présentés dans les deux figures on peut conclure pour les deux algorithmes :

- Un grand pas donne un algorithme converge rapidement à la valeur optimale de puissance générée par le GPV, cependant il provoque une large gamme des oscillations autour de cette valeur.
- Avec un pas petit, l'algorithme converge lentement, mais il a une faible gamme des oscillations autour de la valeur optimale de puissance.
- Les algorithmes de pas variable permettent de faire un équilibre acceptable entre un bon temps de convergence et une faible gamme d'oscillation avec une amélioration de performance plus le nombre de pas augment.

Pour l'algorithme avec pas variable on va utiliser celle qui permet de le pas de varier entre plusieurs valeurs pour la suite.

### 3.6.2. Etude comparative des performances de différentes commandes MPPT

Pour cette partie, l'objectif est de faire une étude comparative entre les performances de différentes méthodes de MPPT (P&O, INC, FCC, FCO, Hill Climbing, ICI, ADC, P&O et INC avec pas variable) sous des conditions climatiques standards et variables.

#### 3.6.2.1. Fonctionnement sous des conditions climatiques standards

Les conditions atmosphériques choisies dans cette partie sont les conditions standards de fonctionnement (un rayonnement de  $1000 \text{ W/m}^2$  et une température de  $25^\circ\text{C}$ ) donc la puissance maximale désirée en sortie du GPV est  $80 \text{ W}$ . Les résultats obtenus sont donnés par la figure (3.13) :

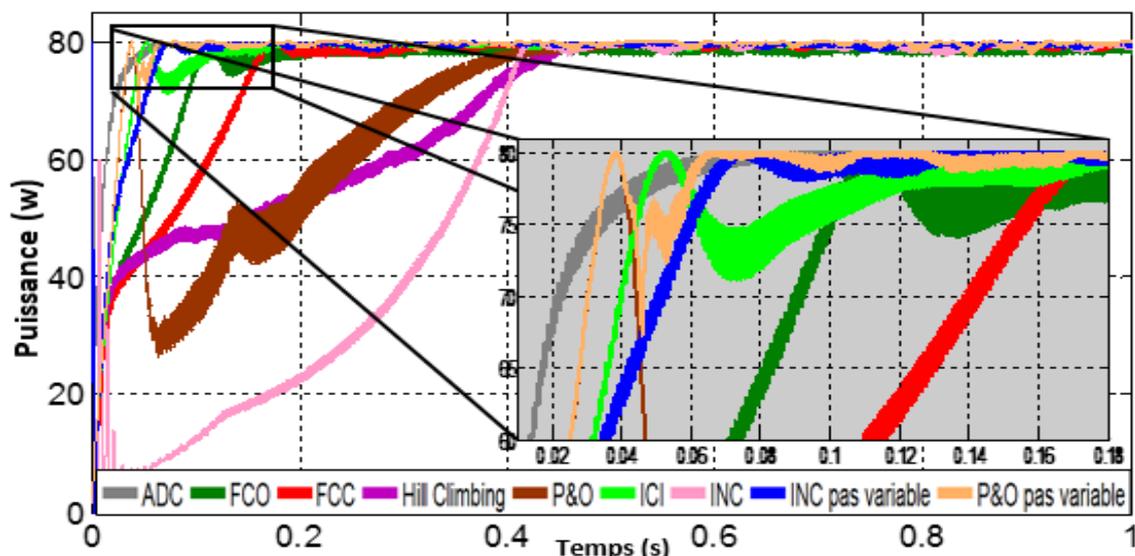


Figure (3.13) : Puissance à la sortie de GPV avec différentes commandes MPPT sous STC

3.6.2.2. Fonctionnement avec des changements brusques du niveau de rayonnement

La Figure (3.14) représente les résultats de simulation de différentes commandes MPPT avec des changements brusques de l'éclairement solaire qui varie de 1000W/m<sup>2</sup> à 700W/m<sup>2</sup>.

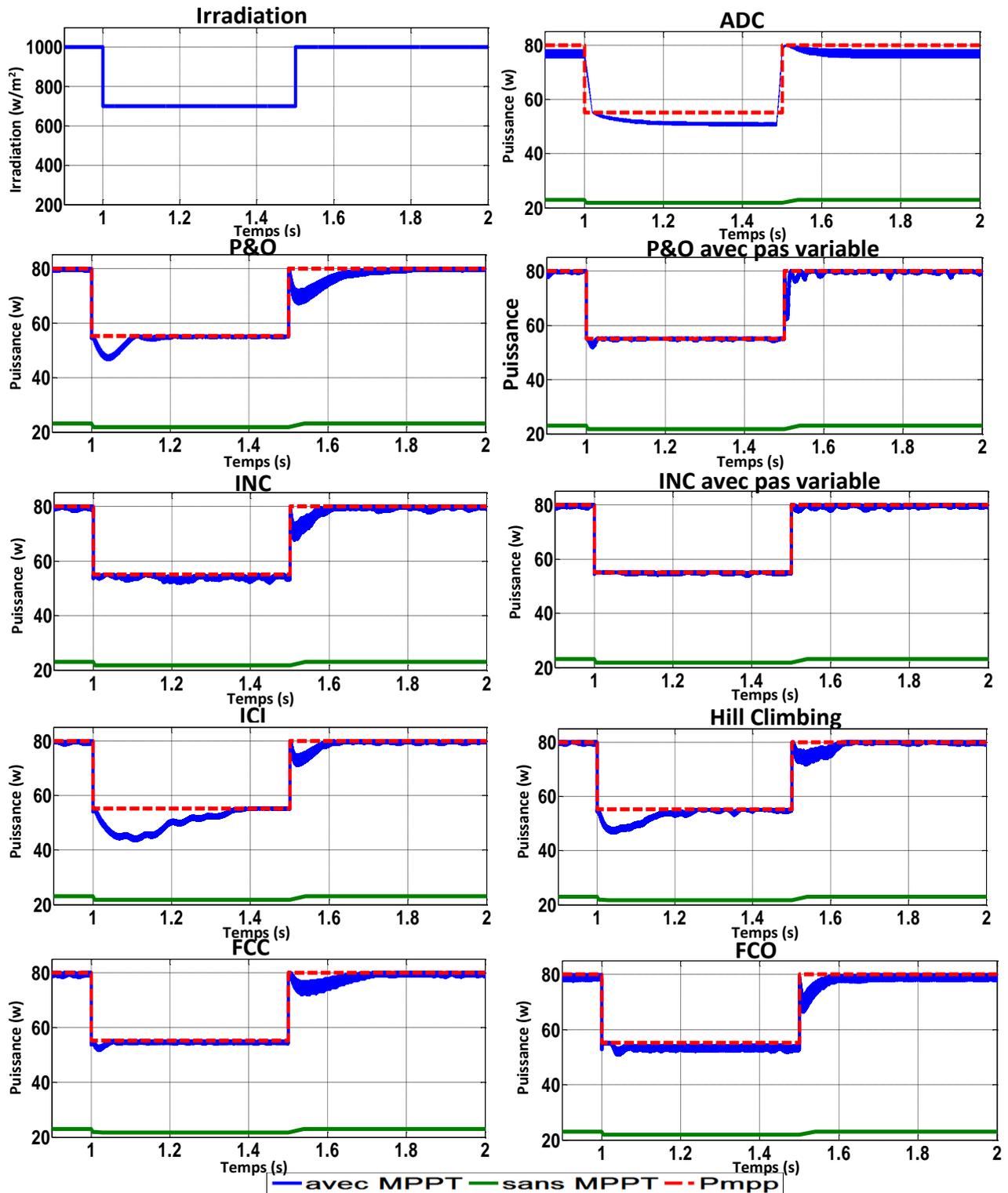


Figure (3. 14) : Puissance à la sortie de GPV avec différentes commandes MPPT sous des changements brusques du niveau de rayonnement.

3.6.2.3. Fonctionnement avec des changements progressif du niveau de rayonnement

La Figure (3.15) représente les résultats de simulation de différentes commandes MPPT avec des changements progressifs de l'éclairement solaire qui varie de 1000W/m<sup>2</sup> à 700W/m<sup>2</sup>.

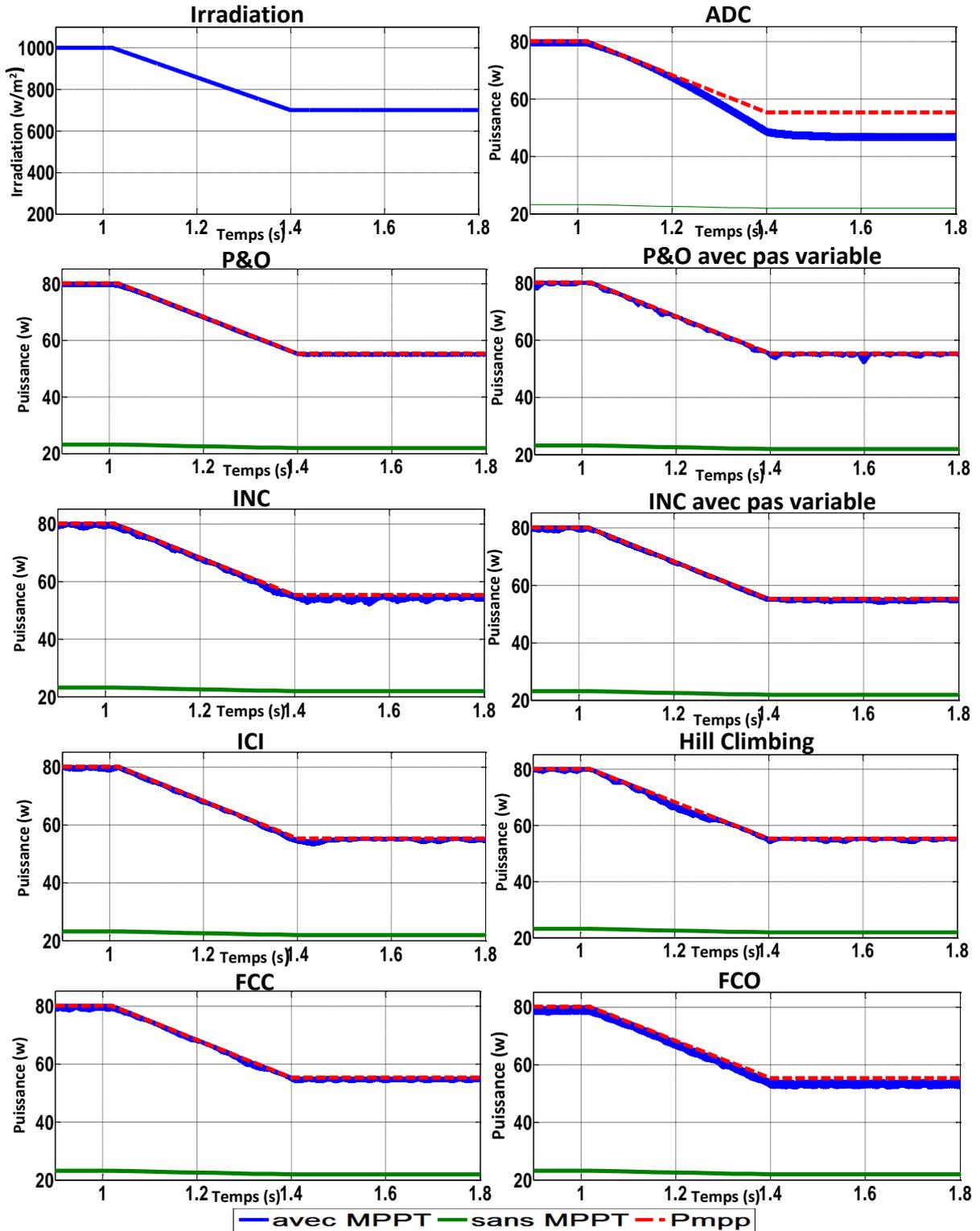


Figure (3. 15) : Puissance à la sortie de GPV avec différentes commandes MPPT sous des changements progressifs du niveau de rayonnement.

#### 3.6.2.4. Discussion

- L'algorithme P&O est un algorithme classique et simple. En générale, cet algorithme dépend fortement des conditions initiales et il présente quelques problèmes liés aux oscillations autour du PPM. et son mauvais comportement suite à un changement brusque de l'éclairement.
- L'algorithme INC semble une amélioration de l'algorithme P&O. En effet, il se comporte mieux lors d'un changement rapide des conditions météorologiques. Cependant, c'est un algorithme plus compliqué que le précédent.
- Les algorithmes basés sur la mesure d'une fraction de tension du circuit ouvert (FCO) ou d'une fraction de courant de court-circuit (FCC) sont très simples et faciles à implémenter. L'inconvénient majeur est les pertes d'énergie et l'arrêt de transfert de puissance lorsqu'on mesure les grandeurs  $V_{oc}$  et  $I_{cc}$ .
- L'algorithme Hill Climbing est largement utilisé dans les systèmes PV en raison de sa simplicité et parce qu'il ne nécessite pas d'étude ou de modélisation préalable des caractéristiques de la source et peut tenir compte de la dérive des caractéristiques résultant du vieillissement, de l'ombrage ou d'autres irrégularités de fonctionnement. Cependant, son inconvénient est son mauvais comportement suite à un changement climatique.
- L'algorithme ADC est un algorithme très rapide et simple mais son inconvénient majeur est la variation de rendement avec la variation d'irradiation.
- Par rapport à l'algorithme P&O, L'algorithme ICI est un algorithme utilise un seul capteur en plus il est rapide et stable mais son inconvénient est son mauvais comportement suite à un changement brusque de l'éclairement.
- Les algorithmes P&O et INC avec pas variable son des algorithmes robuste, très rapide et efficace. En effet, ces algorithmes fonctionnent au point optimal presque sans oscillations.

Le tableau suivant résume les principales spécifications des différents algorithmes MPPT précédemment étudiés. Nous avons évalué et comparé ces algorithmes en termes de connaissance technique des paramètres du panneau PV, complexité, rapidité et précision.

Tableau (3. 4) : Caractéristiques majeures des commandes MPPT.

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

### 3.6.3. Influence de choix de type convertisseur DC-DC sur les performances des méthodes MPPT

Tous les résultats présentés précédemment sont des résultats obtenus avec le convertisseur DC-DC type BOOST. La question qui se pose est-ce que le type de convertisseur influé sur les performances des algorithmes MPPT ?

Pour répondre à cette question, Nous simulions les différentes méthodes vues précédemment avec un convertisseur BUCK-BOOST type SEPIC. Les résultats sont illustrés dans les figures suivantes :

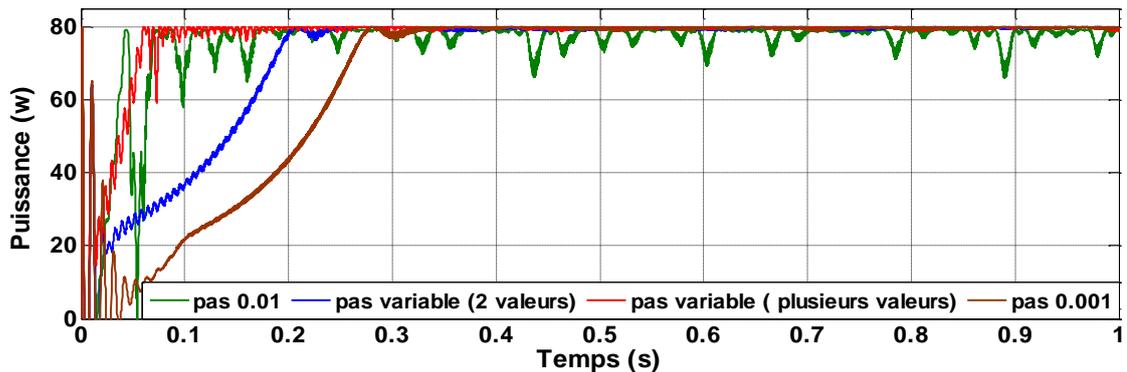


Figure (3. 16) : Puissance à la sortie de GPV pour l’algorithme P&O avec différent pas avec convertisseur type SEPIC.

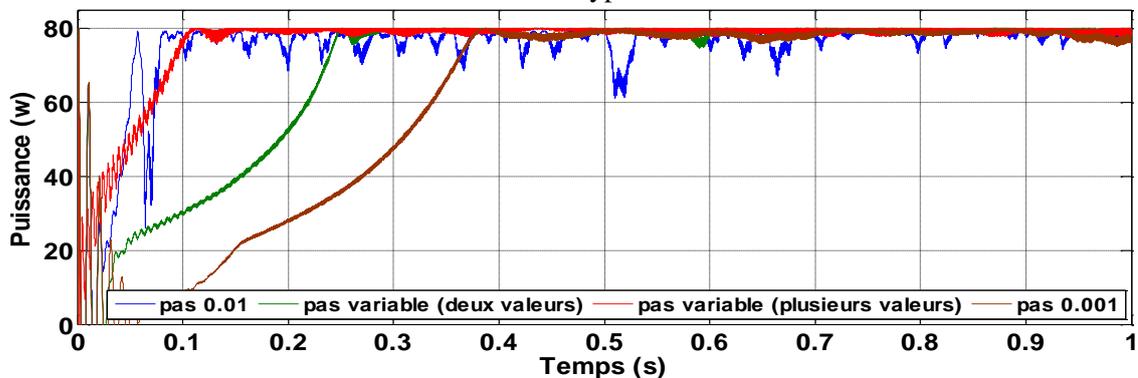


Figure (3. 17) : Puissance à la sortie de GPV pour l’algorithme INC avec différent pas avec convertisseur type SEPIC.

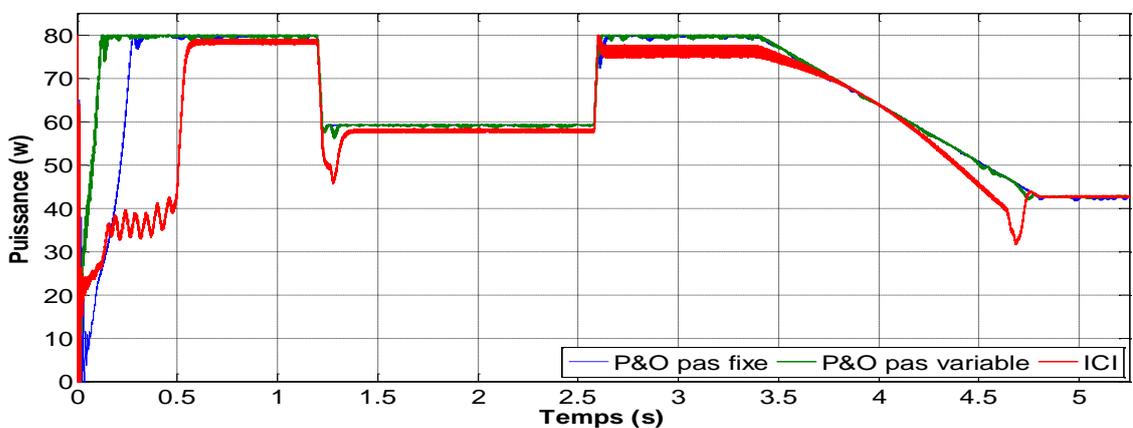


Figure (3. 18) : Puissance à la sortie de GPV pour les algorithmes P&O, ICI et P&O pas variable avec convertisseur type SEPIC sous un éclairement variable.

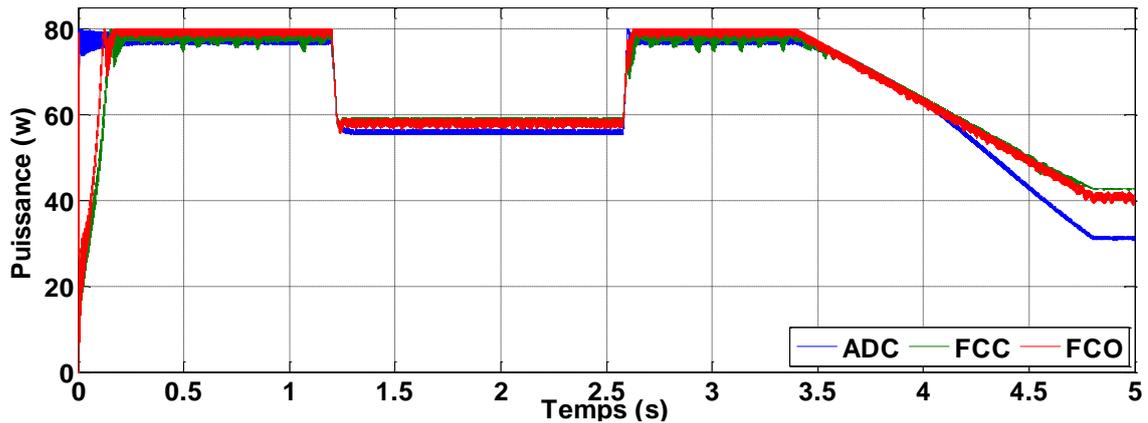


Figure (3. 19) : Puissance à la sortie de GPV pour les algorithmes ADC, FCC et FCO avec convertisseur type SEPIC sous un éclairage variable

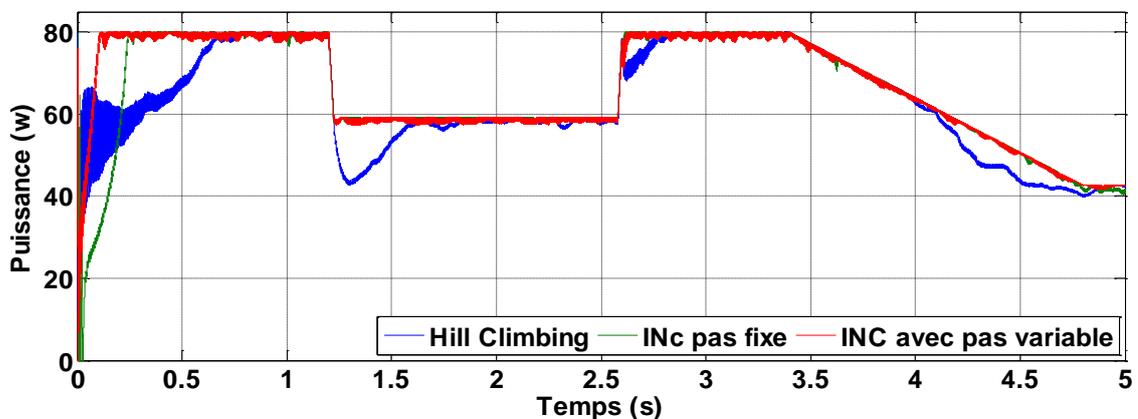


Figure (3. 20) : Puissance à la sortie de GPV pour les algorithmes INC, Hill Climbing et INC pas variable avec convertisseur type SEPIC sous un éclairage variable.

### Discussion :

Le convertisseur DC-DC de type SEPIC est un convertisseur pouvant fonctionner comme un convertisseur élévateur ou abaisseur au contraire un convertisseur de type BOOST qui est un convertisseur élévateur uniquement.

En même temps, ce dernier à une large gamme d'évaluation (de 0 à 1) au contraire pour le SEPIC cette gamme est réduite à la moitié (de 0.5 à 1).

Cependant, selon les résultats obtenus avec les deux convertisseurs on peut remarquer que la différence entre les deux résultats est un changement négligeable dans la précision, le temps de convergence et la largeur d'oscillations de quelque algorithme.

Selon le changement dans l'algorithme programmé, l'algorithme ADC est le seul algorithme qui fait des modifications dans son algorithme selon le type d'hacheur utilisé (ANNEXE A).

Donc on peut conclure que le choix de convertisseur ce fait selon le besoin d'utilisateur (abaisseur, éleveur...) et n'influe pas sur les performances des algorithmes MPPT.

### 3.7. Conclusion

Ce chapitre est consacré à la simulation sous PROTEUS d'un système PV contrôlé par différents types d'algorithmes MPPT. Le système comprend un générateur photovoltaïque, un convertisseur DC-DC, (BOOST puis SEPIC), une carte ARDUINO Mega 2560 qui est utilisée pour commander le convertisseur, une charge résistive, des capteurs du courant et de tension et un afficheur LCD pour afficher les résultats en temps réel.

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.

Le suivi du MPP est fortement lié au choix de pas du rapport cyclique (les algorithmes utilisant des pas variables ou des pas adaptatives sont meilleurs que ceux utilisant un pas fixe).

On peut conclure aussi que le choix de type de convertisseur DC-DC n'influe pas sur les performances des méthodes MPPT.

## **Conclusion générale**

---

À l'ère du développement durable, la technologie photovoltaïque a montré son potentiel significatif comme source d'énergie renouvelable. Ce mémoire est centré sur l'amélioration des performances et du rendement d'un système photovoltaïque. L'objectif principal a été de faire une étude comparative entre quelques méthodes MPPT et de trouver la plus efficace et optimale permettant ainsi d'extraire le maximum de puissance disponible à partir du générateur photovoltaïque.

Pour atteindre cet objectif, Dans un premier temps, nous avons présenté le rayonnement solaire et la conversion du rayonnement solaire par effet PV, ainsi le générateur PV et sa modélisation. Cette modélisation a été ensuite appuyée par simulation sous PROTEUS du modèle d'un panneau photovoltaïque de type 80M(36) qui fournit une puissance maximale de 80 W sous des conditions atmosphériques standards. Cette simulation nous a permis d'une part de valider le modèle du panneau 80M(36) et d'autre part d'étudier l'effet du changement des conditions climatiques (ensoleillement et température) sur les caractéristiques électriques (I-V et P-V) du panneau .

Ensuite, nous avons étudié deux types de convertisseur DC-DC (BOOST et SEPIC) pour utiliser dans ce travail. Après avoir abordé le problème de poursuite du point de puissance maximale dans les systèmes de conversion photovoltaïques alors, nous avons présenté la commande MPPT et ces quelque diffèrent méthodes qui ont été proposées dans la littérature.

Dans un deuxième temps, nous présentons l'étude et la simulation des différents composants du système PV : le GPV, les convertisseurs, le capteur de tension, le capteur de courant et la carte ARDUINO méga 2560 comme unité de commande.

A cause de pandémie de coronavirus l'étude s'est limitée sur le plan théorique et la simulation, elle ne passe pas à l'étape de réalisation. Cependant on a montré, par simulation, que l'algorithme INC donne des résultats meilleurs que le P&O. D'autre part, la méthode du courant de court-circuit a de meilleures performances que la méthode de tension de circuit ouvert. On a remarque aussi que les deux algorithmes ICI et hill climbing représente un mauvais comportement suite à un changement de l'éclairément. On a montré aussi que l'algorithme ADC qui basé sur la relation entre la charge, la tension, et la puissance du GPV donne une bonne performance en terme de rapidité de convergence et stabilité autour du MPP avec les deux types de convertisseurs.

Parmi tous ces algorithmes, le P&O et INC avec pas variable sont les algorithmes qui montrent un bon comportement et des meilleures performances par rapport aux autres méthodes.

Comme perspective, nous serions intéressés par les points suivants :

- Application de ces algorithmes d'optimisation MPPT sur d'autres types de charge comme le système de pompage photovoltaïque ou une batterie (le système photovoltaïque autonome).
- Application d'un autre algorithme d'optimisation plus robuste telle que l'algorithme basé sur les différentes méthodes d'intelligence artificiel (réseau de neurone, l'algorithme neuro-floue...) ou des techniques de commande plus robuste telle que la commande par mode glissant.
- Utilisation des techniques d'optimisations méta heuristique comme les algorithmes génétiques, et Particule Swarm Optimization (PSO) pour l'optimisation de rapport cyclique en temps réel.

---

## Bibliographie

- [1] R.KHENFER, Détection et isolation de défauts combinant des méthodes à base de données appliquées aux systèmes électro-énergétiques, Thèse Doctorat ,université Ferhat abbés -SETIF, 2015.
- [2] N. DEBILI, Etude et optimisation en environnement Matlab/Simulink d'un système de pompage Photovoltaïque, mémoire de magister, université de CONSTANTINE, 2015.
- [3] M.Bechouat, Commandes non linéaires des systèmes photovoltaïques, Thèse de doctorat , universite 8 mai 1945 GUELMA, 2017.
- [4] Y.LASMI, Optimisation de la poursuite du point de puissance maximale (MPPT) d'un système photovoltaïque par les techniques intelligentes, mémoire de magister, université de SETIF, 2013.
- [5] F.BENADEL, Etude Et Simulation D'une Commande MPPT Pour Système PV, mémoire de Master, université de Mohamed Boudiaf - M'SILLA, 2016.
- [6] T.Fethallah et O. LAMOUDI, Etude et Réalisation d'un Système Photovoltaïque Optimisé par Logique Floue, mémoire de Master, université Kasdi Merbah Ouargla, 2018.
- [7] A.Mekemeche, Modélisation à deux dimensions des propriétés physiques de cellules solaires au silicium à base de substrat de type n. Étude de quelques cas particuliers de cellules innovantes , Thèse Doctorat, Université Abdel Hamid Ibn Badis de MOSTAGANEM, 2017.
- [8] A.LABOURET et M.VILLOZ, Installation photovoltaïque, xsx: le moniteur, 2006.
- [9] M. H. HORSIN et B.MULTON, Energie électrique: génération photovoltaïque, v éd., paris: Culture Sciences de l'Ingénieur, 2020.
- [10] B.BOUDERHEM et Y.SALHI, Conception et Réalisation d'un Hacheur Boost MPPT à Base d'une Carte ARDUINO Application PV, mémoire de Master, université Kasdi Merbah-OUARGLA, 2017.
- [11] A.AZIZI, Modélisation optimisation d'un système de production d'énergie photovoltaïque avec un système de stockage hybride, Thèse Doctorat, université BADJI MOKHTAR-ANNABA, 2019.

- 
- [12] E. Schiller, le pompage photovoltaïque : manuel de cours à l' intention des ingénieurs et des techniciens , - publ. En collab. Avec : iepf, université d'Ottawa, eier, crepa, 1998.
- [13] Unité de recherche d'énergies renouvelables au milieu saharienne, l'équipement de gisement solaire.
- [14] K.HELALI, Modélisation d'une Cellule Photovoltaïque : Etude Comparative, mémoire de magister, université MOULOUD MAMMERI de TIZI-OUZOU 2012.
- [15] T.Mambrini, Caractérisation de panneaux solaires photovoltaïques en conditions réelles d'implantation et en fonction des différentes technologie, Thèse Doctorat, universite paris-sud, école doctorale STITS, Laboratoire de Génie Electrique de Paris.
- [16] C.CABAL, Optimisation énergétique de l'étage d'adaptation électronique dédié à la conversion photovoltaïque, Thèse Doctorat, universite de TOULOUSE, 2008.
- [17] T.TOUAMA, N.HAFIDI, Commande d'un MPPT avec un convertisseur DC/DC pour un système photovoltaïque, mémoire de Master, université de Mohamed Boudiaf - M'SILLA, 2019.
- [18] F. P. G.Séguier, Electronique de puissance Structures, fonctions de base, principales applications, 9e éd., DUNOD, 2011.
- [19] Y.NETTARI, Commandes robustes et intelligentes des convertisseurs DC-DC , Mémoire de Magister, universite ferhat abbas SETIF1, 2014.
- [20] Y. A.ABID, Etude et dimensionnement d'un convertisseur SEPIC pour une application photovoltaïque, memoire master, Université Abou Bekr Belkaïd de TLEMCEM, 2017.
- [21] A.Hanen, H.Abid, K.Loukil, A.Toumi et M. Abid, Etude comparative de cinq algorithmes de commande MPPT pour un système photovoltaïque, Conférence Internationale des Energies Renouvelables (CIER'13) Tunisie, 2013.
- [22] B.HANOUN, Etude et réalisation d'un hacheur Boost destiné à l'implémentation des commandes à base de DSP, Memoire de master, universite larbi ben m'hidi de OUM EL BOUAGHI, Juin 2016.
- [23] A.AZIZ, Propriétés électriques des composants électroniques minéraux et organiques, Conception et modélisation d'une chaîne photovoltaïque pour une meilleure exploitation de l'énergie solaire , universite TOULOUSE, 2006.
- [24] Soediby, E.Budi et M. Ashari, The ComparativeStudy of Buck-Boost, Cuk, Sepicand Zeta Converters for Maximum Power Point Tracking Photovoltaic Using P&O Method, Proc. of 2015 2nd Int. Conference on Information Technology,

---

Computer and Electrical Engineering (ICITACEE), INDONESIA, Octobre 2015.  
DOI: 10.1109/ICITACEE.2015.7437823

- [25] A.GUELAL, A.MOKHTARI et M.KHERCHI, 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, Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables, Ghardaïa – Algeria 24 - 25 Octobre 2016.
- [26] A.Talha, Développement d'une Méthode MPPT pour un Système Photovoltaïque, Premier Séminaire International sur les Energies Nouvelles et Renouvelables, SIENR'2010, Ghardaïa, Algeria, October 2010
- [27] M. Elyaquouti, S. HAKIM...et A.IHLAL, 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. Vol. 8, No. 1, March 2017, pp. 434~443 ISSN: 2088-8694, DOI: 10.11591/ijpeds.v8i1.pp434-443
- [28] H.Bahri et A.Harrag, Variable Step Size P&O MPPT Controller to Improve Static and Dynamic PV System Performances, DOI: <http://dx.doi.org/10.25073/jaec.201822.94>
- [29] A.Rhif, Etudes et Applications sur les Energies Renouvelables, International Centre for Innovation & Development –ICID– , -PET- Vol. 60 ISSN : 1737-9934.
- [30] A. BENSLIMANE et A.MERABTI, A comparative study between hill climbing algorithm and fuzzy logic controller algorithm of MPPT for GPV system, EasyChair preprint № 2695, 2020.
- [31] M. Farid, Etude comparative entre quelques méthodes de poursuite du point de puissance maximale dans les systèmes photovoltaïques, mémoire de Master, Université Abderrahmane MIRA de Bejaia , 2013.
- [32] J.William Zanotti, Walbermark M. dos Santos et D.Cruz Martins, the new mppt method for pv systems employing input characteristic impedance, Federal University of Santa Catarina, Florianópolis-BRAZIL, 2013. 978-1-4799-0272-9/13/\$31.00 ©2013 IEEE
- [33] <https://www.arduino.cc/>.

---

# ANNEXE A

## Calcul du rapport cyclique pour le convertisseur SEPIC

Pour le convertisseur DC-DC type SEPIC on a :

$$V_0 = \frac{\alpha}{1-\alpha} V_i \quad (\text{A.1})$$

$$i_i = \frac{\alpha}{1-\alpha} i_0 \quad (\text{A.2})$$

En remplaçant les équations (A.1) et (A.2) dans l'équation (2.30), on obtient :

$$R = \frac{V_0}{i_0} = \frac{\alpha^2 V_{pv}}{I_{pv} * (1-\alpha)^2} \quad (\text{A.3})$$

En multipliant le numérateur et le dénominateur par la tension  $V_{pv}$ , on obtient :

$$R = \frac{\alpha^2 V_{pv}^2}{P_{pv} * (1-\alpha)^2} \quad (\text{A.4})$$

D'où

$$R P_{pv} * (1 - \alpha)^2 = \alpha^2 V_{pv}^2 \quad (\text{A.5})$$

$$(1 - \alpha)^2 = \frac{\alpha^2 V_{pv}^2}{R P_{pv}} \quad (\text{A.6})$$

$$\alpha = 1 - \frac{\alpha V_{pv}}{\sqrt{P_{pv} * R}} \quad (\text{A.7})$$

$$\alpha \left( 1 + \frac{V_{pv}}{\sqrt{P_{pv} * R}} \right) = 1 \quad (\text{A.8})$$

La relation  $\alpha(k)$  dans l'algorithme ADC devient :

$$\alpha = \frac{\sqrt{P_{pv} * R}}{V_{pv} + \sqrt{P_{pv} * R}} \quad (\text{A.9})$$