

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE**  
**MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA**  
**RECHERCHE SCIENTIFIQUE**

*Université Abou Bekr Belkaïd de Tlemcen*

*Faculté de Technologie*

*N° attribué par la bibliothèque*

--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

**MEMOIRE DE FIN D'ETUDE POUR L'OBTENTION DU DIPLOME**  
**DE MASTER ACADEMIQUE**

**Spécialité : « Electrotechnique »**

**Option : « Commandes électriques »**

**préparé au Département de Génie Electrique et Electronique (GEE)**

**et présenté par**

***MEKKAOUI Oussama-Abdelfettah et MAMEM Anes Mohammed***

*Intitulé du mémoire*

**Etude comparative des différentes commandes**  
**MPPT d'un hacheur boost alimenté par panneau**  
**photovoltaïque**

**soutenu le 08 Juillet 2021 devant la commission d'examen composée de :**

A. BOUMEDIENNE	Président	Professeur	U.A.B - Tlemcen
S.BOURI	Encadrant	Maître de Conférences	U.A.B - Tlemcen
B. YACOUBI	Examineur	Maître de Conférences	U.A.B - Tlemcen

**Année universitaire 2020 - 2021**

---

## Dedicaces 1

Tout d'abord, je rends grâce à Dieu le tout puissant de m'avoir donné la foi et la force de mener à terme ce modeste travail que je dédie particulièrement :

À mon soutien moral et source de joie et de bonheur, celui qui s'est toujours sacrifié pour me voir réussir, mon père que Dieu lui prête longue vie, santé et joie.

À la lumière de mes jours, la source de mes efforts, la flamme de mon cœur, ma vie, mon bonheur, ma mère que j'adore qui m'a conseillé, aidé et encouragé durant toute la période de préparation de ce mémoire.

À ma sœur qui m'a été d'un grand soutien moral.

À toute la famille du plus grand au plus petit pour leurs encouragements.

À mes amis(es) pour leur soutien et leur loyauté envers ma personne.

À tout ceux qui m'ont inculqué le savoir du primaire jusqu'à l'université.

MAMEM Anes Mohammed  
Tlemcen, le 08 Juillet 2021

---

## Dedicaces 2

Tout d'abord, je rends grâce à Dieu le tout puissant de m'avoir donné la foi et la force de mener à terme ce modeste travail que je dédie particulièrement :

À mon soutien moral et source de joie et de bonheur, celui qui s'est toujours sacrifié pour me voir réussir, mon père que Dieu lui prête longue vie, santé et joie. A la lumière de mes jours, la source de mes efforts, la flamme de mon cœur, ma vie, mon bonheur, ma mère que j'adore qui m'a conseillée, aidée et encouragée durant toute la période de préparation de ce mémoire.

À mes frères et sœurs et qui m'ont été d'un grand soutien moral.

À ma famille du plus grand au plus petit pour leurs encouragements.

À mes amies pour leur soutien et leur loyauté envers ma personne.

À tous qui m'ont inculqué le savoir du primaire jusqu'à l'université.

MEKKAOUI Oussama  
Tlemcen, le 08 Juillet 2021

---

## Remerciements

Ce document présente les travaux effectués dans le cadre de notre projet de fin d'étude de Master au Département de Génie Électrique et Électronique de la Faculté de Technologie de l'Université Abou Bekr Belkaïd de Tlemcen.

En premier lieu, nous tenons à exprimer notre gratitude à notre encadrant, Docteur BOURI Sihem, Maitre de Conférences à l'Université Abou Bekr Belkaïd de Tlemcen, pour nous avoir proposé et dirigé ce travail, nous la remercions pour nous avoir fait profiter de son expérience, pour orientations qui nous ont permis de mener à bien ce travail.

Nous sommes sensibles à l'honneur que nous a fait monsieur Abdelmadjid BOUMEDIENNE, Professeur à l'Université Abou Bekr Belkaïd, pour avoir accepté de présider et de nous honorer de sa présence au sein du jury de soutenance du présent mémoire ; qu'il trouve ici l'expression de notre reconnaissance et de notre respect.

Enfin, nous tenons également à adresser nos vifs remerciements au Docteur Yacoubi Boumediene, Maitre de Conférences à l'Université Abou Bekr Belkaïd, nous le remercions chaleureusement pour avoir accepté d'examiner le présent mémoire et pour ses observations et remarques pertinentes et constructives.

Nous tenons aussi remercier nos sincères remerciements aux enseignants du département Génie Électrique et Électronique pour leurs enseignements et les cours intéressants qu'ils nous ont prodigués pendant notre cursus à l'Université Abou Bekr Belkaïd de Tlemcen.

Merci enfin à tous ceux qui, de près ou de loin, nous ont aidés et donc ont contribué au succès de ce travail.

*MEKKAOUI Oussama-Abdelfettah*

*MAMEM Anes Mohammed  
Tlemcen, le 08 Juillet 2021*

# TABLE DES MATIÈRES

DEDICACES 1	i
DEDICACES 2	ii
REMERCIEMENTS	iii
NOMENCLATURE	viii
GLOSSAIRE	x
INTRODUCTION GÉNÉRALE	1
<b>I GÉNÉRALITÉ SUR LES SYSTÈMES PHOTOVOLTAÏQUES</b>	<b>3</b>
I.1 INTRODUCTION	4
I.2 ÉNERGIE PHOTOVOLTAÏQUE HISTORIQUE	4
I.2.1 les avantages de l'énergie photovoltaïque	5
I.2.2 Les inconvenant de l'énergie photovoltaïque	5
I.3 LE RAYONNEMENT SOLAIRE	6
I.4 L'EFFET PHOTOVOLTAÏQUE	7
I.5 CELLULE PHOTOVOLTAÏQUE	8
I.5.1 Types de cellules photovoltaïques	9
I.5.1-a Les cellules monocristallines	9
I.5.1-b Les cellules poly-cristallines :	9
I.5.1-c Cellule en silicium amorphe :	9
I.5.2 Modélisation de cellule PV	10
I.5.2-a Modèle idéal	10
I.5.2-b Modèle réel à une diode	11
I.6 GÉNÉRATEUR PHOTOVOLTAÏQUE (GPV)	12
I.7 PROTECTION CLASSIQUE DE GPV	14
I.8 PANNEAU PHOTOVOLTAÏQUE 80M(36)	14
I.8.1 Modélisation et Simulation du module 80M(36) sous logiciel PROTEUS	15
I.8.2 Influence de température et d'éclairement sur les caractéristiques de cellule PV	17
I.9 COUPLAGE DIRECT SOURCE-CHARGE	18
I.10 CONCLUSION	20
<b>II TECHNIQUES DE MAXIMISATION DE LA PUISSANCE</b>	<b>21</b>
II.1 INTRODUCTION	22

---

II.2	CONVERTISSEURS <i>DC – DC</i> . . . . .	23
II.2.1	Convertisseur de type BOOST . . . . .	24
II.2.1-a	Principe de fonctionnement . . . . .	24
II.2.1-b	Choix des composants du convertisseur BOOST . . . . .	25
II.3	COMMANDES <i>MPPT</i> CLASSÉES PAR TYPE DE RECHERCHE . . . . .	26
II.3.1	Méthode indirecte . . . . .	26
II.3.2	Méthode directe . . . . .	26
II.4	LES DIFFÉRENTS ALGORITHMES DE COMMANDES <i>MPPT</i> . . . . .	27
II.4.1	Algorithme Perturber et Observer ( <i>P&amp;O</i> ) : . . . . .	27
II.4.2	Les commandes <i>MPPT</i> basées sur le principe de la logique floue ( <i>FLC</i> ) . . . . .	28
II.4.3	L'algorithme de la conductance incrémentale ( <i>INC</i> ) . . . . .	30
II.4.4	Technique <i>MPPT</i> basée sur <i>PSO</i> . . . . .	31
II.4.5	Autres méthodes <i>MPPT</i> . . . . .	33
II.5	CONCLUSION . . . . .	35
III	SIMULATION ET RÉSULTATS . . . . .	<b>37</b>
III.1	INTRODUCTION . . . . .	38
III.2	SIMULATION DES PARTIES DU SYSTÈME PHOTOVOLTAÏQUE . . . . .	38
III.2.1	Simulation du panneau photovoltaïque . . . . .	38
III.2.2	Simulation du hacheur BOOST . . . . .	40
III.3	SIMULATION DU SYSTÈME PHOTOVOLTAÏQUE AVEC CONTRÔLE <i>MPPT</i> . . . . .	41
III.3.1	Simulation de la Méthode <i>P&amp;O</i> . . . . .	42
III.3.2	Simulation de la méthode <i>INC</i> . . . . .	44
III.3.3	Simulation de la Méthode logique floue . . . . .	47
III.3.4	Simulation de la Méthode <i>PSO</i> . . . . .	48
III.4	CONCLUSION . . . . .	50
	CONCLUSION GÉNÉRALE . . . . .	<b>51</b>
	BIBLIOGRAPHIE . . . . .	<b>53</b>

# TABLE DES FIGURES

I.1	évolution de la puissance photovoltaïque installée au niveau mondial suivant les différentes zones géographiques [9] . . . . .	5
I.2	courbes d'ensoleillement avec différentes conditions atmosphérique et météorologique de la wilaya d'Adrar (latitude $30^\circ$ ) [13] . . . . .	7
I.3	courbes d'ensoleillement avec différentes latitudes de la wilaya d'Adrar (l'année 2018) [13] . . . . .	7
I.4	Caractéristique électrique d'une cellule photovoltaïque . . . . .	8
I.5	Les principaux types de cellule : a) Cellule monocristalline ; b) Cellule polycristalline ; c) Cellule amorphe . . . . .	9
I.6	circuit équivalent du modèle idéal d'une cellule . . . . .	10
I.7	circuit équivalent du modèle réel d'une cellule <i>PV</i> . . . . .	11
I.8	Générateur photovoltaïque . . . . .	12
I.9	les caractéristiques électriques d'une association de $n_s$ cellules <i>PV</i> identiques en série . . . . .	12
I.10	les caractéristiques électriques d'une association de $n_p$ cellules <i>PV</i> identiques en parallèle . . . . .	13
I.11	les caractéristiques électriques d'un module <i>PV</i> par rapport de celle de cellules . . . . .	13
I.12	Association des modules <i>PV</i> avec les diodes de protections . . . . .	14
I.13	Caractéristique $I - V$ d'un module dont certaines cellules ombragées sont isolées par une diode de by-pass . . . . .	15
I.14	la modélisation du panneau 80M(36) sous logiciel PSIM . . . . .	16
I.15	Schéma équivalent du module 80M(36) dans PROTEUS . . . . .	16
I.16	Les variations de caractéristiques électriques de panneau 80M(36) pour différents niveaux d'éclairiments à $T = 25^\circ C$ , a) caractéristiques $I - V$ , b) caractéristiques $P - V$ . . . . .	17
I.17	Les variations de caractéristiques $I - V$ et $P - V$ de cellule pour différents niveaux de température à $G = 1000W/m^2$ , a) caractéristiques $I - V$ , b) caractéristique $P - V$ . . . . .	18
I.18	couplage direct entre un <i>GPV</i> et une charge résistive . . . . .	18
I.19	Points de fonctionnement d'un <i>GPV</i> en connexion directe, en fonction de la charge [16] . . . . .	19
I.20	Connexion d'un <i>GPV</i> à une charge <i>DC</i> à travers un étage d'adaptation . . . . .	19
I.21	Schéma synoptique du système <i>PV</i> adapté par le convertisseur <i>DC - DC</i> . . . . .	20
II.1	Caractéristique $I - V$ du panneau photovoltaïque . . . . .	22
II.2	Symbôle d'un convertisseur <i>DC - DC</i> . . . . .	23
II.3	convertisseur <i>DC - DC</i> de type BOOST . . . . .	24

II.4	le schéma équivalent de convertisseur $DC - DC$ de type BOOST l'interrupteur $K$ est fermé . . . . .	24
II.5	le schéma équivalent de convertisseur $DC - DC$ de type BOOST l'interrupteur $K$ est ouvert . . . . .	25
II.6	Recherche du $PPM$ par la méthode $P\&O$ [1] . . . . .	28
II.7	Organigramme de l'algorithme $P\&O$ . . . . .	28
II.8	Exemple de structure de base de la commande floue . . . . .	29
II.9	Exemple d'une table de vérité pour une commande $LF$ . . . . .	29
II.10	Positionnement du point de fonctionnement suivant la valeur de $\Delta I_{pv}/\Delta V_{pv}$ sur les caractéristiques de $I - V$ [16] . . . . .	31
II.11	Organigramme de l'algorithme $INC$ . . . . .	31
II.12	Organigramme de l'algorithme $MPPT$ proposé basé sur $PSO$ [28] . . . . .	32
II.13	Organigramme de l'algorithme $ADC$ . . . . .	34
II.14	Organigramme de l'algorithme $ICI$ . . . . .	35
III.1	Schéma de simulation du panneau $PV$ étudié. . . . .	38
III.2	Paramètre de la cellule $PV$ . . . . .	39
III.3	Caractéristiques $I - V$ et $P - V$ du panneau utilisé . . . . .	40
III.4	Schéma du hacheur BOOST sous MATLAB/SIMULINK . . . . .	40
III.5	Courbes de la tension d'entrée du hacheur BOOST . . . . .	41
III.6	Courbes de la tension de sortie du hacheur BOOST . . . . .	41
III.7	Simulation du $SPV$ sous $MATLAB SIMULINK$ . . . . .	41
III.8	Schéma de simulation du panneau $PV$ avec la méthode $P\&O$ . . . . .	42
III.9	Courbe du courant du $GPV$ avec la méthode $P\&O$ . . . . .	42
III.10	Courbe de tension aux bornes du $GPV$ avec la méthode $P\&O$ . . . . .	43
III.11	Courbe de la puissance du $GPV$ avec la méthode $P\&O$ . . . . .	43
III.12	Signal de commande $PWM$ avec la méthode $P\&O$ . . . . .	43
III.13	Courbe de tension de sortie avec la méthode $P\&O$ . . . . .	44
III.14	Schéma de simulation du panneau $PV$ avec la méthode $INC$ . . . . .	44
III.15	Courbe de la tension aux bornes du $GPV$ avec la méthode $INC$ . . . . .	45
III.16	Courbe du courant et de la puissance du $GPV$ avec la méthode $INC$ . . . . .	45
III.17	Courbe de tension de sortie et du signal $PWM$ avec la méthode $INC$ . . . . .	46
III.18	Schéma de simulation d'un panneau $PV$ avec la méthode logique floue . . . . .	47
III.19	Courbe de puissance aux bornes du $GPV$ avec la méthode logique floue . . . . .	47
III.20	Courbe du courant du $GPV$ avec la méthode logique floue . . . . .	48
III.21	Courbe de la tension de sortie avec la méthode logique floue . . . . .	48
III.22	Modèle SIMULINK de l'algorithme $MPPT$ $PSO$ . . . . .	49
III.23	L'évolution de la tension aux bornes de la charge avec système $PV$ commandé en $MPPT - PSO$ . . . . .	49
III.24	L'évolution du courant de charge avec système $PV$ commandé en $MPPT - PSO$ . . . . .	49
III.25	L'évolution de la puissance de charge avec système $PV$ commandé en $MPPT - PSO$ . . . . .	50

---

## Nomenclature

Les principales notations et abréviations utilisées dans cette thèse sont explicitées ci-dessous, sous leur forme la plus couramment employée dans le domaine du génie électrique.

Symbole	Signification
$dI_{PV}$	La d'v'e courant photovoltae
$dP_{PV}$	La d'v'e la puissance photovoltae
$dV_{PV}$	La d'v'e la tension photovoltae
$di_L$	La d'v'u courant de l'inductance
$I_{cel}$	Le courant de la sortie d'une cellule photovoltae
$I_{CC}$	Courant de court-circuit d'une cellule ou d'un module solaire
$I_{MPP}$	Le courant au point de puissance maximale
$I_{PV}$	Le courant que peut d'vrer un grateur photovoltae
$I_{PH}$	Photo courant
$I_S$	Le courant de saturation de Diode
$K_V$	facteur de tension d'une cellule photovoltae
$K_i$	facteur de courant d'une cellule photovoltae
$n_P$	nombre de cellules connect en parall
$n_S$	nombre de cellules connect en se
$P_{MPP}$	Puissance Maximale d'un Grateur photovoltae
$P_{PV}/P_{GPV}$	La puissance disponible en sortie du grateur photovoltae
$R_S$	La r'stance se du panneau photovoltae
$R_{SH}$	R'stance shunt
$T_{STC}$	Tempture aux conditions de teste standard
$V_{CEL}$	La tension de la sortie d'une cellule photovoltae
$V_{CO}$	La tension du circuit ouvert
$V_g$	Energie de gap
$V_{MPP}$	La tension au point de puissance maximale
$V_{PV}$	La tension aux bornes du grateur photovoltae
$V_{ripple}$	L'ondulation de tension
$V_{th}$	La tension thermique
$A$	La facteur d'idit la diode
$C$	Condensateur
$D$	Diode
$f$	frequence de commutation ( $Hz$ )
$G$	L'airement de rence ( $1000W/m^2$ )
$K$	Constante de Boltzmann ( $1.381 \times 10^{-23} J/k$ )
$K_1$	Constante ( $1.2A/cm^2K^3$ )
$L$	Inductance
$q$	Charge d'ctron
$T$	Tempture effective de la cellule en Kelvin
$\alpha$	Rapport cyclique

---

## Glossaire

<b>Acronyme</b>	<b>Signification</b>
ADC	Adaptative Duty Cycle
ANN	Artificial Neural Network
CAO	Conception assistar ordinateur
DC-DC	Direct Courent-Direct Courent (Courant Continu-Courant Continu)
FCC	Fraction Du Courant De Court-Circuit
FCO	Fraction De La Tension De Circuit Ouvert
FLC	Fuzzy Logic Controller
f.	La force ectromotrice
GPV	Grateur Photovoltae
ICI	Input Characteristic Impedance
IDE	Integrated Development Environment
INC	Conductance Incrntielle
MPPT	Maximum Power Point Tracking
MPP/PPM	Maximum Power Point/ Point De Puissance Maximal
<i>P&amp;O</i>	Perturbation Et Observation
PV	Photovoltae
SEPIC	Single Ended Primary Inductor Converter

---

## Introduction générale

Tout au long de l'histoire, l'énergie a toujours été une partie importante de la vie sur terre. L'évolution de notre société humaine est étroitement liée à l'utilisation de l'énergie. Tout au long de l'antiquité du moyen âge jusqu'au 18<sup>e</sup> siècle, l'absence de la révolution industrielle, la quasi-totalité des besoins énergétiques humains étaient assurés par les sources d'énergie renouvelables traditionnelles (bois, moulins, vent, voiliers, etc.).

À la fin du 18<sup>e</sup> siècle, le couple charbon et vapeur ouvre la porte à la révolution industrielle. Depuis le début du 20<sup>e</sup> siècle, l'utilisation du gaz naturel, du pétrole et de l'électricité ont fondamentalement changé les modes de vie. Cela a affaibli l'utilisation des énergies renouvelables.

Aujourd'hui, une grande partie de la demande mondiale d'énergie provient des combustibles fossiles. Cependant, les réserves de ces combustibles fossiles sont limitées, et leurs prix continuent d'augmenter, et ils sont la principale raison du réchauffement climatique qui menace la terre.

Ces dernières années, le débat sur l'avenir de notre approvisionnement énergétique s'est intensifié. Dans ce cas, les gens s'intéressent aux énergies renouvelables. Cette dernière retrouve progressivement son statut de principale source d'énergie car toutes ces formes d'énergie sont inépuisables, plus propres et plus respectueuses de l'environnement.

En ce qui concerne le développement durable, l'énergie photovoltaïque connaît une croissance rapide en raison de son énorme potentiel en tant que source d'énergie renouvelable. Ce type d'énergie est de plus en plus utilisé dans différents domaines, des installations résidentielles et commerciales aux systèmes spatiaux, en raison de nombreux avantages, tels que l'absence de pollution, l'absence de bruit, une installation facile et un temps de retour. Cependant, son principal inconvénient est le faible rendement de conversion photovoltaïque. Ainsi, l'optimisation de l'énergie produite par les modules photovoltaïques reste un sujet de recherche attractif pour les chercheurs.

La poursuite du point de puissance maximale MPPT (Maximum Power Point Tracking) reste un bon moyen de résoudre le problème de la conversion de l'énergie solaire, qui inclut le fonctionnement du système photovoltaïque dans la zone de puissance maximale [2].

Notre article est da recherche et comparaison de diffntes technologies de contrMPPT*rtirdegrateurspho*  
DC.*Nous considrons certaines technologies desuividepointdepuissancemaximale, voir : observationdesp*  
& O), *incrntdeconductance(*INC), *algorithme fractionnairedecourantdecourt–circuit(FCC), tensionena*  
& O*etINC*ontdesespacementsvariables*etdesalgorithme*sontproposar*leDrBechouat*[3], *quenousappelon*

Ce travail est divis trois chapitres :

Dans le premier chapitre, nous allons prnter d'une mani grale l'rgie renouvelable, gra-  
teur photovoltaes et leurs composants, ainsi le principe de la conversion photovoltae puis  
nous donnerons les principales caractstiques d'un *GPV*.

Dans le deuxi chapitre, on va modser un syst photovoltae, comme la modsation de  
*GPV* et la modsation de convertisseur *DC/DC* voir, le convertisseur Boost.

Dans le troisi chapitre, nous exposerons les techniques du controur poursuite du point  
de puissance maximale (*MPPT*) par les quatres techniques. La premi est la commande  
*MPPT* de type perturbe et observe (*P&O*) et le deuxi mode est basur l'lution de la  
conductivitectrique *INC* . la troisi est le contrar logique floue et la derniere technique est  
le contrar la methode *PSO* .La derni partie de ce chapitre illustrera les rltats de simulation  
du syst photovoltae, validant les techniques des commandes blies.

En fin, nous terminerons notre mire par une conclusion grale, dont nous rappelons  
quelque commentaire et que les perspectives qui pourront faire suite tre travail.

# Chapitre I

---

## Généralité sur les systèmes photovoltaïques

---

### SOMMAIRE

---

I.1	INTRODUCTION . . . . .	4
I.2	ÉNERGIE PHOTOVOLTAÏQUE HISTORIQUE . . . . .	4
I.2.1	les avantages de l'énergie photovoltaïque . . . . .	5
I.2.2	Les inconvénient de l'énergie photovoltaïque . . . . .	5
I.3	LE RAYONNEMENT SOLAIRE . . . . .	6
I.4	L'EFFET PHOTOVOLTAÏQUE . . . . .	7
I.5	CELLULE PHOTOVOLTAÏQUE . . . . .	8
I.5.1	Types de cellules photovoltaïques . . . . .	9
I.5.2	Modélisation de cellule PV . . . . .	10
I.6	GÉNÉRATEUR PHOTOVOLTAÏQUE (GPV) . . . . .	12
I.7	PROTECTION CLASSIQUE DE GPV . . . . .	14
I.8	PANNEAU PHOTOVOLTAÏQUE 80M(36) . . . . .	14
I.8.1	Modélisation et Simulation du module 80M(36) sous logiciel PROTEUS . . . . .	15
I.8.2	Influence de température et d'éclairement sur les caractéristiques de cellule PV . . . . .	17
I.9	COUPLAGE DIRECT SOURCE-CHARGE . . . . .	18
I.10	CONCLUSION . . . . .	20

---

## I.1 Introduction

Le soleil est une énergie presque illimitée, il peut couvrir des milliers de fois l'énergie consommée par les êtres humains, c'est pourquoi, ils essaient de tirer le meilleur parti de cette énergie depuis longtemps (énergie gratuite) [4].

Il existe différents types d'énergie solaire : l'énergie passive est utilisée pour le chauffage, l'éclairage et la climatisation. L'énergie thermique qui convertit les rayons du soleil en chaleur (chaleur) thermodynamique, y compris l'utilisation de capteurs pour concentrer le rayonnement solaire, chauffer un fluide à haute température qui génère de la vapeur à haute pression puis le turbiner et utiliser l'énergie photovoltaïque pour représenter l'énergie récupérée, convertit directement la lumière du soleil en électricité à travers le panneau photovoltaïque [5]

Dans ce chapitre, nous présenterons brièvement le rayonnement solaire, sa conversion par effet *PV*, les cellules *PV*, leurs modèles, caractéristiques et les différents paramètres qui affectent ces caractéristiques, et l'énergie photovoltaïque.

## I.2 énergie photovoltaïque Historique

L'énergie solaire photovoltaïque provient d'une partie de la conversion directe du rayonnement solaire en électricité. Cette conversion d'énergie se fait gr à des cellules dites photovoltaïques, basées sur un phénomène physique appelé effet photovoltaïque [6], [7].

L'effet photovoltaïque a été découvert par le physicien frans Edmond Becquerel (1788 – 1878) en 1839. Mais c'est près d'un siècle plus tard que les scientifiques ont approfondi et exploité ce phénomène physique [7], [8].

En 1949, William B. Shockley (1910 – 1989) a établi la théorie de la jonction PN, Créé la base théorique des cellules solaires utilisées aujourd'hui [7].

Sur cette base, Daryl Chapin, Calvin Fuller et Gerald Pearson dans Bell Labs, ont réalisé la première cellule solaire en silicium d'une surface de  $2\text{cm}^2$  pièces avec un rendement qui atteignait 6% et il fut montré au public le 25 avril 1954 [7].

Dans les années 50, le premier vaisseau spatial a été lancé en 1958, c'est le seul processus non nucléaire d'alimentation des satellites [6]. En raison du prix élevé des modules solaires, il n'est utilisé que pour Applications spatiales plutôt que les applications terrestres, le prix du watt était d'environ 1000 fois plus élevé que le prix actuel [6], [7] (en 1955, il était de  $1800\$/W$  environ  $22500DZD/W$ ) [9].

Depuis 1998, et à l'échelle mondiale, les parcs solaires photovoltaïque ont eu un taux de croissance annuel moyen de 35% [7]. Le photovoltaïque continue de cro"itre dans le secteur de l'énergie, la capacité installée mondiale a presque doublé de 2015 à 2015 En 2017(405GW fin 2017 et 229GW fin 2015) [?].

La figure I.1 montre l'évolution de la puissance photovoltaïque au niveau mondial dans différentes régions géographiques de 2008 à 2018, Il est confirmé que l'énergie générée par les propriétés photovoltaïques augmente de fa exponentielle.

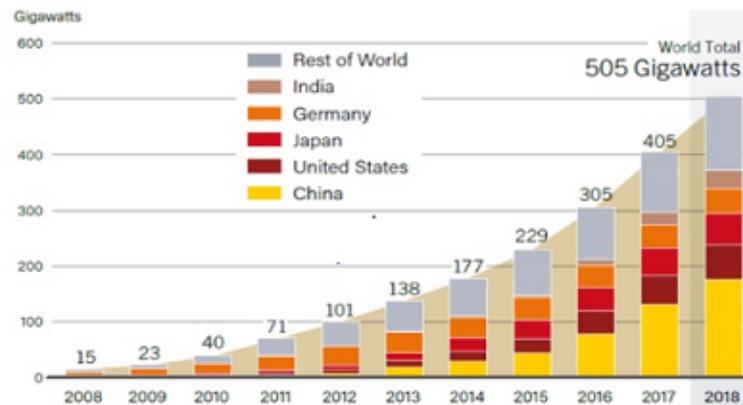


FIGURE I.1 – évolution de la puissance photovoltaïque installée au niveau mondial suivant les différentes zones géographiques [9]

### I.2.1 les avantages de l'énergie photovoltaïque

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

- Pas polluant et silencieux,
- Fiabilité et flexibilité,
- Il n'y a pas de pièces mobiles dans l'installation particulièrement adapté aux zones reculées. C'est la raison de leur utilisation dans les vaisseaux spatiaux,
- Ils nécessitent peu d'entretien,
- Longue durée,
- Réaliser le délai de livraison le plus court ,
- Ce sont des systèmes décentralisés.

### I.2.2 Les inconvénient de l'énergie photovoltaïque

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

- Le coût d'investissement des panneaux photovoltaïques est élevé,

- L'efficacité de conversion réelle du module est faible et diminue au fur et à mesure que le taux de conversion augmente avec le temps,
- Lorsqu'il est nécessaire de stocker de l'énergie électrique via la batterie, Le coût des systèmes photovoltaïques augmente,
- Le panneau contient des produits toxiques et des filières de recyclage qui n'existent pas encore,
- Lorsque les conditions météorologiques sont défavorables, la puissance est réduite (nuage),
- Difficile de recycler les composants du système,
- Même si l'électricité produite par l'installation photovoltaïque n'est pas polluante, la fabrication des panneaux a un impact sur l'environnement.

### I.3 Le rayonnement solaire

Pour quantifier l'énergie produite par les générateurs photovoltaïques dans une application donnée, il est nécessaire de connaître le spectre du rayonnement solaire sur le terrain [2], [4], quatre types de rayonnement ont été répertoriés dans la littérature :

- **Le rayonnement direct** : est le rayonnement directement du soleil et qui peut être mesuré avec un pyranomètre [5].
- **Le rayonnement diffus** : est le rayonnement de toute la voûte depuis le ciel, il est dû à l'absorption et à la diffusion d'une partie du rayonnement solaire dans l'atmosphère et sa réflexion par les nuages [2], il est mesuré par un pyranomètre [5].
- **Le rayonnement solaire réfléchi ou l'albédo du sol** : est un rayonnement qui est réfléchi par le sol ou par des objets au sol, il est important lorsque le sol est particulièrement réfléchissant (eau, neige) [5].
- **Le rayonnement global** : est la somme de tous les rayonnements [5], il est utilisé comme un compteur de lumière du jour ou un compteur de lumière du jour sans écran pour mesurer l'intensité du rayonnement solaire sur n'importe quel plan à tout moment. Il est appelé irradiance ou éclaircissement (généralement représenté par la lettre  $G$ ), exprimé en watts par mètre carré ( $W/m^2$ ) [2], [4].

Le rayonnement solaire sur l'énergie solaire sur une surface du bâtiment dépend principalement de la période (conditions météorologiques), de l'emplacement (altitude et latitude) et environnement (conditions atmosphériques) [11], [12]. Prenons l'exemple de la wilaya d'Adrar [13], la figure 1.2 montre l'éclaircissement mesuré à quatre positions météorologiques avec différentes conditions atmosphériques et de mesure.

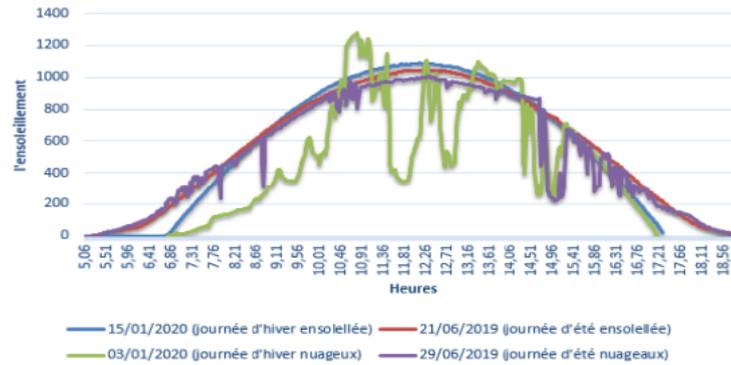


FIGURE I.2 – courbes d'ensoleillement avec différentes conditions atmosphérique et météorologique de la wilaya d'Adrar (latitude  $30^\circ$ ) [13]

La figure I.3 montre, dans la même zone, l'ensoleillement moyen par mois de l'année 2018 avec différentes latitudes.

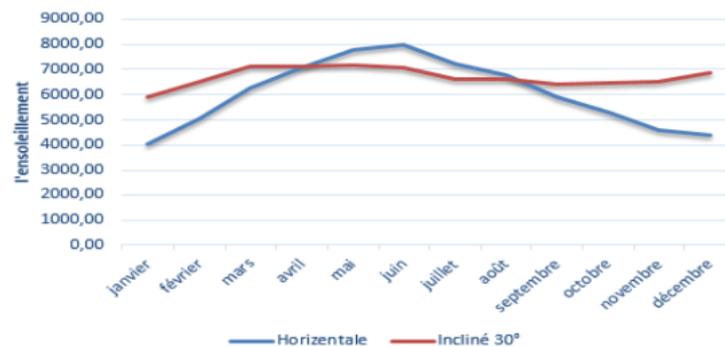


FIGURE I.3 – courbes d'ensoleillement avec différentes latitudes de la wilaya d'Adrar (l'année 2018) [13]

D'après les deux figures ci-dessus, l'utilisation du rayonnement solaire en tant que source d'énergie pose un problème très spécifique. En effet, le rayonnement de l'énergie solaire n'est pas toujours disponible et ne peut être ni stocké ni transporté. Par conséquent, l'énergie solaire disponible à l'emplacement et à l'heure cibles doit être déterminée (énergie disponible) [12].

## I.4 L'effet photovoltaïque

Le mot photovoltaïque vient du mot grec photo, qui signifie lumière et "Volt" du physicien italien "Alessandro Volta" qui a découvert la batterie [8].

L'effet photovoltaïque est la conversion directe de l'énergie radiante (énergie solaire continue) à l'aide de cellules photovoltaïques habituellement à base de silicium cristallin [1]. Ce phénomène est provoqué par les deux couches dans les cellules photovoltaïques silicium,

l'un est dopé  $P$  (dopé au bore), l'autre est dopé en  $N$  (dopé au phosphore), l'ensemble de ces deux types de semi-conducteurs forme une jonction  $PN$ .

## I.5 Cellule photovoltaïque

Les cellules photovoltaïques ou les cellules solaires sont les plus petits composants de l'appareil photovoltaïque. Il est fait de matériaux semi-conducteurs et l'énergie lumineuse est directement convertie en énergie électrique [14].

Le fonctionnement des cellules photovoltaïques est basé sur les effets photovoltaïques et la tension générée peut varier de  $0.3V$  à  $0.7V$  selon les matériaux utilisés et leur disposition, ainsi que la température et le vieillissement de la cellule [6], [14].

Sous une lumière et une température données, chaque cellule photovoltaïque est caractérisée par la courbe courant-tension ( $I = f(V)$ ) et la courbe puissance-tension ( $P = f(V)$ ), la figure I.4 montre les caractéristiques électriques d'une cellule photovoltaïque.

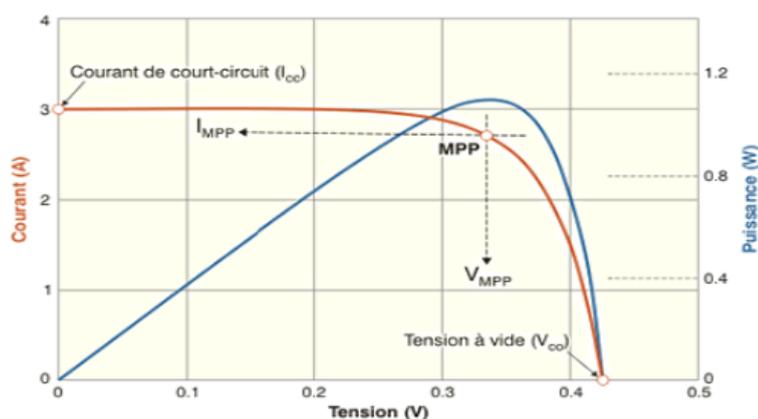


FIGURE I.4 – Caractéristique électrique d'une cellule photovoltaïque

Trois paramètres physiques définissent ces courbes [12] :

- **Tension de circuit ouvert ou point de circuit ouvert ( $V_{co}$ )** : Cette valeur représente la tension générée par la batterie d'éclairage non connectée (le courant nul est batterie  $PV$ ).
- **Courant de court-circuit ( $I_{cc}$ )** : Cette valeur représente le courant généré par le courant de court-circuit, l'unité électroluminescente est connectée à elle-même (court-circuit).
- **Maximum Power Point ( $MPP$ )** : La puissance maximale ( $P_{mpp}$ ) que la cellule  $PV$  peut fournir. C'est pouvoir obtenir la meilleure tension et le meilleur courant appelés  $V_{mpp}$ ,  $I_{mpp}$ .

Les caractéristiques des cellules photovoltaïques dépendent directement de l'éclairage et de la température. Afin de comparer l'efficacité des différentes batteries, ces caractéristiques sont définies dans des conditions d'essai très précises ( $STC$  = conditions standards d'essai). Ces conditions sont : l'éclairement qui est de  $1000W/m^2$  et la température qui est de  $25^{\circ}C$ , la modification de l'un de ces deux paramètres affectera les trois paramètres suivants : La cellule précédemment référencée.

### I.5.1 Types de cellules photovoltaïques

Selon la nature et les caractéristiques, il existe différents types de cellules photovoltaïques Les matériaux utilisés sont indiqués sur la figure I.5. Le type le plus courant est la batterie au silicium Cristal (silicium). nous découvrons :

#### I.5.1-a Les cellules monocristallines

La cellule monocristalline est la première cellule solaire génération. Ils sont fabriqués à partir d'un bloc de silicium cristallin En partie, ces batteries sont généralement bleues uniformes, en Les batteries industrielles sont de 12% et 20%, mais la méthode de production est laborieuse et chère.

#### I.5.1-b Les cellules poly-cristallines :

La batterie polycristalline se compose d'un Le silicium est composé de plusieurs cristaux. Cette cellule est également bleue Selon le fabricant, le rendement est faible, entre 10% et 14%, mais son coût de production moins.

#### I.5.1-c Cellule en silicium amorphe :

Le silicium n'est pas cristallisé, il est déposé sur la plaque de verre. Les cellules sont gris très foncé et leur rendement (environ 10 %) est Calculatrices et montres dites solaires [15].

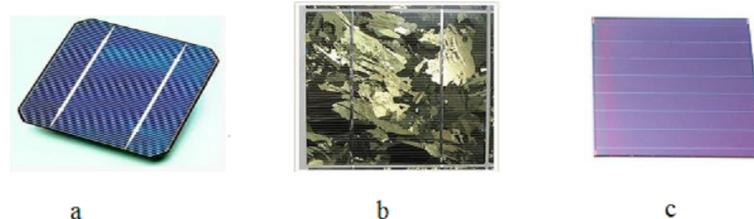


FIGURE I.5 – Les principaux types de cellule : a) Cellule monocristalline ; b) Cellule poly-cristalline ; c) Cellule amorphe

### I.5.2 Modélisation de cellule PV

Il existe plusieurs modèles électriques qui peuvent caractériser les cellules photovoltaïques, et considèrent les cellules comme un facteur commun  $PV$  qui agit comme un générateur de courant idéal. Dans ce travail, nous définirons deux modèles  $PV$  :

#### I.5.2-a Modèle idéal

C'est le modèle le plus simple qui représente une cellule solaire. Dans ce modèle, toutes les pertes sont négligeables, on ne considère que le phénomène de diffusion. La cellule solaire de ce modèle consiste en une source de courant idéale qui peut générer le courant  $I_{ph}$  est proportionnel à la puissance lumineuse incidente et est connecté en parallèle avec la diode, il correspond à la zone de transition  $PN$  de la cellule  $PV$  [11]. Le schéma électrique de la figure I.6 montre la valeur équivalente de la cellule  $PV$  de ce modèle :

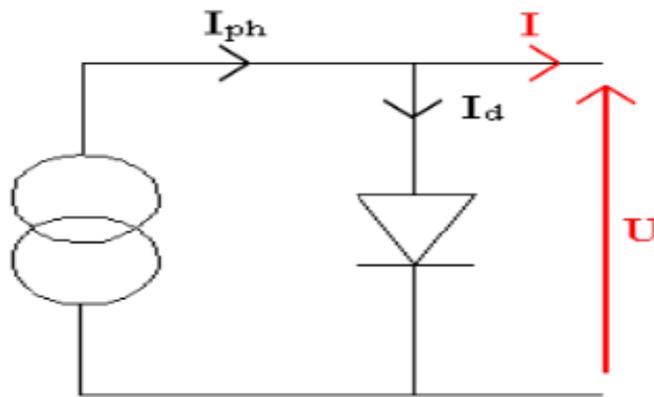


FIGURE I.6 – circuit équivalent du modèle idéal d'une cellule

L'équation caractéristique du modèle est directement dérivée de loi de Kirchhoff [11] :

$$I = I_{ph} - I_d \quad (\text{I.1})$$

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

$$I_d = I_s \left( e^{\frac{v_d}{v_{th}}} - 1 \right) \quad (\text{I.2})$$

$$I = I_{ph} - I_s \left( e^{\frac{v_d}{A \cdot v_{th}}} - 1 \right) \quad (\text{I.3})$$

O :

$I_{ph}$  : est le photo-courant

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

$I_s$  : courant de saturation de la diode donné par :  $I_s = K_1 T$

$V_{th}$  : tension thermique à la température  $T$  :

Avec :

$q$  : charge d'électron ( $1.6020 \cdot 10^{-19} C$ ),

$K$  : constante de Boltzmann ( $1.3810 \cdot 10^{-23} J/k$ )

$K_1$  : constante ( $1.2 A/cm^2 K_3$ )

$T$  : température effective de la cellule en Kelvin

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

### I.5.2-b Modèle réel à une diode

Ce modèle est le plus utilisé dans de nombreuses études par rapport au modèle idéal, le comportement des cellules photovoltaïques est plus proche de celui des cellules photovoltaïques pièce, et avec d'autres modèles (par exemple, d'autre part, le modèle à deux diodes.

Dans ce modèle, les cellules photovoltaïques sont représentées comme des sources de courant générant un photocourant  $I_{ph}$ , pour simuler la conversion du flux lumineux en énergie électrique, en parallèle avec une diode qui simule une jonction  $PN$ . L'optimisation et la modélisation de certains phénomènes au niveau cellulaire, tels que La figure I.7 montrent une résistance série  $R_s$  (perte ohmique) et au shunt  $R_{sh}$  (le courant parasite à travers le courant cellule) [1].

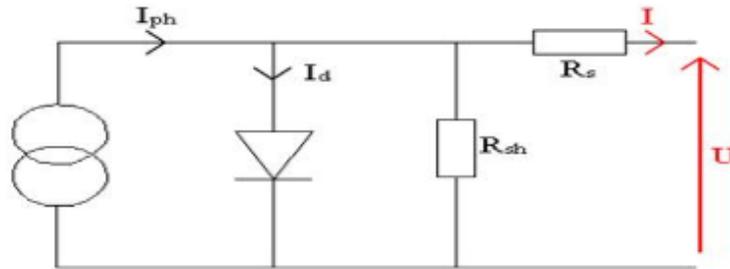


FIGURE I.7 – circuit équivalent du modèle réel d'une cellule PV

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

$$I = I_{ph} - I_d - I_{Rsh} \quad (I.4)$$

$$I_{Rsh} = \frac{V_d}{R_{sh}} \quad (I.5)$$

$$V_d = U + R_s \cdot I \quad (I.6)$$

Le courant généré par la batterie est exprimé par la formule suivante :

$$I = I_{ph} - I_s \left( e^{\frac{R_s \cdot I + U}{A \cdot v_{th}}} - 1 \right) - \frac{U + R_s \cdot I}{R_{sh}} \quad (I.7)$$

Ce modèle est également appelé *L5P* (modèle lumped, un mécanisme, dont cinq paramètres). Par conséquent, il implique les cinq paramètres inconnus suivants : ( $I_{ph}$ ,  $I_s$ ,  $A$ ,  $R_s$  et  $R_{sh}$ ) [11].

## I.6 Générateur photovoltaïque (GPV)

Les cellules photovoltaïques d'une dizaine de centimètres carrés ne peuvent fournir qu'une puissance en dessous de  $1W$ . Ce pouvoir ne suffit pas aux applications électriques courantes [6].

Afin de générer plus d'énergie, plusieurs batteries doivent être connectées en série et en même temps, créer des modules dits photovoltaïques. Ces modules forment un champ afin de pouvoir satisfaire différents niveaux de demande d'énergie [6].

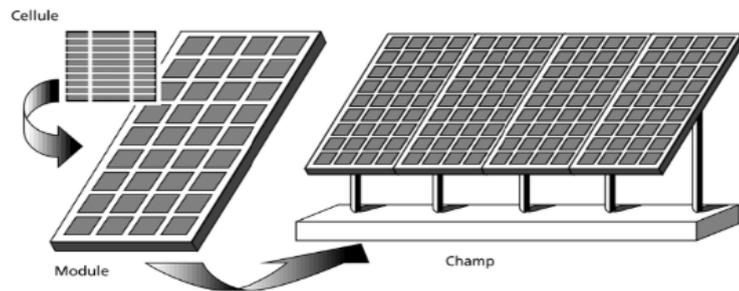


FIGURE I.8 – Générateur photovoltaïque

La connexion en série des batteries permet d'augmenter facilement la tension (figure I.9) [14] :

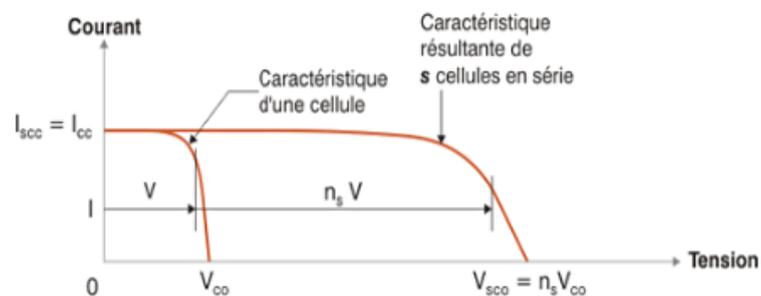


FIGURE I.9 – les caractéristiques électriques d'une association de  $n_s$  cellules *PV* identiques en série

La connexion en parallèle des cellules *PV* permet d'augmenter le courant. Le courant obtenu par l'association parallèle de  $n_p$  unités identiques est supérieur à  $n_p$  le produit du courant généré par la batterie, Figure I.10 [14].

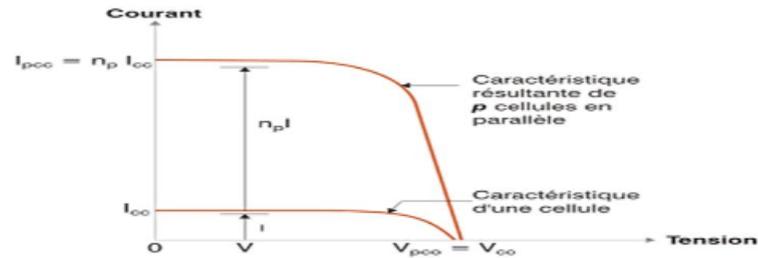


FIGURE I.10 – les caractéristiques électriques d'une association de  $n_p$  cellules *PV* identiques en parallèle

Par conséquent, l'ensemble du générateur peut être obtenu en utilisant un câblage série / parallèle Le *PV* atteint les caractéristiques requises [6]. la puissance disponible à la sortie du générateur *PV* est donnée par la formule suivante [14] :

$$P_{GPV} = n_s \cdot n_p \cdot V_{cel} \cdot I_{cel} \quad (I.8)$$

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 I.11 montre la différence entre les caractéristiques  $I - V$  de la batterie des modules photovoltaïques composés de  $n_s$  cellules connectées en série et de  $n_p$  cellules connectées en parallèle :

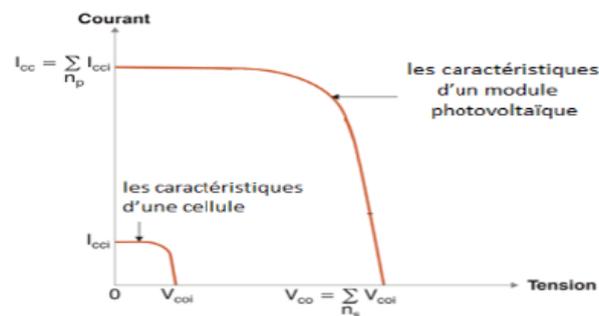


FIGURE I.11 – les caractéristiques électriques d'un module *PV* par rapport de celle de cellules

## I.7 Protection classique de GPV

Un éclairage irrégulier sur un ensemble de cellules photovoltaïques (ou lorsque le module est partiellement à l'ombre) aura des effets néfastes et réduira la durée de vie des équipements photovoltaïques. Pour résoudre ce problème, une protection électrique doit être ajoutée aux modules commerciaux afin d'éviter des dommages destructifs. Elle est liée à l'association entre batteries en série et panneaux en parallèle [14]. Dans les installations photovoltaïques actuelles, il existe deux types de diodes (La diode anti-retour et la diode de dérivation) qui sont les mêmes dans la plupart des cas physiquement différents, mais la méthode d'installation est différente, comme le montre la figure I.12 :

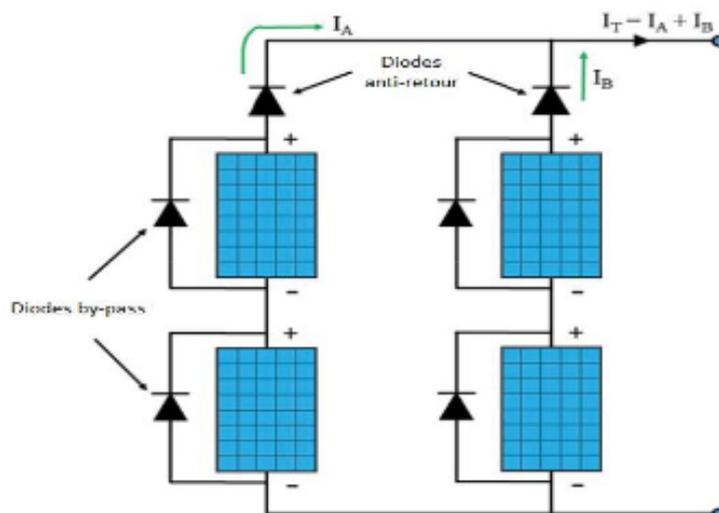


FIGURE I.12 – Association des modules PV avec les diodes de protections

L'utilisation de ces diodes offre deux types de protection :

- Empêcher le courant négatif lorsque plusieurs modules apparaissent peuvent être connecté en parallèle, ou lorsque les charges directement connectées peuvent être passer du mode récepteur au mode générateur, par exemple en nuit. Cette protection est assurée par des diodes anti-retour [14].
- éviter les points chauds lors de la connexion de modules en série. Ce genre de protection est assuré par des diodes de dérivation montées sur la polarité sens inverse. Si une ou un groupe de batteries est bloqué, le courant passera à travers les diodes de dérivation peut empêcher ces batteries de surchauffer. La conduction de ces diodes affectera les caractéristiques de sortie du générateur [15], comme le montre la figure I.13 :

## I.8 Panneau photovoltaïque 80M(36)

Dans ce travail, nous avons choisi STE FRI- SOL se compose de 36 cellules photovoltaïques basiques en silicium monocristallin. Il est fourni dans des conditions de test standard (*STC*) et une puissance maximale 80W, le meilleur courant est de 4.58A sous la

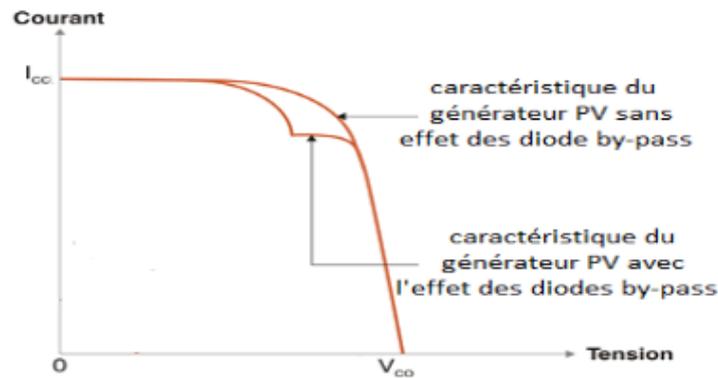


FIGURE I.13 – Caractéristique  $I - V$  d'un module dont certaines cellules ombragées sont isolées par une diode de by-pass

meilleure tension de  $17.45V$ . Les caractéristiques électriques de ce module photovoltaïque sont données dans le tableau ci-dessous :

TABLE I.1 – les paramètres du panneau photovoltaïque 80M(36)

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

### I.8.1 Modélisation et Simulation du module 80M(36) sous logiciel PRO-TEUS

Afin d'obtenir le modèle réel approximatif du panneau 80M(36), nous avons utilisé comme outil le logiciel PSIM "module solaire (modèle physique)" calcule cinq paramètres comme le montre la figure I.14 :

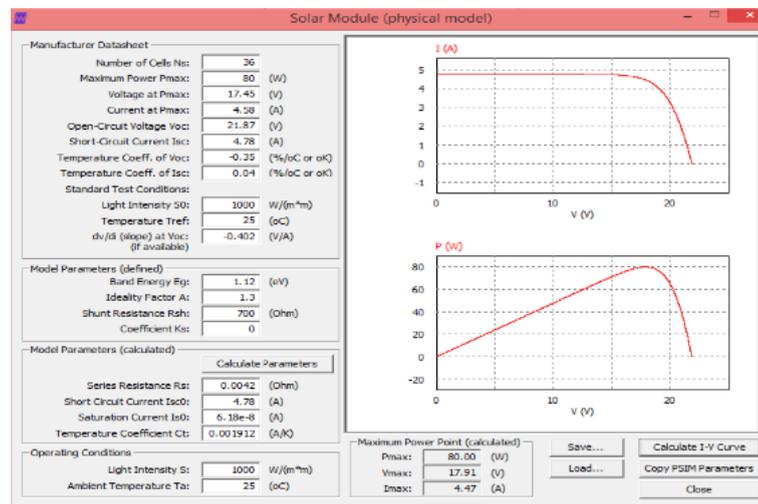


FIGURE I.14 – la modélisation du panneau 80M(36) sous logiciel PSIM

Nous avons utilisé les résultats obtenus par PSIM pour simuler le panneau PV Dans le logiciel PROTEUS (Figure I.15) :

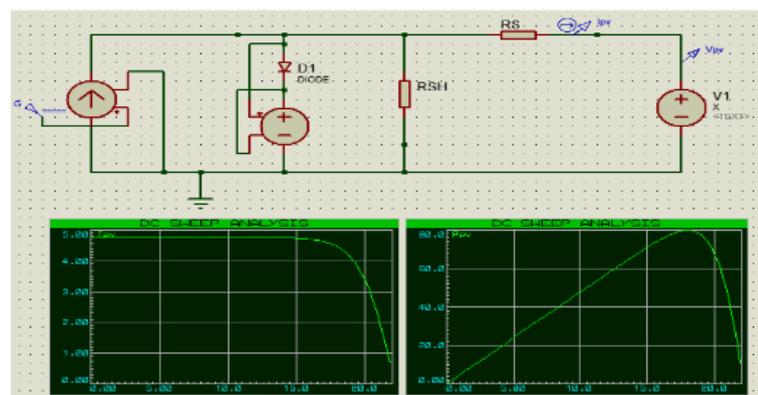


FIGURE I.15 – Schéma équivalent du module 80M(36) dans PROTEUS

Afin de simuler des panneaux photovoltaïques dans PROTEUS, nous avons utilisé :

- Le bloc "Source de courant contrôlé par une tension linéaire" simule la source actuelle  $I_{ph}$ .
- Une diode avec un script spice modifié est utilisée dans ce modèle car elle est nécessaire pour modifier la valeur du courant de saturation  $I_s$ , la température et le facteur idéal  $A$ .
- Le bloc "Source de tension de commande de tension linéaire" peut être simulé en nombre d'unités.
- Deux résistances pour simuler la résistance shunt et la résistance en série.

- Le bloc Source de tension continue est connecté au modèle de générateur photovoltaïque en tant que charge variable. Sa valeur est égale à la valeur de la "variable de balayage" dans la figure "ANALYSE DE BALAYAGE CC". Cette valeur est utilisée pour changer la tension  $V_{pv}$  dans le modèle sous PROTEUS. La plage de la variable "variable de balayage" doit être de  $0V$  à la tension en circuit ouvert  $V_{co}$ .

### I.8.2 Influence de température et d'éclairement sur les caractéristiques de cellule PV

Comme nous l'avons dit précédemment, les caractéristiques des cellules photovoltaïques sont définies dans des conditions de test très spécifiques (éclairage de  $1000W/m^2$ , température de  $25^{\circ}C$ ). Afin d'étudier l'influence des changements de ces deux conditions atmosphériques sur les caractéristiques des cellules photovoltaïques, nous utilisons le modèle de panneau 80M sous le logiciel PROTEUS (36). La figure 1.16 montre les changements des caractéristiques  $I - V$  et  $P - V$  à différents niveaux d'éclairement à une température constante de  $25^{\circ}C$ .

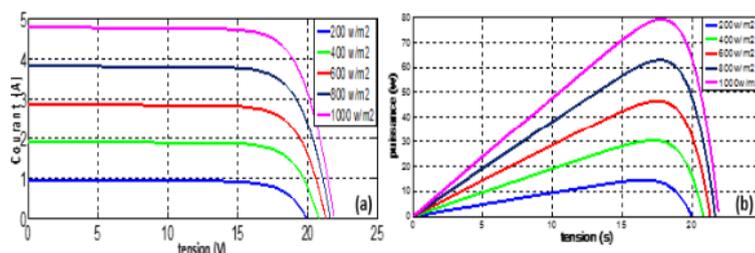


FIGURE I.16 – Les variations de caractéristiques électriques de panneau 80M(36) pour différents niveaux d'éclairements à  $T = 25^{\circ}C$ , a) caractéristiques  $I - V$ , b) caractéristiques  $P - V$

Lorsque le rayonnement change à une température donnée, le courant de court-circuit  $I_{cc}$  change proportionnellement au rayonnement. Dans le même temps, la tension en circuit ouvert  $V_{co}$  change très peu [2], [14]. D'autre part, lorsque la température augmente sous irradiation constante, comme le montre la figure 1.17, la tension à vide  $V_{co}$  diminue à mesure que la température augmente. Plus l'élévation de température est importante, plus la tension en circuit ouvert est faible et le courant de court-circuit  $I_{sc}$  augmente. Cette augmentation est beaucoup moins importante que la chute de tension. Dans la plupart des cas, l'effet de la température sur  $I_{sc}$  est négligeable [11].

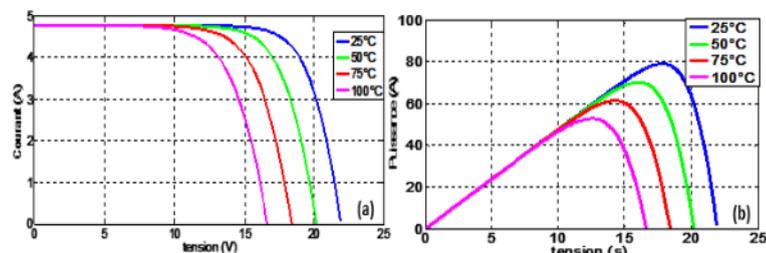


FIGURE I.17 – Les variations de caractéristiques  $I - V$  et  $P - V$  de cellule pour différents niveaux de température à  $G = 1000W/m^2$ , a) caractéristiques  $I - V$ , b) caractéristique  $P - V$

Par conséquent, la température et l'éclairage sont les deux principaux paramètres qui modifieront les caractéristiques des cellules solaires. Par conséquent, ces deux paramètres doivent être soigneusement pris en compte lors de la mise en place d'installations photovoltaïques [14].

## I.9 Couplage direct source-charge

L'équipement photovoltaïque le plus simple imaginable comprend un champ photovoltaïque, qui se compose d'un ou plusieurs modules connectés en série ou en parallèle, et une charge DC qui utilise directement l'énergie générée, comme le montre la figure I.18 [2].

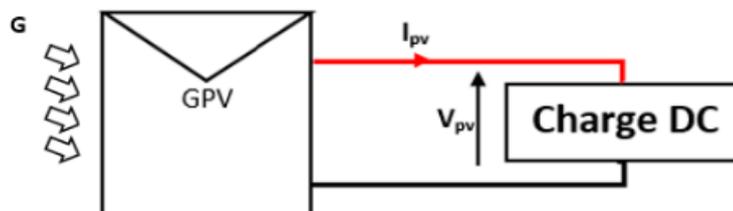


FIGURE I.18 – couplage direct entre un  $GPV$  et une charge résistive

Dans ce type d'installation, il s'agit de la méthode d'utilisation du sol la plus courante en raison de leur simplicité, de leur fiabilité et du faible coût de l'énergie solaire, le point de fonctionnement du  $GPV$  dépend de l'impédance de la charge à laquelle il est connecté, comme le montre la figure I.19 [16].

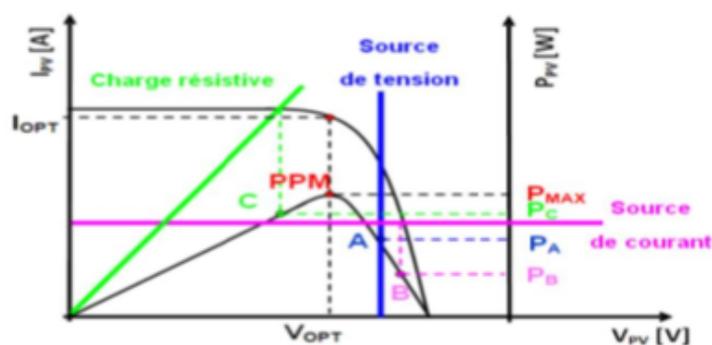


FIGURE I.19 – Points de fonctionnement d'un *GPV* en connexion directe, en fonction de la charge [16]

Comme le montre la figure I.19, *GPV* peut être directement connecté à trois types de charges [16] :

- Charge de source de tension de DC
- Charge de type d'alimentation CC,
- Charge résistive pure.

Peut identifier trois points de travail correspondants A, B, C La puissance de  $P_A$ ,  $P_B$  et  $P_C$  fournie est différente de la puissance maximale  $P_{mpp}$  de *GPV*.

Le principal inconvénient de cette installation est qu'elle ne fournit aucun type de réglage opérationnel. Il n'y a aucune garantie que la meilleure puissance disponible sur le terminal *GPV* sera fournie à la charge. En revanche, certains types de charges nécessitent une tension et un courant alternatifs [2].

Pour résoudre ce problème, et pour toujours extraire la puissance maximale disponible sur le terminal *GPV* et la transférer vers la charge, un étage d'adaptation est utilisé. Cet étage joue le rôle d'interface entre les deux éléments, comme le montre la figure I.20. Il assure la transmission de la puissance maximale fournie par le générateur [2] par des actions de contrôle.

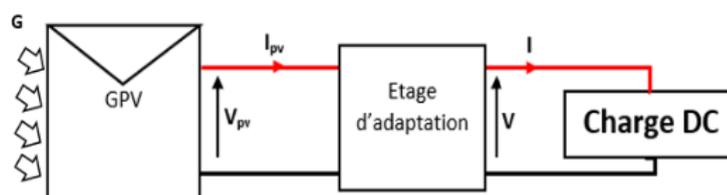


FIGURE I.20 – Connexion d'un *GPV* à une charge *DC* à travers un étage d'adaptation

Habituellement, l'étage adaptatif utilisé en *PV* est un convertisseur statique (convertisseur de puissance *DC – DC*) est contrôlé par une commande qui permet le suivi du *MPP*

appelé *MPPT* "Maximum Power Point Tracking" [17], comme illustré par la Figure I.21 :

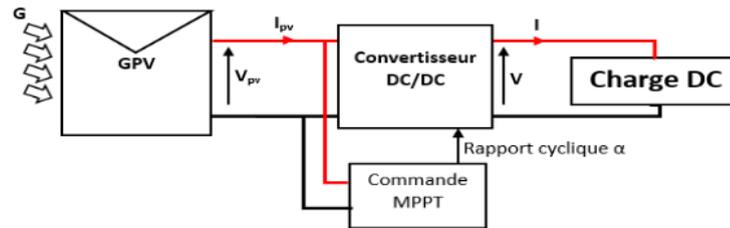


FIGURE I.21 – Schéma synoptique du système *PV* adapté par le convertisseur *DC – DC*

## I.10 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté l'énergie solaire et son rayonnement basés sur l'effet photovoltaïque et les principes des cellules et des générateurs photovoltaïques, et nous avons étudié les effets de la lumière et de la température sur l'énergie solaire (l'électricité produite par *GPV*). Enfin, le problème du couplage direct source-charge a été également discuté ainsi que leurs solutions (phase d'adaptation).

Dans le prochain chapitre, nous étudierons les composants phase d'adaptation (convertisseur *DC – DC* et son contrôle *MPPT*) pour trouver la puissance maximale du générateur photovoltaïque.

## Chapitre II

---

# Techniques de maximisation de la puissance

---

### SOMMAIRE

---

II.1	INTRODUCTION . . . . .	22
II.2	CONVERTISSEURS <i>DC – DC</i> . . . . .	23
II.2.1	Convertisseur de type BOOST . . . . .	24
II.3	COMMANDES <i>MPPT</i> CLASSÉES PAR TYPE DE RECHERCHE . . . . .	26
II.3.1	Méthode indirecte . . . . .	26
II.3.2	Méthode directe . . . . .	26
II.4	LES DIFFÉRENTS ALGORITHMES DE COMMANDES <i>MPPT</i> . . . . .	27
II.4.1	Algorithme Perturber et Observer ( <i>P&amp;O</i> ) : . . . . .	27
II.4.2	Les commandes <i>MPPT</i> basées sur le principe de la logique floue ( <i>FLC</i> ) . . . . .	28
II.4.3	L’algorithme de la conductance incrémentale ( <i>INC</i> ) . . . . .	30
II.4.4	Technique <i>MPPT</i> basée sur <i>PSO</i> . . . . .	31
II.4.5	Autres méthodes <i>MPPT</i> . . . . .	33
II.5	CONCLUSION . . . . .	35

---

## II.1 Introduction

Ces dernières années, la demande croissante d'énergie et la pollution causée par l'utilisation des combustibles fossiles ont incité le public à utiliser les énergies renouvelables. Dans ce cas, l'énergie photovoltaïque est l'une des sources importantes d'énergie renouvelable, apportant des résultats à nos problèmes de production d'énergie. De plus, cette énergie semble être la plus prometteuse, non polluante et inépuisable. Cependant, la génération de cette énergie est non linéaire et varie avec l'intensité lumineuse et la température. Par conséquent, le point de fonctionnement des panneaux photovoltaïques (*PV*) ne coïncide pas toujours avec le point de puissance de crête (figure II.1). Ensuite, nous utilisons un mécanisme appelé "Maximum Power Point Tracking" (*MPPT*) qui permet de rechercher et de suivre le point de puissance maximum, afin de générer en continu la puissance maximum [11].

Par conséquent, certains travaux se concentrent sur les systèmes photovoltaïques. Ils ont essayé de développer un algorithme pour extraire l'énergie maximale convertie par le panneau, afin que le système photovoltaïque puisse atteindre le meilleur état de fonctionnement [12]. Nous avons trouvé des algorithmes basés sur les méthodes suivantes dans la littérature, comme : l'alpinisme, la perturbation et l'observateur (*P&O*) et l'incrément de conductance (*INC*) [1], [2]. D'autres commandes ont également été développées, telles que la mesure de la fraction de courant de court-circuit (*FCC*) ou la mesure de la fraction de courant de court-circuit (Circuit ouvert (*FCO*) [3], [4]. Il existe également des commandes dites intelligentes basées sur la logique floue (*LF*) [5], [6] (*FCC*).

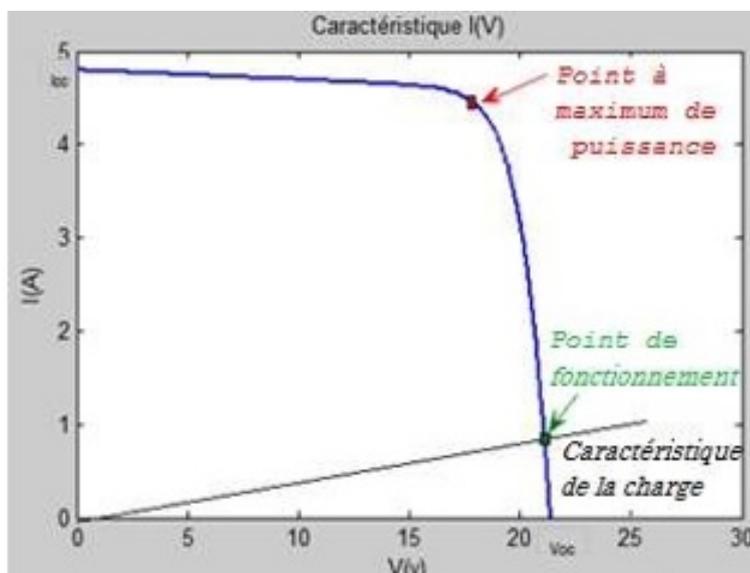


FIGURE II.1 – Caractéristique  $I - V$  du panneau photovoltaïque

## II.2 Convertisseurs DC – DC

Un convertisseur ou hacheur  $DC - DC$  est un dispositif électronique de puissance placé entre le générateur et le récepteur, tous deux alimentés en courant continu [9], Il permet d'ajuster la tension appliquée au récepteur ou le courant circulant dans le récepteur avec un rendement élevé et une grande flexibilité [10], [11].

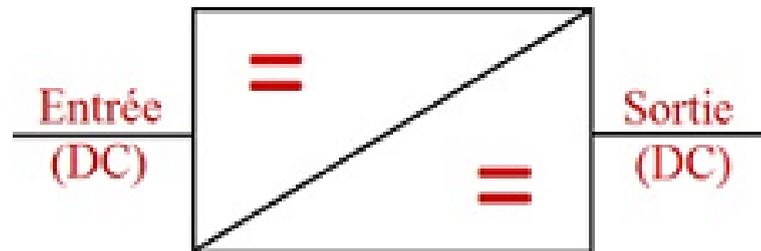


FIGURE II.2 – Symbole d'un convertisseur  $DC - DC$

- **Le hacheur direct** : est connecté au générateur et au récepteur, dont l'un agit comme une source de tension et l'autre comme une source de courant. Ils n'ont que des interrupteurs qui vous permettent d'opérer la connexion entre le générateur et le récepteur.
- **Le hacheur indirect** : est connecté au même type de générateur et de récepteur. Ils comprennent des interrupteurs et un élément de stockage d'énergie qui reçoit l'énergie du générateur puis la transmet au récepteur en fonction de la connexion entre les interrupteurs.

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

TABLE II.1 – table  
la complexité de quelque type de convertisseur [11]

Type	Fonction	Interrupteur	Diode	Transformateur	Complexité
Buck	Abaisseur	1	1	Non	Faible
Boost	Elévateur	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, nous présenterons les principes de deux convertisseurs BOOST et SEPIC. Ces convertisseurs sont souvent utilisés dans les systèmes photovoltaïques pour générer la tension et le courant requis. Ces types de convertisseurs ne sont constitués que de composants réactifs (selfs, condensateurs), et dans des conditions idéales, ils ne consomment aucune énergie. Par conséquent, ils se caractérisent par un rendement élevé [12].

### II.2.1 Convertisseur de type BOOST

BOOST, également connu sous le nom de hacheur parallèle, est un convertisseur élévateur  $DC - DC$  direct (boost) illustré à la figure II.3. Son application typique est de convertir sa tension d'entrée en une tension de sortie de valeur plus élevée. La source d'entrée est de type  $CC$  (l'inductance est connectée en série avec la source de tension) et la charge de sortie est de type  $CC$  (le condensateur est connecté en parallèle avec la charge résistive) [10].

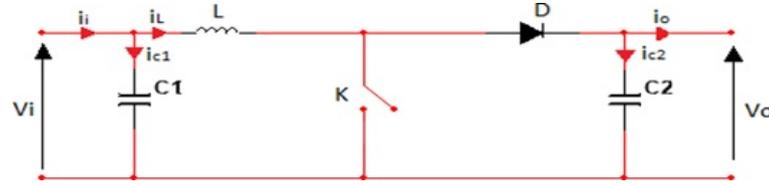


FIGURE II.3 – convertisseur  $DC - DC$  de type BOOST

#### II.2.1-a Principe de fonctionnement

selon l'état de conduction de l'interrupteur  $K$  pendant la période commutation  $T$ , l'étude est divisée en deux parties : Tout d'abord, nous définissons la valeur de l'applet de rapport cyclique  $\alpha$ , qui représente la durée de la période de temps  $T$  lorsque l'interrupteur  $K$  est activé.  $\alpha$  est compris entre 0 ( $K$  ne conduit jamais) et 1 ( $K$  conduit toujours).

- **Mode continu de 0 à  $\alpha T$  (Une phase d'accumulation d'énergie)** : Si l'interrupteur  $K$  est fermé, le schéma du convertisseur équivalent est représenté sur la figure II.4, ce qui fait augmenter le courant dans l'inducteur, de sorte qu'une certaine quantité d'énergie est stockée sous forme d'énergie magnétique. Ensuite, la diode  $D$  est bloquée, puis la charge est déconnectée de l'alimentation [13].

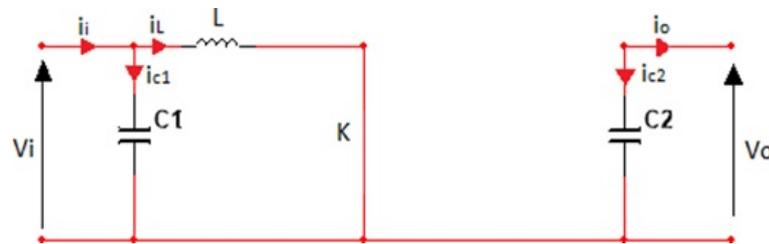


FIGURE II.4 – le schéma équivalent de convertisseur  $DC - DC$  de type BOOST l'interrupteur  $K$  est fermé

Le convertisseur dans ce cas peut être modélisé par les équations suivantes :

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{V_i}{L} \quad (\text{II.1})$$

$$\frac{dV_o}{dt} = -\frac{1}{C_2} i_o \quad (\text{II.2})$$

- **Mode discontinu de  $\alpha T$  à  $T$  (phase de roue libre)** : Lorsque l'interrupteur  $K$  est ouvert, comme le montre la figure II.5, l'inducteur est connecté en série avec le générateur, et sa force électromotrice est ajoutée à l'inductance du générateur (effet d'amélioration), et le courant circulant à travers l'inducteur alors traverse la diode, le condensateur et la charge. Cela provoque le transfert de l'énergie accumulée dans l'inductance vers le condensateur [19]. Après avoir activé l'interrupteur, la diode  $D$  empêche le condensateur  $C$  de se décharger. On suppose que le condensateur est suffisamment grand pour pouvoir lisser la tension de la charge.



FIGURE II.5 – le schéma équivalent de convertisseur DC – DC de type BOOST l'interrupteur  $K$  est ouvert

Le convertisseur, dans ce cas, peut être modélisé par les équations suivantes [21] :

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{V_i - V_o}{L} \quad (\text{II.3})$$

$$\frac{dV_o}{dt} = \frac{i_L}{C_2} - \frac{1}{C_2}i_o \quad (\text{II.4})$$

La tension et le courant de sortie du convertisseur BOOST sont donnés par [3] :

$$V_o = \frac{1}{1 - \alpha}V_i \quad (\text{II.5})$$

$$i_o = (1 - \alpha)i_i \quad (\text{II.6})$$

### II.2.1-b Choix des composants du convertisseur BOOST

Comme le courant est toujours positif et que l'interrupteur doit être contrôlé (lors du blocage et du démarrage), un transistor (tel qu'un transistor bipolaire ou à effet de champ) peut être utilisé à la place du transistor  $K$ , qui a une grille isolée *IGBT* ou un thyristor *GTO* en mode de commutation Travail (tout ou tout). L'interrupteur d'alimentation utilisé dépend du niveau de puissance à convertir et de la fréquence de découpage [2]. Comme indiqué dans le tableau suivant.

TABLE II.2 – table

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] :

$$L \geq \frac{V_o}{4\Delta i_{max}f} \quad (\text{II.7})$$

$$C_1 \geq \frac{I_i}{\Delta V_{imax}f} \quad (\text{II.8})$$

$$C_2 \geq \frac{V_o}{8\Delta V_{cmax}f} \quad (\text{II.9})$$

La diode  $D$  est une diode "roue libre". Il permet d'évacuer l'énergie stockée dans le starter lors du verrouillage de l'interrupteur. Selon [23], les diodes Schottky de puissance à faible chute de tension à l'état passant sont le premier choix pour minimiser les pertes de conduction. Choisissez en fonction du courant moyen  $I_d$ , du courant de crête possible  $I_{dmax}$  et de la tension inverse  $V_R$  à prendre en charge.

## II.3 Commandes MPPT classées par type de recherche

### II.3.1 Méthode indirecte

Cette commande MPPT utilise un lien entre la variable mesurée ( $I_{sc}$  ou  $V_{co}$ ) et la position approximative du MPP qui peut être facilement déterminée. Il compte également les commandes basées sur des estimations de point de fonctionnement GPV dérivées d'un modèle de paramètres prédéfinis. Il existe également des commandes pour établir un suivi de tension optimal en ne considérant que le changement de température de la batterie donné par le capteur. L'avantage de ces commandes est qu'elles sont faciles à exécuter. Ils sont conçus pour des systèmes peu coûteux et imprécis qui doivent fonctionner dans des zones géographiques à faible changement climatique. Parmi ces méthodes, nous avons trouvé des méthodes de tension en circuit ouvert de générateur, des méthodes de court-circuit, etc ... [5]

### II.3.2 Méthode directe

Ce type de commande MPPT détermine le meilleur point de fonctionnement (MPP) en fonction du courant, de la tension ou de la puissance mesurés dans le système. Par

conséquent, il peut réagir à des changements imprévisibles dans le fonctionnement de *GPV*. Généralement, ces processus sont basés sur des algorithmes de recherche, avec lesquels la courbe de puissance maximale peut être déterminée sans interrompre le fonctionnement. Pour cette raison, la tension du point de fonctionnement augmentera périodiquement. Si la puissance de sortie est élevée, passez à la direction de recherche suivante, sinon elle sera inversée. Ensuite, le point de fonctionnement réel oscille autour du *MPP*. D'autres algorithmes peuvent conserver ce principe de base pour éviter les malentendus. Ces erreurs se produisent, par exemple, en raison de la différence de direction de recherche, qui est provoquée par une augmentation de puissance, qui est provoquée par une augmentation rapide du niveau de rayonnement. La détermination de la valeur de puissance du générateur *MP* est essentielle pour la recherche du *MPP*, il faut mesurer la tension et le courant du générateur et le produit de ces deux variables. Parmi ces méthodes, nous avons trouvé la méthode différentielle, la méthode Perturbe & Observe (*P&O*), l'incrément de conductance, ... [5]

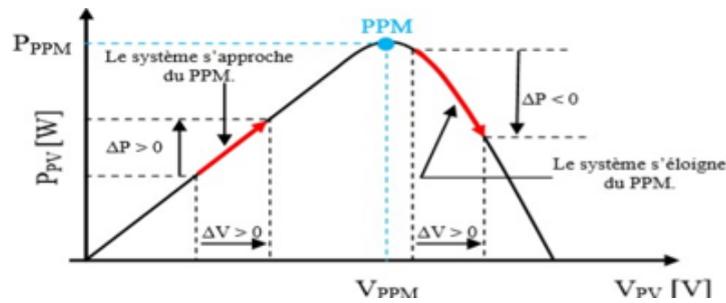
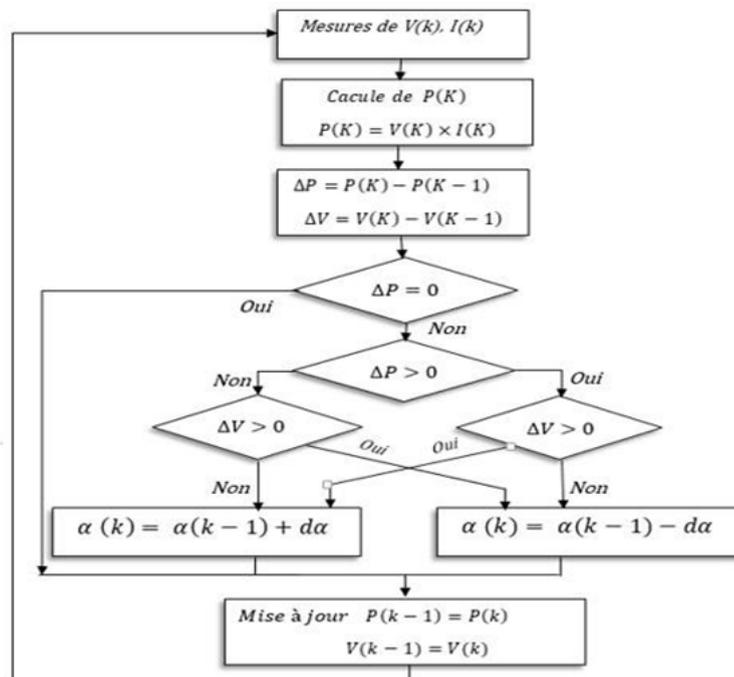
## II.4 Les différent algorithmes de commandes MPPT

Au cours des dernières décennies, de nombreuses façons de trouver un député provincial ont été trouvées. Parmi ces méthodes, les méthodes les plus fréquemment rencontrées sont généralement appelées : perturbation et observation (*P&O*), incrément de conductance (*INC*), rampe, fraction de tension  $V_{co}(FCO)$ , fraction de courant  $I_{cc}(FCC)$  et basées sur différentes méthodes d'intelligence artificielle *MPPT* Commande

Afin de comparer les performances de ces commandes sur la base de recherches antérieures, nous passons brièvement en revue leurs différents principes dans les paragraphes suivants :

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

En raison de la simplicité et de la facilité de mise en œuvre de la méthode *P&O*, c'est généralement la méthode la plus couramment utilisée. Cet algorithme est utilisé comme valeur de la tension d'entrée  $V_{pv}$  et du courant  $I_{pv}$ , et comme sortie du rapport cyclique  $\alpha$  [26]. Le principe de cet algorithme (comme son nom l'indique, comme le montre la figure II.7) est de perturber la tension  $V_{pv}$  en agissant sur le rapport cyclique  $\alpha$ , puis de suivre la perturbation, et le panneau P calcule la puissance ( $k$ ) fournie et comparez-le avec le précédent  $P(k-1)$  [5] : Si la puissance augmente, nous sommes proches de (*MPP*), et les changements de rapport cyclique restent dans le même sens. Au contraire, si la puissance est réduite, nous resterons à l'écart du *MPP*. Par conséquent, nous devons inverser la direction du changement de cycle de service. Comme le montre la figure II.6 [21].

FIGURE II.6 – Recherche du *PPM* par la méthode *P&O* [1]FIGURE II.7 – Organigramme de l'algorithme *P&O*

### II.4.2 Les commandes MPPT basées sur le principe de la logique floue (*FLC*)

Le contrôle basé sur la logique floue est utilisé dans le système de suivi des points de sur-puissance. Le contrôle présente les avantages suivants : il s'agit d'un contrôle robuste et ne nécessite pas une compréhension exacte du modèle mathématique du système. De plus, ils peuvent gérer la non-linéarité [16], [21].

Le fonctionnement de cet algorithme est divisé en trois étapes :

- **Fuzzification** : permet de convertir les variables d'entrée physiques en ensembles flous. Dans cette étape, la variable d'entrée numérique sera convertie en une variable de langage pouvant prendre les cinq valeurs suivantes : *NB* (grand négatif), *NS* (petit négatif), *ZE* (zéro), *PS* (petit positif), *PB* (grand positif). En utilisant la structure de base du contrôle de logique floue. Comme le montre la figure II.8.

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

$$E = \frac{P(k) - P(k-1)}{V(k) - V(k-1)} \quad (\text{II.10})$$

$$\Delta E = E(k) - E(k-1) \quad (\text{II.11})$$

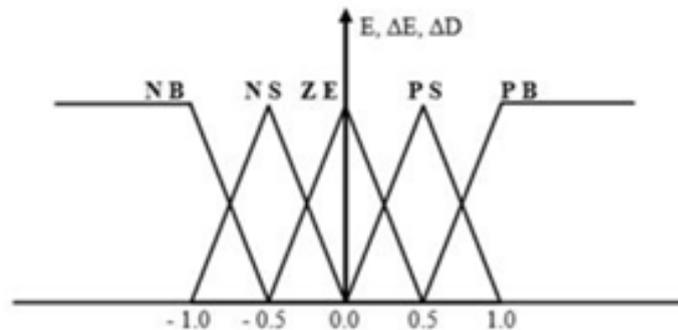


FIGURE II.8 – Exemple de structure de base de la commande floue

- **Inférence** : Dans l'étape d'inférence, utilisez le tableau des règles d'inférence illustré à la figure II.9 [16] pour prendre une décision sur la variable de sortie  $\Delta\alpha$  en fonction des variables d'entrée  $E$  et  $\Delta E$ . En effet, nous avons établi une relation logique entre l'entrée et la sortie tout en définissant les règles d'appartenance. Ensuite, nous dessinons le tableau des règles d'inférence [21].

$E \backslash \Delta E$	NB	NS	ZE	PS	PB
NB	ZE	ZE	NB	NB	NB
NS	ZE	ZE	NS	NS	NS
ZE	NS	ZE	ZE	ZE	PS
PS	PS	PS	PS	ZE	ZE
PB	PB	PB	PB	ZE	ZE

FIGURE II.9 – Exemple d'une table de vérité pour une commande  $LF$

- **Defuzzification** :

cette étape s'applique uniquement à la variable de sortie  $\Delta\alpha$ . Dans cette étape,  $\Delta\alpha$  sera converti d'une variable verbale en une variable numérique afin de pouvoir piloter le convertisseur de puissance en  $PPM$  [21].

En termes de précision *PPM* et de vitesse de récupération, cette commande offre les meilleures performances. Cependant, l'inconvénient de cette commande est que sa précision est liée à la complexité de la table de vérité utilisée. Par conséquent, il est nécessaire de forcer la sélection d'un microcontrôleur avec une grande puissance de calcul, ce qui entraînera inévitablement la consommation d'énergie lié au microprocesseur pas moins que le coût supplémentaire [21].

### II.4.3 L'algorithme de la conductance incrémentale (*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 II.10) comme indique l'équation suivante [9] :

$$\frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} = 0 \quad (\text{II.12})$$

Cette équation peut être réécrite comme suit :

$$\frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} = \frac{d(I_{pv} \times V_{pv})}{dV_{pv}} = \frac{V_{pv} \times dI_{pv}}{dV_{pv}} + \frac{I_{pv} \times dV_{pv}}{dV_{pv}} \quad (\text{II.13})$$

$$\frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} = V_{pv} \frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} + I_{pv} \quad (\text{II.14})$$

Ce qui implique :

$$\frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} + \frac{I_{pv}}{V_{pv}} \quad (\text{II.15})$$



obtenu. Par conséquent, afin d'assurer une bonne vitesse et précision de suivi [28].

Pour l'étape d'initialisation de l'optimisation de l'essaim de particules, la particule  $l$  peut être réglé dans une plage aléatoire ou placé dans une position fixe. Habituellement, s'il y a des données, il est plus logique d'initialiser les particules environnantes. Disponible sur la position du point de puissance maximale globale Portée de la recherche. L'auteur souligne le déplacement minimum entre les pics Près de 80% de  $COV$  en continu et le pic sur la courbe  $P-V$  appara^ it presque A un multiple de 80% de la tension en circuit ouvert du module  $OC$ . Par conséquent, le nombre de particules  $N$  est sélectionné dans le système photovoltaïque comme numéros aléatoires. Les espaces de recherche du les particules qui couvrent [01] sont initialisées sur un point défini 0 et 1 sont la valeur cycle minimum et maximum du convertisseur continu-continu utilisé, respectivement.

L'objectif de cette méthode  $MPPT$  basée sur  $PSO$  est d'extraire de la puissance La  $P_{pv}$  maximale du photovoltaïque. Afin d'évaluer la valeur de fitness en tant que puissance générée, Après la sortie du régulateur, la modulation de largeur d'impulsion agit sur la position en ligne Les particules représentant l'état du cycle de service, et la tension photovoltaïque  $V_{pv}$  et Le courant  $I_{pv}$  peut être mesuré.

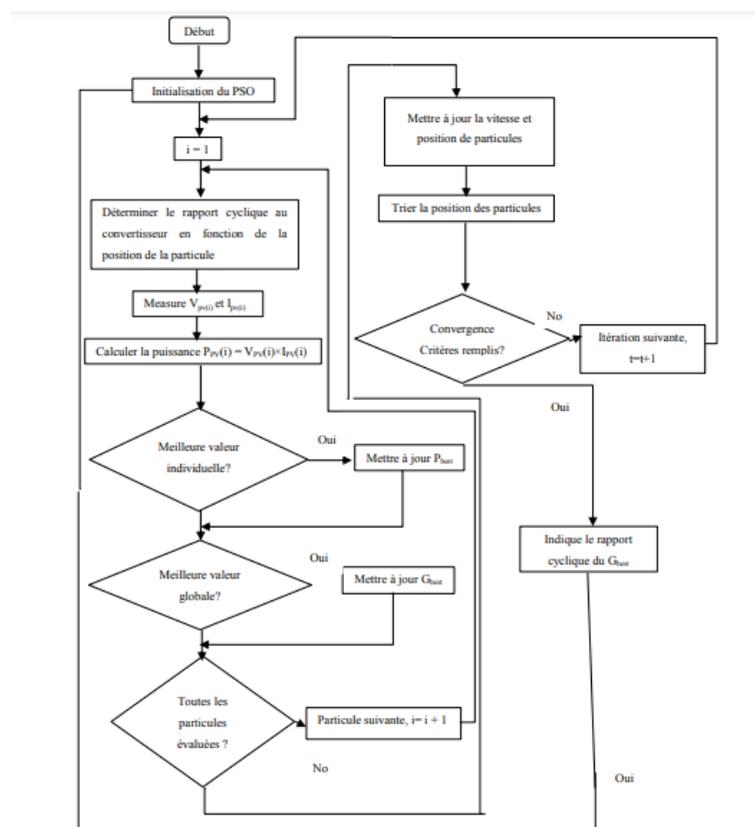


FIGURE II.12 – Organigramme de l'algorithme  $MPPT$  proposé basé sur  $PSO$  [28]

### II.4.5 Autres méthodes MPPT

Dans la littérature, il existe d'autres algorithmes *MPPT* qui nécessitent parfois de nouvelles technologies. Nous pouvons citer :

- *P&O* à pas variable [16], [27],
- Améliorer *P&O* grâce à la logique floue [6],
- Pas variable *INC* [16],
- Algorithme de capacité parasite [31],
- Méthode d'oscillation forcée [31].

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 leur 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 :

$$R = \frac{V_{out}}{I_{out}} \quad (II.16)$$

En remplaçant (II.5) et (II.6) dans (II.16), on obtient :

$$R = \frac{V_{pv}}{I_{pv}(1 - \alpha)^2} \quad (II.17)$$

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

$$R = \frac{V_{pv}^2}{P_{pv}(1 - \alpha)^2} \quad (II.18)$$

Et donc :

$$\alpha = 1 - \frac{V_{pv}}{\sqrt{P_{pv} \times R}} \quad (II.19)$$

La dernière relation est utilisée pour mettre à jour la valeur du rapport cyclique  $\alpha$ .

L'organigramme de cet algorithme est illustré à la figure II.13.

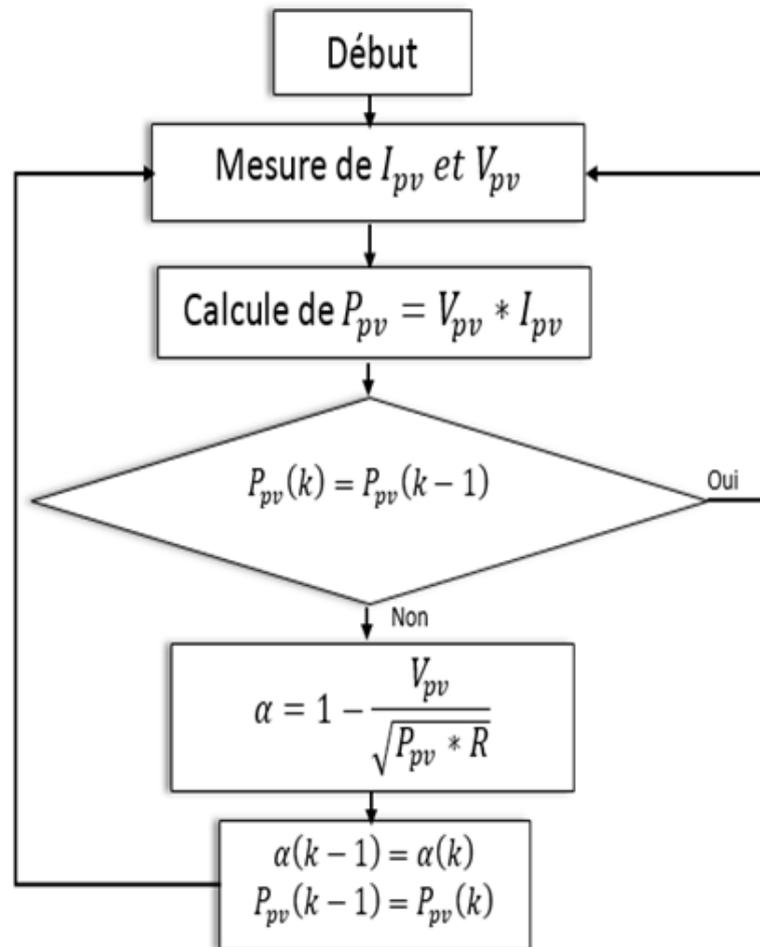
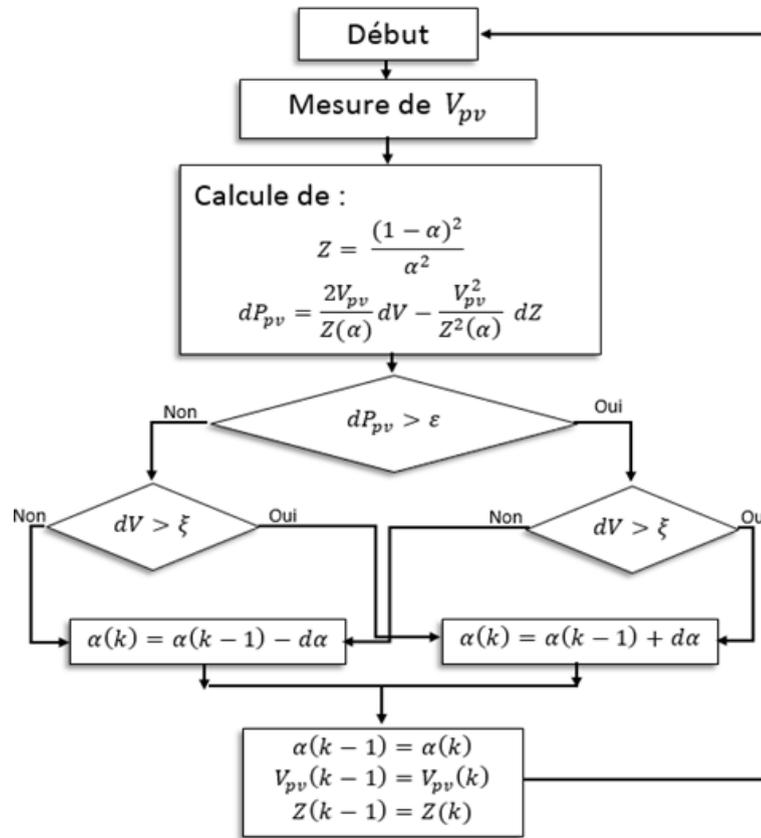


FIGURE II.13 – Organigramme de l’algorithme ADC

Proposition d’un autre algorithme pour améliorer l’algorithme *P&O* [32], et est connu comme *ICI* (impédance caractéristique d’entrée). L’algorithme est implémenté à l’aide d’un seul capteur de tension, comme le montre la figure II.14

FIGURE II.14 – Organigramme de l’algorithme *ICI*

Le principe de cet algorithme est d’obtenir le comportement en régime permanent du convertisseur *DC – DC* à partir de l’impédance de l’entrée de caractérisation ( $R_s$  de *GPV*), et de calculer la dérivée de puissance en fonction de l’impédance  $Z(\alpha)$  (figure II.14). Deux variables doivent être connues, à savoir le rapport cyclique obtenu à partir du registre du microcontrôleur et la tension d’entrée du convertisseur, seules variables détectées. L’initialisation des variables est la suivante :

$$\alpha(k-1) = 0 \quad (\text{II.20})$$

$$V_{pv}(k-1) = 0 \quad (\text{II.21})$$

$$Z(k-1) = \text{grand nombre} \quad (\text{II.22})$$

## II.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudié l’adaptation de puissance entre l’alimentation et la charge pour mieux utiliser la puissance délivrée par le *GPV*. À cette fin, nous avons discuté et discuté du convertisseur *DC – DC* statique (hacheur).

---

Dans la deuxième partie, nous avons discuté de la commande *MPPT* qui pilote le convertisseur *DC – DC*.

### SOMMAIRE

---

III.1 INTRODUCTION . . . . .	38
III.2 SIMULATION DES PARTIES DU SYSTÈME PHOTOVOLTAÏQUE . . . . .	38
III.2.1 Simulation du panneau photovoltaïque . . . . .	38
III.2.2 Simulation du hacheur BOOST . . . . .	40
III.3 SIMULATION DU SYSTÈME PHOTOVOLTAÏQUE AVEC CONTRÔLE <i>MPPT</i> . . . . .	41
III.3.1 Simulation de la Méthode <i>P&amp;O</i> . . . . .	42
III.3.2 Simulation de la méthode <i>INC</i> . . . . .	44
III.3.3 Simulation de la Méthode logique floue . . . . .	47
III.3.4 Simulation de la Méthode <i>PSO</i> . . . . .	48
III.4 CONCLUSION . . . . .	50

---

### III.1 Introduction

Afin de pouvoir visualiser les caractéristiques de sortie de la méthode *MPPT*, il est nécessaire de faire un schéma électrique de ce phénomène, car l'environnement MATLAB / SIMULINK est adapté à cette simulation.

Le logiciel MATLAB et son extension graphique associée SIMULINK fait partie d'un ensemble d'outils de traitement du signal intégrés, qui peuvent simuler le système dans des états continus et discrets, il est donc très approprié pour tester les commandes *MPPT* numériques.

Afin d'obtenir de meilleurs résultats, ce chapitre mène spécifiquement des simulations et des recherches comparatives sur les méthodes de contrôle.

### III.2 Simulation des parties du système photovoltaïque

#### III.2.1 Simulation du panneau photovoltaïque

La figure ci-dessous représente le modèle du panneau photovoltaïque à l'étude.

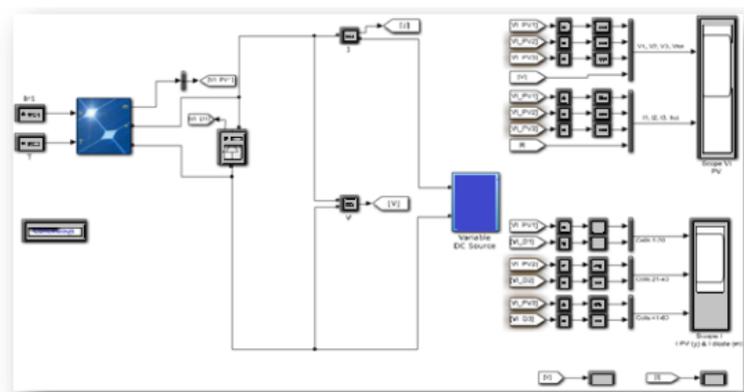


FIGURE III.1 – Schéma de simulation du panneau *PV* étudié.

La figure suivante représente les paramètres du panneau photovoltaïque de type AR-RAY :

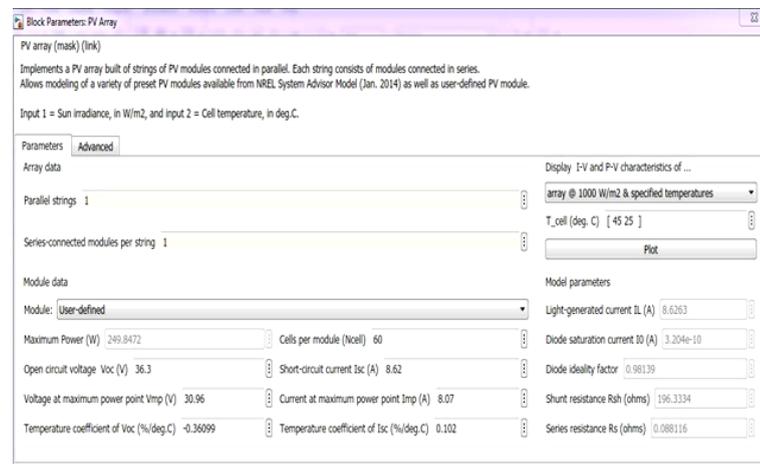
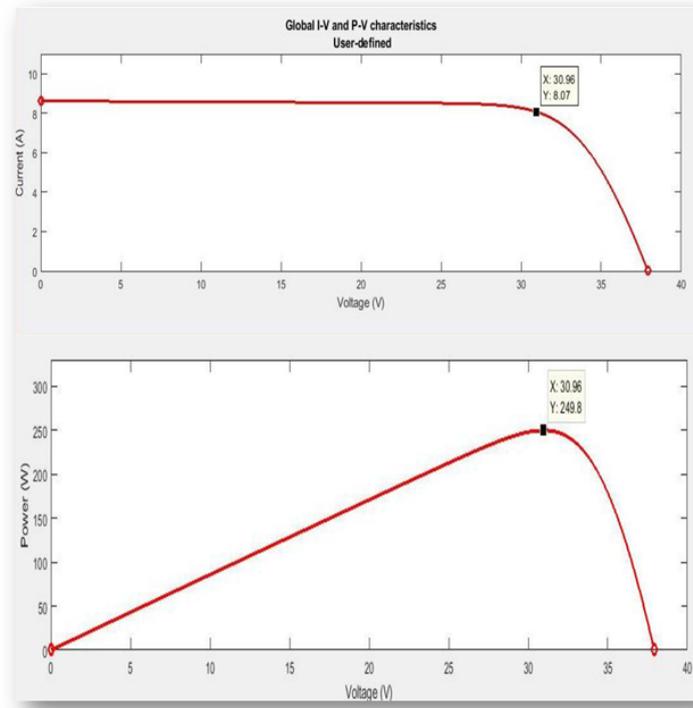


FIGURE III.2 – Paramètre de la cellule PV

Une série de simulations a été réalisée pour analyser le fonctionnement des panneaux photovoltaïques sélectionnés, et les résultats obtenus sont présentés dans la figure ci-dessous :

- La première courbe montre les caractéristiques courant-tension du panneau pour un éclairage  $PV G = 1000W/m^2$  et la température  $T = 25^{\circ}C$ .
- La deuxième courbe montre les caractéristiques de tension d'alimentation du panneau pour un éclairage  $PV G = 1000W/m^2$  et la température  $T = 25^{\circ}C$ .

FIGURE III.3 – Caractéristiques  $I - V$  et  $P - V$  du panneau utilisé

Alors pour le bon fonctionnement du panneau  $PV$  le point maximum doit atteindre une puissance de  $P_{max} \approx 250W$ , et  $I \approx 8A$ .

### III.2.2 Simulation du hacheur BOOST

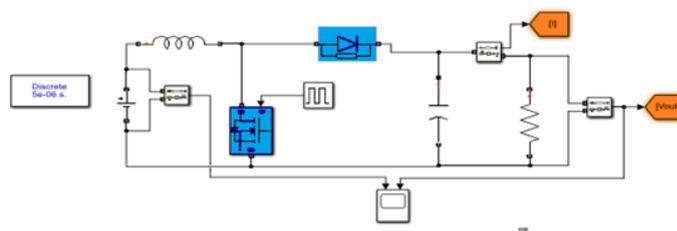


FIGURE III.4 – Schéma du hacheur BOOST sous MATLAB/SIMULINK

Les résultats de la simulation à la fréquence  $f = 10e^{-3}Hz$  sont montrés dans les figures ci-dessus.

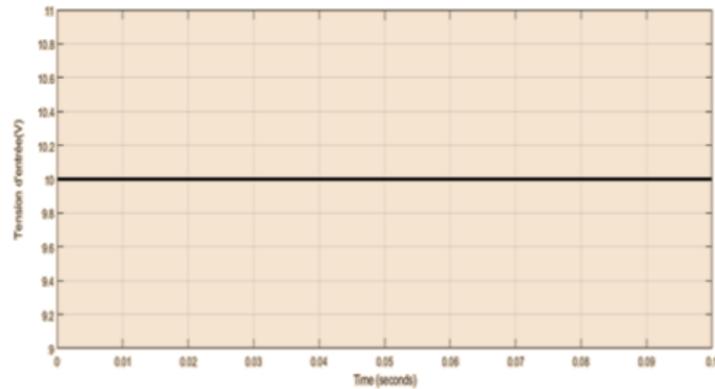


FIGURE III.5 – Courbes de la tension d'entrée du hacheur BOOST

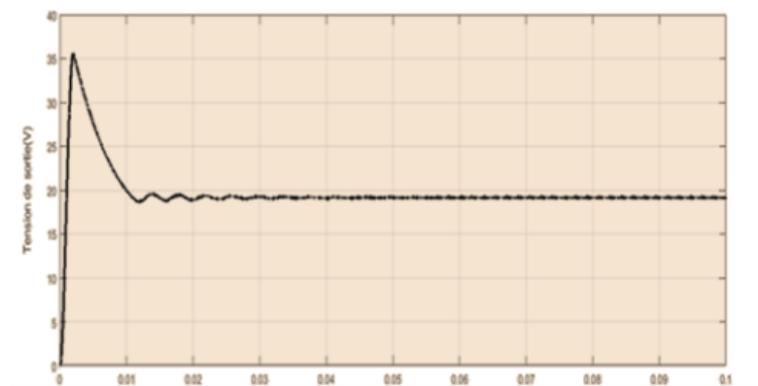


FIGURE III.6 – Courbes de la tension de sortie du hacheur BOOST

### III.3 Simulation du système photovoltaïque avec contrôle *MPPT*

Afin de tester la fonction de l'algorithme précédemment modélisé, l'unité de commande *MPPT* du système photovoltaïque est introduite ; l'entrée est le courant et la tension du panneau, et la sortie représente l'étape de cycle de service qui génère le signal de modulation *PWM*.

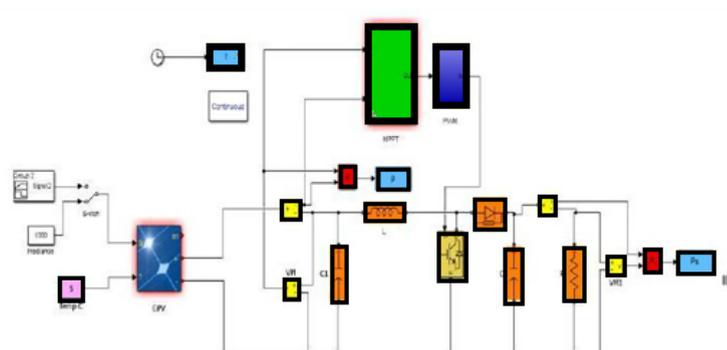


FIGURE III.7 – Simulation du *SPV* sous *MATLAB SIMULINK*

### III.3.1 Simulation de la Méthode P&O

Afin de bénéficier de la puissance maximale et d'établir une meilleure connexion entre le *GPV* et la charge, nous avons proposé une méthode de contrôle *MPPT*, la méthode *P&O*.

Le principe de cette méthode est de calculer  $\Delta P$  et  $\Delta V$  pour les rapprocher de *PPM*. Nous avons analysé la conception et la simulation du contrôle *MPPT* perturbation et observation, qui a été appliqué au *GPV*, et un convertisseur statique est passé sur la charge.

Nous avons simulé le fonctionnement des modules (*GPV-BOOST-MPPT* et charge) dans des conditions atmosphériques fixes (éclairage  $1000W/m^2$ , température  $25^{\circ}C$ ), et le contrôle de type *P&O* de l'évolution des performances du système photovoltaïque *MPPT*.

L'assemblage suivant représente la simulation MATLAB / SIMULINK de la méthode *P&O* :

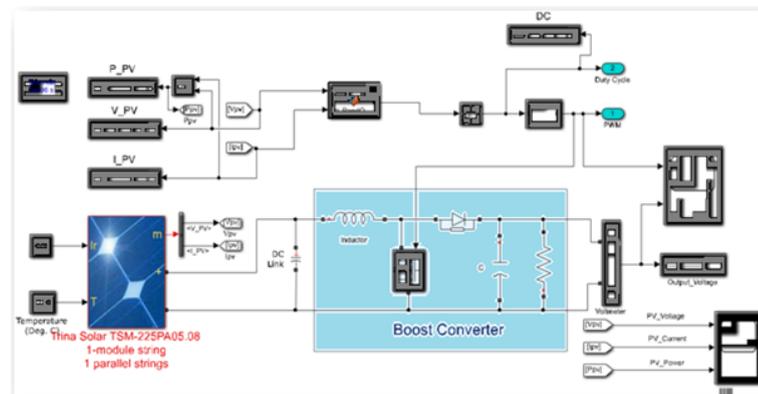


FIGURE III.8 – Schéma de simulation du panneau *PV* avec la méthode *P&O*

La figure ci-dessous représente la commande *MPPT* "Interférences et Observation", qui montre le comportement de l'algorithme *P&O* vis-à-vis des variations de  $\Delta D$  dans des conditions climatiques constantes :  $G = 1000W/m^2$  et  $T = 25^{\circ}C$ .

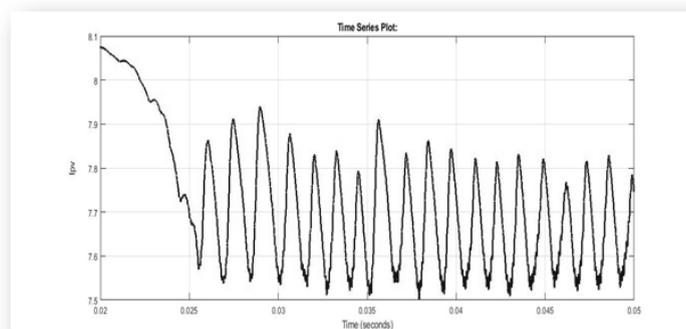
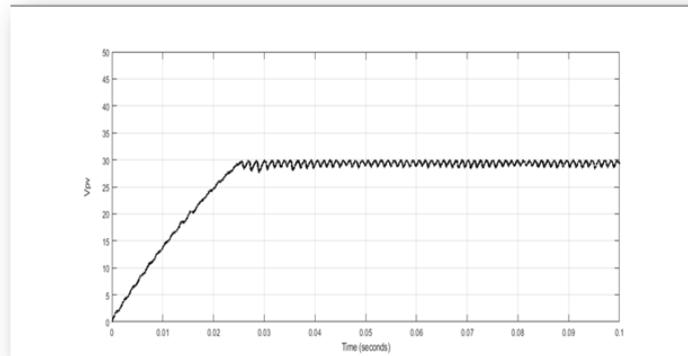
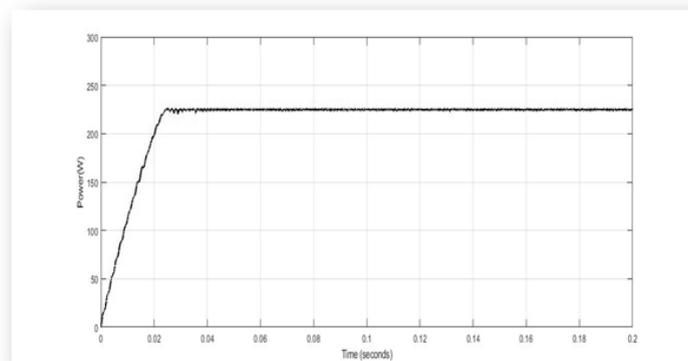
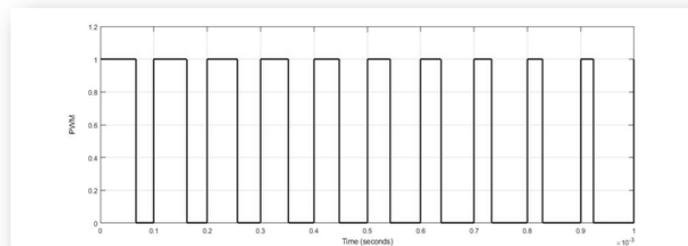
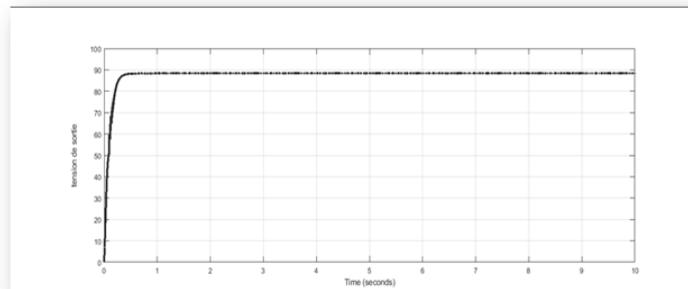


FIGURE III.9 – Courbe du courant du *GPV* avec la méthode *P&O*

À partir de la figure III.11, nous remarquons que la puissance a atteint la valeur

FIGURE III.10 – Courbe de tension aux bornes du *GPV* avec la méthode *P&O*FIGURE III.11 – Courbe de la puissance du *GPV* avec la méthode *P&O*FIGURE III.12 – Signal de commande *PWM* avec la méthode *P&O*

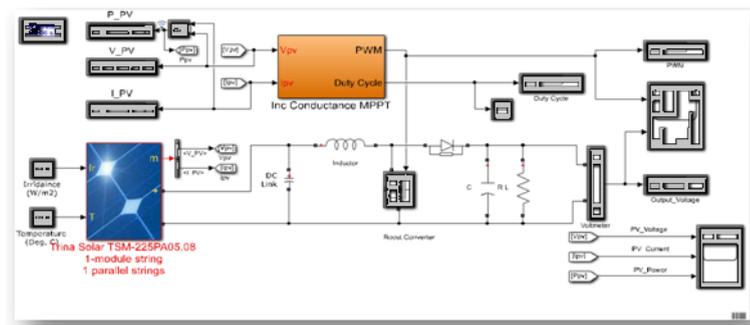
maximale ( $225W$ ), et que le changement du pas incrémental  $\Delta D$  affecte l'oscillation autour du point de puissance maximale (*PPM*).

FIGURE III.13 – Courbe de tension de sortie avec la méthode *P&O*

### III.3.2 Simulation de la méthode *INC*

La méthode est basée sur l'évolution de la conductivité électrique et le changement de la conductivité électrique des générateurs photovoltaïques. Afin d'atteindre *PPM*, nous devons comparer la valeur de conductance avec l'incrément de conductance ( $dI/dV$ ) (si l'incrément) à chaque fois. La conductivité est supérieure à la valeur opposée de la conductivité, nous réduisons le rapport cyclique.

Nous avons simulé le fonctionnement d'un ensemble d'équipements (*GPV – BOOST – MPPT* et charge) dans des conditions atmosphériques fixes (éclairage  $1000W m^2$  et température  $25^{\circ}C$ ) pour évaluer les performances du système photovoltaïque *MPPT* type *INC* du système de contrôle. La figure suivante montre la structure du schéma de simulation de l'installation *PV* associée à la commande *MPPT* de type *INC* :

FIGURE III.14 – Schéma de simulation du panneau *PV* avec la méthode *INC*

La figure suivante montre le comportement de l'algorithme *INC* par rapport au changement de  $\Delta D$  dans des conditions climatiques constantes :  $G = 1000W/m^2$  et  $T = 25^{\circ}C$  et leurs changements :

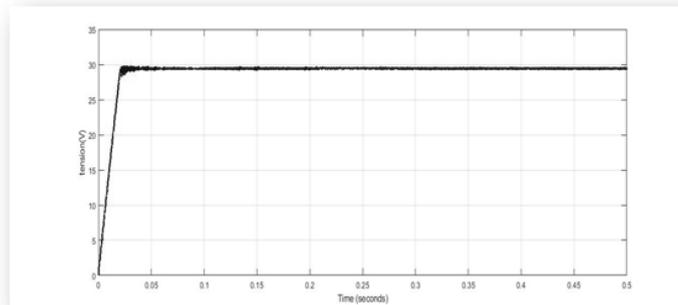


FIGURE III.15 – Courbe de la tension aux bornes du *GPV* avec la méthode *INC*

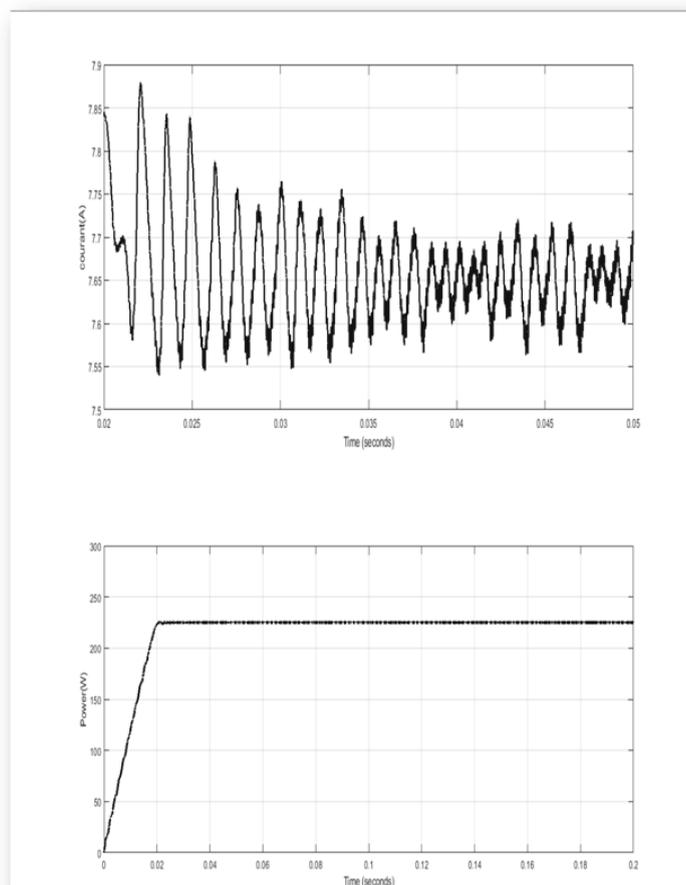


FIGURE III.16 – Courbe du courant et de la puissance du *GPV* avec la méthode *INC*

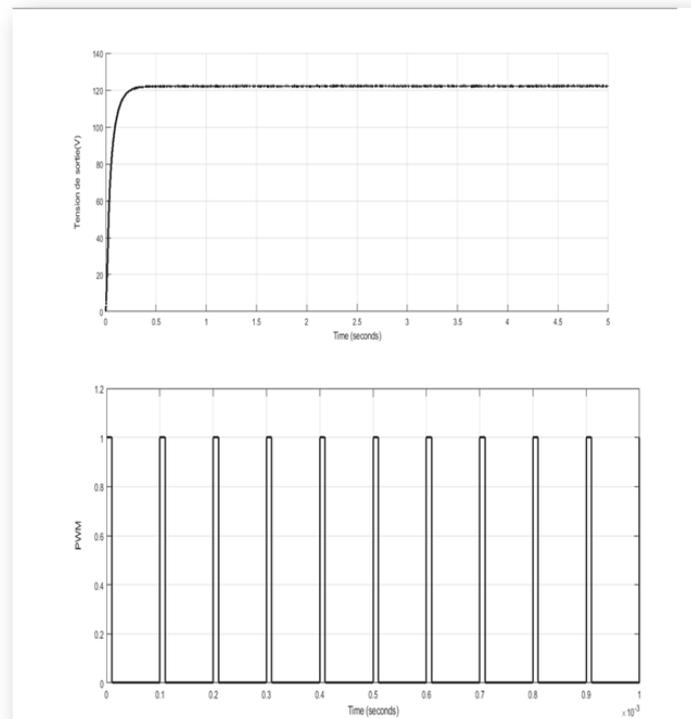


FIGURE III.17 – Courbe de tension de sortie et du signal *PWM* avec la méthode *INC*

À partir de la figure précédente, nous pouvons voir que la puissance atteint  $225W$ . Nous remarquons également que le changement du pas incrémental  $\Delta D$  affecte l'oscillation près du point de puissance maximale (*PPM*), et le système avec la commande *INC* donne également la même chose comme la méthode *P&O*, presque les mêmes paramètres que la commande *P&O* sont utilisés à cette fin.

Nous avons également remarqué qu'au fur et à mesure que le pas de cycle de service diminue, l'oscillation près du point de puissance maximale diminue, ce qui rend le système plus stable.

Les résultats obtenus montrent que le contrôle est efficace pour suivre le point de puissance maximum. En ce qui concerne la stabilité du système, il convient de noter que si l'étape du cycle de service est importante, l'algorithme *MPPT* répond rapidement aux changements des conditions de fonctionnement du système, mais la stabilité augmente les pertes.

Nous avons également remarqué que l'amplitude d'oscillation de la technologie *INC* autour de *PPM* est supérieure à celle de la méthode *P&O* car il est difficile de satisfaire la condition  $dP/dV = 0$ .

### III.3.3 Simulation de la Méthode logique floue

Nous avons optimisé les deux commandes *P&O* et *INC*, elles ont donné une réponse satisfaisante en régime permanent et présentaient de nombreuses similitudes, mais pour certaines réponses, l'efficacité de l'état transitoire est plus faible.

En raison du développement des microcontrôleurs et de la puissance de calcul, le contrôle de logique floue est le plus populaire. La technologie de commande numérique *MPPT* floue est simulée à l'aide d'un convertisseur *DC – DC* dans l'environnement MATLAB / SIMULINK. La figure ci-dessous montre le schéma équivalent :

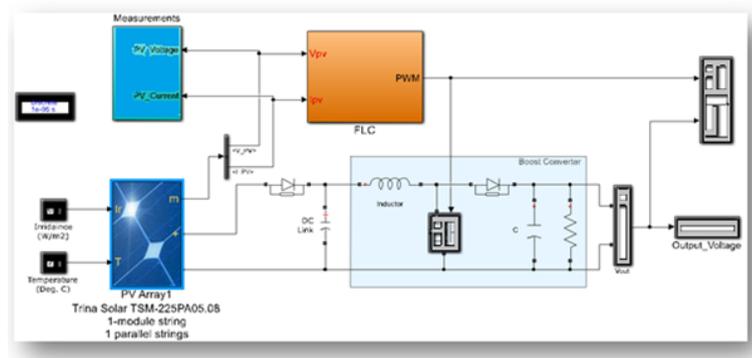


FIGURE III.18 – Schéma de simulation d'un panneau *PV* avec la méthode logique floue

Sous les conditions atmosphériques fixes (un éclairement  $1000W m^2$  et une température de  $25^{\circ}C$ ) le système photovoltaïque avec la commande de la logique floue a été simulé avec l'ensemble (*GPV – BOOST – MPPT* et une charge) pour voir l'évolution de ses performances. Les résultats de la simulation sont illustrés par la figure suivante :

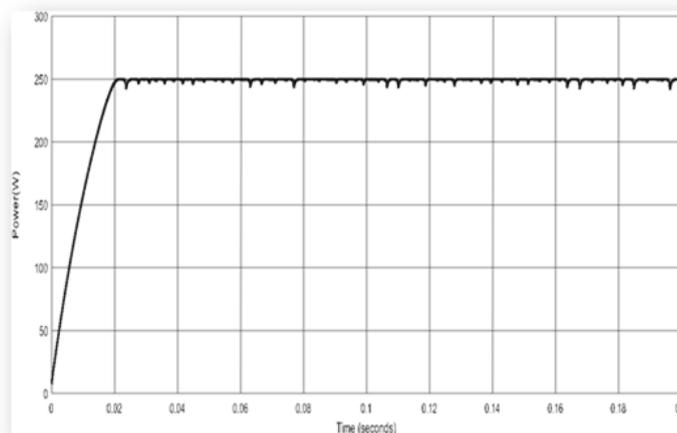


FIGURE III.19 – Courbe de puissance aux bornes du *GPV* avec la méthode logique floue

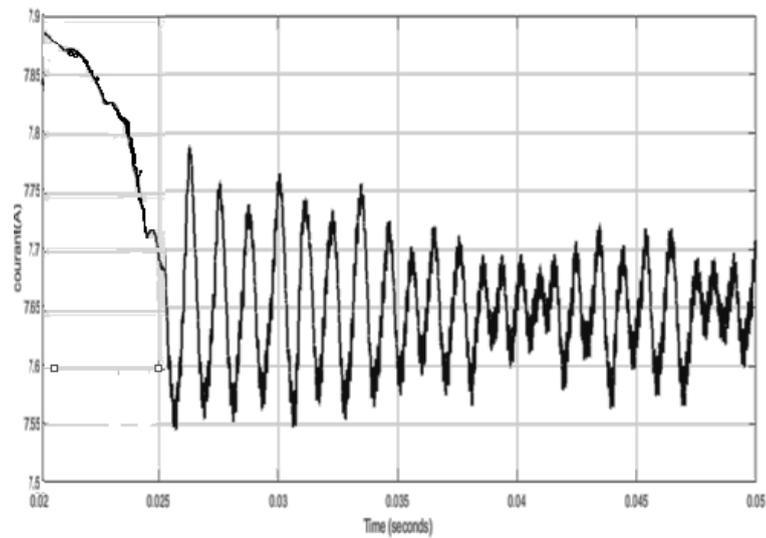
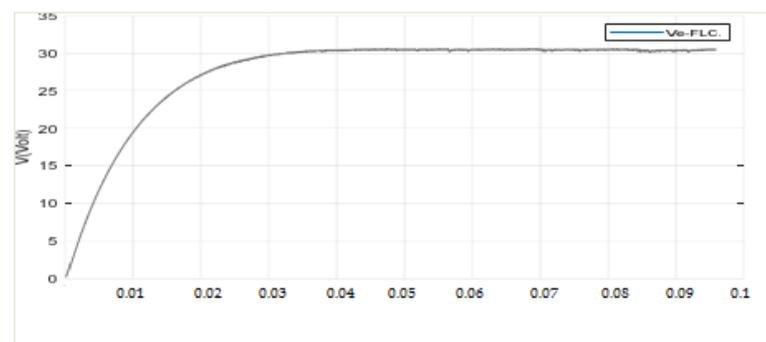
FIGURE III.20 – Courbe du courant du *GPV* avec la méthode logique floue

FIGURE III.21 – Courbe de la tension de sortie avec la méthode logique floue

Il ressort de la courbe obtenue que la commande basée sur la logique floue répond correctement aux caractéristiques du panneau. L'électricité produite est maintenue à une puissance de 250W.

### III.3.4 Simulation de la Méthode *PSO*

La Figure III.22 représente le modèle de simulation de l'algorithme *PSO*, en se basant sur l'organigramme illustré sur la Figure III.8

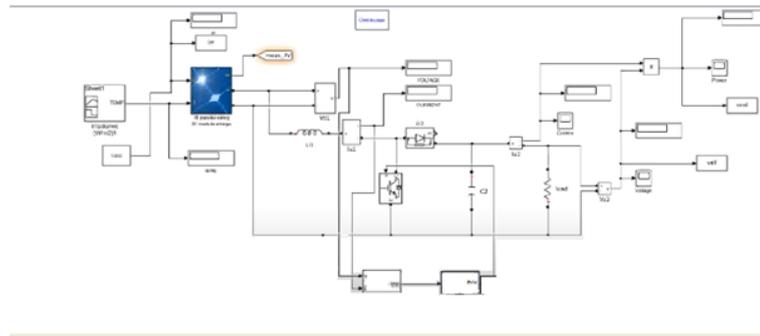
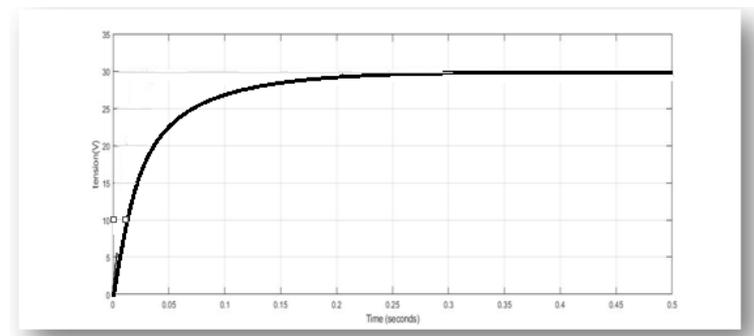
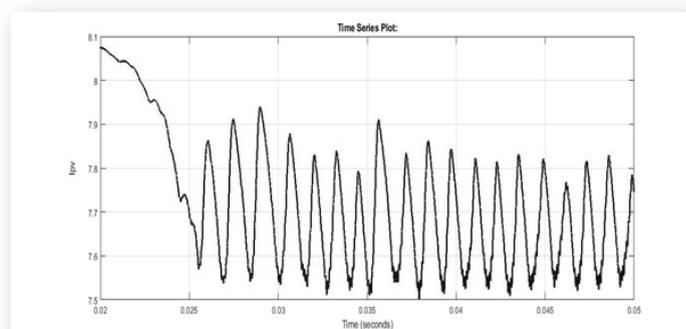


FIGURE III.22 – Modèle SIMULINK de l'algorithme MPPT PSO

La figure ci-dessous représente la commande *MPPT "PSO"*, elle montre le comportement de l'algorithme *PSO* vis-à-vis des variations de  $\Delta D$  dans des conditions climatiques constantes :  $G = 1000W/m^2$  et  $T = 25^\circ C$ .

FIGURE III.23 – L'évolution de la tension aux bornes de la charge avec système *PV* commandé en *MPPT – PSO*FIGURE III.24 – L'évolution du courant de charge avec système *PV* commandé en *MPPT – PSO*

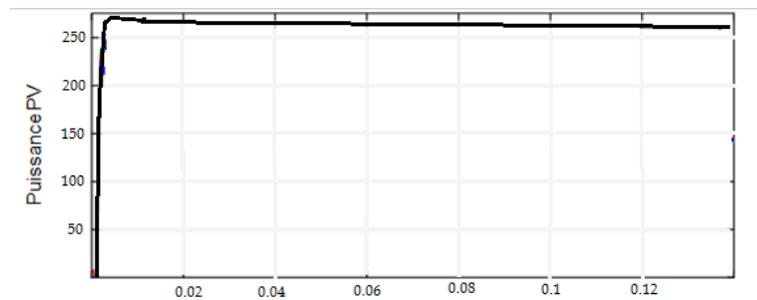


FIGURE III.25 – L'évolution de la puissance de charge avec système *PV* commandé en *MPPT – PSO*

On voit sur la courbe obtenue que la commande basée sur *PSO* répond correctement aux caractéristiques du panneau. L'électricité générée maintient toujours une puissance maximale de 270W.

Les résultats obtenus montrent que le contrôle est très efficace pour surveiller le point de puissance maximale.

### III.4 CONCLUSION

Ce chapitre présente quatre méthodes de contrôle *MPPT* appliquées aux générateurs photovoltaïques, et les résultats de l'exécution dans l'environnement MATLAB / SIMULINK. Nous avons mené une étude comparative sur quatre méthodes *MPPT*, la première est la méthode *P&O*, la seconde est la méthode *INC*, la troisième est la commande floue et la quatrième est la méthode *PSO*.

À partir des résultats obtenus, nous constatons que la technique *INC* présente des oscillations autour du *PPM* avec une amplitude plus grande que celle de la méthode *P&O*, car il est difficile de remplir la condition  $dP/dV = 0$ .

La commande par logique floue présente des résultats très compétitifs par rapport aux deux autres méthodes..

Les résultats alors obtenus par l'utilisation de la logique floue sont beaucoup plus prometteurs et donnent un rendement meilleur avec convergence au *PPM* que les méthodes *P&O* et *INC*.

la commande *PSO* permet moins d'ondulation de la puissance en régime permanent, donc une bonne stabilité du système *PV* en régime statique.

Il est évident que la puissance *PV* extraite avec *PSO* est meilleure que celles des techniques *FL*, *INC* et *P&O*.

---

## Conclusion générale

L'objectif du développement durable, la technologie photovoltaïque a montré grand potentiel en tant que source d'énergie renouvelable. L'objectif de ce travail est d'améliorer les performances et l'efficacité des systèmes photovoltaïques.

Le but principal est d'analyser certains modes *MPPT* et de trouver le plus efficace et optimal pour extraire le maximum de puissance disponible à partir des générateurs photovoltaïques.

Pour atteindre cet objectif, dans un premier temps, nous avons étudié le rayonnement solaire et la conversion du rayonnement solaire par effet *PV*, ainsi le générateur *PV* et sa modulation. Ensuite, nous avons étudié deux types de convertisseurs *DC – DC* (*BOOST* et *SEPIC*) utilisés dans ce travail.

Après avoir résolu le problème de suivi de la puissance maximale dans le système de conversion photovoltaïque, alors nous avons étudié la commande *MPPT* et ses différentes modes proposés dans la littérature.

A cause de la pandémie de coronavirus, l'étude s'est limitée au plan théorique et la simulation, elle ne passe pas par l'étape de la réalisation. Cependant on a montré la simulation, que l'algorithme *PSO* donne des résultats meilleurs que le *P&O*, *FLC* et *INC*.

Parmi tous ces quatre algorithmes, le *PSO* et *FLC* sont les algorithmes qui montrent un bon comportement et des meilleures performances par rapport aux autres modes.

Comme perspective, nous serions intéressés par les points suivants :

- Application d'un autre algorithme d'optimisation plus robuste tel que l'algorithme basé sur les différents modes d'intelligence artificielle (réseau de neurones, l'algorithme neuro-flou ?)
- Rendre la commande sur un dispositif pratique
- Explorer les domaines les plus efficaces de la stratégie afin de trouver les résultats les plus prometteurs dans toutes les conditions

- 
- Utiliser les modes *PSO* modernes (Social Learning *PSO*, Comprnsive Learning *PSO*, Barebone *PSO* ....) reconnues d'être plus efficaces que la mode *PSO* canonique.

---

## Bibliographie

---

## Bibliographie

- [1] R.KHENFER. *Détection et isolation de défauts combinant des méthodes à base de données appliquées aux systèmes électro - énergétiques*. Thèse de doctorat ,université Ferhat Abbès - 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 , université 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'un e 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. Etude de quelques cas particuliers de cellules innovantes* . Thèse de 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*. 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 ?u ne 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 de 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, universitOttawa, eier, crepa, 1998.

- [13] *Unité de recherche d'énergies renouvelables au milieu saharienne*. léquipement 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 de doctorat, université 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, université de TOULOUSE, 2008.
- [17] T.TOUAMA et 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.Sier. *Electronique de puissance Structures, fonctions de base, principales applications*. 9e , DUNOD, 2011.
- [19] Y.NETTARI. *Commandes robustes et intelligentes des convertisseurs DC-DC* . Mémoire de Magister, université ferhat abbas SETIF1, 2014.
- [20] Y. A.ABID. *Etude et dimensionnement d'un convertisseur SEPIC pour une application photovoltaïque*. memoire master, Université Abou Bekr Belkae TLEMEN, 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*. Mémoire de master, université 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* . université TOULOUSE, 2006.
- [24] Soediby, E.Budi et M. Ashari. *The Comparative Study of Buck-Boost, Cuk, Sepic and Zeta Converters for Maximum Power Point Tracking Photovoltaic Using P&O Method*. Proc. of 2015 2nd Int. Conference on Information Technology, 66 Computer and Electrical Engineering (ICITACEE), INDONESIA, Octobre 2015. DOI : 10.1109/ICITACEE.2015.7437823
- [25] A.GUELLAL, A.MOKHTARI et M.KHERCHI. *La Commande MPPT Basée sur les Algorithmes Intelligents Destinée aux Applications photovoltaïque : Etude comparative et implémentation sur FPGA*. Le 4 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 photovoltaes*. Mémoire de Master, Universitderrahmane 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. 978-1-4799-0272-9/13/31.002013IEEE
- [33] <http://www.arduino.cc/>