

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République algérienne démocratique et populaire
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique
المركز الجامعي لعين تموشنت
Centre Universitaire Belhadj Bouchaib d'Ain-Temouchent
Institut de Technologie
Département de Génie Electrique



Projet de fin d'études
Pour l'obtention du diplôme de Master en :
Domaine : SCIENCE ET TECHNOLOGIE
Filière : ELECTROMECHANIQUE
Spécialité : ELECTROMECHANIQUE

Intitulé

**Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque
commandé par la commande MPPT (P&O)**

Présenté Par :

- 1) ZIAT Soheir Ibtissem
- 2) MEDJAHED nour el houda

Devant les jurys composés de :

Dr : M.AISSOU	MCB	C.U.B.B (Ain Temouchent)	Président
Dr : A.ATTOU	MAA	C.U.B.B (Ain Temouchent)	Encadrant
Mr : B.BENSAID	MCA	C.U.B.B (Ain Temouchent)	Examineur

Année universitaire 2019/2020

Remerciements

A travers ce modeste travail, nous tenons à remercier vivement notre promoteur Dr ATTOU AMINE pour l'intéressante documentation qu'il a mise à notre disposition, pour ses conseils précieux et pour toutes les commodités et aisances qu'il nous a apportées durant notre étude et réalisation de ce projet.

Nos remerciements les plus vifs s'adressent aussi aux messieurs le président et les membres de jury d'avoir accepté d'examiner et d'évaluer notre travail.

Nous exprimons également notre gratitude à tous les professeurs et enseignants qui ont collaboré à notre formation depuis notre premier cycle d'étude jusqu'à la fin de notre cycle universitaire.

Sans omettre bien sûr de remercier profondément tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation du présent travail.

Dédicace

Je dédie ce mémoire à ma mère Fadéla et mon père Ismail pour l'éducation qu'ils ont su me donner et qui m'a permis avec l'aide de DIEU d'arriver là où je suis. Je dédie ce mémoire à mon frère, ma sœur et toute la famille ZIAT et SAADALAH sans exception et enfin à tous les amis et collègues.

Z. SOHEIR IBTISSEM

TABLE DES MATIERES

TABLE DES MATIERES	i
LISTE DES FIGURES	iv
LISTE DES ABREVIATIONS	vi
INTRODUCTION GENERALE	1
CHAPITRE I: L'ENERGIE SOLAIRE ET LES SYSTEMES PHOTOVOLTAIQUES	
<i>I.1 Introduction</i>	4
<i>I.2 Le rayonnement solaire et sa caractérisation</i>	4
1.2.1 Spectre du rayonnement :	4
1.2.2 Types de rayonnement :	5
1.2.3 Domaines d'utilisation du rayonnement :	6
<i>I.3 Les Systèmes Photovoltaïques</i> :	6
1.3.1 Système photovoltaïque autonome :	6
1.3.2 Système photovoltaïque raccordé au réseau :	7
<i>I.4 Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque</i> :	8
CHAPITRE II: LE GENERATEUR PHOTOVOLTAIQUE	
<i>II.1 Introduction</i>	9
<i>II.2 Principe de conversion photovoltaïque</i>	9
<i>II.3 Principe d'une cellule photovoltaïque</i>	10
11.3.1 Structure d'une cellule photovoltaïque	11
<i>II.4 Modèle d'une cellule photovoltaïque</i> :	14
11.4.1 Module photovoltaïque :	16
11.4.2 Caractéristiques d'un module :	16
<i>II.5 Influence de la température et de l'éclairement sur les caractéristiques I-V et P-V</i> :	17
11.5.1 Influence de l'éclairement:	17

II.5.2	Influence de la température :	18
II.6	Protections classiques d'un GPV :	19
II.7	Résultats de simulation :	20
	Caractéristiques I(V) et P(V) d'une cellule solaire :	24
	Effet de la température et de l'ensoleillement sur les courbes I(V) et P(V) :	26
CHAPITRE III: LES CONVERTISSEURS DC DC		
III.1	Introduction	28
III.2	Les différentes chaînes de conversion photovoltaïque :	28
III.2.1	Connexion directe GPV-charge comme mode de transfert de puissance :	28
III.2.2	Connexion GPV-charge via un étage d'adaptation continu-continu :	30
III.3	Les convertisseurs DC-DC :	31
III.3.1	Principe du MLI (PWM) :	31
III.3.2	Types de convertisseurs DC-DC :	32
III.3.3	Dimensionnement du filtre LC :	38
III.4	Résultats de simulation d'un hacheur BOOST:	39
CHAPITRE IV: LA COMMANDE MPPT.....		
IV.1	Introduction	40
IV.2	Principe de la recherche du point de puissance maximal :	40
IV.3	Classification des Commandes MPPT :	41
IV.3.1	MPPT indirecte :	41
IV.3.2	MPPT Directe :	41
IV.4	Les algorithmes MPPT :	42
IV.4.1	Méthodes a contre réaction de tension :	42
IV.4.2	Méthodes a contre réaction de courant :	43
IV.4.3	Méthodes a contre réaction de puissance :	44
IV.5	Perturbation Et Observation (P&O, Perturb And Observe) :	45
IV.5.1	Raisonnement Perturb&Observe :	46
IV.5.2	Organigramme de l'Algorithme P&O :	46
IV.5.3	Avantages et inconvénients de P&O :	48
IV.5.4	Autres Méthodes :	48
IV.6	Résultats de simulation de la commande MPPT :	48
CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES.....		55

BIBLIOGRAPHIE.....57

LISTE DES FIGURES

Figure I.1: spectre du rayonnement solaire.	5
Figure I.2: Système photovoltaïque autonome.	7
Figure I.3: Système photovoltaïque raccordé au réseau.	8
Figure II.1: effet photoélectrique.	10
Figure II.2: Cellule solaire.	11
Figure II.3: Structure d'une cellule solaire.	12
Figure II.4: Diode fabriquée à partir d'une jonction PN.	12
Figure II.5: Dopage de type N-P.	13
Figure II.6: schéma équivalent d'une CPV.	14
Figure II.7: association de cellules en série N_s (à gauche) et en parallèle N_p (à droite).	16
Figure II.8: Effet de l'éclairement sur la caractéristique I-V.	18
Figure II.9: Effet de l'éclairement sur la caractéristique P-V.	18
Figure II.10: Effet de la température sur la caractéristique I-V.	19
Figure II.11: Effet de la température sur la caractéristique P-V.	19
Figure II.12: Schématisation d'un GPV élémentaire avec diodes by-pass et diode anti-retour.	20
Figure II.13: Schéma bloc du courant de saturation.	21
Figure II.14: Schéma bloc du courant de saturation inverse (courant de fuite).	21
Figure II.15: Schéma bloc du courant shunt.	22
Figure II.16: Schéma bloc du photo-courant.	22
Figure II.17: Schéma bloc du courant PV.	22
Figure II.18: Schéma bloc du GPV.	23
Figure II.19: caractéristiques du bloc PV sous MATLAB/simulink.	23
Figure II.20: Caractéristique typique I-V d'une cellule solaire.	24
Figure II.21: Caractéristique courant-tension du module PV.	25
Figure II.22: Caractéristique puissance-tension du module PV.	25
Figure II.23: Caractéristique $P(V)$ du générateur PV avec un E variable et $T=Cst.$	26
Figure II.24: Caractéristique $I(V)$ du générateur PV avec un E variable et $T=Cst.$	26
Figure II.25: Caractéristique $I(V)$ du générateur PV avec une T variable et $E=Cst.$	27
Figure II.26: Caractéristique $P(V)$ du générateur PV avec une T variable et $E=Cst.$	27
Figure III.1: structure quadripôle.	28
Figure III.2: Principe d'une connexion directe entre un GPV et une charge.	29
Figure III.3: Points de fonctionnement d'un GPV en connexion directe.	29
Figure III.4: Connexion d'un GPV à une charge à travers un étage d'adaptation.	31
Figure III.5: Principe du MLI (DC/DC).	32
Figure III.6: Schéma du circuit électrique d'un convertisseur Buck-Boost.	32

Figure III.7: Convertisseur Buck-Boost en état passant et bloqué.	33
Figure III.8: Schéma du circuit électrique d'un convertisseur Buck.	33
Figure III.9: schéma équivalent lorsque K1 est fermé/ouvert.	34
Figure III.10: Schéma du circuit électrique d'un convertisseur Boost.	34
Figure III.11: schéma équivalent lorsque S est fermé.	35
Figure III.12: schéma équivalent lorsque S est ouvert.	36
Figure III.13: Modélisation du système (GPV-BOOST-charge).	39
Figure IV.1: Schéma de principe d'une connexion à travers un convertisseur DC/DC contrôlé par une commande MPPT.	41
Figure IV.2: Organigramme de classification des commandes MPPT.	42
Figure IV.3: Algorithme de circuit ouvert.	43
Figure IV.4: Algorithme du court-circuit.	44
Figure IV.5: Poursuite du point de puissance maximale.	45
Figure IV.6: Table de vérité de l'algorithme 'perturbation et observation'.	45
Figure IV.7: Algorithme de la méthode P&O.	47
Figure IV.8: Modélisation d'un SPV sous MATLAB\SIMULINK.	49
Figure IV.9: Courbes P(t),V(t),et I(t) à l'entrée/sortie du système (E=1000W/m ² T=25°).	49
Figure IV.10: Courbes P(t),V(t),et I(t) à l'entrée/sortie du système (E=500W/m ² T=25°).	50
Figure IV.11: Courbes P(t),V(t),et I(t) à l'entrée/sortie du système (E=700W/m ² T=25°).	51
Figure IV.12: Courbes P(t),V(t),et I(t) à l'entrée/sortie du système (E=800W/m ² T=25°).	51
Figure IV.13: Courbes P(t),V(t),et I(t) à l'entrée/sortie du système (E=1000W/m ² T=-5°).	52
Figure IV.14: Courbes P(t),V(t),et I(t) à l'entrée/sortie du système (E=1000W/m ² T=0°).	53
Figure IV.15: Courbes P(t),V(t),et I(t) à l'entrée/sortie du système (E=1000W/m ² T=50°).	53

LISTE DES ABREVIATIONS

Système photovoltaïque

I_{ph} : Photo-courant [A]
 I_D : Courant à travers la diode [A]
 I_{cell} : Courant fourni par la cellule [A]
 I_{ch} : Courant à travers la charge [A]
 R_p : Résistance parallèle de la cellule [Ω]
 R_s : Résistance série de la cellule [Ω]
 R_{ch} : Résistance de la charge [Ω]
 V_{ch} : Tension aux bornes de la charge [V]
 V_{cell} : Tension aux bornes de la cellule [V]
 q : Charge électrique élémentaire [$q=6021764e-19C$]
 k : Constante de Boltzmann [$K = 1,3806503e-23 J/K$]
 T : Température absolue de la cellule [K]
 I_s : Courant de saturation de la jonction non éclairée [A]
 V_{oc} : Tension du circuit ouvert [V]
 I_{sc} : Courant de court-circuit [A]
 η : Facteur d'idéalité de la jonction
 I : Courant de cellule.
 V : Tension de cellule.
 T : Température de la cellule [$^{\circ}K$]
 I_0 : Courant de saturation [A]
 I_{pv} : Courant du module photovoltaïque [A]
 V_{pv} : Courant du module photovoltaïque [A]
 N_p : Nombre de modules en parallèles
 N_s : Nombre de modules en séries
 E : Irradiation [w/m^2]
 h : Constante de Planck
 λ : Longueur d'onde

Système DC-DC

F_s : Fréquence de switch
 I_{om} : Courant de sortie pour la puissance maximale
 V_{pv-mpp} : Tension du panneau pour la puissance maximale
 L : Courant d'inductance
 V_c : Tension de la capacité C
 X_{opt} : Valeur optimale
 D : le rapport cyclique du convertisseur
 V_{mpp} : tension de la puissance maximale
PPM: Point de puissance maximal
 I_{mpp} : Courant dans le point PPM

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

Il y a environ 4,6 milliards d'années, une énorme boule de gaz se crée: le soleil. Son diamètre est plus ou moins de 1 300 000 km soit cent fois celui de la Terre. La distance séparant cet astre de notre planète est de 149 597 870 km. Grâce à la célérité, nous savons que la lumière parvient à notre surface en 8 minutes et 19 secondes. Le soleil est une source de multiples études: son origine, ses caractéristiques, son avenir, son rayonnement. Mais la principale question à traiter sans ce travail est de savoir en quoi le soleil est nécessaire au développement de la vie sur terre ?

Le soleil envoie dans l'espace une énergie qui est au niveau de la terre de l'ordre de $1300\text{W}/\text{m}^2$. Une fois l'atmosphère traversée, la terre reçoit au niveau du sol à la verticale à midi, dans le cas idéal d'un temps clair et sec, de l'ordre de $1000\text{ W}/\text{m}^2$. Au niveau mondial, compte-tenu de l'ensoleillement réel, l'énergie solaire reçue au sol en moyenne annuelle se monte à environ 75000 GTep^2 ou 0,9 milliards de TWh^3 . Cette énergie représente 6000 fois la consommation mondiale annuelle actuelle d'énergie (12,5 GTep).

Les chiffres du soleil :

- Distance Terre-Soleil : environ 150 millions de kilomètres
- Diamètre : environ 1,4 million de kilomètres (Terre = 12 700 km)
- Masse : environ $2 \cdot 10^{30}\text{ kg}$ (Terre = $6 \cdot 10^{24}\text{ kg}$)
- Masse volumique : $1,41\text{ g}/\text{cm}^3$ (eau = $1\text{ g}/\text{cm}^3$, Terre = $5,5\text{ g}/\text{cm}^3$)
- Puissance rayonnée par le Soleil : $4 \cdot 10^{23}\text{ kW}$
- Energie solaire reçue par la Terre : $1353\text{ J}/\text{m}^2/\text{s}$
- Température au centre du Soleil : environ 14 millions de Kelvins ($0\text{ K} = -273,15\text{ }^\circ\text{C}$)
- Température de la surface du Soleil : environ 5 800 K
- Composition : hydrogène (92 %), hélium (8 %), et des traces d'oxygène, de carbone, d'azote, de silicium, de néon, de fer et de soufre essentiellement ; mais tous les atomes sont présents.

L'exploitation directe de l'énergie solaire au moyen des capteurs relève de deux technologies bien distinctes : l'une produit des calories, c'est l'énergie solaire thermique, et l'autre produit de l'électricité, et c'est cette dernière énergie solaire photovoltaïque qui fait l'objet de ce mémoire.

Presque toutes les énergies renouvelables sont des dérivées de l'énergie solaire : le vent, le rayonnement solaire, la force de l'eau sont des produits directs ou indirects de l'activité solaire. Le soleil fournit une énergie lumineuse grandiose à la Terre. Mais le problème réside dans le fait que la forme sous laquelle nous recevons l'énergie n'est pas nécessairement celle sous laquelle cette énergie est utilisable. C'est pourquoi, nous devons utiliser des processus de conversion de l'énergie. Notamment, les cellules solaires photovoltaïques.

L'énergie photovoltaïque, basée sur la conversion du rayonnement électromagnétique solaire en électricité, représente l'une des ressources énergétiques renouvelables à part entière. Cette dernière se développe très rapidement. Elle est durable, propre et sans pollution de l'environnement. Elle est de nature multidisciplinaire, impliquant la mécanique, l'électronique de puissance, théorie de contrôle, et d'autres filières.

Cette conversion d'énergie s'effectue par le biais d'une cellule dite photovoltaïque (PV) basée sur un phénomène physique appelé effet photovoltaïque qui consiste à produire une force électromotrice lorsque la surface de cette cellule est exposée à la lumière. Selon les caractéristiques électriques des cellules photovoltaïques et de leur association série/parallèle, le rendement des systèmes PV peut être amélioré par des méthodes dit techniques de Poursuite du Point de Puissance Maximale (MPPT) : c'est dans cette optique que s'inscrit ce thème de recherche.

Un aperçu de plus de trente de ces techniques MPPT a été abordé dont la technique perturbation et observation (P&O), cette technique est largement utilisée. Il existe également d'autres techniques que nous allons brièvement mentionner dans les prochains chapitres.

Ce mémoire est divisé en quatre chapitres comme suit :

- Dans le premier chapitre, nous présentons des notions générales sur l'énergie solaire, le rayonnement solaire et ses caractérisations, les différents systèmes photovoltaïques. A la fin nous allons exposer les avantages et les inconvénients de l'énergie PV.
- Dans le deuxième chapitre, nous allons nous intéresser au générateur photovoltaïque en commençant par le principe de conversion PV passant par le principe de la cellule PV et sa structure de fonctionnement. Ensuite Nous allons utiliser le logiciel MATLAB pour étudier dans un premier temps le comportement d'un module PV, ainsi que l'influence de la température et de l'éclairement sur l'énergie produite.

- Le troisième chapitre, traite les différentes chaînes de conversion photovoltaïque puis une étude théorique sur les différents types des convertisseurs statiques qu'on peut utiliser dans le système photovoltaïque, basant sur le convertisseur BOOST qui sera contrôlé par la commande MPPT. tout en donnant les principaux résultats obtenus par la modélisation et simulation de ce dernier sur MATLAB/simulink.

Le cœur du travail est exposé dans le dernier chapitre traitant de l'analyse, de la validation, et de la discussion des résultats de simulation et expérimentaux de la technique MPPT (P&O) proposée :

- Dans le quatrième chapitre, nous présentons le principe de la recherche de point maximal, les classifications de la commande MPPT ainsi, des algorithmes de quelques-unes de ces méthodes, en focalisant sur la méthode P&O.
- Une conclusion générale dressera le bilan de cette étude en donnant quelques perspectives pour de futurs travaux.

CHAPITRE I: L'ENERGIE SOLAIRE ET LES SYSTEMES PHOTOVOLTAIQUES

I.1 Introduction

Le Soleil est une grande sphère formée de gaz extrêmement chauds. Il est constitué, par la masse de 80% d'hydrogène, de 19% d'hélium, le 1% restant étant un mélange de plus de 100 éléments lourds (Fer, Néon, Azote, Silicium, ...).

Des réactions de fusion thermonucléaire se produisent sans cesse dans le noyau du Soleil à des millions de degrés dont les atomes d'hydrogène sont transformés en hélium. La masse est alors transformée en énergie selon la fameuse formule d'Einstein, $E = mC^2$. Cette énergie est transmise sous forme de rayonnements électromagnétiques. Une partie de cette énergie atteint l'espace extra-atmosphérique de la Terre avec une irradiance moyenne d'environ $1,367 \text{ W/m}^2 \pm 3\%$.

La technologie photovoltaïque est parmi les applications de l'énergie solaire. L'énergie solaire photovoltaïque provient de la conversion de la lumière du soleil au sein des matériaux semi-conducteurs où cette dernière est transformée directement en énergie électrique.

I.2 Le rayonnement solaire et sa caractérisation

L'un des phénomènes les plus importants pour le transfert d'énergie dans l'atmosphère est le rayonnement électromagnétique. Le rayonnement électromagnétique se propage sous forme d'onde à une vitesse d'environ $300\,000 \text{ km/s}$ (la vitesse de la lumière). Ces rayons traversent l'atmosphère terrestre puis arrivent jusqu'à la surface de la Terre.

Le rayonnement solaire est la matière première de l'énergie solaire, il peut aussi être considéré comme un ensemble de photons, particules transportant chacune une quantité d'énergie appelée quantum d'énergie et notée ΔE

Ce rayonnement constitue un spectre continu allant des ultra-violets (5%) à l'infrarouge (55%) en passant par le visible (40%) où il émet avec le maximum d'intensité. Cependant, en traversant l'atmosphère, des parties de ce rayonnement sont réfléchies, absorbées ou diffusées, ce qui diminue significativement cette valeur. Cette diminution est d'autant plus forte que la couche d'atmosphère est importante. Ainsi, l'énergie que nous transmet le Soleil dépend de plusieurs facteurs comme l'épaisseur de l'atmosphère où l'on se trouve ou encore la position du Soleil et sa valeur atteint dans les meilleures conditions $900 \text{ à } 1000 \text{ Watts/m}^2$.

I.2.1 Spectre du rayonnement :

L'un des phénomènes les plus importants pour le transfert d'énergie dans l'atmosphère est le

rayonnement électromagnétique. Le rayonnement électromagnétique se propage sous forme d'onde. Toutes les ondes électromagnétiques se propagent à la même vitesse dans le vide, soit $2,99793 \times 10^8$ m/s, et en une vitesse proche mais moins rapide dans l'air. La lumière visible avec les rayons gamma, rayons x, ultraviolet, infrarouge, micro-ondes, et radio forment le spectre électromagnétique. La longueur d'onde et la fréquence du spectre sont montrées dans la figure (I.1).

Le rayonnement électromagnétique est composé de «grains» de lumière appelés photons. L'énergie de chaque photon est directement liée à la longueur d'onde. L'énergie de chaque photon est donnée par la formule suivante : $E = h\nu = hc/\lambda$ (1.1)

- $h = 6,62 \cdot 10^{-34}$ JS⁻¹ : la constante de Planck.
- $C = 3 \cdot 10^8$ mS⁻¹ : étant la vitesse de propagation.
- λ : la longueur d'onde.

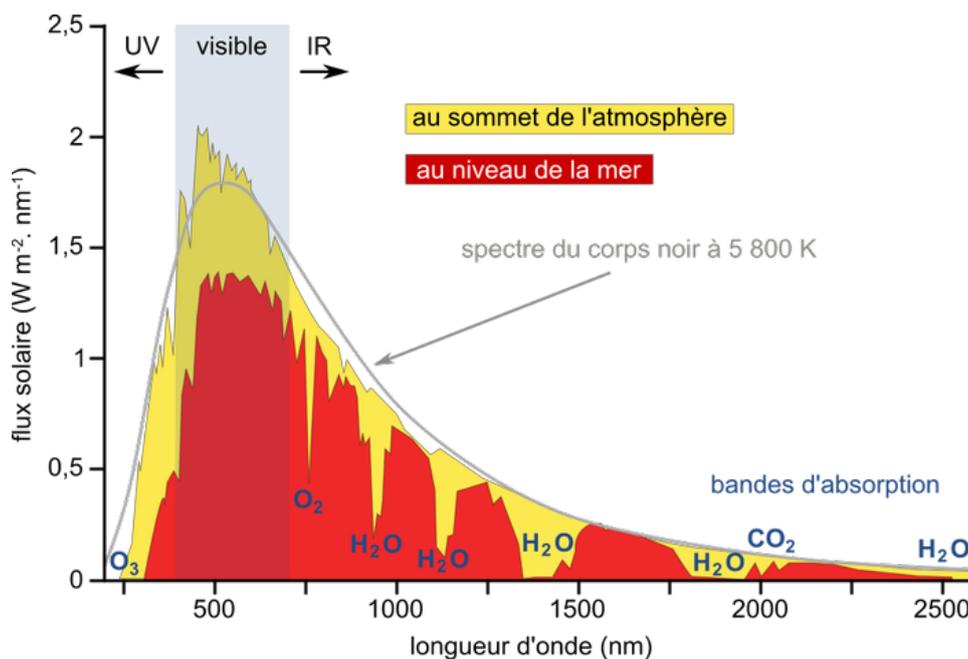


Figure I.1: spectre du rayonnement solaire.

I.2.2 Types de rayonnement :

Généralement on constate 4 types :

Rayonnement direct : c'est le rayonnement solaire atteignant directement la surface terrestre depuis le soleil. Le pyrhéliomètre est l'instrument qui permet de mesurer l'intensité du rayonnement direct.

Rayonnement diffus : il est dû à l'absorption et à la diffusion d'une partie du rayonnement solaire par l'atmosphère et à sa réflexion par les nuages. Il peut être mesuré par un pyranomètre.

Rayonnement solaire réfléchi ou l'albédo : c'est le rapport de l'énergie solaire réfléchie par une surface à l'énergie solaire incidente. Plus une surface est réfléchissante, plus son albédo est élevé et. Il peut être mesuré par un Albédo mètre.

Rayonnement global : Il représente la somme de tous les rayonnements reçus (direct+diffus+albédo). Il est mesuré par un pyranomètre ou un solarimètre.

I.2.3 Domaines d'utilisation du rayonnement :

Le rayonnement solaire disponible au sol est un élément clé dans de nombreux domaines qu'on peut tenter de regrouper de la manière suivante :

- Production d'électricité par la voie photovoltaïque ou solaire thermique (décision d'investissement, management du réseau d'électricité, ...)
- Agriculture et énergie de la biomasse (prévision et surveillance de la croissance de la culture et de la biomasse)
- Prévisions météorologiques et climatiques (GCOS, 2010)
- Environnement (photochimie de l'air dans les villes)
- santé humaine (prévention des cancers de la peau, ...)
- vieillissement et résistance des matériaux (polymères, peintures, caoutchouc, ...)
- architecture et habitat (économies d'énergie, confort lumineux, ...)

I.3 Les Systèmes Photovoltaïques :

Le système photovoltaïque est constitué par une source d'énergie (générateur photovoltaïque dit GPV), une interface de puissance (les convertisseurs statiques DC-DC et DC-AC avec un système de commande) et une charge.

Les systèmes photovoltaïques les plus couramment utilisés sont de deux types : autonome et raccordé au réseau.

I.3.1 Système photovoltaïque autonome :

Les installations autonomes sont des installations non raccordées au réseau, dont le système de stockage garantit une énergie électrique même en cas de faible éclairage ou d'obscurité.

Ces installations sont avantageuses d'un point de vue technique et financier c'est bien souvent le seul moyen de s'électrifier lorsque le courant du réseau n'est pas disponible.

Etant donné que le courant fourni par le générateur PV est du courant DC, si l'installation de l'utilisateur requiert du courant AC, un onduleur est nécessaire.

Ces systèmes nécessitent l'utilisation de batteries d'accumulateur pour stocker l'énergie durant l'absence du soleil.

I.3.2 Système photovoltaïque raccordé au réseau :

Système raccordé au réseau, ou non autonome, c'est un système qui injecte l'excès d'énergie dans le réseau de distribution électrique qui agit par conséquent comme un grand accumulateur, il est couplé donc directement au réseau électrique à l'aide d'un onduleur.

Les systèmes raccordés au réseau n'ont donc pas besoin de batterie d'accumulateur. Ce type de système offre beaucoup de facilité pour le producteur/consommateur puisque c'est le réseau qui est chargé de l'équilibre entre la production et la consommation d'électricité.

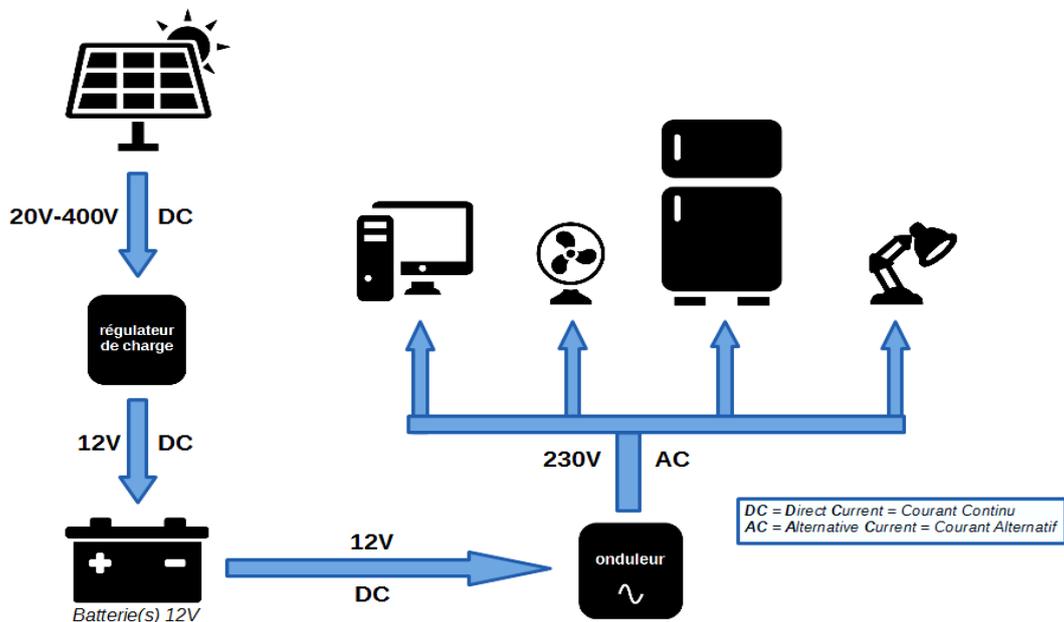


Figure I.2: Système photovoltaïque autonome.

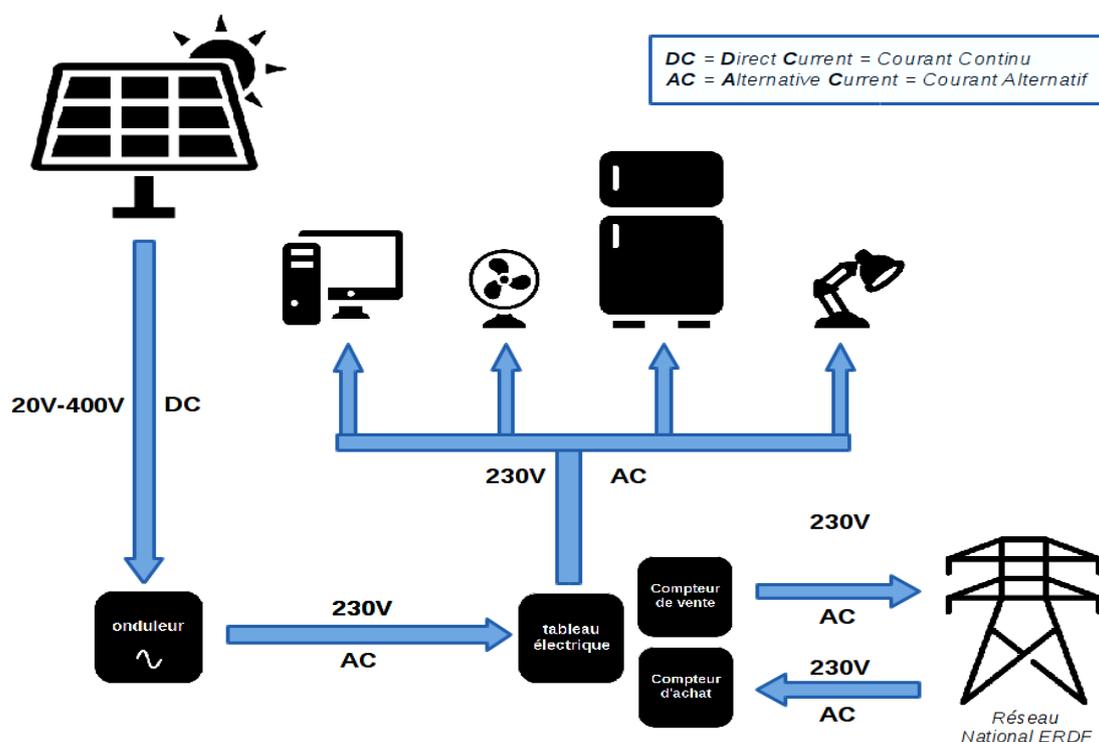


Figure I.3: Système photovoltaïque raccordé au réseau.

I.4 Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque :

Avantage :

- Sa gratuité.
- Pas de pollution.
- Sa fiabilité et la longue vie de l'installation.
- Sa structure fixe.
- Son coup de maintenance bas.
- Sa flexibilité (dimensionnement selon les besoins, modularité).
- L'installation ne produit aucun bruit.
- Son potentiel illimité. 5% de la surface des déserts sucrerait pour alimenter la planète entière.

Inconvénients :

- Le coût élevé de l'installation.
- Le rendement relativement bas de l'effet photovoltaïque.
- La puissance est réduite lorsque les conditions climatiques sont défavorables (nuages).

CHAPITRE II: LE GENERATEUR PHOTOVOLTAIQUE

II.1 Introduction

L'énergie solaire photovoltaïque provient de la transformation directe d'une partie de la lumière en électricité. Cette conversion s'effectue par le biais d'une cellule dite photovoltaïque basé sur un phénomène physique appelé effet photovoltaïque qui consiste à produire une force électromotrice lorsque la cellule est exposée à la lumière.

L'association de plusieurs cellules en série/parallèle donne lieu à un générateur photovoltaïque qui a une caractéristique courant-tension (I-V) et puissance-tension (P-V) non linéaire présentant un point de puissance maximale ce qui va faire l'objet de notre travail. Notre objectif de travail est l'étude de l'influence de quelques paramètres sur un générateur photovoltaïque à partir de la modélisation de ce dernier sous Matlab/Simulink.

II.2 Principe de conversion photovoltaïque

Effet photovoltaïque :

L'énergie solaire photovoltaïque provient de la conversion de la lumière du soleil en électricité au sein de matériaux semi-conducteurs comme le silicium ou recouverts d'une mince couche métallique. Ces matériaux photosensibles ont la propriété de libérer leurs électrons sous l'influence d'une énergie extérieure apportée par les photons qui heurtent les électrons et les libèrent, induisant un courant électrique: c'est *l'effet photovoltaïque*.

L'effet photoélectrique (EPE) :

Le rayonnement solaire est constitué de photons dont la longueur d'onde s'étend de l'ultraviolet (0.2 μm) à l'infrarouge lointain (2.5 μm). On utilise la notion AM pour Air Mass afin de caractériser le spectre solaire en termes d'énergie émise. L'énergie totale transportée par le rayonnement solaire sur une distance soleil-terre est de l'ordre de 1350W/m² (AM0) dans l'espace hors atmosphère terrestre. Lorsque le rayonnement solaire traverse l'atmosphère, il subit une atténuation et une modification de son spectre, à la suite de phénomènes d'absorption et de diffusion dans les gaz, l'eau et les poussières. Ainsi, la couche d'ozone absorbe une partie du spectre lumineux provenant du soleil, et en particulier une partie des ultraviolets dangereux pour la santé. [13]

Le rayonnement solaire direct reçu au niveau du sol (à 90° d'inclinaison) atteint 1000 W/m² du fait de l'absorption dans l'atmosphère (AM1). Cette valeur change en fonction de l'inclinaison des

rayons lumineux par rapport au sol. Plus l'angle de pénétration θ est faible, plus l'épaisseur atmosphérique que les rayons auront à traverser sera grande, d'où une perte d'énergie conséquente..

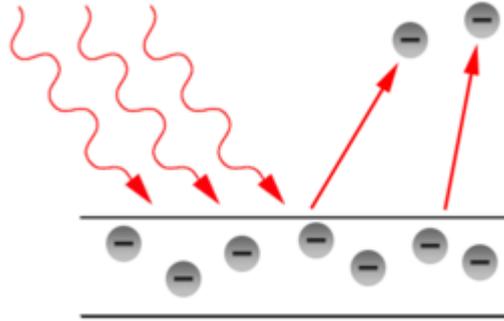


Figure II.1: effet photoélectrique.

II.3 Principe d'une cellule photovoltaïque

Une cellule photovoltaïque aussi appelée cellule solaire, constitue l'élément de base de la conversion photovoltaïque. Elle utilise le phénomène photoélectrique pour produire de l'électricité, sous forme de courant continu, constitué de semi-conducteurs, principalement à base de silicium.

Une cellule photovoltaïque est une diode, formée de deux couches de matériaux de semi-conducteur dopées de sorte que l'une conduise les charges négatives (dopée au phosphore) et l'autre, les charges positives (dopée au bore) créant ainsi une jonction PN avec une barrière de potentiel. Lorsque les photons sont absorbés par le semi-conducteur, ils transmettent leur énergie aux atomes de la jonction PN de telle sorte que les électrons de ces atomes se libèrent et créent des électrons (charges N) et des trous (charges P). Ceci crée alors une différence de potentiel entre les deux couches. Cette différence de potentiel est mesurable entre les connexions des bornes positives et négatives de la cellule. A travers une charge continue, on peut en plus récolter des porteurs. La tension maximale de la cellule est d'environ 0.6 V pour un courant nul. Cette tension est nommée tension de circuit ouvert (V_{OC}). Le courant maximal se produit lorsque les bornes de la cellule sont court-circuitées, il est appelé courant de court-circuit (I_{CC}) et dépend fortement du niveau d'éclairement.

En résumé le principe d'une cellule photovoltaïque est de forcer les électrons et les trous à se déplacer chacun vers une face opposée du matériau photovoltaïque au lieu de se replacer

simplement dans la même position qu'avant. Il s'agit en somme de faire déplacer tous ces électrons et ces trous dans une seule et même direction pour créer un courant. [11][1]



Figure II.2: Cellule solaire.

II.3.1 Structure d'une cellule photovoltaïque

Une cellule photovoltaïque est constituée de plusieurs couches. Visuellement, la cellule photovoltaïque prend la forme de fines plaques d'une dizaine de centimètres de côté. Ces cellules photovoltaïque sont ensuite assemblées dans un module photovoltaïque, plus communément appelé panneau. On trouve au centre, une couche avec porteurs de charges libres négative (N) en contact avec une autre couche avec porteurs de charges libres positives (P). De part et d'autre du cœur de la cellule, on a une couche conductrice (K) autrement dit une grille métallique, puisqu'il faut que cette couche soit conductrice et ne subisse pas des phénomènes de corrosion. On a donc une couche qui sert de cathode (pôle +) recouvrant la couche semi-conductrice dopée N et une couche qui joue le rôle de l'anode (pôle -) en dessous la couche semi-conductrice P. Aussi le silicium est très réflecteur, on place donc un revêtement anti-réflexion sur le dessus de la cellule. Enfin on trouve une couche de verre qui protège la cellule. Ces couvertures de protections sont indispensables car la cellule est très fragile. L'épaisseur totale de la cellule est de l'ordre du millimètre. Comme le montre la figure (II.3) : [11]

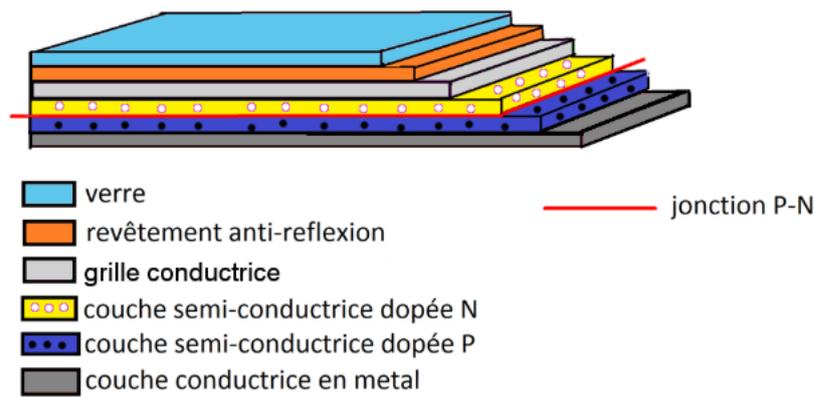


Figure II.3: Structure d'une cellule solaire.

II.3.1.1 Dopage des cristaux :

La jonction PN : C'est la juxtaposition de deux régions de types différents (N et P). La différence de densité des donneurs et d'accepteurs ($N_d - N_a$) passe d'une valeur négative dans la région de type P à une valeur positive dans la région de type N.

La solution la plus fréquente pour guider les électrons et les trous est d'utiliser un champ électrique au moyen d'une jonction PN, entre couches « dopées » respectivement P (positive) et N (négative). Le dopage des cristaux de silicium consiste à leur ajouter d'autres atomes pour améliorer la conductivité du matériau. Une jonction PN est créée par l'assemblage de deux barreaux de Silicium de type N et P. Le composant ainsi créé est appelé diode. [13]

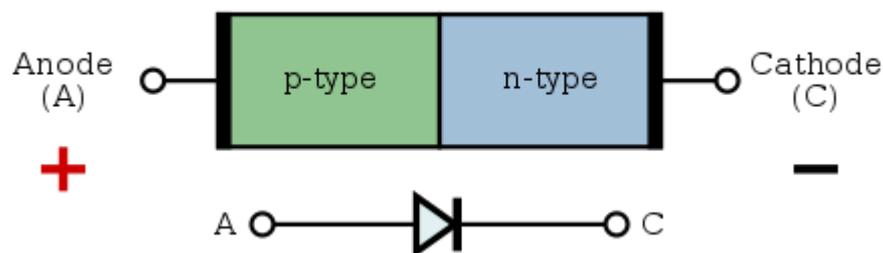


Figure II.4: Diode fabriquée à partir d'une jonction PN.

Dopage de type N : un atome de silicium compte 4 électrons. L'une des couches est dopée avec des atomes de phosphore qui, eux, comptent 5 électrons (soit 1 de plus que le silicium). On parle de dopage négatif car les électrons (de charge négative) sont excédentaires.

Dopage de type P : l'autre couche de la cellule est dopée avec des atomes de bore ont 3 électrons (1 de moins que le silicium). On parle de dopage positif en raison du déficit d'électrons ainsi créée.

Lorsque la première couche est mise en contact avec la seconde. Les électrons en excès dans le matériau dopé N se dirigent naturellement vers le matériau dopé P.

Quand un photon arrache un électron, libérant l'électron et formant un trou, sous l'effet de ce champ électrique ils partent chacun à l'opposé. Les électrons s'accumulent dans la région N (qui devient le pôle négatif), tandis que les trous s'accumulent dans la région P (qui devient le pôle positif). Ce déplacement d'électrons n'est autre que de l'électricité.

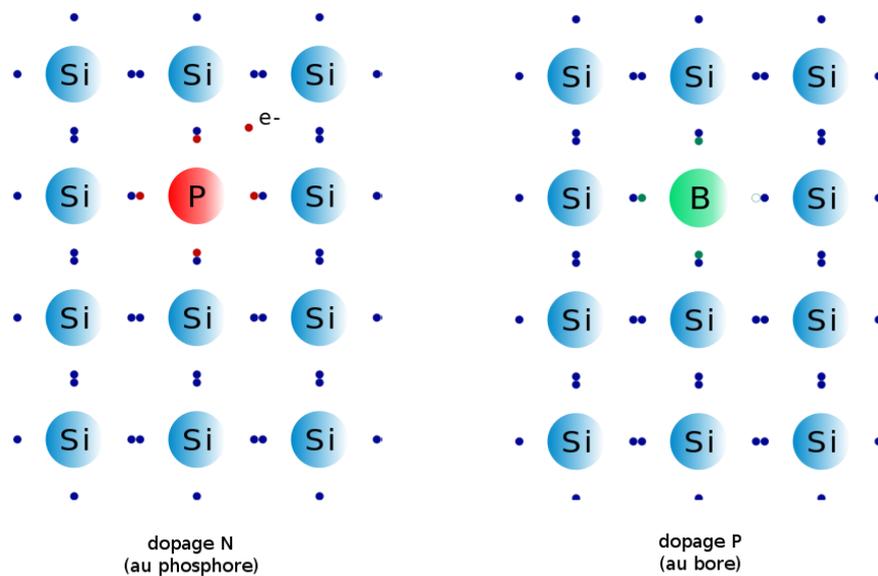


Figure II.5: Dopage de type N-P.

II.3.1.2 Types de cellules photovoltaïques :

Les cellules mono-cristallines: Ce type de cellule photovoltaïque est l'une des plus répandues. Elle est obtenue à partir de silicium monocristallin, appliqué en une tranche simple. Elle permet de composer des panneaux solaires qui vont produire de l'électricité servant à alimenter une habitation ou le réseau public, par exemple.

Les cellules en silicium poly-cristallin : Facilement reconnaissable grâce à ses cristaux bleus, cette cellule photovoltaïque se compose d'une seule tranche de silicium. Elle est de forme carrée. On la trouve souvent dans les installations domestiques, agricoles ou industrielles.

La cellule au silicium Amorphe : elle est composée d'une couche fine de silicium, bien plus fine que les monocristallines ou les polycristallines. On la trouve essentiellement pour alimenter les appareils de faible puissance, comme les montres solaires, les éclairages de jardin ou encore les calculatrices solaires.

II.4 Modèle d'une cellule photovoltaïque :

Une cellule solaire photovoltaïque est une diode électronique PN de grande surface qui est exposée à la lumière (photons), et génère une tension électrique (volts). En ce qui concerne le comportement d'une cellule solaire réelle, deux résistances parasites sont prises en considération pour une description plus exacte. La figure présente le schéma équivalent d'une cellule PV: [30] [24]

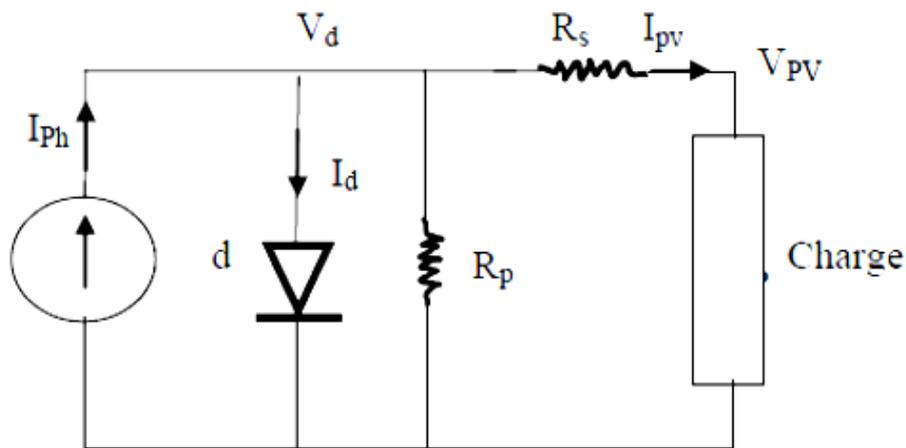


Figure II.6: schéma équivalent d'une CPV.

A partir de ce circuit on peut tirer les équations suivantes : [30] [24]

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

Avec:

I : le courant délivré par la cellule.

I_{ph} : Photo courant.

I_d : Courant de diode.

I_{sh}/I_p : Le courant de la résistance shunt.

R_p : la résistance shunt caractérisant les courants de fuite de la jonction.

R_s : la résistance série représentant les diverses résistances des contacts et de connexions.

Ces équations permettent de décrire la caractéristique I-V et P-V de la cellule et du module en donnant les expressions des différents courants: [30]

Le photo-courant:
$$I_{ph} = [I_{cc} + ki(T - T_{ref})] * \frac{G}{G_{ref}} \quad (2.1)$$

Le courant de saturation I_0 :
$$I_0 = I_{rs} \left(\frac{T}{T_{ref}} \right)^3 \cdot \exp \left[\left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T} \right) \frac{qEg}{nK} \right] \quad (2.2)$$

Le courant de saturation inverse de la diode (courant de fuite) :
$$I_{rs} = \frac{I_{sc}}{\exp(q V_{oc} n N_s K T)^{-1}} \quad (2.3)$$

Le courant de la résistance shunt :
$$I_{sh} = \frac{V + (I.R_s)}{R_{sh}} \quad (2.4)$$

le courant délivré (série) :
$$I = I_{ph} - I_0 \left[\exp \left(\frac{q(V + I.R_s)}{n N_s K T} \right) - 1 \right] - I_{sh} \quad (2.5)$$

Le courant délivré (parallèle) :
$$I = N_p I_{ph} - N_p I_0 \left[\exp \left(\frac{q(V + I.R_s)}{n N_s K T} \right) - 1 \right] - N_p I_{sh} \quad (2.6)$$

I_0 : est le courant de saturation. [A]

I_{rs} : est le courant inverse. [A]

I_{cc} : le courant de court-circuit de la cellule dépendant de G et T. [A]

V : la tension aux bornes de la cellule. [V]

V_{oc} : Tension de circuit ouvert du module (donnée par le constructeur). [V]

T : la température ambiante. [K]

T_{ref} : Température de référence (298 K). [K]

K : la constante de Boltzmann (1.3805 .10⁻²³ J/K). [J/K]

K_i : Coefficient d'I_{cc}.

q : la charge de l'électron (1.602. 10⁻¹⁹ °c). [C]

E_g : l'éclairage de référence (1.1 eV pour le silicium poly cristallin à 25°C) [eV]

n : le facteur de non idéalité de la jonction.

N_s : Nombre de cellules connectées en série.

N_p : Nombre de cellules connectées en parallèle.

G : Irradiation sur la surface de la cellule (1000 W/m²). [W/m²]

II.4.1 Module photovoltaïque :

Les caractéristiques électriques d'une seule cellule sont généralement insuffisantes pour alimenter les équipements électriques. Il faut associer les cellules en série pour obtenir une tension plus importante : le module solaire ou panneau photovoltaïque. [6][1]

➤ **En série :**

Les cellules photovoltaïques peuvent se connecter en série. Les tensions de toutes les cellules s'ajoutent et le courant est le même que celui d'une seule cellule. C'est pourquoi il faut toujours des cellules de même courant pour les mettre en séries. En fabrication, on appelle cela l'appairage : on trie les cellules selon leur courant pour les câbler en série. Si l'une d'elles est plus faible en courant, elle imposerait son courant à toute la série ce qui pénaliserait le module complet.

➤ **En parallèle :**

Lorsque les cellules sont connectées en parallèles, ce sont les courants qui s'ajoutent et c'est la tension qui restera constante. Il faudra donc appairer les tensions et non les courants, lors de la mise en parallèle des modules photovoltaïques pour constituer un générateur plus puissant.

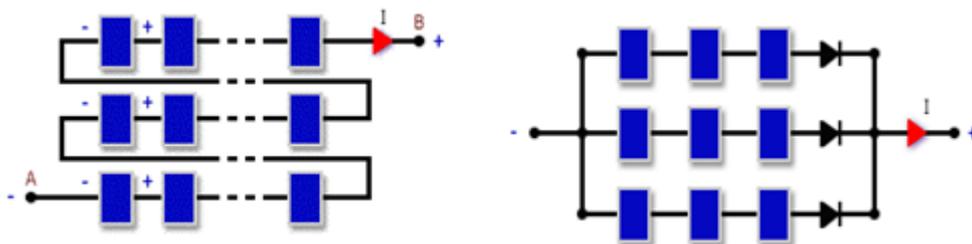


Figure II.7: association de cellules en série N_s (à gauche) et en parallèle N_p (à droite).

II.4.2 Caractéristiques d'un module :

Les modules sont généralement des parallélépipèdes des rectangles rigides minces (quelques centimètres d'épaisseur), dont les caractéristiques suivantes :

- La puissance de crête, P_c : mesurée en watts-crête, c'est la puissance électrique maximum que peut fournir le module dans les conditions standards (25°C et un éclairement de 1000 W/m^2).
- La caractéristique $I=f(V)$: Courbe représentant le courant I débité par le module en fonction de la tension aux bornes de celui-ci.

- Tension à vide, V_{oc} : Tension aux bornes du module en l'absence de tout courant, pour un éclairement " plein soleil ", celle-ci va produire une tension continue d'environ 0,6 V.

Dans le cas idéal, sa valeur est légèrement inférieure à : $V_{oc} = \left(\frac{q}{nKT}\right) L_n \left(\frac{I_L}{I_0} - 1\right)$ (2.7)

- Courant de court-circuit, I_{cc} : Courant débité par un module en court-circuit pour lequel la tension aux bornes de la cellule ou du générateur PV est nulle. L'expression approchée du courant de court-circuit est :

$$I_{cc} = \frac{I_L}{1 + \left(\frac{R_s}{R_p}\right)} \quad (2.8)$$

- Point de fonctionnement optimum, P_m (V_m , I_m) : Lorsque la puissance de crête est maximum en plein soleil, $P_m = V_m \cdot I_m$ (2.9)

- Rendement : Rapport de la puissance électrique optimale à la puissance de radiation incidente, il est exprimé en (%). Soit (S) la surface du module et (E) l'éclairement, ce rendement a pour expression :

$$\eta = \frac{P_m}{S \cdot E} \quad (2.10)$$

- Facteur de forme : Rapport entre la puissance optimale P_m et la puissance maximale que peut avoir la cellule,

$$FF = \frac{P_m}{V_{oc} \cdot I_{cc}} \quad (2.11)$$

II.5 Influence de la température et de l'éclairement sur les caractéristiques I-V et P-V :

II.5.1 Influence de l'éclairement:

Les figures représentent un exemple de la courbe I(V) et P(V) d'un panneau pour différents éclairement :

- Sur la courbe I(V) On remarque que la valeur du courant (I_{cc}) est directement proportionnelle à l'intensité du rayonnement, par contre la tension ne varie pas dans les mêmes proportions, elle reste quasiment identique même à faible éclairement. (Figure II.8)
- Sur la courbe P(V), on remarque que la puissance maximum délivrée par la cellule augmente avec l'éclairement. (Figure II.9)

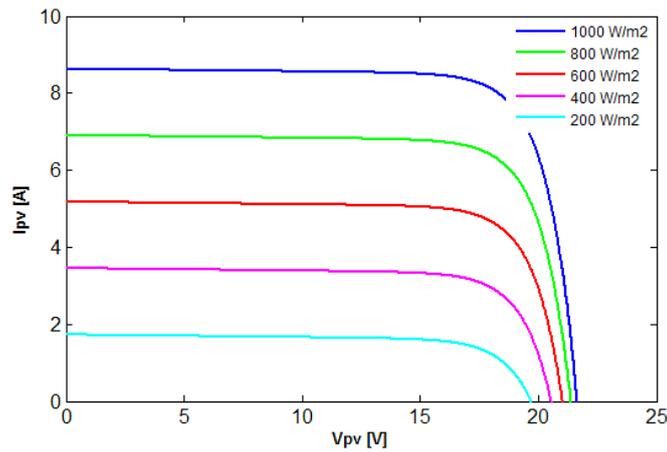


Figure II.8: Effet de l'éclairement sur la caractéristique I-V.

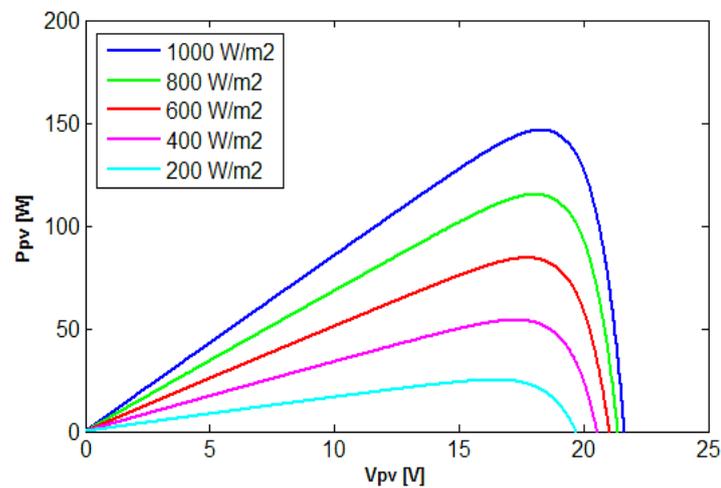


Figure II.9: Effet de l'éclairement sur la caractéristique P-V.

II.5.2 Influence de la température :

Les figures représentent un exemple de la courbe $I(V)$ et $P(V)$ d'un panneau pour différentes températures :

- Quand la température diminue, la tension à vide augmente, mais le courant de court-circuit diminue dans des proportions moindres (Figure II.10).
- La tension à vide et la puissance maximum diminuent très faiblement lorsque la température augmente (Figure II.11).

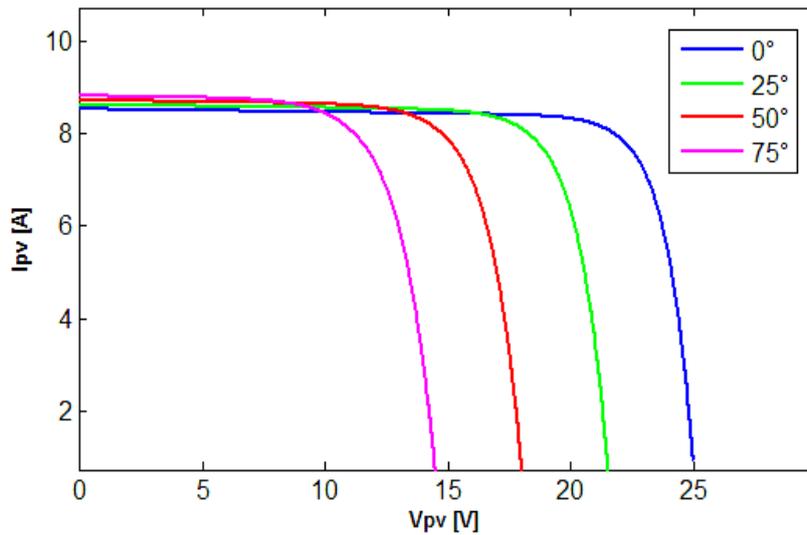


Figure II.10: Effet de la température sur la caractéristique I-V.

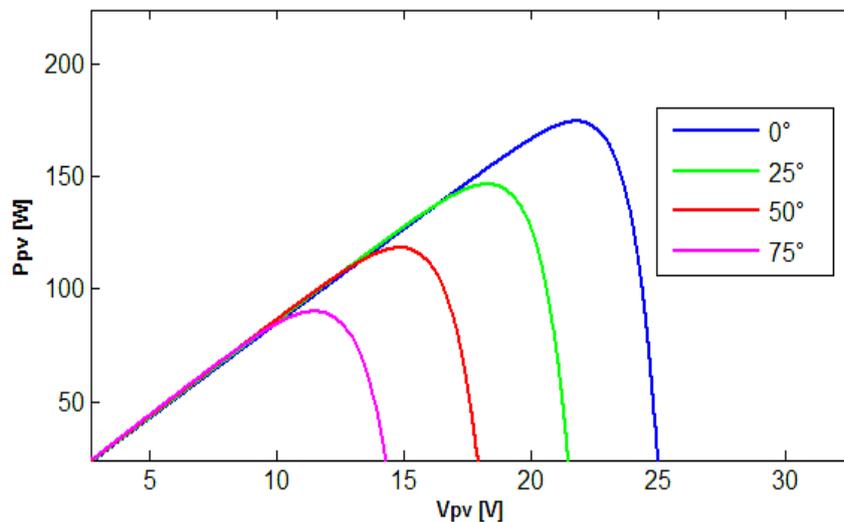


Figure II.11: Effet de la température sur la caractéristique P-V.

II.6 Protections classiques d'un GPV :

Les générateurs photovoltaïques sont destinés à produire de l'énergie électrique durant plusieurs années, alors nous devons assurer la protection électrique de l'installation afin d'augmenter sa durée de vie en évitant différentes pannes destructrices liées à l'association des cellules et de leur fonctionnement en cas d'ombrage. Pour cela, deux types de protections sont classiquement utilisées dans les installations actuelles :

- **Diode anti-retour** : a fin d'établir la protection en cas de connexion en parallèle de modules PV pour éviter les courants négatifs dans les GPV. Ou bien quand une charge en connexion joue le rôle du générateur en basculant du récepteur.
- **Diode by-pass** : permette la protection lors de la mise en série de modules PV et ainsi de ne pas perdre la totalité de la chaîne et éviter les points chauds.

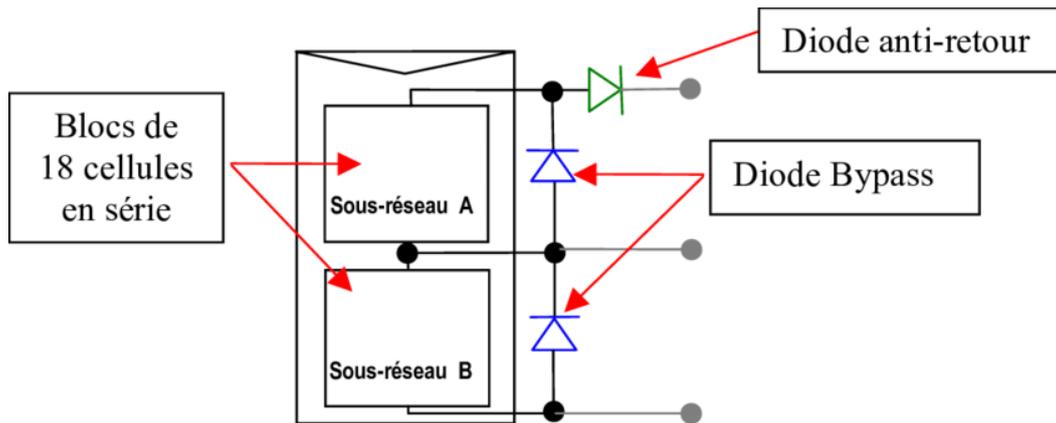


Figure II.12: Schématisation d'un GPV élémentaire avec diodes by-pass et diode anti-retour.

II.7 Résultats de simulation d'un GPV :

Afin d'étudier la caractéristique d'une cellule PV, on a implémenté un modèle, à base de schéma block, dans l'environnement MATLAB/Simulink, en se basant sur les équations du modèle définies ci-dessus.

Les Figures suivantes représentent respectivement les blocs de courant de saturation (I_0), saturation inverse de la diode (I_{rs}), courant shunt (I_{sh}) et du photo-courant (I_{ph}).

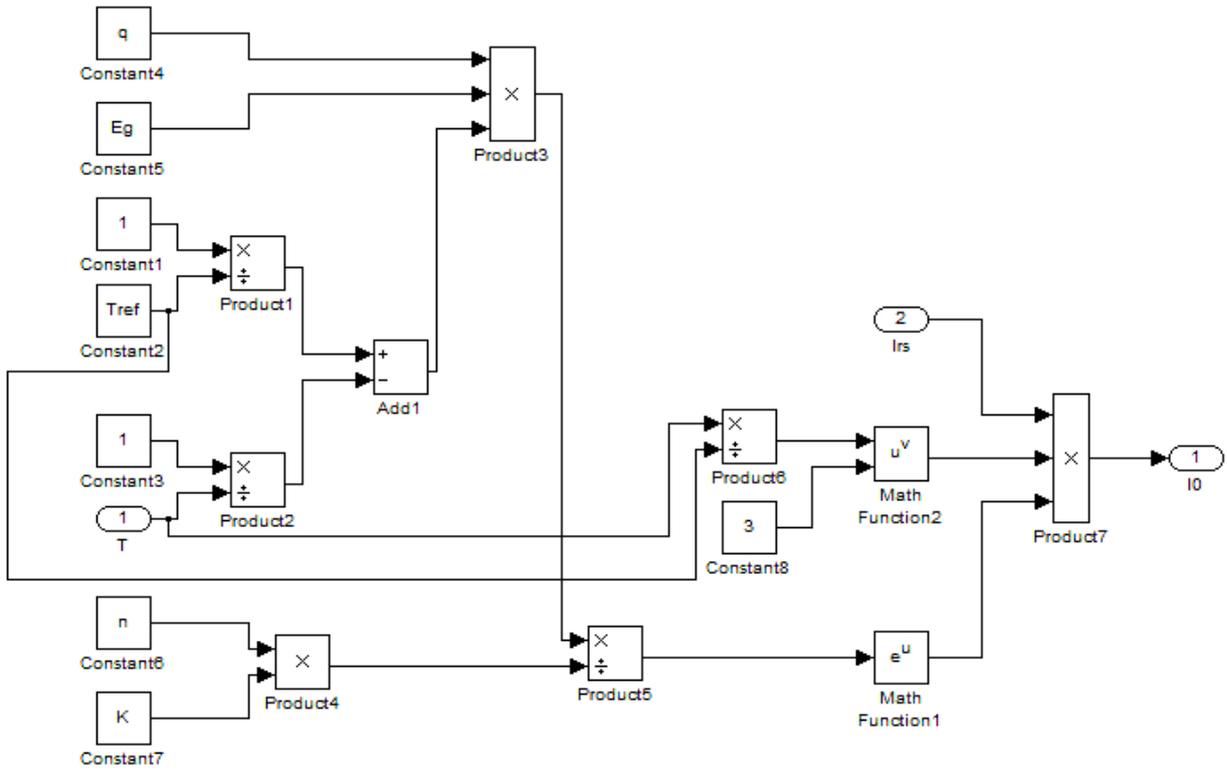


Figure II.13: Schéma bloc du courant de saturation.

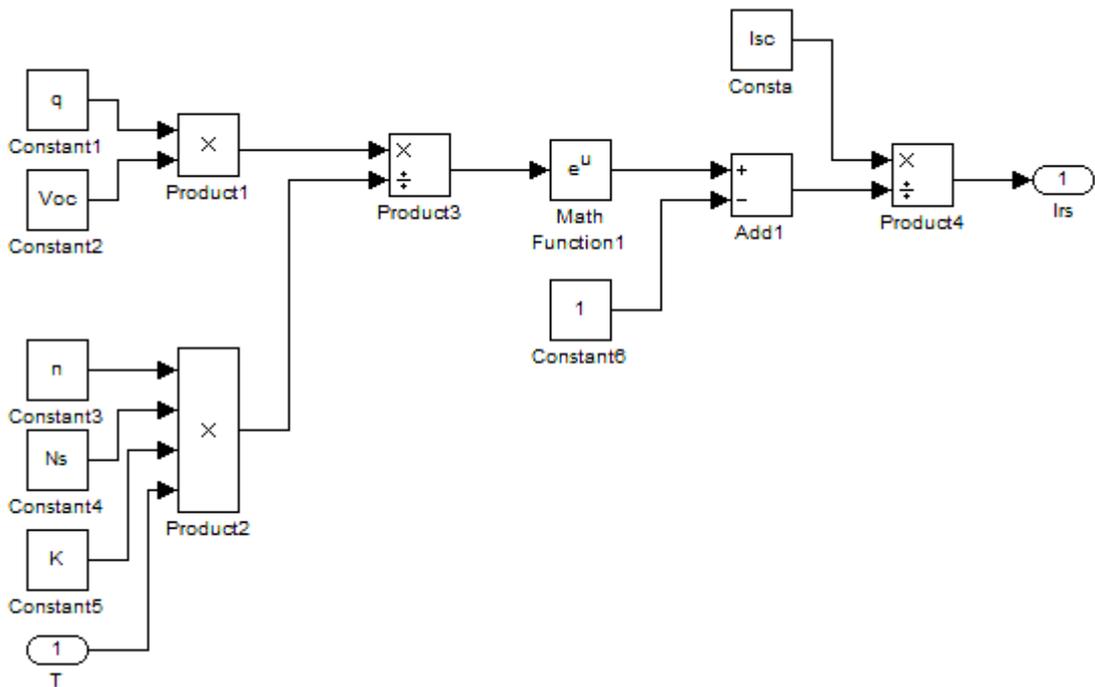


Figure II.14: Schéma bloc du courant de saturation inverse (courant de fuite).

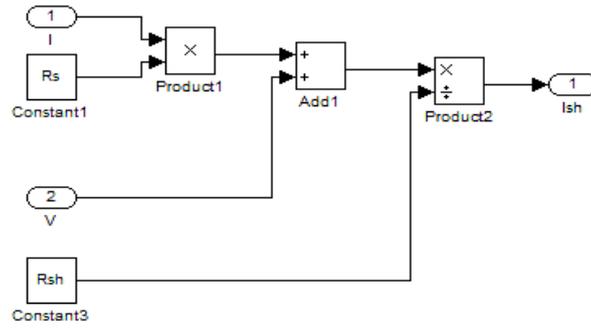


Figure II.15: Schéma bloc du courant shunt.

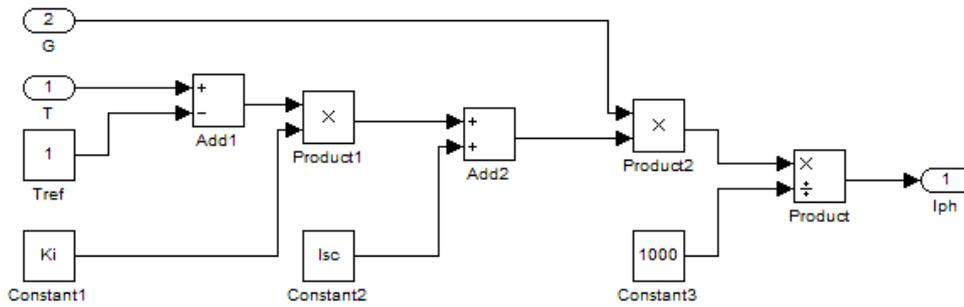


Figure II.16: Schéma bloc du photo-courant.

La Figure (II.17) représente le schéma bloc correspondant au générateur photovoltaïque caractérisant le courant généré à la sortie du module.

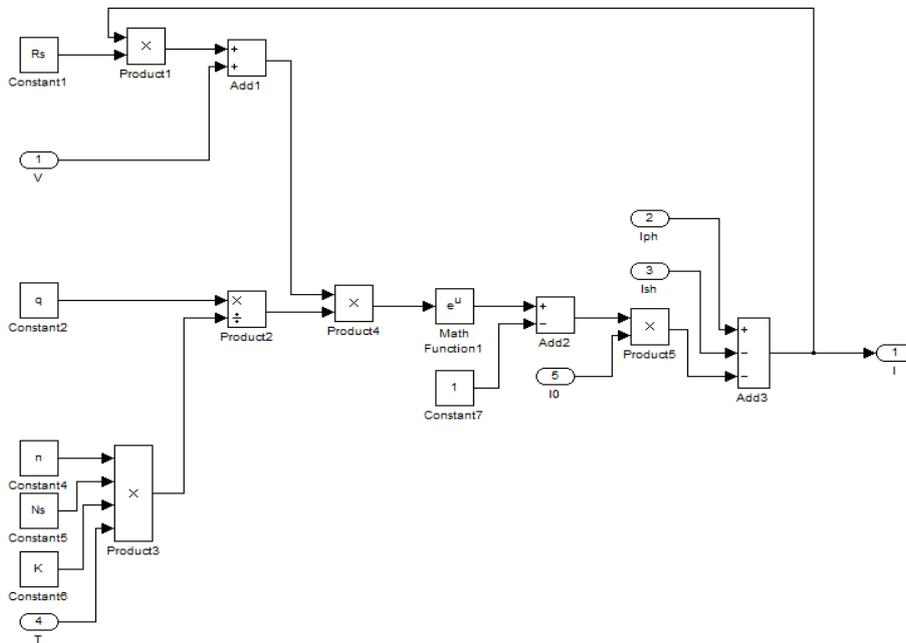


Figure II.17: Schéma bloc du courant PV.

Le schéma électrique équivalent du générateur photovoltaïque est réduit en un simple schéma bloc (Figur II.18) à deux entrées (E : l'éclairement et T : la température de la cellule) et deux sorties (I : le courant et V : la tension).

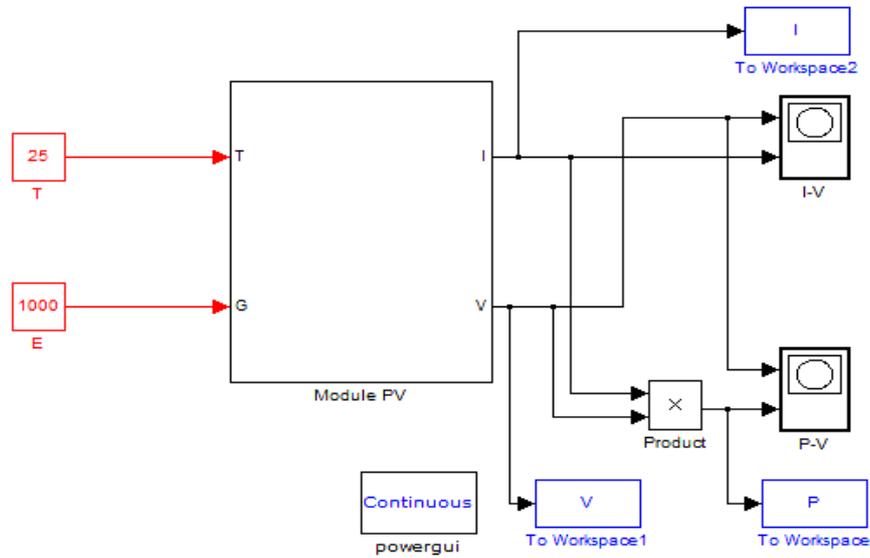


Figure II.18: Schéma bloc du GPV.

Les caractéristiques des panneaux photovoltaïques diffèrent d'un constructeur à l'autre. Dans la suite, on va s'intéresser à un modèle photovoltaïque constitué de 35 cellules branchées en série dont les caractéristiques sont les suivantes :

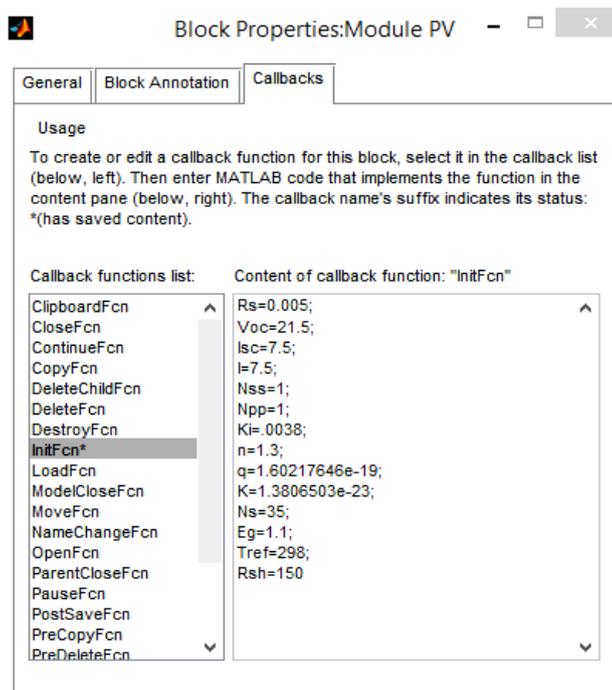


Figure II.19: caractéristiques du bloc PV sous MATLAB/Simulink.

Caractéristiques I(V) et P(V) d'une cellule solaire :

La caractéristique principale de la cellule solaire est la caractéristique I-V qui montre comment une cellule solaire répondra à toutes les charges possibles sous un ensemble particulier de conditions d'ensoleillement et de température (figure II.20). Il y a trois points importants dans cette courbe:

- Le point de fonctionnement optimal auquel la cellule fournit sa puissance maximale (point 5)
- Le point où la tension est égale à zéro et le courant est en maximum (courant de circuit court, point 4)
- Le point où le courant est égal à zéro et la tension est en maximum (tension de circuit ouvert, point 1)

Egalement la caractéristique I-V peut être divisée en deux gammes:

- Une gamme où la cellule est considérée comme une source de tension (1-2).
- Une gamme où la cellule est considérée comme une source de courant (3-4).

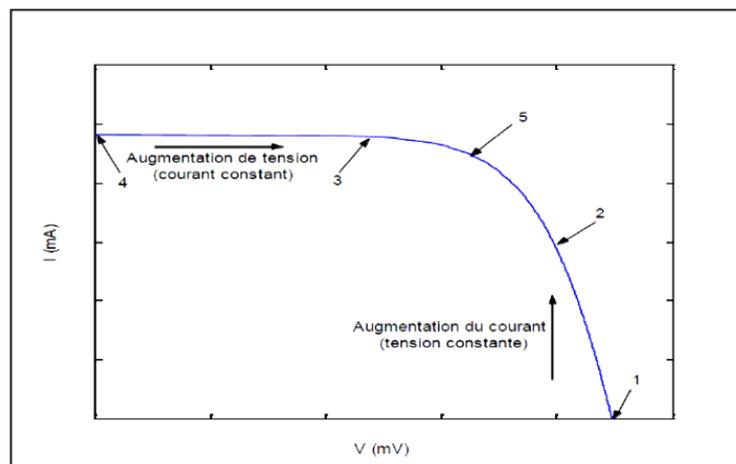


Figure II.20: Caractéristique typique I-V d'une cellule solaire.

Caractéristique courant-tension : Le courant de court-circuit est $I_{cc}=7.5A$, c'est le courant maximal que la cellule peut fournir. La tension de circuit ouvert est $V_{oc}=21.5V$ (figure II.19). Ce résultat peut être expliqué par le fait que le générateur est composé de 35 cellules connectées en série ce qui donne : $V_{oc}=35*0.6=21V$. Sur la figure (II.21), on a représenté la caractéristique courant-tension du module PV dans les conditions standard « STC » [$G=1000w/m^2$ et $T=25^{\circ}C$] :

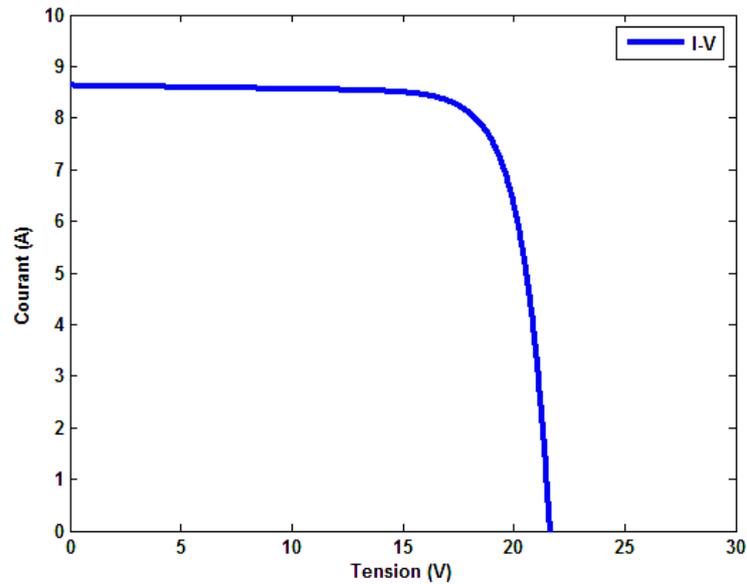


Figure II.21: Caractéristique courant-tension du module PV.

Caractéristique puissance-tension : La puissance débitée par le module PV est le produit de l'intensité de courant et de la tension entre ses bornes. Cette puissance peut dépasser les 220W. La caractéristique puissance-tension du module PV considéré est représentée sur la figure (II.22) : On voit sur la courbe le point de fonctionnement maximal (MPP) correspondant à une puissance qui dépasse les 140W. C'est au voisinage de ce point qu'il faut chercher à maintenir le fonctionnement du module PV.

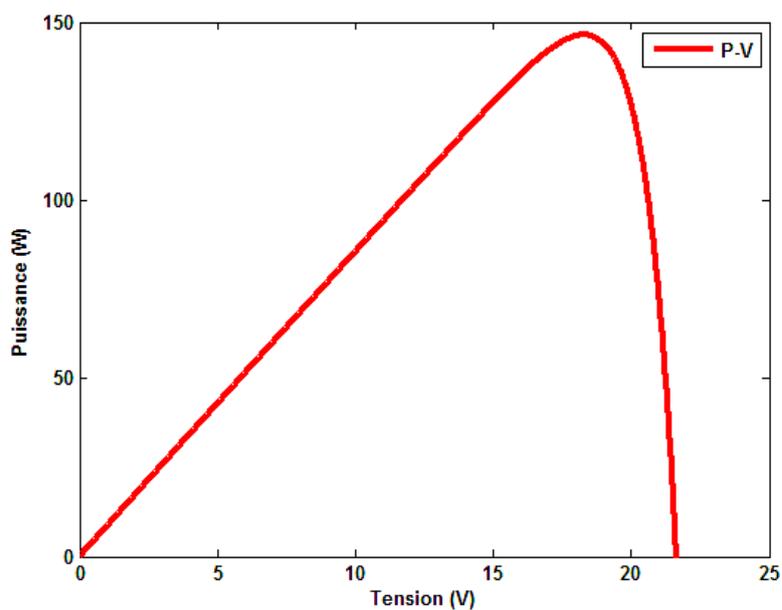


Figure II.22: Caractéristique puissance-tension du module PV.

Effet de la température et de l'ensoleillement sur les courbes I(V) et P(V) :

➤ Influence de l'ensoleillement sur les caractéristiques I(V) et P(V) :

Pour ce test, on a considéré une température constante de 25 °C et un ensoleillement variable. Le résultat donnant la variation de puissance et du courant en fonction de la tension est représenté sur les figures suivantes :

- On remarque que la baisse de l'éclairement fait diminuer faiblement la valeur de la tension de circuit ouvert. Le point de puissance optimale chute en conséquence (figure II.24).
- On constate que le courant subit une variation importante, mais par contre la tension varie légèrement ; car le courant de court-circuit est une fonction linéaire de l'éclairement alors que la tension de circuit ouvert est une fonction logarithmique. (Figure II.23)

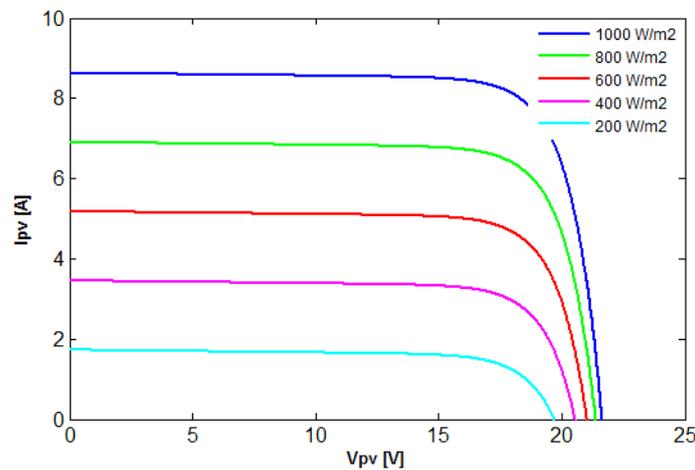


Figure II.23: Caractéristique P(V) du générateur PV avec un E variable et T=Cst.

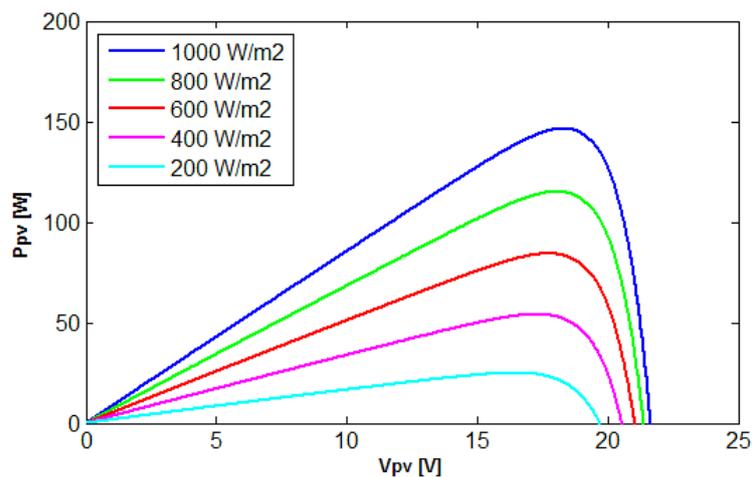


Figure II.24: Caractéristique I(V) du générateur PV avec un E variable et T=Cst.

➤ **Influence de la température sur les caractéristiques I(V) et P(V):**

Dans ce cas, on considère un ensoleillement constant de 1000W/m^2 avec une température variable, Les résultats de simulation sont donnés dans les figures ci-dessous.

- On remarque que la tension de circuit ouvert V_{oc} est très sensible à la variation de la température. Elle baisse avec l'augmentation de la température T . Quand la température diminue, la tension à vide augmente, mais le courant de court-circuit diminue dans des proportions moindres (Figure II.25). La diminution du courant de saturation est la principale cause de la chute de courant à basse température.
- La variation de la puissance optimale va dans le sens inverse de T (Figure II.26).

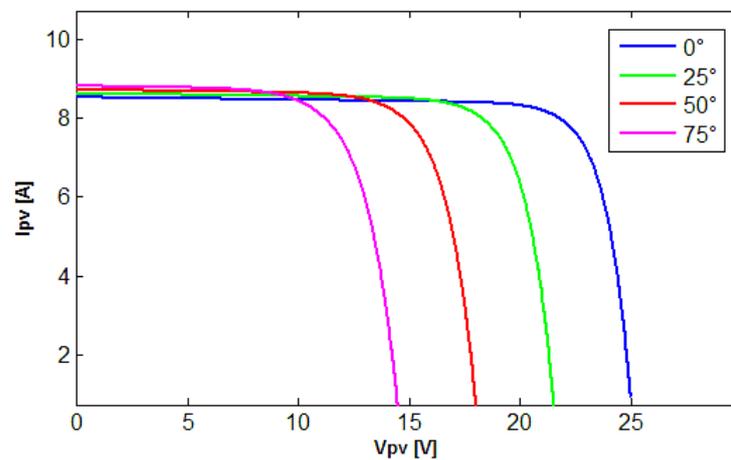


Figure II.25: Caractéristique I(V) du générateur PV avec une T variable et $E=Cst$.

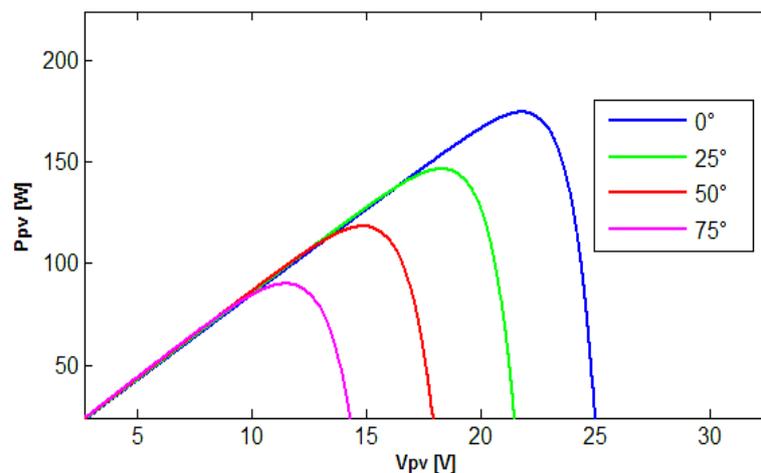


Figure II.26: Caractéristique P(V) du générateur PV avec une T variable et $E=Cst$.

CHAPITRE III: LES CONVERTISSEURS DC DC

III.1 Introduction

L'Electronique de Puissance est la branche de l'Electrotechnique qui a pour objet l'étude de la conversion statique d'énergie électrique, c'est-à-dire l'échange d'énergie entre 2 systèmes électriques. Cette énergie est disponible soit sous une forme alternative (réseau de distribution électrique, alternateur ...) soit sous une forme continue (batterie d'accumulateurs, génératrice à courant continu ...).C'est le rôle des convertisseurs statiques.

Les caractéristiques électriques d'un GPV varient en fonction des conditions météorologiques et de la température, du matériau photovoltaïque, de l'instant et de l'endroit des mesures. Et pour qu'un générateur photovoltaïque fonctionne dans les conditions optimales, il doit être doté d'un quadripôle d'adaptation. Cette adaptation se réalise en cherchant de façon automatique le point de puissance maximale (PPM) du générateur. Ce quadripôle peut être un convertisseur DC-DC de type dévolteur ou survolteur (Buck ou Boost) selon les applications.

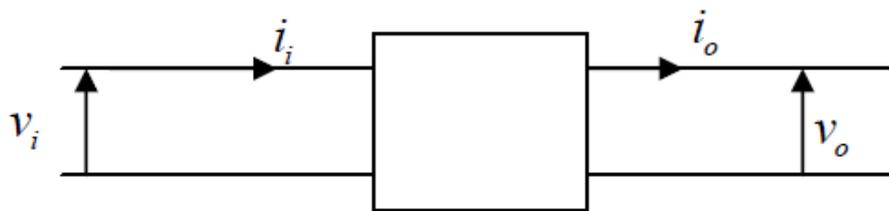


Figure III.1: structure quadripôle.

III.2 Les différentes chaînes de conversion photovoltaïque :

III.2.1 Connexion directe GPV-charge comme mode de transfert de puissance :

Le système le plus simple que l'on puisse concevoir se compose d'un GPV et d'une charge qui utilise directement l'énergie produite du GPV. La connexion directe est surtout utilisée en raison de sa simplicité de mise en œuvre, son coût minimal ainsi qu'à sa grande fiabilité.

Une précaution doit être prise pour éviter de détériorer le générateur par un retour de courant sur ce dernier. Ainsi, une diode anti-retour est placée entre la source et la charge. Cette diode permet d'éviter que le GPV devienne récepteur lorsqu'il n'est plus éclairé et soit détruit s'il atteint ses limites de fonctionnement en récepteur (emballement thermique, phénomènes d'avalanche).

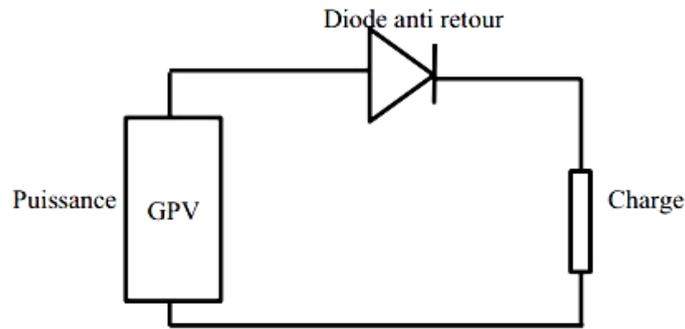


Figure III.2: Principe d'une connexion directe entre un GPV et une charge.

En effet, le générateur photovoltaïque est une source d'énergie continue qui ne peut être connectée à une charge alternative que via un étage d'adaptation de type onduleur. L'inconvénient majeur de cette connexion est sa dépendance directe entre la puissance fournie par le générateur et la charge. En effet, la puissance fournie par le module photovoltaïque résulte de l'intersection entre la caractéristique $I(V)$ du générateur photovoltaïque et celle de la charge.

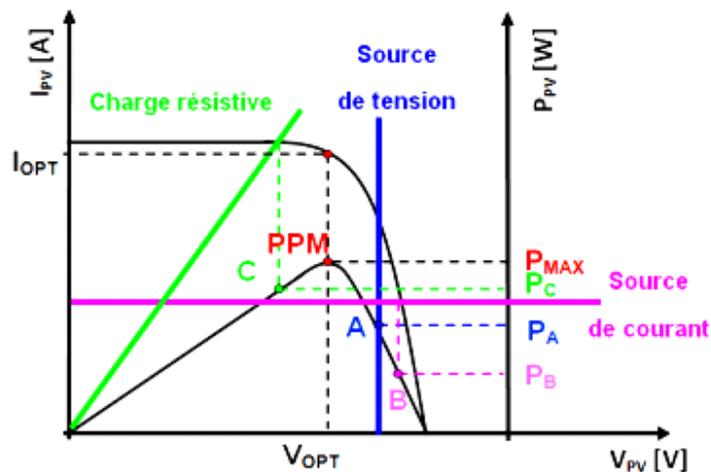


Figure III.3: Points de fonctionnement d'un GPV en connexion directe.

Analyse:

Trois types de charges DC typiques existent: une charge purement résistive, une charge de type source de tension et une charge de type source de courant.

Sur la figure (III.3), nous avons représenté les caractéristiques $I(V)$ et $P(V)$ d'un GPV ainsi que les caractéristiques $I(V)$ des trois types de charges. Tout d'abord, nous pouvons identifier le point de fonctionnement où la puissance fournie par le générateur est maximale (P_{max}) pour un courant optimal (I_{opt}) et une tension optimale (V_{opt}), point nommé PPM. Ensuite, nous pouvons trouver le point d'intersection entre les caractéristiques $I(V)$ du générateur et celles des trois types de

charges :

- 1) point A pour une charge résistive,
- 2) point B pour une charge de type source de tension,
- 3) point C pour une charge en source de courant.

Pour ces trois points, la puissance fournie par le générateur est respectivement P_A , P_B et P_C , que comme l'illustre la figure (III.3) correspondant à des valeurs de puissance inférieures à la puissance maximale disponible P_{max} .

III.2.2 Connexion GPV-charge via un étage d'adaptation continu-continu :

Comme illustré précédemment, le point de fonctionnement peut se trouver plus ou moins éloigné du PPM, voir ne pas exister, alors aucun transfert de puissance ne peut avoir lieu. Ainsi, l'un des intérêts à introduire un étage d'adaptation est d'assurer que le transfert d'énergie est toujours possible. L'introduction d'un étage d'adaptation permettant de fixer le point de fonctionnement du GPV indépendamment de celui de la charge et permet l'extraction de la puissance optimale à tout instant. L'ensemble peut fonctionner de façon idéale, si diverses boucles de contrôle en entrée et en sortie de l'étage d'adaptation sont prévues.

En entrée, elles garantissent l'extraction à chaque instant, du maximum de puissance disponible aux bornes du GPV. En sortie, des boucles de contrôle spécifiques permettent un fonctionnement optimal de chaque application dans son mode le plus approprié. Les techniques utilisées classiquement pour les boucles de contrôle en entrée consistent à associer à l'étage d'adaptation une commande appelée MPPT (en anglais Maximum Power Point Tracking) qui effectue une recherche permanente du PPM.

L'étage d'adaptation entre le GPV et la charge peut être constitué d'un ou plusieurs convertisseurs statiques et permet d'assurer les fonctions suivantes :

- adapter les niveaux de tensions entre la source et la charge dans de grandes proportions si nécessaire (convertisseur Buck, Boost,...)
- introduire une isolation galvanique (convertisseur Flyback, Forward,...)
- connecter une charge avec des besoins d'alimentation de type alternative (onduleur).

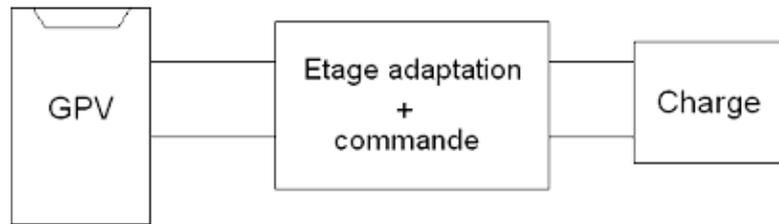


Figure III.4: Connexion d'un GPV à une charge à travers un étage d'adaptation.

III.3 Les convertisseurs DC-DC :

Le hacheur, ou convertisseur continu – continu (DC → DC), est un dispositif électronique qui permet d'obtenir une valeur de tension continue constante avec un rendement élevé. Ils se composent de condensateurs, d'inductances et de commutateurs. Généralement le commutateur est un transistor MOSFET qui travaille en mode bloqué-saturé.

Le commutateur du convertisseur est commandé par un signal PWM (Pulse Width Modulation) ou MLI (Modulation de Largeur d'Impulsion), avec une fréquence de commutation FS fixe et un rapport cyclique α variable.

Ces convertisseurs permettent le contrôle du transfert d'énergie entre une source et une charge qui est, soit de nature capacitive (source de tension), soit de nature inductive (source de courant).

En principe, la tension d'entrée est "hachée" à une fréquence donnée par un transistor alternativement passant et bloqué. Il en résulte une onde carrée de tension qu'il suffit de lisser pour obtenir finalement une tension continue. [4][9]

III.3.1 Principe du MLI (PWM) :

Dans les convertisseurs DC-DC, la tension de sortie doit être régulée pour être constamment égale à une tension de référence, du fait que la tension d'alimentation V et les caractéristiques de la charge peuvent varier.

Une méthode pour réguler la tension de sortie $V_0(t)$ afin d'obtenir une tension moyenne V_{0moy} fixe consiste à ajuster en permanence le rapport cyclique de commande de l'interrupteur $\alpha = T_{ON}/T$ sans modifier T .

Cette méthode qui consiste à faire varier la largeur des impulsions de commande de l'interrupteur est appelée méthode de Modulation de Largeur d'Impulsion (MLI) ou encore PWM (Pulse Width Modulation). Le signal de contrôle de l'interrupteur S devra être élaboré par comparaison entre le rapport cyclique α et une tension en dents de scie V_{DS} comme suit :

- Lorsque $\alpha > V_{DS}$: $S = 1$, l'interrupteur S est commandé à la fermeture (état ON).
- Lorsque $\alpha < V_{DS}$: $S = 0$, l'interrupteur S est commandé à l'ouverture (état OFF).

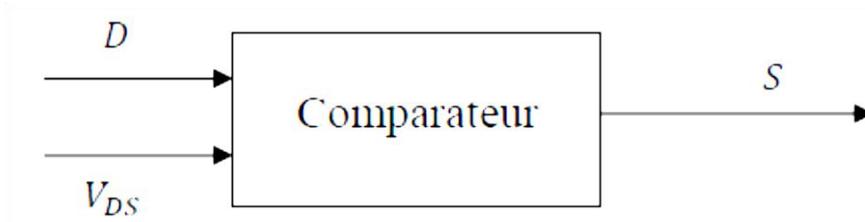


Figure III.5: Principe du MLI (DC/DC).

III.3.2 Types de convertisseurs DC-DC :

Trois types d'hacheurs seront étudiés dans ce chapitre : hacheur abaisseur élévateur de tension (Buck-Boost), hacheur dévolteur ou abaisseur de tension (Buck), et hacheur survolteur ou élévateur de tension (Boost).

Dans notre étude on s'intéresse beaucoup plus aux hacheurs de type BOOST. [10]

III.3.2.1 Hacheur dévolteur - survolteur (série –parallèle) :

Dans ce dispositif, la tension peut être augmentée ou diminuée selon le mode de commutation. Cependant, La tension de sortie est de signe opposé à la tension d'entrée. Son amplitude peut être supérieure ou inférieure à celle de la tension d'entrée selon la valeur du rapport cyclique α . C'est un abaisseur-élévateur-inverseur en tension.

Le circuit électrique de base du hacheur dévolteur-survolteur, et ses deux configurations (états de fonctionnement) sont données par les figures suivantes.

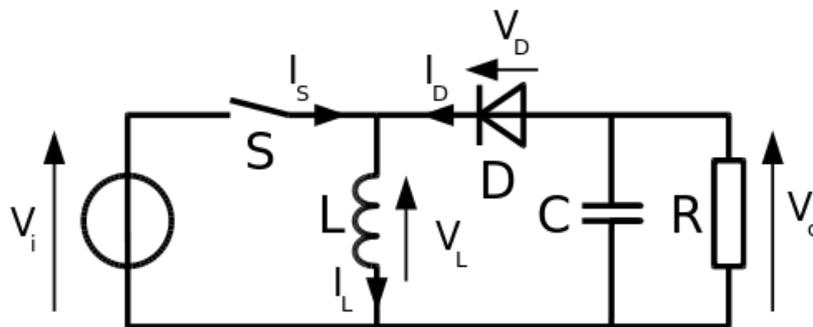


Figure III.6: Schéma du circuit électrique d'un convertisseur Buck-Boost.

Fonctionnement :

Le fonctionnement d'un convertisseur Buck-Boost peut être divisé en deux configurations suivant l'état de l'interrupteur S (voir figure 3.7) :

- Dans l'état passant, l'interrupteur S est fermé, conduisant ainsi à une augmentation de l'énergie

stockée dans l'inductance.

- Dans l'état bloqué, l'interrupteur S est ouvert. L'inductance est reliée à la charge et à la capacité. Il en résulte un transfert de l'énergie accumulée dans l'inductance vers la capacité et la charge.

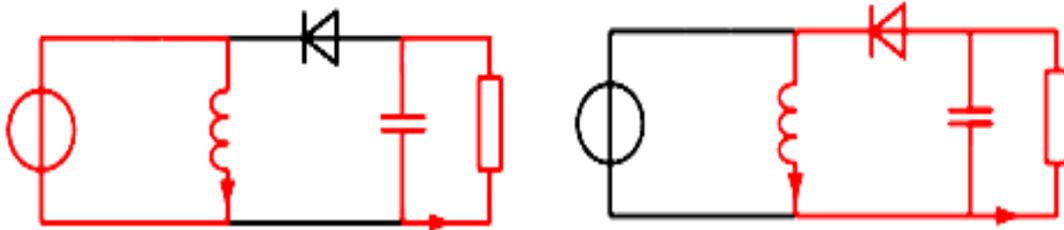


Figure III.7: Convertisseur Buck-Boost en état passant et bloqué.

III.3.2.2 Hacheur dévolteur (série) :

Un convertisseur Buck, ou hacheur série, est un appareil qui convertit une tension continue en une autre tension continue de plus faible valeur. Sa structure demande un interrupteur à amorçage et a blocage commandé (transistor bipolaire, transistor, IGBT,.....) et une diode.

Le circuit électrique de base du hacheur dévolteur, et ses états de fonctionnement sont données par les figures suivantes. Les composants clés sont l'inductance (L), le commutateur (Transistor) (T), la diode (D,) et le condensateur (C).

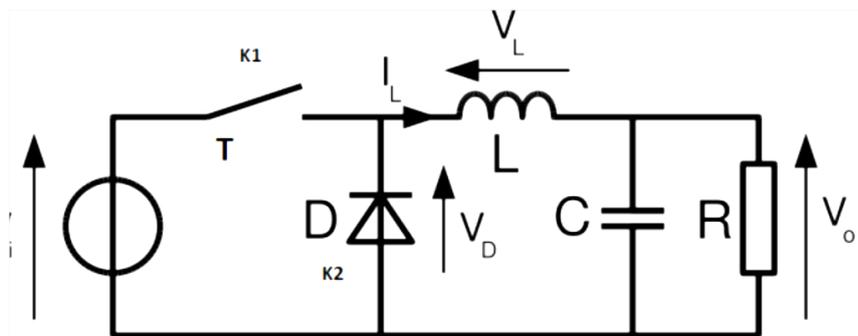


Figure III.8: Schéma du circuit électrique d'un convertisseur Buck.

Fonctionnement :

On note α : le rapport cyclique des impulsions qui commandent l'interrupteur.

T : étant la période des impulsions (hachage).

L'interrupteur K1 est fermé pendant la fraction $[\alpha T]$ de la période de hachage, la source d'entrée fournit l'énergie à la charge R à travers l'inductance (L) qui se charge d'énergie avec augmentation

du courant (I_L).

Lors du blocage du transistor pendant la fraction $[\alpha \text{ à } T]$, la diode (K2) assure la continuité du courant dans l'inductance. L'énergie emmagasinée dans cette inductance est alors déchargée dans le condensateur et la résistance de charge avec une diminution de courant (I_L).

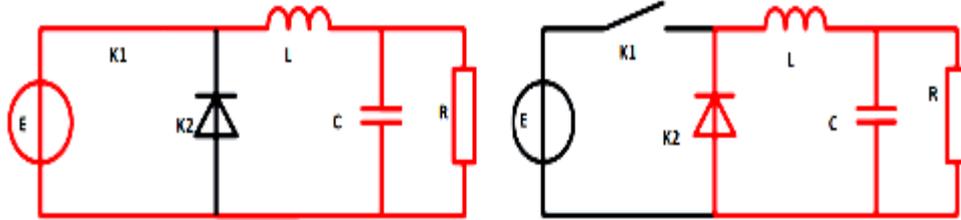


Figure III.9: schéma équivalent lorsque K1 est fermé/ouvert.

III.3.2.3 Hacheur survolteur (ou Boost) :

Un convertisseur Boost, ou hacheur parallèle, est un appareil qui convertit une tension continue en une autre tension continue de plus forte valeur. Ce type de convertisseur peut être utilisé comme adaptateur source charge lorsque la charge a besoin d'une tension supérieure à celle du générateur PV. Il est composé essentiellement Une inductance L , une capacité C , d'un interrupteur K qui peut prendre deux états 1 et 0 (comme IGBT ou MOSFET) et d'une diode D .

Dans ce cas , la source (une f.é.m.) est, à présent en série avec une inductance L (dans un premier temps on néglige sa résistance propre R) donc une source de courant qui débitent dans une source de tension V_0 et que la diode D empêche tout retour de courant vers la source. [8] [12]

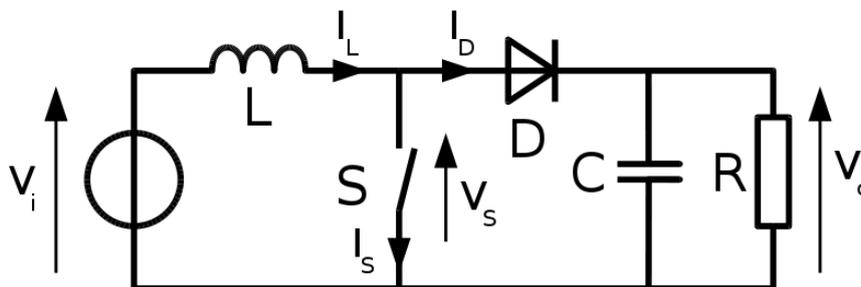


Figure III.10: Schéma du circuit électrique d'un convertisseur Boost.

a) Modèle mathématique équivalent :

On distingue deux modes de fonctionnement selon que le courant dans l'inductance s'annule

(conduction discontinue) ou pas (conduction continue).

Conduction continue : dans ce cas l'énergie emmagasinée dans l'inductance L est transférée partiellement et donc le courant dans celle-ci ne s'annule pas.

1 er cas : $0 < t < \alpha T$: lorsque l'interrupteur S est fermé (position 1) la source charge l'inductance, le courant croît progressivement, pendant ce temps, la capacité à droite maintient la tension de sortie utilisant l'énergie précédemment stockée (figure III.12).

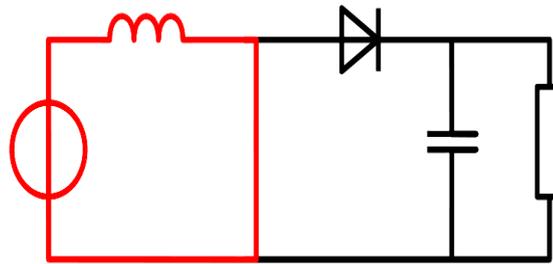


Figure III.11: schéma équivalent lorsque S est fermé.

L'application des lois de Kirchhoff sur la première phase de fonctionnement ($0 < t < \alpha T$) donne :

$$I_{C1} = C1 \frac{dV_i}{dt} = I_i - I_L \quad (3.1)$$

$$I_{C2} = C2 \frac{dV_0}{dt} = -I_0 \quad (3.2)$$

$$V_L = L \frac{dI_L}{dt} = V_i - R_L I_L \quad (3.3)$$

La tension d'entrée est calculée de la façon suivante : $V_i = L \frac{d}{dt} I_L \quad (3.4)$

Le courant de l'inductance vaut : $I_L(t) = \frac{V_i}{L} t + I_{LMIN} \quad (3.5)$

Où I_{LMIN} es le courant de l'instant initial. Pendant cet intervalle le courant traversant l'inductance augmente.

2 ème cas : $\alpha T < t < T$: lorsque l'interrupteur K est ouvert (position 0) le courant dans l'inductance diminue, la bobine génère une tension qui s'ajoute à la tension de source, qui s'applique sur la charge (R) à travers la diode. Le circuit du convertisseur sera comme montré dans la Figure (III.12) :

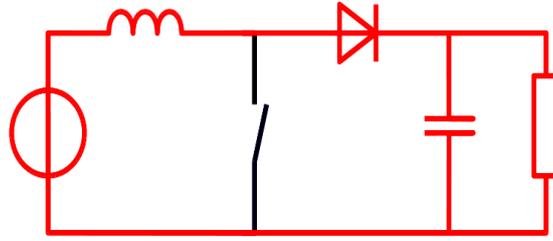


Figure III.12: schéma équivalent lorsque S est ouvert.

L'application des lois de Kirchhoff sur la deuxième phase de fonctionnement ($\alpha T < t < T$) donne :

$$I_{C1} = C1 \frac{dV_i}{dt} = I_i - I_L \quad (3.6)$$

$$I_{C2} = C2 \frac{dV_0}{dt} = I_L - I_0 \quad (3.7)$$

$$V_L = L \frac{dI_L}{dt} = V_i - V_0 - R_L I_L \quad (3.8)$$

La tension d'entrée vaut : $V_i = L \frac{d}{dt} I_L + V_0 \quad (3.9)$

Le courant pendant cet intervalle peut s'exprimer : $I_L(t) = \frac{V_i - V_0}{L} t + I_{LMAX} \quad (3.10)$

D'un autre coté, nous pouvons exprimer la tension de sortie en fonction de la tension d'entrée et du rapport cyclique : $V_0 = \frac{1}{1-\alpha} V_i \quad (3.11)$

Ce qui peut se réécrire de la façon suivante : $\frac{V_0}{V_i} = \frac{1}{1-\alpha} \quad (3.12)$

Avec :

α : le rapport cyclique

V_0 : Tension aux bornes de la charge.

V_i : Tension d'entrée (cellule solaire).

Grâce à cette dernière expression, on peut voir que la tension de sortie est toujours supérieure à celle d'entrée (le rapport cyclique variant entre 0 et 1), qu'elle augmente avec α , et que théoriquement elle peut être infinie lorsque α se rapproche de 1. C'est pour cela que l'on parle de survolteur.

En appliquant le principe de conservation de puissance entre l'entrée et la sortie du convertisseur, on peut établir la valeur moyenne du courant dans l'inductance en fonction du courant moyen dans la charge et du rapport cyclique : $I_L = \frac{1}{1-\alpha} I_S \quad (3.13)$

Conduction discontinue : dans ce cas, le courant traversant l'inducteur s'annule pendant une partie de la période. La seule différence avec le principe de fonctionnement décrit précédemment, est

que l'inductance est complètement déchargée en début de cycle.

On suppose les interrupteurs parfaits, et aussi que la capacité C est suffisamment élevée pour que $V_0(t)=\text{constante}=V_S$ et donc la conduction discontinue n'est pas incluse dans notre étude.

b) Modèle approximé du convertisseur Boost :

Les systèmes d'équations de base (3.8 à 3.10) représentent le convertisseur Boost pour un intervalle du temps αT et $(1 - \alpha)$ respectivement. Le convertisseur oscillant entre ces deux états avec une fréquence élevée, nous devons trouver une représentation dynamique approximée valable pour les deux intervalles de temps. Pour cela nous considérons que la variation des variables dynamiques C_i , V_L est de forme linéaire, en d'autres termes nous pouvons faire une approche d'exponentielle par un segment ($e^\varepsilon \approx 1 + \varepsilon$ si $\varepsilon \ll 1$) et ainsi la dérivée de ces grandeurs sera constante. Cette approche nous permet de décomposer l'expression de la valeur moyenne de la dérivée de la variable dynamique x sur les deux intervalles du temps αT et $(1 - \alpha)$: [8]

$$\left\langle \frac{dx}{dt} \right\rangle T = \frac{dx}{dt(\alpha T)} \alpha T + \frac{dx}{dt((1-\alpha)T)} (1 - \alpha)T \quad (3.14)$$

Où $\left\langle \frac{dx}{dt} \right\rangle$ est la valeur moyenne de la dérivée de x sur un intervalle T . Cette relation est valide si :

$$\frac{dx}{dt(\alpha T)} \text{ Et } \frac{dx}{dt((1-\alpha)T)} \text{ sont constants sur les intervalles } \alpha T \text{ et } 1 - \alpha T.$$

on obtient les équations qui régissent le système sur un intervalle entier :

$$I_{C1} = C1 \frac{dV_i}{dt} \alpha T = (I_i - I_L) \alpha T (1 - \alpha) T (I_i - I_L) \quad (3.15)$$

$$I_{C2} = C2 \frac{dV_0}{dt} \alpha T = -\alpha T I_0 (1 - \alpha) T (I_L - I_0) \quad (3.16)$$

$$V_L = L \frac{dI_L}{dt} \alpha T = (V_i - R_L I_L) \alpha T + (1 - \alpha) T (V_i - R_L I_L - V_0) \quad (3.17)$$

En arrangeant les termes des équations précédentes, (pour qu'on puisse interconnecter le Boost avec les autres blocs de simulation), on obtient la modélisation dynamique du convertisseur Boost :

$$I_L = I_i - C1 \frac{dV_i}{dt} \quad (3.18)$$

$$I_0 = (1 - \alpha)I_L - C2 \frac{dV_0}{dt} \quad (3.19)$$

$$V_i = (1 - \alpha)V_0 + L \frac{dI_L}{dt} + R_L I_L \quad (3.20)$$

III.3.3 Dimensionnement du filtre LC :

Nous allons dimensionner les paramètres passifs liés à l'hacheur survolteur (L et C).

Pour un rapport cyclique (α) la tension de sortie en fonction de la tension d'entrée est donnée par :

$$V_0 = \frac{1}{1-\alpha} V_i \quad \rightarrow \quad \alpha = 1 - \frac{V_0}{V_i} \quad (3.21)$$

- **Résistance (R):**

Choix de la valeur de la charge résistive par rapport à la puissance délivré par le panneau :

$$P_c = \frac{V_i^2}{R} \quad \rightarrow \quad R = \frac{V_i^2}{P} \quad (3.22)$$

- **L'inductance (L) :**

Nous aurons ainsi :

$$\Delta I_L = \frac{1}{2} (I_L(\alpha T) - I_L(0)) \quad (3.23)$$

Ainsi l'inductance (L) peut être calculée comme suit :

$$V_L = L \frac{d}{dt} I_L \quad \rightarrow \quad V_i = L \frac{d}{dt} I_L \quad (3.24)$$

En utilisant $V_L(t) = V_i$ dans le premier sous-intervalle. Le courant I_L à la fin de la première période est donné par :

$$I_L(\alpha T) = I_L(0) + \frac{V_i}{L} (\alpha T) \quad (3.25)$$

Si on remplace ce dernier dans la première équation on obtient :

$$\Delta I_L = \frac{1}{2} \frac{V_i}{L} (\alpha T) \quad \rightarrow \quad L = \frac{V_i}{2 \Delta I_L F} \quad (\text{Avec : } F=1/T) \quad (3.26)$$

- **Capacité (C) :**

Nous aurons ainsi :

$$I_C = C \frac{dV_C}{dt}$$

$$\int_{-\Delta V_C}^{\Delta V_C} V_C = \frac{1}{2} \int_0^{\alpha T} I_C dt$$

$$-2\Delta V_C = -\frac{1}{C} \frac{V_C}{R} \alpha T \quad \rightarrow \quad C = \frac{V_C}{2\Delta R F V_C} \alpha T \quad (3.27)$$

III.4 Résultats de simulation d'un hacheur BOOST:

A l'aide du toolbox Simpower dans l'environnement Simulink de MATLAB on est arrivé à réaliser et tester le hacheur Boost comme le montre la figure (III.13) :

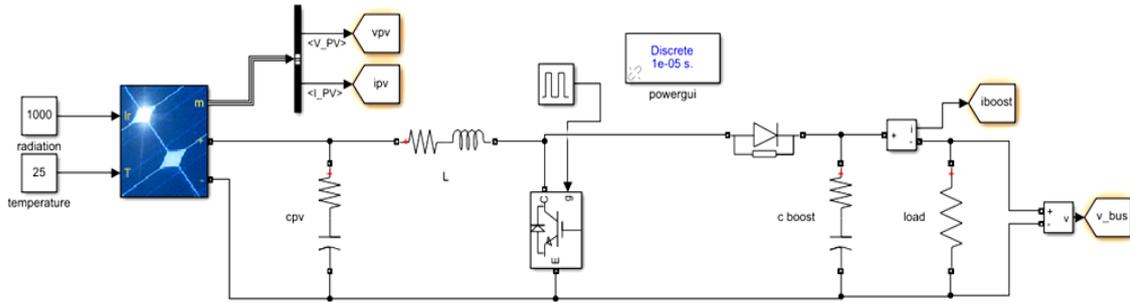


Figure III.13: Modélisation du système (GPV-BOOST-charge).

Les paramètres utilisés dans ce test sont présentés comme suit :

C1	L	C2	R
100e-6 F	5e-3 H	3300e-6 F	6 ohms

On suppose que les interrupteurs utilisés sont parfaits et le condensateur C est assez grand pour garder la tension de charge constante.

CHAPITRE IV: LA COMMANDE MPPT

IV.1 Introduction

Les panneaux solaires, bien qu'ils soient en plus performants, ont des rendements qui restent assez faibles. C'est pourquoi il faut exploiter le maximum de puissances qu'ils peuvent générer en réduisant au maximum les pertes d'énergie. Une caractéristique importante de ces panneaux est que la puissance maximale disponible est fournie seulement en un seul point de fonctionnement appelé le point de puissance maximale (MPP), définie par une tension et un courant donnés ; ce point se déplace en fonction des conditions météorologiques (ensoleillement, température, etc.). Extraire le maximum de puissance nécessite donc un mécanisme de poursuite de ce point qu'on appelle MPP Tracker (MPPT).

Dans ce chapitre nous allons citer les différentes méthodes de poursuite du point de puissance maximale et en terminant par notre méthode qui est choisie parmi les précédentes s'appelle 'perturbation et observation', (P&O : Perturb-and-Observe).

IV.2 Principe de la recherche du point de puissance maximal :

Cette méthode permet au générateur PV de travailler à sa puissance maximale quel que soit les conditions météorologiques d'irradiations et de température. Un contrôleur MPPT permet donc de piloter le convertisseur statique reliant la charge (une batterie par exemple) et le panneau photovoltaïque de manière à fournir en permanence le maximum de puissance à la charge chaque instant. Cependant tous les algorithmes performants doivent jouer sur la variation du rapport cyclique du convertisseur de puissance associé en l'amenant à la valeur optimale de manière à maximiser la puissance délivrée par le panneau. Plusieurs méthodes de poursuite du PPM ont été proposées, mais la plus en vue est le fameux algorithme P&O qui prédomine.

La Figure (IV.1) présente le schéma de principe d'un module photovoltaïque doté d'étage d'adaptation DC-DC entre le GPV et la charge de sortie associée à une commande MPPT de façon à transférer le maximum de puissance. [20]

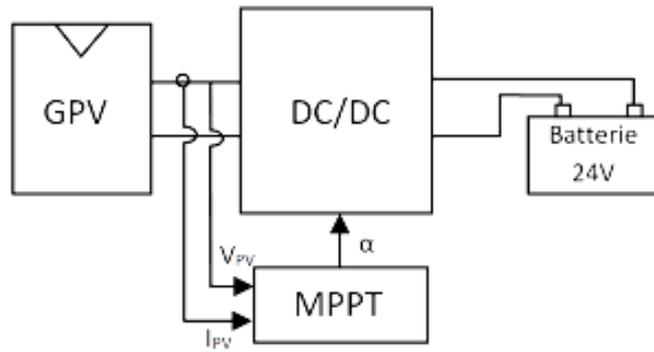


Figure IV.1: Schéma de principe d'une connexion à travers un convertisseur DC/DC contrôlé par une commande MPPT.

IV.3 Classification des Commandes MPPT :

La classification peut être basée sur la fonction des techniques ou des stratégies de commande utilisées. Ainsi, deux catégories peuvent être présentées: méthodes directes et indirectes.

IV.3.1 MPPT indirecte :

Ce type de commandes MPPT utilise le lien existant entre les variables mesurées (I_{sc} ou V_{oc}), qui peuvent être facilement déterminées, et la position approximative du MPP. Il compte aussi les commandes en se basant sur une estimation du point de fonctionnement du GPV réalisée à partir d'un modèle paramétrique défini au préalable. Il existe aussi des commandes qui établissent une poursuite de la tension optimale en prenant en compte uniquement les variations de la température des cellules donnée par un capteur. Ces commandes ont l'avantage d'être simples à réaliser. Elles sont plutôt destinées à des systèmes peu coûteux et peu précis devant fonctionner dans des zones géographiques où il y a peu de changements climatiques. Parmi ces méthodes, on retrouve la méthode de la tension de circuit ouvert du générateur, la méthode de court-circuit etc... [17]

IV.3.2 MPPT Directe :

Les méthodes directes sont des méthodes qui utilisent les mesures de tension et de courant des panneaux et dont l'algorithme est basé sur la variation de ces mesures. La détermination de la valeur de la puissance du générateur PV est indispensable pour la recherche du MPP, nécessite la mesure de la tension et du courant du générateur, ainsi que la multiplication de ces deux variables. Si la puissance de sortie est plus grande, alors la direction de recherche est maintenue pour l'étape suivante, sinon elle sera inversée. D'autres algorithmes se basent sur l'introduction de variations sinusoïdales en petit signal sur la fréquence de découpage du convertisseur pour comparer la composante alternative et la composante continue de la tension du GPV et pour ainsi placer le

point de fonctionnement du GPV le plus près possible du MPP. L'avantage de ce type de commandes est leurs précisions et leur rapidité de réaction. Parmi ces méthodes, on retrouve la méthode de différenciation, la méthode Perturbe & Observe (P&O), l'incrément de conductance (InC)... [17]

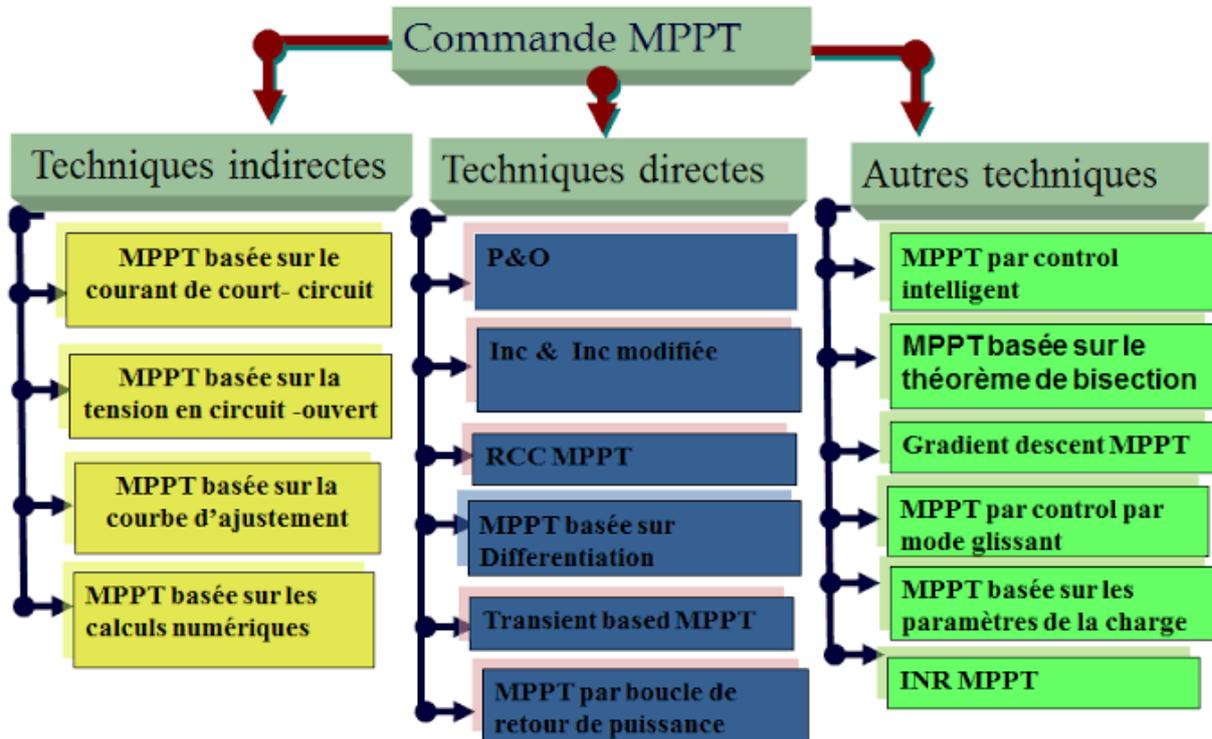


Figure IV.2: Organigramme de classification des commandes MPPT.

IV.4 Les algorithmes MPPT :

Il existe plusieurs principes de fonctionnement des commandes MPPT plus ou moins performantes basées sur les propriétés du GPV. Une synthèse des principaux modes de recherche du PPM existants dans ce chapitre nous a permis de bien identifier l'existant et les points qu'il restait à améliorer. Ceci a constitué la base théorique pour nos travaux concernant les simulations dans le chapitre suivant. [22][24]

IV.4.1 Méthodes à contre réaction de tension :

Ce genre de mécanismes repose sur le contrôle de la tension de fonctionnement des panneaux par la comparaison de cette tension avec une tension de référence. Cela génère une tension d'erreur qui fait varier le rapport cyclique de la PWM de commande afin d'annuler cette erreur. Selon la nature de cette tension de référence (fixe ou variable, interne ou externe) on a trois types de

méthodes :

- Méthode à tension de référence fixe.
- Méthode à tension de référence en fonction de OC (circuit ouvert ; open circuit voltage).
- Tension de référence extrême (Cellule pilote).

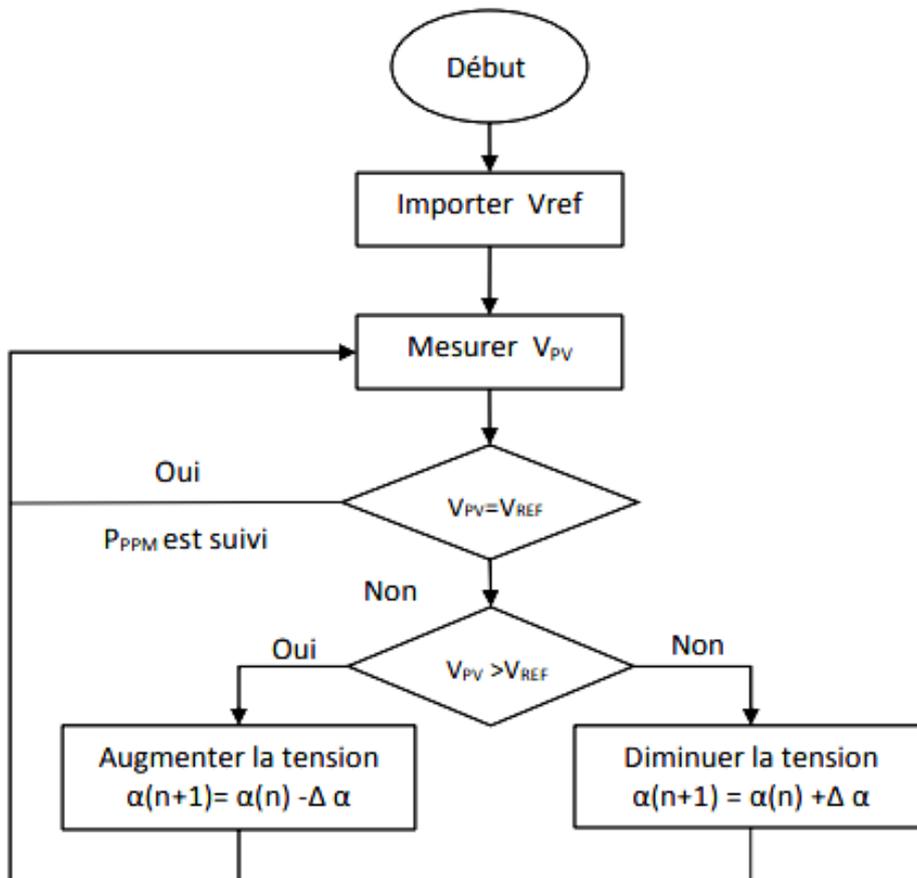


Figure IV.3: Algorithme de circuit ouvert.

IV.4.2 Méthodes à contre réaction de courant :

Cette méthode utilise seulement une mesure de courant pour obtenir l'information sur le point opérationnel et actuel du système. Permet de savoir la valeur du courant optimal dans lequel doit fonctionner le panneau pour extraire le maximum de puissance :

- Méthode à courant de référence en fonction du courant de court-circuit SC .
- Méthode de maximisation du courant de sortie.

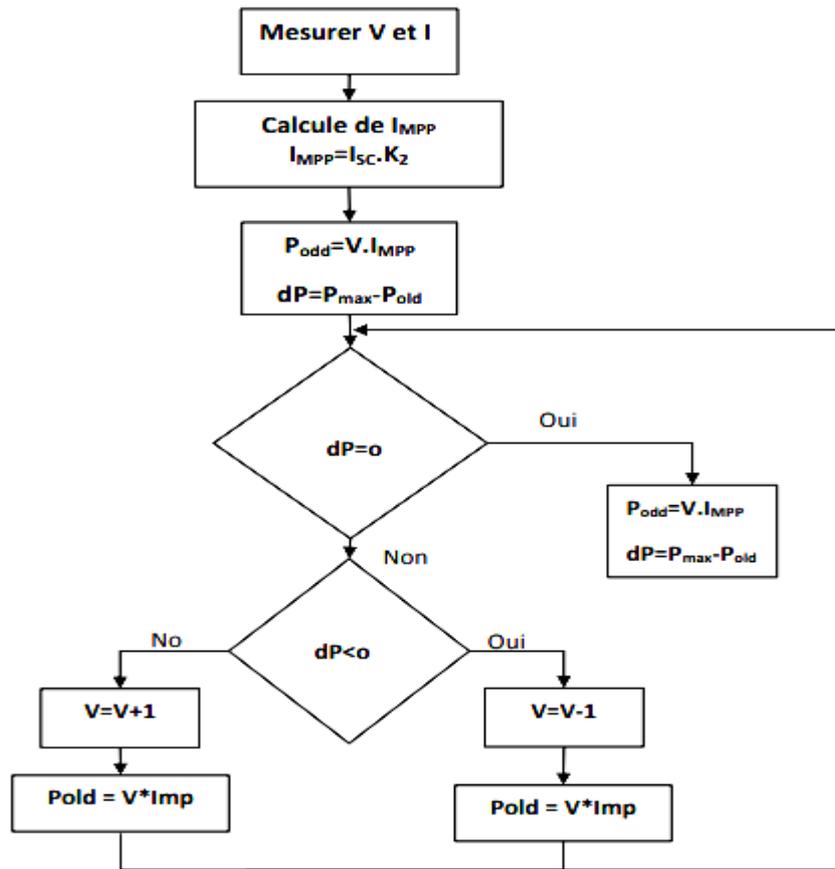


Figure IV.4: Algorithme du court-circuit.

IV.4.3 Méthodes à contre réaction de puissance :

Ces méthodes sont basées sur des algorithmes de recherche itérative qui se charge de trouver le point de fonctionnement du panneau pour que la puissance générée soit maximale sans interruption de fonctionnement du système. L'évaluation de la puissance instantanée de ce dernier est élaborée par une simple multiplication de ces deux composantes $P_{pv} = I_{pv} * V_{pv}$. Elles ne sont pas basées sur des valeurs de références prédéfinies ou à partir des paramètres opérationnels, mais sur la maximisation permanente de la puissance générée par les panneaux solaires. Ainsi pour un point donné on fait la recherche dans un certain sens, si on a une augmentation de la puissance du panneau alors on maintient cette direction de recherche, sinon on cherche dans le sens opposé :

- Méthode de perturbation et observation (P&O).
- Méthode de conductance incrémentale (InC).
- Méthode de Hill Climbing. [32]

IV.5 Perturbation Et Observation (P&O, Perturb And Observe) :

L'algorithme P&O est largement utilisé parce qu'il a la particularité d'avoir une structure simple, et peu de paramètre de mesure, pour l'utiliser on considère que le PV fonctionne à un point qui n'est pas obligatoirement le MPP.

La méthode P&O fonctionne en perturbant périodiquement la tension du panneau V_{pv} avec l'ajout d'un signal de faible amplitude positif ou négatif noté ΔV et on observe la variation de puissance P_{pv} noté ΔP qui en résulte ainsi, comme l'illustre la figure (IV.5).

Si une incrémentation positive de la tension V_{pv} engendre un accroissement de la puissance P_{pv} , cela signifie que le point de fonctionnement se trouve à gauche du PPM (voir Figure IV.5). Si au contraire, la puissance décroît, cela implique que le système a dépassé le PPM. Un raisonnement similaire peut être effectué lorsque la tension décroît.

En résumé, si suite à une perturbation de tension, la puissance PV augmente, la direction de perturbation est maintenue. Dans le cas contraire, elle est inversée pour reprendre la convergence vers le nouveau PPM. [35]

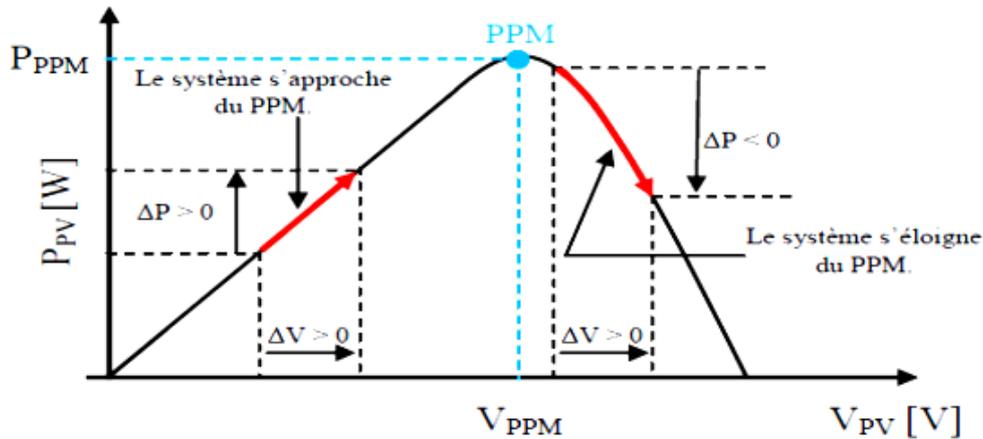


Figure IV.5: Poursuite du point de puissance maximale.

Perturbation de la tension	Observation de la puissance	Prochaine Perturbation
Positive (+)	Positive (+)	Positive (+)
Positive (+)	Négative (-)	Négative (-)
Négative (-)	Positive (+)	Négative (-)
Négative (-)	Négative (-)	Positive (+)

Figure IV.6: Table de vérité de l'algorithme 'perturbation et observation'.

IV.5.1 Raisonnement Perturb&Observe :

- Mesures de courant et de tension.
- Calcul de la puissance du panneau.
- La puissance trouvée est-elle égale à la valeur précédente ? :
- Oui : renouvellement de la mesure.
- Non : étape suivante.
- La variation de la puissance est-elle positive ?
- Oui : détermination du sens de la pente par observation de la variation de tension :
- Positive : incrémentation de la tension de référence.
- Négative : décrémentation de la tension de référence.
- Non : détermination du sens de la pente par observation de la variation de tension :
- Positive : incrémentation de la tension de référence.
- Négative : décrémentation de la tension de référence.
- Mise à jour de la variable puissance photovoltaïque.

IV.5.2 Organigramme de l'Algorithme P&O :

La figure (IV.7) représente l'algorithme classique associé à une commande MPPT de type P&O, où l'évolution de la puissance est analysée après chaque perturbation de tension. La figure montre les entrées du système MPPT ; ΔP et ΔV calculées à partir des signaux $P(k)$, $P(k-1)$, $V(k)$ et $V(k-1)$, les signes de ces deux entrées sont exploités pour savoir dans quelle position de la courbe P-V on se trouve.

D'abord la tension V et le courant I sont mesurés pour calculer la puissance P_k . Cette valeur P_k est comparée à la valeur de la puissance obtenue durant la dernière mesure P_{k-1} . Si la puissance fournie par le panneau a augmenté depuis la dernière mesure, l'incrément ou la décrémentation du rapport cyclique α continuera dans le même sens que lors du dernier cycle et ceci est fait par le test sur ΔV . [35]

- Si $\Delta V > 0$ cela veut dire qu'on a incrémenté V durant le dernier cycle c'est-à-dire $D_{k+1} = D_k + \Delta D$
- Si $\Delta V < 0$ cela veut dire qu'on a décrémenté V durant le dernier cycle c'est-à-dire qu'on va mettre $D_{k+1} = D_k - \Delta D$.

Donc on termine dans le chemin où P continue à augmenter. Si la puissance fournie par le panneau a diminué depuis la dernière mesure, l'incrément ou la décrémentation du rapport

cyclique α sera en sens inverse par rapport au dernier cycle et ceci est fait aussi par le test sur ΔV .

Avec cet algorithme la tension de fonctionnement V est perturbée à chaque cycle. Dès que le MPP sera atteint, V oscillera autour du point de fonctionnement idéal V_{mpp} . Mais ceci cause des pertes de puissances qui dépendent de la largeur du pas d'une simple perturbation ΔD . Si la largeur du pas est grande, l'algorithme de MPPT répondra rapidement aux changements soudains mais occasionnera des pertes dans des conditions changeantes lentement et dans les états stables.

Si la largeur du pas est très petite les pertes dans les états stables ou les conditions changeantes lentement seront réduites, mais le système aura une réponse lente aux changements rapides de la température ou d'insolation. La valeur pour la largeur idéale du pas du système ne peut être déterminée qu'expérimentalement où par simulation, est ainsi satisfaire un compromis entre la réponse rapide et perte de puissance dans les états stables. [35]

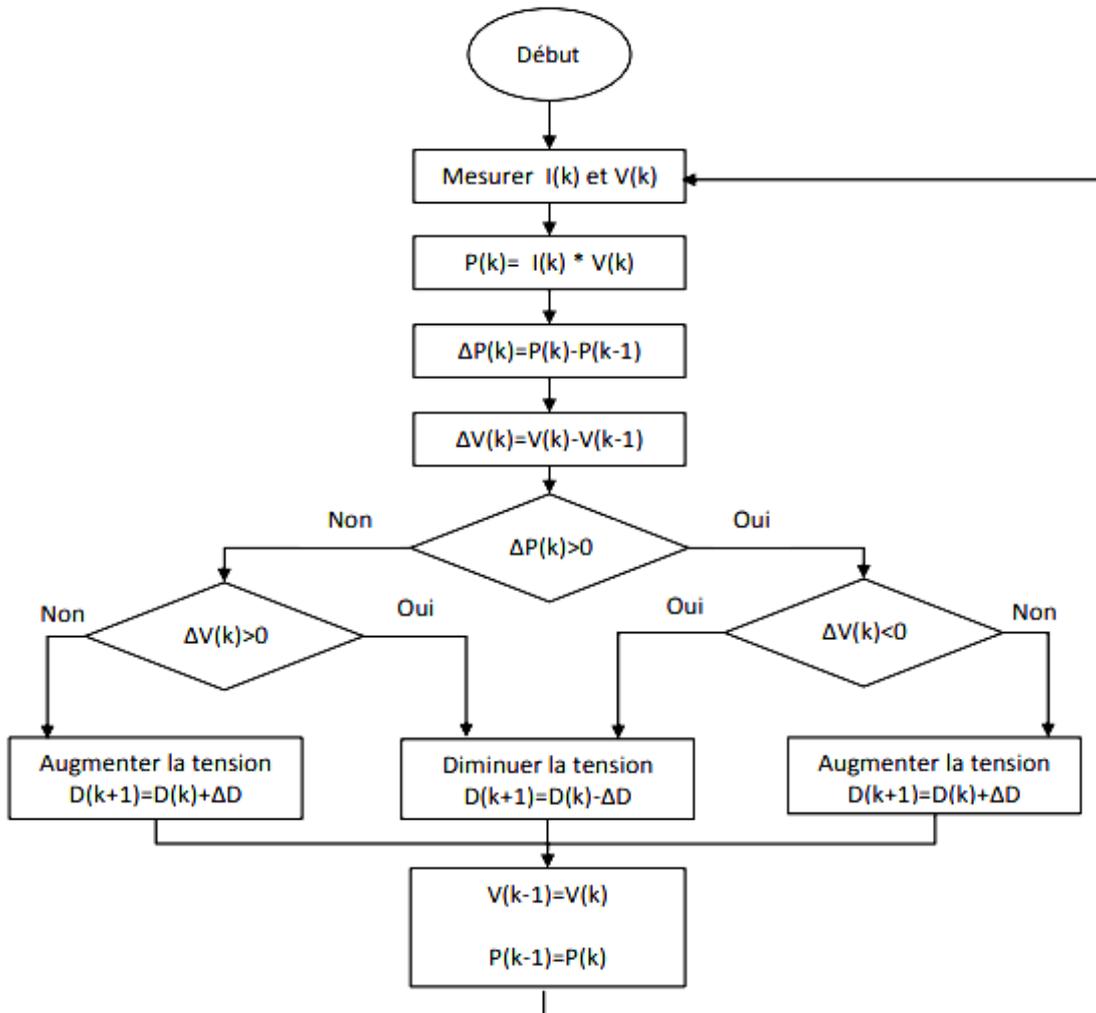


Figure IV.7: Algorithme de la méthode P&O.

IV.5.3 Avantages et inconvénients de P&O :

Avantage :

- Structure de régulation simple.
- Nombre des paramètres mesures réduit. [39]

Inconvénients :

- Dépassement du point maximum optimal en cas de changement rapide des conditions atmosphériques. [39]

IV.5.4 Autres Méthodes :

- Les algorithmes à base de réseau de neurones.
- Méthode de look-up table.
- Les algorithmes d'identification en temps réel du MPP.
- Méthode de β .
- L'algorithme de la capacité parasite (Parasitic Capacitance).
- La méthode de balayage du courant (Current Sweep). [39]

IV.6 Résultats de simulation de la commande MPPT :

Pour avoir une meilleure connexion entre le GPV et la charge et bénéficier de la puissance maximale, on présente l'une des méthodes de la commande MPPT qui est la méthode PO, partant de la modélisation de cet algorithme aux résultats des tests.

a) Simulation du schéma global

La figure (IV.8) Représente le schéma global d'un système photovoltaïque composé d'un module PV avec un hacheur BOOST commandé en MPPT de type P&O.

Pour tester les fonctionnements des algorithmes modélisés précédemment, on a inséré le bloc de commande MPPT pour le système photovoltaïque, les entrées de la commande sont le courant et la tension du panneau, la sortie représente le pas du rapport cyclique qui génère le signal de modulation PWM.

La Figure (IV.9) illustre le bloc schématique de SIMULINK du système PV adapté par la commande MPPT :

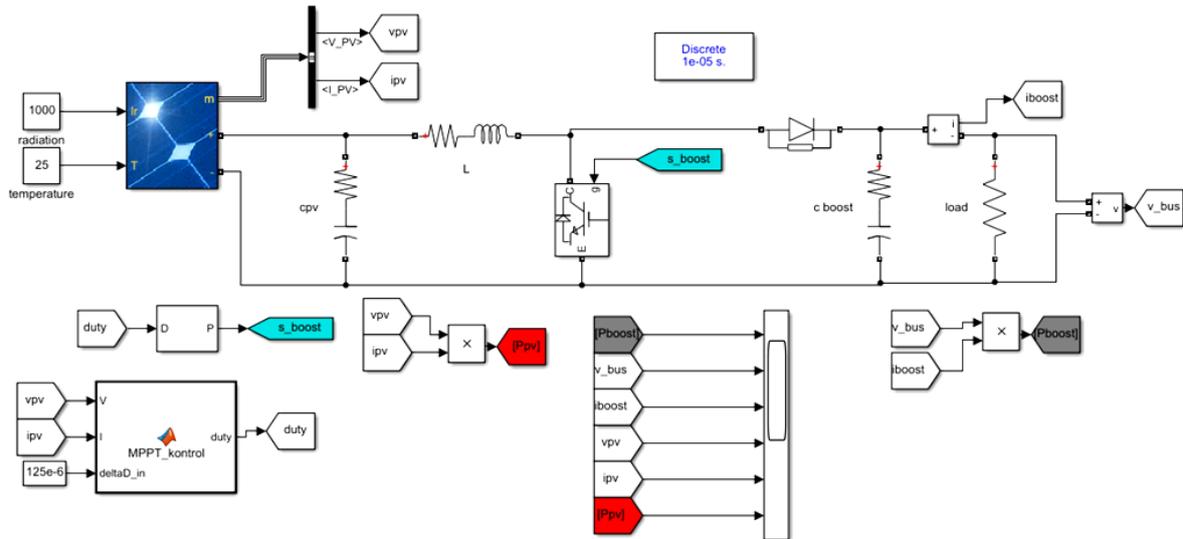


Figure IV.8: Modélisation d'un SPV sous MATLAB\SIMULINK.

b) Fonctionnement sous des conditions constantes

Nous avons simulé le fonctionnement d'un ensemble (GPV-BOOST-MPPT et une charge) sous des conditions atmosphériques fixes (un éclairage $1000W/m^2$ et une température de $25^{\circ}C$) et pour un pas de 5. La Figure suivante représente, respectivement, l'évolution de la puissance, la tension et le courant à l'entrée et la sortie du système.

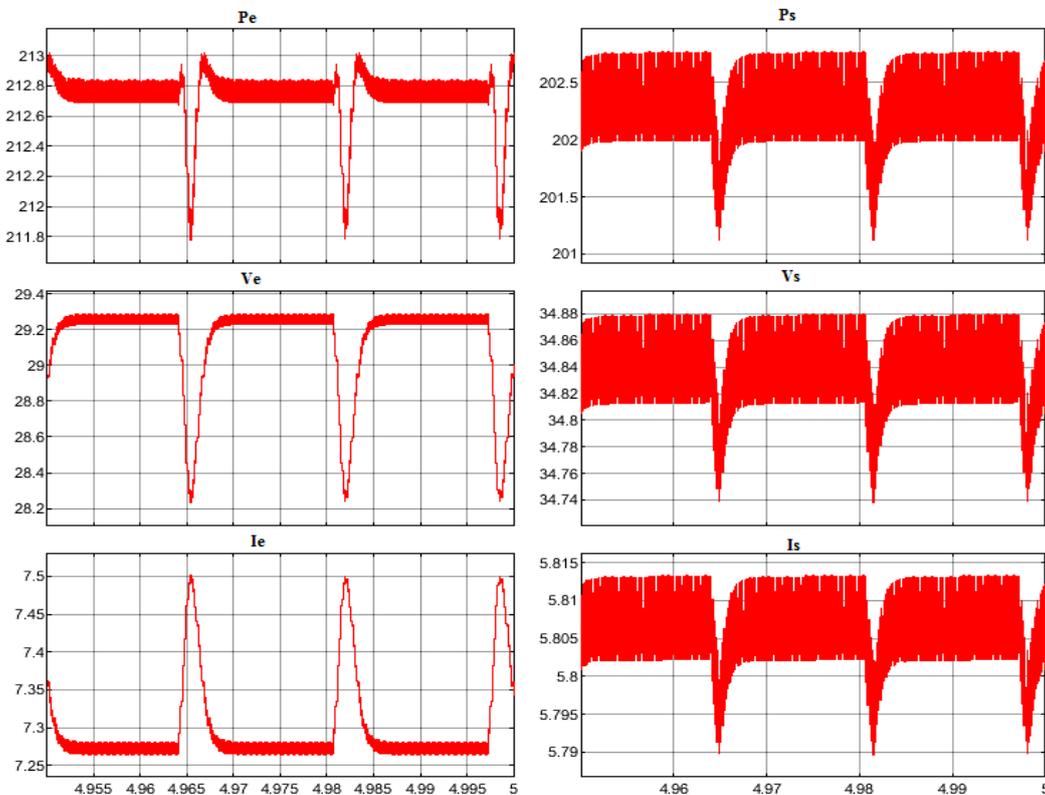


Figure IV.9: Courbes P(t),V(t),et I(t) à l'entrée/sortie du système (E=1000W/m² T=25°).

c) Fonctionnement sous des conditions climatiques variables.

Eclairement variable :

Nous avons testé le fonctionnement du système étudié sous une température fixe de 25°C et un éclairement variable (500W/m^2 , 700W/m^2 , 800W/m^2) comme illustré dans les figures suivantes :

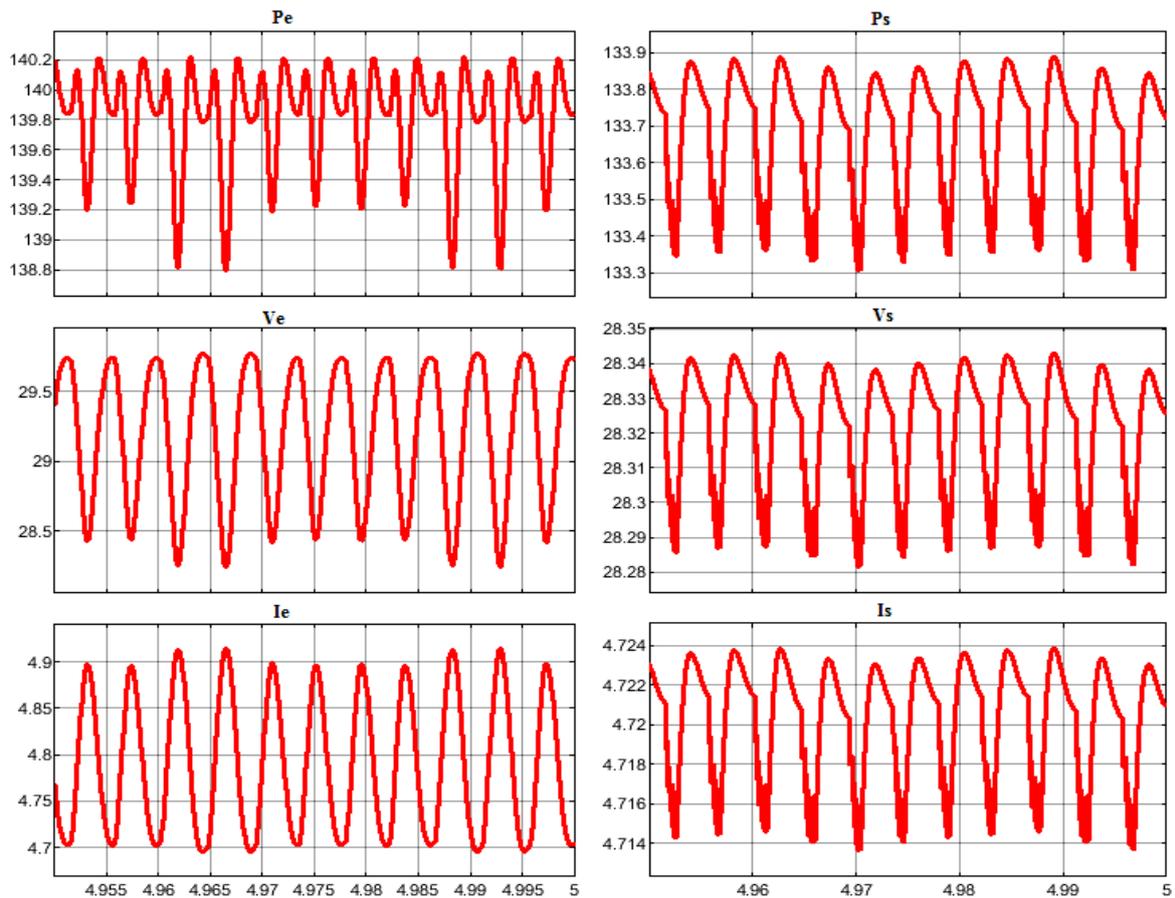


Figure IV.10: Courbes $P(t)$, $V(t)$, et $I(t)$ à l'entrée/sortie du système ($E=500\text{W/m}^2$ $T=25^{\circ}$).

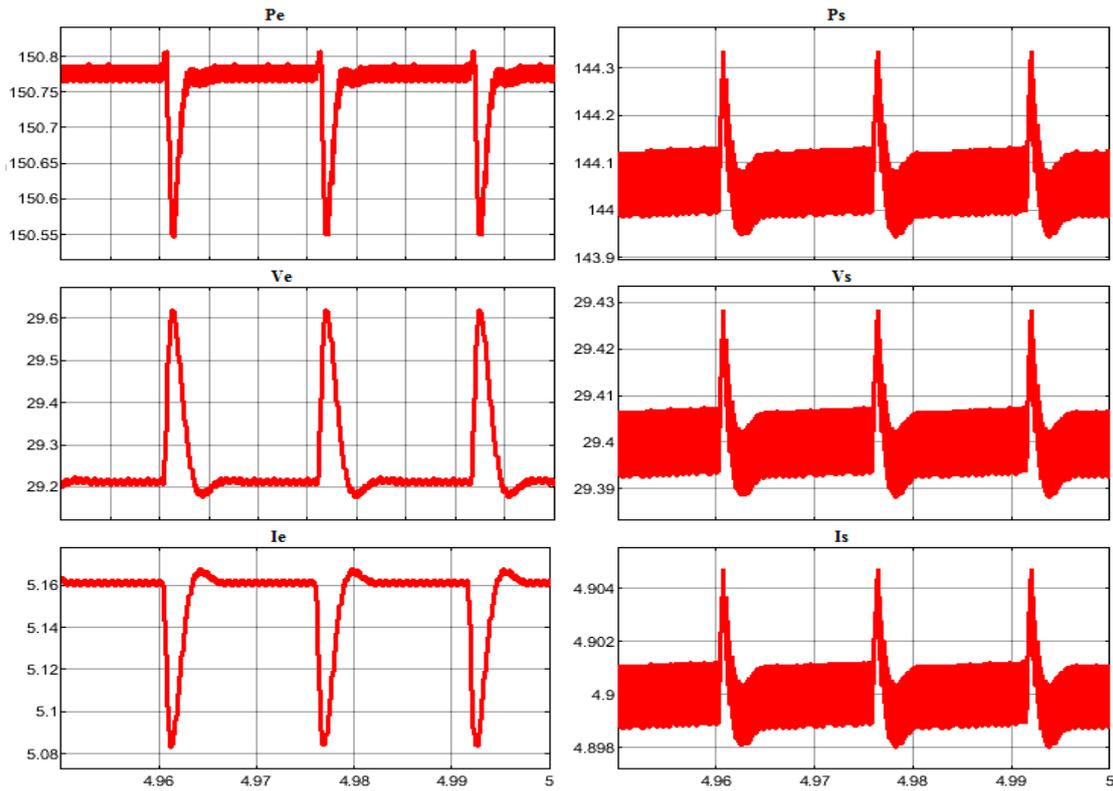


Figure IV.11: Courbes P(t),V(t),et I(t) à l'entrée/sortie du système ($E=700W/m^2$ $T=25^\circ$).

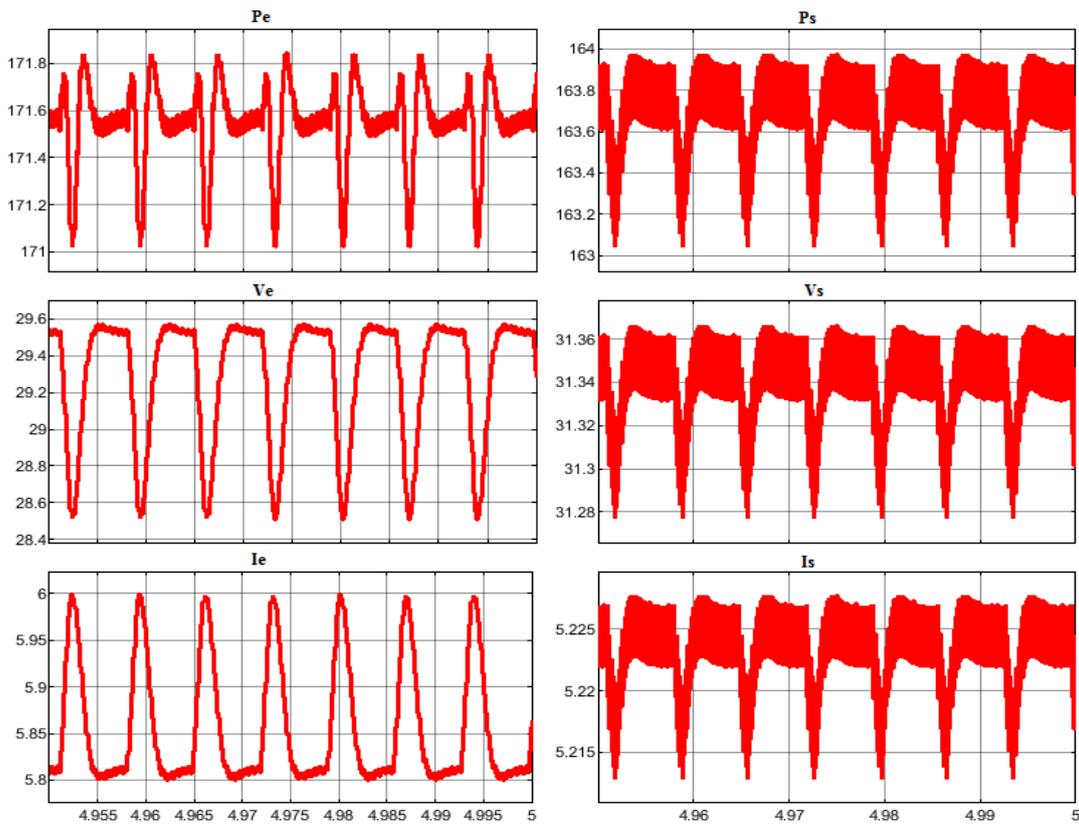


Figure IV.12: Courbes P(t),V(t),et I(t) à l'entrée/sortie du système ($E=800W/m^2$ $T=25^\circ$).

Température variable :

Dans ce cas nous allons inversé le test de fonctionnement du système étudié sous un éclairage fixe de 1000W/m^2 et une température variable (-5° 0° 50°). Les figures suivantes montrent les résultats obtenus :

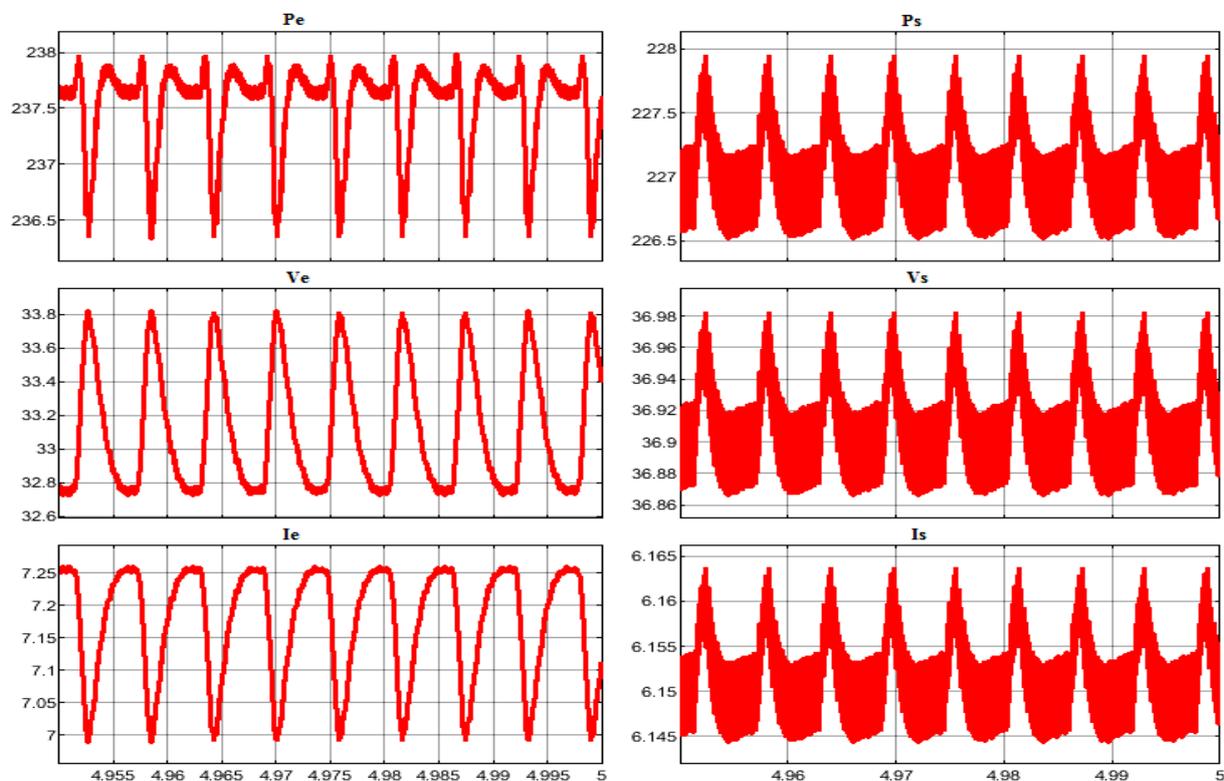


Figure IV.13: Courbes $P(t)$, $V(t)$, et $I(t)$ à l'entrée/sortie du système ($E=1000\text{W/m}^2$ $T=-5^\circ$).

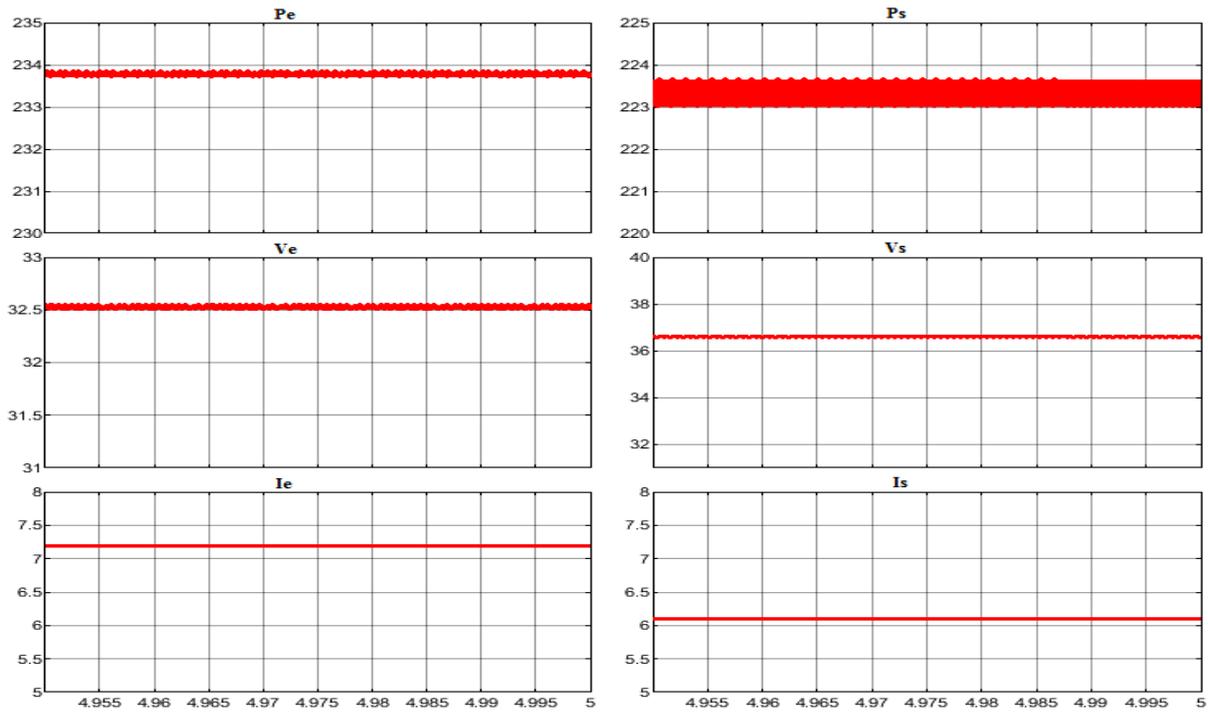


Figure IV.14: Courbes P(t),V(t),et I(t) à l'entrée/sortie du système ($E=1000W/m^2$ $T=0^\circ$).

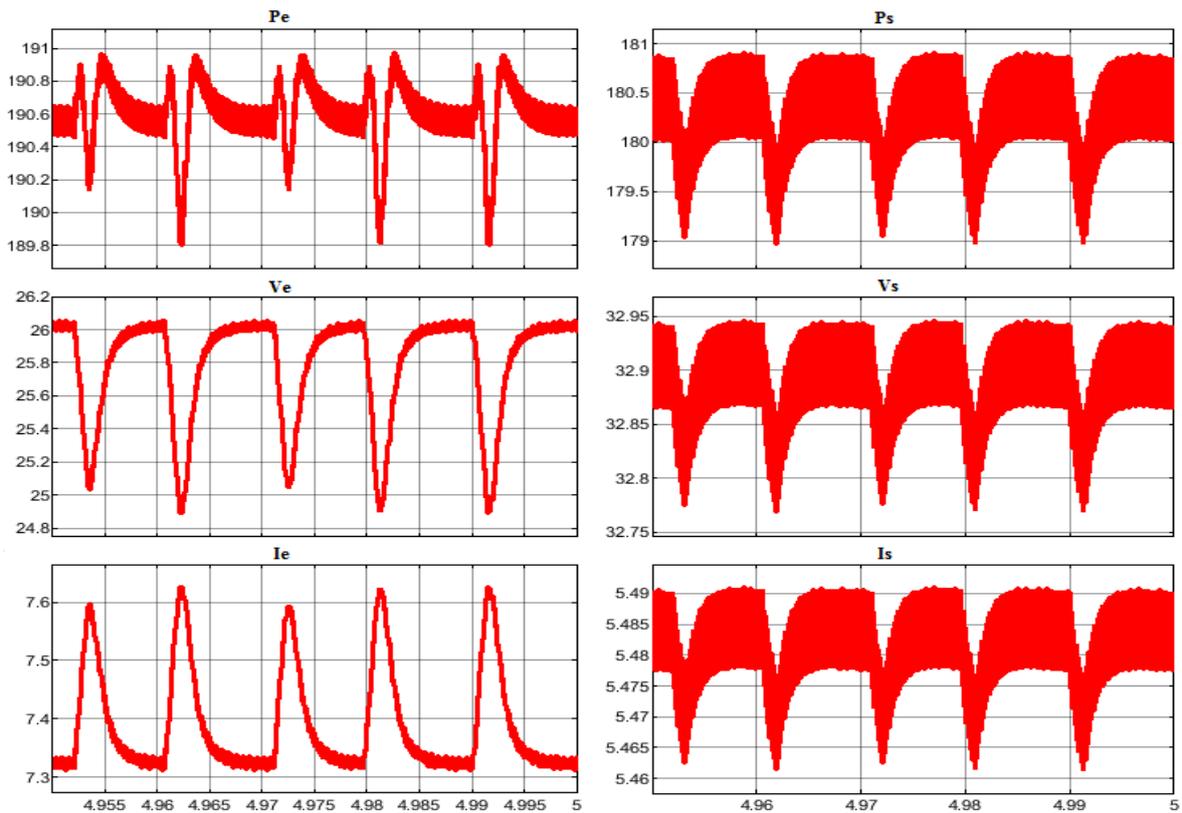


Figure IV.15: Courbes P(t),V(t),et I(t) à l'entrée/sortie du système ($E=1000W/m^2$ $T=50^\circ$).

Analyse des résultats de P&O :

À partir des résultats obtenus, on remarque que la commande P&O a permis de retrouver le point de puissance maximale du panneau. Avec la présence de la commande P&O, on remarque que : la courbe de la puissance illustrée dans la Figure (IV.9) atteint jusqu'à 202 W avec de grandes oscillations.

À partir des courbes présentées pour les différents cas de simulation, le hacheur Boost fournit une tension de sortie V_s supérieure à celle du générateur photovoltaïque. Donc l'hacheur Boost effectue correctement son rôle

Dans le cas du fonctionnement avec l'éclairement variable, on note que la MPPT a un rendement très important dans le but de poursuivre le PPM.

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

Dans notre projet l'étude est basée sur l'analyse d'une modélisation et simulation du fonctionnement électrique d'un système photovoltaïque (PV) adapté par une commande numérique (commande MPPT) assurant la poursuite de la puissance maximale fournie par le générateur PV.

Le travail présenté dans ce mémoire traite de la simulation et l'implémentation d'un algorithme MPPT par la méthode de perturbation et observation (P&O). La méthode P&O est l'un des systèmes les plus largement utilisés dans MPPT. Il vérifie la puissance de sortie du réseau et compare sa varié à la direction de perturbation de la tension de fonctionnement du réseau lui-même.

Au premier lieu nous avons vu des notions sur l'énergie solaire, le principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque au silicium ainsi que le générateur (GPV).

Ensuite, nous avons présenté la modélisation mathématique de la cellule et le générateur photovoltaïque, Nous avons utilisé le logiciel MATLAB pour étudier dans un premier temps le comportement d'une cellule photovoltaïque puis un générateur photovoltaïque dans les conditions standard ($G=1000 \text{ W/m}^2$ $T=25^\circ\text{C}$). Nous avons étudié aussi l'influence de la température et de l'éclairement sur l'énergie produite par la cellule PV sur l'énergie produite.

Finalement, nous avons présenté le fonctionnement du hacheur DC-DC (Boost) et la commande MPPT, et faire la modélisation et simulation de ces deux derniers.

Les principaux éléments auxquels ce travail a abouti sont :

- Le courant délivré par le GPV est directement proportionnel à l'ensoleillement par contre la tension aux bornes du GPV est relativement peu dégradée par l'accroissement de celui-ci.
- L'augmentation de la température conduit à une diminution nette de la tension de circuit ouvert, à une légère augmentation du courant de court-circuit, et à une diminution de la puissance maximale.
- Pour profiter de la puissance maximale délivrée par un panneau solaire, l'utilisation d'un étage d'adaptation entre ce panneau et la charge est nécessaire.

Pour une éventuelle continuité du présent travail, il est possible d'énumérer quelques perspectives comme suite de cette étude dont on peut citer :

- Exploitation de nouveaux algorithmes MPPT.
- Introduction d'autres types de convertisseurs DC/DC.

BIBLIOGRAPHIE

BIBLIOGRAPHIE

[1]A.Attou, « Commande de la machine asynchrone dédiée à l'énergie photovoltaïque ». Thèse de doctorat, Université Djillali Liabes de Sidi-bel-abbes 2017.

[2]A.Belkaid, « Conception et implémentation d'une commande MPPT de haute performance pour une chaîne de conversion photovoltaïque autonome », thèse de doctorat, Université Farhat Abbas Sétif-1, 2015.

[1]A.amarou, M.Ayache, « contribution à l'optimisation d'une chaîne de conversion d'énergie photovoltaïque », doctorat en sciences en électrotechnique option ,2014

[3]C.Cabal, « Optimisation énergétique de l'étage d'adaptation électronique dédié à la conversion photovoltaïque. », thèse de doctorat, Université Toulouse III – Paul Sabatier, 2008.

[4]S.Ghandour, « Conception de Convertisseurs DC/DC à base de MEMS », thèse de doctorat, Laboratoire CEA/LETI dans l'École Doctorale EEATS, Université de Grenoble, 2011.

[5]M. Djarallah, « Contribution à l'étude des systèmes photovoltaïques résidentiels couplés au réseau électrique ». Thèse de doctorat en sciences, Université de Batna 2008.

[6]A.C. Pastor, « Conception et réalisation de modules photovoltaïques électroniques », thèse de doctorat, Institut national des sciences appliquées de Toulouse 2005.

[7]N.Oleksiy, « Simulation, fabrication et analyse de cellules photovoltaïques à contacts arrières interdigités » Ecole doctorale. Thèse de doctorat, 2005.

[8]Benoît Issartel, « Conception d'un convertisseur DC/DC de type boost », Projet P10AB04, Polytech Clermont-Ferrand.

[9]I.Hidri, « Support de cours D'électronique de puissance Les convertisseurs DC-DC et DC-AC », Technologie à l'ISET de Nabeul.

[10]A. Rufer, P. Barrade, « Cours d'_electronique de puissance Conversion DC/DC », École Polytechnique Fédérale de Lausanne.

[11]A.Ricaud, « systèmes photovoltaïques » Polytech' Savoie, oct 2011.

[12]Bontjes Joamie, « Etude d'un hacheur survolteur », ECAM EPMI, Septembre 2017.

[13]F.Heroguel, « Les cellules photovoltaïques » Ecole normale supérieure, Lyon épreuve de projet, 2007.

[14]Saint Priest « électricité solaire avenir solaire » sma solar technology ag – 2012.

[15]Le Ministère de L'énergie et des mines conception et réalisation satinfo société du groupe sonelgaz « programme des énergies renouvelables et de l'efficacité énergétique » mars 2011

[16]N. Aouchiche, M.S. Aït Cheikh et A. Malek, «Poursuite du point de puissance maximale d'un système photovoltaïque par les méthodes de l'incrémentation de conductance et la perturbation & observation», Revue des Energies Renouvelables Vol. 16 N°3, 2013.

[17]M.Hatti, « contrôleur flou pour la poursuite du point de puissance maximum mppt d'un système photovoltaïque ». Jcge'08 lyon, 2008.

[18]Alain Bilbao Learetta, « Réalisation de commandes MPPT numériques », rapport de stage projet fin d'études, Université Rovira I Virgili, Tortosa, 2006.

[19]S. Gueye, I. Gueye, L. Thiaw, G.Sow, A. Ndiyaye, M. Thiam, « Conception d'un régulateur solaire avec commande MPPT », Laboratoire d'Energies Renouvelables, Ecole supérieure Polytechnique, Cheikh Anta Diop Dakar, Senegal, Juillet 2014.

[20]A.Talha, S.Boukhalfa, « Développement d'une Méthode MPPT pour un Système Photovoltaïque », Laboratoire d'Instrumentation, Faculté d'Electronique et d'Informatique, USTHB Bab-Ezzouar, Alger, Algérie, 2010.

[21]Z. Ayache, A. Bendaoud, H. Slimani, B. Benazza, H. Miloudi, A. Bentaallah, « Commande MPPT et Contrôle d'un Système Photovoltaïque par la Logique Floue », Laboratoire IRECOM, Université Djilali Liabès de Sidi Bel Abbès.

[22]B.Bendib, « Techniques conventionnelles et avancées de MPPT pour des applications photovoltaïques: étude comparative », mémoire de Magister, département d'Electronique .Université Ferhat Abbes-Sétif 2007.

[23]N.Saadaoui, « Modélisation et extraction automatique des paramètres d'un générateur photovoltaïque », mémoire de Magister, département d'Electrotechnique, Université Ferhat Abbes-Sétif 2010.

[24]BENSACI Wafa, «Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque adapté par une commande MPPT », Mémoire master, université kasdi Marbah Ouargla, 2012.

[25]B.Mohammed, « Modélisation d'un système de captage photovoltaïque autonome » mémoire de Magister, Centre universitaire de Bechar, 2008.

[26]A.Saadi, « Etude comparative entre les techniques d'optimisation des systèmes de pompage photovoltaïque » mémoire de Magister, Université de Biskra 2000.

[27]A.Lyes, « Etude de la connexion au réseau électrique d'une centrale photovoltaïque » mémoire de Magister, Université Mouloud Mammeri -Tizi Ouzou 2011.

[28]F.Slama, « Modélisation d'un système multi générateurs photovoltaïques interconnectés au réseau électrique », mémoire de Magister, département d'Electrotechnique, Université de Sétif 2012.

[29]M.Obeidi, « Commande des hacheurs MPPT par logique floue », mémoire de Magister, Ecole nationale polytechnique 2006.

- [30]A.Benayad, « Modélisation des panneaux photovoltaïques par les méthodes de soft computing », mémoire de Magister, département de Génie Electrique, Université de Béjaia 2011.
- [31]S.Ait-Cheikh, « Etude, investigation et conception d’algorithmes de commande appliqués aux systèmes photovoltaïques », mémoire de Magister, Ecole nationale polytechnique 2007.
- [32]Y.Lasmi, « Optimisation de la poursuite du point de puissance maximale (MPPT) d’un système photovoltaïque par les techniques intelligentes. », mémoire de magister, Université Sétif-1,2013.
- [33]C.Tigrine, O.Ait Ouali, « Etude et simulation des techniques MPPT d’un système photovoltaïque », mémoire de master, Université A. Mira de Bejaia, 2019.
- [34]S.Ferdjani, O.Maatallah, « Etude et Réalisation d’un Hacheur Boost Commandé par le μ C ARDUINO en vue d’Implémenter des Commandes MPPT », mémoire de master, Université Ahmed Draia, Adrar 2019.
- [35]Y.Sedrati, H.Nouar, « Implémentation de l’algorithme P&O pour un système photovoltaïque », mémoire de master académique, Université Kasdi Merbah d’Ourgla, 2016.
- [36]S.Mayouf, « Modélisation et simulation d’un système photovoltaïque connecté au réseau électrique avec une commande vectorielle », mémoire de master, Université Mohamed Boudiaf de M’sila, 2016.
- [37]L.Dellali, Y.Dib, « Etude comparative de deux commandes MPPT appliquées à un Système Photovoltaïque », mémoire de master, Université Abou-Bekr Belkaid de Tlemcen, 2017.
- [38]F.Benadel, « Etude Et Simulation D’une Commande MPPT Pour Système PV », mémoire de master, Université Mohamed Boudiaf de M’sila, 2016.
- [39]S.Zahar,C.Makhlouf, « Etude et Simulation d’un Générateur Photovoltaïque Muni d’un Convertisseur MPPT pour une Meilleur Gestion Energétique », mémoire de master, Université Mohamed Boudiaf de M’sila, 2017.

Résumé :

La puissance de sortie d'un GPV dépend d'un certain nombre de paramètres parmi lesquels l'intensité du rayonnement solaire, la température des cellules, etc. En raison des caractéristiques électriques fortement non linéaires des cellules PV et de leurs associations, le rendement des systèmes PV peut être amélioré par des solutions à base des techniques MPPT. Il existe des méthodes MPPT conventionnelles souvent utilisées, à savoir la méthode de perturbation et d'observation (P&O). Dans ce travail nous avons traité la simulation et l'implémentation d'un algorithme mppt par la méthode de perturbation et observation (P&O) afin d'analyser, simuler, et évaluer le système global d'alimentation PV sous des conditions de fonctionnement variables. Pour ce faire les modèles mathématiques des composants du système PV (GPV, convertisseur DC/DC, MPPT, charge) ont été développés. Les résultats de simulation, obtenus à l'aide de l'outil Matlab Simulink.

Mots clés :

Simulation. Convertisseur DC/DC. Algorithme MPPT (P&O), Générateur photovoltaïque (GPV), Eclairage.

Abstract:

The output power of a GPV depends on a number of parameters including the intensity of solar radiation, cell temperature, etc. Due to the highly non-linear electrical characteristics of PV cells and their associations, the efficiency of PV systems can be improved by solutions based on MPPT techniques. There are conventional MPPT methods often used, namely the perturbation and observation method (P&O). In this work we have treated the simulation and the implementation of an mppt algorithm by the perturbation and observation method (P&O) in order to analyze, simulate, and evaluate the global PV power system under operating variable conditions. To do this, the mathematical models of the components of the PV system (GPV, DC / DC converter, MPPT, load) have been developed. Simulation results, obtained using the Matlab Simulink tools.

Keywords:

Simulation. DC / DC converter. MPPT algorithm (P & O), Photovoltaic generator (GPV), Irradiance.

ملخص:

تعتمد الطاقة الناتجة لـ GPV على عدد من المعلمات بما في ذلك كثافة الإشعاع الشمسي ، ودرجة حرارة الخلية ، إلخ. نظرًا للخصائص الكهربائية غير الخطية للغاية للخلايا الكهروضوئية وارتباطاتها ، يمكن تحسين كفاءة الأنظمة الكهروضوئية عن طريق حلول تعتمد على تقنيات MPPT. هناك طرق MPPT التقليدية المستخدمة في كثير من الأحيان ، وهي طريقة الاضطراب والملاحظة (P&O). في هذا العمل ، عالجتنا محاكاة وتنفيذ خوارزمية mppt بواسطة طريقة الاضطراب والمراقبة (P&O) من أجل تحليل ومحاكاة وتقييم نظام الطاقة الكهروضوئية العالمي في ظل ظروف تشغيل متغيرة. للقيام بذلك ، تم تطوير النماذج الرياضية لمكونات النظام الكهروضوئي (GPV ، محول DC / DC ، MPPT ، الحمل). نتائج المحاكاة تم الحصول عليها باستخدام أداة Matlab Simulink.

الكلمات المفتاحية

النظام الكهروضوئي، المحول DC/DC ، آلية التحكم (P & O) MPPT ، مولد (GPV) ، اشعاع.