

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'enseignement Supérieur
et de la Recherche scientifique



Université d'EL-Oued
Faculté des Sciences et de la Technologie



Mémoire de Fin d'Etudes
En vue de l'obtention du diplôme de

MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et Technologie
Filière : Génie Électrique
Spécialité: Réseaux Électriques

Thème

**Etude comparative des algorithmes de
poursuite du point de Puissance maximale
(MPPT) appliqués aux systèmes
photovoltaïques**

Etudié par:

Encadreur : Mr. MIDA dris

 **KAID Imad eddine**

 **LAIB Nour eddine**

Soutenu Juin 2013

Remerciement

Merci à dieu tout puissant qui nous a éclairé le bon chemin et qui nous a tous donné comme volonté, santé et surtout patience pour pouvoir durant toute ces longue années d'étude arriver à ce niveau et de concrétiser nos effort par ce modeste travail.

*Nous tenons à adresser nos vifs remerciements pour sa collaboration son soutien moral ,à notre encadreur **Mr: MIDA dris** , pour nous avoir suivies durant la préparation de ce travail et pour son aide ces précieuses , nombreux conseils et suggestions .*

Les collègues de la première promotion de notre spécialité à leur soutien que dieu les aident dans leur vie professionnelles.

Nos familles respectueuses à leur soutien matériel et moral, et l'atmosphère qui nous ont présenté.

A monsieur le président et les membres des jury, pour leurs acceptation de juger ce travail.

Remerciement spécial aux responsables de l'université D'El-Oued et à tous ceux personnes nous présentons nous remerciements et nos respect

IMAD-EDDINE ET NOUR EDDINE



Listes des figures	Page
Figure I-1 Zones d'ensoleillement en Algérie	6
Figure I -2 (a) cellule PV, (b) module PV et (c) panneaux PV	8
Figure I -3 Caractéristique typique I-V d'une cellule solaire	11
Figure I -4 Caractéristique typique P-V d'une cellule solaire	11
Figure I -5 Schéma d'une cellule élémentaire	12
Figure I-6 Schéma de principe d'un type d'alimentation à découpage	15
Figure I-7 Schéma d'un quadripôle électrique	15
Figure I-8 périodes fermeture et ouverture d'un commutateur	16
Figure I-9 Schéma de principe d'un convertisseur dévolteur (Buck)	17
Figure I-10 Schéma de principe d'un convertisseur survolteur (Boost)	17
Figure I-11 Convertisseur dévolteur-survolteur	18
Figure I -12 Plusieurs modules PV en série vers un seul onduleur	19
Figure I -13 Bus à basse tension alternative	20
Figure I -14 Convertisseur de type forward alimentant le bus continu	21
Figure I -15 Structure avec un convertisseur de type fly-back	21
Figure I -16 Hacheur élévateur de tension avec onduleur centralisé	22
Figure II-1 Module KC200GT	26
Figure II-2 Schéma équivalent du modèle à une exponentielle, L3P	28
Figure II-3 Schéma équivalent du modèle à une exponentielle, L4P	29
Figure II-4 Schéma équivalent du modèle à une exponentielle, L5P	30
Figure II-5 Schéma équivalent du modèle à deux exponentielles, 2M7P	31
Figure II-6 Schéma équivalent du modèle à deux exponentielles, 2M6P	33
Figure II-7 Schéma équivalent du modèle à deux exponentielles, 2M5P	34
Figure II-8 Schéma équivalent du modèle à une seule diode	35
Figure II-9 Simulation du module PV	36
Figure II-10 Caractéristique typique I-V d'un module solaire	37
Figure II-11 Caractéristique typique P-V d'un module solaire	38
Figure II-12 (a) Influence de l'éclairement sur la caractéristique I (V)	39
Figure II-12 (b) Influence de l'éclairement sur la caractéristique P (V)	39
Figure II-13 (a) Influence de la température sur la caractéristique I (V)	40

Figure II-13 (a) Influence de la température sur la caractéristique P (V)	40
Figure II-14 (a) Influence de la résistance série (R_s) sur la caractéristique I (V)	41
Figure II-14 (b) Influence de la résistance série (R_s) sur la caractéristique P (V)	42
Figure II-15 (a) Influence de la résistance shunt (R_{sh}) sur la caractéristique I (V)	42
Figure II-15 (b) Influence de la résistance shunt (R_{sh}) sur la caractéristique P (V)	43
Figure III -1 Connexion directe GPV-Charge via une diode anti-retour	46
Figure III-2 Caractéristiques électriques d'un générateur photovoltaïque en connexion direct GPV-Charge	46
Figure III -3 Connexion d'un GPV à une charge à travers un étage d'adaptation	47
Figure III -4 Chaîne élémentaire de connexion photovoltaïque	48
Figure III-5 Recherche et recouvrement du Point de Puissance Maximale	49
Figure III-6 Principe de la première technique MPPT numérique	54
Figure III-7 Recherche du MPP	55
Figure III-8 Caractéristique $P_{pv}(V_{pv})$ d'un panneau solaire	56
Figure III-9 Algorithme MPPT perturbation Puis observation (P&O)	57
Figure III-10. Algorithme MPPT à pas auto-adaptatif	59
Figure III-11 Positionnement du point de fonctionnement ($G=1kW/m^2$, $T=25C^\circ$)	60
Figure III-12 Algorithme MPPT Conductance Incrémentale (Inc .CoN)	61
Figure III-13 Relation entre P_{pv} et le rapport cyclique D du CS	63
Figure.III-14 Algorithm MPPT Hill Climbing (H.C)	63
Figure III-15 Rapport entre V_{op} et V_{co} en fonction de l'éclairement	65
Figure III-16 Structure de base de la commande floue	68
Figure III-17 exemple d'un réseau de neurones	70
Figure IV-1 la variation de puissance en fonction de la tension	73
Figure IV-2 Poursuite du point de puissance maximale par (P&O) pour l'éclairement variable	74
Figure IV-3 La variation de la puissance en fonction du rapport cyclique	74
Figure IV-4 La variation de la puissance en fonction de la tension vers le PPM	75
Figure IV-5 Poursuite du point de puissance maximale pour un éclairement variable	75
Figure IV-6 La variation de la puissance en fonction du rapport cyclique	76
Figure IV-7 La variation de l'erreur absolue en fonction de l'éclairement	76

Figure IV-8 La variation de rendement en fonction de l'éclairement	77
Figure IV -9 La variation de la conductance incrémentale en fonction de la tension	77
Figure IV-10 La variation de la puissance en fonction de la tension vers le PPM	78
Figure IV-11 Poursuite du point de puissance maximale par un MPPT pour un éclairement variable	79
Figure IV-12 La variation de la puissance en fonction du rapport cyclique	80
Figure IV-13 La variation de l'erreur absolue en fonction de l'éclairement	80
Figure IV-14 La variation de rendement en fonction de l'éclairement	81
Figure IV-15 Comparaison des rendements des trois méthodes	81

Liste des symboles

V_{co}	: Tension a circuit-ouvert	[V]
V_0	: Tension a la sortie du convertisseur	[V]
N_p	: Nombre de modules en parallèles	
N_s	: Nombre de cellules en série	
$V_{cellule}$	: Tension aux bornes de la cellule	[V]
V_{th}	: tension thermique	[V]
I_{cc}	: courant de court-circuit	[A]
I_{op}	: courant optimal	
V_{op}	: tension optimale	[V]
V_{op}	: tension de circuit ouvert	[V]
R_s	: résistance série	[Ω]
P_{max}	: Puissance maximale disponible	[W]
I_{mp}	: Courant maximale de la cellule	[A]
V_{mp}	: Tension maximale de la cellule	[V]
R_s	: Résistance série par cellule	[Ω]
R_{sh}	: Résistance shunt par cellule	[Ω]
I_{pv}	: Le courant fourni par la cellule	[A]
I_d	: Courant dans la diode	[A]
I_{ph}	: Courant thermique	[A]
I_s	: courant de saturation de la diode	[A]
I_0	: Courant a la sortie du convertisseur	[A]
V_d	: Tension aux bornes de la diode	[A]
q	: Charge d'électron	[C]
K	: Constante de Boltzmann	[J/K]
I_{d1}	: Courant de la diode 1	[A]
I_{d2}	: Courant de la diode 2	[A]
a	: facteur de dimension	
$I_{ph(ref)}$	: Le courant photonique sous condition de référence	[A]

μ_{cc} :	Coefficient de sensibilité de l'intensité à la température	[A/K]
G :	L'éclairement réels	[W/m ²]
G_{ref} :	condition e référence	
G, G_{ref} :	L'éclairement réels et la condition de référence La surface de module photovoltaïque	[W/m ²]
T_c :	Température absolue	[K]
T :	température	[K]
$T_c, T_{c(ref)}$:	La température de cellules à la condition de référence	[W/m ²]
E_g :	L'énergie de gap	[eV]
G_0 :	l'ensoleillement	W/m ²
α :	Coefficient de temperature	[mA/cm ² /°C]
FF :	facteur de forme	
S :	surface de la cellule	[m ²]
η :	Rendement de la cellule	[%]
PV :	photovoltaïque	
$MPPT$:	maximum power point tracking	
GPV :	générateur photovoltaïque	
PPM :	point de puissance maximale	
$DC-DC$:	conversion continu-continu	
$DC-AC$:	conversion continu-alternative	
$P\&O$:	Perturbation puis Observation	
$Inc.CoN$:	Incrémental conductance (Conductance Incrémentale)	
$H.C$:	Hill climbing	
d :	rapport cyclique	
T_s :	période de commutation du convertisseur	

Listes des tableaux	Page
Tableau II-1 Caractéristiques du module PV KC200GT	27
Tableau III-1 Exemple d'une table de vérité pour une commande logique floue	68
Tableau IV-1 comparaison de nombre d'itération et la valeur moyenne du rendement Entre les trois algorithmes	82

Sommaire

Introduction Générale	1
-----------------------	---

Chapitre I

Les systèmes photovoltaïques

I-1-Introduction	3
I-2- Historique	3
I-3- Rayonnement solaire	4
I- 3-1- Composantes du rayonnement solaire	4
I-3-2- Rayonnement solaire en Algérie	5
I-4 – Conversion photovoltaïque	6
I-4 -1- L'effet photovoltaïque	7
I-5- Les cellules solaires	7
I-5-1- Les différents types des cellules solaires	8
I- 6- Caractéristique d'une cellule PV	8
I - 6- 1- Caractéristique courant – tension	8
I - 6- 2- Caractéristique puissance – tension	11
I-7- Le principe de fonctionnement d'une cellule	12
I-8- Les composants d'un système photovoltaïque	13
I-8-1- Les cellules solaires	13
I-8-2- Les batteries	13
I-8-3- Les régulateurs à recherche de point de puissance maximale (MPPT)	14
I-8-3-1- Principe du MPPT	14
I-8-4- Les convertisseurs	14
I-8-4-1- Les convertisseurs DC/AC (Onduleurs)	14
I-8-4-2- Les convertisseurs DC/DC (Hacheurs)	14
I-8-4-2-1- Hacheur dévolteur	16
I-8-4-2-2- Hacheur survolteur	17
I-8-4-2-3- Hacheur dévolteur-survolteur	17
I-8-5- Les autres composants	18
I-9- Les différents types des systèmes photovoltaïques	19
I-9-1- Système PV connecté directement au réseau	19

I-9-1-1- Structure à convertisseur unique	19
I-9-1-2- Structure avec bus à basse tension alternative	20
I-9-2- Système à bus continu intermédiaire	20
I-9-2-1- Structure avec convertisseur forward	20
I-9-2-2- Structure avec un convertisseur de type fly-back	21
I-9-2-3- Structure avec hacheur et onduleur	22
I-10- Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque	22
I-10-1- Avantages	22
I-10-1- Inconvénients	23
I-11 – Conclusion	24

Chapitre II

Modélisation et simulation d'une cellule photovoltaïque

II-1- Introduction	25
II-2- Modélisation des cellules photovoltaïques	26
II-3- Modèle à une diode	28
II-3-1- Modèle à trois paramètres (L3P)	28
II-3-2- Modèle à quatre paramètres (L4P)	29
II-3-3- Modèle à cinq paramètres (L5P)	30
II-4- Modèle à deux diodes	30
II-4-1- Modèle à sept paramètres (2M7P)	30
II-4-2- Modèle à six paramètres (2M6P)	33
II-4-3- Modèle à cinq paramètres (2M5P)	34
II-5- Simulation d'un module PV avec le modèle à une seule diode	35
II-5 -1- Caractéristique $I(V)$	37
II-5 -2- Caractéristique $P(V)$	38
II-5 -3 - Influence de l'éclairement sur les caractéristiques $I(V)$ et $P(V)$	38
II-5 -4- Influence de la température sur les caractéristiques $I(V)$ et $P(V)$	40
II-5 -5- Influence de la résistance série sur les caractéristiques $I(V)$ et $P(V)$	41
II-5 -6 - Influence de la résistance shunt sur les caractéristiques $I(V)$ et $P(V)$	42
II-6- Conclusion	44

Chapitre III

Différentes méthodes MPPT appliquées aux systèmes PV

III-1- Introduction	45
III-2- La connexion direct GPV-charge comme mode de transfert de puissance	45
III-3- La connexion GPV-charge via un étage d'adaptation	47
III-4- Principe de la recherche du point de puissance maximale	48
III-5- Critères d'évaluation d'une commande MPPT	50
III-6- Rendements de la chaîne de puissance	51
III-7- Différents types de commandes MPPT	52
III-8- Classification des technique MPPT	53
III-8-1- Les premiers types de technique MPPT	53
III-8-2- Les technique MPPT a algorithme performants	54
III-8-2-1- Technique Perturbation puis Observation (P&O)	56
III-8-2-2- Technique MPPT à pas auto-adaptatif	57
III-8-2-3- Technique de la Conductance Incrémentale (Inc. Con)	59
III-8-2-4- Technique Hill Climbing (H.C)	62
III-8-3- Les techniques MPPT basées sur des relation de proportionnalité	64
III-8-3-1- Technique de la fraction de la tension de circuit ouvert du générateur	64
III-8-3-2- Technique de court-circuit	65
III-8-4- Les techniques de différenciation	66
III-8-5- Les techniques MPPT basées sur le principe de logique flou	67
III-8-5-1- Historique	67
III-8-6- Les techniques MPPT de réseaux de neurones artificielle	69
III-9- Conclusion	71

Chapitre IV

Résultats & Etude comparative

IV -1- Introduction	72
IV -2- Discussion des Résultats	73
IV -2-1- Résultats de la méthode de perturbation puis observation	73
IV -2-2- Résultats de la méthode de l'incrémentation de la conductance	74

IV -2-3- Résultats de la méthode de fraction de la tension du circuit ouvert	78
IV -2-4- Interprétation	79
IV -3 - Etude comparative des trois algorithmes	81
IV -4- Conclusion	83
Conclusion Générale	84
Bibliographie	85
Annexe	

INTRODUCTION GÉNÉRALE

La production d'énergie est un défi de grande importance pour les années à venir. Les besoins énergétiques des sociétés industrialisées ainsi que les pays en voie de développement ne cessent de se multiplier. Cette production a triplé depuis les années 60 à nos jours. La totalité de production mondiale d'énergie provient de sources fossiles.

La consommation de ces sources donne lieu à des émissions de gaz à effet de serre et donc une augmentation de la pollution. En plus la consommation excessive de stock de ressources naturelles réduit les réserves de ce type d'énergie d'une façon dangereuse pour les générations futures.

Les énergies renouvelables telles que l'énergie éolienne, l'énergie solaire, l'énergie biomasse et l'énergie hydroélectrique, sont des solutions prometteuses pour concurrencer les sources d'énergies de masse telle que l'énergie fossile et nucléaire.

On entend par énergie renouvelable, des énergies issues du soleil, du vent, de la chaleur de la terre, de l'eau ou encore de la biomasse. A la différence des énergies fossiles, les Energies renouvelables sont des énergies à ressource illimitée.

Le rayonnement solaire est répartie sur toute la surface de la terre, sa densité n'est pas grande et ne cause aucun conflit entre les pays contrairement au pétrole. Les systèmes photovoltaïques semblent bien s'imposer comme moyen de conversion de l'énergie solaire en énergie électrique. Un tel système se compose d'un champ de modules et d'un ensemble de composants qui adaptent l'électricité produite par les modules aux spécifications des récepteurs.

Dans ce contexte général, notre étude s'intéresse à la filière photovoltaïque et aussi consiste au développement d'une procédure d'optimisation qui permet la poursuite de la puissance maximale (**Maximum Power Point Tracking MPPT**) d'un générateur photovoltaïque. Pour décrire cela, ce mémoire est présenté en quatre chapitres :

- ✚ Dans le premier chapitre, on a fait une généralité sur les générateurs photovoltaïques. On a présenté le principe de l'effet photovoltaïque, la cellule PV et ses paramètres. En suite on a fait un rappel sur les générateurs PV et leurs performances.
- ✚ Dans le deuxième chapitre, on a modélisé la cellule photovoltaïque avec plusieurs modèles et on a simulé le module sur l'environnement Matlab Simulink avec le modèle à une diode, et on a montré l'influence de l'éclairement et la température sur les caractéristiques I-V et P-V.
- ✚ Le troisième chapitre est consacré à l'explication du principe de la commande MPPT et les différentes méthodes utilisées pour le suivi de ce point de puissance maximale.
- ✚ Dans le quatrième chapitre on a présenté et discuté nos résultats des trois méthodes appliquées pour la poursuite du point de puissance maximale de générateur PV. A savoir la méthode de perturbation puis observation, la méthode de la conductance incrémentale et la méthode de la fraction de la tension de circuit ouvert.
- ✚ A la fin , ce mémoire est terminé par une conclusion générale.

Chapitre I

Les systèmes photovoltaïques

I-1- Introduction:

Depuis très longtemps, l'homme a cherché à utiliser l'énergie émise par le soleil, étoile la plus proche de la terre. La plupart des utilisations sont directes comme en agriculture, à travers la photosynthèse ou dans diverses applications de séchage et chauffage, autant artisanale qu'industrielle.

Cette énergie est disponible en abondance sur toute la surface terrestre et, malgré une atténuation importante lors de la traversée de l'atmosphère, une quantité encore importante arrive à la surface du sol. On peut ainsi compter sur 1000 W/m^2 dans les zones tempérées et jusqu'à 1400 W/m^2 lorsque l'atmosphère est faiblement polluée en poussière ou en eau. Le flux solaire reçu au niveau du sol terrestre dépend ainsi de plusieurs paramètres comme:

- l'orientation, la nature et l'inclinaison de la surface terrestre,
- la latitude du lieu de collecte, de son degré de pollution ainsi que de son altitude,
- la période de l'année,
- l'instant considéré dans la journée,
- la nature des couches nuageuses.

La conversion de la lumière en électricité, appelée **effet photovoltaïque**, peut s'effectuer par le biais d'un capteur constitué de matériaux sensibles à l'énergie contenue dans les photons. Ce capteur se présente à l'échelle élémentaire sous forme d'une cellule nommée cellule photovoltaïque (PV). [1]

L'Algérie dispose d'environ 3200 heures d'ensoleillement par an, bénéficiant d'une situation climatique favorable à l'application des techniques solaires. [4]

Ce chapitre décrit les Systèmes photovoltaïques concepts de base de l'énergie solaire et de la production d'électricité grâce à l'effet photovoltaïque. Les principaux éléments et caractéristique du système photovoltaïque sont également étudiés

I-2- Historique :

Les systèmes photovoltaïques sont utilisés depuis 40 ans. Les applications ont commencé avec le programme spatial pour la transmission radio des satellites. Elles se sont poursuivies avec les balises en mer et l'équipement de sites isolés dans tous les

pays du monde, en utilisant les batteries pour stocker l'énergie électrique pendant les heures sans soleil.

- **En 1839:** le physicien français Edmond Becquerel a découvert le processus de l'utilisation de l'ensoleillement pour produire du courant électrique dans un matériau solide. C'est l'effet photovoltaïque.
- **En 1875:** Werner Von Siemens a exposé devant l'Académie des Sciences de Berlin un article sur l'effet photovoltaïque dans les semi-conducteurs. Mais jusqu'à la Seconde Guerre Mondiale, le phénomène reste encore une curiosité de laboratoire
- **En 1954:** trois chercheurs américains, Chapin, Pearson et Prince, ont mis au point une cellule photovoltaïque à haut rendement au moment où l'industrie spatiale naissante cherche des solutions nouvelles pour alimenter ses satellites.
- **En 1958:** une cellule avec un rendement de 9 % est mise au point. Les premiers satellites alimentés par des cellules solaires sont envoyés dans l'espace.
- **En 1973:** la première maison alimentée par des cellules photovoltaïques est construite à l'Université de Delaware USA (à New York)
- **En 1983:** la première voiture alimentée par un module ou panneaux photovoltaïque parcourt une distance de 400 Km en Australie.

La première cellule photovoltaïque (ou photopile) a été développée aux États-Unis en 1954 par les chercheurs des laboratoires Bell, qui ont découvert que la photosensibilité du silicium pouvait être augmentée en ajoutant des "impuretés". C'est une technique appelée le "dopage" qui est utilisée pour tous les semi-conducteurs, Mais ce n'est que lors de la course vers l'espace que les cellules ont quitté les laboratoires. En effet, les photopiles représentent la solution idéale pour satisfaire les besoins en électricité à bord des satellites, ainsi que dans tout site isolé.

I-3- Rayonnement solaire:

I- 3-1- Composantes du rayonnement solaire :

Le rayonnement solaire est la matière première de l'énergie solaire. C'est une propagation d'une onde de longueur qui varie entre 0,2 μm (ultra-violet) à 4 μm (infra-rouge). Sans la nécessité d'un support physique pour se déplacer, il arrive au sol après la perte d'une grande partie de son intensité, à cause d'une partie de l'ultraviolet, qui s'absorbe [2].

a- Rayonnement direct :

C'est l'ensemble des rayonnements solaires parallèles qui produisent de l'énergie venant, directement du soleil vers la terre plus ou moins alterné. (Par la diffusion ou l'absorption)

b- Rayonnement diffus :

Il provient d'une manière isotrope de toutes les directions de l'espace, lui même, il est décomposé en :

- Diffus provenant du ciel.
- Diffus provenant du sol.
- Diffus provenant de la rétro -diffusion du sol.

c- Rayonnement global :

C'est l'énergie du soleil reçue par une surface horizontale, elle est la somme des deux rayonnements relatifs des rayonnements directs et diffus. Par temps Clair, les proportions relatives des rayonnements direct et diffus varient au cours de la journée selon la hauteur du soleil, mais également selon les quantités d'eau, de CO₂ ou de poussière contenue dans l'atmosphère. Le rayonnement direct est dix fois supérieur au rayonnement diffus, lorsque le soleil est proche de zénith; Hors atmosphère, la répartition spectrale du rayonnement se détermine de manière très précise. Au sol, la vapeur d'eau, la poussière, etc...., ont un effet considérable sur le spectre du rayonnement reçu. [3]

I-3-2- Rayonnement solaire en Algérie:

Le territoire algérien est partagé en huit zones homogènes d'ensoleillement qui sont représenté dans la figure (I- 1) :

- Zone1 : type Annaba, recevant à la moyenne une énergie globale horizontale de 4.30kwh/m² et inclinée de 4.85Kwh/m² par jour.
- Zone2 :Type Alger, recevant à la moyenne une énergie globale horizontale de 4.60kwh/m² et inclinée de 5.26Kwh/m² par jour.
- Zone3 : type Batna, recevant à la moyenne une énergie globale horizontale de 5.19kwh/m² et inclinée de 5.97Kwh/m² par jour .

- Zone4: type Ouargla, recevant à la moyenne une énergie globale horizontale de 5.69kWh/m^2 et inclinée de 6.53Kwh/m^2 par jour.
- Zone5: type In Salah , recevant à la moyenne une énergie globale horizontale de 6.12 kWh/m^2 et inclinée de 6.78Kwh/m^2 par jour.
- Zone6 : type Adrar, recevant à la moyenne une énergie globale horizontale de 6.36kWh/m^2 et inclinée de 7.11Kwh/m^2 par jour.
- Zone7 : type Tamanrasset, recevant à la moyenne une énergie globale horizontale de 6.47kWh/m^2 et inclinée de 7.01Kwh/m^2 par jour.
- Zone8 : type Janet, recevant à la moyenne une énergie globale horizontale de 6.82kWh/m^2 et inclinée de 7.44Kwh/m^2 par jour [4] [5].

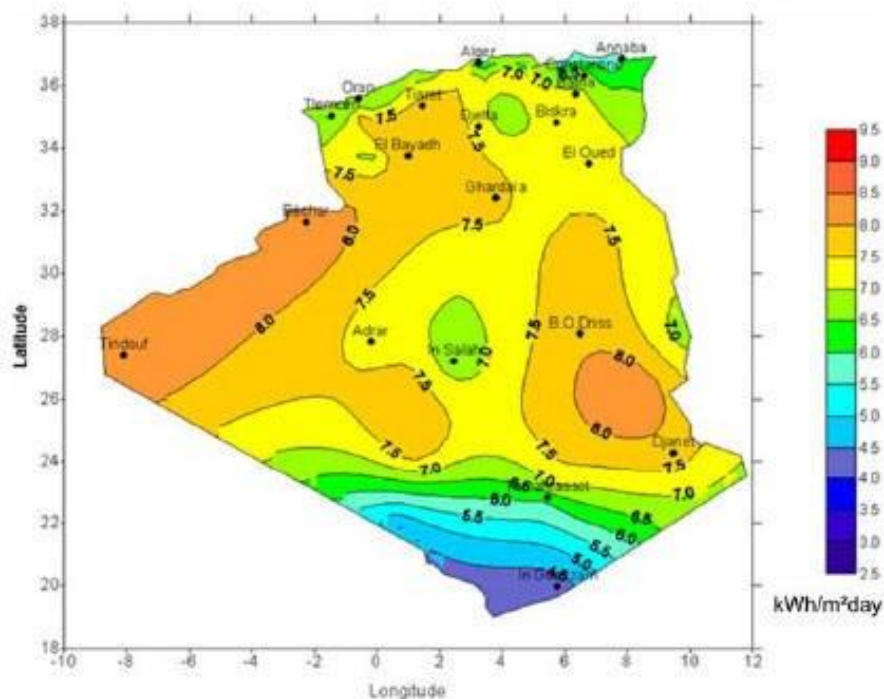


Figure I- 2 Zones d'ensoleillement en Algérie

I-4 - Conversion photovoltaïque:

La possibilité de transformer directement l'énergie lumineuse, et en particulier le rayonnement solaire en énergie électrique est apparue en 1954 avec la découverte de l'effet photovoltaïque. Cet effet utilise les propriétés quantiques de la lumière permettant la transformation de l'énergie incidente en courant électrique dont la cellule solaire ou photopile, est l'élément de base de cette conversion photovoltaïque. [4]

I-4 -1- L'effet photovoltaïque :

L'effet photovoltaïque est un processus de transformation de l'énergie émise par le soleil, sous forme de photons, en énergie électrique à l'aide de composant semi-conducteur appelé cellule solaire.

L'effet photovoltaïque ne peut se produire que s'il existe une barrière de potentiel dans le semi- conducteur avant qu'il soit éclairé .Une telle barrière existe, par exemple, à l'interface entre deux volumes dopés différemment c'est à dire où l'on a introduit deux types différents d'impuretés à concentration différent, par exemple de type P-N. Si ce matériau est éclairé, les charges électriques, rendus mobiles par la lumière (l'effet photoélectrique), seront séparées par la barrière avec d'un côté les charges positives et de l'autre côté les charges négatives.

Parmi les matériaux semi conducteurs les plus utilisés on trouve, le silicium, le germanium, le sulfure de Gallium et l'arséniure de Gallium.

I-5- Les cellules solaires:

Une cellule solaire photovoltaïque est une plaquette de silicium (semi-conducteur), capable de convertir directement la lumière en électricité. Cet effet est appelé l'effet photovoltaïque.

Le courant obtenu est un courant continu et la valeur de la tension obtenue est de l'ordre de 0,6 V

La cellule solaire est la brique de base d'un système PV. Une cellule individuelle PV est généralement assez faible, produisant typiquement d'environ 1 ou 2 W de puissance. Pour renforcer la puissance de sortie des cellules photovoltaïques, elles doivent être reliées entre eux de grandes unités appelées modules. Les modules, à leur tour, peuvent être reliés pour former des unités plus grandes appelés panneaux qui peuvent être interconnectés pour produire plus de puissance. En connectant les cellules ou modules en série, la tension de sortie peut être augmentée. D'autre part, le courant de sortie peut atteindre des valeurs plus élevées en connectant les cellules ou les modules en parallèle. Voir la figure (I-2):

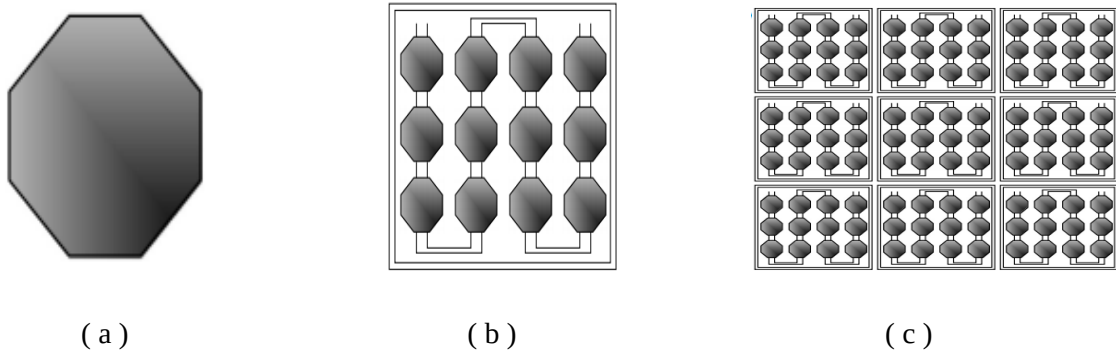


Figure I -2 (a) cellule PV, (b) module PV et (c) panneaux PV

I-5-1- Les différents types des cellules solaires :

Il existe différents types de cellules solaires (ou cellules photovoltaïques), et chaque type de cellules a un rendement et un coût qui lui est propre. Cependant, quel que soit leur type, leur rendement reste assez faible: de 8 à 23% de l'énergie qu'elles reçoivent.

Il existe trois principaux types de cellules à l'heure actuelle [7]:

- ✓ Les cellules monocristallines: Ce sont celles qui ont le meilleur rendement (12-16% ; jusqu'à 23% en laboratoire), mais aussi celle qui ont le coup le plus élevé, du fait d'une fabrication compliquée.
- ✓ Les cellules poly cristallines: Leur conception étant plus facile, leur coût de fabrication est moins important, cependant leur rendement est plus faible: 11% - 13% (18% en laboratoire).
- ✓ Les cellules amorphes: Elles ont un faible rendement (8% - 10% ; 13% en laboratoire), mais ne nécessitent que de très faibles épaisseurs de silicium et ont un coût peu élevé. Elles sont utilisées couramment dans de petits produits de consommation tel que des calculatrices solaires ou encore des montres.

I- 6- Caractéristique d'une cellule PV:

I - 6- 1- Caractéristique courant – tension:

La caractéristique courant-tension d'une photopile se met sous la forme mathématique :

$$I = I_{ph} - I_D - \frac{V + R_s I}{R_{sh}} \quad (I-1)$$

Où le courant de diode (D) est donné par l'équation [8] :

$$I_D = I_0 \left(\exp \left[\frac{q(V+R_s I)}{aKT} \right] - 1 \right) \quad (I-2)$$

Ou a est un facteur de dimension, K constant de Boltzmann ($K = 1.381.10^{-23} J/K$) et q la charge de l'électron ($q = 1.602.10^{-19} C$).

En substituant l'expression du courant I_D dans l'équation (I-1), le courant I devient :

$$I = I_{ph} - I_0 \left(\exp \left[\frac{q(V+R_s I)}{aKT} \right] - 1 \right) - \frac{V+R_s I}{R_{sh}} \quad (I-3)$$

Le courant de court circuit est pratiquement égal au photo-courant I_{ph} lui-même, d'après cette dernière équation, on peut déduire l'expression de la tension V :

$$v = -R_s I + \frac{aKT}{q} \ln \left[\frac{I_{ph} - \left(\frac{R_s}{R_{sh}} + 1 \right) I - \frac{V}{R_{sh}}}{I_0} + 1 \right] \quad (I-4)$$

Si l'on suppose que R_{sh} est infinie et R_s nulle, l'équation précédente devient :

$$V = \frac{aKT}{q} \ln \left[\frac{I_{ph} - I}{I_0} + 1 \right] \quad (I-5)$$

Si la charge est infinie (circuit ouvert), la cellule présentera à ces bornes une tension V_{co} , dont son expression est comme suit :

$$V_{co} = \frac{aKT}{q} \ln \left[\frac{I_{ph}}{I_0} + 1 \right] \quad (I-6)$$

Comme l'ordre de grandeur de $\left(\frac{I_{ph}}{I_0} \right)$ est d'environ $10^{10} : 10^{14}$ [8], l'équation précédente devient :

$$V_{co} = V_{th} \ln \left[\frac{I_{ph}}{I_0} \right] \quad (I-7)$$

$$\text{Avec} \quad V_{th} = \frac{aKT}{q} \quad (I-8)$$

Où V_{th} est la tension thermique.

La tension thermique V_{th} et le courant de saturation peuvent être données par [9]:

$$V_{th} = \frac{V_{op} + R_s I_{op} - V_{co}}{I} \ln \left(1 - \frac{I_{op}}{I_{cc}} \right) \quad (I-9)$$

$$I_0 = (I_x - I_{op}) \exp\left(-\frac{V_{op} + R_s I_{op}}{V_{sh}}\right) \quad (I-10)$$

Où

$$I_{cc} (module) = N_p \cdot I_{cc} (cellule) : \text{Le courant de court-circuit.}$$

$$I_{op} (module) = N_p \cdot I_{op} (cellule) : \text{Le courant optimal.}$$

$$V_{op} (module) = N_s \cdot I_{co} (cellule) : \text{La tension de circuit ouvert.}$$

$$V_{op} (module) = N_s \cdot I_{op} (cellule) : \text{La tension optimale.}$$

$$R_s (module) = \frac{N_s}{N_p} \cdot R_s (cellule) : \text{La résistance série.}$$

N_s et N_p sont respectivement le nombre de modules en séries et en parallèles .La courbe I-V est essentiellement affectée par la variation de deux entrées : l'éclairement et la température de Générateur PV. L'adaptation de l'équation (I-11) pour différents niveaux de l'éclairement et la température solaires peut être manipulée par les équations suivantes [7] :

$$I = I_{ph} - I_{01} \left\{ \exp \left[\frac{[V + R_s I]}{\alpha \cdot V_{th}} \right] - 1 \right\} - I_{02} \left\{ \exp \left[\frac{[V + R_s I]}{\beta \cdot V_{th}} \right] - 1 \right\} - \frac{V + R_s I}{R_{sh}} \quad (I-11)$$

$$\Delta t = T - T_{ref} \quad (I-12)$$

$$\Delta I = \alpha \left(\frac{E}{E_{ref}} \right) \Delta T + \left(\frac{E}{E_{ref}} - 1 \right) I_{cc} \quad (I-13)$$

$$\Delta V = -\beta \Delta T - R_s \Delta I \quad (I-14)$$

$$V = V_{ref} + \Delta V \quad (I-15)$$

$$I = I_{ref} + \Delta I \quad (I-16)$$

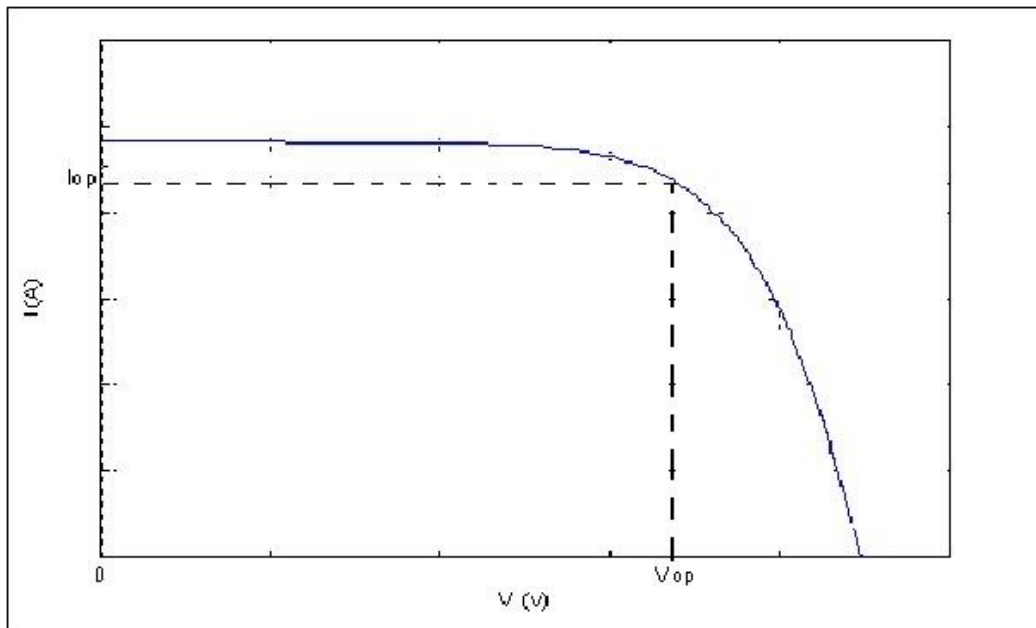


Figure I -3 Caractéristique typique I-V d'une cellule solaire

I - 6- 2- Caractéristique puissance – tension:

La puissance maximale débitée par la cellule est donnée par le produit entre la tension V_{op} et le courant I_{op} : $P_{max} = I_{op} \cdot V_{op}$.

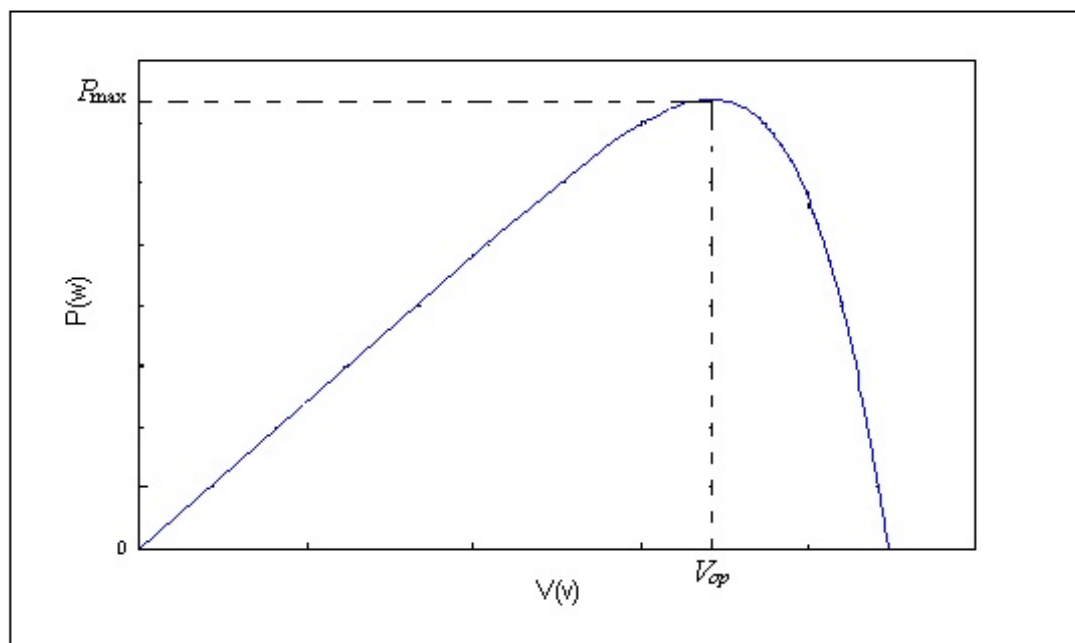


Figure I -4 Caractéristique typique P-V d'une cellule solaire

I-7- Le principe de fonctionnement d'une cellule PV:

Une cellule photovoltaïque est assimilable à une diode photo -sensible, son fonctionnement est basé sur les propriétés des matériaux semi conducteurs. La cellule photovoltaïque permet la conversion directe de l'énergie lumineuse en énergie électrique. Son principe de fonctionnement repose sur l'effet photovoltaïque (Bequerelle 1889). Une cellule est constituée de deux couches minces d'un semi conducteur. Ces deux couches sont dopées différemment. Pour la couche N, c'est un apport d'électrons périphériques et pour la couche P c'est un déficit d'électrons. Les deux couches présentent ainsi une différence de potentiel. L'énergie des photons lumineux captés par les électrons périphériques (couche N), leur permet de franchir la barrière de potentiel et d'engendrer un courant électrique continu. Pour effectuer la collecte de ce courant, des électrodes sont déposées par sérigraphie sur les deux couches de semi-conducteur figure (I-5). L'électrode supérieure est une grille permettant le passage des rayons lumineux. Une couche antireflet est ensuite déposée sur cette électrode afin d'accroître la quantité de lumière absorbée [1, 2, 3]

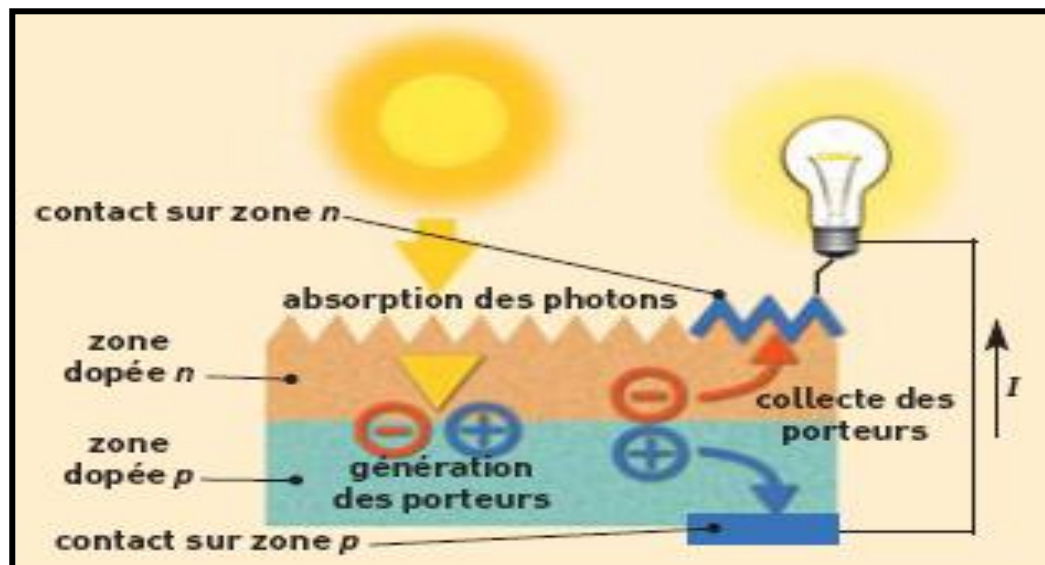


Figure I -5 Schéma d'une cellule élémentaire

I-8- Les composants d'un système photovoltaïque :

Il existe plusieurs composants d'un système photovoltaïque et cela dépendent de l'application considérée soit pour habitation isolée ou proximité d'un réseau, utilisation de batterie ou « au fil du soleil », convertisseurs de puissance :

- Les cellules solaires
- Les batteries
- Les régulateurs de charge
- Les convertisseurs
- Autres composants

I-8-1- Les cellules solaires:

Les cellules solaires photovoltaïques sont des semi-conducteurs capables de convertir directement la lumière en électricité. Les cellules usuelles sont rondes ou carrées et elles sont constituées essentiellement du silicium mono ou poly-cristallin (plus de 90% de la production des photopiles) ou du silicium amorphe . [3]

I-8-2- Les batteries :

Le stockage d'énergie dans les systèmes photovoltaïques autonomes est en général assuré par les batteries. Celles-ci sont des éléments essentiels au bon fonctionnement des systèmes autonomes.

On utilisera des batteries dans le cas où la demande de puissance est décalée par rapport au soleil. Le choix du type de batterie se fait d'après une approximation de la puissance moyenne journalière et du temps de stockage nécessaire.

Il existe plusieurs types des batteries , on citera les suivantes :

- ✓ Batterie au plomb ;
- ✓ Batterie au nickel (NiCd, NiMH, Ni-Zn) ;
- ✓ Batterie au lithium (Li-métal, polymère, ion...) ;
- ✓ Systèmes à oxydoréduction ;
- ✓ Super-condensateurs ;
- ✓ Volant d'inertie ;
- ✓ Air comprimé ;
- ✓ Batterie zinc-air ;

I-8-3- Les régulateurs à recherche de point de puissance maximale (MPPT) :

Ces régulateurs utilisent un circuit électronique spécial permettant de soutirer en permanence du champ de capteurs sa puissance maximale.

I-8-3-1- Principe du MPPT:

Les régulateurs MPPT sont conçus pour extraire des panneaux solaires la puissance maximale disponible. Cela permet donc de récupérer un maximum d'énergie quels que soient la température et l'ensoleillement. Les tensions et courants sont mesurés en permanence de manière à déduire la puissance extraite du panneau. La puissance ainsi obtenue est comparée avec la puissance de l'instant précédent. La tension aux bornes des panneaux est ensuite augmentée ou réduite suivant le résultat de la comparaison.

I-8-4- Les convertisseurs:

Suivant l'application, on devra souvent utiliser un convertisseur pour adapter la puissance générée à la charge.

Il existe principalement les convertisseurs DC/DC et les convertisseurs DC/AC :

I-8-4-1- Les convertisseurs DC/AC (Onduleurs) :

Ce sont des onduleurs. Ils peuvent être utilisés pour alimenter une charge isolée mais aussi pour raccorder un générateur photovoltaïque au réseau. La déformation de l'onde due aux commutations est susceptible de produire des perturbations plus ou moins gênantes pour les cellules photovoltaïques. Les onduleurs peuvent être classés en générateurs produisant soit une onde sinusoïdale, soit une onde carrée ou une onde dite pseudo sinusoïdale. Le choix de l'onduleur dépendra des appareils qu'il devra faire fonctionner.

I-8-4-2- Les convertisseurs DC/DC (Hacheurs) :

Les hacheurs sont des convertisseurs du type continu-continu permettant de contrôler la puissance électrique dans des circuits fonctionnant en courant continu avec une très grande souplesse et un rendement élevé [7].

Le hacheur se compose de condensateurs, d'inductance et de commutateurs. Dans le cas idéal, tous ces dispositifs ne consomment aucune puissance active, c'est la raison pour laquelle on a de bons rendements dans les hacheurs [7].

La technique du découpage, apparue environ dans les années soixante, a apporté une solution au problème du mauvais rendement et de l'encombrement des alimentations séries.

Dans une alimentation à découpage figure (I-6), 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 [7].:

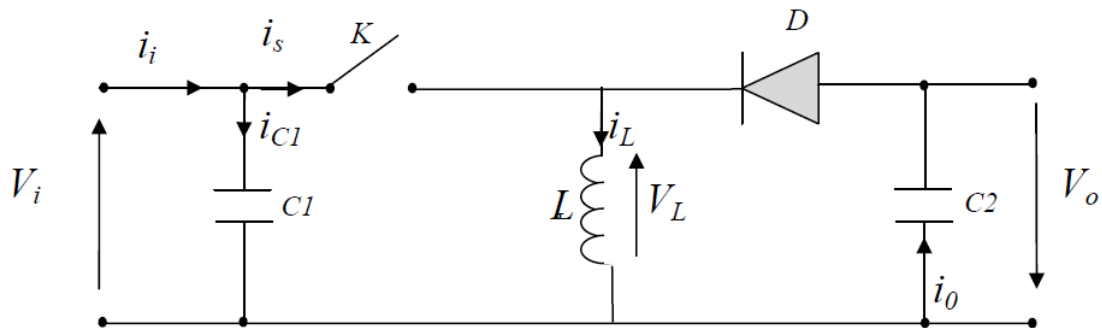


Figure I-6 : Schéma de principe d'un type d'alimentation à découpage

D'un point de vue circuit, le hacheur apparaît comme un quadripôle figure (I-7), jouant le rôle d'organe de liaison entre deux parties d'un réseau. On peut le considérer comme un transformateur de grandeurs électriques continues [7].

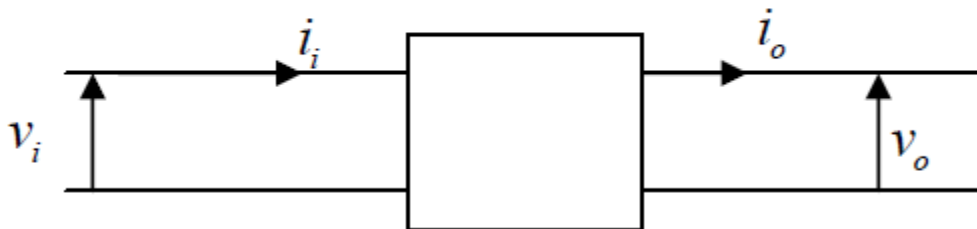


Figure I-7: Schéma d'un quadripôle électrique

La régulation de la tension de sortie à un niveau constant est réalisée par une action sur le "rapport cyclique", défini comme la fraction de la période de découpage où l'interrupteur est passant figure (I-8). L'interrupteur est un dispositif semi-conducteur en mode tout-rien (bloqué – saturé), habituellement un transistor MOSFET. Si le

dispositif semi-conducteur est bloqué, son courant est zéro et par conséquent sa dissipation de puissance est nulle. Si le dispositif est dans l'état saturé la chute de tension à ses bornes sera presque zéro et par conséquent la puissance perdue sera très petite [7].

Pendant le fonctionnement du hacheur, le transistor sera commuté à une fréquence constante f_s avec un temps de fermeture = $dT(s)$, et un temps d'ouverture = $(1-d)T(s)$.

ou :

✚ $T(s)$: est la période de commutation qui est égale à $\frac{1}{f_s}$.

✚ d : le rapport cyclique du commutateur ($d \in [0, 1]$).

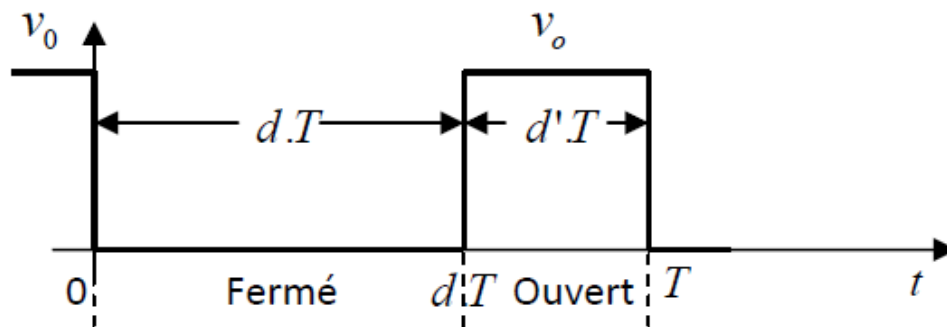


Figure I-8 périodes fermeture et ouverture d'un commutateur

Il existe plusieurs types des convertisseurs DC-DC. Parmi les quels, on présente le principe des trois types des convertisseurs à découpage (dévolteur, survolteur et mixte), utilisés fréquemment dans les systèmes photovoltaïques pour générer les tensions et les courants souhaités ainsi que pour l'adaptation des panneaux solaires avec les différentes charges [6, 7].

I-8-4-2- 1-Hacheur dévolteur

Le convertisseur dévolteur peut être souvent trouvé dans la littérature sous le nom de hacheur buck ou hacheur série. La figure (I-9) présente le schéma de principe du convertisseur dévolteur [7]. Son application typique est de convertir sa tension d'entrée en une tension de sortie inférieure, où le rapport de conversion $M = \frac{V_o}{V_i}$ change avec le rapport cyclique du commutateur.

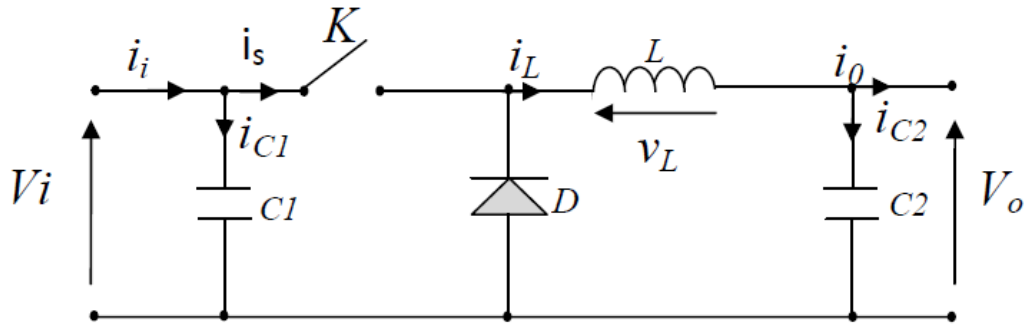


Figure I-9 Schéma de principe d'un convertisseur dévolteur (buck)

I-8-4-2- 2-Hacheur survolteur

Ce dernier est un convertisseur survolteur, connu aussi sous le nom de « boost » ou hacheur parallèle, son schéma de principe de base est celui de la figure (I-10). Son application typique est de convertir sa tension d'entrée en une tension de sortie supérieure [7].

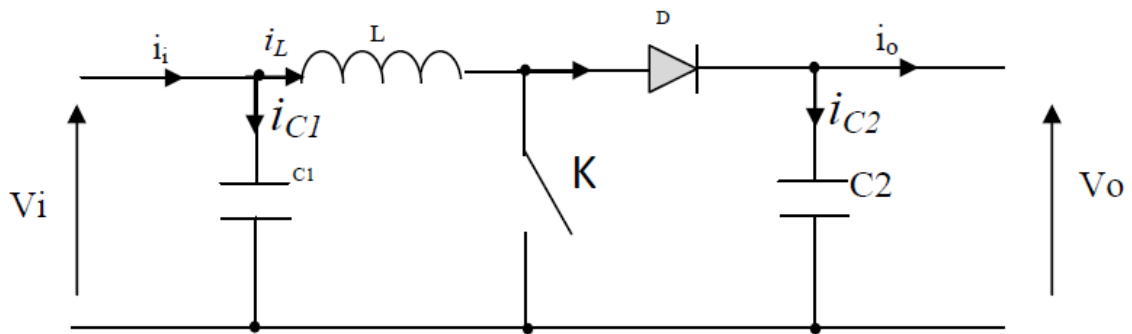


Figure I-10 Schéma de principe d'un convertisseur survolteur (Boost)

I-8-4-2- 3 - Hacheur dévolteur-survolteur

Le convertisseur dévolteur-survolteur combine les propriétés des deux convertisseurs précédents, il est utilisé comme un transformateur idéal de n'importe quelle tension d'entrée pour n'importe quelle tension de sortie désirée; son schéma de base est illustré par la figure (I-11) [7] :

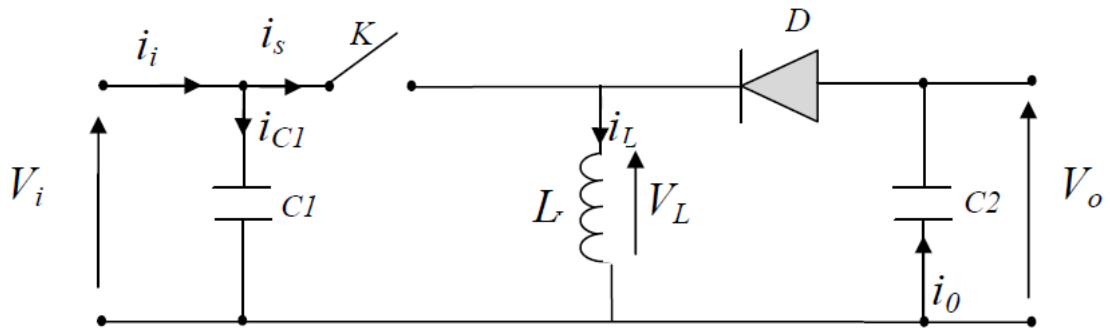


Figure I-11 Convertisseur dévolteur-survolteur

I-8-5- Les autres composants :

Les derniers éléments indispensables au bon fonctionnement d'un système photovoltaïque autonome sont les protections contre la foudre, les disjoncteurs et les fusibles.

Comme les panneaux solaires sont des équipements généralement coûteux, ils doivent être protégés pour éviter toute dégradation. Les dangers sont multiples :

- ✓ Perturbations induites par les commutations des convertisseurs de puissance. Dans ce cas, on peut introduire des filtres de puissance pour éliminer les harmoniques.
- ✓ Fonctionnement en récepteur : les panneaux se détériorent rapidement quand ils absorbent de la puissance. On peut utiliser des diodes pour empêcher le courant de circuler dans le mauvais sens.
- ✓ La Foudre: les protections contre la foudre sont indispensables si l'on veut garantir une alimentation fiable en électricité. Pour réaliser une protection il faut respecter trois principes:
 - conduire le courant de foudre vers la terre par le chemin le plus directe.
 - minimiser les surfaces des boucles de masse.
 - limiter l'onde de surtension par des parafoudres [10].

I-9- Les différents types des systèmes photovoltaïques:

Il existe deux types de structures de système photovoltaïques :

1. Les systèmes à connexion directe au réseau Cette installation est constituée d'un générateur photovoltaïque qui est connecté à l'aide d'un onduleur au réseau électrique. Il existe dans la littérature de nombreux exemples [9].
2. Le système à bus continu intermédiaire. Le générateur photovoltaïque est connecté à un bus continu par l'intermédiaire d'un convertisseur continu continu . Un onduleur délivre une tension modulée. Celle-ci est filtrée pour réduire le taux d'harmonique (THD) On obtient alors en sortie de ce dispositif une tension utilisable pouvant être injectée dans le réseau [8].

I-9-1- Système PV connecté directement au réseau :

I-9-1-1- Structure à convertisseur unique :

Le dispositif présenté à la Figure(I-12) est le plus simple, car il comporte le moins de composants possible. On associe plusieurs modules photovoltaïques en série pour obtenir une tension continue suffisamment grande. Cette solution est une alternative à un hacheur élévateur de tension. La tension continue obtenue alimente directement un onduleur central, qui fournit la tension sinusoïdale désirée (230 V). Il pourrait être avantageux d'insérer un transformateur pour isoler le système photovoltaïque du réseau. L'inconvénient majeur de ce dispositif est l'arrêt total et immédiat de la production d'énergie lors d'un problème survenant en amont de l'onduleur. De plus le contrôle du point maximal de puissance est approximatif car toutes les cellules ne délivrent pas le même courant en raison de leurs différences de structure interne et d'ensoleillement.

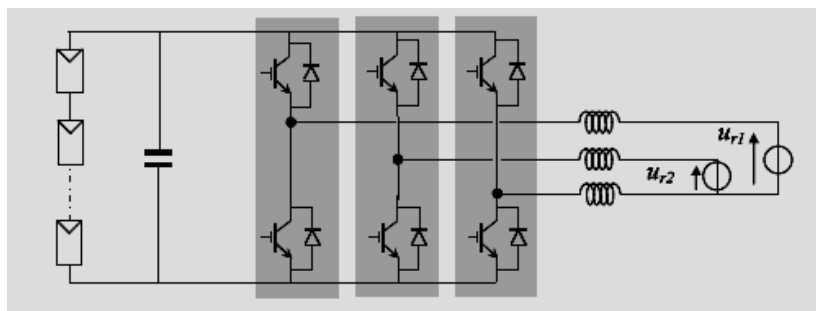


Figure I -12 Plusieurs modules PV en série vers un seul onduleur

I-9-1-2- Structure avec bus à basse tension alternative :

La Figure(I-13) montre un onduleur associé à un circuit de commande qui est directement connecté au module photovoltaïque. La tension en sortie de ce dernier est transformée en une tension alternative de fréquence 50 Hz. Cette tension est transportée grâce à un bus alternatif (20 V - 50 Hz, exemple du schéma) vers un transformateur central qui l'élève au niveau désiré. Le faible niveau de tension dans le bus est l'avantage majeur de ce type de montage, puisqu'il assure la sécurité du personnel. Cependant, la distance entre le transformateur et le module doit être faible à cause du courant important qui traverse les câbles et qui génère des pertes Joules. Il y a un compromis à faire au niveau de la tension du bus alternatif. D'une part, il faut que sa valeur crête soit inférieure à celle délivrée par le module (même avec un faible ensoleillement). D'autre part, une tension faible dans ce bus diminue le rendement.

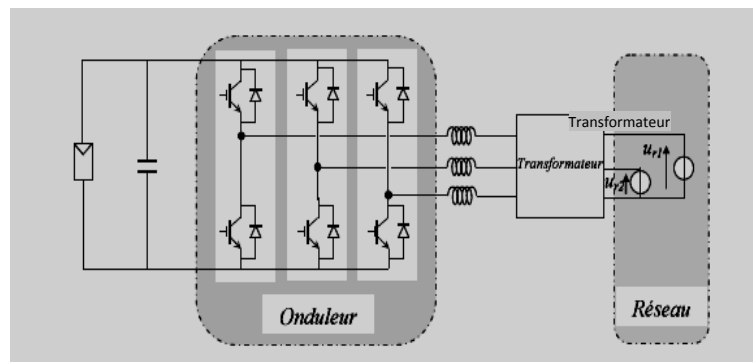


Figure I -13 Bus à basse tension alternative

I-9-2- Système à bus continu intermédiaire :

I-9-2-1- Structure avec convertisseur forward :

La Figure (I-14) présente un convertisseur forward qui est capable d'augmenter la tension en sortie du module photovoltaïque jusqu'à 350 V (tension désirée). L'utilisation d'un transformateur pour la connexion au réseau n'est donc plus nécessaire, la conversion continu-alternatif se fait de façon relativement simple, grâce à un onduleur centralisé. Les inconvénients majeurs de ce montage sont:

- La capacité doit être relativement importante, à cause des ondulations du courant en sortie du module.

- Le bus continu supportera un signal en créneaux qui induira une grande émission d'ondes électromagnétiques et éventuellement des pertes de fuite; l'induction du transformateur compris dans le convertisseur générera des pertes de fuite,
- La tension élevée qui traverse le bus continu réduit la sécurité du personnel d'entretien.

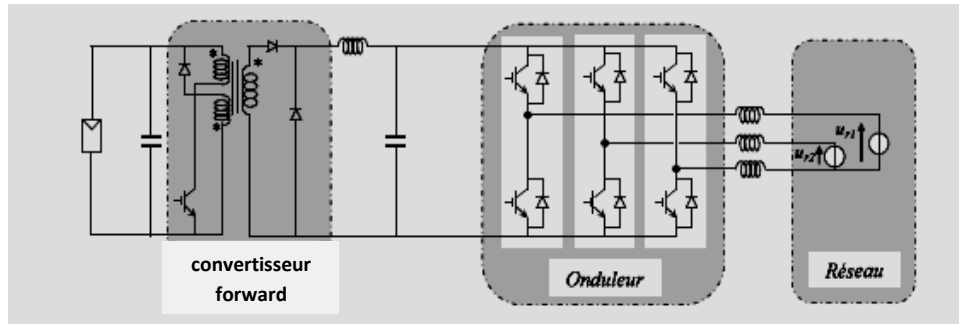


Figure I -14 Convertisseur de type forward alimentant le bus continu

I-9-2-2- Structure avec un convertisseur de type fly-back :

La Figure (I-15) montre une structure à base d'un convertisseur de type fly-back qui élève la tension de sortie du module photovoltaïque au niveau de tension désiré. La caractéristique principale du fly-back se situe au niveau du transformateur qui agit comme l'inducteur principal et qui assure l'isolation galvanique. Le hacheur est contrôlé pour obtenir un maximum d'énergie du module photovoltaïque et l'onduleur assure une tension constante V_{ac1} et le transfert de puissance vers le réseau. L'inconvénient du transformateur est qu'il génère des pertes et qu'il augmente le coût de l'installation.

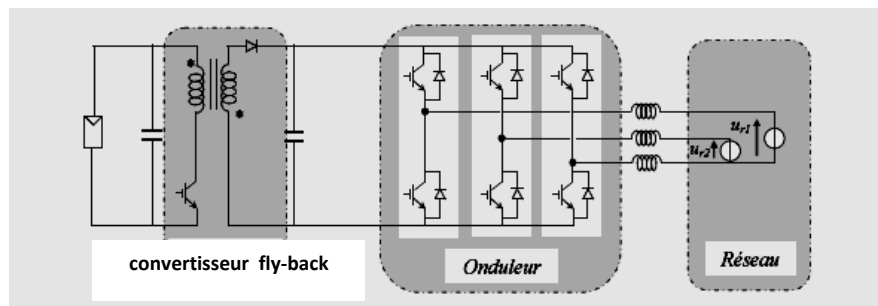


Figure I -15 Structure avec un convertisseur de type fly-back

I-9-2-3- Structure avec hacheur et onduleur :

Figure (I-16) représente un hacheur qui élève la tension en sortie du module photovoltaïque en une tension de 100 V délivrée sur le bus continu. Avec le hacheur, il est difficile d'élèver la tension de sortie des modules plus de 4 à 5 fois pour obtenir une tension continue suffisamment grande, en raison de la résistance de l'inductance. On adjoint un onduleur pour avoir une sortie sinusoïdale, puis un transformateur pour éléver cette tension au niveau désiré (selon le réseau) et pour assurer l'isolation entre la partie production et la partie utilisation . L'avantage de ce système est que des batteries peuvent être facilement connectées au bus continu pour obtenir un système autonome. Le courant d'entrée est relativement lisse , c'est pour cela que la capacité peut être faible.

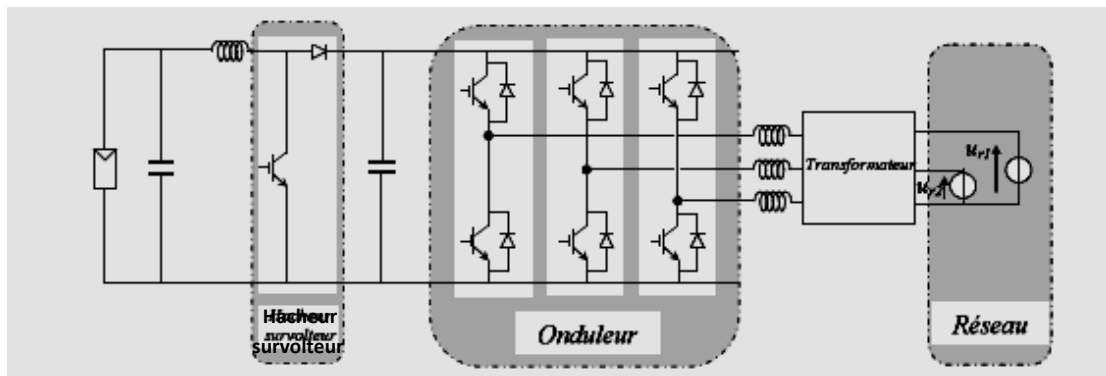


Figure I -16 Hacheur élévateur de tension avec onduleur centralisé

I-10- Avantages et inconvénients des systèmes photovoltaïques :

I-10-1- Avantages :

- D'abord une haute fiabilité. L'installation ne comporte pas de pièces mobiles qui la rend particulièrement appropriée aux régions isolées. C'est la raison de son utilisation sur les engins spatiaux.
- Ensuite le caractère modulaire des panneaux photovoltaïques permet un montage simple et adaptable à des besoins énergétiques divers. Les systèmes peuvent être dimensionnés pour des applications de puissances allant du mille watt au Méga Watt.
- Le coût de fonctionnement est très faible vu les entretiens réduits et il ne nécessite ni combustible, ni son transport, ni personnel hautement spécialisé.

- La technologie photovoltaïque présente des qualités sur le plan écologique car le produit fini est non polluant, silencieux et n'entraîne aucune perturbation du milieu, si ce n'est par l'occupation de l'espace pour les installations de grandes dimensions.

I-10-1- Inconvenient :

- La fabrication du module photovoltaïque relève de la haute technologie et requiert des investissements d'un coût élevé.
- Le rendement réel de conversion d'un module est faible, de l'ordre de 10-15 % avec une limite théorique pour une cellule de 28%. Les générateurs photovoltaïques ne sont compétitifs par rapport aux générateurs diesel que pour des faibles demandes d'énergie en régions isolées.
- Lorsque le stockage de l'énergie électrique sous forme chimique (batterie) est nécessaire, le coût du générateur est accru.
- Le stockage de l'énergie électrique pose encore de nombreux problèmes.

I-11- Conclusion :

Dans ce chapitre on a présenté les différents composants d'un système photovoltaïque. On a étudié le principe de l'effet photovoltaïque, la cellule PV et ses paramètres. En suite on a fait un rappel sur les systèmes PV et leurs performances, et on a présenté une étude sur les convertisseurs DC-DC (hacheurs) comme le convertisseur dévolteur, convertisseur survolteur et convertisseur dévolteur-survolteur et leurs commande MPPT pour chercher le point de la puissance maximale du générateur photovoltaïque et on a vu également les différentes structures et configurations de la connexion du système PV au réseau électrique

Chapitre II

Modélisation et simulation d'une cellule(module) photovoltaïque

II-1- Introduction:

L'énergie solaire photovoltaïque (PV), qui est la conversion directe de la lumière en électricité grâce à des cellules solaires, représente une alternative intéressante et bien adaptée à des besoins limités. Malgré sa facilité de mise en œuvre, son faible impact environnemental et le peu d'entretien qu'il nécessite, un système photovoltaïque n'est plus concurrentiel lorsque la demande augmente. Ainsi, une étude assez rigoureuse est nécessaire pour faire le meilleur choix le plus performant avec moindre coût possible.

La performance d'un système PV dépend fortement des conditions météorologiques, telle que le rayonnement solaire, la température, la vitesse du vent et l'éclairement. Pour fournir l'énergie continuellement durant toute l'année, un système PV doit être correctement dimensionné. Cependant les informations fournies par les constructeurs d'équipements photovoltaïques ne permettent que de dimensionner approximativement le système [9].

La modélisation mathématique des cellules solaires est indispensable pour toute opération d'optimisation du rendement ou de diagnostic du générateur photovoltaïque. Le module photovoltaïque est représenté généralement par un circuit équivalent dont les paramètres sont calculés expérimentalement en utilisant la caractéristique courant-tension. Ces paramètres ne sont pas généralement des quantités mesurables ou incluses dans les données de la fabrication. En conséquence, ils doivent être déterminés à partir des systèmes des équations V-I à divers points de fonctionnement donnés par le constructeur ou issues de la mesure directe sur le module.

La modélisation de ces dernières s'impose comme une étape cruciale et a conduit à une diversification dans les modèles proposés par les différents chercheurs. Leurs différences se situent principalement dans le nombre de diodes, la résistance shunt finie ou infinie, le facteur d'idéalité constant ou non, ainsi que les méthodes numériques utilisées pour la détermination des différents paramètres inconnus

On rencontre dans la littérature plusieurs modèles dont les précisions restent tributaires de la modélisation mathématiques des différents phénomènes physiques intrinsèques intervenant dans le processus de production d'électricité. Dans la plupart des travaux de la littérature, on trouve principalement le modèle équivalent à quatre paramètres basé sur la modélisation mathématique de la courbe tension -courant [9].

II-2- Modélisation des cellules photovoltaïques:

La modélisation des cellules photovoltaïques passe nécessairement par un choix judicieux des circuits électriques équivalents.

Pour développer un circuit équivalent précis pour une cellule PV, il est nécessaire de comprendre la configuration physique des éléments de la cellule aussi bien que les caractéristiques électriques de chaque élément, en prenant plus ou moins de détails. Selon cette philosophie, plusieurs modèles mathématiques sont développés pour représenter un comportement fortement non linéaire, résultant de celui des jonctions semi-conductrices qui sont à la base de leurs réalisations. Ces modèles se différencient entre eux par les procédures mathématiques et le nombre de paramètres intervenant dans le calcul de la tension et du courant du module photovoltaïque

On présentera deux modèles du GPV à savoir [10] :

- Modèle à une diode (ou exponentielle simple),
- Modèle à deux diodes (ou double exponentielle).

Tous les deux sont basés sur l'équation de diode bien connue de Shockley.

Nous avons étudié un module **KC200GT** , présenté sur la figure (II-1).



Figure II-1 Module KC200GT

Le tableau (II-1) donne les caractéristiques du module KC200GT sous les conditions standards (1000 W/m², Température de cellule: 25 °C).

Grandeurs	valeur
Puissance maximale	200 W
Tension au MPP (V_{mp})	26.3 V
Courant au MPP (I_{mp})	7.61 A
Courant de court-circuit (I_{cc})	8.21 A
Tension de circuit ouvert (V_{co})	32.9 V
Coefficient du rendement de la température	0.0049 %
Facteur de forme (FF)	0.771
Nombre de cellules en série (N_s)	54
Nombre de cellules en parallèle (N_p)	4
Coefficient de sensibilité de la tension à la température	-0.123 V/K
Coefficient de sensibilité de l'intensité à la température	+0,0032 A/K

Tableau II-1: Caractéristiques du module PV KC200GT .

Les caractéristiques d'une cellule photovoltaïque seront décrites comme suit:

- Le courant de court-circuit (I_{cc}) qui fournit chaque cellule est :

$$I_{cc}(\text{cellule}) = \frac{I_{cc}}{N_p} \quad (\text{II-1})$$

- La tension du circuit ouvert (V_{co}) de chaque cellule est:

$$V_{co}(\text{cellule}) = \frac{V_{co}}{N_s} \quad (\text{II-2})$$

- Le courant maximal de chaque cellule est :

$$I_{mp}(\text{cellule}) = \frac{I_{mp}}{N_p} \quad (\text{II-3})$$

- La tension maximale de chaque cellule est :

$$V_{mp}(\text{cellule}) = \frac{V_{mp}}{N_s} \quad (\text{II-4})$$

- La puissance maximale de chaque cellule est:

$$P_{\max}(\text{cellule}) = I_{mp}(\text{cellule}) \cdot V_{mp}(\text{cellule}) \quad (\text{II-5})$$

- La résistance série de chaque cellule est :

$$R_{s(cellule)} = \frac{N_p}{N_s} \cdot R_{s(module)} \quad (II-6)$$

- La résistance shunt de chaque cellule est :

$$R_{sh(cellule)} = \frac{N_p}{N_s} \cdot R_{sh(module)} \quad (II-7)$$

II-3- Modèle à une diode:

Le fonctionnement d'un module photovoltaïque est décrit par le modèle « standard » à une diode établi par Shockley pour une seule cellule PV. Il est généralisé à un module PV en le considérant comme un ensemble de cellules identiques branchées en série ou en parallèle [11].

Une description plus simple est obtenue à partir du modèle à une exponentielle. Ce modèle comporte une diode de moins par rapport au modèle à deux exponentielles, ce qui implique que ce modèle comporte dans l'équation de la caractéristique courant-tension une exponentielle de moins [10], [11].

II-3-1- Modèle à trois paramètres (L3P) :

Une cellule photovoltaïque peut être décrite de manière simple comme une source idéale de courant qui produit un courant I_{ph} équation (II-20) proportionnel à la puissance lumineuse incidente, en parallèle avec une diode qui correspond à l'aire de transition P-N de la cellule PV. Il est connu aussi sous le nom L3P (Lumped, 1 Mechanism model with 3 Paramètres) [14]. Pour un générateur PV idéal, la tension aux bornes de la résistance est égale à celle aux bornes de la diode.

Le schéma électrique équivalent de la cellule PV pour ce modèle est représenté par la figure (II-2)

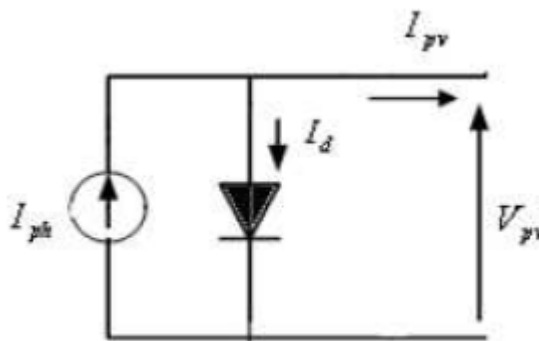


Figure II-2 Schéma équivalent du modèle à une exponentielle, L3P

Dans le cas de cellules solaires au silicium monocristallin, on considère l'hypothèse d'une cellule idéale. Le facteur d'idéalité est alors considéré comme égal à

l'unité .L'équation caractéristique est déduite d'une manière directe à partir de la loi de Kirchhoff:

$$I_{pv} = I_{ph} - I_d \quad (\text{II-8})$$

La diode étant un élément non linéaire, sa caractéristique I-V est donnée par la relation[7-8] :

$$I_d = I_s \left(\exp\left(\frac{V_d}{V_t}\right) - 1 \right) \quad (\text{II-9})$$

Le courant débité équivaut à :

$$I_{PV} = I_{ph} - I_s \left(\exp\left(\frac{V_{PV}}{V_t \cdot n}\right) - 1 \right) \quad (\text{II-10})$$

Le courant de saturation de la diode est supposé variable avec la température selon l'expression [7-8]:

$$I_s = I_{s(ref)} \cdot \left(\frac{T_c}{T_{c(ref)}} \right)^3 \exp \left(\left(\frac{q \cdot E_{gap}}{n \cdot k} \right) \cdot \left(\frac{1}{T_{c(ref)}} \right) - \left(\frac{1}{T_c} \right) \right) \quad (\text{II-11})$$

II-3-2- Modèle à quatre paramètres (L4P) :

Le modèle à quatre paramètres est un modèle largement utilisé, il a été étudié par Townsend [16]. Ce modèle traite la cellule photovoltaïque comme une source de courant, dépendante de l'éclairement, connectée en parallèle avec une diode et en série avec une résistance série R_s

Les quatre paramètres apparaissant dans l'équation de la caractéristique $I(V)$ sont le courants photonique I_{ph} équation (II-20), la résistance série R_s , et deux caractéristiques de la diode I_s équation (II-25) , et n . Ces paramètres ne sont pas des quantités mesurables et ne sont pas généralement inclus dans les données des fabricants. Par conséquent, ils doivent être déterminés à partir des systèmes des équations $I(V)$ pour différents points de fonctionnement (donnés par les fabricants) [16].

Le schéma électrique équivalent de la cellule PV pour ce modèle est représenté sur la figure (II-3) :

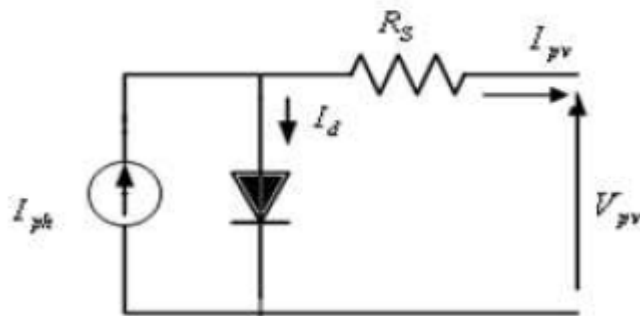


Figure II-3 Schéma équivalent du modèle à une exponentielle, L4P

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

$$I_{pv} = I_{ph} - I_s \left(\exp\left(\frac{V_{pv} + R_s I_{pv}}{V_t n}\right) - 1 \right) \quad (\text{II-12})$$

II-3-3- Modèle à cinq paramètres (L5P) :

La cellule photovoltaïque est représentée par le circuit électrique de la figure (II-4) qui se compose d'une source de courant modélisant le flux lumineux, les pertes sont modélisées par deux résistances, une résistance shunt et une résistance série. Le modèle fait donc intervenir les cinq paramètres inconnus suivants: n , I_{ph} équation (II-13), R_s , R_{sh} et I_s équation (II-25). Il est connu sous le nom L5P (Lumped, 1 Mechanism model with 5 Paramètres).

L'équation caractéristique est déduite d'une manière directe à partir de la loi de Kirchhoff:

$$I_{pv} = I_{ph} - I_d - I_{sh} \quad (\text{II-13})$$

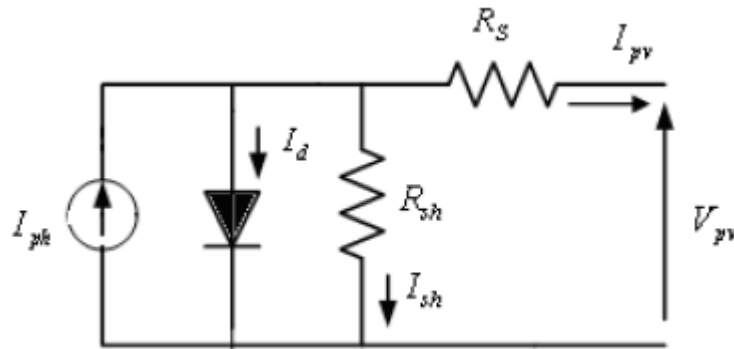


Figure II-4 Schéma équivalent du modèle à une exponentielle, L5P

Le courant électrique produit par la cellule est alors donné par l'expression suivante [7]:

$$I_{pv} = I_{ph} - I_s \left(\exp\left(\frac{V_{pv} + R_s I_{pv}}{V_t n}\right) - 1 \right) - \left(\frac{V_{pv} + R_s I_{pv}}{R_{sh}} \right) \quad (\text{II-14})$$

II-4- Modèle à deux diodes:

II-4-1- Modèle à sept paramètres (2M7P) :

Il est connu aussi par le nom 2M7P (Lumped, 2 Mechanism model with 7 Paramètres) . Le fonctionnement d'une cellule solaire peut être modélisé en considérant le schéma électrique équivalent ci-dessous figure (II-5). Il consiste en la description mathématique d'un circuit réalisé par la connexion en parallèle de deux diodes ayant les courants de saturation I_{s1} et I_{s2} , les facteurs de diode n_1 et n_2 une source de courant produisant un photo-courant I_{ph} , qui dépend de l'éclairement solaire

La résistance série R_s rend compte de la résistivité du matériau, de celle des électrodes et du contact semi-conducteur-Métal. Sa valeur est déterminée par l'inverse de la pente de la caractéristique $I(V)$ pour une tension V égale à V_{co} . Ce terme doit idéalement être le plus faible possible pour limiter son influence sur le courant de la cellule. Ce ci peut être réalisé en optimisant le contact métal/semi-conducteur, et en diminuant la résistivité du matériau utilisé. Cependant, un dopage trop élevé entraîne une augmentation de la recombinaison des porteurs.

La résistance parallèle (shunt) ou de court-circuit R_{sh} traduit quant à elle, la présence d'un courant de fuite à travers l'émetteur, causé par un défaut. Ceci est le cas lorsque la diffusion des contacts métalliques à haute température perce l'émetteur. Elle peut aussi être due à un court-circuit sur les bords de la cellule. Cette valeur devra être la plus élevée possible [12].

Le modèle à deux-diodes est représenté par une équation implicite du courant qui ne peut être résolue qu'à l'aide des méthodes itératives.

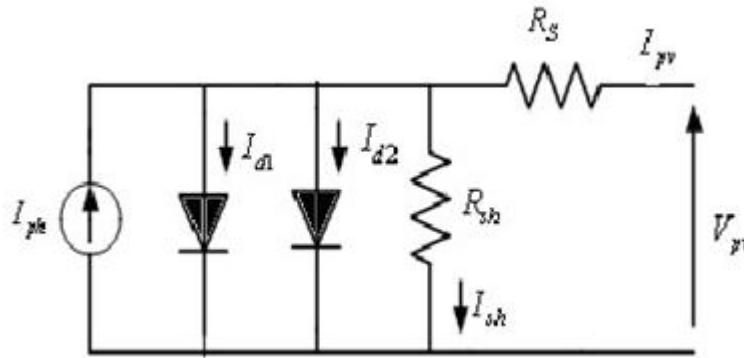


Figure II-5 Schéma équivalent du modèle à deux exponentielles, 2M7P

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

$$I_{pv} = I_{ph} - I_{d1} - I_{d2} - I_{sh} \quad (\text{II-15})$$

Avec:

I_{ph} : Courant photonique

I_{d1} : Courant de la diode 1

I_{d2} : Courant de la diode 2

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

$$I_{d1} = I_{s1} \left(\exp\left(\frac{V_d}{n_1 V_t}\right) - 1 \right) \quad (\text{II-16})$$

$$I_{d2} = I_{s2} \left(\exp \left(\frac{V_d}{n_2 V_t} \right) - 1 \right) \quad (\text{II-17})$$

$$I_{sh} = \frac{V_{pv} + I_{pv} \cdot R_s}{R_{sh}} \quad (\text{II-18})$$

Avec :

$V_t = \frac{KT_c}{q}$: Représentant le potentielle thermodynamique

T_c : est la température absolue

q : la constante de charge d'électron: $1.602 \cdot 10^{-19} C$

K : la constante de Boltzmann : $1.38 \cdot 10^{-23} J/K$

I_{sh} : est le courant de la résistance de shunt

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

$$I_{pv} = I_{ph} - I_{s1} \left(\exp \left(\frac{V_{pv} + I_{pv} \cdot R_s}{V_t \cdot n_1} \right) - 1 \right) - I_{s2} \left(\exp \left(\frac{V_{pv} + I_{pv} \cdot R_s}{V_t \cdot n_2} \right) - 1 \right) - \left(\frac{V_{pv} + I_{pv} \cdot R_s}{R_{sh}} \right) \quad (\text{II-19})$$

Le courant photonique est lié à l'éclairement, à la température et au courant photonique mesuré aux conditions de référence est donné par:

$$I_{ph} = \frac{G}{G_{ref}} \left(I_{ph(ref)} - \mu_{cc} (T_c - T_{c(ref)}) \right) \quad (\text{II-20})$$

Avec

$I_{ph(ref)}$: Le courant photonique sous condition de référence [A]

μ_{cc} : Coefficient de sensibilité de l'intensité à la température [A/K]

G, G_{ref} : L'éclairement réels et à la condition de référence [W/m²]

$T_c, T_{c(ref)}$: La température de cellule, réelle et à la condition de référence

Les courants de saturation I_{s1} et I_{s2} sont donnés par les relations suivantes [12]:

$$I_{s1} = C_{s1} \cdot T_c^3 \cdot \exp \left(\frac{-E_{gap} \cdot q}{n_1 \cdot T \cdot k} \right) \quad (\text{II-21})$$

$$I_{s2} = C_{s2} \cdot T_c^{3/2} \cdot \exp \left(\frac{-E_{gap} \cdot q}{n_2 \cdot T \cdot k} \right) \quad (\text{II-22})$$

Les constantes C_{s1} et C_{s2} sont généralement comprises respectivement entre $150 - 180 A \cdot K^3$ et $1,3 - 1,7 \times 10^{-2} A \cdot K^{-5/2}$ pour une module de 100 cm^2 .

Une valeur du facteur d'idéalité différent de l'unité est associée à un mécanisme de recombinaison prédominant et elle dépend de la nature et de la position des niveaux pièges.

- $n = 1$: La zone de charge d'espace est dépeuplée (cas idéal).
- $1 < n < 2$: Le niveau piège est peu profond dans la zone de charge d'espace et n dépend de la polarisation [12].
- $n = 2$: Les centres de recombinaison sont distribués uniformément dans la zone

de charge d'espace et sur un seul niveau au milieu de la bande interdite.

- $2 < n < 4$: Les centres de recombinaison sont distribués de façon non uniforme avec une densité réduite au centre de la zone de charge d'espace par rapport à la surface

E_{gap} : Energie de gap (Silicium cristallin = 1,12 eV, Silicium amorphe = 1,7 eV, CIS = 1,03eV, CdTe = 1,5 eV).

II-4-2- Modèle à six paramètres (2M6P) :

Si la résistance shunt est considérée infinie R_{sh} tend vers ∞ le nombre de paramètres à déterminer devient 6 et le nom du modèle dans ce cas est 2M6P (Lumped, 2 Mechanism model with 6 Paramètres) . Cette simplification est justifiée par le fait que la résistance shunt est d'habitude beaucoup plus grande que les autres résistances donc le courant qui la traverse est négligeable. Il consiste en la description mathématique d'un circuit réalisé par la connexion en parallèle de deux diodes ayant les courants de saturation équation (II-21) et I_{s2} équation (II-22), les facteurs de diode n_1 et n_2 , une source de courant produisant un photo-courant I_{ph} équation (II-20) qui dépend de l'éclairement solaire et de la résistance série R_s

La cellule photovoltaïque est représentée par le circuit électrique, figure (II-6).

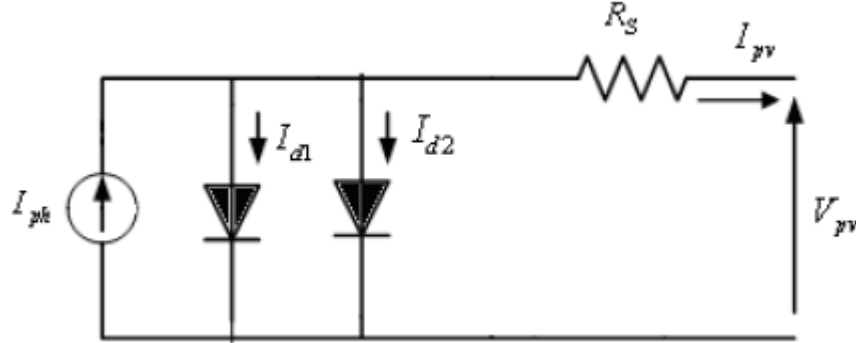


Figure II-6 Schéma équivalent du modèle à deux exponentielles, 2M6P

L'équation caractéristique est déduite d'une manière directe à partir de la loi de Kirchhoff [10]:

$$I_{pv} = I_{ph} - I_{d1} - I_{d2} \quad (\text{II-23})$$

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

$$I_{pv} = I_{ph} - I_{s1} \left(\exp\left(\frac{V_{pv} + R_s I_{pv}}{V_t n_1}\right) - 1 \right) - I_{s2} \left(\exp\left(\frac{V_{pv} + R_s I_{pv}}{V_t n_2}\right) - 1 \right) \quad (\text{II-24})$$

II-4-3- Modèle à cinq paramètres (2M5P) :

Le circuit équivalent de ce modèle est obtenu en utilisant une simplification au circuit du modèle à six paramètres représenté sur la figure (II-6) et le nom du modèle dans ce cas est 2M5P (Lumped, 2 Mechanism model with 5 Paramètres) . Cette simplification se traduit par supposer que la résistance shunt est infinie, et la résistance série est nulle. Le circuit equivalent sera represent comme suit, figure (II-7).

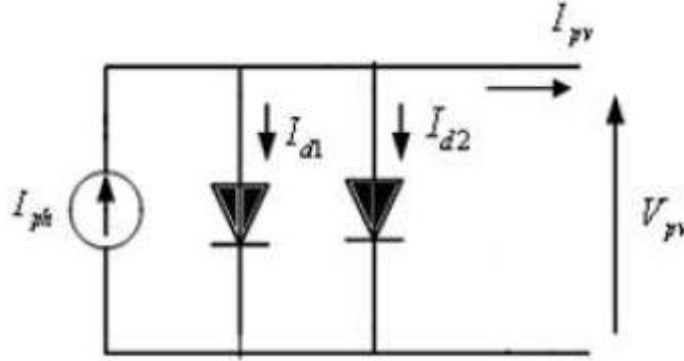


Figure II-7 Schéma équivalent du modèle à deux exponentielles, 2M5P

Il consiste en la description mathématique d'un circuit réalisé par la connexion en parallèle de deux diodes ayant les courants de saturation I_{s1} (équation (II-21)) et I_{s2} équation (II-22), les facteurs de diode n_1 et n_2 , une source de courant produisant un photo- courant I_{ph} (équation (II-20)) qui dépend de l'éclairement solaire et de la température

L'équation caractéristique est déduite d'une manière directe à partir de la loi de Kirchhoff:

$$I_{pv} = I_{ph} - I_{d1} - I_{d2} \quad (II-25)$$

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

$$I_{pv} = I_{ph} - I_{s1} \left(\exp\left(\frac{V_{PV}}{V_t \cdot n_1}\right) - 1 \right) - I_{s2} \left(\exp\left(\frac{V_{PV}}{V_t \cdot n_2}\right) - 1 \right) \quad (II-26)$$

II-5- Simulation d'un module PV avec le modèle à une seule diode :

Le figure (II-8) représente le schéma équivalent du modèle à un seule diode .

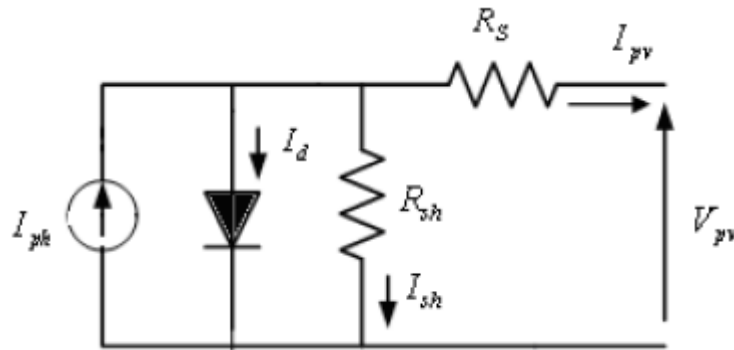


Figure II-8 Schéma équivalent du modèle à une seule diode

Un module solaire photovoltaïque est développée dans l'environnement Matlab_Simulink. en utilisant le modèle avec une seule diode .

Le modèle Simulink est représenté à la figure (II-9)

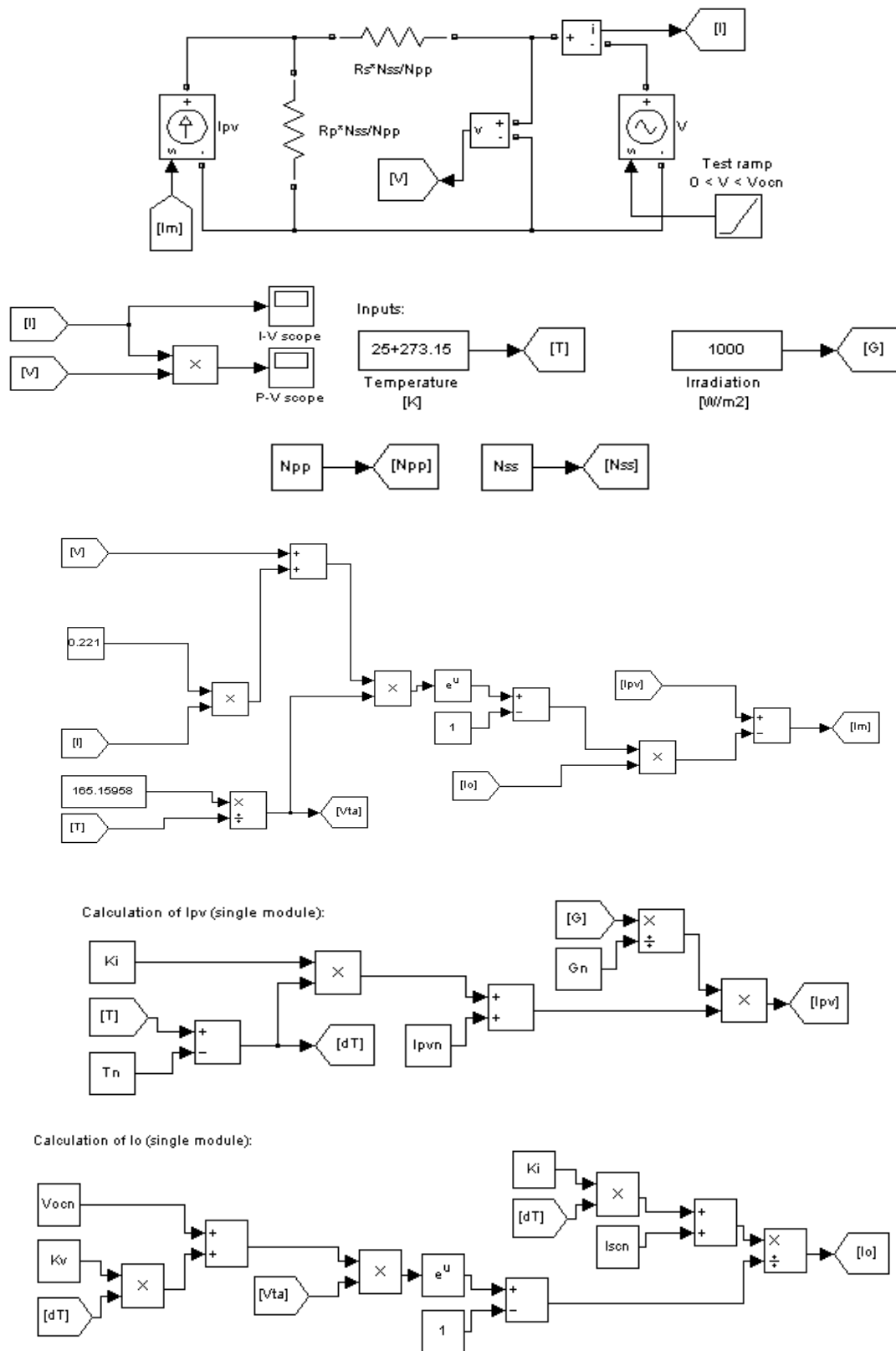


Figure II-9 Simulation du module PV.

II-5 -1- Caractéristique I (V) :

Après l'exécution du bloc simulation d'un module PV, la variation de courant en fonction de la tension du module qui représente la caractéristique I (V) est illustrée dans la figure (II-10)

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 des conditions d'ensoleillement et de température figure (II-10), 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 court-circuit, 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 trois gammes:

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

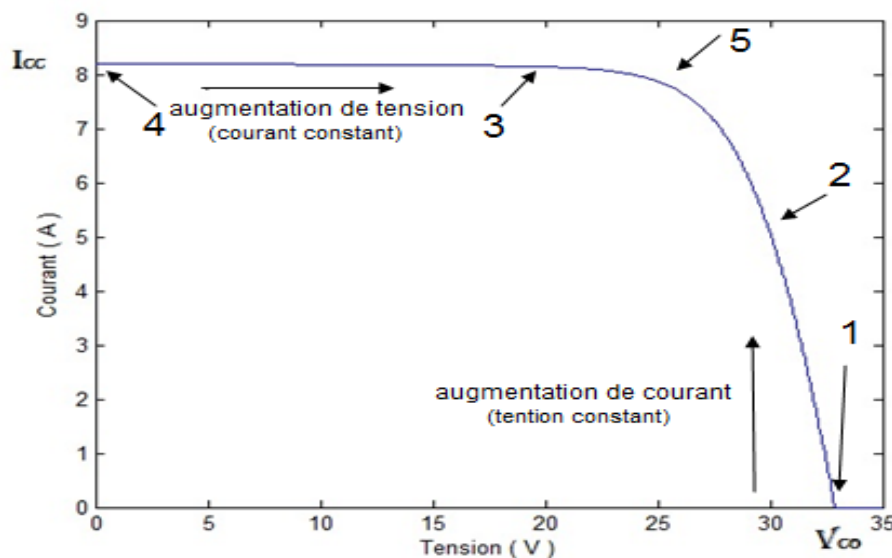


Figure II-10 Caractéristique typique I-V d'un module solaire

II-5 -2- Caractéristique P(V) :

Après l'exécution du bloc simulation d'un module PV, la variation de puissance en fonction de tension du module qui représente la caractéristique $I(V)$ est illustrée dans la figure (II-11)

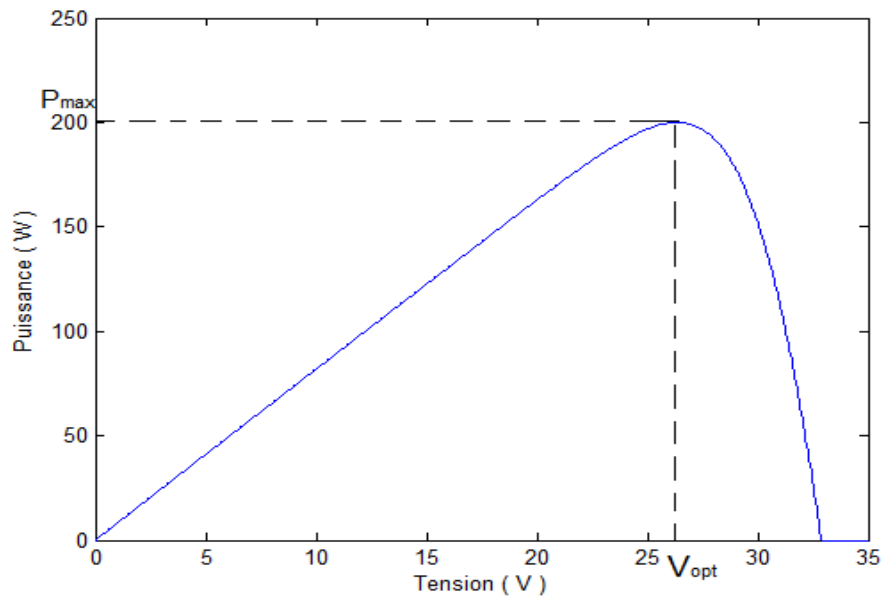


Figure II-11 Caractéristique typique P-V d'un module solaire

On remarque que la puissance délivrée par un module photovoltaïque augmente proportionnellement avec l'augmentation de la tension jusqu'à la valeur optimale (P_{max}) ensuite elle décroît jusqu'au zéro ($P=0$), quand la tension est égale à la tension de circuit ouvert.

II-5 -3 - Influence de l'éclairement sur les caractéristiques I(V) et P(V) :

La figure (II-12) présente un exemple des courbes pour différents niveaux d'éclairement à une température fixe et égale à une température ambiante de référence ($T=25^{\circ}\text{C}$) :

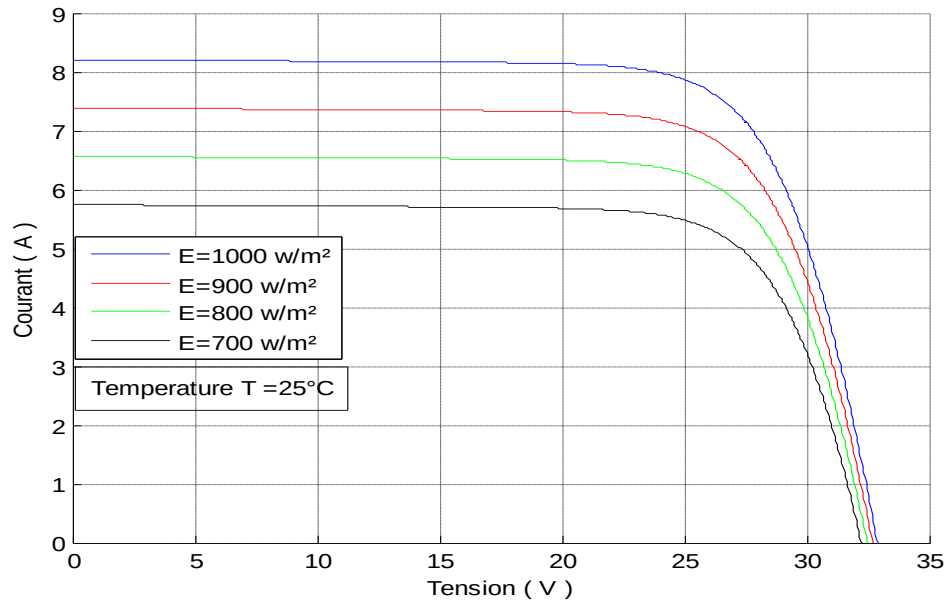


Figure II-12 (a) Influence de l'éclairement sur la caractéristique $I(V)$

On remarque dans la figure(II-12 (a)) que la valeur du courant de court-circuit est directement proportionnelle à l'intensité du rayonnement [5]. Par contre, la tension en circuit ouvert ne varie pas dans les mêmes proportions, elle reste quasiment identique même à faible éclairement.

De même pour les caractéristiques $P(V)$ montrées sur la figure (II-12 (b)) on observe que le niveau de la puissance maximale augmente avec l'augmentation du l'éclairement

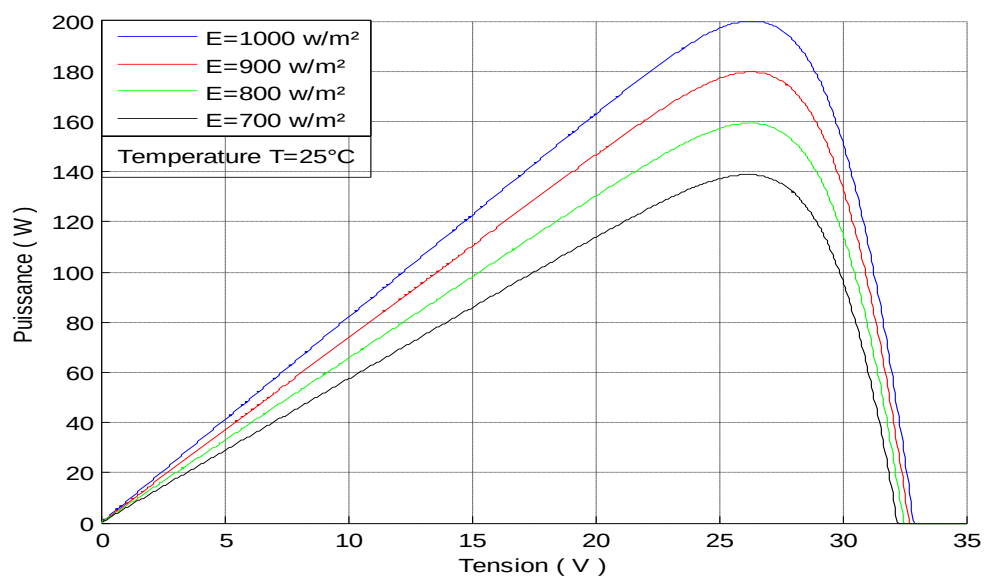


Figure II-12 (b) Influence de l'éclairement sur la caractéristique $P(V)$

II-5 -4- Influence de la température sur les caractéristiques $I(V)$ et $P(V)$:

La figure (II-13 (a)) présente un exemple des courbes $I(V)$ pour différents niveaux de température et pour un éclairement de référence égale à 1000 W/m^2 .

On remarque que la température à une influence négligeable sur la valeur du courant de court-circuit. Par contre, la tension en circuit ouvert baisse assez fortement lorsque la température augmente, par conséquent la puissance extractible diminue comme le montre la figure (II-13 (b)).

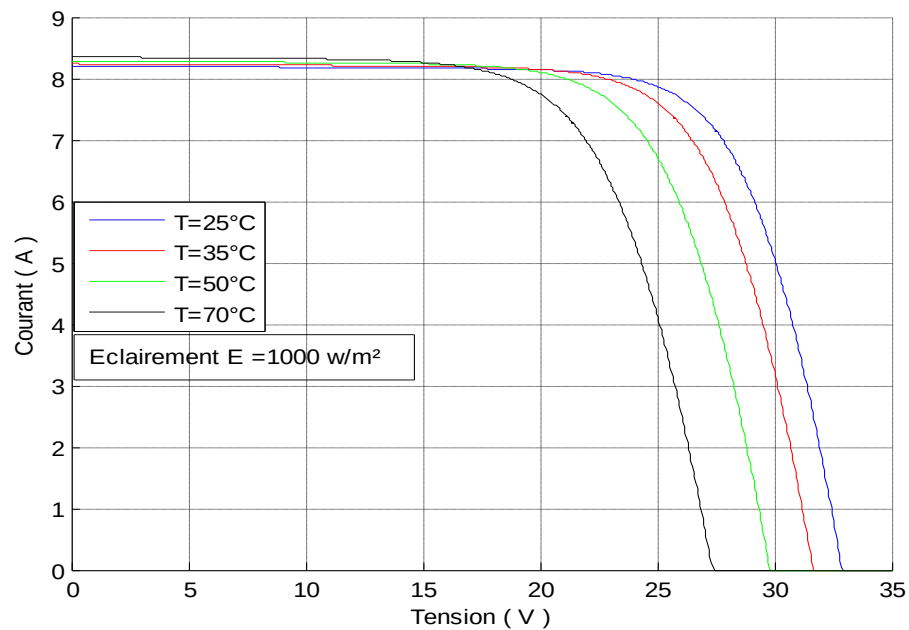


Figure II-13 (a) Influence de la température sur la caractéristique $I(V)$

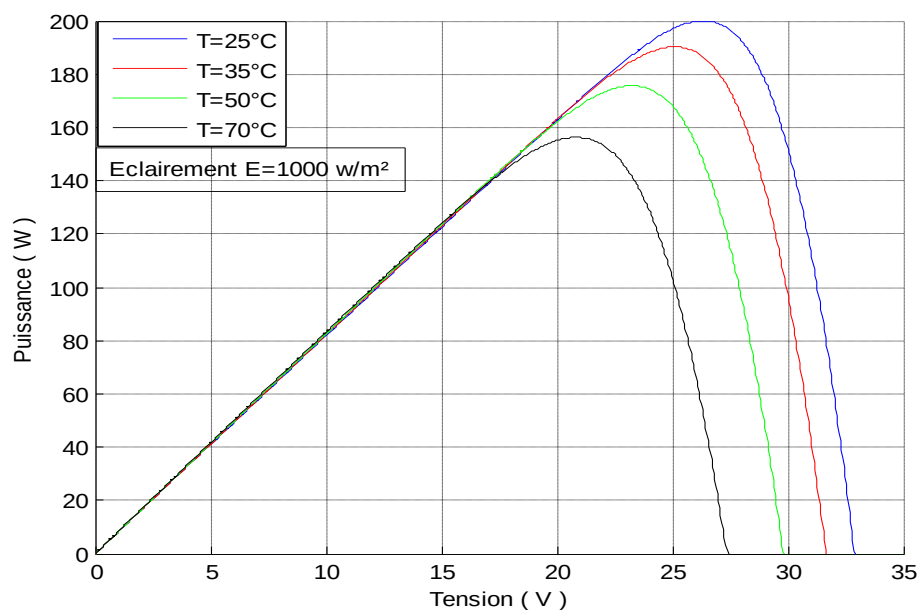


Figure II-13 (b) Influence de la température sur la caractéristique $P(V)$

Donc il faut impérativement prendre en compte la variation de la température du site lors du dimensionnement d'une installation photovoltaïque.

II-5 -5- Influence de la résistance série sur les caractéristiques $I(V)$ et $P(V)$:

Les figures (II-14 (a)) , (II-14 (b)) montrent l'influence de la résistance série sur la caractéristique $I(V)$ et $P(V)$ de la cellule photovoltaïque.

La résistance série agit sur la pente de la caractéristique dans la zone où la photodiode se comporte comme un générateur de tension. Elle ne modifie pas la tension du circuit ouvert, et lorsqu'elle est élevée, elle diminue la valeur du courant de court-circuit. L'augmentation de la résistance série se traduit par une diminution de la pente de la courbe de puissance.

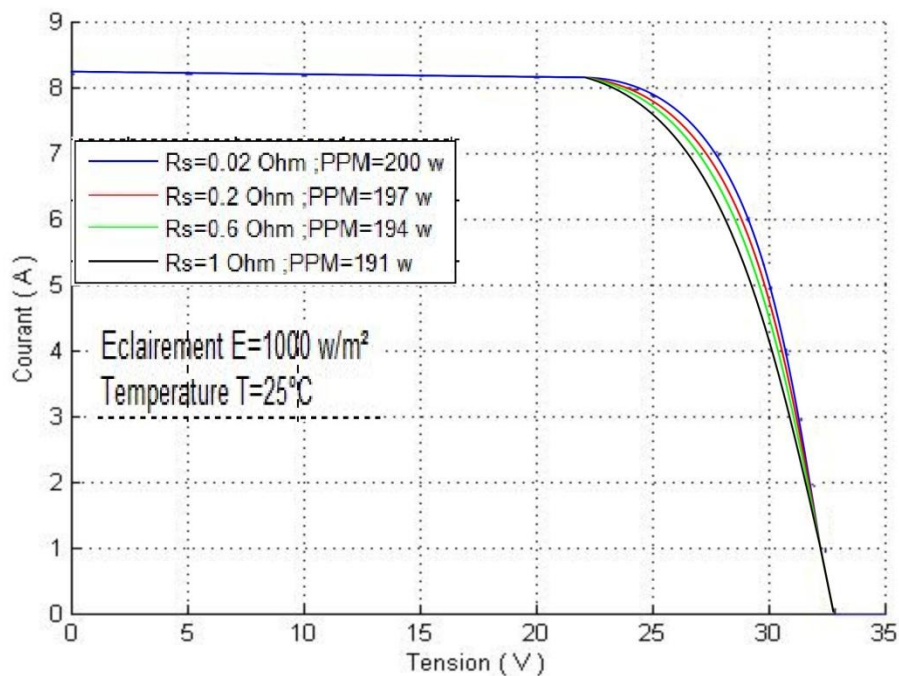


Figure II-14 (a) Influence de la résistance série (R_s) sur la caractéristique $I(V)$

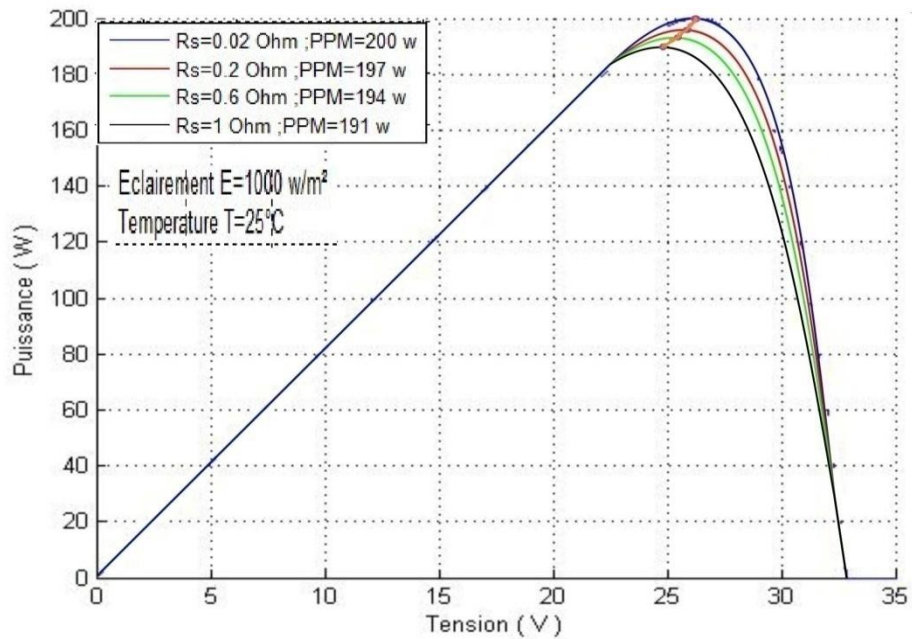


Figure II-14 (b) Influence de la résistance série (R_s) sur la caractéristique $P(V)$

II-5 -6 - Influence de la résistance shunt sur les caractéristiques $I(V)$ et $P(V)$:

La résistance shunt est une résistance qui prend en compte les fuites inévitables du courant qui intervient entre les bornes d'une photopile. En général, la résistance shunt est très élevée, son effet se fait sentir surtout dans la partie génération de courant

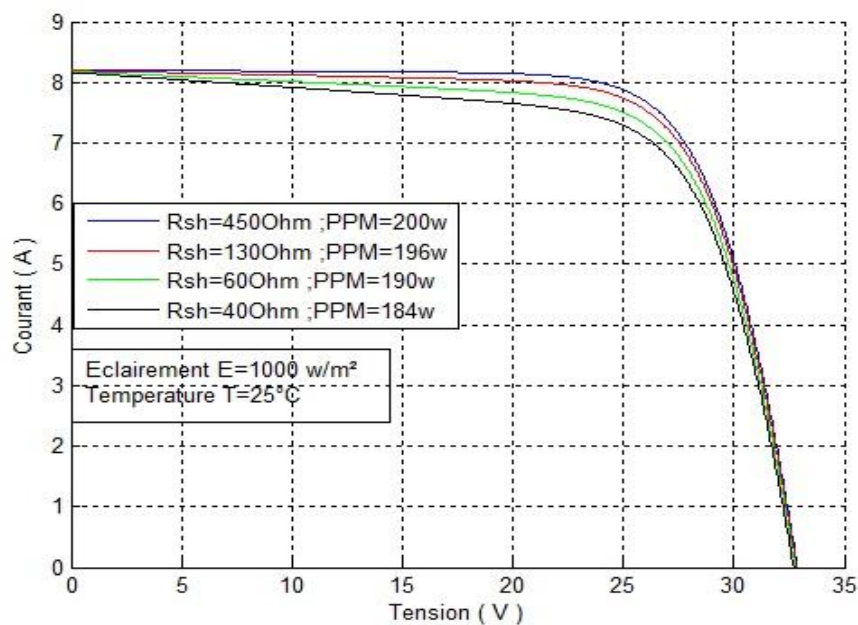


Figure II-15 (a) Influence de la résistance shunt (R_{sh}) sur la caractéristique $I(V)$

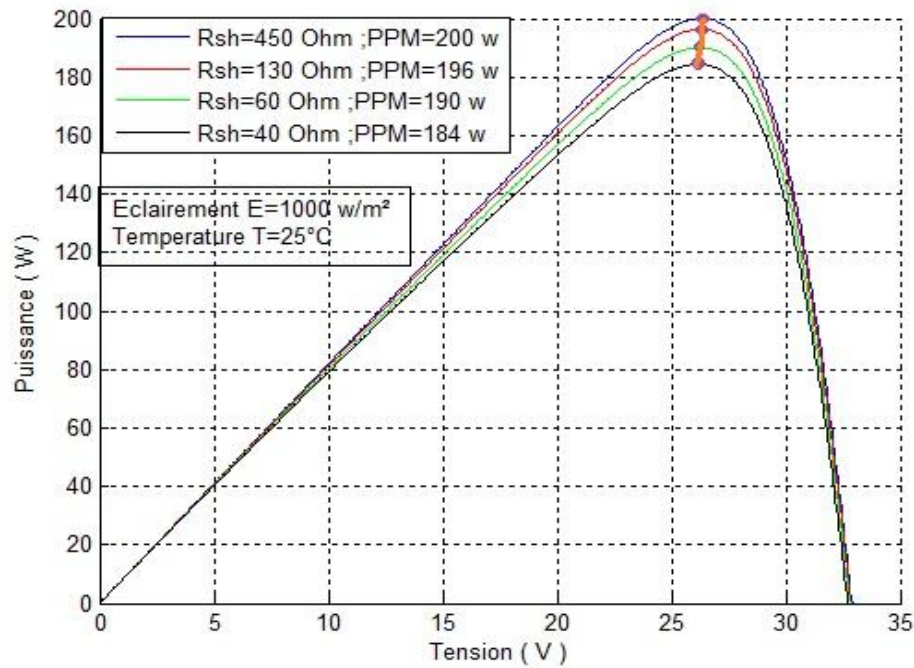


Figure II-15 (b) Influence de la résistance shunt (R_{sh}) sur la caractéristique $P(V)$

L'influence de la résistance parallèle (shunt) sur la caractéristique courant-tension se traduit par une légère diminution de la tension de circuit ouvert, et une augmentation de la pente de la courbe $I-V$ de la cellule dans la zone correspondant à un fonctionnement comme une source de courant. Ceci provient du fait qu'il faut soustraire du photo-courant, outre le courant direct de diode, un courant supplémentaire variant linéairement avec la tension développée. La puissance fournie par une cellule solaire varie avec sa résistance parallèle, plus cette résistance est élevée plus la puissance fournie est importante.

II-6- Conclusion:

Dans ce chapitre, nous avons présenté les caractéristiques électriques fondamentales d'une cellule photovoltaïque (module photovoltaïque) et les circuits équivalents ont été décrits. Des modèles mathématiques de complexité variable ont été discutés (modélisation), aussi bien que des critères pour choisir un modèle sont convenablement détaillé. Nous avons vu que la cellule PV présente une caractéristique $I(V)$ non linéaire dont il est possible de résoudre l'équation des caractéristiques. Bien qu'il puisse être possible de trouver la réponse par des plusieurs méthodes, Six modèles d'une cellule photovoltaïque ont été détaillés.

Une simulation du modèle PV avec le modèle à une diode à 5 paramètres a été effectuée, et on a vu également l'influence des différents paramètres sur les caractéristiques $I(V)$ et $P(V)$, a savoir l'éclairement et la température.

D'après les résultats des simulations, on peut dire que les performances d'un module photovoltaïque sont d'autant plus dégradées que R_s est grande ou que R_{sh} est faible.

Chapitre III

Différentes méthodes MPPT appliquées aux systèmes PV

III-1- Introduction:

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

En effet, les études en simulation dans le chapitre précédent ont bien montré que l'énergie des photons convertie en électricité est une fonction fortement variable selon l'éclairement et la température mais aussi selon la charge qui est connectée au générateur PV.

Pour remédier à cette dernière influence, des lois de commandes spécifiques ont été conçues et mises au point à partir de 1968 afin de permettre à ces dispositifs de produire leur maximum de puissance électrique, quelle que soit les conditions climatiques. Ce type de commande est souvent nommé dans la littérature Recherche du Point de Puissance Maximale ou bien Maximum Power Point Tracking en anglo-saxon (MPPT). [14]

Dans ce chapitre, nous allons exposer succinctement les différentes architectures de la chaîne de conversion PV, MPPT, ainsi que le principe de la poursuite du Point De Puissance Maximale (PPM). Ensuite nous allons consacrer une partie de ce chapitre sur les différentes méthodes (MPPT) .

III-2- La connexion direct GPV-charge comme mode de transfert de puissance :

Les connexions direct du panneau solaire photovoltaïque à une charge reste actuellement le principe de fonctionnement le moins cher et le plus répandu, la figure(III-1) Bien sûr, il faut s'assurer auparavant que la charge accepte bien la connexion directe au générateur de puissance. En effet, le GPV est une source d'énergie continue qui ne peut être connectée à une charge alternative que via un étage d'adaptation de type onduleur.

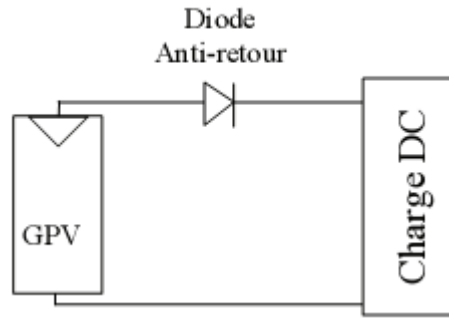


Figure III -1 Connexion directe GPV-Charge via une diode anti-retour

L'inconvénient majeur de cette connexion est sa dépendance directe entre la puissance fournie par le générateur et la charge. En fait, la puissance fournie par le module photovoltaïque résulte de l'intersection entre la caractéristique du GPV et celle de la charge. Comme la caractéristique de la figure (III-2) montre, la puissance transmise directement à une batterie ou charge résistive de type lampe ou bien même un moteur (MCC), n'est pas toujours effectué à la puissance maximale P_{max} que peut fournir le panneau solaire. La solution la plus utilisée actuellement est de créer généralement un GPV par association de cellules pour obtenir une puissance nominale donnée proche de celle nécessaire pour l'utilisation. Cette solution est valable pour les charges DC de type batterie recueillant le courant PV sous des tensions proches de V_{opt} . Autre application direct est le pompage d'eau « au fil du soleil ». dans ce cas, on garantit statistiquement la coïncidence du point de puissance maximale PPM du générateur avec les besoins optimaux de la charge.

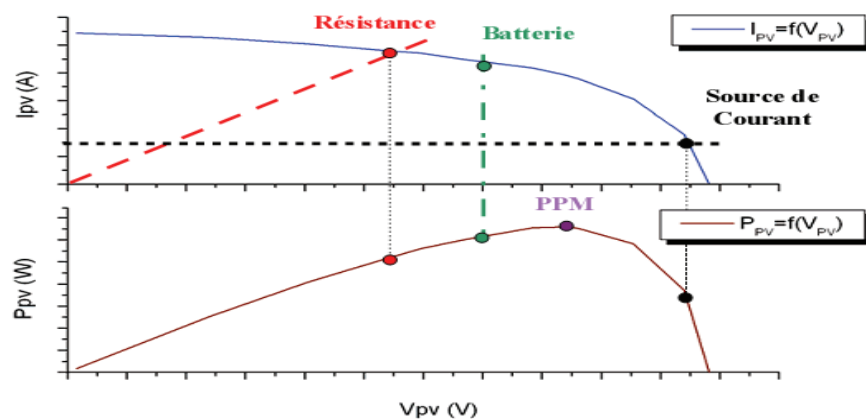


Figure III -2 caractéristiques électriques d'un générateur photovoltaïque en connexion direct GPV-Charge

III-3- La connexion GPV-charge via un étage d'adaptation :

Comme illustré précédemment, le point de fonctionnement peut se trouver plus ou moins éloigné du PPM, voir ne pas exister. Ce dernier cas se produit par exemple, lorsqu'une batterie connectée à un GPV, présente une tension de batterie systématiquement supérieure à la tension de circuit ouvert du générateur photovoltaïque (V_{co}). Alors, aucun transfert de puissance peut avoir lieu. Ainsi, l'un des intérêts à introduire un étage d'adaptation comme indiqué sur la (figure III-3) est d'assurer que le transfert d'énergie est toujours possible et qu'il peut s'effectuer dans des conditions de fonctionnement optimales pour la source PV et la charge.

En résumé, selon l'application et le degré d'optimisation de production souhaités, l'étage d'adaptation entre le GPV et la charge peut être constitué d'un ou plusieurs convertisseurs et permet d'assurer les fonctions suivantes :

- Adapter les niveaux de tensions entre la source et la charge dans de grandes proportions si nécessaire.
- Introduire une isolation galvanique.
- Connecter une charge avec des besoins d'alimentation de type alternative.

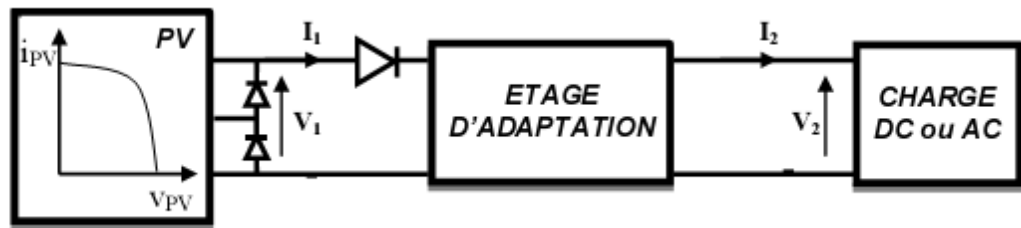


Figure III -3 Connexion d'un GPV à une charge à travers un étage d'adaptation

L'introduction d'un étage d'adaptation permettant de fixer le point de fonctionnement du GPV indépendamment de celui de la charge, permet l'extraction de la puissance optimale. 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. Et 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 qui effectue une recherche permanente du point de puissance maximale (PPM).

III-4- Principe de la recherche du point de puissance maximale:

Le principe de ces commandes est d'effectuer une recherche du point de puissance maximale (MPPT) tout en assurant une parfaite adaptation entre le générateur et sa charge de façon à transférer le maximum de puissance.

La figure (III-4) représente une chaîne élémentaire de conversion photovoltaïque associée à une commande MPPT. Pour simplifier les conditions de fonctionnement de cette commande, une charge DC est choisie. Comme nous pouvons le voir sur cette chaîne, la commande MPPT est nécessairement associée à un quadripôle possédant des degrés de liberté qui permettent de pouvoir faire une adaptation entre le GPV et la charge. Dans le cas de la conversion solaire, le quadripôle peut être réalisé à l'aide d'un convertisseur DC-DC de telle sorte que la puissance fournie par le GPV correspond à la puissance maximale (P_{MAX}) qu'il génère et qu'elle puisse ensuite être transférée directement à la charge.

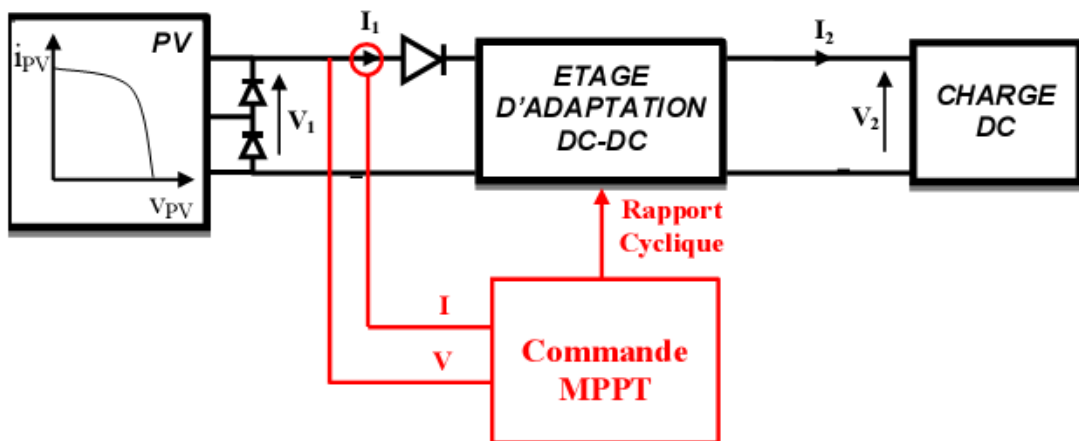


Figure III -4 Chaîne élémentaire de connexion photovoltaïque

La technique de contrôle communément utilisée consiste à agir sur le rapport cyclique de manière automatique pour amener le générateur à sa valeur optimale de fonctionnement qu'elles que soient les instabilités météorologiques ou variations brutales de charges qui peuvent survenir à tout moment.

La figure (III-5) illustre trois cas de perturbations. Suivant le type de perturbation, le point de fonctionnement bascule du point de puissance maximal PPM_1 vers un nouveau point P_1 de fonctionnement plus ou moins éloigné de l'optimum. Pour une variation d'ensoleillement (cas a), il suffit de réajuster la valeur du rapport cyclique pour converger vers le nouveau point de puissance maximale PPM_2 . Pour une variation de la

charge (cas b), on peut également constater une modification du point de fonctionnement qui peut retrouver une nouvelle position optimale grâce à l'action d'une commande. Dans une moindre mesure, un dernier cas de variation de point de fonctionnement peut se produire lié aux variations de température de fonctionnement du GPV (cas c). Bien qu'il faut également agir au niveau de la commande, cette dernière n'a pas les mêmes contraintes temporelles que les deux cas précédents. En résumé, le suivi du PPM est réalisé au moyen d'une commande spécifique nommée MPPT qui agit essentiellement sur le rapport cyclique du convertisseur statique (CS) pour rechercher et atteindre le PPM du GPV. [14]

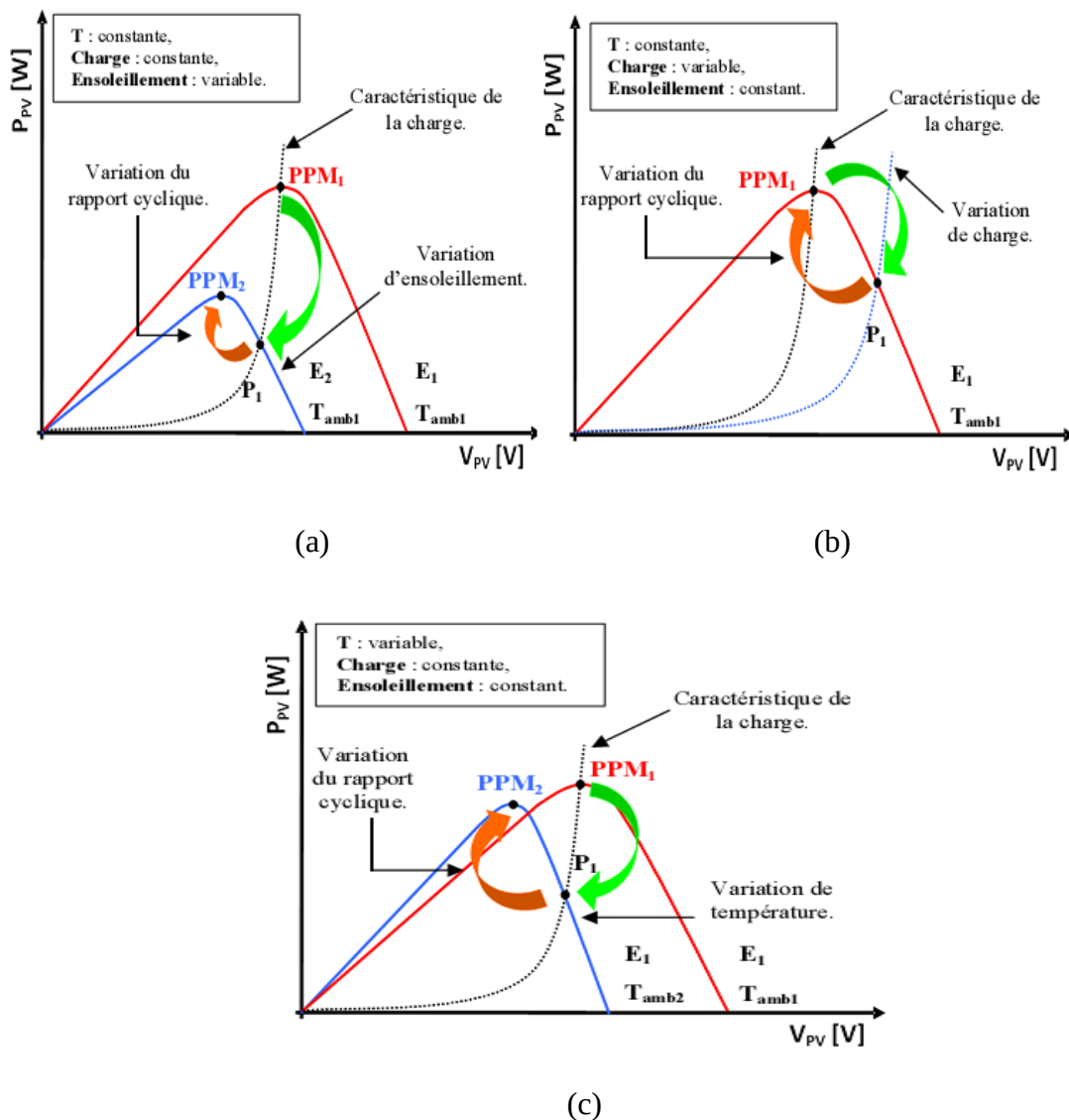


Figure III-5 Recherche et recouvrement du Point de Puissance Maximale

a) suit à une variation d'ensoleillement,

b) suite à une variation de charge,

c) suite à une variation de température.

III-5- Critères d'évaluation d'une commande MPPT:

La qualité d'une commande MPPT peut être définie comme la position du point de fonctionnement du système par rapport au PPM.

La puissance effectivement P délivrée par le GPV dépend de la commande utilisée au niveau du convertisseur. Le rendement du point de fonctionnement qui en découle et que nous noterons η_{MPPT} , permet de mesurer l'efficacité de la commande. En résumé cela donne le % de pertes de puissance d'un module PV par rapport à la fourniture de la puissance maximale qu'il pourrait produire.

$$\eta_{MPPT} = \frac{P}{P_{MAX}} \quad (III.1)$$

Les performances d'une commande MPPT ne se résument pas à ce seul paramètre (η_{MPPT}). D'autres critères, présentés dans la suite, tels que le temps de réponse et son aptitude à fonctionner sur une large gamme de puissance sont importants pour évaluer les qualités de ce type de commande.

- **Simplicité et coût :**

La complexité de l'algorithme entraînant des difficultés d'implantation et des pertes liées directement au nombre de calculs nécessaires. Donc , un commande MPPT doit avoir un niveau de simplicité important favorisant une faible consommation et donc un coût de développement raisonnable pour que sa présence compense le surcoût généré.

- **Réponse dynamique :**

Une commande MPPT doit avoir un bon comportement en dynamique afin de pouvoir piloter l'étage d'adaptation et assurer que la recherche du nouveau PPM, suite aux changements d'éclairement ou de température, soit faite le plus rapidement possible.

- **Flexibilité :**

Une commande MPPT doit être précise et stable quelles que soient ses conditions d'utilisation. C'est-à-dire qu'elle ne doit pas être conçue pour fonctionner pour un seul type de panneau. Elle doit être la plus universelle possible, capable de fonctionner avec des panneaux des différentes

technologies sans trop de modifications, tout en gardant le même taux de précision et de robustesse.

- **Compétitive sur une large gamme de puissance :**

Par définition, une commande MPPT, utilisée dans des applications photovoltaïques, est supposée suivre le PPM généré par un module PV, quelque soit le niveau d'ensoleillement. La commande MPPT est dite compétitive si le PPM est atteint avec une erreur statique, correspondant à la position du point de fonctionnement par rapport au PPM, relativement faible sur une large gamme de puissance.

III-6- Rendements de la chaîne de puissance :

Pour avoir une idée plus précise sur les origines des pertes dans une chaîne de conversion solaire, des rendements de chaque partie de la chaîne ont été définis. Pour cela, le rendement total de celle-ci a été décomposé en divers types de rendements reliés spécifiquement à chaque partie de la chaîne.

Le rendement maximum de la conversion photons-électrons du panneau solaire noté $\eta_{PV(max)}$ est défini :

$$\eta_{pv(max)} = \frac{P_{max}}{G * A_{eff}} \quad (III.2)$$

A_{eff} : est la surface effective du panneau PV représentant uniquement la partie active du capteur PV effectuant la conversion des photons en électrons.

G : Eclairement de référence égale à 1kw/m^2

La puissance P effectivement délivrée par un générateur PV va dépendre de la commande utilisée dans le convertisseur. Le rendement du point de fonctionnement qui en découle que nous notons η_{MPPT} permet de mesurer l'efficacité de la commande. En fait on peut l'appeler aussi rendement de la commande.

$$\eta_{MPPT} = \frac{P}{P_{max}} \quad (III-3)$$

Où P_{max} est le maximum de puissance potentiellement disponible à la sortie de panneau, il dépend des paramètres physiques du panneau et des conditions météorologiques.

Enfin, le rendement du convertisseur noté η_{conv} généralement fourni par les documents constructeurs est défini par l'équation (III-4), en notant P_s la puissance délivrée en sortie du convertisseur et P_e la puissance en entrée du convertisseur statique

$$\eta_{CONV} = \frac{P_s}{P_e} \quad (III-4)$$

Le rendement total de la chaîne de conversion (III-5) peut être défini par le produit de ces trois rendements précédemment définis.

$$\eta_{TOTAL} = \eta_{PV(max)} \cdot \eta_{MPPT} \cdot \eta_{CONV} \quad (III-5)$$

III-7- Différents types de commandes MPPT :

Si l'on veut poursuivre le point PPM réel, il serait nécessaire d'obtenir de l'information sur la puissance réelle extraite du module PV. Ceci peut être réalisé en mesurant la tension V_{pv} à la sortie du panneau et le courant I_{pv} qu'il peut fournir. A partir de la puissance électrique ($P = V_{pv} * I_{pv}$), on pourra utiliser différents algorithmes de contrôle pour poursuivre le PPM du module PV. Trois implantations de commande MPPT sont possibles :

- Commande MPPT à implantation analogique. Elle se caractérise par une simplicité dans la conception et une grande dynamique vis-à-vis de son équivalence numérique et aussi des diverses perturbations. Elle peut être complètement réalisée avec des composants analogiques et logiques sans qu'aucun calcul ne soit nécessaire.

- Commande MPPT à implantation mixte logique et analogique qui est basé sur l'addition d'un filtre nommé LFR (loss free resistor).

- Commandes MPPT à implantation numérique faisant intervenir que des composants digitaux. La pièce principale de ces commandes est un microcontrôleur. Elles sont souvent incluses avec diverses fonctions notamment des protections. L'algorithme implanté est plus ou moins lourd selon la précision du système, la robustesse et la rapidité de la boucle de commande. Ainsi, parmi les nouvelles MPPT publiées récemment, on peut citer la commande MPPT de type numérique proposé par M. Matsui. Celle-ci est basé sur la mesure des tensions de sortie et

d'entrée d'un convertisseur de type boost. En effet, connaissant le lien entre les grandeurs d'entrée et de sortie d'un convertisseur statique en fonction du son rapport cyclique, une fois les mesures effectuées, on peut calculer la valeur du rapport cyclique permettant de faire la meilleure adaptation source-charge. Ces types de commande sont valables en basses fréquences et puissances élevées. Leur inconvénient se manifeste lorsque la fréquence de système de conversion augmente, elles peuvent induire alors des erreurs sur la détermination du rapport cyclique optimal. De ce fait, elles peuvent entraîner des pertes importantes en rendement.

Ces commandes numériques se basent sur des algorithmes de contrôle adaptatifs, permettant de maintenir le système à son point de puissance maximale.

III-8- Classification des technique MPPT:

Diverses publications sur les commandes assurant un fonctionnement de type commande MPPT apparaissent régulièrement dans la littérature depuis 1968, date de publication de la première loi de commande de ce genre, adaptée à une source d'énergie renouvelable de type photovoltaïque.

Etant donné le grand nombre de publications dans ce domaine, nous avons fait une classification des différentes techniques MPPT existantes en les regroupant selon leur principe de base. La classification, en plus du principe, s'est effectuée selon des critères comme la précision de la recherche ou sa rapidité pour en faire une évaluation comparative [14] [15].

III-8-1- Les premiers types de technique MPPT:

L'algorithme mis en œuvre dans les premières commandes MPPT était relativement simple. En effet, les capacités des microcontrôleurs disponibles à l'époque étaient faibles et les applications surtout destinées au spatial avaient beaucoup moins de contraintes en variation de température et d'éclairement que les applications terrestres à l'époque.

Son principe a d'abord été décrit par A.F. Bohringer. Cette commande est basée sur un algorithme de contrôle adaptatif, permettant de maintenir le système à son point de puissance maximum (PPM).

Ce dernier est décrit en figure (III-6) et peut être implanté entièrement en numérique [15].

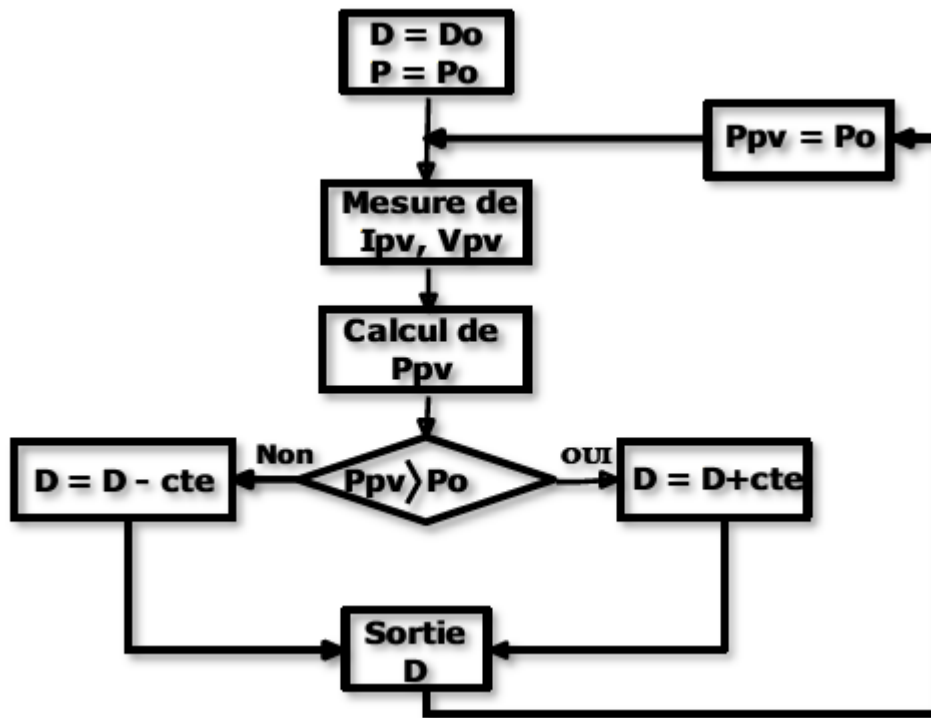


Figure III-6 Principe de la première technique MPPT numérique

Il consiste à calculer la puissance à l'instant t_n à partir des mesures de I_{pv} et V_{pv} , et de la Comparer à celle stockée en mémoire, correspondant à l'instant t_{n-1} de là, un nouveau rapport cyclique D est calculé et est appliqué au convertisseur statique. Ce principe est toujours valable du point de vue théorique et appliqué de nos jours sur des algorithmes numériques plus performants.

Cependant, le temps de réaction a été amélioré ainsi que la précision de la recherche du PPM associée à un certain nombre de précautions pour ne pas perdre le PPM même temporairement [15].

III-8-2- Les technique MPPT a algorithmme performants:

Ces derniers sont constitués par des hacheurs dont la commande intègre le système MPPT (Maximum Power Point Tracking). Cette commande à base d'un microcontrôleur qui contrôle les variations de l'intensité du courant I et de la tension V et calcule la puissance P . afin d'optimiser le transfert d'énergie électrique fournie par les panneaux.

Le système MPPT cherche à faire débiter ces panneaux à leur puissance maximale en agissant sur le rapport cyclique D .

Le principe du contrôleur MPPT est souvent basé sur une méthode par tâtonnement, comme le montre la figure (III-7) suivante qui illustre le principe de recherche du PPM.

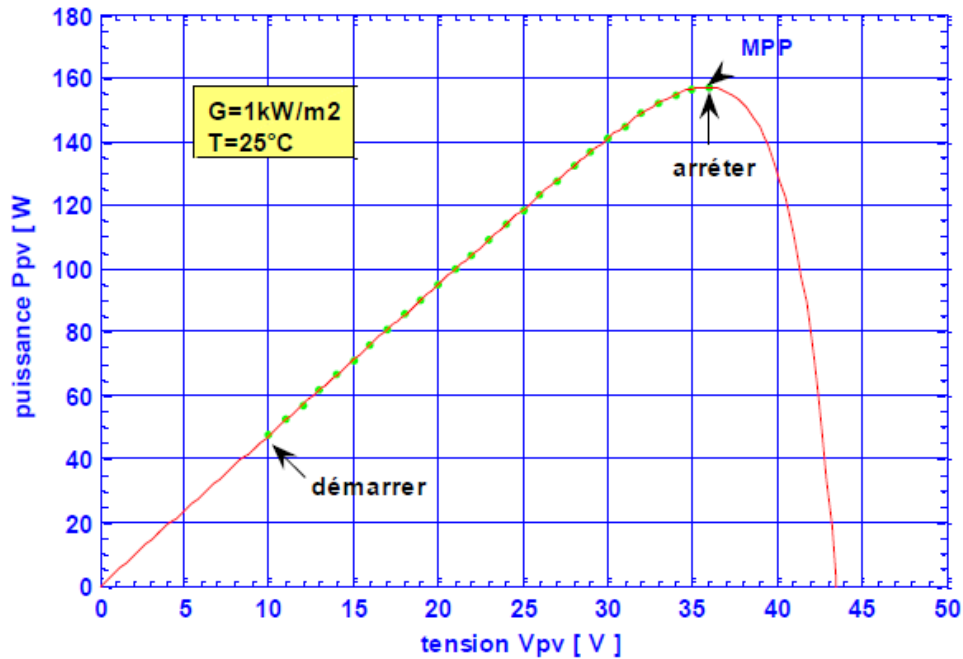


Figure III-7 Recherche du PPM

La charge va imposer son point de fonctionnement (P_1) par exemple. Le programme développé choisit un sens d'ajustement de D par pas $+$ ($d = \text{cte}$) ou $-$ ($d = \text{cte}$). Il compare si la valeur du point suivant en puissance est supérieure ou non à celui qui précède.

Si oui, on se déplace au point suivant (P_2) avec le même sens de variation de α , jusqu'au moment où le terme suivant (P_n) devienne inférieur au précédent (P_{n-1}). A ce moment, on prend le sens opposé d'ajustement de α et l'on recommence la même procédure, jusqu'à obtenir un système qui va basculer entre trois points qui englobent le PPM (P_{opt}).

Pour réaliser cette opération, plusieurs techniques existe en littérature on cite les technique suivants :

III-8-2-1-Technique Perturbation puis observation (Perturbe and Observe) (P&O):

Le principe des commandes MPPT de type P&O consiste à perturber la tension V_{pv} d'une faible amplitude autour de sa valeur initiale et d'analyser le comportement de la variation de puissance P_{pv} qui en résulte ainsi, comme l'illustre la figure (III.8), on peut déduire que 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.

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. à partir de ces diverses analyses sur les conséquences d'une variation de tension sur la caractéristique $P_{pv}(V_{pv})$, il est alors facile de destituer le point de fonctionnement par rapport au PPM, et de faire alors converger ce dernier vers le maximum de puissance à travers un ordre de commande approprié.

En résumé, si suite à une perturbation de tension, la puissance P_{pv} augmente, la direction de perturbation est maintenue. Dans le cas contraire, elle est inversée pour reprendre la convergence vers le nouveau PPM. La figure (III-9) 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 [14].

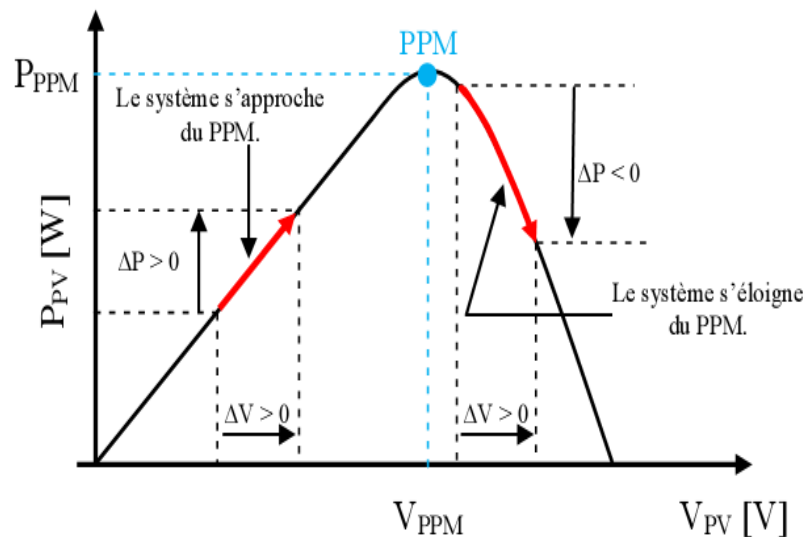


Figure III-8 Caractéristique $P_{pv}(V_{pv})$ d'un panneau solaire

Pour ce type de commande, deux capteurs (courant et tension du GPV) sont nécessaires pour Déterminer la puissance du GPV à chaque instant

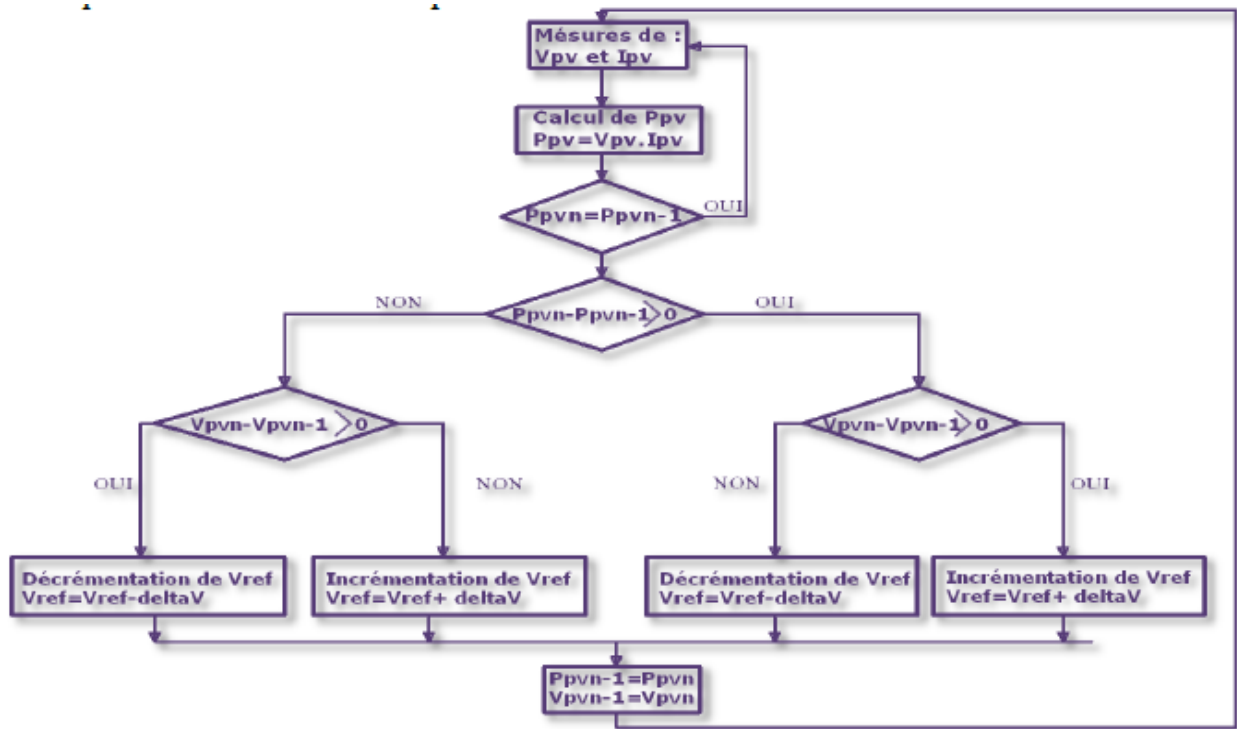


Figure III-9 Algorithme MPPT perturbation puis observation (P&O)

L'algorithme "P&O" a des limitations qui réduisent son efficacité. Quand l'intensité de lumière solaire diminue, il est difficile au MPPT de discerner l'emplacement du PPM. Un autre inconvénient de l'algorithme "P&O" quand il atteint le point MPP, le point de fonctionnement oscille autour de ce dernier. En outre, il a été montré que l'algorithme "P&O" peut avoir un comportement erratique sous un changement rapide du niveau de l'ensoleillement

III-8-2-2- Technique MPPT à pas auto-adaptatif:

Le principe fondamental de cet algorithme est la variation du pas d'incrément, ceci permettant de converger plus rapidement vers le MPP mais aussi de réduire les oscillations autour de ce point.

En effet, afin de converger rapidement vers le PPM, nous définissons, suivant un critère de variation de puissance, une région (r) de recherche à pas variable. En dehors de la région (r), l'algorithme se comporte comme un P&O normal avec un pas fixe noté C, mais lorsque l'on entre dans la région (r), le pas s'auto-adapte et se réduit au fur et à mesure que l'on approche du PPM. Les équations (III-6) à (III-12) détaillent le calcul du

pas auto adaptatif, nous supposons qu'autour du MPP, la tension reste constante et donc seul le courant varie.

$$\frac{dP_{pv}}{dt} = V_{pv} \frac{dI_{pv}}{dt} + I_{pv} \frac{dV_{pv}}{dt} = 0 \quad (III-6)$$

Pour le calcul du pas auto-adaptatif, nous supposons qu'autour du MPP

$$dV_{pv} \rightarrow 0 \quad (III-7)$$

$$dI_{pv} \rightarrow 0 \quad (III-8)$$

$$V_{pv} dI_{pv} \rightarrow dP_{pv} \quad (III-9)$$

$$dI_{pv} \rightarrow \frac{dP_{pv}}{V_{pv}} \quad (III-10)$$

Finalement, nous obtenons le pas auto-adaptif :

$$C_{auto} = x \cdot dP_{pv} \quad (III-11)$$

Avec

$$X \approx \frac{K}{V_{pv}} \quad (III-12)$$

P_{pv} étant la puissance aux bornes des panneaux photovoltaïques V_{pv} et I_{pv} , respectivement leurs tension et courant.

Le coefficient k est un coefficient correcteur ($k \in [0.1, 1]$) qui permet de converger dans de bonnes conditions et résulte d'un réglage par itération basé sur le compromis (temps de Convergence / stabilité).

L'algorithme MPPT est représenté à la figure (III-10) [15].

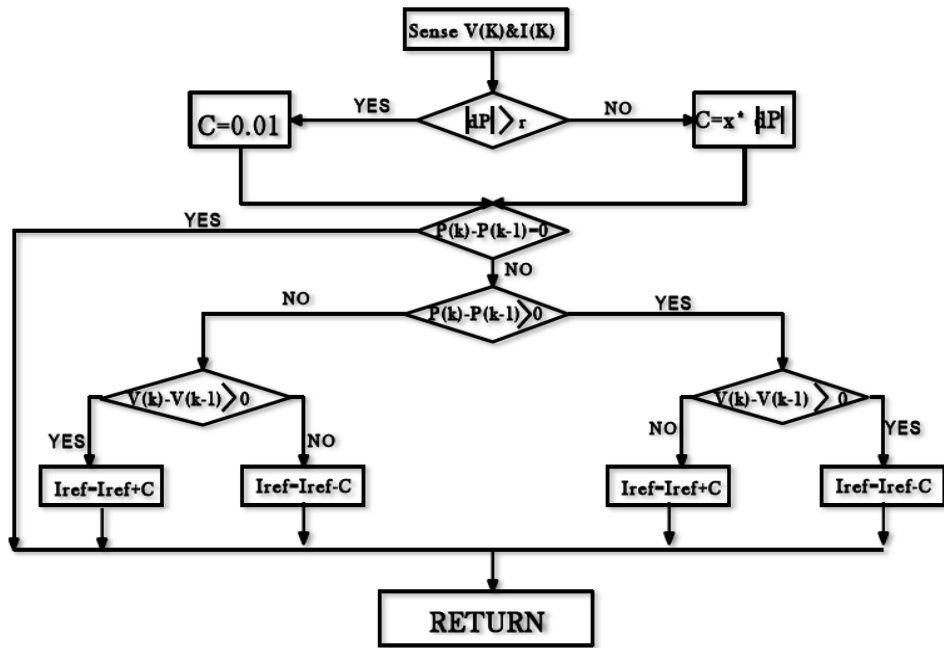


Figure III-10. Algorithme MPPT à pas auto-adaptatif

III-8-2-3-Technique de la Conductance Incrémentale (Incremental Conductance) :

Pour rechercher le PPM, On peut utiliser une autre technique qui se base sur la connaissance de la variation de conductance du GPV et des conséquences sur la position du point de fonctionnement par rapport à un PPM.

Ainsi, la conductance du module photovoltaïque est définie par le rapport entre le courant et la tension du GPV comme indiqué ci-dessous.

$$G = \frac{I_{pv}}{V_{pv}} \quad (\text{III-13})$$

Et une variation élémentaire (incrément) de conductance peut être définie par :

$$\Delta G = \frac{\Delta I_{pv}}{\Delta V_{pv}} \quad (\text{III-14})$$

D autre part, l'évolution de la puissance du module (P_{pv}) par rapport à la tension (V_{pv}) donne la position du point de fonctionnement par rapport au PPM. Lorsque la dérivée de puissance est nulle, cela signifie que l'on est sur le PPM, si elle est positive le point d'opération se trouve à gauche du maximum, lorsqu'elle est négative, on se situe à droite .

La Figure (III-11) permet d'écrire les conditions suivantes :

- Si $\frac{dP_{PV}}{dV_{PV}} > 0$ le point de fonctionnement est à gauche du PPM, (III-A)
- Si $\frac{dP_{PV}}{dV_{PV}} = 0$ le point de fonctionnement est sur le PPM, (III-B)
- Si $\frac{dP_{PV}}{dV_{PV}} < 0$ le point de fonctionnement est sur la droite du PPM, (III-C)

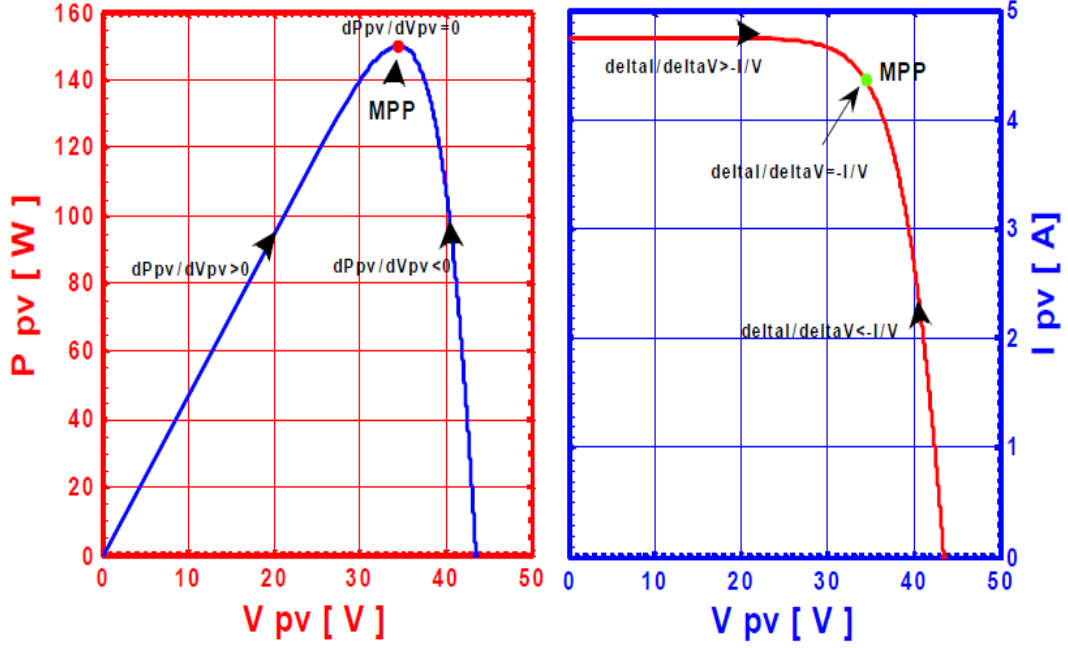


Figure III-11 Positionnement du point de fonctionnement ($G=1kW/m^2$, $T=25C^\circ$).

Le lien entre la conductance est donné par l'équation (III-15) et la dérivée de la puissance $\frac{dP_{PV}}{dV_{PV}}$ peut être décrit par l'équation suivante :

$$\frac{dP_{PV}}{dV_{PV}} = \frac{d[I_{PV} \cdot V_{PV}]}{dV_{PV}} = V_{PV} \cdot \frac{dI_{PV}}{dV_{PV}} + I_{PV} \cdot \frac{dV_{PV}}{dV_{PV}} = V_{PV} \cdot \frac{dI_{PV}}{dV_{PV}} + I_{PV} \quad (III-15)$$

D'où, on peut alors écrire de nouvelles conditions sur la variation de conductance comme celles données par (III-15) sur la dérivée de puissance :

- Si $\frac{\Delta I_{PV}}{\Delta V_{PV}} > -\frac{I_{PV}}{V_{PV}}$ le point de fonctionnement est à gauche du PPM (III-D)
- Si $\frac{\Delta I_{PV}}{\Delta V_{PV}} = -\frac{I_{PV}}{V_{PV}}$ le point de fonctionnement est sur le PPM (III-E)
- Si $\frac{\Delta I_{PV}}{\Delta V_{PV}} < -\frac{I_{PV}}{V_{PV}}$ le point de fonctionnement est sur la droite du PPM (III-F)

Le maximum de puissance peut être alors traqué en effectuant des comparaisons à chaque instant de la valeur de la conductance $\frac{I_{PV}}{V_{PV}}$ avec celle de l'incrément de

conductance $\frac{\Delta I_{pv}}{\Delta V_{pv}}$ comme l'illustre l'algorithme de la (figure III.12). V_r correspond à la tension de référence et force le GPV à fonctionner à cette valeur.

Si on est au PPM, alors la tension V_r correspond bien à la tension optimale V_{opt} . Une fois le PPM atteint, le point de fonctionnement peut être maintenu sur cette position jusqu'à la détection d'une variation de ΔI_{pv} .

Cela indique alors un changement de conditions climatiques, donc un nouveau PPM à rechercher. Pour cela, l'algorithme incrémente ou décrémente la valeur de V_r jusqu'à atteindre le PPM. Le schéma de principe de cette méthode est illustré sur la figure (III-12) [14] [15]

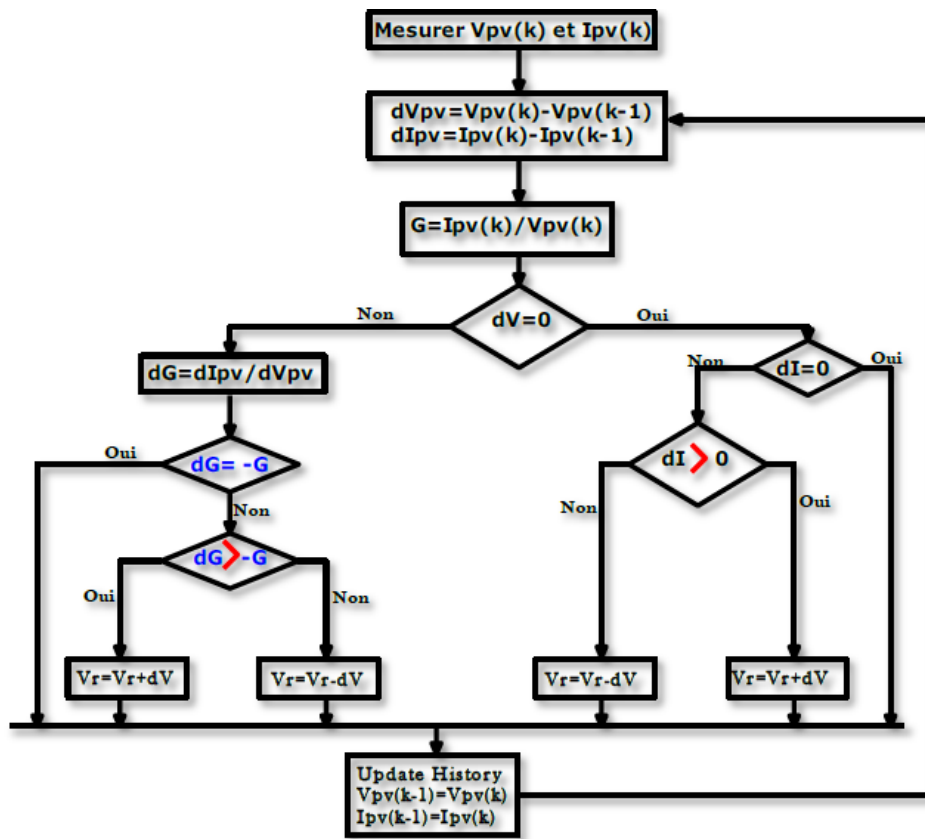


Figure III-12 Algorithme MPPT Conductance Incrémentale (Inc.CoN)

Les équations (III-D) et (III-F) sont employées pour déterminer la direction dans laquelle une perturbation doit se produire pour déplacer le point de fonctionnement vers le PPM. Cette perturbation est répétée jusqu'à ce que l'équation (III-E) soit satisfaite. Une fois le MPP est atteint, le MPPT continue à fonctionner avec cette valeur jusqu'à ce qu'un changement de la valeur du courant soit détecté, ce dernier résulte d'un changement au niveau de l'éclairement. Quand l'éclairement augmente, le PPM se

déplace vers la droite de la tension de fonctionnement. Pour compenser ce mouvement du PPM, le MPPT doit augmenter la tension de fonctionnement. La même chose pour le cas contraire, quand l'éclairement diminue, le MPPT doit diminuer cette dernière.

Les valeurs actuelles et précédentes de la tension et du courant sont utilisées pour calculer (ΔV) et (ΔI). Si $\Delta V=0$ et $\Delta I=0$, alors les conditions atmosphériques n'ont pas changé et le MPPT fonctionne toujours au PPM. Si $\Delta V=0$ et $\Delta I>0$, alors l'éclairement a augmenté. Ceci exige au INC d'augmenter la tension de fonctionnement pour retrouver de nouveau le MPP. Contrairement si $\Delta I<0$, l'éclairement a diminué tout en exigeant au INC-MPPT de diminuer la tension de fonctionnement. Si le changement de la tension n'est pas nul, les rapports dans les équations (III-D) et (III-F) peuvent être employés pour déterminer la direction dans laquelle la tension doit être changée afin d'atteindre le PPM.

Si $\frac{\Delta I}{\Delta V} > -\frac{I}{V}$ (c'est-à-dire le rapport $(\Delta P/\Delta V)>0$), donc le point de fonctionnement est à gauche du MPP. Ainsi, la tension de fonctionnement doit être augmentée pour atteindre le PPM. De même, si $\frac{\Delta I}{\Delta V} < -\frac{I}{V}$ (c'est-à-dire le rapport $(\Delta P/\Delta V)<0$), le point de fonctionnement se trouve à droite du MPP tout en signifiant que la tension doit être réduite pour atteindre le PPM [10]. Le schéma de la figure (III.-12) montre l'organigramme de l'algorithme INC.

En réalité, cet algorithme est une correction de l'algorithme "P&O" puisqu'il est capable de calculer la direction dans laquelle la perturbation du point de fonctionnement devrait être pour atteindre le PPM, et il peut aussi déterminer l'atteinte du PPM. De plus, dans les conditions de changement rapide de l'ensoleillement, l'algorithme ne devrait pas prendre la mauvaise direction comme c'est le cas avec l'algorithme "P&O", et d'ailleurs, il n'oscille pas autour du PPM une fois qu'il l'atteint.

III-8-2-4- Technique Hill Climbing (H.C) :

La technique de contrôle nommée Hill Climbing consiste à faire « monter » le point de fonctionnement le long de la caractéristique du générateur présentant un maximum.

Pour cela, deux pentes sont possibles. La recherche s'arrête théoriquement quand le point de puissance maximale est atteint.

Cette méthode est basée sur la relation entre la puissance du panneau et la valeur du rapport cyclique appliqué au CS.

Mathématiquement, le PPM est atteinte lorsque $\frac{dP_{PV}}{dD} = \frac{d(R_{in} * I_{pv}^2)}{dD}$ est forcé à zéro par la commande, comme le montre la figure (III-13) .

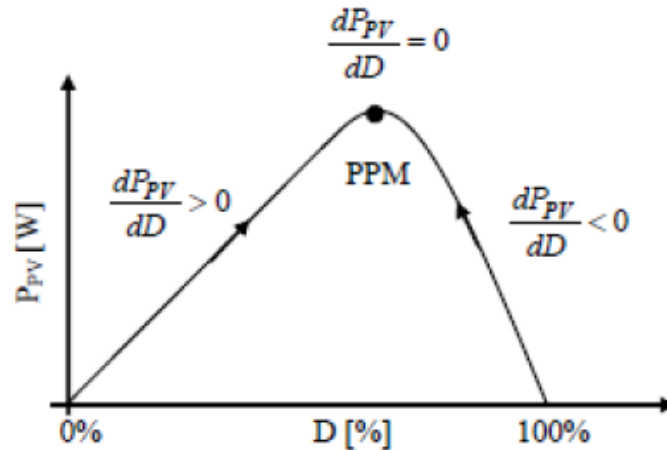


Figure III-13 Relation entre P_{pv} et le rapport cyclique D du CS

L'algorithme de cette méthode est illustré sur la (figure.III.14).

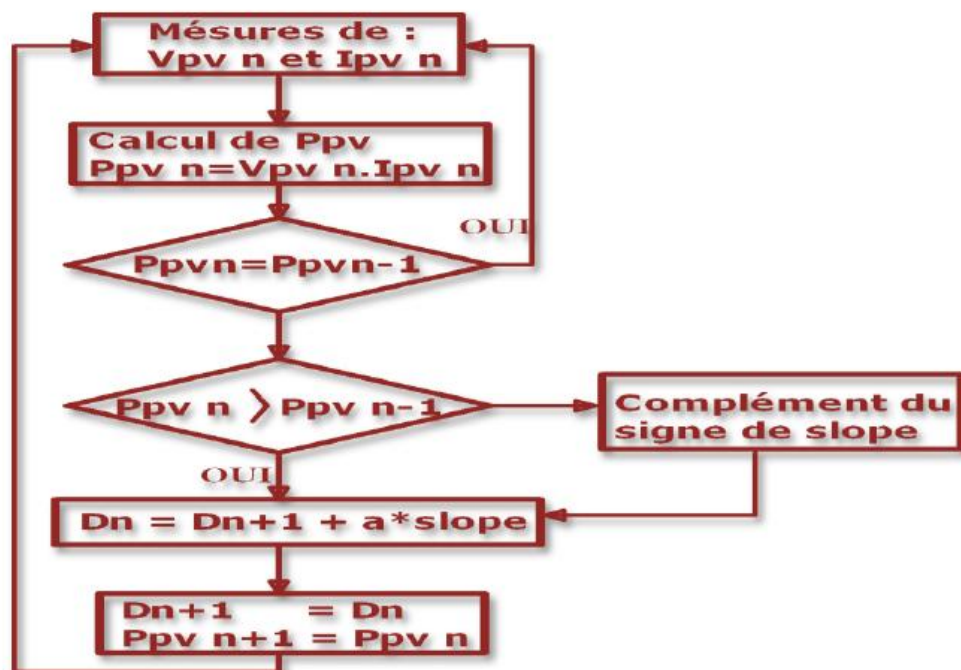


Figure.III-14 Algorithm MPPT Hill Climbing (H.C).

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

panneau. D et P_{pv} représentent respectivement le rapport cyclique et la puissance du générateur, a symbolise la variable d'incrément du rapport cyclique.

Périodiquement, la puissance P_{pvn} est comparée à la valeur déterminée précédemment P_{pvn_1} en fonction du résultat de la comparaison, le signe de la valeur slope change ou reste identique. Ce qui a pour effet d'incrémenter ou de décrémenter.

III-8-3- Les techniques MPPT basées sur des relations de proportionnalité:

Le mode de fonctionnement de ces commandes est basé sur des relations de proportionnalité entre les paramètres optimaux caractérisant le point de puissance maximal (V_{opt} et I_{opt}) et les paramètres caractéristiques du module PV (V_{co} et I_{cc}). Suivant le paramètre contrôlé, on parle alors de commande en régulation de courant ou de tension.

III-8-3-1- Technique de la fraction de la tension de circuit ouvert du générateur:

Elle est facile à mettre en œuvre, moins coûteuse pour les systèmes photovoltaïques. Plusieurs études ont montré que le rapport entre la tension optimale (pour laquelle la puissance débitée est maximale) et celle en circuit ouvert est approximativement constant, pour un même module, sous des niveaux d'éclairement et températures différents.

Ceci est la base du fonctionnement à fraction de tension constante qui peut être interprété par l'expression suivante:

$$\frac{V_{MPP}}{V_{co}} \approx K \quad (III-16)$$

La tension de circuit ouvert est mesurée en isolant temporairement le générateur PV du système et alors le point maximum de fonctionnement de puissance est calculé en utilisant l'équation (III-16). La littérature [14] donne un intervalle de 73% et 80% comme bande de valeurs de la constante K . En réalité K n'est pas constant et est affectée par des niveaux de l'éclairement, la température et de type de module. De même pour la technique de fraction de courant de court-circuit

$$\frac{I_{MPP}}{I_{cc}} \approx K \quad (III-17).$$

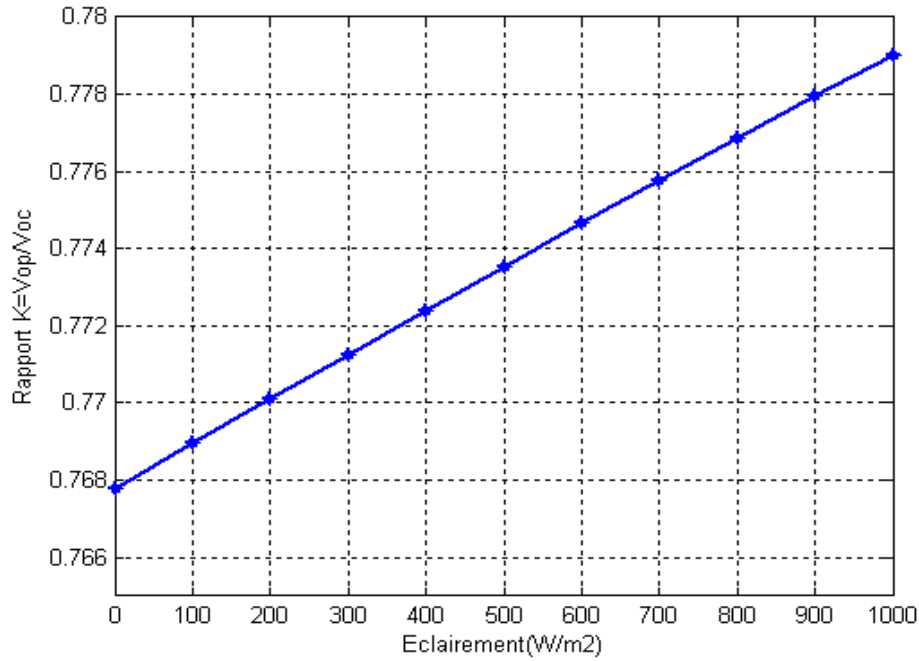


Figure III-15 Rapport entre V_{op} et V_{co} en fonction de l'éclairement

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

Un autre inconvénient est l'hypothèse faite sur l'évolution de K_v dans un GPV suivants les différents points de fonctionnement des caractéristiques de puissance. Beaucoup d'auteurs font l'hypothèse que ce coefficient est constant pour un générateur donné. Ceci est loin d'être vrai pour la plupart des GPV en silicium (SI) qui affichent une variation d'au moins 10 % de ce facteur en fonction de la température de fonctionnement. Ces commandes sont très simples et très robustes mais aujourd'hui ne présentent pas assez de précisions inhérentes à leur principe même de fonctionnement pour être retenues dans des systèmes de conversion récents [14].

III-8-3-2- Technique de court-circuit:

Cette nouvelle méthode est basée sur la connaissance de la relation linéaire en première approche entre I_{opt} et I_{cc} comme le montre l'équation :

$$I_{opt} = K_i * I_{cc} \quad (III-18)$$

Avec K_i correspondant à un facteur de courant qui dépend là aussi du GPV utilisé et il est généralement compris entre 0.78 et 0.92.

L'équation (III-18) montre que le courant I_{opt} peut être déterminé par une mesure de I_{cc} et que le PPM peut être atteinte en appliquant un courant de référence égal à I_{opt} à la régulation en courant du convertisseur. La mesure de I_{cc} implique une perte de transfert de puissance du a la mise en court- circuit du GPV.

Cependant, cette méthode peut s'avérer plus précise que la précédente car la température n'influence pas trop ce coefficient . Ces types de commandes ayant besoin uniquement d'un seul capteur, elles ont été très utilisées dans les années 80.

Elles s'avéraient alors plus faciles à mettre en œuvre et un peu moins coûteux que les commandes extrémales citées au début de ce document. Par contre, la précision de ces commandes est faible notamment à cause des procédés d'estimation des paramètres caractéristiques du module (I_{cc} et V_{CO}) qui ne peuvent pas se faire trop souvent. L'échelle temporelle de réaction est en effet de la minute. De plus, à chaque fois qu'une mesure de courant ou de tension est faite, cela entraîne un arrêt obligatoire de transfert de puissance et donc des pertes énergétiques qui ne sont pas négligeables au cours d'une journée.

III-8-4- Les techniques de différenciation :

Cette méthode est basée sur la propriété de la dérivée d'une fonction qui s'annule en un de ses extrema. La résolution de l'équation (III-19) permet d'obtenir le point de puissance maximale :

$$\frac{dP_{pV}}{dt} = V_{pV} \frac{dI_{pV}}{dt} + I_{pV} \frac{dV_{pV}}{dt} = 0 \quad (III-19)$$

Cependant, afin d'atteindre réellement le point de puissance maximale, cette équation doit être résolue rapidement. Cette opération est longue et complexe car elle exigent des calculs et mesures : mesures de la tension V_{pv} des panneaux, du courant I_{pv} , de la variation de la tension dV_{pv} , de la variation du courant dI_{pv} , permettant le calcul de la variation de la puissance dP_{pv} puis sa comparaison a (0) . Si la variation de la puissance n'est pas nulle, son signe permet de déterminer la direction de la recherche du PPM. Cette méthode nécessite donc des moyens de calcul qui soient très efficaces .

III-8-5- Les techniques MPPT basées sur le principe de la logique floue:

Les commandes basées sur la logique floue (dans la littérature anglo-saxonne Fuzzy Logic Control) sont de plus en plus populaires grâce à l'évolution des microcontrôleurs .

L'avantage de ces techniques est qu'elles peuvent fonctionner avec des valeurs d'entrées peu précises et qu'elles n'ont pas besoin de modèle mathématique de grande précision. De Plus, elles peuvent traiter des équations non linéaires .

III-8-5-1- Historique :

- 1965, naissance du concept flou avec le Pr. Zadeh Lofti (Californie) « Un contrôleur électromécanique doté d'un raisonnement humain serait plus performant qu'un contrôleur classique. » Théorie des « sous-ensembles flous ».
- 1973, Zadeh introduit la notion de variables linguistiques.
- 1974, Mamdani (Londres) réalise un contrôleur flou pour moteur à vapeur.
- 1987, explosion du flou au Japon et qui atteint son apogée en 1990.
- 1995 J. S. R. Jang Logique floue élargie aux systèmes à réseaux de neurones et à l'Intelligence Artificielle.

Le principe d'une commande floue se base sur deux variables d'entrées qui sont l'erreur E et le changement d'erreur ΔE et une variable de sortie ΔD (variation du rapport cyclique).

La valeur de la variable de sortie, qui pilote le convertisseur statique pour rechercher le PPM, Est déterminée à l'aide d'une table de vérité et de l'évolution des paramètres d'entrée.

En général, la commande logique floue comprend donc trois étapes communément nommées dans la littérature

- la fuzzification,
- la lecture de la table de vérité,
- la defuzzification

Durant la fuzzification, les variables d'entrées numériques sont converties en variable

Linguistique pouvant prendre les cinq valeurs suivantes

- NB : Negative Big,
- NS : Negative Small,
- ZE : Zero,
- PS : Positive Small,
- PB: Positive Big.

Comme le montre la structure de base de la commande logique floue illustrée en (figure.III.16)

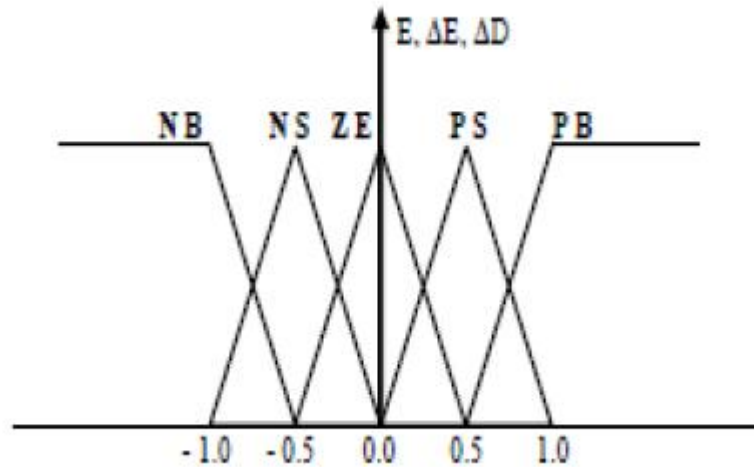


Figure III-16 Structure de base de la commande floue

Les paramètres d'entrées E et ΔE sont liées aux équations suivantes

$$E(n) = \frac{P(n) - P(n-1)}{V(n) - V(n-1)} \quad (\text{III.20})$$

$$\Delta E(n) = E(n) - E(n-1) \quad (\text{III.21})$$

En fonction de leurs évolutions et d'une table de vérité comme indiquée dans le tableau (III-1), Une valeur est attribuée au paramètre de sortie ΔD .

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

Tableau III-1 Exemple d'une table de vérité pour une commande logique floue

La variable linguistique assignée à ΔD , dépend des différentes combinaisons entre E et ΔE . Par exemple, si les variables d'entrée (E et ΔE), ont comme valeur PB et ZE correspondant à un point de fonctionnement très éloigné du PPM, d'après la table de vérité la valeur donnée à la variable de sortie ΔD est PB, ce qui implique une forte variation positive du rapport cyclique pour atteindre le PPM.

En résumé, les variations du rapport cyclique dépendent de la différence de position entre le point de fonctionnement et un PPM. Ainsi, dès que ce dernier s'approche du PPM, les incréments appliqués à ΔD s'affinent jusqu'à atteindre le PPM. La defuzzification, consiste à convertir cette fois, une variable linguistique en variable numérique. Cette étape ne s'applique qu'à la variable de sortie ΔD , afin de pouvoir piloter le convertisseur de puissance pour atteindre le PPM. Noppadol Khaehintung a démontré en 2004 que l'emploi d'une commande MPPT basée sur le principe de la logique floue permet d'améliorer d'un facteur 8 le temps de réponse par rapport à une commande P&O classique[14-15].

En résumé, cette méthode s'avère être très performante lors de changement des conditions climatiques, cependant sa précision en statique est fortement liée à la complexité de la table de vérité employée entraînant la nécessité du choix obligatoire d'un microcontrôleur ayant une grande capacité de calculs tenant compte des nombreuses disparités des paramètres électriques du panneau.

III-8-6- Les techniques MPPT de réseaux de neurones artificielle:

La technique MPPT de réseaux de neurones artificielle est, elle aussi, de plus en plus utilisée, car elle offre une grande alternative pour résoudre des problèmes complexes. Ces dernières années, l'utilisation de cette méthode dans divers domaines d'application ne cesse d'augmenter car elle fonctionne à partir d'une boîte noire qui n'exige pas d'informations détaillées sur le fonctionnement du système. Elle établit des relations entre les variables d'entrée et de sortie en analysant les précédentes données mémorisées. Un autre avantage est qu'elle peut traiter des problèmes d'une grande complexité grâce à des paramètres interdépendants.

Les réseaux de neurones sont composés généralement de trois couches différenciées, nommées :

- Couche d'entrée (Input layer),
- Couche cachée (Hidden layer),

- Couche de sortie (Output layer).
-

Comme le montre la figure (III-17).

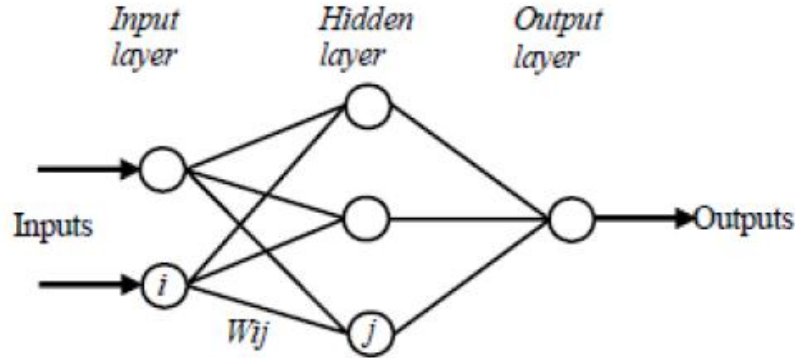


Figure III-17 exemple d'un réseau de neurones

Le nombre de nœuds au niveau des différentes couches est une variable en fonction du degré d'apprentissage souhaité et de la précision de la commande souhaitée. Pour une commande MPPT, les variables d'entrées peuvent donc être les paramètres caractéristiques d'un GPV (V_{co} , I_{cc}) associées ou non à des données atmosphériques comme la température. Ou plusieurs signaux de référence comprenant au moins le rapport cyclique permettant de commander le CS pour fonctionner le plus souvent possible au PPM. La qualité de la recherche du PPM dépend essentiellement de l'algorithme utilisé dans la couche cachée et de la construction proprement dite du réseau. Ainsi, L'importance entre deux nœuds de la valeur du poids choisi W_{ij} est à prendre en compte.

Éventuels, les poids W_{ij} doivent être initialement déterminés avec le plus de soin possible à travers des procédures d'apprentissage laborieuses et spécifiques à chaque GPV, chaque site d'implantation et chaque type de charge. De plus, cet apprentissage doit être révisé régulièrement (typiquement chaque mois) pour mettre à jour les relations entre les entrées et les sorties du réseau. Ce qui rend cette commande fastidieuse en entretien et en maintenance.

Bien qu'il existe une grande quantité de ces commandes MPPT dans la littérature, nous ne connaissons pas d'application industrielle les utilisent [15].

III-9- Conclusion :

Dans le présent chapitre nous avons abordé les bases de poursuite la puissance maximale. Après avoir donné un aperçu sur les différents modes de connexion du Générateur PV-Charge et types de commandes MPPT et la classification des différentes techniques de poursuite du point de puissance maximale (MPPT).

Nous nous sommes intéressés plus dans ce que suit particulièrement à l'application des trois méthodes à savoir la méthode de perturbation puis observation, la méthode de la conductance incrémentale et la méthode de la fraction de la tension en circuit ouvert .

Chapitre IV
Résultats & Etude
comparative

IV -1- Introduction :

Le branchement d'une charge à un générateur photovoltaïque est le mode de couplage le plus simple qui soit. Le point de fonctionnement dans ce cas se situe à l'intersection de la droite de charge et la caractéristique $I-V$ du générateur. Ce point ne peut pas coïncider avec le point de puissance maximale ; il s'ensuit une perte de puissance maximale du système.

Ce problème peut être résolu soit par le changement de la configuration du générateur photovoltaïque, soit par l'adjonction d'un dispositif de recherche de point de puissance maximale placé entre le générateur et la charge pour assurer l'adaptation d'impédance. Dans ce qui suit, cette dernière possibilité est développée.

L'exploitation optimale de l'énergie électrique disponible aux bornes du générateur photovoltaïque peut être contributive à la réduction du coût global du système. Il existe plusieurs techniques pour satisfaire ce but .

Dans ce chapitre, nous avons traité trois (3) techniques de recherche du point de puissance maximale (PPM) du générateur photovoltaïque qui sont les suivantes :

- 1) La technique Perturbation puis observation (P&O : Perturbe-and-Observe) ;
- 2) La technique de L'Incrémentation de la Conductance (Incrémental Conductance) ;
- 3) La technique de la Fraction de la tension en circuit ouvert.

IV -2- Discussion des Résultats :

Les trois méthodes suscitées ont été programmées sous l'environnement Matlab. Après exécution des différents programmes les résultats sont les suivants:

IV -2-1- Résultats de la méthode de perturbation puis observation:

L'algorithme de la figure III-9 est converti en programme et après exécution, nous avons trouvé les résultats indiqués sur les figures (IV-1,2,3). Cette méthode a la particularité d'avoir une structure de régulation simple, et peu de paramètre à mesurer. Il opère en perturbant périodiquement la tension du panneau, et en comparant la puissance précédemment délivrée avec la nouvelle après perturbation, en suivant l'organigramme de la méthode suscitée.

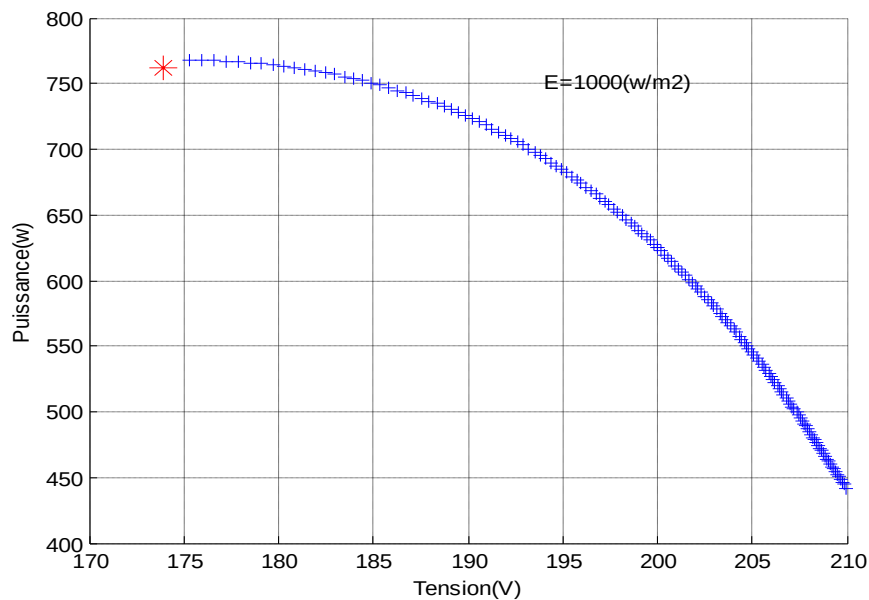


Figure IV-1 la variation de puissance en fonction de la tension

Le point de la puissance maximale a comme coordonnées ($V = 174 \text{ V}$, $P = 760 \text{ W}$) pour un éclairage fixe égale à 1000 W/m^2 .

Des différents tests ont été opérés du programme pour des différents niveaux d'éclairage, et à chaque variation d'éclairage, le point de puissance maximale est suivi comme le montre la figure qui suit

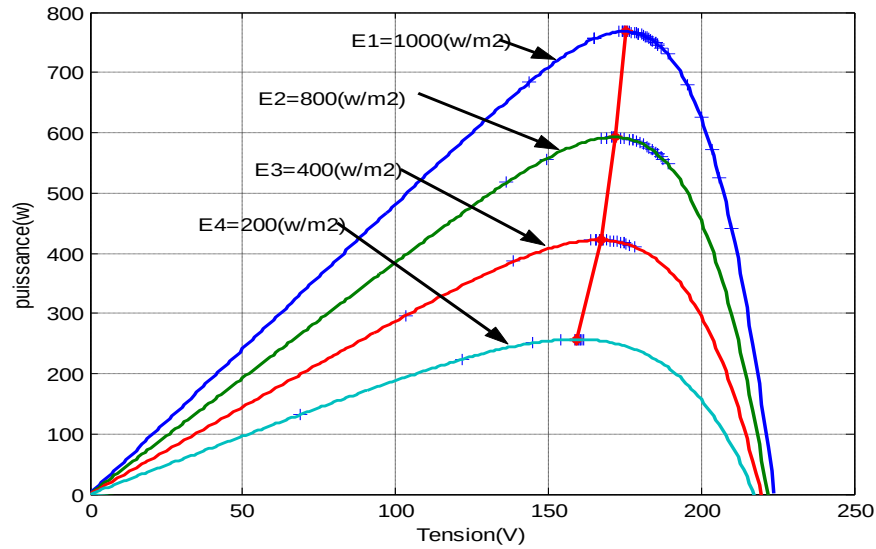


Figure IV-2 Poursuite du point de puissance maximale par (P&O) pour l'éclairement variable

La variation de la puissance en fonction du rapport cyclique du hacheur est illustrée sur la figure (IV-3), pour un éclairement fixe égale à 1000 W/m^2 .

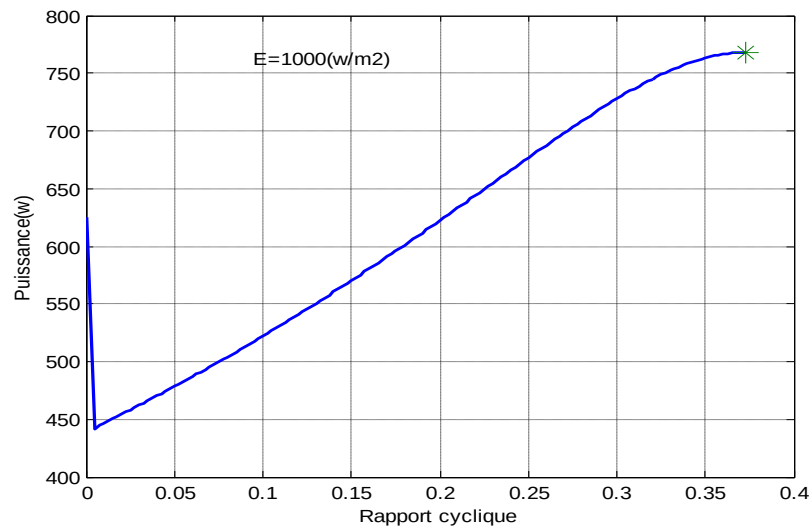


Figure IV-3 La variation de la puissance en fonction du rapport cyclique

IV -2-2- Résultats de la méthode de l'incrémentation de la conductance :

On a dit précédemment que cette méthode utilise l'incrémentation de la conductance vue par la source. Les tensions et courants du panneau sont lus par des capteurs, de telle manière que le contrôleur peut calculer la conductance et la conductance incrémentale, et décide sur la direction de l'incrémentation, jusqu'à leur égalité.

L'algorithme de la figure (III-12) est converti en programme et après exécution, nous avons trouvé les résultats indiqués sur les figures IV-4, 5, 6.

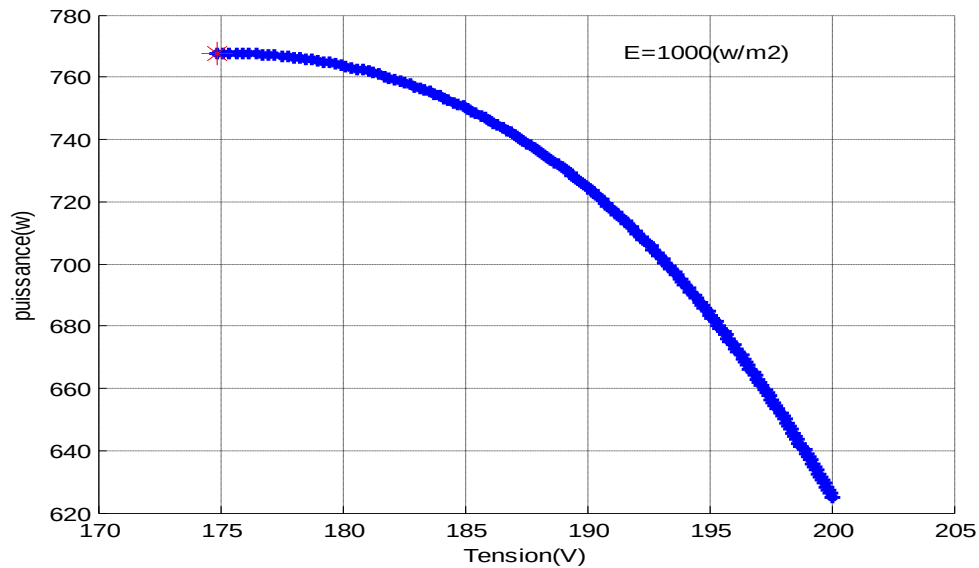


Figure IV-4 La variation de la puissance en fonction de la tension vers le PPM

Le point de la puissance maximale a comme coordonnées ($V=175 \text{ V}$, $P=765 \text{ W}$) pour un éclairement fixe égale à 1000 W/m^2 .

Des différents tests ont été opérés du programme pour des différents niveaux d'éclairement, et à chaque variation d'éclairement le point de puissance maximale est suivi comme le montre la figure qui suit

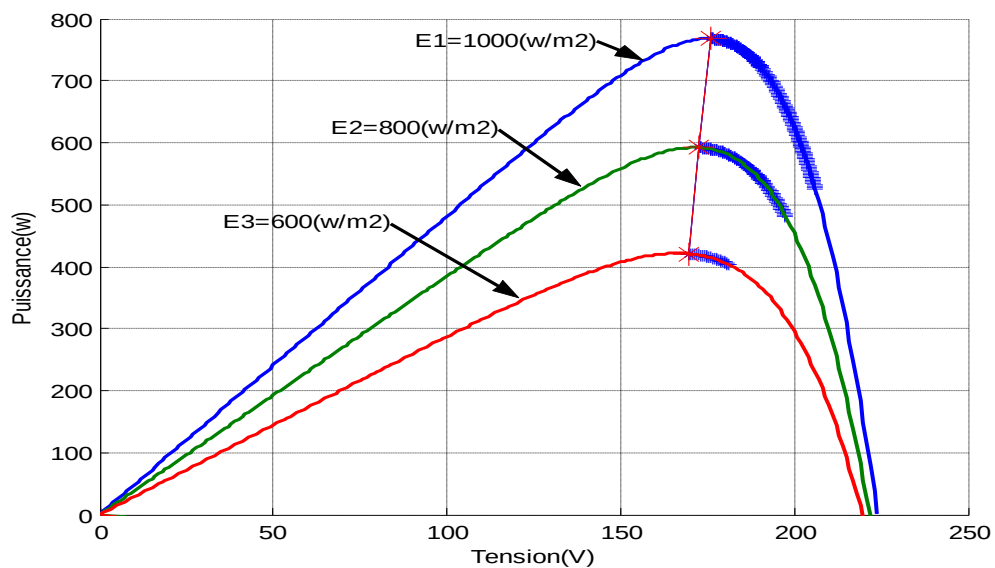


Figure IV-5 Poursuite du point de puissance maximale pour un éclairement variable

La variation de la puissance en fonction du rapport cyclique du hacheur est illustrée sur la figure (IV-6), pour un éclairement fixe égale à 1000 W/m^2 . Cette variation est presque linéaire jusqu'à l'arrivée du point de puissance maximale.

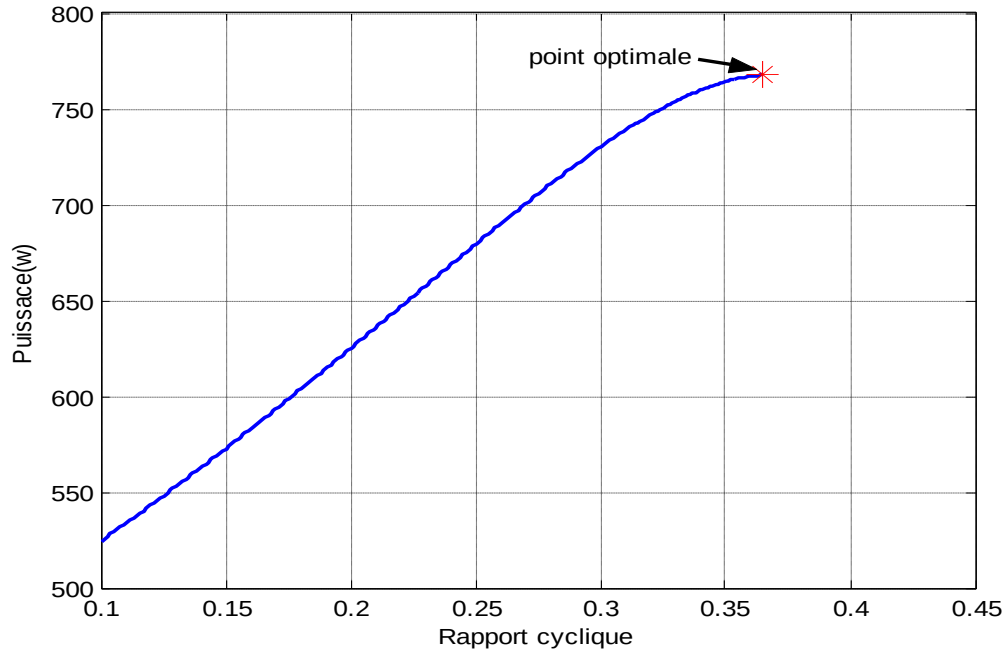


Figure IV-6 La variation de la puissance en fonction du rapport cyclique

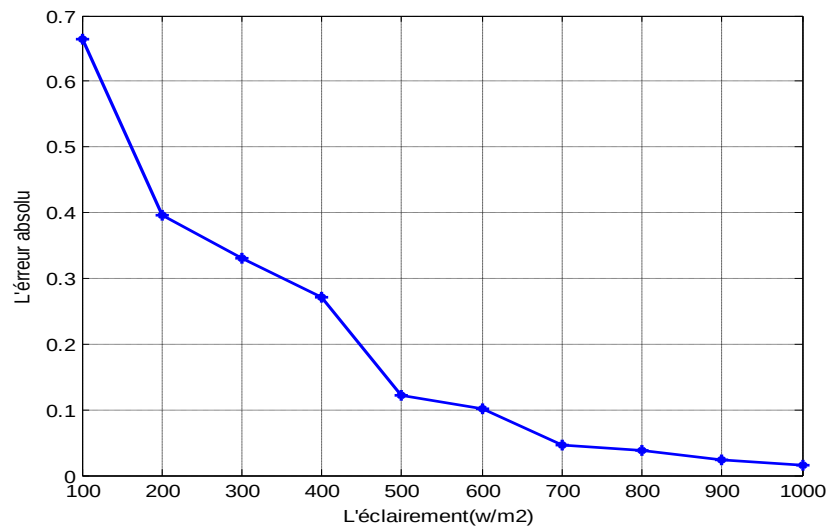


Figure IV-7 La variation de l'erreur absolue en fonction de l'éclairement

La figure (IV-7) montre clairement que l'erreur diminue avec l'augmentation du niveau de l'éclairement

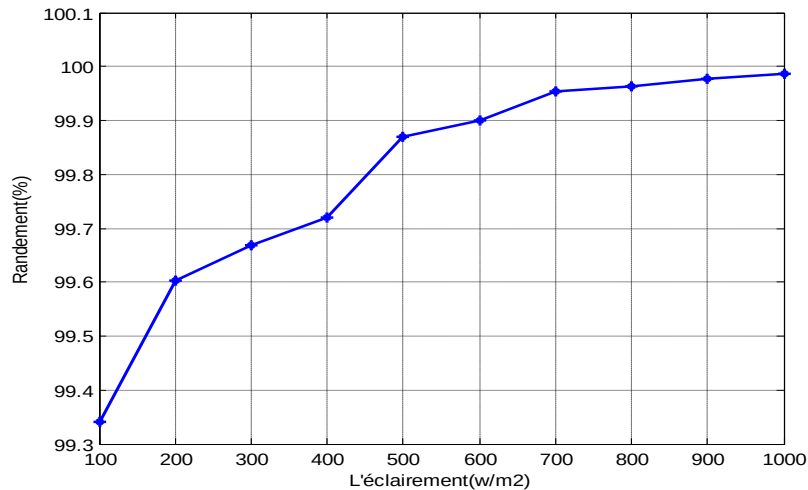


Figure IV-8 La variation de rendement en fonction de l'éclairement

Cette figure illustre la variation du rendement de la méthode de la conductance incrémentale en fonction de l'éclairement, il est clair que le rendement est à un niveau élevé [99.3% , 99.99%]. Il atteint son max à l'éclairement $E = 1000 \text{ W/m}^2$.

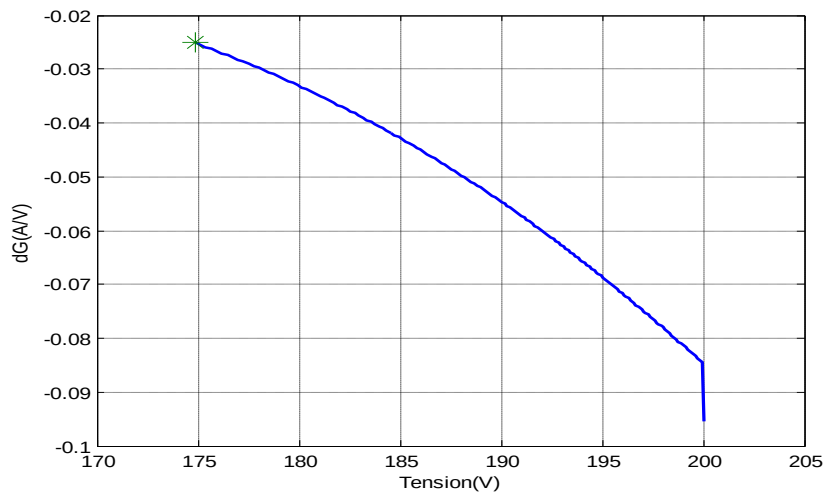


Figure IV -9 La variation de la conductance incrémentale en fonction de la tension

Suivant la nature de la charge et le convertisseur utilisé (hacheur parallèle), les points de poursuite se trouvent à droite du point optimal, c'est-à-dire: $dP / dV < 0 \Rightarrow dI / dV < -I / V$ donc on diminue la tension vers PPM, par suite l'augmentation de α jusqu'à $|dG| = |G| = 0.0251$.

IV -2-3- Résultats de la méthode de fraction de la tension du circuit ouvert: :

Nous avons dit précédant que, la recherche du point de puissance maximale se fait à partir d'une tension de référence calculé à partir de la tension du circuit ouvert , si la tension mesurée est inférieure à la tension de référence ,on augmente le rapport cyclique α , dans le cas contraire on diminue le rapport cyclique α , Les résultats de programmation sont montrés dans les figures suivantes :

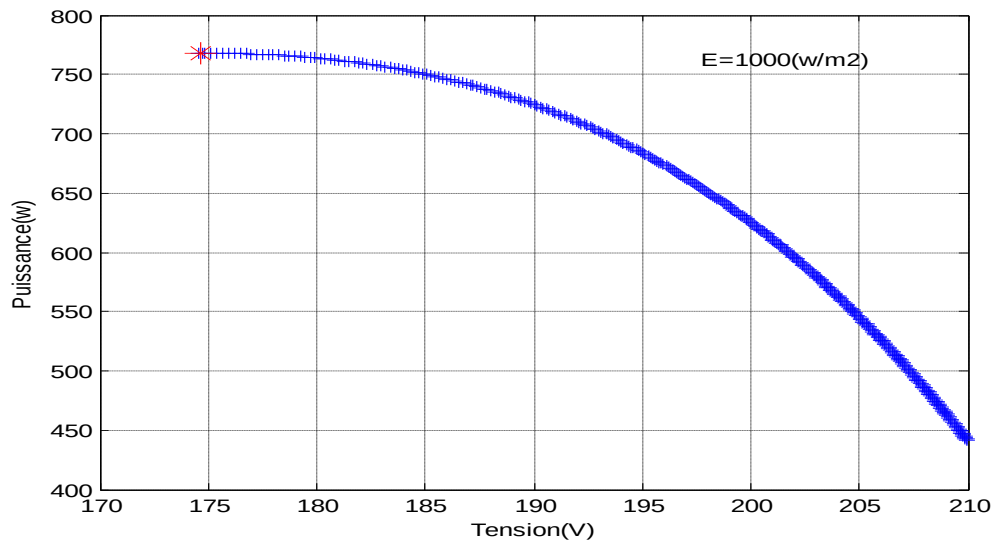


Figure IV-10 La variation de la puissance en fonction de la tension vers le PPM

Le point de la puissance maximale a comme coordonnées ($V= 174.5$ V, $P= 765$ W) pour un éclairage fixe égale à 1000 W/m².

Des différents tests ont été opérés du programme pour des différents niveaux d'éclairage, et à chaque variation du point de puissance maximale est suivi comme le montre la figure qui suit.

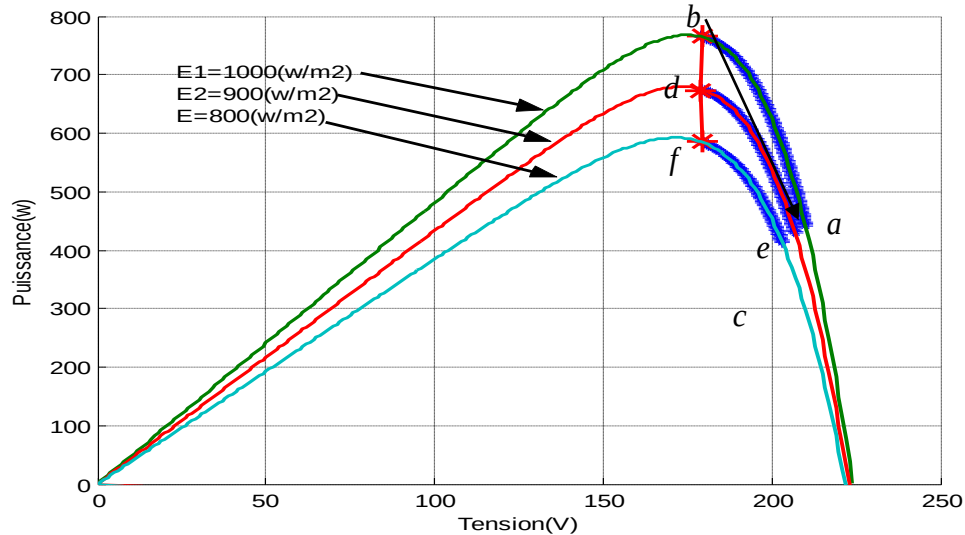


Figure IV-11 Poursuite du point de puissance maximale pour un éclairement variable

IV -2-4- Interprétation :

On démarre avec $\alpha = 0$ (le point a), avec les conditions climatiques standard.

Pour une charge résistive $R=100\Omega$ connectée à un hacheur parallèle, le point de fonctionnement se trouve à droite du point optimale (PPM) ou $V_{MPP}=174.5\text{ V}$, $P_{MPP}=765\text{ W}$ ($E=1000\text{ w/m}^2$), on se dirige vers ce point, en augmentant α se qui veut dire diminué la tension avec des pas $\Delta\alpha$ constantes figure (IV-11).ce qui permet de montrer une bonne adaptation de la charge : la résistance(R_g) vue par le panneau photovoltaïque est : $R_g=R (1- \alpha) ^2$, par suite pour diminuer R_g afin de se diriger vers le PPM on augmente α .

En variant l'éclairement à température constante ($T=25^\circ\text{C}$), les points suivent le chemin (b-c-d-e-f), à partir de l'éclairement ($E=1000\text{w/m}^2$) jusqu'à l'éclairement ($E=800\text{ w/m}^2$) figure(IV-11).

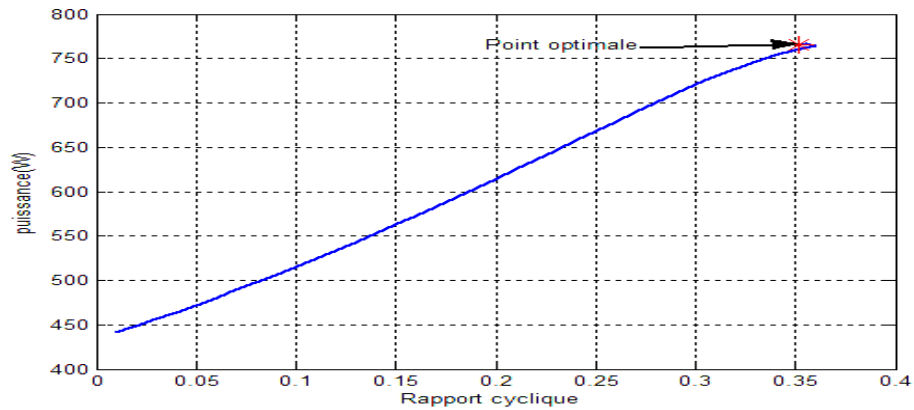


Figure IV-12 La variation de la puissance en fonction du rapport cyclique

A partir de la figure (IV-12), il y a une relation proportionnelle entre la puissance et le rapport cyclique ($\alpha_{opt} = 0.35$).



L'erreur absolue

Elle est donnée par la relation suivante :

$$err(\%) = \left(\frac{P_{optimale} - P_{calcul \acute{e}}}{P_{optimale}} \right) \cdot 100$$

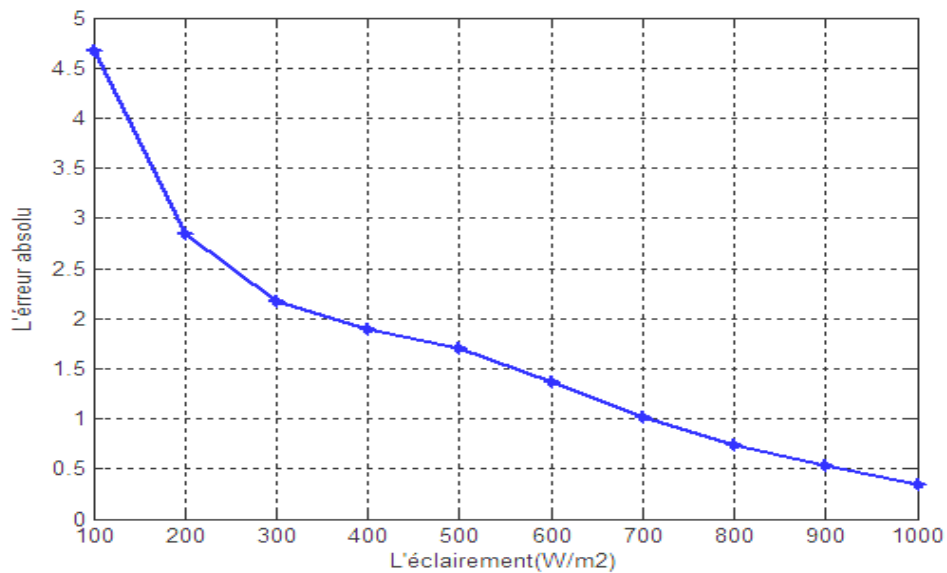


Figure IV-13 La variation de l'erreur absolue en fonction de l'éclairement

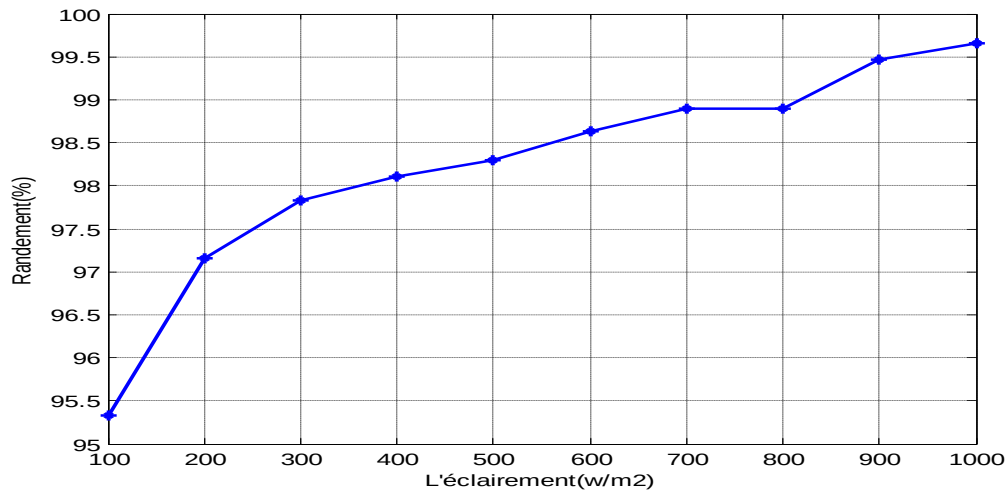


Figure IV-14 La variation de rendement en fonction de l'éclairement

La Figure (IV-13) montre la variation de l'erreur absolue en fonction de l'éclairement, elle est minimale pour les grandes valeurs de l'éclairement, puis elle augmente considérablement vers les valeurs grandes pour les petites valeurs d'éclairement ainsi que pour le rendement figure (IV-14) il augmente avec l'augmentation de l'éclairement du [95.3% , 99.6%]

IV -3 - Etude comparative des trois algorithmes:

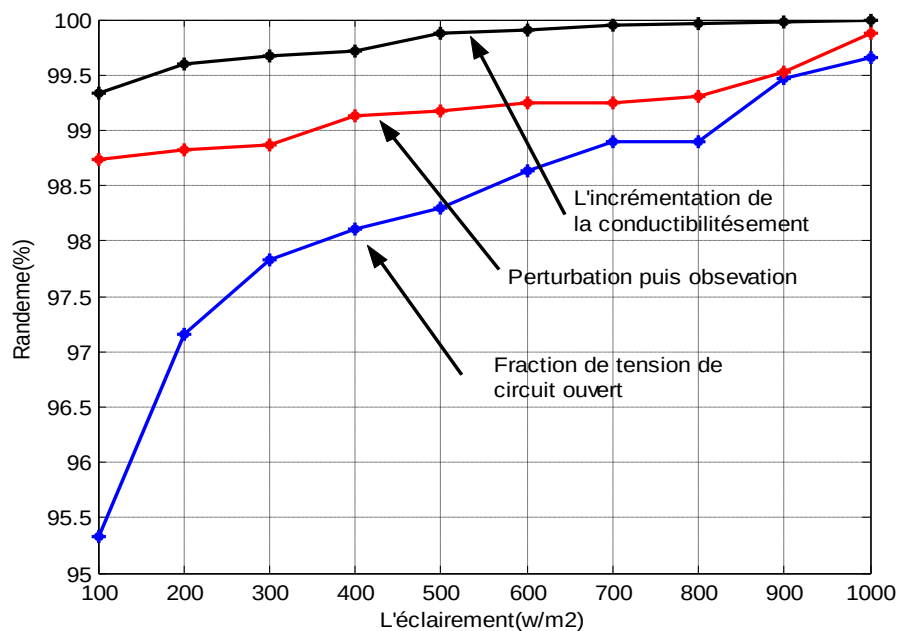


Figure IV-15 Comparaison des rendements entre les trois méthodes

Techniques	La méthode de fraction de la tension de circuit ouvert	la méthode de Perturbation puis observation	La méthode de l'incrémental de la conductibilité
Nombre d'itération	49	150	171
La valeur moyenne de rendement	98.2273	99.1930	99.7981

Tableau IV-1 comparaison de nombre d'itération et la valeur moyenne du rendement Entre les trois algorithmes

A partir du tableau et figure précédent, la méthode de la conductance incrémentale est la plus efficace par rapport aux deux autres méthodes.

Pour la technique perturbation puis observation elle est efficace pour des changements lents d'éclairements, mais avec des pertes de puissance dues à l'oscillation autour du PPM ; ces pertes risquent d'être encore plus importantes en cas de conditions météorologiques qui fluctuent rapidement (comme une journée nuageuse).

De telles conditions météorologiques posent un grand problème pour la recherche du PPM quelque soit l'algorithme utilisé, en effet afin que celui-ci puisse être efficace, il est nécessaire que le convertisseur statique fonctionne en régime établi avant que de nouvelles perturbations soient effectuées.

vu le nombre d'itérations requis pour atteindre le PPM, la technique de la fraction de la tension de circuit ouvert est le plus rapide .

IV -4- Conclusion :

Dans ce chapitre, nous aurons présenté trois méthodes de poursuite de la puissance maximale à savoir la technique de l'incrémentation de la conductance et la technique de perturbation puis observation et en fin la technique de la fraction de la tension de circuit ouvert. Et nous avons retenu que l'algorithme de l'incrémentation de la conductance se caractérise par un rendement supérieur relativement à ceux des autres algorithmes, Perturbation puis observation et fraction de la tension de circuit ouvert.

Notons que cet algorithme est trop lent à retrouver le nouveau point de fonctionnement optimal comparativement avec les deux autres méthodes

CONCLUSION GÉNÉRALE

Le travail qu'on a présenté porte 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 par différentes méthodes. Dans un premier temps, on a donné des généralités sur les systèmes PV, principe de l'effet PV, cellule PV. Ainsi que le générateur photovoltaïque et leurs performances.

On a étudié, dans un deuxième temps, quelques types des convertisseurs DC-DC, utilisés dans les systèmes photovoltaïques. Comme l'hacheur dévolteur, l'hacheur survolteur. Ainsi, on a décrit le mécanisme de la poursuite pour l'extraction de la puissance maximale sous différentes conditions de fonctionnement. On a comparé aussi les performances des trois méthodes MPPT basées sur la contre réaction de la puissance, comme la méthode de la conductance incrémentale, la méthode de perturbation puis observation et la méthode de la fraction de la tension de circuit ouvert.

La comparaison à montrer que la méthode de la conductance incrémentale appliquée au système PV pour la poursuite du point de puissance maximale a donné un rendement plus élevée que les deux autres méthodes et qui est presque constant proche du 100%.

Ces résultats, forts intéressants, montrent que l'utilisation de la commande MPPT permet d'améliorer d'une manière considérable le rendement des installations photovoltaïques.

Comme perspective nous proposons de développer d'autres méthodes de poursuite de la puissance maximale basées sur l'utilisation des techniques d'intelligence artificielle comme la logique floue, les réseaux de neurones artificiels et les réseaux neuro-flous pour la commande du convertisseur.

Bibliographie

[1] R. Andoulsi :

“étude d'une classe de systèmes photovoltaïques par une approche bond graph modélisation, analyse et commande ”, Thèse de doctorat université des sciences et technologies de Lille 2001.

[2] O. Gergoud :

" Modélisation énergétique et optimisation économique d'un système de production éolien et photovoltaïque couplé au réseau et associé à un accumulateur ", Thèse de doctorat de l'école normale supérieure de Cachan 2001.

[3] D. Bellala :

“ contribution à l'optimisation des systèmes de conversion d'énergie application aux systèmes photovoltaïques ”, Thèse de doctorat université de Batna 2010.

[4] Michel Capderou :

" Atlas Solaire de l'Algérie ", Tome 1, volume 1,2, OPU, 1987

[5]: “Les énergies renouvelables en Algérie.”

Ubifrance et les Missions Economiques, Actualisation du 14 juillet 2010

[6] M. Djarallah :

« Contribution à l'étude des systèmes photovoltaïques résidentiels couplés au réseau électrique », Thèse de Doctorat, Université de Batna, Algérie, 2008.

[7] N. Abouchabana :

« Etude d'une nouvelle topologie buck-boost appliquée à un MPPT », Mémoire de Magistère, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, Algérie, 2009.

[8] B. Gori :

« modélisation et simulation d'un système PV adapté par une commande MPPT analogique », Mémoire d'Ingéniorat, université Ouargla, 2011.

[9] M. Adouane :

«Etude et conception d'une stratégie de commande d'un onduleur connecté au réseau électrique», Mémoire de magistère, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, Algérie, 2008.

[10] F. Chekired :

« Etude et implémentation d'une commande MPPT neuro-floue sur FPGA», mémoire de magister, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, Algérie, 2008.

[11] A. Ould mohamed yahia et al :

« étude et modalisation d'un générateur photovoltaïque » revue des Energie Renouvelables Vol.11 N° 3 2008 pp 473-483, 2008.

[12] R. Khezzar et al. :

« Comparaison entre les différents modèles électriques et détermination des paramètres de la caractéristique I-V d'un module photovoltaïque ». revue des Energie Renouvelables Vol.13 N° 3, pp 379-388, 2010

[13] T.U. Townsend :

« A Method for Estimating the Long Term Performance of Direct- Coupled Photovoltaic Systems ». MS Thesis, Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin, Madison, 1989.

[14] O. Gergaud, B. Multon, H. Ben Ahmed :

« Analysis and Experimental Validation of Various Photovoltaic System Models »7th International ELECTRIMACS Congress, Montréal, Août 2002.

[15] A. P. Hu :

“Evaluation of Micro Controller Based Maximum Power Point Tracking Methods Using dSPACE Platform”, Australian University Power Engineering Conference 2006.

[16] K. Kassmi, M. Hamlaoui et F. Olivier :

Conception et modélisation d'un système photovoltaïque adapté par une commande MPPT analogique ”, Revue des Energies Renouvelables Vol. 10 N°4 (2007) 451 – 462.

ANNEXE B :

Fiche technique d'un module SUN-XL 800 , sous ($G = 1000 \text{ W/m}^2$ et $T = 25^\circ\text{C}$)

Grandeurs	valeur
Puissance maximale	770 W
Tension au MPP (V_{mp})	175 V
Courant au MPP (I_{mp})	4.4 A
Courant de court-circuit (I_{cc})	4.82 A
Tension de circuit ouvert (V_{co})	32.9 V
Coefficient du rendement de la température	0.0049 %
Facteur de forme (FF)	0.775
Nombre de cellules en série (N_s)	10
Nombre de cellules en parallèle (N_p)	4
Coefficient de sensibilité de la tension à la température	-0.130 V/K
Coefficient de sensibilité de l'intensité à la température	+0,0038 A/K

Etude comparative des algorithmes de poursuite du point de Puissance maximale (MPPT) appliqués aux systèmes photovoltaïques.

ملخص

يركز هذا العمل على دراسة مقارنة لمجموعة من الطرق التي تتبع النقطة العظمى للاستطاعة المنتجة من طرف مولدات الألواح الشمسية (الكهروضوئية). لإنجاز هذا العمل قمنا ببرمجة ومقارنة ثلاثة طرق مختلفة وهم : طريقة الاضطراب والملاحظة ، طريقة تدرج الناقلية وطريقة القسمة على توتر الدارة المفتوحة . هذا العمل سمح لنا بمعرفة جميع العناصر المؤثرة على عملية تتبع نقطة الإستطاعة العظمى وكذلك إظهار محاسن ومساوئ كل طريقة من هذه الطرق.

الكلمات المفتاحية: تتبع نقطة الاستطاعة العظمى، نظام كهر وضوئي، مهشم تيار مستر/تيار مستمر

Résumé

Ce travail s'intéresse à l'étude comparative des différentes méthodes de la poursuite du point de puissance maximale (MPPT) appliqués aux générateurs photovoltaïques. Pour cette raison, trois méthodes ont été programmées et comparées entre elles, à savoir la méthode de perturbation puis observation « perturb and observe », la méthode de la conductance incrémentale « Incremental Conductance » et la méthode de la fraction de la tension de circuit ouvert. Ce qui nous a permis de déterminer les différents paramètres influençant le point de puissance maximale, et de montrer les performances de chaque méthode.

Mots clés : poursuite du point de puissance maximale (MPPT), système photovoltaïque PV, convertisseur DC/DC

Abstract

This work focuses on the comparative study of the different methods of the maximum power point tracking (MPPT) applied to photovoltaic generators. For this reason, three methods have been programmed and compared between them, the method of « perturb and observe », « Incremental Conductance » and the fraction of the open circuit voltage method. What allowed us to determine the different parameters influencing the maximum power point, and to show the performance of each method.

Keywords: maximum power point tracking (MPPT), photovoltaic system PV, converter DC/DC