

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche
Scientifique
UNIVERSITE MOULOU D MAMMERI DE TIZI-OUZOU



FACULTE DE GENIE ELECTRIQUE ET D'INFORMATIQUE
DEPARTEMENT D'ELECTRONIQUE

Mémoire de Fin d'Etudes

De MASTER ACADEMIQUE

Filière : Génie Electrique

Spécialité : MICROELECTRONIQUE.

Thème

Une étude comparative
entre les différents MPPT's
photovoltaïques

Présenté par : BABACI Hanane et BENKHEDDA Issaad

Mémoire soutenu publiquement le 04/07/2018 devant le jury composé de :

M^r ATTAF

M^{me} HATEM Djedjiga

M^{me} SIDI SAID Amel

M^{elle} AMARA Yasmine

Maître de Conférences B, UMMTO, FGEI, Président

Maître de Conférences A, UMMTO, FGEI, Encadreur

Maitre assistante classe A, UMMTO, FGEI, Examineur

Université de BLIDA, Co-promotrice

Année Universitaire : 2017/2018

Remerciements

Nous tenons à remercier notre promotrice Mme HATEM Djedjiga et notre co-promotrice Melle. AMARA Yasmine de nous avoir encadré, orienté, aidé et conseillé.

Nous remercions aussi Mr ATTAF.Y, Mme SIDI SAID.A d'être présents la aujourd'hui.

Nous souhaitons remercier nos enseignants au sein du département, tous les membres de nos familles

Et nos amis.

Enfin, nous remercions ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'aboutissement de notre humble travail exceptionnellement toute l'équipe du Cyber Cafe Campus France tarif étudiants.

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à :

- Ma chère mère qui a été la raison de ma réussite.*
- Mon cher père qui m'a soutenu avec tous les moyens possibles.*
- Mon frère et mes sœurs.*
- Mes amis au saint de l'institut*
- A tous ceux qui ont contribué a ma réussite de près ou de loin.*

-BABACI HANANE

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à :

- Ma chère mère qui a été la raison de ma réussite.*
- Mon cher père qui m'a soutenu avec toute manière possible.*
- Mes frères.*
- Mes amis.*

-BENKHEDDA ISSAAD

Liste des tableaux

Tableau (II-1) : tableau récapitulatif du fonctionnement des hacheurs.....	35
Tableau (III-1): Exemple d'une table de vérité pour une commande logique floue	54
Tableau (IV-1): Comparaison des techniques MPPT.	74

Liste des figures

Figure (I-1): La jonction PN et le principe de fonctionnement de la cellule PV.	3
Figure (I-2) : Circuit équivalent d'une cellule idéal.	4
Figure (I-3): Schéma équivalent de la cellule solaire d'une seule diode.....	5
Figure (I-4): Circuit électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque double diodes.	6
Figure (I-5): La connexion en série de la cellule PV.	7
Figure (I-6): La caractéristique résultante d'une connexion série de N_s cellule identique.	7
Figure (I-7): Connexion parallèle de cellules PV.....	8
Figure (I-8): Caractéristique résultante d'une connexion parallèle de N_p cellules identiques.	8
Figure (I-9) :(a)-Schémas classique d'un panneau solaire PV avec des diodes de protection.	9
Figure (I.10): Différentes technologies de cellules photovoltaïques.....	11
Figure (I-11) : Photos de cellules monocristallines (a) et multi cristallines (b).	11
Figure (I-12): le convertisseur continu-alternative.....	13
Figure (I-13): Différents régimes d'une cellule solaire selon la puissance d'éclairement.	16
Figure (I-14): Influence de la température sur les caractéristiques I(V) d'un module PV.....	17
Figure (I-15): Evaluation de la caractéristique P(V) en fonction de la température d'un module PV.....	18
Figure (I-16): Evaluation de caractéristique I (V) (a) et P (V) (b) en fonction d'irradiation.....	18
Figure (II.1): Symbole d'un convertisseur DC-DC	19
Figure (II.2): Schéma de principe d'un type d'alimentation à découpage.....	20
Figure (II.3): Schéma d'un quadripôle électrique.	20
Figure(II.4) : périodes fermeture et ouverture d'un commutateur.	21
Figure (II.5) : Schéma équivalent d'un hacheur dévolteur.....	22
Figure (II.6): Les deux configurations d'un convertisseur Buck suivant l'état de l'interrupteur	22
Figure (II.7) : Chronogrammes de courant et tension d'un hacheur buck.....	23
Figure (II.8): Formes d'ondes courant/tension dans un convertisseur Buck.	23
Figure (II.9): Formes d'ondes courant/tension dans un convertisseur Buck en conduction discontinue.	25
Figure (II.10) : Schémas équivalents du hacheur dévolteur.....	27
Figure (II.11): Schéma équivalent d'un hacheur survolteur.	29
Figure(II.12): Chronogrammes de courant et tension d'un hacheur boost.	29
Figure (II.13) : Formes d'ondes courant/tension dans un convertisseur Boost.	29
Figure (II.14): Schéma électrique d'un hacheur boost fermé.	31
Figure (II.15) : Schémas équivalents du hacheur survolteur.....	31
Figure (II.16) : Schéma équivalent d'un Convertisseur dévolteur-survolteur.....	32

Liste des figures

Figure (II.17) : Schéma électrique d'un hacheur buck- boost.	33
Figure (II.18): Chronogrammes de courant et tension d'un hacheur buck-boost.	33
Figure (II.19) : Schéma électrique d'un hacheur buck- boost fermé.	34
Figure (II. 20) : Schéma électrique d'un hacheur buck- boost ouvert.	34
Figure (III-1): Schéma synoptique d'une commande MPPT.	38
Figure (III-2): Principe de la première commande MPPT numérique.	39
Figure (III-3): Principe de fonctionnement d'une commande MPPT.	40
Figure (III-4): Changement d'éclairement et conséquence sur les courbes de puissance d'un GPV ainsi que sur l'adaptation source-charge.	41
Figure (III-5): Classification de la technique MPPT couramment utilisée.	42
Figure (III-6): Recherche PPM avec la méthode (P&O).[....	43
Figure (III-7): Organigramme de l'Algorithme MPPT de la Perturbation & Observation (P&O).	43
Figure (III-8): Positionnement du point de fonctionnement suivant le signe de la dérivée de la conductance G.	45
Figure (III-9): Algorithme d'une commande MPPT basée sur la méthode Incrément de Conductance(INC).	46
Figure (III-10): Fonctionnement d'une commande MPPT de type "IncCond" illustré sur une chaîne élémentaire de conversion PV.	47
Figure (III-11): Relation entre la puissance du GPV et le rapport cyclique du convertisseur statique.	48
Figure (III-12): Algorithme type de la commande Hill Climbing.	49
Figure (III-13): Schéma de principe de la commande Hill Climbing.	49
Figure (III-14): Organigramme de l'algorithme FCO.	51
Figure (III-15): Organigramme de l'algorithme FCC.	52
Figure (III-16): Schéma bloc de l'algorithme à base de la logique floue.....	53
Figure (III-17): Fonctions d'appartenances de : (a) L'entrée E ; (b) L'entrée CE et (c) La sortie $d\alpha$	55
Figure (III-18): Structure du réseau de neurones artificiels pour MPPT	58
Figure (IV-1): Convertisseur dévolteur (abaisseur) sous Matlab/Simulink.	63
Figure (VI-2): Convertisseur survolteur (élevateur) sous Matlab/Simulink.....	63
Figure (IV-3): Convertisseur abaisseur- élevateur sous Matlab/Simulink.....	64
Figure (IV-4): Courbes de tension, courant d'entrée/sortie du convertisseur élevateur.	64
Figure (IV-5): Courbes de tension, courant d'entrée/sortie du convertisseur abaisseur.	65

Liste des figures

Figure (IV-6): Courbes de tension, courant d'entrée/sortie du convertisseur abaisseur.	65
Figure (IV-7): connexion directe du panneau PV à une charge variable.	68
Figure (IV-8): Caractéristiques I(V) et P(V) du panneau solaire à une température $T = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ et à différentes valeurs d'éclairement.	69
Figure (IV-9): Caractéristiques I(V) et P(V) du panneau solaire à une irradiance de 1000W/m^2 et différentes valeurs de température.....	70
Figure (IV-10): Schéma MATLAB/SIMULINK utilisé pour comparer les commandes MPPT's.....	71
Figure (IV-11): Courant de sortie du panneau PV.	72
Figure (IV-12): Courant de sortie du hacheur boost (alimentant la charge).	72
Figure (IV-13): Tension de sortie de panneau PV	73
Figure (IV-14): Tension de sortie de hacheur boost (alimentant la charge).	73
Figure (IV-15): Puissance de sortie du panneau PV.	74
Figure (IV-16): Puissance délivrée à la charge.	75
Figure (IV-17): Courbes des courants à la sortie de boost obtenu par les différentes MPPT.	76
Figure (IV-18): Courbes des tensions à la sortie de boost obtenu par les différentes MPPT.	76
Figure (IV-19): Courbes des puissances à la sortie de boost obtenu par les différentes MPPT.	77

Liste des Symboles

E : Éclairement absorbée par la cellule

E_{ref} : Éclairement de référence ($1000\text{w}/\text{m}^2$)

e : Energie..... [J]

I_{ph} : Photo courant [A]

I_d : Le courant délivré à la diode [A]

I_0 : Courant de saturation inverse de la diode [A]

I_{cell} : Le courant fourni par la cellule [A]

I : Le courant sortant de la cellule [A]

I_s : Le courant de sortie [A]

I_{cc} : Le courant court-circuit [A]

I_L : Le courant traversant l'inductance [A]

I_{ppm} : Le courant optimal [A]

i_c : Le courant qui traverse le condensateur [A]

i_s : Le courant de sortie qui traverse le condensateur..... [A]

i_i : Le courant d'entrée qui traverse le condensateur [A]

ΔI_{Lon} : Le courant dans l'inductance durant l'état passant [A]

ΔI_{Loff} : Le courant dans l'inductance durant l'état bloqué..... [V]

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

V_s : La tension de sortie [V]

V_{co} : La Tension de circuit ouvert [V]

V_L : La tension aux bornes de l'inductance [V]

V_{ppm} : La tension optimale [V]

V_r : La tension de référence [V]

V_0 : La tension d'entrée du convertisseur [V]

V_1 : La tension de sortie inferieur du convertisseur..... [V]

V_k : La tension emmagasinée dans l'inductance. [V]

DC : Le courant continu.

AC : Le courant alternatif.

f_s : La fréquence de coupure.

f_e : Fréquence de découpage.

Liste des Symboles

M : Le rapport de conversion.

S : Interrupteur.

t : Temps(s).

T_{ds} : Temps de fermeture.

T_s : La période de commutation.

T_e : La période des impulsions.

N_s : Cellules identiques en série.

N_p : Cellules identiques en parallèle.

FF : Facteur de forme.

η : Le rendement.

δ : Coefficient empirique.

C : Le potentiel thermodynamique.

L : l'inductance.

K : La constante Boltzmann ($1,381 \cdot 10^{-23}$ j/k).

q : La charge d'électron ($1,602 \cdot 10^{-19}$ C).

T_C : La Température absolue [°C]

R_0 : La résistance interne de la diode [Ω]

R_S Et R_P : La résistance série et la résistance parallèle [Ω]

R_{sh} : La résistance de shunt..... [Ω]

T : La température absolue..... [°C]

n_1 Et n_2 : Les facteurs de puretés de la diode.

P_{IN} : La puissance lumineuse incidente [W]

P_{max} : La puissance maximale [W]

P : La puissance..... [W]

MPPT : Maximum Power Point Tracking.

PPM : Point de puissance maximal.

α : Le rapport cyclique.

GPV : Générateur photovoltaïque.

PV : Photovoltaïque.

P&O : Perturbation et observation.

Liste des Symboles

INC : Incrémentation de la conductance.

G : La valeur de la conductance.

dG : Variation élémentaire de la conductance.

dI_{pv} : Variation élémentaire du courant [A]

dV_{pv} : Variations élémentaires de la tension [V]

dP_{pv} : Variation élémentaire de la puissance [W]

k : Facteur de tension/courant dépendant de la caractéristique de la cellule PV.

FCC : Algorithme à base de la mesure d'une fraction du courant I_{cc} .

FCO : Algorithme à base de la mesure d'une fraction de la tension (V_{co}).

FLO : Algorithme à base de la logique floue.

NB : Grand négatif (Négative Big).

NS: Petit négatif (Négative Small).

ZE: Zéro.

PS: Petit Positif (positive Small).

PB : Grand positif (Positive Big).

RNA : Réseau Neurones Artificiels.

CdTe : le tellure de cadmium.

CIS : le sélénure de cuivre et d'indium.

CIGS : galium

Sommaire

Chapitre I : généralités sur les systèmes photovoltaïques

I.1. Introduction.....	1
I.2. Historique.....	1
I.3. Le système Photovoltaïque	2
I.3.1. Les différentes méthodes des modèles électriques d'une cellule PV	3
I.3.1.1. Le modèle idéal	4
a. Le modèle à une seule diode	4
b. Le modèle à double diode	5
I-3-2- L'association des cellules solaire	7
a. Association en série	7
b. Association en parallèle	8
I.3.3. Le rôle des diodes anti-retour et by-pass	9
I.4. Classification des modules photovoltaïques	9
I.4.1. Classification selon la taille	10
I.4.2. Classification selon la technologie de cellule photovoltaïque	10
I.4.2.1. Silicium cristallin	11
I.4.2.2. Silicium amorphe	11
I.4.2.3. Cellules organiques	12
I.4.2.4. Cellules Composites (CIS, CIGS et CdTe)	12
I.5. Les composants d'une installation photovoltaïque	12
I.5.1. Système de stockage (batterie)	12
I.5.2. Les convertisseurs continu- continu DC/DC (Les Hacheurs)	12
I.5.3. Les convertisseurs DC/AC(les onduleurs)	13
I.5.4. Régulateurs et éléments de protection	13
I.6. Paramètres photovoltaïques	14
I.6.1. Facteur de forme (FF)	14
I.6.2. Le rendement η	14
I.6.3. Le courant court-circuit ICC.....	15
I.6.4. La tension de circuit ouvert VCO	15
I.7. L'influence de différentes conditions climatiques sur le module PV	17
I.7.1.influence de température	17
I.7.2. Influence d'irradiation	18
I.8. Conclusion	18

Sommaire

Chapitre II : les différents hacheurs utilisés dans une installation photovoltaïque

II.1.Introduction	19
II.2. Les convertisseurs DC-DC ou hacheurs	19
II.2 .1.Type des hacheurs	21
II.2.1.1. Hacheur dévolteur (buck)	22
a. Fonctionnement	22
a.1. Conduction continue	23
a.2. Conduction discontinue	25
a.3. Modèle mathématique équivalent	27
II.2.1.2.Hacheur survolteur	29
a.Fonctionnement	29
b. Modèle mathématique équivalent	31
II.2.1.3. Hacheur dévolteur-survolteur	33
a. Fonctionnement	33
b. Modèle mathématique équivalent	33
II.3.2. Tableau récapitulatif du fonctionnement des hacheurs	36
II.4.Conclusion	36
Chapitre III : Etat de l'art sur les différents algorithmes MPPTs.	
III.1.Introduction	37
III.2.1. Définition	37
III.2.2. Historique	38
III.2.3. Les premiers types de commande MPPT	38
III.3. Principe de fonctionnement d'une MPPT	40
III.4.Classification des techniques MPPT'S	42
III.4.1. Les techniques directes	42
a. Méthode perturbation et observation (P&O)	42
b. La méthode d'incrémentation de la conductance (INC)	44
c.La méthode "Hill Climbing"	48
III.4.2.Les techniques indirectes (hors ligne)	51
a. Algorithme à base de la mesure d'une fraction de la tension(V_{co})	51
b. Algorithme à base de la mesure d'une fraction du courant I_{cc}	52
III.4.3.Les techniques intelligents	53
a. Algorithme à base de la logique floue	53

Sommaire

1.La fuzzification	54
La lecture de la table de vérité(Inférence)	56
2. Défuzzification	56
b.La technique de Réseau Neurones Artificiels(RNA)	57
III.3.4. Synthèse des commandes MPPT	59
III.3.4.1.Implémentation	59
III.3.4.2.Coût	59
III.3.4.3. Réponse dynamique	60
III.3.4.4. Flexibilité	60
III.3.4.5. Système de plusieurs maximums (effet d'ombrage)	60
III.4.5.Conclusion	60
CHAPITRE IV :Comparaison et implémentation des différents MPPT's sous MATLAB-SIMULINK	
IV. Introduction	61
IV.1.1. Description MATLAB/Simulink	61
a. Définition de MATLAB-SIMULINK.....	61
b .Composants de la bibliothèque MATLAB	62
IV.1.2. Processus de simulation sous Simulink	62
IV.2.Simulation des différents convertisseurs classiques	63
IV.2.1. Représentation des Schéma et graphes sous MATLAB-SIMULINK	63
IV.2.2.Interprétation des résultats	66
IV.2.3. Simulation de l'installation photovoltaïque	67
IV.3. L'influence de la température et l'ensoleillement sur les caractéristiques du panneau solaire	68
IV.3.1. L'influence de l'irradiation	68
IV.3.2. L'influence de la température	70
IV.4. Simulation des différents MPPT's.....	71
VI.4.1. les résultats de simulation	72
a. Les courants	72
b. Les tensions	73
c. Les puissances.....	74
IV.3.5. Comparaison entre les techniques MPPT's	75
IV.3.5.1. Résultats de simulation	75
IV.3.5.2. Interprétation des résultats	77
IV.4. Conclusion	78

Introduction générale :

Le développement et l'exploitation des énergies renouvelables ont connu une forte croissance ces dernières années. Presque toutes les énergies renouvelables sont des dérivées de l'énergie solaire : le vent, le rayonnement solaire, la force de l'eau sont des produits directs ou indirects de l'activité solaire. L'énergie photovoltaïque, basée sur la conversion du rayonnement électromagnétique solaire en électricité, représente l'une des ressources énergétiques renouvelables à part entière.

Le générateur photovoltaïque est le seul convertisseur direct pour transformer le rayonnement solaire en énergie électrique. Il doit être associé à d'autres éléments afin de constituer toute une chaîne appelé « système photovoltaïque » ou « installation photovoltaïque ».

L'énergie solaire est intermittente, parmi les problèmes majeurs rencontrés nous citons : le coût très élevé des capteurs mis en œuvre les changements aléatoires de l'énergie solaire reçue par le capteur durant la journée, la saison et l'année, qui est dû principalement à la variation des conditions atmosphériques « rayonnement et température », donne une énergie électrique très fluctuante durant la période d'utilisation entraînant ainsi un prix de consommation d'électricité assez élevé d'où l'étude des différents systèmes MPPTs est indispensable.

Pour cela l'objectif de notre travail est l'étude comparative des différents systèmes MPPTs dans le but d'optimiser la production (la puissance) d'une installation photovoltaïque autonome.

Notre étude est présentée en quatre chapitres :

Le premier chapitre est consacré aux généralités des systèmes photovoltaïques et leur modélisation mathématiques ainsi ces caractéristiques.

Dans le deuxième chapitre, on étudie quelques types convertisseurs DC-DC, utilisés dans les systèmes photovoltaïques autonomes, vue son importance en tant qu'adaptateur de charge, nous allons détailler la méthodologie de modélisation des convertisseurs statiques.

Le troisième chapitre présente un état de l'art des différents algorithmes MPPTs, leurs fonctionnement, les différentes études dans lesquelles ils sont utilisés et l'intérêt de leurs utilisations.

Dans le dernier chapitre nous allons faire une comparaison, une implémentation des différentes MPPTs et une simulation sous MATLAB-SIMULINK du convertisseur survolteur « boost » et les commandes MPPTs : « P&O », « INC », «Vco » et « FLC ».

Enfin nous terminons notre étude par une conclusion générale.

I.1. Introduction

Plusieurs sources d'énergie renouvelable sont disponibles dans la nature. Citant à titre d'exemple : l'énergie solaire, le vent, la biomasse, et les vagues. Sachant que, la terre reçoit une capacité énergétique de l'ordre de $1,8 * 10^{11}$ MW par an, ce qui est plusieurs milliers de fois supérieur à la consommation actuelle de toutes les sources. Ainsi, l'énergie solaire peut subvenir à nos besoins énergétiques actuels et futurs. L'énergie solaire photovoltaïque peut être donc exploitée même dans des sites isolés et joue un rôle très important dans la production d'électricité à l'échelle mondiale.

Cependant, pour bénéficier de cette énergie une étude approfondie de l'emplacement de l'installation photovoltaïque et le choix des composants à utiliser sont nécessaires afin d'avoir un bon rendement et donc minimiser les coûts de l'installation.

I.2.Historique

Le rayonnement solaire peut être converti en électricité grâce à l'effet photovoltaïque découvert par le scientifique français Edmund Becquerel en 1839[1].

En effet, le rayonnement solaire est composé des photons qui peuvent être absorbés par un matériau semi-conducteur constituant une jonction P-N nommée la cellule solaire. Ce qui provoque la génération des électrons et des trous qui permet donc à la cellule PV de délivrer un courant et donc une puissance pour alimenter une charge électrique. Pour éviter le reflet de rayonnement sur la surface de la cellule et bénéficier au maximum de l'énergie solaire la couleur commercial bleu est choisi grâce à sa nature antireflet (la couleur est due à une couche antireflet) [2].

La crise économique de 1970 qui a causé une élévation dramatique des prix des énergies fossiles a conduit la recherche scientifique pour exploiter d'autres moyens pour produire une énergie moins chère non-polluante et renouvelable. Plusieurs gouvernements incluant USA, Japon et plusieurs pays d'Europe ont commencé des projets ambitieux d'exploitation des énergies renouvelables [3].

L'efficacité et le coût de la fabrication de la cellule solaire sont les deux paramètres essentiels qui doivent être pris en considération pour avoir un bon rendement et minimiser les prix des panneaux solaires. L'efficacité des cellules solaires qui se trouvent dans les marchés est du rang de 13 à 16 % [4].

Le semi-conducteur constituant la cellule solaire peut être de technologie amorphe, silicone, silicium, cadmium, Telluride, etc. [5].

La tension délivrée par une seule cellule solaire est de l'ordre de 0.5 à 1V. Donc, on ne peut pas utiliser la cellule solaire seule. La connexion de plusieurs cellules en série augmente la valeur de la tension de sortie alors que la connexion parallèle augmente le courant de sortie.

La puissance électrique générée dépend de la température et l'ensoleillement. Donc pendant la nuit et les journées ombrées la production d'électricité est atténuée. En plus de ça, l'électricité produite a des caractéristiques non-linéaires (tension-courant) et (tension-puissance). Donc, l'utilisation d'un étage de l'électronique de puissance (hacheur ou onduleur) est indispensable afin de bénéficier des avantages de cette énergie et extraire le maximum de puissance possible du panneau solaire [6].

L'avantage major de la technologie des cellules PV est la conversion directe de l'éclairement solaire en électricité sans intermédiaire d'une partie mécanique. Mais les autres énergies renouvelables comme le vent, la biomasse et solaire thermique requièrent une partie mécanique afin de pouvoir convertir ces énergies en électricité [7].

La production d'électricité à partir des panneaux photovoltaïques a eu une grande échelle d'installation dans divers domaines d'applications :

- ✓ Les satellites ;
- ✓ Les voitures électriques ;
- ✓ L'éclairage public ;
- ✓ Pompage d'eau ;
- ✓ Les panneaux d'indications routières ;
- ✓ Alimentations des sites isolées ;
- ✓ Bateaux.

I.3. Le système Photovoltaïque

Un système photovoltaïque est constitué à partir de la connexion d'un ensemble de panneaux solaires, des hacheurs et des onduleurs, des batteries, des charges, des régulateurs (MPPT pour les hacheurs et commande des onduleurs), et des éléments de protection. Ce système peut fonctionner en mode isolé (déconnecté de réseau de distribution), ou bien en mode connecté au réseau.

Le choix de mode de fonctionnement et les composants constituant une installation photovoltaïque dépend de :

- La puissance désirée par le consommateur.
- L'ensoleillement de la région qui influe sur le rendement de l'installation.
- Le type de charge à alimenter (CC ou CA).

L'utilisation de l'électricité pour une longue période requiert l'intégration des éléments de stockage (batteries, super-capacitor ...).

La cellule solaire est l'élément de base qui constitue un système photovoltaïque, constitué par deux jonctions P-N comme le montre la figure (I-1), la connexion de plusieurs cellules en série et en parallèle permet d'augmenter la tension et le courant de sortie. Il existe plusieurs façons de modélisation de la cellule PV : modèle idéal, à une seule diode ou à double diode.

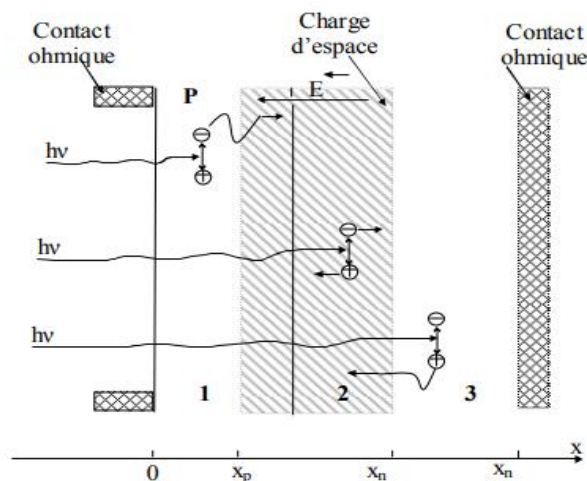


Figure (I-1): La jonction PN et le principe de fonctionnement de la cellule PV

I.3.1. Les différentes méthodes des modèles électriques d'une cellule PV

I.3.1.1. Le modèle idéal

Dans ce cas la cellule PV peut être schématisée par un générateur de courant I_{ph} en parallèle avec une diode délivrant un courant continu à sa sortie. Figure (I-2)[19 ,20].

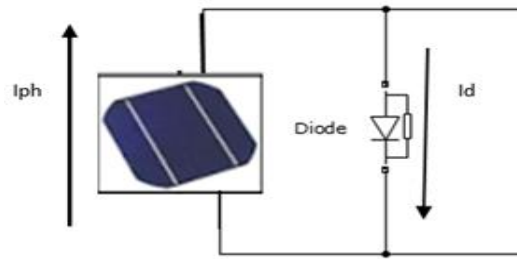


Figure (I-2) : Circuit équivalent d'une cellule idéal.

Remarque : cette résistance représente la résistance de la diode.

En utilisant la loi de Kirchhoff, le courant I délivré par la cellule est donné comme suit :

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

Avec :

I_{ph} : Le photo courant [A] proportionnelle à forte éclairement (E)

$$I_{ph} = \frac{E}{E_{ref}}(I-2)[19, 20]$$

(E : Éclairement absorbée par la cellule, E_{ref} : éclairement de référence ($1000\text{w}/\text{m}^2$)).

I_d : Le courant délivré à la diode est obtenu comme suite

$$I_d = I_0 \left[\exp\left(\frac{V_D}{V_T}\right) - 1 \right] \quad (\text{I-3})$$

I_0 : Courant de saturation inverse de la diode; $V_T: \left(\frac{KT}{q}\right)$.

a. Le modèle à une seule diode

Ce modèle est représenté par une source photo-électrique en parallèle avec une diode, une résistance de contacte et de connexion en série et une autre résistance en parallèle dite la résistance de shunt et qui représente le courant de fuite [8].

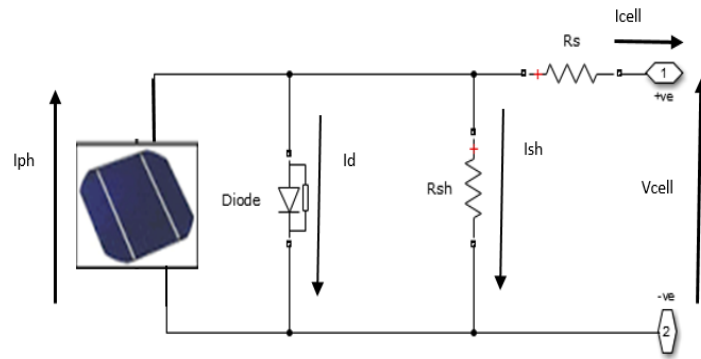


Figure (I-3): Schéma équivalent de la cellule solaire d'une seule diode.

A partir du circuit équivalent de la figure (I-3) et en utilisant la loi de Kirchhoff on peut écrire :

$$I = I_{ph} - I_0 \times \exp \frac{q(V+I.R_s)}{nkT} - 1 - \frac{V+I.R_s}{R_{sh}} \quad (I-4)[8]$$

Avec:

I: Le courant fourni par la cellule (A)

I_{ph} : Le courant de sortie de photo-générateur (A)

I_0 : Courant de saturation inverse de la diode

V: La tension aux bornes de la cellule (V)

K: La constante de Boltzmann 1.38×10^{-23} (J/K),

q: charge 1.6×10^{-19} (C).

T: Temperature (K).

b. Le modèle à double diode

La figure montre un modèle électrique de la cellule photovoltaïque prenant en compte les différents facteurs limitatifs ; on y retrouve le générateur de courant I_{Ph} , correspondant à la jonction PN de la photodiode ainsi que des résistances complémentaires séries (R_s) et parallèles (R_p) et deux diodes D_1 et D_2 . La résistance série (R_s) est due à la résistivité des différentes couches de la cellule, émetteur base et contacts métalliques (en particulier leur interface avec le semi-conducteur).

[19,20].

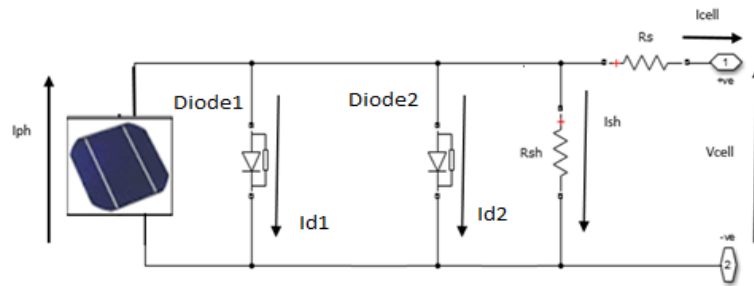


Figure (I-4): Circuit électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque double diodes.

Avec :

D_2 : La diode de recombinaison.

Le modèle mathématique qui caractérise le module photovoltaïque à double diode est donné par l'équation (I-5) [19,20] :

$$I = I_{ph} - I_{d1} \left[\exp\left(\frac{q(V+I \times R_s)}{N_s \times n_1 \times KT}\right) - 1 \right] - I_{d2} \left[\exp\left(q \left(\frac{V+R_s}{N_s \times n_1 \times KT}\right) - 1 \right) \right] - \left[\frac{V+I \times N_s \times R_s}{N_s \times R_p} \right] \quad (\text{I-5})$$

Avec :

I_{d1} et I_{d2} : Les courants de saturation des diodes.

n_1 et n_2 : Les facteurs de puretés de la diode.

R_s et R_p : La résistance série et la résistance parallèle.

T : La température absolue.

q : La charge d'électron ($1,602 \times 10^{-19}$ C).

K : Constante de Boltzmann ($1,380 \times 10^{-23}$ j/k).

V : La tension aux bornes de la cellule.

I : Le courant sortant de la cellule.

I.3.2. L'association des cellules solaire

Comme cité dans le paragraphe précédent la tension délivrée par une seule cellule solaire est de l'ordre de 0.5 à 1V. Donc plusieurs cellules doivent être associées en série et en parallèle pour avoir une puissance désirée par la charge à alimenter.

a. Association en série

Une association de N_S cellules en série permet d'augmenter la tension à leurs sorties. En conservant le même courant d'entrée. La figure (I-5) montre N_S cellules identiques en série avec un même courant de sortie I_S et une tension de sortie V_S comme dans l'équation (I-6) :

$$V_S = N_S \times V \quad (I-6)$$

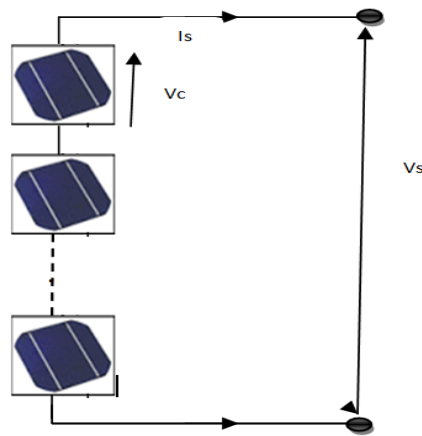


Figure (I-5): La connexion en série de la cellule PV.

b. Association en parallèle

Dans un groupement de cellules connectées en parallèle figure (I-7), les cellules sont soumises à la même tension et la caractéristique résultante de la connexion est obtenue par addition des courants à tension donnée comme indiqué par l'équation (I-7) suivante :

$$I_s = N_p * I_{cc} \quad (I-7)$$

Avec :

N_p : Cellules identiques en parallèle.

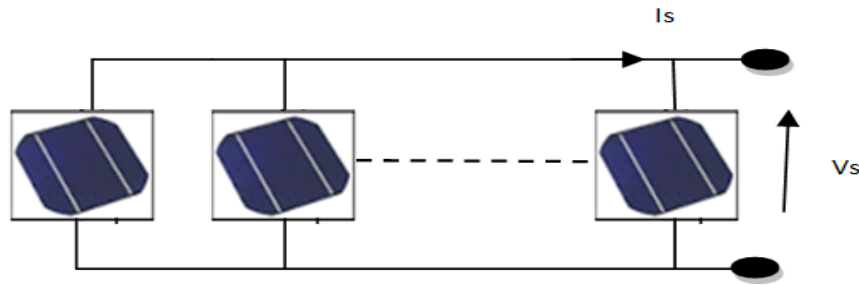


Figure (I-7): Connexion parallèle de cellules PV.

La figure (I-8) montre la caractéristique résultante (I_{PCC} , V_{PCO}) obtenue en associant en parallèle N_p cellule identique.

Comme la connexion parallèle des cellules pour la construction d'un module n'est généralement pas convenable car un grand courant nécessite une section de câblage plus grande. En plus, une tension basse occasionne des pertes relativement élevées. Pour ces raisons un groupement en série est plus approprié pour la construction des modules photovoltaïque disponible dans le marché [9].

I.3.3. Le rôle des diodes anti-retour et by-pass

L'ombrage partiel correspond à l'éclairement non-homogène sur les cellules solaires ou sur un ensemble de panneaux solaires dans une installation PV. Ce phénomène provoque une diminution de la puissance de sortie. Dans ce cas la cellule ombrée devient réceptrice plutôt que génératrice. Ce qui endommage le panneau. Donc pour éviter ceci il est évident de connecter des diodes by-pass pour une ou plusieurs cellules en parallèles pour que le courant ne circule pas dans la cellule ombrée et pour empêcher le courant de traverser dans le mauvais sens (vers le panneau), il est indispensable de connecter dans chaque branche une diode en série (diode anti-retour)[9].

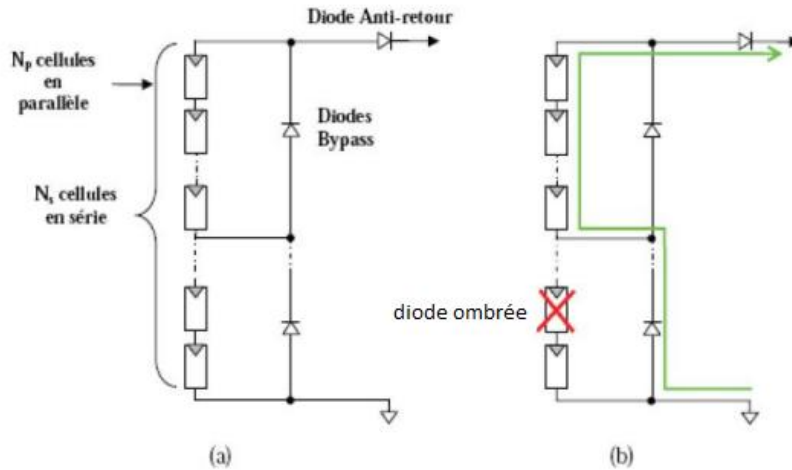


Figure (I-9) :(a)-Schémas classique d'un panneau solaire PV avec des diodes de protection.

(b)-Défaillance d'une des cellules du module PV et activation de diode de circulation I. [14].

Avec :

I : Le courant photovoltaïque des cellules.

I.4. Classification des modules photovoltaïques

Le module photovoltaïque est constitué par la connexion en série de plusieurs cellules solaires de même caractéristiques électriques (cellules identiques). Les modules PV peuvent être classifiés selon la taille et la matière utilisée pour la fabrication des cellules comme suite :

I.4.1. Classification selon la taille

Les modules photovoltaïques sont classés selon la puissance délivrée à leurs sorties en micro-puissance, faible puissance, moyenne puissance et forte puissance, comme indiqué dans le tableau suivant :




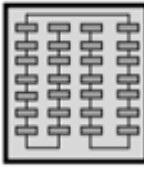
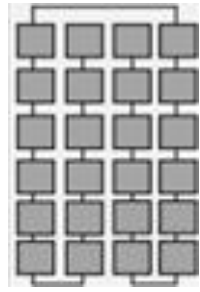
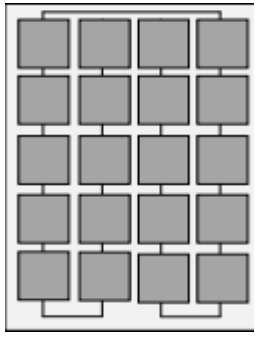
$0 - 2w_c$ Micro puissance $0-500\text{cm}^2$	$2 - 10w_c$ Faible puissance $500\text{cm}^2-0.2\text{m}^2$	$20 - 50w_c$ Moyenne puissance $0.2-0.5\text{m}^2$	$50 - 150w_c$ Forte puissance $>0.5\text{m}^2$
 Cellule solaire Type : intérieur : De 1.5 à 6V  Petit module silicium amorphe de 4 à 12V	  Module en silicium amorphe, CIS ou silicium poly cristallin De 6 à 12V	 Module en silicium cristallin, mono ou poly (et parfois CIS) 6 ou 12V	 Module en silicium cristallin, mono ou poly 12,24 et +
Calculette, montres, jouettes, mesures, téléphones d'urgence, alarmes ...	Instrumentation, signalisation routière ; stations météo, paramètre, clôtures électriques, petite électrification rurale, nautisme, caravaning	Habitat isole, électrification rurale, connexion au réseau, relais télécoms, protection cathodique, centrales solaires.	

Tableau (I.1): Classification des modules photovoltaïques selon la puissance de sortie [10].

I.4.2. Classification selon la technologie de cellule photovoltaïque

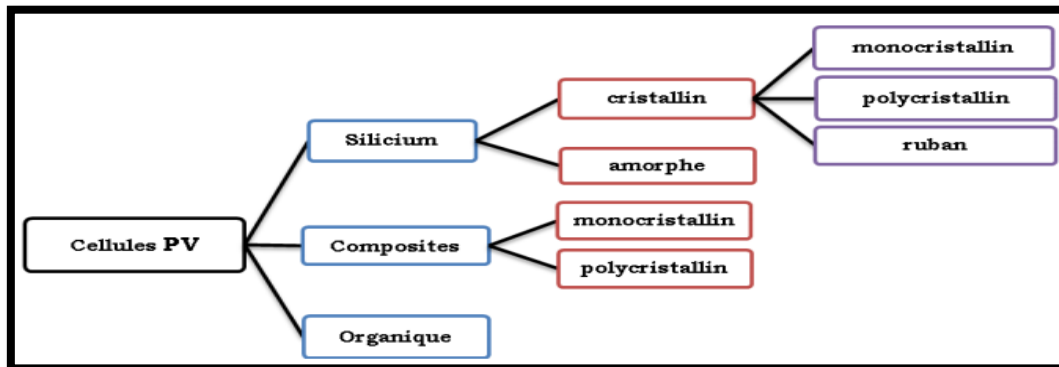
Il existe un grand nombre de technologies mettant en œuvre l'effet photovoltaïque qui sont encore en phase de recherche et développement. Les principales technologies industrialisées en quantité à ce jour sont : le silicium mono ou poly cristallin et silicium en couche mince à base de silicium amorphe ou CIS (Cuivre Indium Sélénium) [11] :

I.4.2.1. Silicium cristallin

Le silicium cristallin est l'un des matériaux le plus utilisé dans l'industrie photovoltaïque.

On site 2 différents types [11] :

- ✓ **Le silicium monocristallin** : c'est un matériau de très haute pureté. Ce type de matériau qui présente d'excellentes qualités électroniques permet la fabrication de cellules conventionnelles à haut rendement mais il est très coûteux.



Figure(I.10): Différentes technologies de cellules photovoltaïques.

- ✓ **Le silicium poly cristallin** : il est fabriqué principalement à partir d'un matériau de sources moins raffinés. C'est le matériau qui conduit au coût plus faible de watt crête.

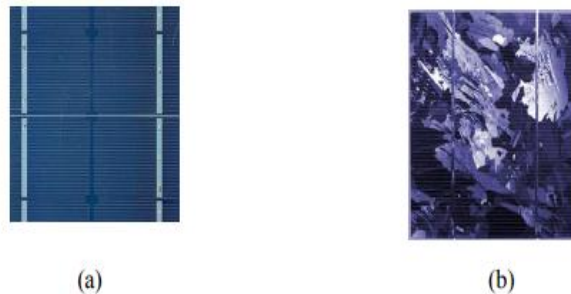


Figure (I-11): Photos de cellules monocristallines (a) et multicristallines (b).

I.4.2.2. Silicium amorphe

Une autre forme de silicium est également utilisée pour la fabrication de cellule photovoltaïque : le silicium amorphe hydrogène (a-Si-H). L'avantage du silicium est qu'il est déposé à basse température ce qui permet l'utilisation de substrats à bas coût (verre) de plus, grâce à sa pseudo-largeur de bande interdite de 1.7V et une absorption très importante, quelques microns suffisent [11].

Avec des jonctions multiples on peut atteindre des rendements de 12% à 13% au laboratoire [12].

I.4.2.3. Cellules organiques

Les cellules solaires à base de matériaux organiques ou de polymère sont caractérisées par leur faible coût, matière première illimitée, facilité de mise en œuvre, dispositifs souples ... [11].

Il existe aujourd'hui des cellules photovoltaïques organiques dont le rendement dépasse la barre de 10% [11].

I.4.2.4. Cellules Composites (CIS, CIGS et CdTe)

D'autres matériaux sont également utilisés : le tellure de cadmium (CdTe), le sélénure de cuivre et d'indium (CIS) et galium (CIGS). Ces technologies basées sur des films minces sont encore très coûteuses mais elles laissent espérer des rendements élevés et une durée de vie moins équivalente au silicium [11].

I.5. Les composants d'une installation photovoltaïque

La connexion directe d'un panneau solaire à une charge peut endommager le panneau et conduit à des pertes de la puissance, donc plusieurs composants sont inclus dans une installation PV parmi ces composants on peut citer :

I.5.1. Système de stockage (batterie)

Comme l'énergie solaire est faible durant les journées ombrées et indisponible pendant la nuit, l'utilisation des éléments de stockage est indispensable pour stocker le surplus de production pour satisfaire le besoin des charges [13].

Plusieurs types de batteries sont inclus dans les installations PV :

- Les batteries au Plomb acide.
- Les batteries au Nickel-cadmium.
- Super capacitor.

I.5.2. Les convertisseurs continu- continu DC/DC (Les Hacheurs)

Les convertisseurs **continu- continu** permettent de faire varier la valeur moyenne de la tension continue à leur sortie, le choix de l'hacheur selon le besoin de la charge en tension élevée ou courant élevé. Les hacheurs sont classés en trois grandes familles et qui sont :

- ✓ les hacheurs dévolteurs : abaissent la tension de sortie ;
- ✓ les hacheurs survolteurs : permettent d'avoir une tension de sortie élevée à celle de l'entrée ;
- ✓ les hacheurs survolteurs-dévolteurs : combinent le fonctionnement des hacheurs survolteurs et dévolteurs.

I.5.3. Les convertisseurs DC/AC (les onduleurs)

La conversion continue alternative a pour rôle la transformation d'un signal de tension (ou de courant) continu en un signal de tension (ou de courant) alternatif d'amplitude, de fréquence et de phase désirées. Cette transformation s'opère dans un convertisseur appelé onduleur Figure (I-12), aussi on distingue deux grands groupes : les onduleurs de tension et les onduleurs de courant. Ils

sont associés pour alimenter une charge à courant alternatif et connecter l'installation au réseau de distribution.

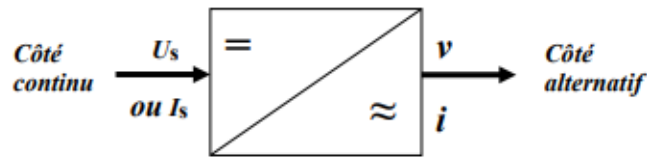


Figure (I-12): le convertisseur continu-alternative.

Il existe plusieurs types d'onduleurs utilisés dans les installations photovoltaïques dont on peut citer :

- ✓ les onduleurs monophasés ;
- ✓ les onduleurs triphasés ;
- ✓ les onduleurs multi-niveaux.

I.5.4. Régulateurs et éléments de protection

Les systèmes de régulation de charge sont des éléments d'un système PV qui ont pour but de contrôler la charge et la décharge d'une batterie afin d'en maximiser sa durée de vie. Son rôle principal est de réduire le courant lorsqu'une batterie se rapproche d'un état de charge complet, de petites bulles commencent à se former sur les électrodes positives.

A partir de ce moment il vaut mieux réduire le courant de charge non seulement pour éviter des dégâts mais aussi afin de mieux atteindre l'état de charge complet, un courant trop élevé peut provoquer une déformation des électrodes à l'intérieur, ce qui peut créer un court-circuit. Le régulateur de charge assure deux fonctions principales :

- 1-La protection des batteries contre les surcharges et décharges profondes,
- 2-L'optimisation de transfert d'énergie du champ PV et l'utilisation.

Les régulateurs de charge de système photovoltaïque autonome peuvent se classer en quatre groupes principaux :

- a- Les régulateurs de charge parallèle (shunt),
- b- Les régulateurs de charge sérient,

- c- Les régulateurs PWM,
- d- Les régulateurs MPPT (maximum power point tracking).

I.6. Paramètres photovoltaïques

I.6.1. Facteur de forme (FF)

Un paramètre important est souvent utilisé à partir de la caractéristique I(V) pour qualifier la qualité d'une cellule ou d'un générateur PV: c'est le facteur de remplissage ou facteur de forme (FF). Ce coefficient représente le rapport entre la puissance maximale que peut délivrer la cellule notée P_{MAX} et la puissance formée par le rectangle $I_{CC} \times V_{OC}$ plus la valeur de ce facteur sera grande, plus la puissance exploitable le sera également. Les meilleures cellules auront donc fait l'objet de compromis technologiques pour atteindre le plus possible les caractéristiques idéales [15].

Il est défini par la relation suivante :

$$FF = \frac{P_{max}}{V_{CO} \times I_{CC}} \quad (I-8)$$

I.6.2. Le rendement η

Le rendement, η des cellules PV désigne le rendement de conversion en puissance, il est défini comme étant le rapport entre la puissance maximale délivrée par la cellule et la puissance lumineuse incidente, P_{IN}

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{IN}} = \left(\frac{FF \times V_{CO} \times I_{CC}}{P_{IN}} \right) \quad (I-9)$$

Ce rendement peut être amélioré en augmentant le facteur de forme, le courant de court-circuit et la tension de circuit ouvert.

Le rendement de conversion est un paramètre essentiel, en effet la seule connaissance de sa valeur permet d'évaluer les performances de la cellule.

I.6.3. Le courant court-circuit I_{CC}

Il s'agit de courant de mesure lorsque le potentiel appliqué est nul. C'est le plus grand courant que la cellule peut fournir. Celui-ci est en fonction de la température, de la longueur d'onde du rayonnement, de la surface active de la cellule et de la mobilité des porteurs. Ce courant est linéairement dépendant de l'intensité lumineuse reçue.

I.6.4. La tension de circuit ouvert V_{CO}

C'est la tension aux bornes de la cellule lorsqu'elle n'est pas connectée à une charge ou lorsqu'elle est connectée à une charge de résistance infinie. Elle dépend essentiellement du type de cellule solaire (jonction PN et diode Schottky), des matériaux de l'interface active-électrode. Elle dépend aussi de l'intensité lumineuse reçue [16].

$$V_{co} = \left(\frac{KT_C}{q} \right) \log \left(\left(\frac{I_{ph}}{I_S} \right) + 1 \right) \quad (\text{I-10})$$

Avec :

C : Le potentiel thermodynamique.

K : La constante Boltzmann ($1,381 \cdot 10^{-23}$ j/kelvin).

q : La charge d'électron.

T_C : La Température absolue.

I_S : Courant de saturation inverse.

I_{ph} : Le photo courant.

On peut observer deux régimes d'après la figure (I-13) :

- **Régime des faibles éclairagements : dans ce cas $I_{ph} \ll I_S$, ce permet d'écrire :**

$$\log \left(\frac{I_{ph}}{I_S} + 1 \right) = \left(\frac{I_{ph}}{I_S} \right) \quad (\text{I-11})$$

D'où :

$$V_{CO} \approx \left(\frac{KT_C}{q} \right) \left(\frac{I_{ph}}{I_S} \right) \quad (\text{I-12})$$

C'est la zone de comportement linéaire de la cellule .La formule précédent peut s'écrire aussi [17].

$$V_{CO} = R_0 \times I_{ph} \quad (\text{I-13})$$

$$R_0 = \left(\frac{KT_C}{q \times I_S} \right) \quad (\text{I.14})$$

R_0 : La résistance interne de la diode en polarisation externe nulle(circuit ouvert)et sous faible éclairément.

- **Régime des flux lumineux suffisamment intenses pour que $I_{ph} \gg I_S$,**

$$\left(\frac{I_{ph}}{I_S}\right) \gg 1$$

D'où :

$$V_{CO} = \left(\frac{KT_c}{q}\right) \left(\frac{I_{ph}}{I_S}\right) \quad (I-15)$$

C'est le domaine de comportement logarithmique figure (I-13)

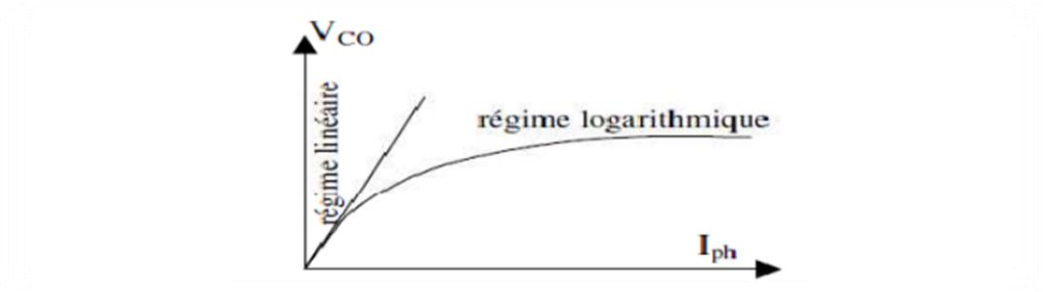


Figure (I-13): Différents régimes d'une cellule solaire selon la puissance d'éclairement.

Il est important de remarquer que cette tension augmente avec \log de I_{ph} donc avec le \log de l'illumination. En revanche elle décroît avec la température malgré le terme $\left(\frac{KT_c}{q}\right)$. En effet, le courant de saturation, I_S dépend de la surface de la diode (donc de la cellule) et des caractéristiques de la jonction : il varie exponentiellement avec la température et cette dépendance en température compense largement le terme $\left(\frac{KT_c}{q}\right)$. Donc la tension de circuit ouvert V_{CO} baisse avec la température, ce qu'on doit prendre en considération dans le dimensionnement des systèmes [18].

I.7. L'influence de différentes conditions climatiques sur le module PV

I.7.1. Influence de température

La figure (I-14) représente les courbes courant-tension pour différentes températures de fonctionnement de la cellule PV.

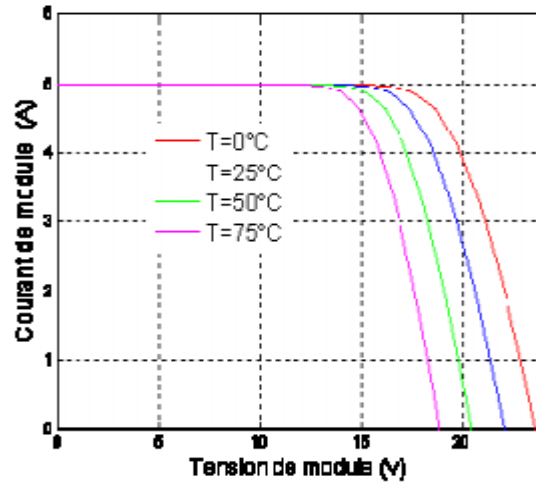


Figure (I-14): Influence de la température sur les caractéristiques I(V) d'un module PV.

On remarque que la température a 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 extraite diminue.

Lors du dimensionnement d'une installation, la variation de la température du site sera impérativement à prendre en compte.

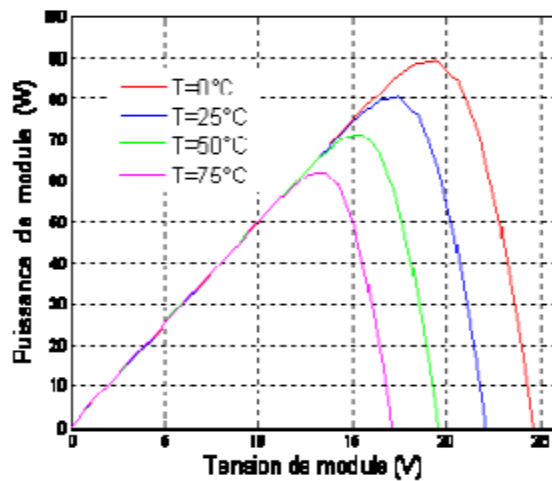


Figure (I-15): Evaluation de la caractéristique P(V) en fonction de la température d'un module PV.

I.7.2. Influence d'irradiation

La valeur du courant court-circuit est directement proportionnelle à l'intensité de rayonnement. Par contre la tension de circuit ouvert ne varie pas dans les mêmes proportions, elle reste quasiment identique même à faible éclairage.

L'irradiation standard internationalement acceptée est mesurée suivant la réponse des panneaux PV exposés à une intensité de rayonnement 1000W/m^2 et une température de 25C .

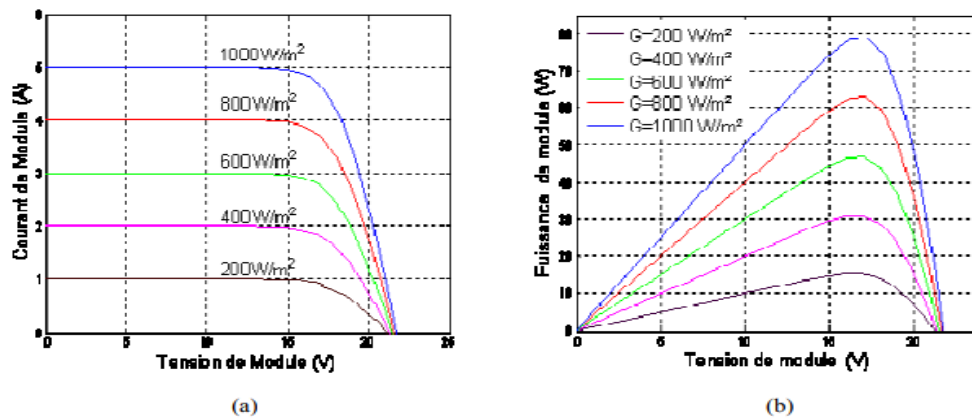


Figure (I-16): Evaluation de caractéristique I(V) (a) et P(V) (b) en fonction d'irradiation.

I.8. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons parlé sur les généralités des systèmes photovoltaïques et présenté les différentes caractéristiques du générateur photovoltaïque, et les paramètres à prendre en considération pour avoir un bon rendement du système.

Et comme les PV sont non linéaires, l'utilisation d'un convertisseur DC/DC et sa commande MPPT pour exploiter le maximum de puissance disponible est très important. Pour cela, les différents convertisseurs DC/DC et leurs spécifications seront présentés dans le chapitre suivant.

II.1.Introduction

Dans un système de conversion des énergies renouvelables, des convertisseurs continu-continu sont utilisés pour charger des batteries de stockage et pour transformer le courant continu en une autre forme de courant continu (abaisser sa valeur ou l'augmenter) selon le besoin de la charge à alimenter. Trois types d'hacheurs sont souvent utilisés dans le domaine des énergies renouvelables: hacheurs survolteurs, dévolteurs et survolteurs-dévolteurs.

L'emploi des convertisseurs a eu un grand challenge pour le transfert d'un maximum de puissance de la source de production vers la charge avec moins de pertes.

Le but de ce chapitre est l'étude de quelques types de convertisseurs DC-DC, utilisés dans les systèmes photovoltaïques.

II.2. Les convertisseurs DC-DC ou hacheurs

Le hacheur est un convertisseur continu/continu permettant de convertir une énergie continue à un niveau donné de tension (ou de courant) en une énergie continue à un autre niveau de tension (ou de courant). Son utilisation s'avère nécessaire pour stocker l'énergie photovoltaïque dans des batteries ou pour alimenter une charge continue [21].

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 [22].

Les hacheurs sont des convertisseurs continus qui procèdent par découpage d'une grandeur d'entrée continue, tension ou courant et dont la grandeur de sortie est également continue ou à faible ondulation [23].

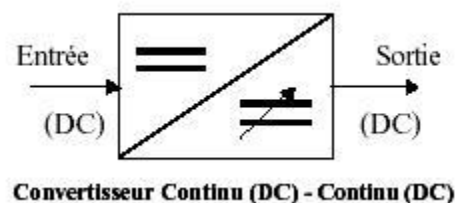


Figure (II.1): Symbole d'un convertisseur DC-DC.

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 [24].

La technique du découpage apparue dans les années soixante environ a apporté une solution au problème du mauvais rendement et de l'encombrement des alimentations séries. Dans une alimentation à découpage Figure (II.1), 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 [24].

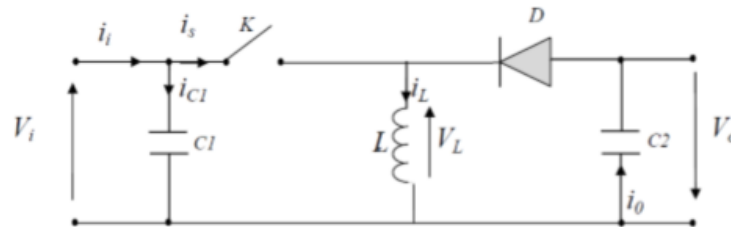


Figure (II.2): Schéma de principe d'un type d'alimentation à découpage.

D'un point de vue circuit, le hacheur apparaît comme un quadripôle (figure II.2), jouant le rôle d'organe de liaison entre deux parties d'un réseau. On peut le considérer comme un transformateur de grandeurs électriques continues [24].

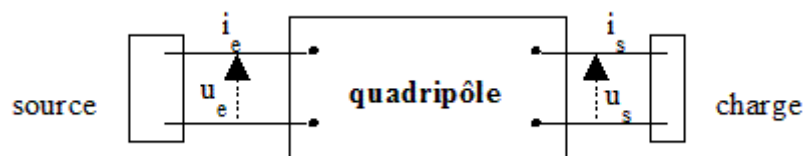


Figure (II.3): Schéma d'un quadripôle électrique.

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 II.3). 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 [24].

II.2.1.1. Hacheur dévolteur (buck)

Le convertisseur dévolteur peut être souvent trouvé dans la littérature sous le nom d'hacheur buck ou hacheur série. La figure (II.5) présente le schéma de principe du convertisseur dévolteur. Son application typique est de convertir sa tension d'entrée en une tension de sortie inférieure, où le rapport de conversion $M = \frac{V_0}{V_1}$ change avec le rapport cyclique du commutateur.

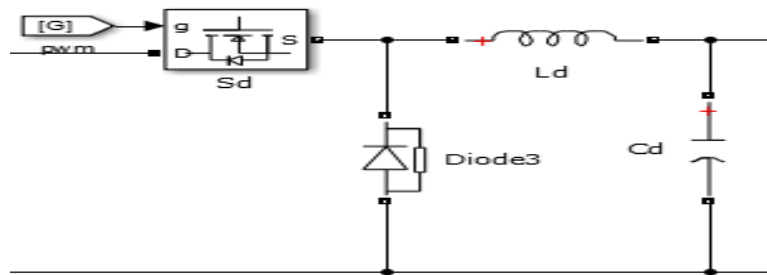


Figure (II.5) : Schéma équivalent d'un hacheur dévolteur.

a. Fonctionnement



Figure (II.6): Les deux configurations d'un convertisseur Buck suivant l'état de l'interrupteur.

Dans l'état passant, l'interrupteur S est fermé, la tension aux bornes de l'inductance vaut :

$$V_L = V_i - V_0 \quad (\text{II-1})$$

Le courant traversant l'inductance augmente linéairement. La tension aux bornes de la diode étant négative, aucun courant ne la traverse.

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

T_e : étant la période des impulsions.

Quand l'interrupteur est fermé pendant la durée αT_e y a une tension appliquée aux bornes de la diode. L'interrupteur est commandé à la fréquence de découpage $f_e = \frac{1}{T_e}$ La source V_i fournit de

l'énergie à la charge et à l'inductance. Pendant le temps $t \in [\alpha T_e, T_e]$ l'interrupteur s'ouvre et l'énergie emmagasinée dans l'inductance commande la circulation du courant dans la diode de roue libre D. La tension à ses bornes est donc nulle [28].

Les chronogrammes de la figure (II.4) sont tracés dans le cas d'une conduction continue, (tracés dans le cas idéal) c'est-à-dire que le courant ne repasse jamais par zéro. Pour calculer la relation entre la tension d'entrée et celle de sortie, on exprime que la tension moyenne aux bornes de l'inductance est nulle [28].

$$V_0 = \alpha \cdot V_i \text{ (II-2)}$$

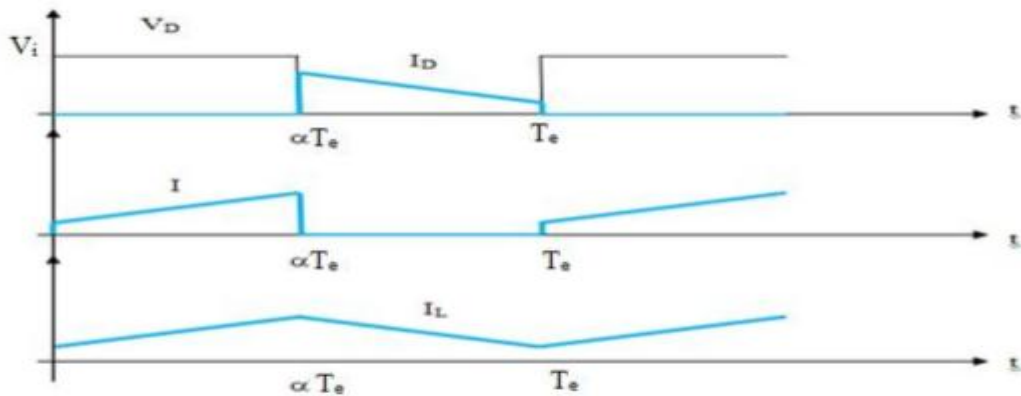


Figure (II.7) : Chronogrammes de courant et tension d'un hacheur buck.

a.1. Conduction continue

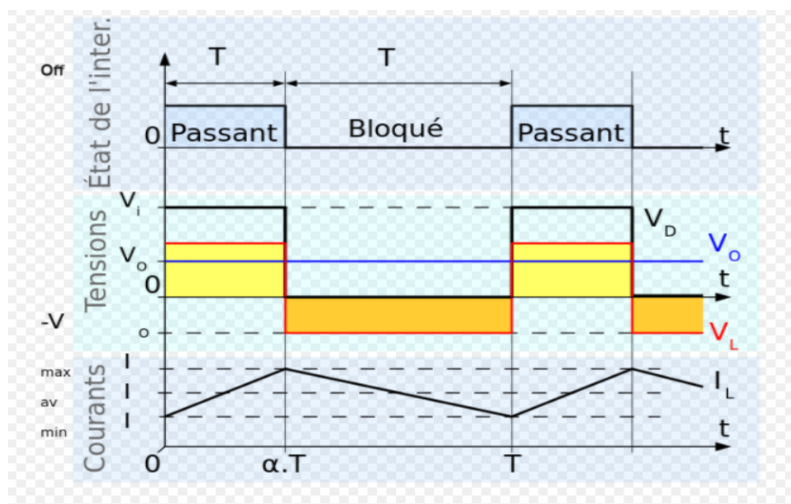


Figure (II.8): Formes d'ondes courant/tension dans un convertisseur Buck.

Quand un convertisseur Buck travaille en mode de conduction continue, le courant I_L traversant l'inductance ne s'annule jamais. La figure (II-8) montre les formes d'ondes du courant et de la tension dans un convertisseur Buck.

Le taux d'accroissement de I_L est donné par :

$$V_L = L \frac{dI}{dt} \quad (\text{II-3})$$

Avec : - V_L égale $V_i - V_0$ pendant l'état passant ;

- V_0 durant l'état bloqué.

Par conséquent, l'augmentation de I_L durant l'état passant est donnée par :

$$\Delta I_{Lon} = \int_0^{\alpha T} dI_L = \int_0^{\alpha T} \frac{V_L}{L} dt = \frac{(V_i - V_0)\alpha T}{L} \quad (\text{II-4})$$

De même, la baisse du courant dans l'inductance durant l'état bloqué est donnée par :

$$\Delta I_{Loft} = \int_0^{\alpha T} dI_L = \int_{\alpha T}^T \frac{V_L}{L} dt = \frac{V_0 \cdot (T - \alpha T)}{L} \quad (\text{II-5})$$

Si on considère que le convertisseur est en régime permanent, l'énergie stockée dans chaque composant est la même au début et à la fin de chaque cycle de commutation. En particulier, l'énergie stockée dans l'inductance est donnée par :

$$e = \frac{1}{2} \times LI_L^2 \quad (\text{II-6})$$

En conséquence, le courant I_L traversant l'inductance est le même au début et à la fin de chaque cycle de commutation. Ce qui peut s'écrire de la façon suivante :

$$\Delta I_{Lon} + \Delta I_{Loft} = 0 \quad (\text{II-7})$$

En remplaçant ΔI_{Lon} et ΔI_{Loft} par leur expression, on obtient :

$$\frac{(V_i - V_0)\alpha T}{L} - \frac{V_0 \cdot (T - \alpha T)}{L} = 0 \quad (\text{II-8})$$

Ce qui peut se réécrire de la façon suivante :

$$V_0 = \alpha V_i \quad (\text{II-9})$$

Grâce à cette équation, on peut voir que la tension de sortie varie linéairement avec le rapport cyclique. Le rapport cyclique étant compris entre 0 et 1, la tension de sortie V_0 est toujours inférieure à celle d'entrée. C'est pour cela que l'on parle parfois de dévolteur.

a.2. Conduction discontinue

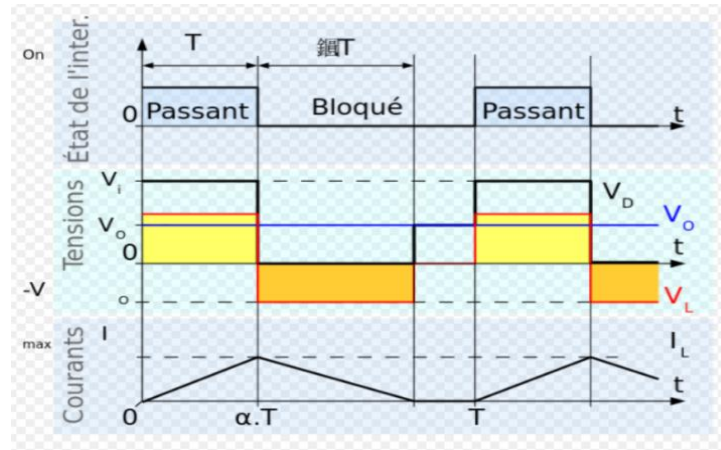


Figure (II.9): Formes d'ondes courant/tension dans un convertisseur Buck en conduction discontinue.

Dans certains cas la quantité d'énergie demandée par la charge est assez faible pour être transférée dans un temps plus court qu'une période de commutation. Dans ce cas le courant traversant l'inducteur s'annule pendant une partie de la période. La seule différence avec le principe de fonctionnement décrit précédemment est que l'inductance est complètement déchargée en début de cycle (les formes d'ondes sur la figure (II.9)). Bien que faible, la différence entre conduction continue et discontinue a un fort impact sur la formule de la tension de sortie. La tension de sortie peut être calculée de la façon suivante :

On considère toujours que le convertisseur a atteint le régime permanent. L'énergie stockée dans les composants est donc la même en début et en fin de cycle (elle est nulle dans le cas de la conduction discontinue). Cela engendre aussi que la tension moyenne aux bornes de l'inductance (V_L) est nulle. Ceci se traduit sur la figure (II-4), par une égalité de l'aire des rectangles jaune et orange :

$$(V_i - V_0). \alpha. T - V_0 \delta. T = 0 \quad (\text{II-10})$$

$$\delta = \frac{V_i - V_0}{V_0} \cdot \alpha \quad (\text{II-11})$$

En supposant que le condensateur de sortie est suffisamment important pour maintenir la tension de sortie constante pendant un cycle de commutation, le courant de sortie délivré à la charge (I_s) est constant. Cela implique que le courant traversant le condensateur est de valeur moyenne nulle. Par conséquent nous avons :

$$I_L = I_s \quad (\text{II-12})$$

Avec I_L le courant moyen traversant l'inductance. Comme on peut le voir sur la figure(II.9), le courant I_L traversant l'inductance est de forme triangulaire. Par conséquent la valeur moyenne de I_L peut donc être calculée géométriquement de la façon suivante:

$$I_L = \left(\frac{1}{2} I_{Lmax} \cdot \alpha \cdot T + I_{Lmax} \cdot \delta \cdot T \right) \frac{1}{T} = \frac{I_{Lmax} (\alpha + \delta)}{2} = I_s \quad (\text{II-12})$$

Le courant dans l'inductance est nul en début de cycle puis augmente pendant αT jusqu'à atteindre I_{Lmax} . Cela veut dire que I_{Lmax} est égale à :

$$I_{Lmax} = \frac{V_i - V_0}{L} \alpha \cdot T \quad (\text{II-13})$$

En remplaçant I_{Lmax} dans les relations précédentes par son expression, on obtient :

$$I_s = \frac{(V_i - V_0) \alpha \cdot T (\alpha + \delta)}{2L} \quad (\text{II-14})$$

On remplace δ par son expression :

$$I_s = \frac{(V_i - V_0) \alpha \cdot T \left(\alpha + \frac{(V_i - V_0)}{V_0} + \alpha \right)}{2L} \quad (\text{II-16})$$

Qui peut se mettre sous la forme :

$$V_0 = V_i \frac{1}{\frac{2LI_s}{\alpha^2 \cdot V_i \cdot T} + 1} \quad (\text{II-17})$$

On peut voir que l'expression de la tension de sortie est bien plus compliquée que celle obtenue pour la conduction continue. En effet, la tension de sortie dépend non seulement de la tension d'entrée (V_i) et du rapport cyclique α mais aussi de la valeur de l'inductance (L), de la période de commutation (T) et du courant de sortie (I_s).

a.3. Modèle mathématique équivalent

Pour savoir le comportement réel de ce convertisseur il est nécessaire de connaître en détail son modèle mathématique. Pour cela nous devons faire la représentation du circuit équivalent par les deux états du commutateur et de tirer par suite le modèle mathématique reliant les variables d'entrée/sortie.

La figure (II.10) montre les schémas des circuits équivalents d'un convertisseur dévolteur dans les deux cas : l'interrupteur fermé pendant αT_s et l'interrupteur ouvert pendant $(1-\alpha) T_s$ [25, 26, 24, 27].

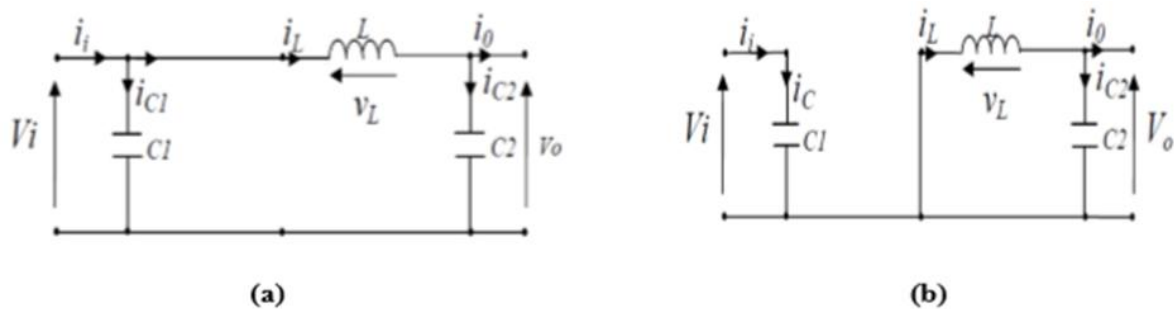


Figure (II.10) : Schémas équivalents du hacheur dévolteur.

(a) : S fermé, (b) : S ouvert.

En appliquant les lois de Kirchhoff sur les deux circuits de la figure (II.10), on obtient les systèmes d'équations suivants :

Pour la première période αT_s :

$$\left\{ \begin{array}{l} i_{c1}(t) = C_1 \frac{dV_i(t)}{dt} = i_i(t) - i_L(t) \\ i_{c2}(t) = C_2 \frac{dV_o(t)}{dt} = i_L(t) - i_s(t) \\ V_L(t) = L \frac{di_L}{dt} = V_i(t) - V_o(t) \end{array} \right. \quad (\text{II-18})$$

Pour la deuxième période $(1 - \alpha) T_s$:

$$\begin{cases} i_{c1}(t) = C_1 \frac{dV_i(t)}{dt} = i_i(t) \\ i_{c2}(t) = L \frac{dI_L(t)}{dt} i_L(t) - i_s(t) \\ V_L(t) = L \frac{dI_L}{dt} = -V_0(t) \end{cases} \quad (\text{II-19})$$

Pour trouver une représentation dynamique valable pour toute la période T_s , on utilise généralement l'expression suivante [24] :

$$\left\langle \frac{dx}{dt} \right\rangle T_s = \frac{dx}{dt} \alpha T_s + \frac{dx}{dt (1-\alpha) T_s} (1 - \alpha) T_s \quad (\text{II-20})$$

En appliquant la relation (II. 20) sur les systèmes d'équations (II.18) et (II.19), on obtient les équations qui régissent le système sur une période entière :

$$\begin{cases} C_1 \frac{dV_i(t)}{dt} T_s = dT_s (i_i + i_L) + (1 - \alpha) T_s i_i \\ C_2 \frac{dV_0(t)}{dt} T_s = dT_s (i_L - i_s) + (1 - \alpha) T_s (i_L + i_s) \\ L \frac{di_L}{dt} = dT_s (V_i - V_0) + (1 - \alpha) T_s (-V_0) \end{cases} \quad (\text{II-21})$$

Après arrangement, on obtient :

$$\begin{cases} i_s(t) = i_L(t) - C_2 \frac{dV_0(t)}{dt} \\ i_L(t) = \frac{1}{\alpha} (i_i(t) - C_1 \frac{dV_i(t)}{dt}) \\ V_i(t) = \frac{1}{\alpha} (L \frac{di_L(t)}{dt} + V_0(t)) \end{cases} \quad (\text{II-22})$$

II.2.1.2.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 (II.11). Son application typique est de convertir sa tension d'entrée en une tension de sortie supérieure [24].

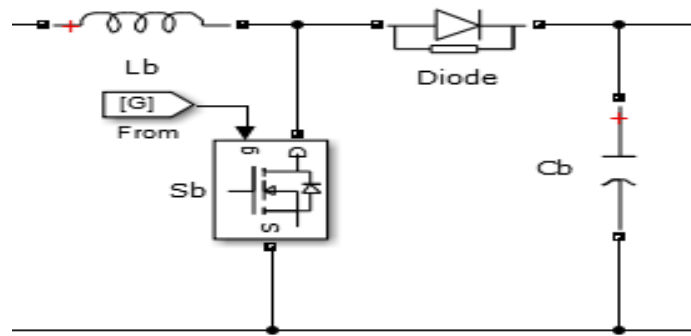


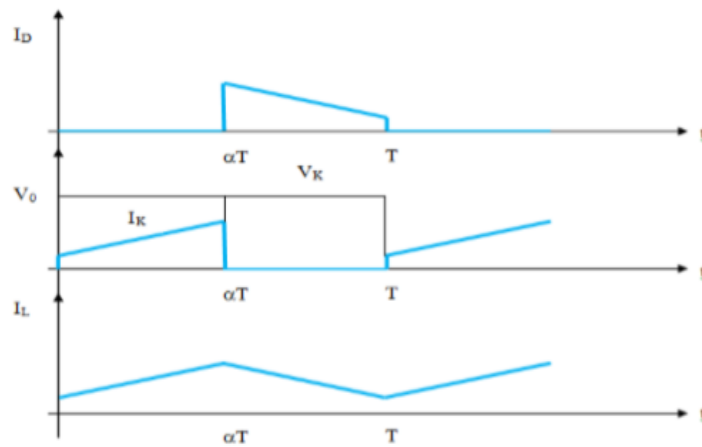
Figure (II.11): Schéma équivalent d'un hacheur survolteur.

a. Fonctionnement

Quand l'interrupteur est fermé pendant la durée $\alpha \cdot T_e$, le courant dans l'inductance croît linéairement. La tension aux bornes de S est nulle. Pendant le temps $t \in [\alpha T_e, T_e]$, l'interrupteur s'ouvre et l'énergie emmagasinée dans l'inductance commande la circulation du courant dans la diode de roue libre D. On a alors $V_k = V_0$.

En écrivant que la tension aux bornes de l'inductance est nulle, on arrive à [28] :

$$V_0(1 - \alpha) = V_i \tag{II-23}$$



Figure(II.12): Chronogrammes de courant et tension d'un hacheur boost.

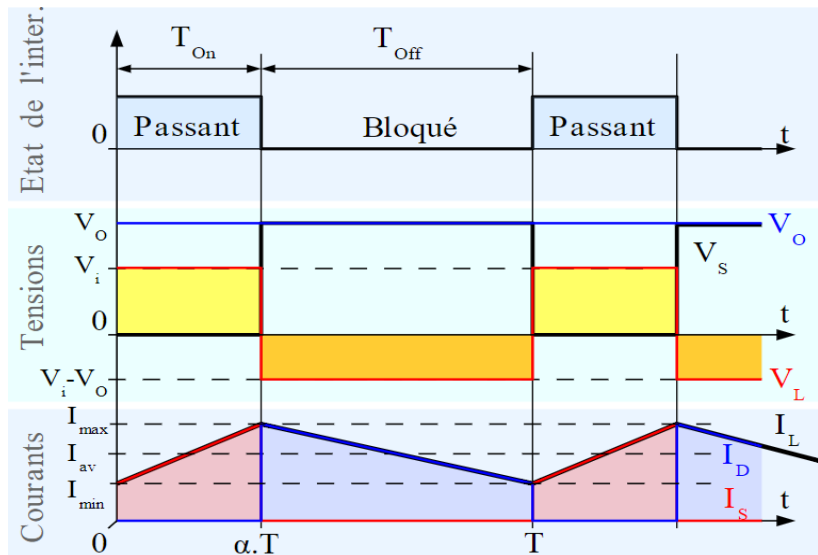


Figure (II.13) : Formes d'ondes courant/tension dans un convertisseur Boost.

Quand un convertisseur Boost travaille en mode de conduction continue, le courant i_L traversant l'inductance ne s'annule jamais. La figure (II.13) montre les formes d'ondes du courant et de la tension dans un convertisseur Boost.

La tension de sortie est calculée de la façon suivante (en considérant les composants comme parfaits) :

Durant l'état passant, l'interrupteur S est fermé, entraînant l'augmentation du courant suivant la relation :

$$V_i = L \frac{\alpha I_L}{dt} \quad (\text{II-24})$$

À la fin de l'état passant, le courant I_L a augmenté de :

$$\Delta I_{Lon} = \int_0^{\alpha T} dI_L = \int_0^{\alpha T} \frac{V_i \cdot dt}{L} = \frac{V_i \cdot \alpha \cdot T}{L} \quad (\text{II-25})$$

α étant le rapport cyclique. Il représente la durée de la période T pendant laquelle l'interrupteur S conduit α est compris entre 0 (S ne conduit jamais) et 1 (S conduit tout le temps).

Pendant l'état bloqué, l'interrupteur S est ouvert, le courant traversant l'inductance circule à travers la charge. Si on considère une chute de tension nulle aux bornes de la diode et un condensateur suffisamment grand pour garder sa tension constante, l'évolution de I_L est:

$$V_i - V_o = L \frac{dI_L}{dt} \quad (\text{II-26})$$

Par conséquent, la variation de I_L durant l'état bloqué est :

$$\Delta I_{L\text{off}} = \int_0^{(1-\alpha)T} dI_L = \int_0^{(1-\alpha)T} \frac{V_i - V_0}{L} \cdot dt = \frac{(V_i - V_0)(1-\alpha)T}{L} \quad (\text{II-27})$$

Si on considère que le convertisseur a atteint son régime permanent, la quantité d'énergie stockée dans chacun de ces composants est la même au début et à la fin d'un cycle de fonctionnement. En particulier, l'énergie stockée dans l'inductance est donnée par :

$$e = \frac{1}{2} \cdot L I_L^2 \quad (\text{II-28})$$

b. Modèle mathématique équivalent

Afin de pouvoir synthétiser les fonctions du hacheur survolteur à l'état d'équilibre, il est nécessaire de présenter les schémas équivalents du circuit à chaque position de l'interrupteur S. Celui de la figure (II.14) présente le circuit équivalent du boost lorsque S est fermé c-à-d d'entre $[0, \alpha T_e]$. [28].

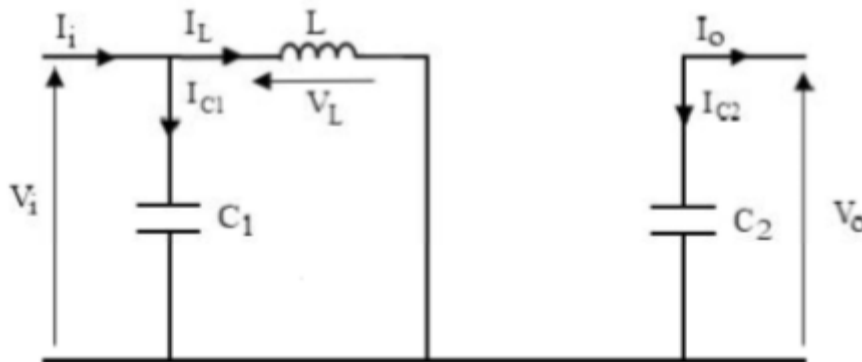


Figure (II.14): Schéma électrique d'un hacheur boost fermé.

Comme pour le convertisseur dévolteur l'application des lois de Kirchhoff sur les circuits équivalents du convertisseur survolteur de la figure (II.14) des deux phases de fonctionnement donne [24]:

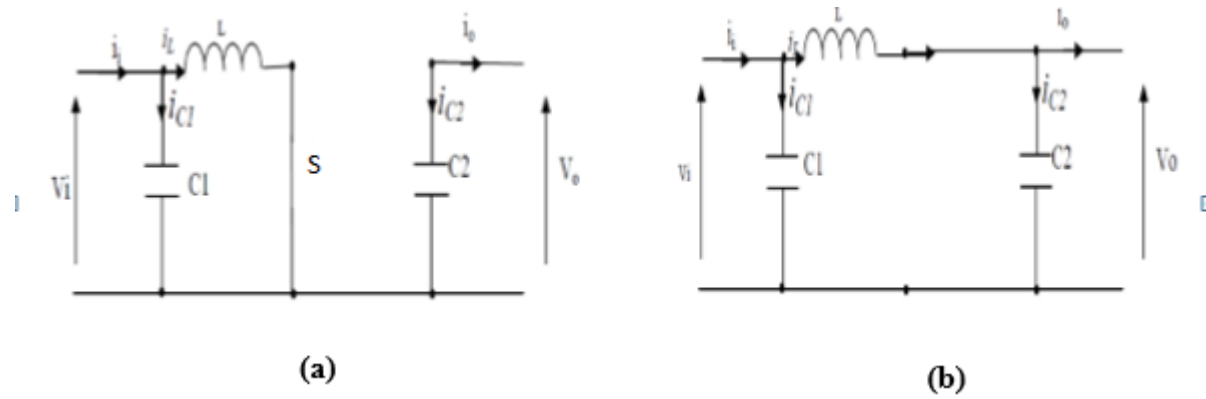


Figure (II.15) : Schémas équivalents du hacheur survolteur,

(a) : S fermé, (b) : S ouvert.

Pour la première période $\alpha.T_s$:

$$\begin{cases} i_{c1}(t) = C_1 \frac{dV_i(t)}{dt} = i_i(t) - i_L(t) \\ i_{c2}(t) = L \frac{dV_o(t)}{dt} = -i_s(t) \\ V_L(t) = L \left(\frac{di_L}{dt} \right) = -V_i(t) \end{cases} \quad (II-29)$$

Pour la deuxième période $(1-\alpha) T$:

$$\begin{cases} i_{c1}(t) = C_1 \frac{dV_i(t)}{dt} = i_i(t) - i_L(t) \\ i_{c2}(t) = C_2 \frac{dV_o(t)}{dt} = -i_L(t) - i_s(t) \\ V_L(t) = L \left(\frac{di_L}{dt} \right) = V_i(t) - V_o(t) \end{cases} \quad (II-30)$$

En appliquant la relation (II.20) sur les systèmes d'équations (II.29) et (II.30), comme pour le convertisseur dévolteur on trouve le modèle approximé du convertisseur survolteur [24] :

$$\begin{cases} i_L = i_t - C_2 \frac{dV_i(t)}{dt} \\ i_s = (1 - \alpha)i_t - C_2 \frac{dV_i(t)}{dt} \\ V_i = L \frac{di_L}{dt} (1 - \alpha)V_0 \end{cases} \quad (II-31)$$

II.2.1.3. 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 (II.16) [24].

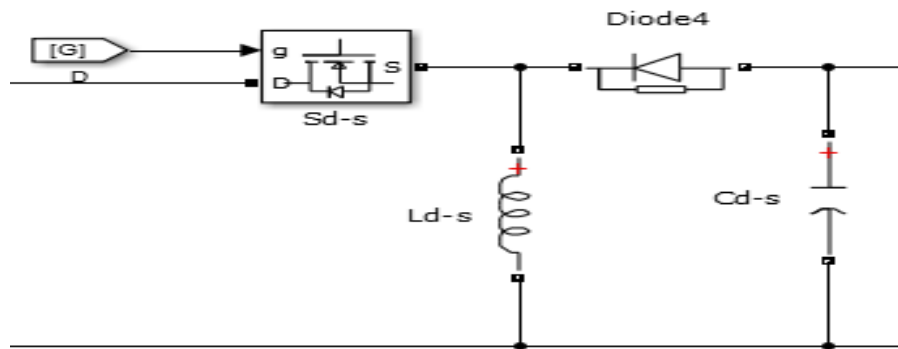


Figure (II.16) : Schéma équivalent d'un Convertisseur dévolteur-survolteur.

a. Fonctionnement

Cette structure de convertisseur permet d'obtenir des tensions négatives à partir de tension positive.

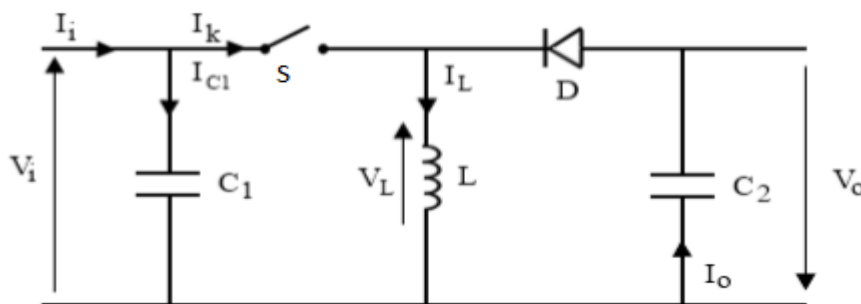


Figure (II.17) : Schéma électrique d'un hacheur buck- boost.

Le schéma de principe est présenté figure (II.17). Quand l'interrupteur est fermé pendant la durée $\alpha.T_e$, le courant augmente linéairement. La tension est égale à V_i . À l'ouverture de S, la diode prend le relais et la tension V_L est égale à $-V_0$. Par définition la tension moyenne aux bornes de l'inductance est nulle. Il en résulte que [29] :

$$V_i \cdot \alpha \cdot T = V_0(1 - \alpha)T \text{ (II-32)}$$

Quand le rapport cyclique $\alpha > 0.5$ le hacheur buck-boost fonctionne comme un hacheur boost.

Si le rapport cyclique $\alpha < 0.5$ le hacheur buck-boost fonctionne comme un hacheur buck.

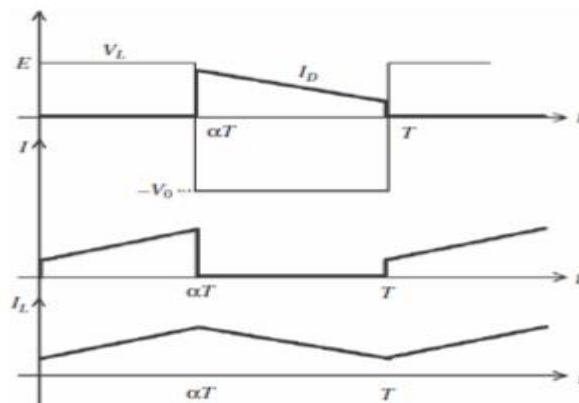


Figure (II.18): Chronogrammes de courant et tension d'un hacheur buck-boost.

b.Modèle mathématique équivalent

Lorsque l'interrupteur S est fermé le circuit équivalent est montré sur la figure (II.13)

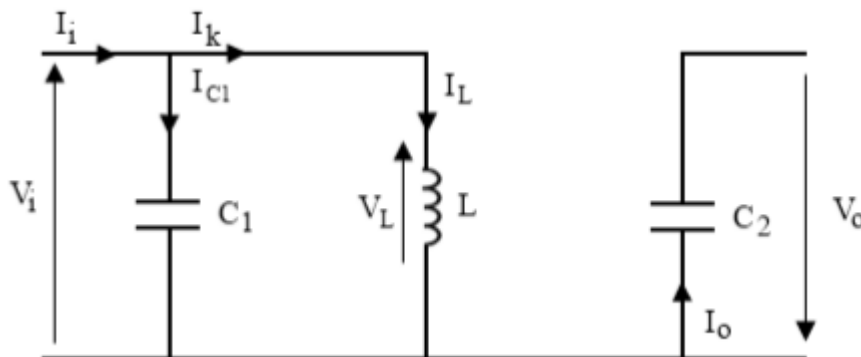


Figure (II.19) : Schéma électrique d'un hacheur buck- boost fermé.

En appliquant la loi de Kirchhoff à ce circuit on obtiendra les équations suivantes :

$$\begin{cases} i_{c1}(t) = C_1 \frac{dV_i(t)}{dt} = i_i(t) - i_L(t) \\ i_{c2}(t) = C_2 \frac{dV_0(t)}{dt} = -i_s(t) \\ V_L(t) = L \left(\frac{di_L}{dt} \right) = -V_i(t) \end{cases} \quad (\text{II-33})$$

Lorsque l'interrupteur S est ouvert le circuit équivalent apparaît à la figure (II.14)

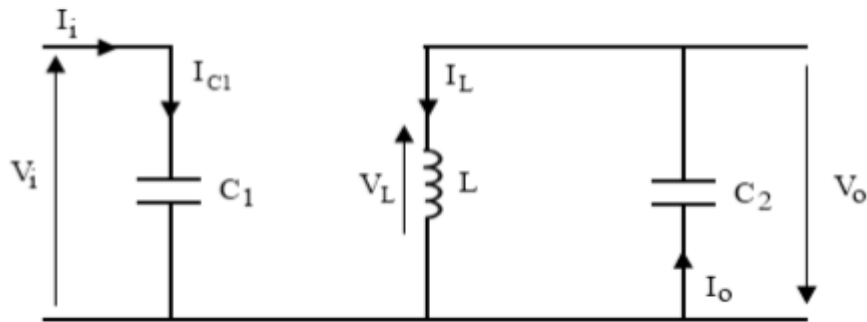


Figure (II. 20) : Schéma électrique d'un hacheur buck- boost ouvert.

Le modèle d'équation dans cette configuration est comme suit :

$$\begin{cases} i_{c1}(t) = C_1 \frac{dV_i(t)}{dt} = i_i(t) \\ i_{c2}(t) = C_2 \frac{dV_0(t)}{dt} = i_s(t) - i_L(t) \\ V_L(t) = L \left(\frac{di_L(t)}{dt} \right) = V_0(t) \end{cases} \quad (\text{II-34})$$

II.3.2. Tableau récapitulatif du fonctionnement des hacheurs

Hacheur	Le fonctionnement	Les équations
Hacheur survolteur	La tension moyenne de sortie V_s est supérieure à la tension d'entrée.	$V_s = \frac{E}{1 - \alpha}$
Hacheur dévolteur	La tension moyenne de sortie V_s est inférieure à celle de l'entrée.	$V_s = \alpha \cdot E$
Hacheur survolteur-dévolteur	La tension moyenne de sortie V_s peut être supérieure ou inférieure à celle de l'entrée en fonction de l'état de l'interrupteur (ouvert ou fermé).	$V_s = \frac{\alpha V_e}{1 - \alpha}$

II.4. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons exposé quelques topologies de base des alimentations à découpage, ce sont les différents convertisseurs continu-continu. Ce sont les convertisseurs dévolteur, survolteur et dévolteurs-survolteur, permettant de modifier la valeur de la tension (moyenne) d'une source de tension continue¹ avec un rendement élevé et peuvent être utilisés dans une installation photovoltaïque.

Nous avons aussi vu le fonctionnement et les caractéristiques électriques de ces convertisseurs d'une manière détaillée.

Dans le chapitre suivant nous allons étudier quelques méthodes MPPT basées sur contre réaction de puissance comme l'algorithme d'incrément de l'inductance et méthode de perturbation et observation.

III.1.Introduction

L'énergie est l'un des moteurs du développement des sociétés. Les pays du globe exploitent les ressources fossiles en priorité (l'exploitation du charbon puis du pétrole). Celles-ci nous dit-on s'épuisent, tandis que les menaces sur le climat sont pour une grande part dues à leur utilisation et que la consommation d'énergie ne cesse d'augmenter ; alors les énergies renouvelables apparaissent dans ce contexte, une alternative intéressante pour préserver à la fois le confort des êtres humains et la qualité de l'air.

Les énergies renouvelables sont des énergies inépuisables. Elles sont issues des éléments naturels : le soleil, le vent, les chutes d'eau, les marées, la chaleur de la Terre ...etc. L'exploitation de ces énergies n'engendre pas ou peu de déchets et d'émissions polluantes. Ce sont les énergies de l'avenir.

Nous allons entamer la partie la plus importante et la plus délicate de ce projet. Il s'agit de la description du convertisseur MPPT qui est un convertisseur de puissance (DC/DC) commandé par un algorithme MPPT adapté à une source d'énergie renouvelable de type photovoltaïque.

Nous allons parler des différents algorithmes utilisés dans les commandes MPPT afin de trouver le point de puissance maximale. Idéalement, le suivi de la puissance se fait automatiquement afin de pouvoir trouver le point de puissance maximale auquel la matrice fonctionne à un rendement maximal et produit une puissance de sortie très élevée.

Des recherches ont été menées pour optimiser les techniques, ce chapitre passe en revue les différents algorithmes MPPT qui ont été utilisés pour le système photovoltaïque aux changements de l'irradiance et de la température, il discute les aspects techniques mérites, démérites et analyse la performance de chaque méthode, c'est très difficiles pour les concepteurs photovoltaïque, chercheur et experts académiques de sélectionner une technique MPPT particulière pour une application particulière qui nécessite les connaissances de base et les caractéristiques comparatives de diverses MPPT algorithmes.

Evidemment, ce chapitre serait une source précieuse pour ceux qui ont besoin de plus d'informations pour concevoir un MPPT amélioré pour les onduleurs et fournir une référence pratique pour les travaux du futur dans la production d'énergie PV.

III.2.1. Définition

La commande MPPT (Maximum Power Point Tracking) est une commande essentielle pour un fonctionnement optimal du système photovoltaïque. Le principe de cette commande est basé sur la variation automatique du rapport cyclique α , la valeur optimale de manière à maximiser la

puissance délivrée par le panneau PV, pour cette raison on va présenter et étudier par la suite les algorithmes de commande les plus populaires.

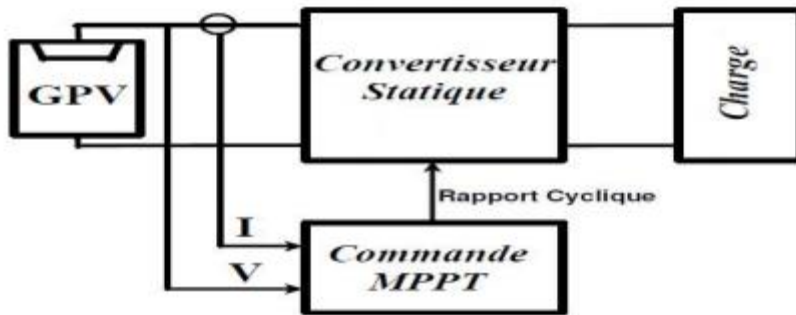


Figure (III-1): Schéma synoptique d'une commande MPPT.

III.2.2. Historique

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 [30].

Etant donné le grand nombre de publications dans ce domaine, nous avons fait une classification des différentes MPPT existantes en les regroupant selon leurs principes de base et leurs implantations matérielles (numériques, analogiques ou mixtes).

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. Seuls les algorithmes qui nous semblent décrire une méthode de recherche spécifique sont reportés dans ce chapitre et brièvement analysés.

III.2.3. Les premiers types de commande MPPT

L'algorithme mis en œuvre dans les premières MPPT conçues était relativement simple. En effet, les capacités des microcontrôleurs disponibles à cette 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.

Appliqué au photovoltaïque, son principe a d'abord été décrit par A.F Bohringer[31].

La commande exposée dans cet article est basée sur un algorithme de contrôle adaptatif permettant de maintenir le système à son point de puissance maximum (PPM). Ce dernier est présenté en figure (III-2) et peut être implanté entièrement en numérique.

Cette première approche est destinée beaucoup plus à des applications spatiales car le phénomène de changement aléatoire de l'éclairement et la température n'est pas prise en compte, ceci n'empêche pas que ce simple algorithme a été la base de toutes les stratégies de la MPPT développées par la suite.

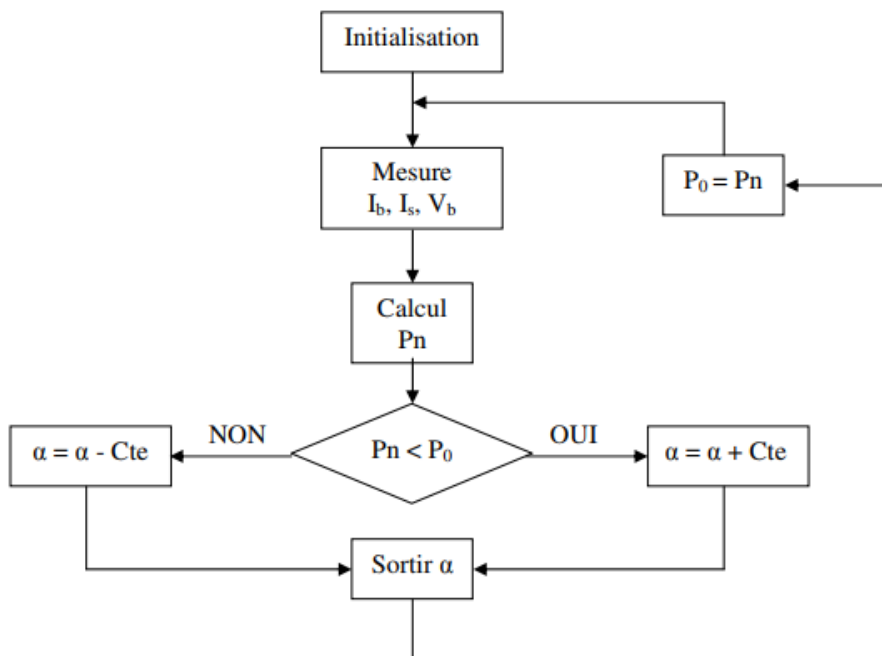


Figure (III-2): Principe de la première commande MPPT numérique.

Le système démarre d'un rapport cyclique initial α_0 et d'une expression initiale P_0 , après avoir effectué la mesure du courant I_b et de la tension V_b aux bornes de la batterie et du courant de charge I_s , le produit $[(I_b + I_s) \times V_b]$ est calculé. Ce dernier est l'image de la puissance instantanée P_n délivrée par le générateur PV à l'instant où la mesure a été effectuée.

Cette image est alors comparée à la puissance P_0 , si P_n est inférieur à P_0 , alors α est incrémenté, si non α est réduit. Une fois α modifié, P_0 prend la valeur P_n et on effectue une nouvelle mesure de I_b, V_b et I_s pour calculer la nouvelle puissance P_n .

Ainsi, par un algorithme numérique de recherche, on peut régler la précision de cette commande de façon à obtenir un rendement MPPT proche de 100% en fonction de l'algorithme

implanté. De plus, le temps de calcul de la MPPT est directement en fonction de l'algorithme implanté ainsi que des performances du microprocesseur.

III.3.Principe de fonctionnement d'une MPPT

Nous devons chercher le point de puissance maximale, pour cela, nous comparons un point de puissance (P_2) mesuré à l'instant (t) avec un point de puissance (P_1) mesuré à l'instant ($t - \Delta t$) (figure (III-3)).

Si $P_1 < P_2$, la dérivée est positive, cela signifie que nous nous rapprochons du point de puissance maximal. Si la dérivée de puissance est négative, cela veut dire que nous avons dépassé le point de puissance maximal.

Ainsi, au démarrage du système, la recherche de PPM se fait progressivement, en cherchant le premier maximum. Les commandes MPPT présentent finalement un bon compromis de rendement en statique et dynamique mais aussi de robustesse sont basées sur une continuelle évaluation de la puissance et une comparaison avec l'état à l'instant précédent.

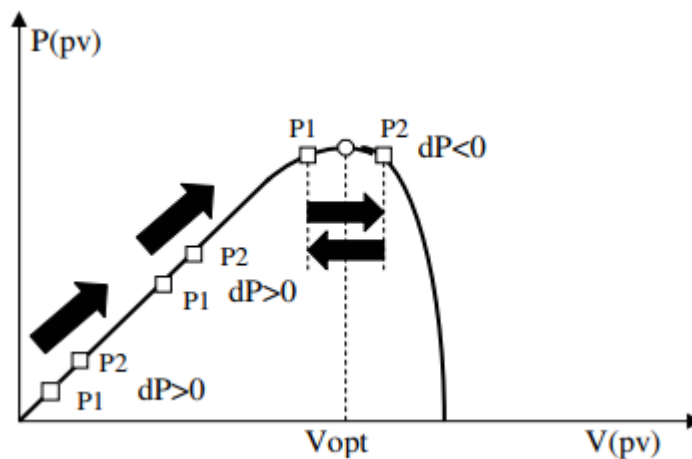


Figure (III-3): Principe de fonctionnement d'une commande MPPT.

Cependant, pour la plupart des MPPT, pour arriver à converger dans de bonnes conditions, quel que soit l'algorithme, il faut que les courbes de puissance délivrées par le générateur soient constantes ou lentement variables, si cette hypothèse n'est pas respectée (changements brutaux des conditions de fonctionnement) le système peut diverger.

Nous avons répertorié les différents problèmes qui peuvent survenir :

La puissance délivrée par le générateur peut présenter plusieurs maximums, cela peut se produire, en particulier lorsque les diodes de protections (diodes by-pass) des cellules PV associées en série ou en parallèle se ferment.

Des changements brutaux d'éclairement et de charge peuvent survenir à tout moment sans que la fréquence de ces changements soit prévisible. Ainsi, le changement peut à tout instant avoir sa courbe de puissance modifiée et donc son PPM comme l'illustre la figure (III-4). Le point de fonctionnement ($P1$) se trouve sur la partie montante de la courbe de puissance 1 avant le changement d'éclairement, suite à la variation d'éclairement, le point de fonctionnement passe de $P1$ à $P2$ qui se trouve sur la courbe de puissance 2.

En comparant la puissance $P1$ à $P2$, on en déduit une dérivée négative, donc on inverse le sens de poursuite pensant avoir dépassé le point de puissance maximum, ici la commande MPPT perd momentanément le PPM. De plus, le changement du sens de la poursuite fait éloigner encore plus le point d'opération PPM.

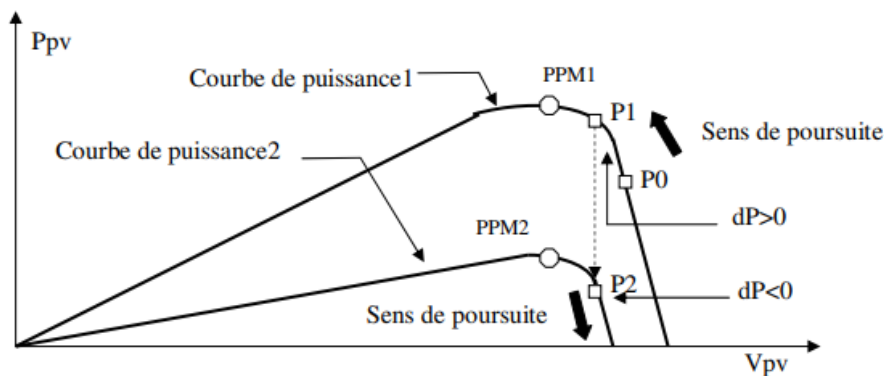


Figure (III-4): Changement d'éclairement et conséquence sur les courbes de puissance d'un GPV ainsi que sur l'adaptation source-charge.

III.4. Classification des techniques MPPT'S

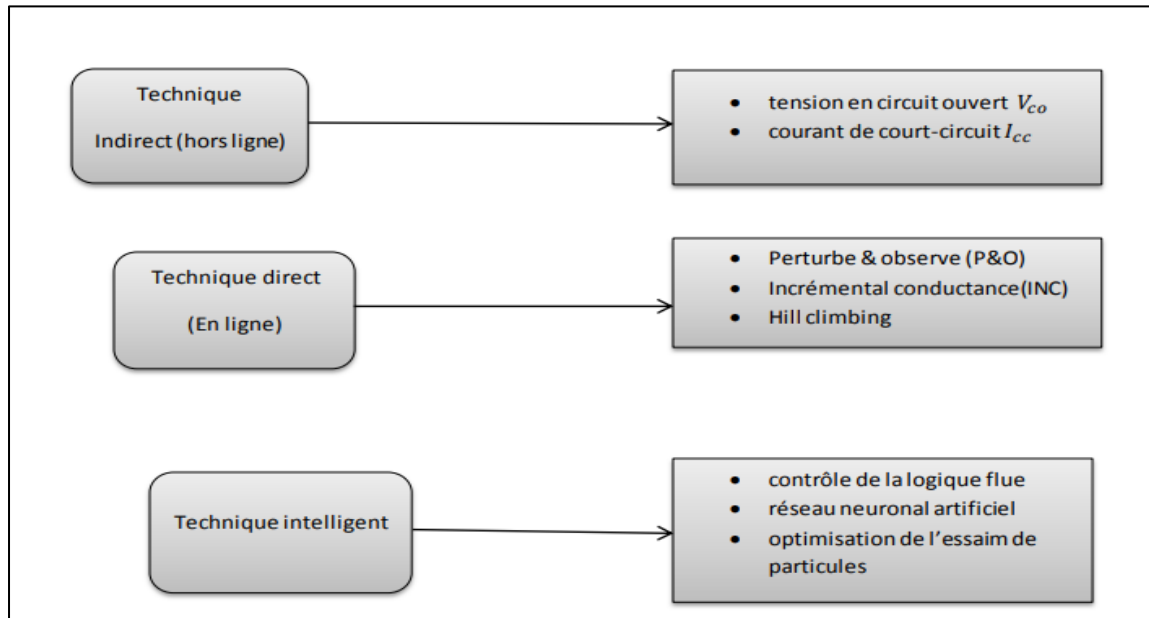


Figure (III-5): Classification de la technique MPPT couramment utilisée.

III.4.1. Les techniques directes

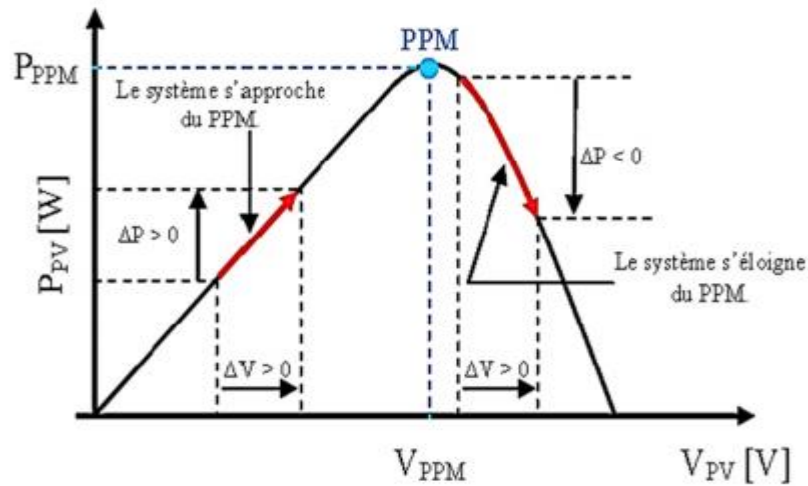
Les techniques directes populaires utilisées directement pour le point de puissance maximale sont perturbé et observe (P&O), technique de conductance incrément (INC) et Hill Climbing[30].

Dans les techniques directes, il y aura une mesure en ligne de la tension et de la mesure du panneau périodiquement pour le calcul du cycle de service, le convertisseur pour suivre le point de puissance maximal MPPT.

a. Méthode perturbation et observation (P&O)

Le principe de cet algorithme est d'effectuer une perturbation sur la tension V_{pv} du panneau PV tout en agissant sur le rapport cyclique α . En effet, suite à cette perturbation, on calcule la puissance fournie par le PV à l'instant (t), puis on la compare à la précédente de l'instant (t-1).

Si la puissance augmente on s'approche du point de puissance maximal PPM, et la variation du rapport du point cyclique est maintenue dans le même sens. Bien au contraire, si la puissance diminue on s'éloigne du point de puissance maximal PPM. Alors, on doit inverser le sens de la variation du rapport cyclique [33].



Figure(III-6): Recherche PPM avec la méthode (P&O).[13].

La figure (III-7) représente l'algorithme classique associé à une commande MPPT de type (P&O), où l'évolution de la puissance est analysée après chaque perturbation de tension. Pour ce type de commande, deux capteurs (courant et tension du GPV) sont nécessaires pour déterminer la puissance du GPV à chaque instant.

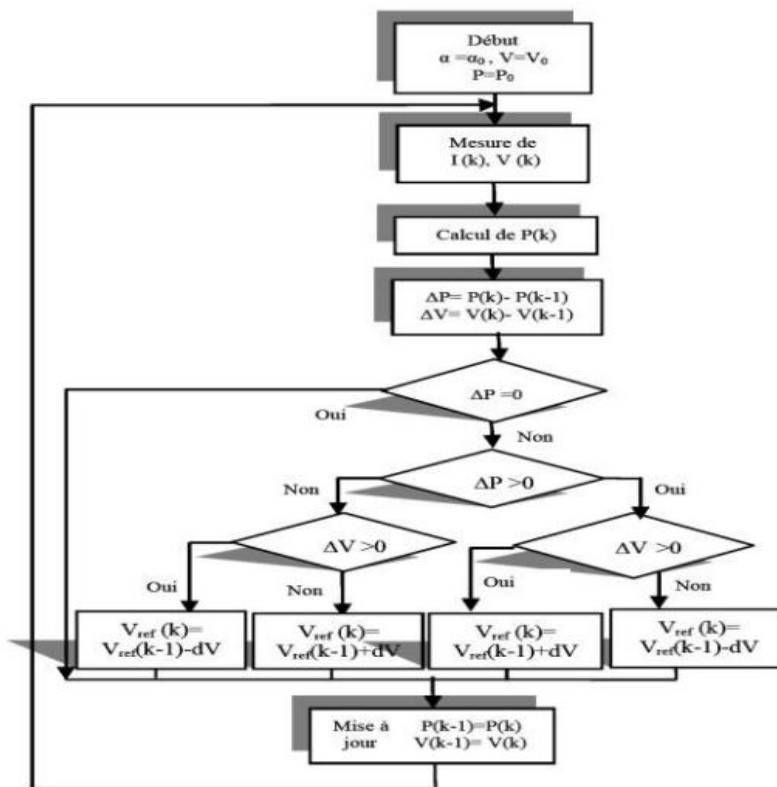


Figure (III-7): Organigramme de l'Algorithme MPPT de la Perturbation & Observation (P&O).

La méthode P&O est aujourd'hui largement utilisée par rapport à sa facilité d'implémentation, cependant elle présente quelques problèmes liés aux oscillations autour du PPM qu'elle engendre (résulte) en régime établi car la procédure de recherche du PPM doit être répétée périodiquement, obligeant le système à osciller en permanence autour du PPM, une fois ce dernier atteint. Ces oscillations peuvent être minimisées en réduisant la valeur de la variable de perturbation. Néanmoins, une faible valeur d'incrément ralentit la recherche du PPM, il faut donc trouver un compromis (transaction) entre précision et rapidité. Ce qui rend cette commande difficile à optimiser.

Ce problème a été mis en évidence [34], où la recherche du PPM est effectuée avec deux valeurs fixes d'incrément (le deuxième incrément est le double du premier), à partir des oscillogrammes proposés, le temps mis pour atteindre le nouveau PPM lors d'une variation de puissance de l'ordre de 8 W est de 200 ms pour le premier l'incrément, alors que celui-ci est divisé par deux pour l'incrément de forte valeur. En contrepartie, les oscillations autour du PPM sont maintenues pour ce dernier.

b. La méthode d'incrément de la conductance (INC)

Cette technique est basée sur la connaissance de la valeur de la conductance (G) et sur l'incrément de la conductance (dG) pour en déduire la position du point de fonctionnement par rapport au point de puissance maximal (PPM) [35].

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

$$G = \frac{I}{V} \quad (\text{III-1})$$

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

$$dG = \frac{dI}{dV} \quad (\text{III-2})$$

D'autre part, l'évolution de la puissance du GPV par rapport à la tension donne la position du point de fonctionnement par rapport au PPM.

Si $\frac{dP}{dV} > 0$, le point de fonctionnement est à gauche du PPM

Si $\frac{dP}{dV} < 0$, le point de fonctionnement est sur la droite du PPM

Si $\frac{dP}{dV} = 0$, le point de fonctionnement est sur le PPM, la figure(III-8) permet d'écrire les conditions suivantes :

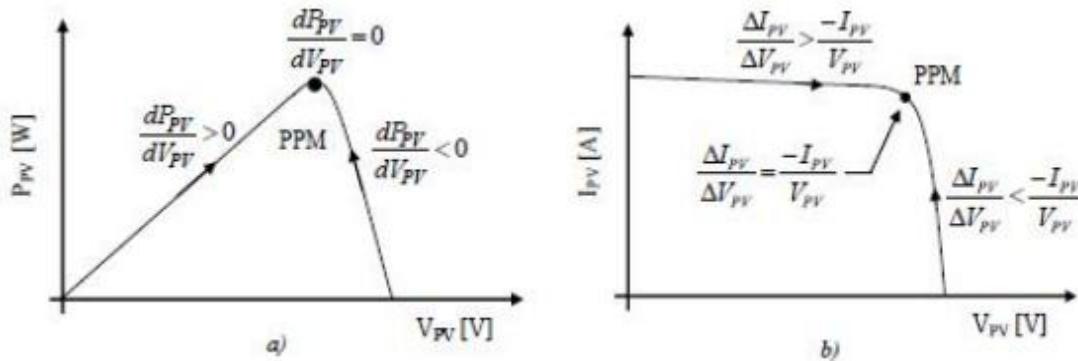


Figure (III-8):Positionnement du point de fonctionnement suivant le signe de la dérivée de la conductance G.

La relation entre $G = \frac{I_{pv}}{V_{pv}}$ et $\frac{dP_{pv}}{dV_{pv}}$ peut-être d'écrit par l'équation suivante :

$$\frac{dP}{dV} = I + V \times \frac{dI}{dV} \cong I + V \times \frac{\Delta I}{\Delta V} \tag{III-3}$$

D'où, on peut alors écrire de nouvelles conditions sur la variation de conductance.

Si $\frac{\Delta I}{\Delta V_{pv}} > -\frac{I}{V}$, le point de fonctionnement est à gauche du PPM.

Si $\frac{\Delta I}{\Delta V_{pv}} < -\frac{I}{V}$, le point de fonctionnement est sur la droite du PPM.

Si $\frac{\Delta I}{\Delta V} = -\frac{I}{V}$, le point de fonctionnement est sur le PPM.

Le maximum de puissance peut être alors traqué en effectuant des comparaisons à chaque instant de la valeur de la conductance ($\frac{I}{V}$), avec celle de l'incrément de conductance ($\frac{\Delta I}{\Delta V}$), comme l'illustre l'algorithme de la figure(III-9).

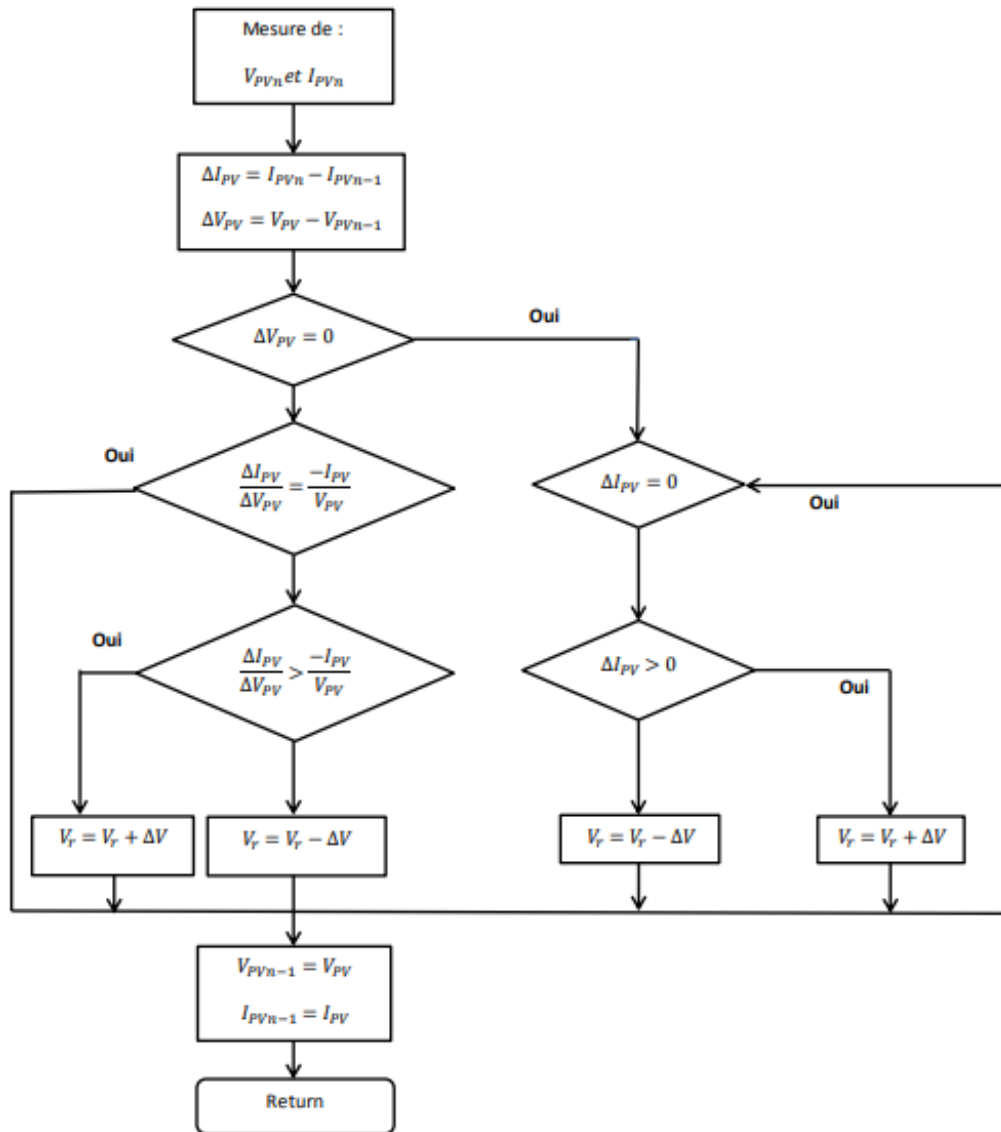
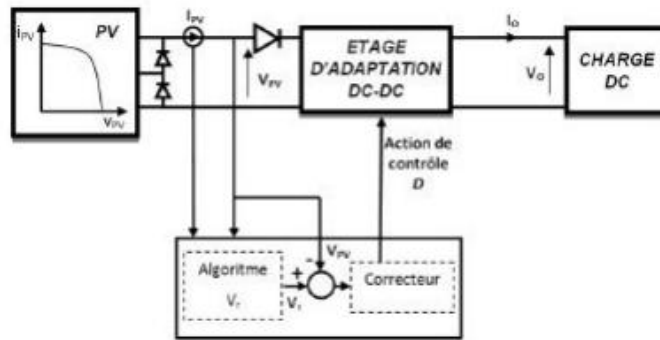


Figure (III-9): Algorithme d'une commande MPPT basée sur la méthode Incrément de Conductance(INC).

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_{ppm} . 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.



Figure(III-10):Fonctionnement d'une commande MPPT de type "IncCond" illustré sur une chaîne élémentaire de conversion PV.

Théoriquement

Avec la méthode de contrôle de type "IncCond", il est possible de trouver un PPM et de le fixer en stoppant la perturbation.

Dans ce cas-là, ΔV_{pv} est nul et c'est le contrôle de l'apparition de ΔI_{pv} qui permet de réactiver l'ajustement de la valeur de V_r pour atteindre un nouveau PPM. Ceci se produit par exemple lors de variations d'ensoleillement. Ceci constitue en soi une propriété intéressante par rapport aux deux types de MPPT précédents car en régime établi, il n'y a pas de pertes par rapport au PPM. De plus, cette méthode ne présente pas de risques de divergence par rapport au PPM.

Pratiquement

Le système présente une oscillation comme la commande P&O autour du PPM, à cause du bruit aux niveaux des acquisitions des paramètres d'entrée V_{pv} , I_{pv} et de la difficulté au système de bien analyser si les relations((III-2)et(III-3))sont bien remplies ou non. Ainsi, en réalité, cette condition n'étant jamais obtenue, le système est toujours en train de la rechercher.

Par rapport à la commande P&O, le temps d'exécution de l'algorithme est plus long car ce dernier est plus complexe. De ce fait, l'intervalle de temps entre deux échantillons de tension et de courant est augmenté engendrant un retard sur la détection des variations climatiques.

Une étude comparative en termes de rendement MPPT est également réalisée par H.Hussein [36] entre la commande "IncCond" et "P&O".

Lors de cette étude, le rendement affiché par la commande "IncCond" est de 89,9 % par rapport au 81,5 % de la commande "P&O". Cette différence est principalement due aux variations relativement faibles autour du PPM engendré par la commande "IncCond".

c. La méthode "Hill Climbing"

Cette technique est basée sur la caractéristique $P(\alpha)$ qui présente un maximum à $\frac{dp}{d\alpha} = 0$ comme le montre la figure (III-11) :

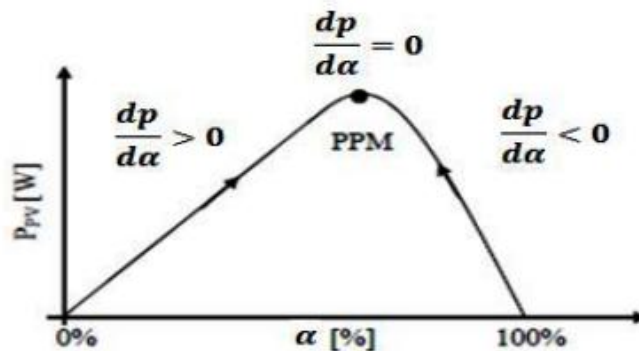


Figure (III-11): Relation entre la puissance du GPV et le rapport cyclique du convertisseur statique.

L'algorithme de cette méthode est illustré sur la figure (III-12). La variable $\text{Slope} \frac{dp}{d\alpha}$ correspond à une variable qui prend le signe « 1 » ou « -1 » suivant la direction que l'on doit donner à la recherche pour augmenter la puissance en sortie du panneau, c'est ce qui symbolise la variable d'incrément du rapport cyclique. Périodiquement, la puissance P_{pvn} est comparée à la valeur déterminée précédemment $P_{pv(n-1)}$.

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 la valeur du rapport cyclique. Une fois le PPM atteint, le système oscille autour de ce dernier indéfiniment rejoignant alors les compromis à faire entre rapidité et précision comme la méthode précédente et les pertes liées à ces oscillations.

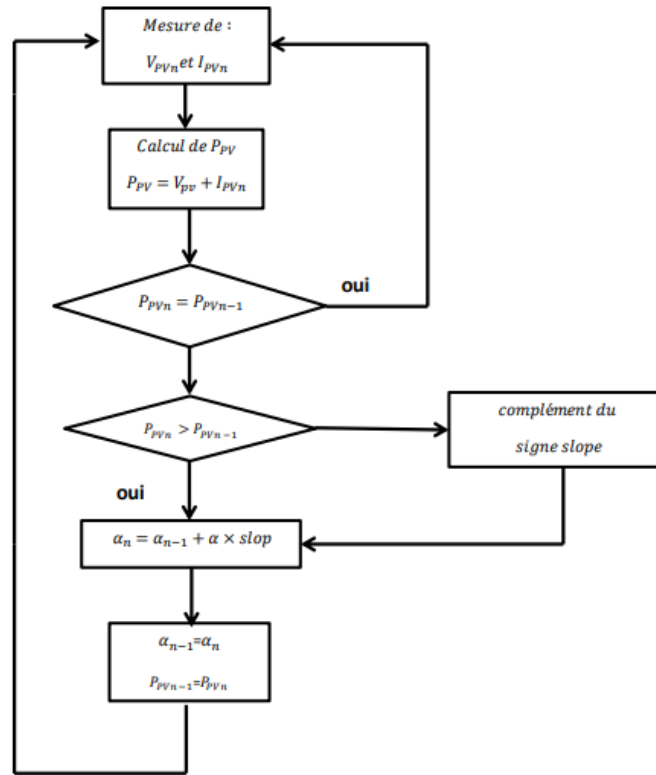


Figure (III-12):Algorithme type de la commande Hill Climbing.

Le schéma synoptique est illustré sur la figure (III-13), l'avantage de cette dernière technique est qu'elle est simple à mettre en œuvre. Par contre, elle possède les mêmes inconvénients que la méthode P&O concernant les oscillations autour du PPM en régime établi et une perte occasionnelle de la recherche du PPM lors du changement rapide des conditions climatiques.

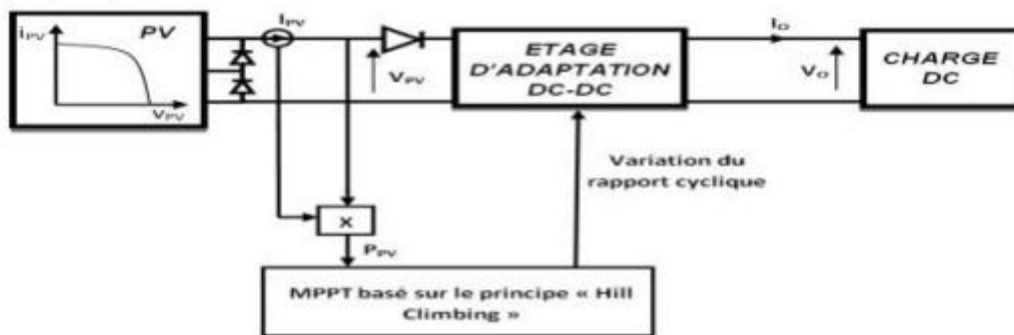


Figure (III-13):Schéma de principe de la commande Hill Climbing.

Ces imperfections sont mises en évidence par W.Xiao [37], à l'aide d'un tableau évaluant les performances de cette commande, en termes de temps de réponse et de puissance extraite en sortie

du GPV, pour différentes valeurs de la variable a . Par exemple, pour une variation d'ensoleillement de 990 W/m^2 à 510 W/m^2 , une incrémentation (a) de 1,5 % du rapport cyclique affiche un temps de réponse de 6 s pour une puissance en sortie du GPV de 1920,6 W. Tandis que pour une incrémentation de 0,4 %, la puissance extraite est de 1931,35W avec un temps de réponse quasi trois fois plus long (16,5 s). Ici, il est à noter qu'une incrémentation faible du rapport cyclique démontre de très bonnes performances lorsque l'ensoleillement varie très lentement (journée de très beau temps) mais une réponse dynamique relativement faible lors de changements d'éclairissements brusques. Malheureusement, il est encore une fois impossible de déterminer le rendement MPPT et d'avoir une idée de l'évolution de ce dernier en fonction des différentes valeurs de la variable d'incrément, car l'auteur indique seulement la puissance extraite en sortie du GPV en fonction d'un niveau d'irradiation sans indiquer la puissance maximale potentielle qu'aurait pu produire le GPV durant l'essai ayant servi d'évaluation. Par contre, des informations concernant le rendement de cette commande sont fournies par le même auteur en [38].

Dans ce nouvel article, les tests d'évaluations sont effectués à l'aide d'une lumière artificielle, afin de contrôler le taux d'ensoleillement. La puissance maximale en sortie du GPV est de $5.83W_c$. Comme précédemment, l'incrément de la variable a a varié de 0.8 % à 2 %. Le temps de recouvrement est alors compris respectivement entre 3.9 s et 1.2 s, avec des rendements variants entre 99.13 % et 95.52 %. Ici, ces rendements correspondent aux points de fonctionnements stables. Il est donc difficile d'évaluer concrètement les performances de cette commande lors d'un fonctionnement en condition réelle où le PPM peut varier à tout instant avec des amplitudes relativement importantes. Il est à signaler qu'un gain intéressant de l'ordre de 15 % en termes de puissance extraite en sortie du PV a été démontré par E.Koutroulis [39] par l'utilisation de ce type de commande comparé au même convertisseur piloté à partir d'un rapport cyclique fixe, dont la valeur correspond à la position du PPM d'un GPV pour une température et une puissance d'ensoleillement données.

L'analyse de ces différentes méthodes de recherche montre qu'elles ne sont pas trop éloignées sur leur fonctionnement en pratique, ni sur les compromis à effectuer entre précision et rapidité au niveau de la valeur de la variable d'incrément. Les divers essais extraits de la littérature montrent que ce type de commande peut être performant dans certaines conditions mais ne permettent pas de dire que tel mode de recherche est plus performant qu'un autre et quand car les conditions de test et les valeurs de variable d'incrément ne sont pas similaires. En revanche, ils donnent une estimation d'un rendement qui peut être élevé et du temps de réponse selon le pas d'incrément choisi.

III.4.2. Les techniques indirectes (hors ligne)

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_{ppm}, I_{ppm}) et les paramètres caractéristiques du GPV, (V_{co}, I_{co}). Suivant le paramètre contrôlé, on parle alors de commande en régulation de courant ou de tension.

a. Algorithme à base de la mesure d'une fraction de la tension (V_{co})

Cet algorithme est basé sur la relation linéaire entre la tension de circuit ouvert et la tension optimale donnée par l'équation suivante :

$$V_{mpp} = k \times V_{co} \quad (\text{III-4})$$

Où k est un facteur de tension dépendant des caractéristiques de la cellule PV et qui varie entre (0,73 et 0,8) [31].

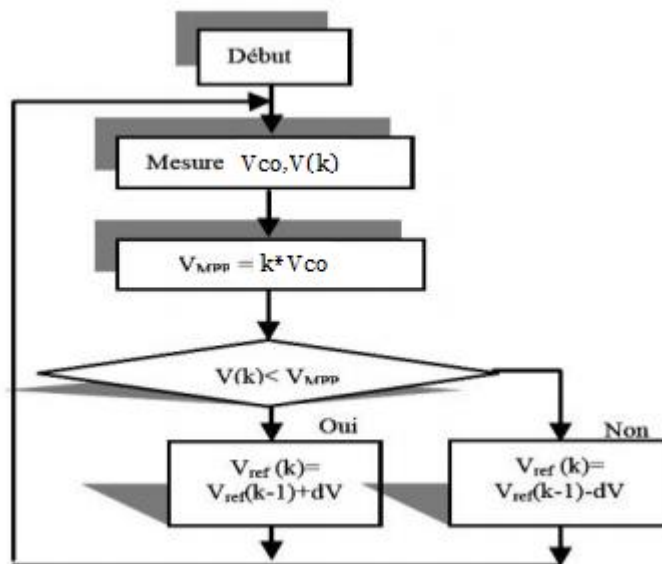


Figure (III-14): Organigramme de l'algorithme FCO.

Pour en déduire la tension optimale, on doit mesurer la tension du circuit ouvert V_{co} . Par conséquent, le point de fonctionnement du panneau est maintenu proche du point de puissance optimale en ajustant la tension de panneau à la tension optimale calculée. Le processus permet d'agir cycliquement sur le rapport cyclique pour atteindre la tension optimale [40].

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 GPV 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 dans un GPV suivant 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 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 essentielles à leur principe même de fonctionnement pour être retenues dans des systèmes de conversion récents.

b. Algorithme à base de la mesure d'une fraction du courant I_{cc}

Cet algorithme est basé sur la relation linéaire entre la tension de circuit ouvert et la tension optimale donnée par l'équation suivante :

$$V_{mpp} = k \times I_{cc} \quad (III-5)$$

Où k est un facteur de courant dépendant des caractéristiques de la cellule PV et qui varie entre (0.85 et 0.92).

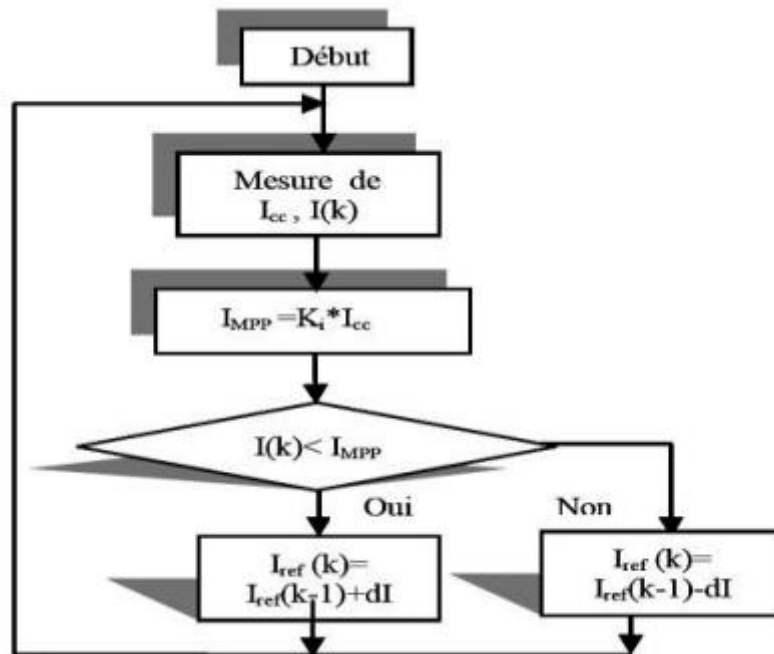


Figure (III-15): Organigramme de l'algorithme FCC.

L'équation (III-5) montre que le courant optimal peut être déterminé par une mesure du courant du court-circuit et que le PPM peut être atteint en appliquant un courant de référence égal à I_{mpp} à la régulation en courant du convertisseur. La mesure du courant de court-circuit implique une perte de transfert de puissance due à la mise en court-circuit du GPV.

Toutefois, 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} , 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.4.3. Les techniques intelligentes

Les contrôleurs MPP intelligents sont très robustes par rapport aux contrôleurs non linéaires conventionnels, ils améliorent efficacement la réponse dynamique et la constante de performance de l'état des systèmes PV.

a. Algorithme à base de la logique floue

Les commandes basées sur la logique floue sont les plus populaires grâce à l'évolution des microcontrôleurs [30]. Cette commande a été utilisée dans les systèmes de poursuite de point de puissance maximal.

L'avantage de ces techniques est qu'elles peuvent être une commande robuste et qui ne nécessite pas la connaissance exacte du modèle mathématique du système. De plus, elles peuvent traiter des non linéarités.

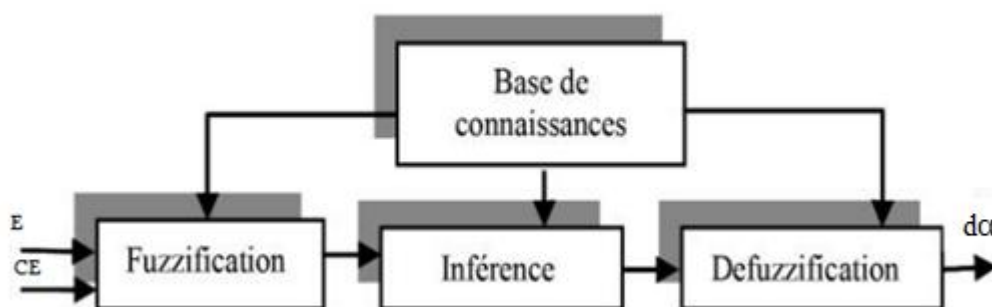


Figure (III-16) : Schéma bloc de l'algorithme à base de la logique floue.

Le principe d'une commande floue se base sur deux variables d'entrées qui sont l'erreur **E** et le changement d'erreur **CE** et une variable de sortie **da** (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 particulier, cette commande est mieux adaptée aux systèmes non linéaires. Le fonctionnement de cet algorithme se fait en trois blocs : la fuzzification, l'inférence et la défuzzification figure (III-17).

1. La fuzzification : permet la conversion des variables physiques d'entrée en ensembles flous.

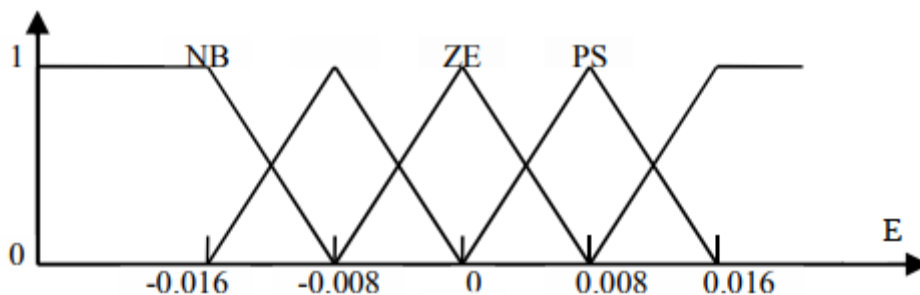
Dans notre cas, on a deux entrées. L'erreur (E) et le changement de l'erreur (CE) à des instants échantillonnés (k).

Les variables E et CE sont exprimées comme suit :

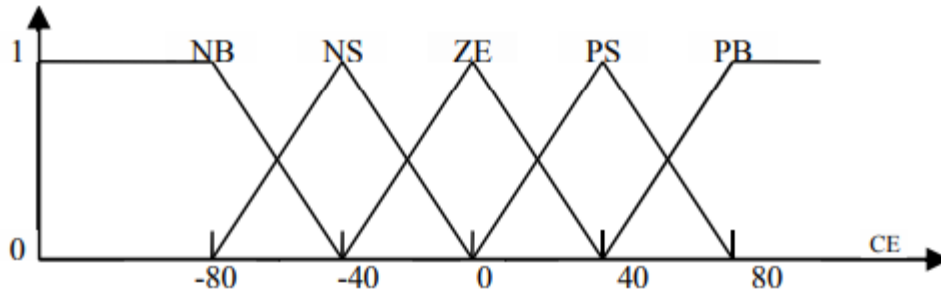
$$E(K) = \frac{P(k) - P(k-1)}{V(k) - V(k-1)} \quad (\text{III-6})$$

$$CE = E(k) - E(k-1) \quad (\text{III-7})$$

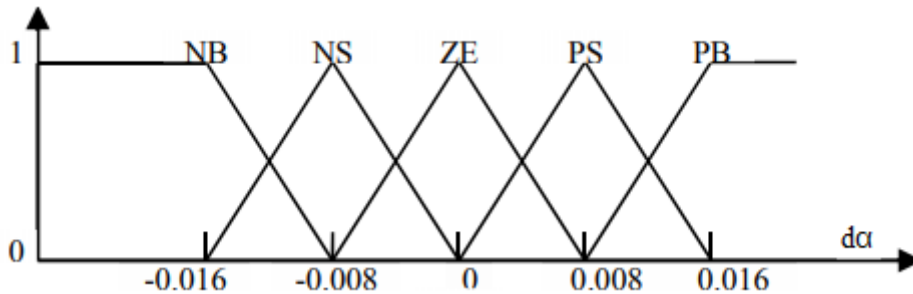
Où **P(k)** et **V(k)** sont respectivement : la puissance et la tension du générateur photovoltaïque [10].



(a)



(b)



(c)

Figure (III-17): Fonctions d'appartenance de : (a) L'entrée E ; (b) L'entrée CE et (c) La sortie $d\alpha$ [42].

Durant la fuzzification, les variables d'entrées numériques sont converties en variables linguistiques pouvant prendre les cinq valeurs suivantes :

- NB: grand négatif (Negative Big),
- NS: petit négatif (Negative Small),
- ZE: Zéro,
- PS: petit Positif (Positive Small),
- PB: grand positif (Positive Big).

La lecture de la table de vérité (Inférence)

Le tableau (II-1), montre la table de règles du contrôleur flou où toutes les entrées de la matrice sont :

CE \ E	NB	NS	ZE	PS	PB
NB	ZE	ZE	PB	PB	PB
NS	ZE	ZE	PS	PS	PS
ZE	PS	ZE	ZE	ZE	NS
PS	NS	NS	NS	ZE	ZE
PB	NB	NB	NB	ZE	ZE

Tableau (III-1) : Exemple d'une table de vérité pour une commande logique floue [32].

La variable linguistique assignée à $d\alpha$ dépend des différentes combinaisons entre E et CE. Par exemple, si les variables d'entrée (E et CE) 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 $d\alpha$ 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 $d\alpha$ s'affinent jusqu'à atteindre le PPM.

2. Défuzzification

Elle consiste à convertir cette fois les variables linguistiques en variables numériques, cette étape ne s'applique qu'à la variable de sortie $d\alpha$, afin de pouvoir piloter le convertisseur de puissance pour atteindre le PPM.

La méthode choisie pour la dernière étape de la conception du contrôleur flou est la méthode du centre de gravité, elle permet le calcul de l'incrément du rapport cyclique $d\alpha$.

$$d\alpha = \frac{\sum_{j=1}^n \mu(\alpha_j) \alpha_j}{\sum_{j=1}^n \mu(\alpha_j)} \quad (\text{III-8})$$

On déduit le rapport α par l'équation suivante :

$$\alpha = d\alpha(K - 1) + \alpha \quad (\text{III-9})$$

N.Khaehintung a démontré dans sa publication en 2004 [41] que l'emploi d'une commande MPPT basée sur le principe de la logique floue permet d'améliorer 8 fois le temps de réponse par rapport à une commande P&O classique. Dans cet article, aucune indication n'est donnée sur la variable d'incrémentation, mais après analyse des relevés, on en déduit que celle-ci est relativement petite car les oscillations autour du PPM sont très faibles expliquant la différence en termes de réponse dynamique. Un phénomène secondaire à prendre en compte est le temps mis par cette commande pour se stabiliser sur un nouveau PPM. La commande floue met 1,75 s pour s'immobiliser sur le PPM, alors que la commande P&O s'y positionne au bout de 1,25s, c'est-à-dire dès qu'elle l'a atteint.

Une comparaison plus fine est donc nécessaire pour affirmer les gains de ce nouveau type de commande à l'algorithmes de base très complexe. En [43], la commande logique floue est comparée directement à la méthode "HillClimbing".

Les différents oscillogrammes montrent que le temps de réponse est légèrement amélioré, par contre l'erreur statique obtenue est relativement faible. Ici, contrairement à l'exemple cité ci-dessus, la valeur de l'incrément est importante. Malheureusement la qualité des relevés ne permet pas de déterminer avec précision le gain en termes de temps de recouvrement ainsi que le rendement de cette commande à cause d'une échelle de temps et des calibres de mesures trop grands.

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. Ici, typiquement, cette commande peut présenter les meilleures performances en termes de précision et de rapidité de recouvrement de PPM mais elle entraîne obligatoirement une consommation énergétique non négligeable liée au microprocesseur ainsi qu'un surcoût.

b. La technique de Réseau Neurons Artificiels(RNA)

La technique de réseaux de neurones elle est aussi, de plus en plus utilisée, car elle offre une grande alternative pour résoudre des problèmes complexes [42]. 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, de dénominations :

- Couche d'entrée (Input layer),
- Couche cachée (Hidden layer),
- Couche de sortie (Output layer).

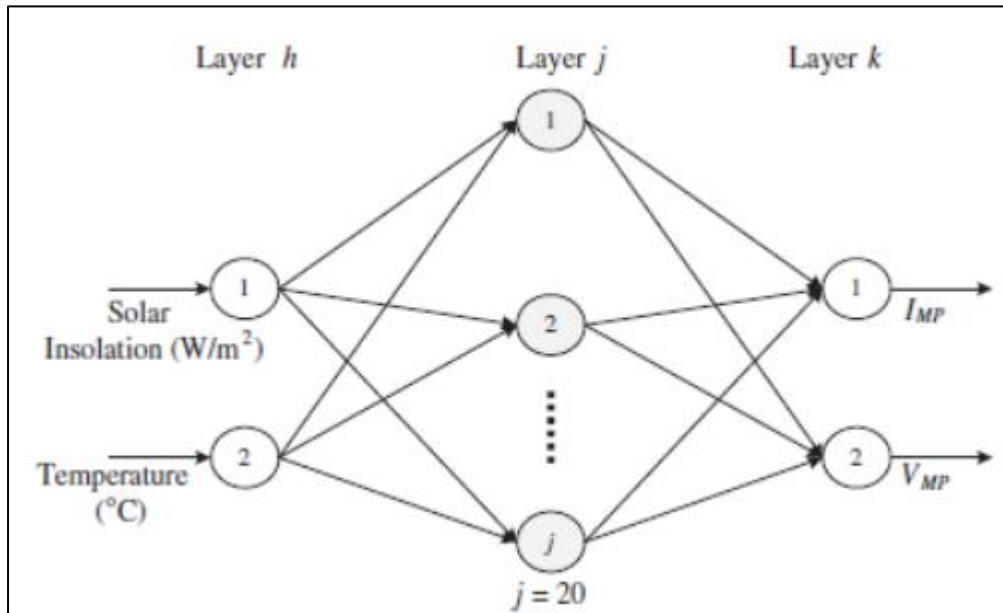


Figure (III-18) : Structure du réseau de neurones artificiels pour MPPT[35].

Le nombre de nœuds au niveau des différentes couches est variable en fonction du degré d'apprentissage souhaité et de la précision de la commande souhaitée. Pour une commande MPPT, les variables d'entrées peuvent donc être les paramètres caractéristiques d'un GPV (I_{cc}, V_{co}) associées ou non à des données atmosphériques comme la température ou l'irradiation ou bien une combinaison de ces dernières. La sortie est généralement un ou plusieurs signaux de référence comprenant au moins le rapport cyclique permettant de commander le convertisseur statique (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. Pour identifier avec précision les différents PPM éventuels, les poids W_{ij} doivent être initialement déterminés avec le plus de soin possible à travers des procédures d'apprentissage pénibles 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 utilisant.

III.3.4. Synthèse des commandes MPPT

III.3.4.1. Implémentation

Le choix de l'algorithme MPPT pour faciliter la mise en œuvre est également un facteur important lors de conception du système PV. Cependant, cela dépend fortement de la connaissance de l'utilisateur dans la manipulation du MPPT. Parce qu'on ne peut préférer faire face à des circuits analogiques et d'autres seront plus familiers dans les circuits numériques.

L'utilisateur est intéressé à travailler avec l'analogique seulement, puis la tension de circuit ouvert et le courant de court-circuit, la technique est une très bonne option. Néanmoins la plupart des algorithmes basés sur l'intelligence du soft computing aiment fuzzy, RNA, PSO, etc... sont tous mis en œuvre sous forme numérique qui nécessite la connaissance de la programmation et logiciel.

La mise en œuvre de l'algorithme MPPT dépend également de la complexité de la conception du nombre de capteurs utilisées, coût et autre exigence matérielles. Certains des algorithmes MPPT peuvent être implémentés seulement sur les topologies spécifiques.

III.3.4.2. Coût

En cas de conditions environnementales en évolution rapide, les exigences des capteurs sont plus augmentées dans la complexité de la conception du matériel et des coûts. Il est plus facile de mesurer la tension que le courant et les capteurs de courant sont très chers ; donc, les techniques MPPT basées sur la mesure actuelle nécessitent un investissement très élevé pour leur œuvre matérielle.

Le coût du MPPT dépend également du choix des circuits analogiques ou numériques, comparatifs au numériques mais au moins le circuit analogique est beaucoup moins cher.

III.3.4.3. 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 suit les changements d'éclairement ou de température et qu'elle soit faite le plus rapidement possible.

III.3.4.4. Flexibilité

La commande MPPT doit être précise et stable quelles que soient ses conditions d'utilisations, c'est-à-dire qu'elle ne doit pas être conçue pour fonctionner pour un seul type d'applications (exemple : spatial ou domestique...). Elle doit être la plus universelle possible, capable de fonctionner avec des panneaux de différentes technologies sans trop de modifications, tout en gardant le même taux de précision et de robustesse.

III.3.4.5. Système de plusieurs maximums w(effet d'ombrage)

La présence de ces maximums provoque une perte d'énergie importante dans le cas d'une mauvaise MPPT. Dans certains travaux [44], il est montré que la détection de ce phénomène implique l'implantation d'un autre étage avec celui de la MPPT. Seule la méthode de balayage de courant qui détecte ce phénomène peut se passer de la nécessité d'un autre étage.

III.4. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons détaillé les différentes méthodes (algorithmes) MPPT rencontrées le plus souvent dans la littérature. L'existence de plusieurs types de commandes MPPT montre que ce domaine de recherche est en permanente progression (amélioration) et qu'il est difficile de trouver une ou plusieurs solutions universelles.

Nous avons aussi présenté les principes des techniques les plus populaires et couramment utilisées dans les travaux de recherche ou dans l'industrie, en mettant en évidence leurs avantages et leurs inconvénients.

Ce chapitre nous servira de support de comparaison avec l'approche de MPPT que nous allons développer dans le chapitre suivant.

IV. Introduction

Nous avons étudié précédemment dans les deux premiers chapitres, les systèmes d'énergies photovoltaïques en utilisant le GPV comme une source d'énergie pour s'approcher aux limites du point de puissance maximal (PPM), qui varie fortement avec des conditions météorologiques (irradiation/température). La recherche du point de puissance maximal (PPM) est basée sur des convertisseurs statiques DC/DC (les hacheurs), qui sont des éléments de base pour l'optimisation de la puissance et l'adaptation de la charge.

Le troisième chapitre présente une étude détaillée sur les différentes méthodes MPPT's (directes, indirectes ou intelligentes) les plus populaires pour dépister le point de puissance dans les systèmes et les installations photovoltaïques.

Dans ce chapitre nous allons faire une analyse et une simulation des différents convertisseurs statiques puis on va analyser les différentes caractéristiques du PV, une simulation et une comparaison des différents MPPT sous MATLAB-SIMULINK.

IV.1.1. Description MATLAB/Simulink

Le logiciel MATLAB, développé par la société « The MathWorks », est devenu un langage de référence pour l'analyse et la résolution de problèmes scientifiques. Il intègre à la fois des solutions de calcul, de visualisation et un environnement de développement.

a. Définition de MATLAB-SIMULINK

Matlab est un logiciel de calcul numérique, qui signifie Matrix laboratory. C'est un langage pour le calcul scientifique, l'analyse de données, leur visualisation et le développement d'algorithmes. Son interface propose, d'une part, une fenêtre interactive type console pour l'exécution de commandes, et d'autre part, un environnement de développement intégré (IDE) pour la programmation d'applications.

Matlab trouve ses applications dans de nombreuses disciplines. Il constitue un outil numérique puissant pour la modélisation de systèmes physiques, la simulation de modèles mathématiques, la conception et la validation (tests en simulation et expérimentation) d'applications. Le logiciel de base peut être complété par de multiples toolboxes, c'est-à-dire des boîtes à outils. Celles-ci sont des bibliothèques de fonctions dédiées à des domaines particuliers. Nous pouvons citer par exemple : l'Automatique, le traitement du signal, l'analyse statistique, l'optimisation...

Matlab utilise deux différentes méthodes dans la simulation : simulation par script ou bien en utilisant SIMULINK.

b. Composants de la bibliothèque MATLAB

Simscape Power Systèmes propose des bibliothèques de composants et des outils d'analyse pour la modélisation et la simulation de systèmes d'alimentation électrique, y compris des machines triphasées, des commandes électriques et des composants pour des applications comme les systèmes FACTS (Flexible AC transmission systems) et les systèmes à énergie renouvelable. L'analyse harmonique, le calcul de la distorsion harmonique totale (THD), le flux de charge et les autres analyses essentielles pour les systèmes d'alimentation électrique sont automatisés, ce qui nous permet d'étudier les performances de notre conception.

IV.1.2. Processus de simulation sous Simulink

Ouvrir Matlab et lancer Simulink en tapant « Simulink » dans la fenêtre de commande.

Il est possible de réaliser la simulation du fonctionnement d'un convertisseur statique en utilisant Matlab /Simulink et le module « Power Systems ».

« Cliquer » sur la case « Blank Model ». Ouvrir le menu « Tools » et cliquer sur « Library Browser ». Dans le menu, ouvrir l'onglet Simscape, puis « Power Systems », « Specialized Technology », « Fundamental Blocks » et « Power Electronics ».

IV.2.Simulation des différents convertisseurs classiques

IV.2.1. Représentation des Schéma et graphes sous MATLAB-SIMULINK

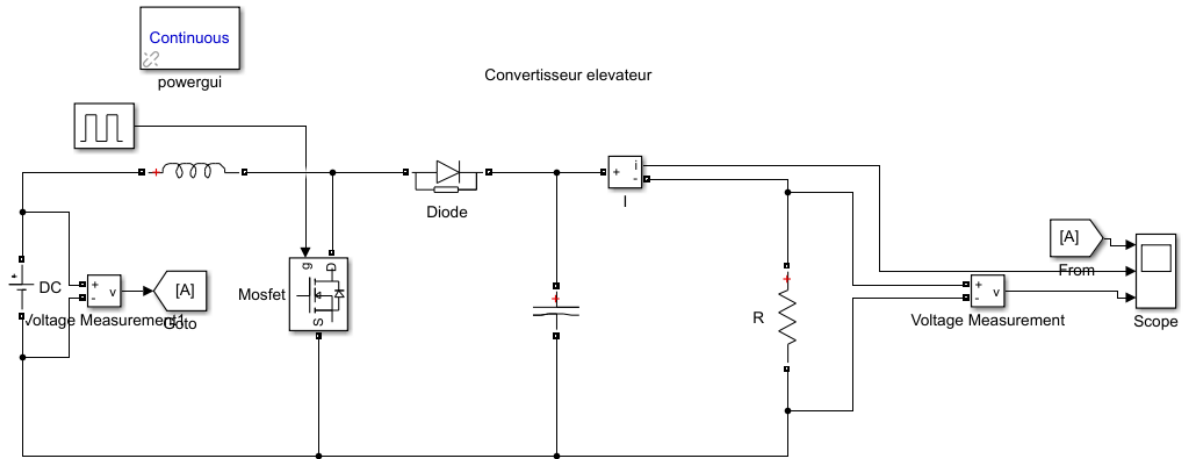


Figure (IV-1) : Convertisseur élévateur sous Matlab/Simulink.

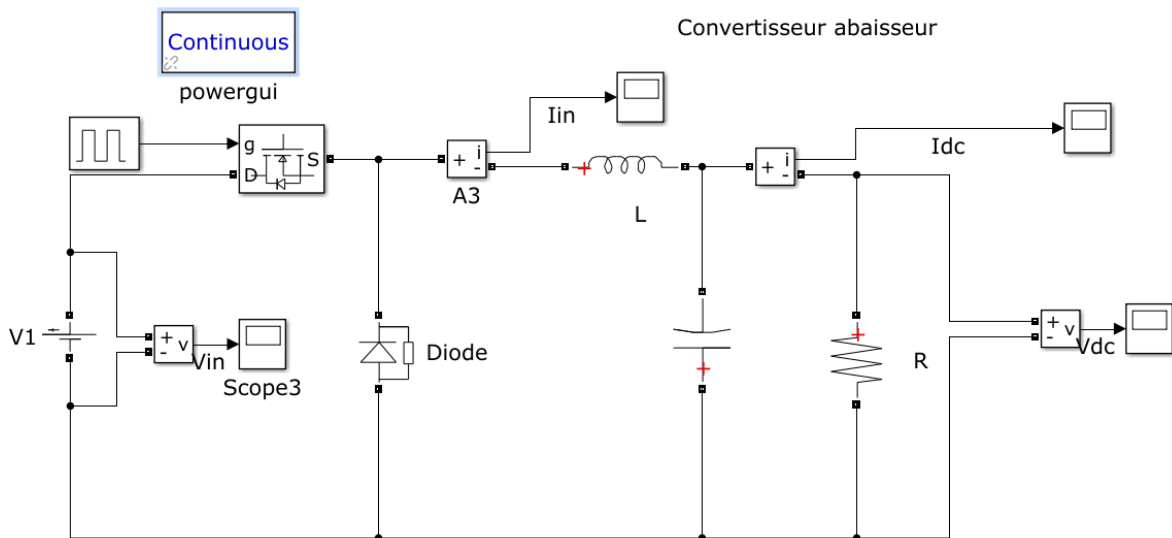


Figure (VI-2) : Convertisseur abaisseur (dévolteur) sous Matlab/Simulink.

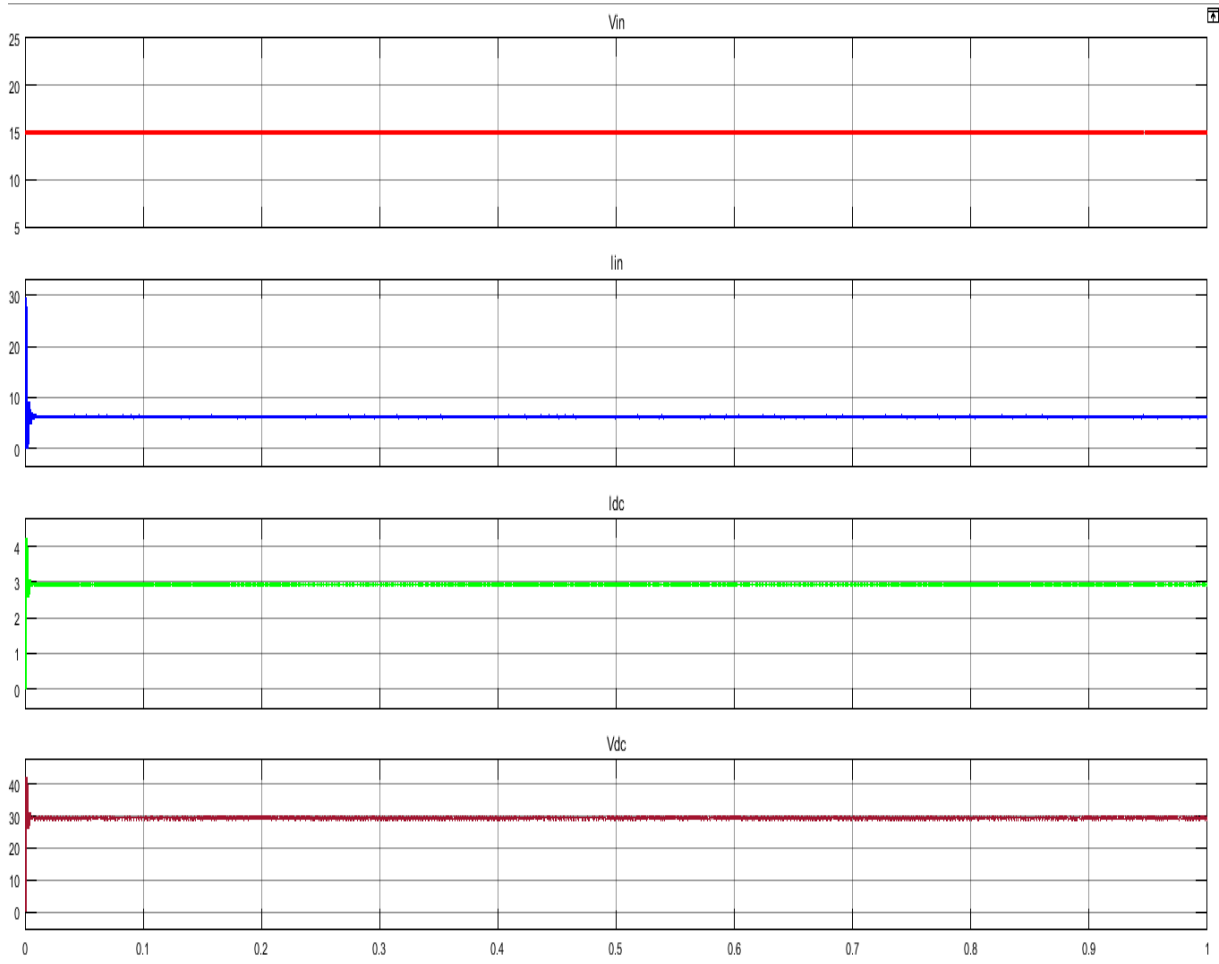


Figure (IV-4) : Courbes de tension, courant d'entrée/sortie du convertisseur élévateur.

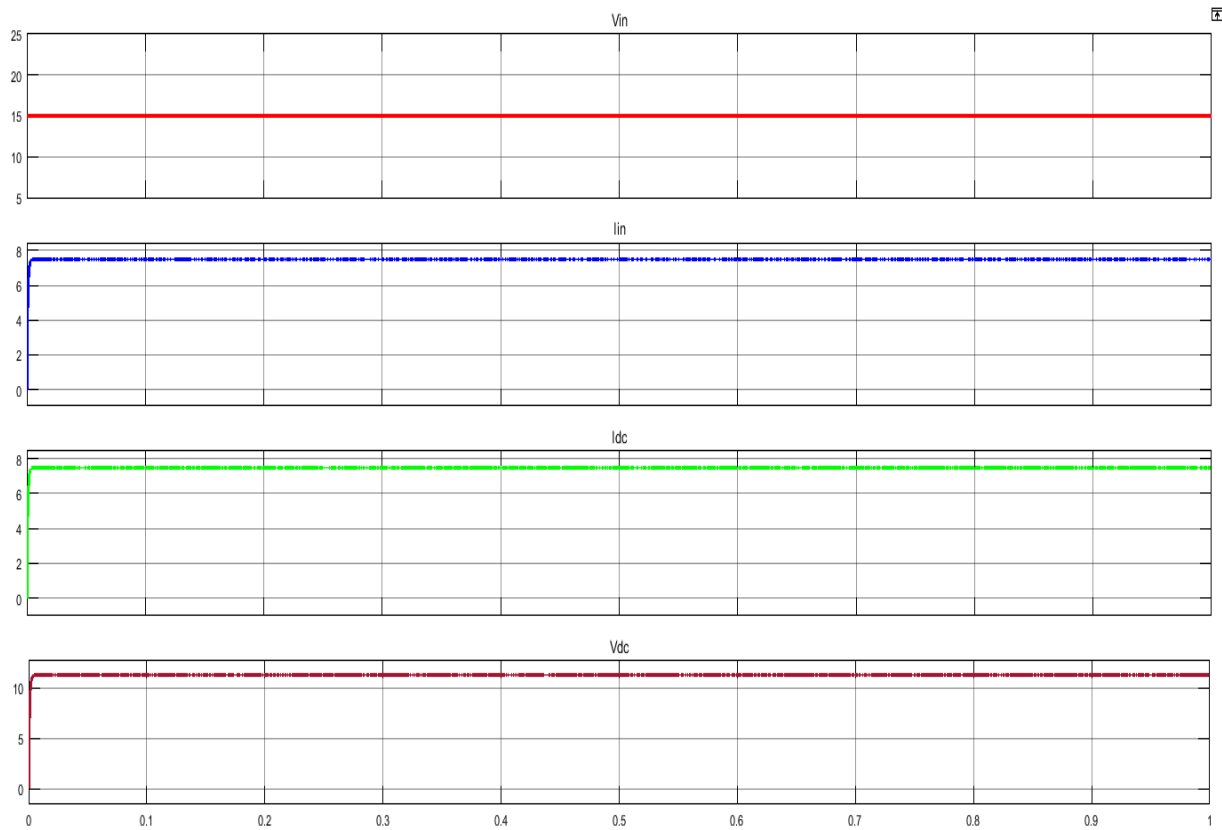


Figure (IV-5) : Courbes de tension, courant d'entrée/sortie du convertisseur abaisseur.

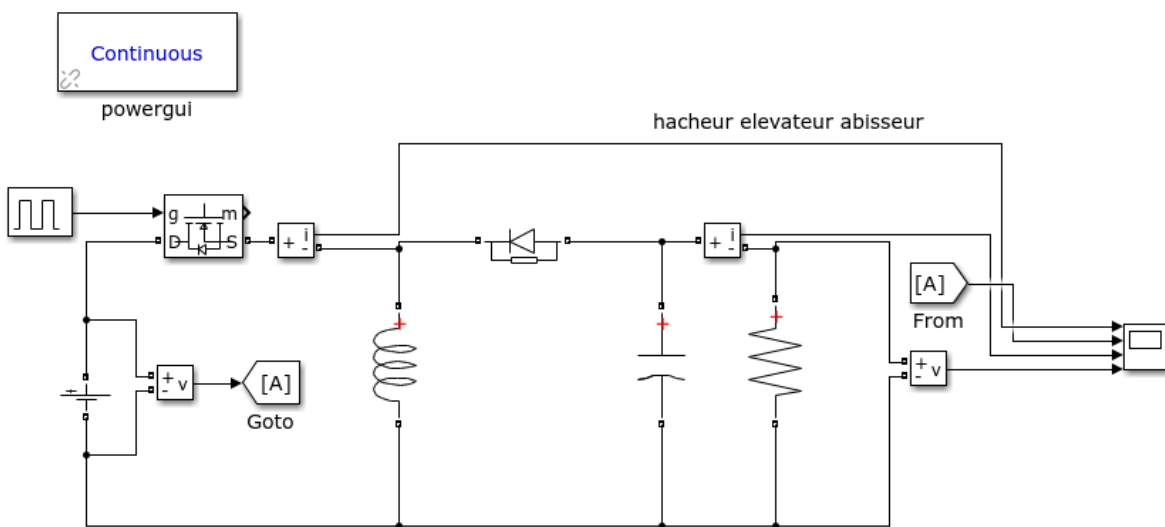


Figure (IV-3) : Convertisseur élévateur-abaisseur sous Matlab/Simulink.

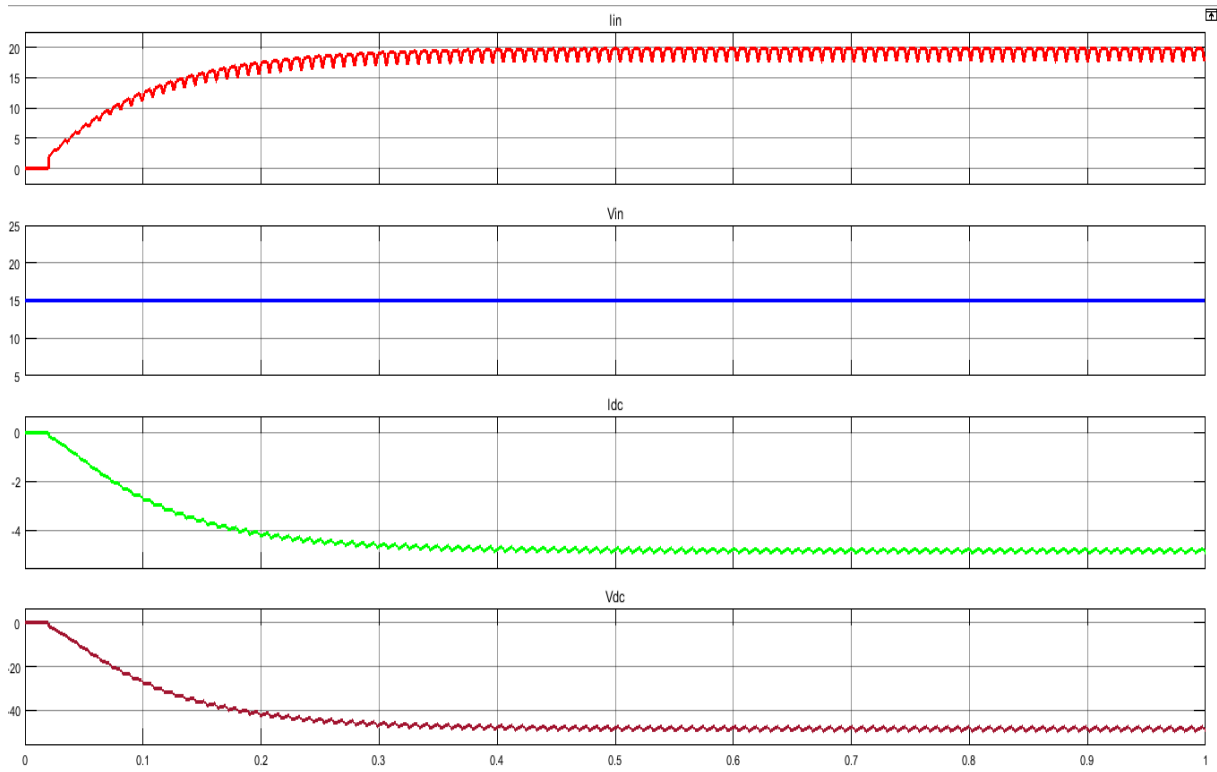


Figure (IV-6) : Courbes de tension, courant d'entrée/sortie du convertisseur abaisseur-élevateur.

IV.2.2. Interprétation des résultats

La simulation des convertisseurs classiques DC-DC: abaisseur, élévateur et abaisseur-élevateur détaillé dans le deuxième chapitre est effectué sous MATLAB/SIMULINK en utilisant les éléments de la bibliothèque SIM-scope pour vérifier et mieux comprendre leurs principes de fonctionnement. En utilisant une source d'entrée continue de 15V et en affectant les mêmes valeurs pour l'inductance $L=50e-3$ H et la capacité $C=1500e-6$ F, pour alimenter une charge résistive $R=10$ ohms pour les hacheurs (élevateur et abaisseur- élévateur) et $R=50$ ohm pour le hacheur abaisseur, et en utilisant la même valeur de rapport cyclique ($\alpha = 50\%$). Les résultats de la simulation de ces trois convertisseurs sont illustrés dans les figures (IV-4), (IV-5) et (IV-6) respectivement.

Pour le hacheur élévateur : on constate que la tension de sortie est élevée (augmentée) tandis que le courant de sortie est abaissé, bien sûr en gardant la même puissance, sauf qu'il va avoir quelques pertes due aux différents composants de l'électronique de puissance qui consomment de l'énergie (L, C et le switch IGBT en MOSFET). L'avantage major de ce type d'hacheur est l'obtention d'une tension élevée pour alimenter des charges à haute tension, il permet l'élimination d'utilisation des transformateurs qui sont à des coûts élevés et créent des harmoniques donc des grandes pertes d'énergie.

Pour le hacheur abaisseur : d'après les résultats illustrés sur la figures (IV-5) on remarque que la tension de sortie est plus petite que celle d'entrée, mais le courant de sortie est élevé et la puissance de sortie est restée toujours la même. Ce type d'hacheur peut donc être utilisé dans des installations où la charge a besoin d'une tension petite par rapport à celle délivrée par la source.

Pour le hacheur élévateur-abaisseur : nous avons déduit d'après les graphes de la figure (IV-6) que la tension et le courant de sortie sont inversement proportionnels à la tension et au courant d'entrée. L'avantage de ce convertisseur est la permutation automatique entre les deux convertisseurs (buck et boost), son utilisation permettra d'obtenir une tension de sortie élevée ou abaissée par rapport à celle de la source, selon le type de la commande associée.

Etant donné l'avantage des hacheurs élévateurs et comme nous avons choisi une charge résistive, que nous devons alimenter à une tension élevée, nous avons sélectionné le convertisseur élévateur pour effectuer la comparaison entre les différents MPPT's.

IV.2.3. Simulation de l'installation photovoltaïque

Les spécifications du panneau solaire utilisé dans notre simulation et le cahier de charge du système sont données dans le tableau suivant :

Nombre de module	En série	1
	En parallèle	1
Puissance maximale (W)	60.53	
Tension en circuit ouvert Voc (V)	21.1	
La tension au point de puissance maximale Vpm (V)	17.0458	
Coefficient de température de Voc (%deg.C)	-0.229	
Cellules par module (Ncel)	36	
Courant du court-circuit Isc (A)	3.8	
Le courant au point de puissance maximale Imp (A)	3.5510197	
Coefficient de température de Isc (%deg.C)	0.030706	
Connexion générée par la lumière IL (A)	3.86	
Courant de saturation de diode IO (A)	4.4972 e-13	

Facteur d'idéalité de diode	0.76717
Résistance shunt Rsh (ohms)	124.864
Résistance série Rs (ohms)	0.51439

Tableau (IV-1) : Cahier de charge du panneau solaire utilisé.

Avant d'effectuer une comparaison entre les différentes méthodes du suivi du point de puissance maximal, nous allons présenter l'influence de différentes conditions climatiques (température et ensoleillement) sur les caractéristiques du panneau photovoltaïque.

IV.3. L'influence de la température et l'ensoleillement sur les caractéristiques du panneau solaire

La connexion directe d'un panneau solaire à une charge résistive permet l'extraction des caractéristiques (tension-courant) et (tension- puissance) sous différents niveaux d'éclairement et différentes valeurs de la température. Le schéma de simulation sous MATLAB /SIMULINK utilisé est illustré sur la figure (IV-7)

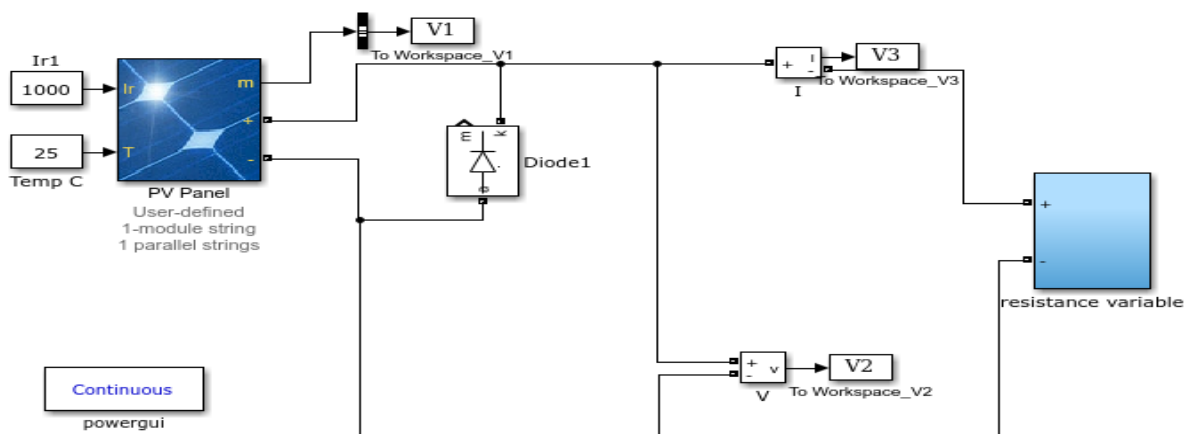


Figure (IV-7) : connexion directe du panneau PV à une charge variable.

IV.3.1. L'influence de l'irradiation

Nous faisons varier l'irradiation de $0W/m^2$ jusqu'à $1000W/m^2$ avec un pas de $200W/m^2$, cela fait pour une température $T = 25\text{ }^\circ\text{C}$ les résultats sont illustrés dans les figures suivantes :

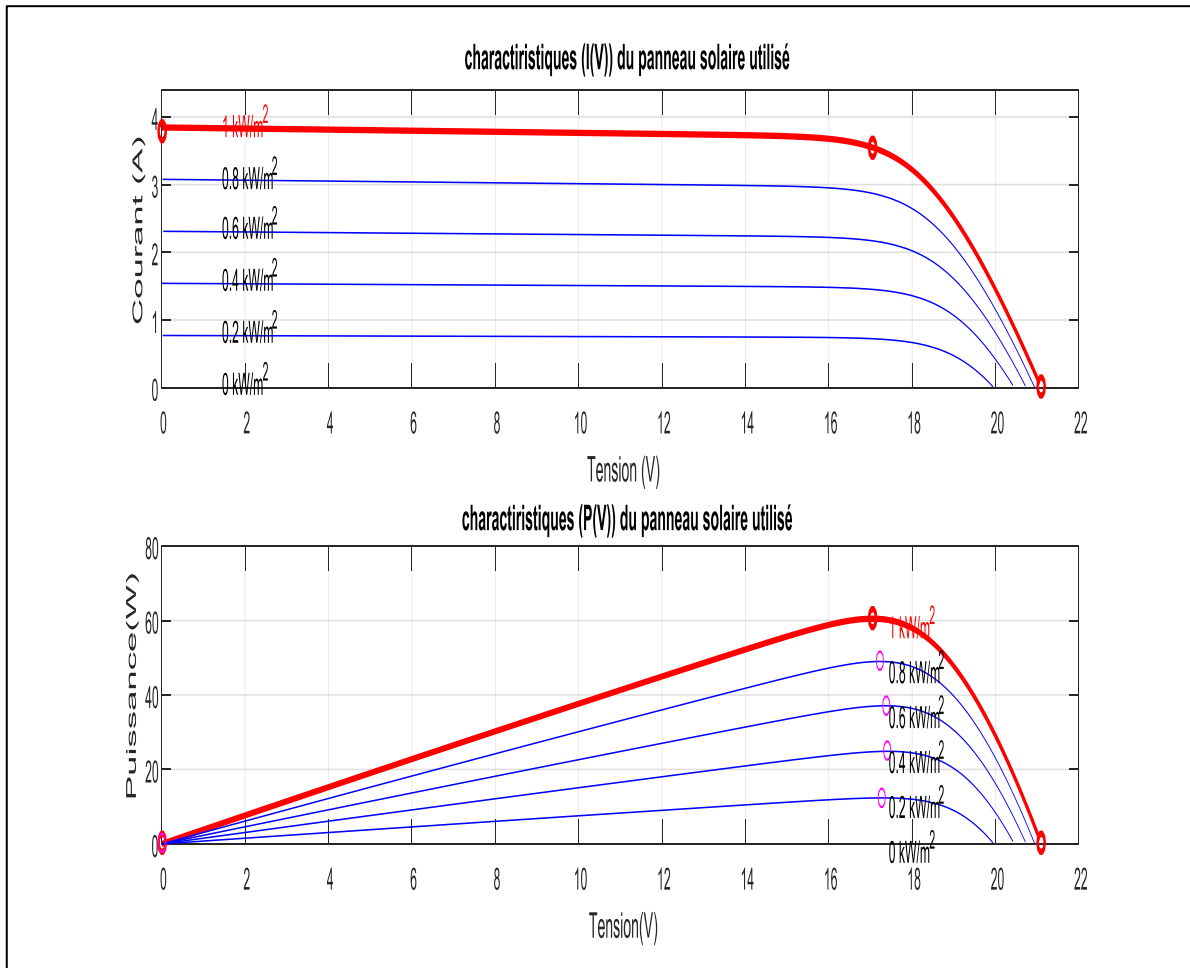


Figure (IV-8) : Caractéristiques I(V) et P(V) du panneau solaire à une température $T = 25\text{ }^\circ\text{C}$ et à différentes valeurs d'éclairement.

Nous constatons que l'augmentation d'éclairement engendre un déplacement de la caractéristique tension-courant suivant l'axe du courant, ainsi qu'une variation de la puissance.

La valeur du courant court-circuit est directement proportionnelle à l'intensité du rayonnement incident, par contre la tension en court-circuit ne varie pas dans les mêmes proportions, mais reste quasiment identique même à faible éclairement.

Ceci implique donc que :

- La puissance optimale de panneau PV (P_{max}) est pratiquement proportionnelle à l'éclairement.
- Les points de puissance maximale se situent à peu près à la même tension.

IV.3.2. L'influence de la température

Nous faisons varier la température de 0 °C jusqu'à 60 °C pour une irradiation de 1000W/m², les résultats sont illustrés dans les figures suivantes :

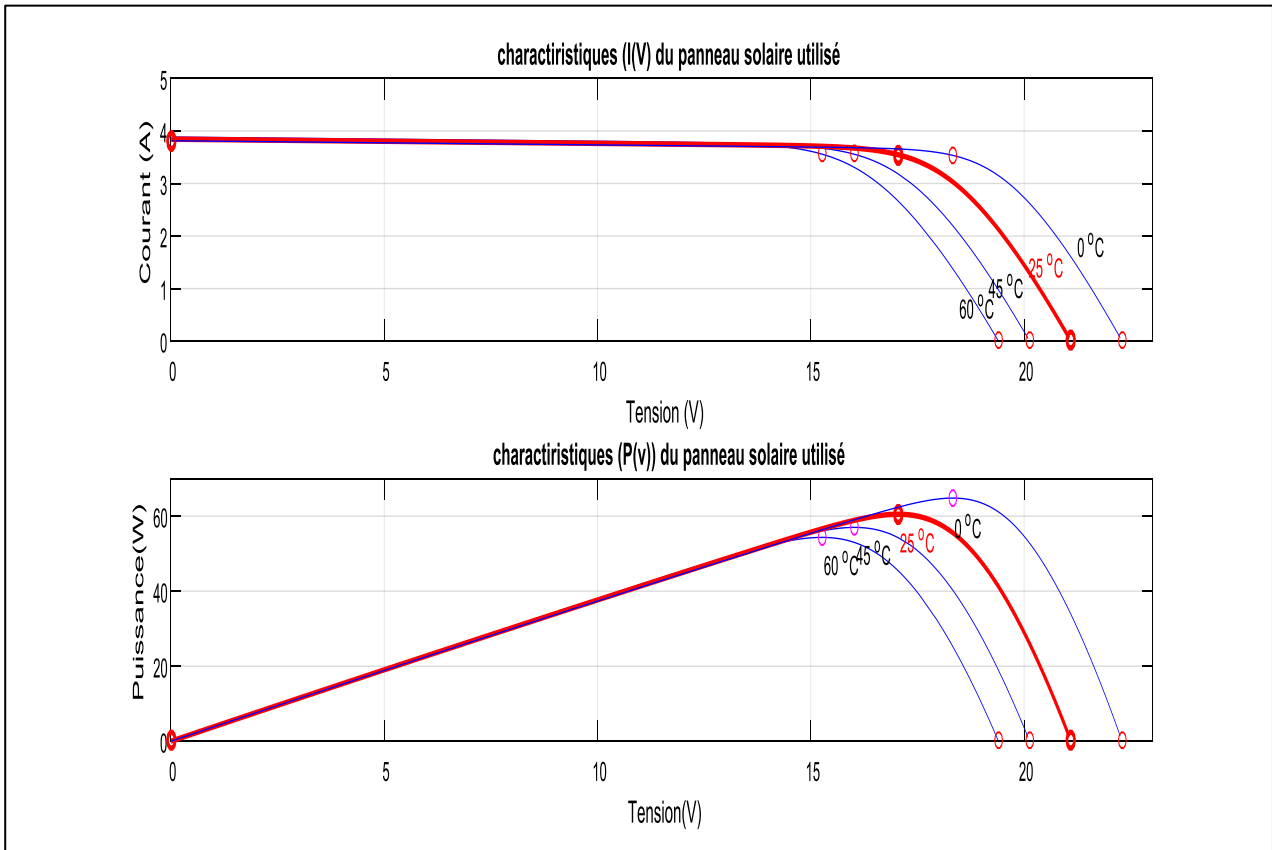


Figure (IV-9) : Caractéristiques I(V) et P(V) du panneau solaire à une irradiance de 1000W/m² et différentes valeurs de température.

Nous remarquons 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.

Nous avons donc déduit que le panneau peut fournir une tension correcte, même à faible éclairage, par conséquent la puissance extractible diminue. Lors du dimensionnement d'une installation, la variation de la température du site sera impérativement prise en compte.

Il est important de savoir que la puissance du panneau diminue environ de 0,5% par chaque degré d'augmentation de la température de la cellule au-dessus de 25 °C.

Enfin, il est important de noter que, lorsque l'éclairement est plus faible que 200 W/m^2 , la tension du panneau varie à son tour. Elle baisse avec l'éclairement (variation logarithmique).

IV.4. Simulation des différents MPPT's

Après avoir dimensionné et choisi les éléments constitutifs d'une installation PV. La sélection du l'algorithme MPPT à utiliser est très importante. Dans notre simulation nous avons utilisé un système photovoltaïque isolé, composé d'un panneau photovoltaïque de 36 cellules, de puissance $P = 60W$, une commande MPPT et d'un hacheur élévateur, composé d'une inductance L pour diminuer l'ondulation du courant ($L = 2e^{-5}H$), une capacité C pour limiter l'ondulation de tension de sortie de valeur ($C = 100e^{-6} F$) et un IGBT pour l'alimentation des puissances moyennes. Le tout connecté à une charge résistive de valeur $R = 40ohm$.

Le schéma de la simulation utilisé est illustré sous la figure (IV-10) :

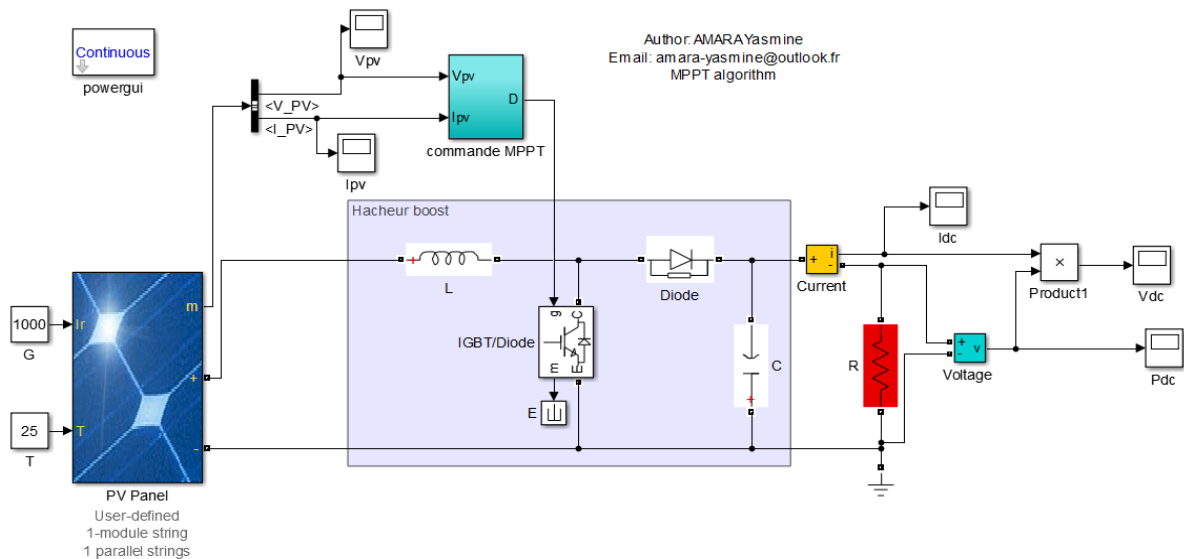


Figure (IV-10) : Schéma MATLAB/SIMULINK utilisé pour comparer les commandes MPPT's.

Et comme le P&O est l'algorithme la plus utilisée dans la littérature, nous avons simulé cet algorithme sous MATLAB /SIMULINK et observer les différentes courbes (tension, courant et puissance) d'entrée /sortie.

VI.4.1. Les résultats de simulation

a. Les courants

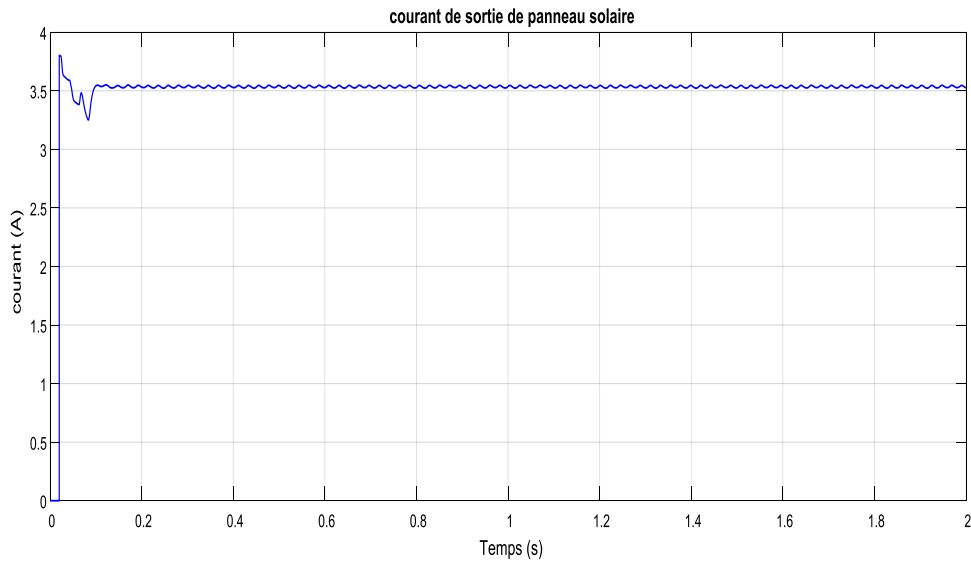


Figure (IV-11) : Courant de sortie du panneau PV.

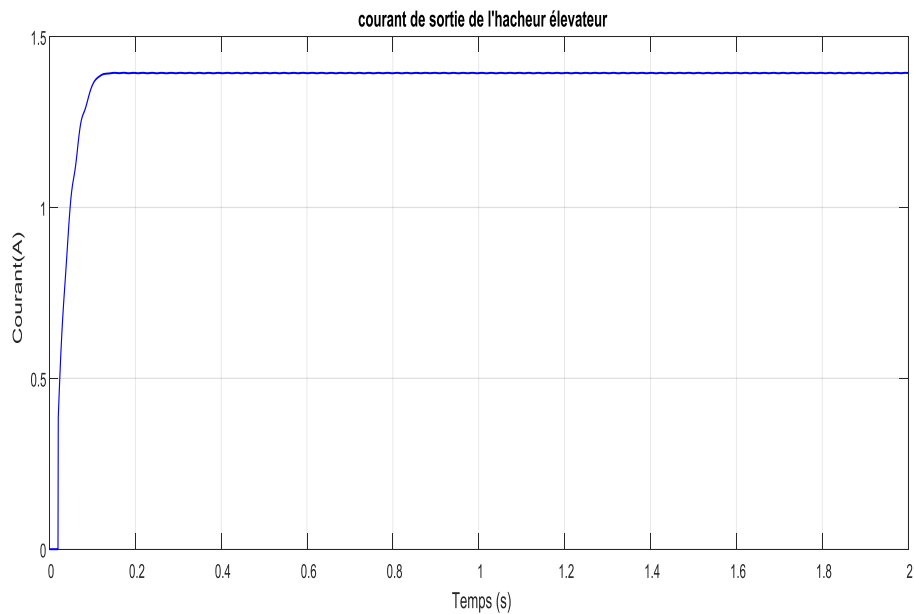


Figure (IV-12) : Courant de sortie du hacheur boost (alimentant la charge).

D'après les figures (IV-11) et (IV-12), nous remarquons que, le courant de sortie du panneau PV est abaissé par rapport au courant de sortie du hacheur (alimentant la charge) dans la figure (IV-12), c'est le rôle d'un hacheur boost. Ce qui confirme la variation du courant en fonction de l'irradiation.

b. Les tensions

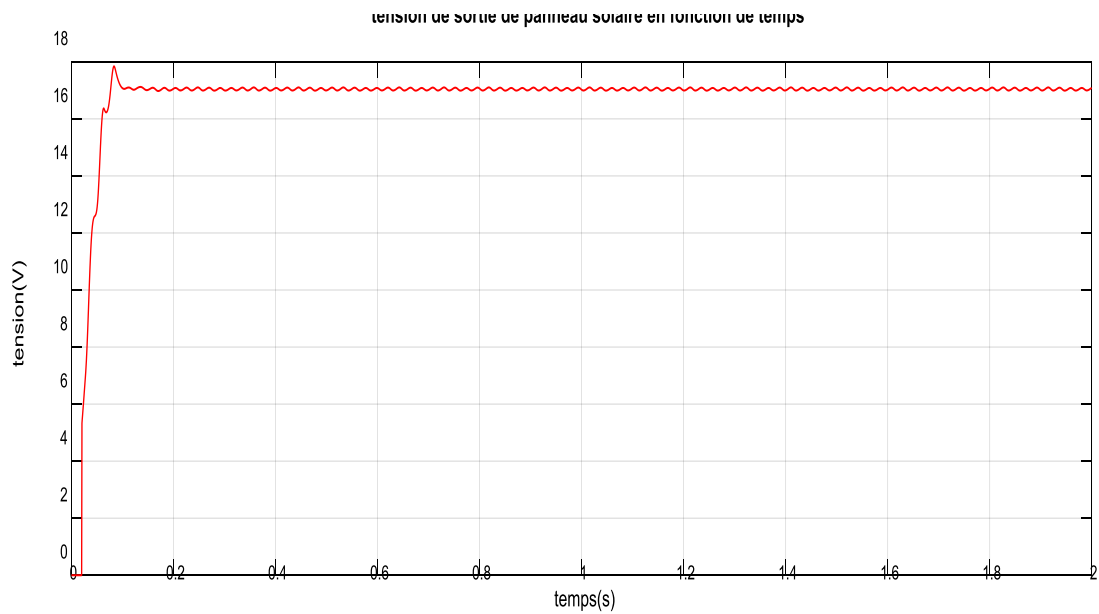


Figure (IV-13) : Tension de sortie de panneau PV.

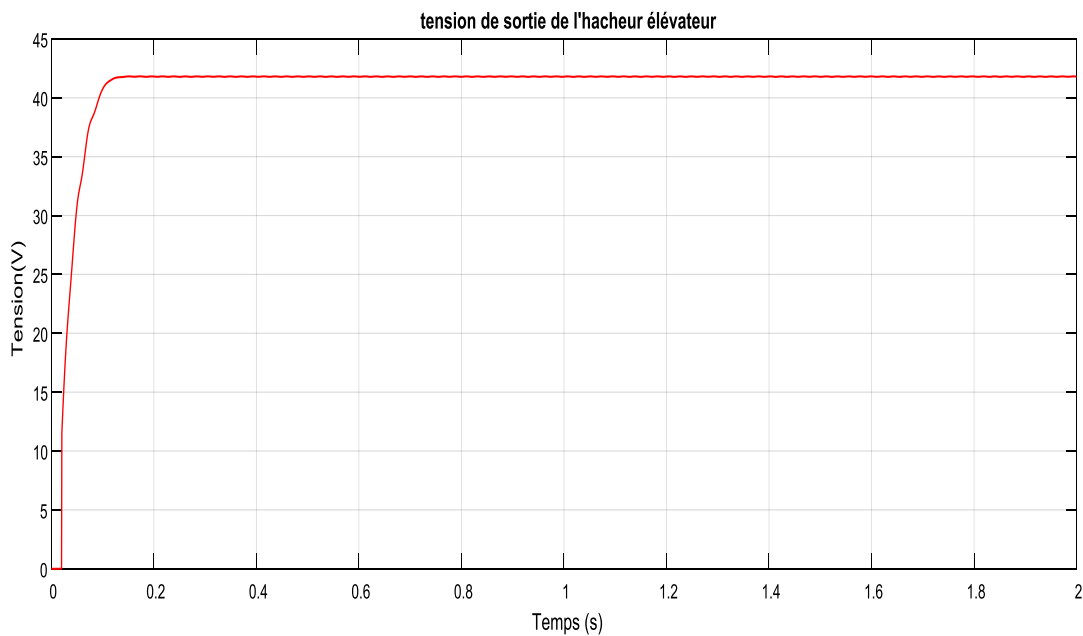


Figure (IV-14) : Tension de sortie de hacheur boost (alimentant la charge).

A partir des figures (IV-13) et (IV-14) nous remarquons la fiabilité de la commande P&O parce qu'il y a une proportionnalité entre la tension de sortie du panneau et la tension de sortie du hacheur boost (augmentation de la tension de sortie du hacheur), et aussi nous avons remarqué la constance du rapport cyclique qui est de ($\alpha = 50\%$) pour chaque éclairement.

c. Les puissances

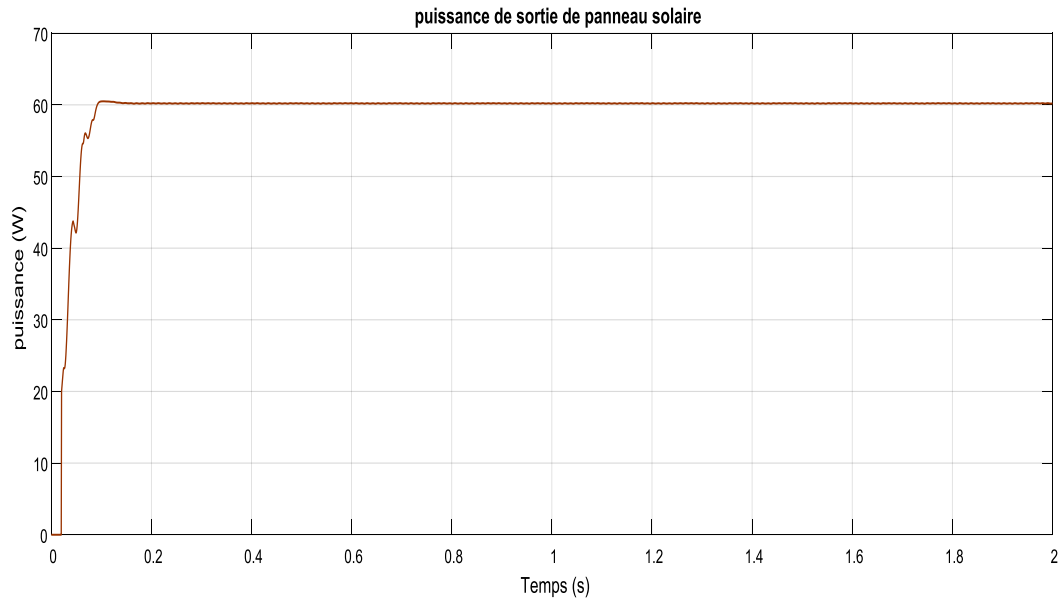


Figure (IV-15) : Puissance de sortie du panneau PV.

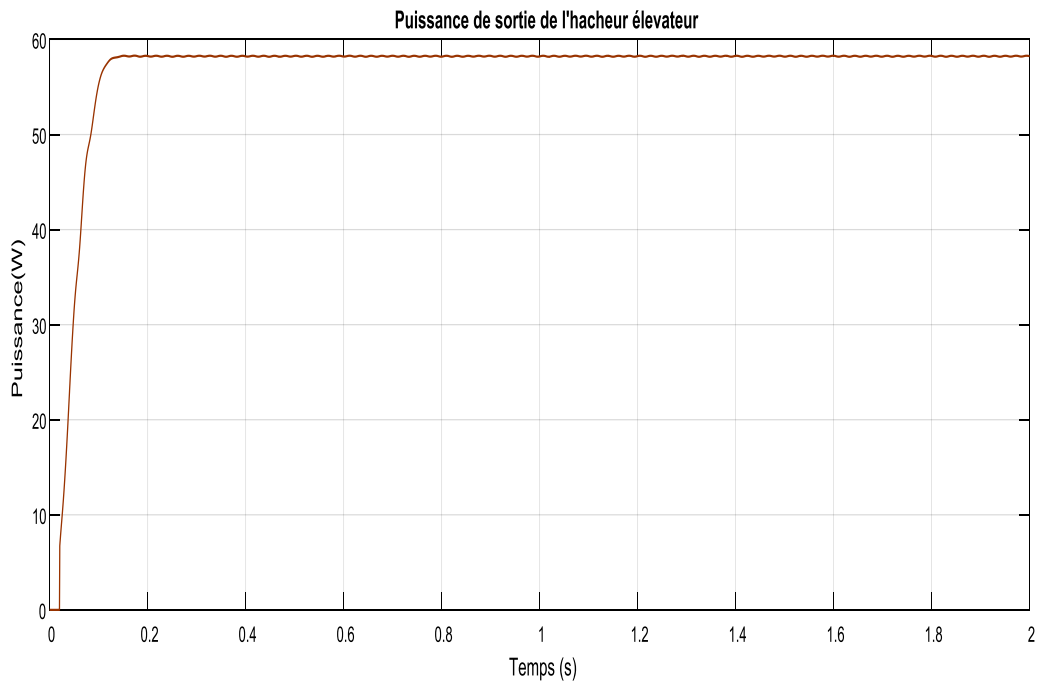


Figure (IV-16) : Puissance délivrée à la charge.

Nous avons remarqué une petite différence entre la puissance de sortie du panneau et celle de la sortie de charge, cette différence représente la puissance consommée par le hacheur à cause de la diode et l'IGBT qui ne sont pas idéaux.

La figure (IV-16) montre bien que le GPV fonctionne à sa puissance maximale quel que soit l'irradiation, même à faible irradiation. Cela est assuré par la commande MPPT.

IV.3.5. Comparaison entre les techniques MPPT's

Pour mieux comprendre et choisir l'MPPT, il faut analyser la perturbation du point de fonctionnement engendrée par les ondulations du courant, de la tension et de la puissance, qui présente un inconvénient pour l'MPPT.

Certaines méthodes de MPPT peuvent être implantées en analogique et d'autres en numérique ou en même temps. Cela a une influence directe sur la simplicité de l'implantation de l'algorithme et donc, sur le coût de la commande MPPT et son rendement.

IV.3.5.1. Résultats de simulation

Les résultats de simulation des algorithmes précédemment étudiés, sont donnés par les figures (IV-17), (IV-18) et (IV-19). Ces figures montrent les valeurs de sortie de la puissance et de la tension et du courant pour une paire de température et d'éclairement égale à (25°C, 1000 W/m²).

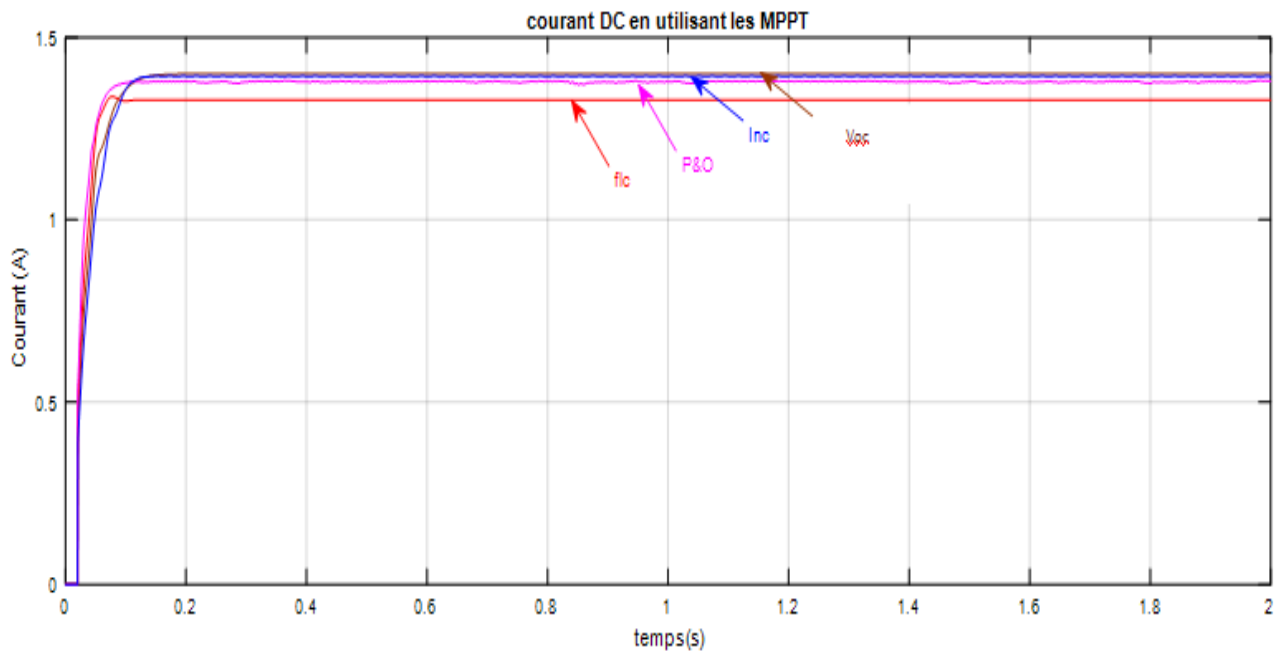


Figure (IV-17) : Courbes des courants à la sortie de boost obtenu par les différentes MPPT.

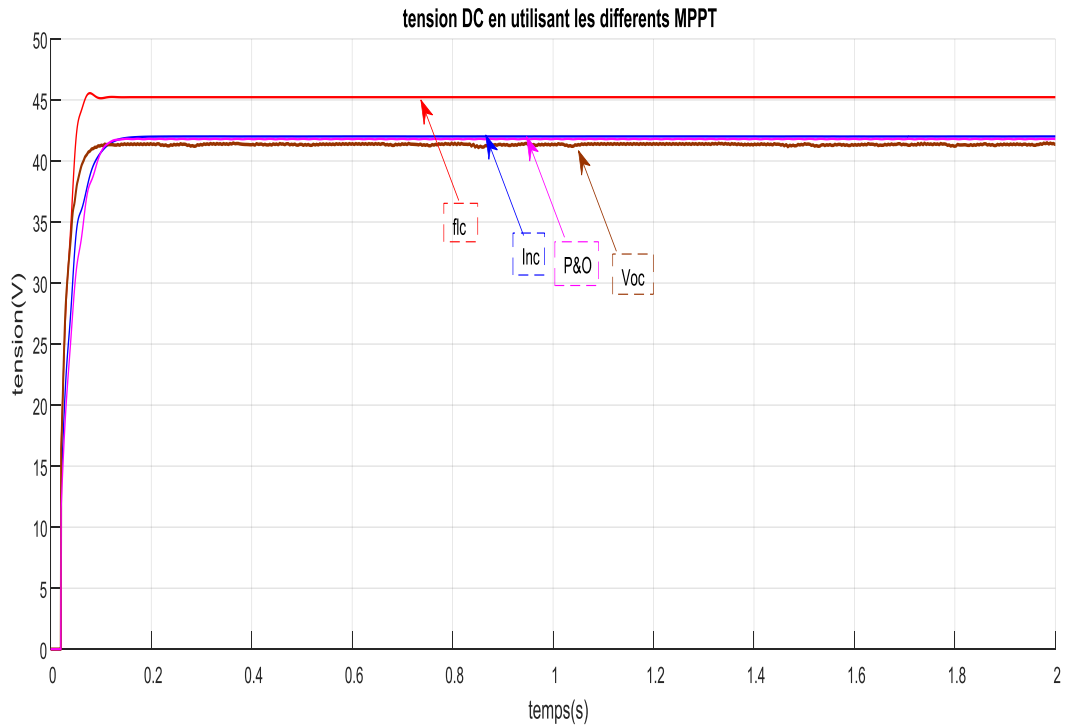


Figure (IV-18) : Courbes des tensions à la sortie de boost obtenu par les différents MPPT.

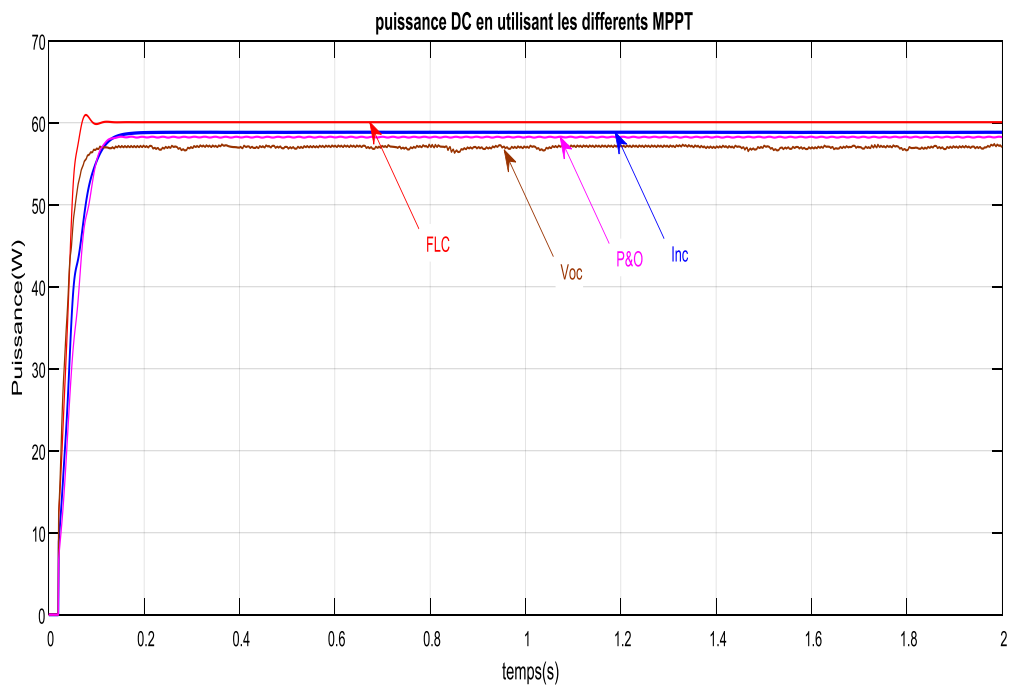


Figure (IV-19) : Courbes des puissances à la sortie de boost obtenu par les différents MPPT.

IV.3.5.2. Interprétation des résultats

Les figures (IV-17), (IV-18) et (IV-19) montrent les formes d’ondes dans le temps des courants, tensions et puissances de sortie du convertisseur DC-DC en utilisant les commandes FLC, P&O, INC et Voc. Dans tous les cas nous avons simulé les algorithmes à des conditions standards de la température et de l’éclairement (25°C, 1000 W/m²). Nous avons une détection du point maximal avec des ondulations assez faibles dans le régime transitoire, avec un recouvrement du PPM. Nous avons remarqué aussi que la réponse dynamique de la commande FLC est élevée en la comparant aux autres algorithmes ce qui signifie que cet algorithme a de meilleures performances en terme de précision et de rapidité de recouvrement de PPM, nous avons analysé les autres courbes et nous avons ordonné les autres méthodes selon la réponse dynamique : l’INC-Cond atteint le PPM avec une grande précision suivi de Voc tandis que le P&O oscille autour de PPM et n’atteint jamais le point maximal, par contre le temps mis par ces commandes pour se stabiliser sur un nouveau PPM est élevé en comparant à la commande P&O. La commande floue met 1,75 s pour s’immobiliser sur le PPM, Inc met 1.65s, Voc met 1.30s alors que la commande P&O s’y positionne au bout de 1,25s, c'est-à-dire dès qu’elle l’a atteint.

En résumé, la commande FLC s’avère être très performante, 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. Donc elle entraîne une consommation énergétique non négligeable. Mais elle peut traiter des problèmes d’une grande complexité grâce à des paramètres interdépendants. Donc c’est l’algorithme la plus efficace et fiable pour extraire le maximum de la puissance du GPV malgré son coût élevé.

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

Méthode MPPT	Connaissance des paramètres du GPV	Nécessité d’une mise à jour périodique	Mode d’implantation	Complexité d’implantation	Vitesse de recouvrement du PPM	La puissance de sortie de boost (W)	Type de capteur utilisés	Rendement (%)
Perturbe et observation (P&o)	Non	Non	Analogique ou numérique	<i>basse</i>	variable	$P_{out} = 58,75W$	1 tension 1 courant	86%

Inc-cond(Inc)	Non	Non	Numérique	moyenne	variable	$P_{out} = 59,87W$	1 tension 1 courant	98%
Logique flue (fIC)	Oui	Oui	Analogique ou numérique	haute	rapide	$P_{out} = 60W$	1 tension 1 courant	99%
Fonction de Vco	Oui	Oui	Analogique ou numérique	moyenne	moyenne	$P_{out} = 58,85W$	1 tension	88%

Tableau (IV-2) : Comparaison des techniques MPPT.

IV.4. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons simulé les différents types de convertisseurs DC/DC (convertisseur buck, convertisseur boost et convertisseur buck-boost) et nous avons sélectionné le convertisseur élévateur pour effectuer la comparaison entre les différents MPPT's.

Nous avons aussi fait une simulation de l'installation photovoltaïque tout en étudiant l'influence de la température et l'ensoleillement sur les caractéristiques du panneau, de nous avons déduit que l'augmentation d'éclairement engendre un déplacement de la caractéristique tension-courant suivant l'axe du courant, ainsi qu'une variation de la puissance ainsi la valeur du courant court-circuit est directement proportionnelle à l'intensité du rayonnement incident, par contre la tension en court-circuit ne varie pas dans les mêmes proportions, mais reste quasiment identique même à faible éclairement.

La simulation permet de déduire que le GPV est beaucoup plus sensible à l'irradiation qu'à la température. Le courant est très sensible à l'irradiation, tandis que la tension est très sensible à la température, par conséquent il est indispensable de contrôler la tension au lieu de contrôler le courant.

D'après les résultats obtenus, montre l'efficacité de l'intelligence artificiel (logique floue) pour avoir un bon rendement, et l'utilité de l'MPPT pour extraire le maximum de puissance du module PV et la protection de l'installation.

Conclusion générale

Nous avons entamé un sujet qui est en plein développement qui consiste « une étude comparative entre les différents MPPT's photovoltaïques ».

Nous vous avons fait un aperçu sur l'énergie solaire, le principe de fonctionnement des panneaux photovoltaïques et les différentes modélisations utilisées pour la simulation des cellules solaires.

En général, un convertisseur DC/DC est placé entre le PV et la charge, en faisant varier le rapport cyclique du point de fonctionnement pour poursuivre le point de puissance maximale (MPPT) qui est nécessaire pour extraire le maximum de puissance du module PV.

Les différentes topologies des convertisseurs continu-continu que nous pouvons utiliser dans une installation PV, leurs principes de fonctionnement et le choix de l'inductance et la capacité.

En raison du coût très élevé du générateur photovoltaïque et au rendement faible du panneau photovoltaïque qui est due aux caractéristiques électriques non linéaires des cellules et leur association, une solution a été mise au point, qui consiste la recherche du point de puissance maximale (dite MPPT) pour avoir un meilleur résultat et produire un maximum de puissance.

Pour dépister ce point de fonctionnement qui varie par rapport aux conditions météorologiques, une méthode de dépistage est utilisée pour trouver le point de puissance maximale qui est basé sur des convertisseurs statiques considérés comme éléments de base pour l'optimisation de la puissance et l'adaptation de la charge.

Nous avons aussi présenté une étude sur les différentes méthodes de la commande MPPT, tout en donnant de multiples algorithmes contrôlant cette commande.

En dernier nous avons analysé et simulé les convertisseurs statique, puis nous avons analysé les différentes caractéristiques du panneau photovoltaïque, une simulation et une comparaison des différents MPPT en utilisant le logiciel MATLAB-SIMULINK a été effectué.

L'analyse des résultats obtenus, montre l'efficacité de l'intelligence artificiel (logique floue) pour avoir un bon rendement, et l'utilité de l'MPPT pour extraire le maximum de puissance du module PV et la protection de l'installation.

Dans ce sens la, les prochains travaux doivent prendre en compte l'influence de l'ombrage partielle sur la puissance produite, l'adaptation de l'MPPT à ce phénomène et le raccordement de l'installation au réseau de distribution.

Références

- [1] H.J.Moller, 'Semiconductors for solarcells' Artch House INC,MA,1993.
- [2] H.Knopf , 'Analysis,Simulation and maximum of evaluation power point tracking(MPPT), Méthode for a solar powerd vehicule', Master of science in Electrical and computer engineering, Portland state university 1999.
- [3] I.Protin. S.Astier, "'Convertisseur photovoltaïque'", technique de l'ingénieur, réf D3360-Vol DAB.
- [4] Group 01 gr 509 , "'Powersupply for the AAU cubesat'", report AALBORG University 2001.
- [5] Antonio luque and Steven Hegedus, "'Handbook of photovoltaïque science and engineering'", JhonWiley & sous LTd,2003.
- [6] A.Ould Mohamed yahia et al "' Etude et modalisation d'un générateur photovoltaïque ''revue des énergies renouvelables Vol.11N3°,2008pp473-483.
- [7] A.Boyette, "'Contrôle commande d'un générateur asynchrone à double alimentation avec système de stockage pour la production éolienne'", thèse doctorat de l'université Henri Poincaré Nancy I, énergie électrique 2006.
- [8] R. Jimmy et Al, "' le pompage photovoltaïque ''", Edition Multi mondes, 1999.
- [9] M. Boukli-hacene Omar, « Conception et Réalisation d'un générateur PV MUN d'un convertisseur MPPT pour une meilleur gestion énergétique», Université Abou Bakr Belkaid, Telemcen, 2010/2011.
- [10] A .LABOURET, M.VILLOZ, "' énergie solaire photovoltaïque '' ,DUNOD, France, 2^{ème} édition, 2005.
- [11] F.Abdo, "' Croissance de couche minces de silicium par épitaxie en phase à vase température pour application photovoltaïque ''", Thèse de doctorat Institut National des science appliquées de Lyon, 2007 .
- [12] A .Ricaud, "' modules photovoltaïque –Filière technologique'' ; Technique de l'ingénieur , D3940, 2009.

Références

- [13] C.Bernard , J.Chauvin, D.Lebrun, J.FMuraz, P.Stassi , « Station solaire autonome pour l'alimentation des antennes de l'expérience de radio détection à l'observatoire Pierre Auger », L'archive ouverte pluridisciplinaire HAL.2006.
- [14] S.Petibon, « Nouvelles architecture distribuer de gestion et de conversion de l'énergie pour les applications photovoltaïques », Thèse de doctorat de l'université de Toulouse, janvier 2009.
- [15] M.Nkouimi, « Outil d'aide au dimensionnement des systèmes photovoltaïque domestique», Mémoire de fin d'étude pour l'obtention du diplôme d'ingénieur de conception, Ecole National supérieur Polytechnique de Yaoundé, 2010.
- [21] Hnnes. Knopf, « Analysis and simulation tools for solararray power systems », Universty of Centrale Floride.2005.
- [17] Lionel Vichiu, « modélisation et analyse de l'intégration des énergies renouvelables dans un réseau autonome », Université Havre, 2005.
- [18] Nattorn Pongtatananukul, « Analysis and Simulation tools for solararraysystems », Universty of Centrale Floride.2005.
- [19] H. Knopf, « Analysis, Simulation and Maximum of Evaluation Power Point Tracking (MPPT) Methods for a SolarPoweredVehicle », Master of Science in Electrical and Computer Engineering, Portland State University, 1999.
- [20] C. Alonso, « Contribution à l'Optimisation, la Gestion et le Traitement de l'Energie », Mémoire en vue de l'obtention de l'Habilitation à Diriger les Recherches, Université Paul Sabatier, Toulouse 3, Décembre 2003
- [21] CH.Maher, « Gestion Energétique des Panneaux photovoltaïque », Mémoire Master Université Sfax 2007-2008
- [22] K.Sobaihi, « étude et réalisation d'un hacheur de Tracking du point de puissance Maximale (MPPT) a contre réaction », Mémoire de Magister Ecole Nationale polytechnique 10, Avenue Hassen Badi El -Harrach Alger.
- [23] Alain Bilbao learreta, « Réalisation de commandes MPPT Numériques », Rapport de stage Projet Fin d'Etudes Universtat Rovira Virgili 2006.

Références

- [24] N. Abouchabana, « Etude d'une nouvelle topologie buck-boost appliquée à un MPPT », Mémoire de Magistère, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, Algérie, 2009.
- [25] S. M. Ait-Cheikh, « Etude, Investigation et conception d'algorithmes de commande appliqués aux systèmes photovoltaïques », Thèse de Doctorat d'état, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, Algérie, 2007.
- [26] S. Issaadi, « Commande d'une poursuite du point de puissance maximum (MPPT) par les Réseaux de Neurones », Mémoire de magister, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, Algérie, 2006.
- [27] M. Moulay-Amar et M. Loghouini, « Etude et réalisation d'un système de poursuite de point de puissance maximale à base de microcontrôleur destiné à une installation photovoltaïque », Mémoire d'ingénieur, université de Ouargla, Algérie, 2005
- [28] M.N.Mchalikh et CH.Hmada, « Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque en fonctionnement autonome et connecté au réseau », Mémoire de Master Université Kasdi Merbah–Ouargla 2013.
- [29] Bogdan Grabowski, Christian Ripoll, « Aide-mémoire Électronique », Dunod, 5e édition, 2008.
- [30] Hiren Patel and Vivek Agarwal, "Maximum Power Point Tracking Scheme for PV Systems Operating Under Partially Shaded Conditions", IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 55, No. 4, April 2008.
- [31] D.Sera, T.Kerekes, R.Teodorescu, F.Blaadbjerg, "Improved MPPT algorithms for rapidly changing Environmental conditions", Communication and information Technologies, ISCIT' 06, 215, sept 2006.
- [32] Trishan Eshram and Patrick L. Chapman, "Comparison of Photovoltaic Array Maximum Power Point Tracking Techniques", IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 22, No. 2, June 2007.
- [33] A. Chermitti, O. Boukli-Hacene and S. Mouhadjer, "Design of a Library of Components for Autonomous Photovoltaic System under Matlab/Simulink", International Journal of Computer Applications, Vol. 53, N°14, 2012.
- [34] W. J. A. Teulings, J. C. Marpinard, A. Capel, and D. O'Sullivan, "A new maximum power point tracking system", IEEE Power Electronics Specialists Conference 1993, PESC'93, pp. 833-838, Jun. 1993.

Références

- [35] M.R. Sourov, U.T. Ahmed and M.G. Rabbani, 'A High Performance Maximum Power Point Tracker for Photovoltaic Power System Using DC-DC Boost Converter', IOSR Journal of Engineering, Vol. 2, N°12, pp. 12 – 20, 2012.
- [36] K. H. Hussein, I. Muta, T. Hshino, and M. Osakada, "Maximum photovoltaic power tracking: an algorithm for rapidly changing atmospheric conditions", Proc. Inst. Elect. Eng. Vol. 142, No.1, pp. 59-64, Jan. 1995.
- [37] W. Xiao, W. G. Dunford, "A modified adaptive hillclimbing MPPT method for photovoltaic power systems", IEEE Power Electronics Specialists Conference, PESC'04, Vol. 3, pp. 1957-1963, Jun. 2004.
- [38] N. kasa, Takahiko Iida, and Gourab Majumdar , "Robust Control for Maximum Power Point Tracking in Photovoltaic Power System", IEEE –PCC Osaka , pp. 827-832, Jun. 2002
- [39] E. Koutroulis, K. Kalaitzakis, N. C. Voulgaris, "Development of a microcontroller based photovoltaic maximum power point tracking control system", Power Electronics, IEEE Transactions on, Vol. 16, pp. 46-54, Jan. 2001.
- [40] C. Cabal, 'Optimisation Energétique de l'Etage d'Adaptation Electronique dédié à la Conversion Photovoltaïque', Thèse de Doctorat, LAAS, Université de Toulouse, 2008.
- [41] K.K. Tse, M.T. Ho, H.S. Chung and S.Y. Ron Hui "A comparative study of Maximum-Power-Point Trackers for photovoltaic panels using switching-frequency modulation scheme", IEEE Trans. On Industrial Electronics, Vol. 51, No. 2, April 2004.
- [42] N. OuldCherchali* , A. Morsli** , M. S. Boucherit ** ;L.Barazane *** and A.Tlemçani*, "Application de la Logique Floue pour la Poursuite du Point de Puissance Maximale d'un Système Photovoltaïque" ,Laboratoire de Recherche en Electrotechnique et Automatique. Université de Médéa Algérie.
- [43] Hussein, K.H.; Muta, I.; Hoshino, T.; Osakada, M.; "Maximum photovoltaic power tracking: an algorithm for rapidly changing atmospheric conditions" Generation, IEE Proceedings Transmission and Distribution. Vol. 142, No. 1, Jan. 1995 pp:59 – 64.
- [44] K.Kobayashi, I. Takano, and Y. Sawada, "A study on a two stage maximum power point tracking control of a photovoltaic system under partially shaded insolation conditions," in IEEE Power Eng. Soc. Gen.Meet., 2003, pp. 2612–2617.

Le soleil est une source permanente d'énergie renouvelable mais elle n'est pas stable, elle varie le long de la journée. Pour une exploitation optimale de cette énergie, il faut utiliser des générateurs PV avec un bon rendement et essayer de choisir la meilleure commande MPPT pour extraire le maximum de puissance de la source.

Dans ce mémoire, nous avons traité la modalisation des différents composants d'une installation photovoltaïque autonome, qui sont : les panneaux, les hacheurs et la charge.

Nous avons fait une étude comparative des différentes MPPT's utilisés pour la variation du rapport cyclique du convertisseur DC-DC.

Les résultats de simulation ont été satisfaisants et montrent l'efficacité de l'MPPT pour bénéficier au maximum de la puissance délivré par le panneau PV.

Les mots clés :

Panneau solaire,

Commande MPPT,

Convertisseur DC-DC,

Rapport cyclique.