

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITÉ IBN-KHALDOUN DE TIARET

FACULTÉ DES SCIENCES APPLIQUEES
DÉPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE



MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

Pour l'obtention du diplôme de Master

Domaine : Sciences et Technologie

Filière : Génie Electrique

Spécialité : Automatisation et contrôle des systèmes industrielles

THÈME

**Conception et modélisation d'un système photovoltaïque
adapté par une commande MPPT**

Préparé par : Maatallah El-abbes

Boumaza Nabil

Devant le Jury :

| Nom et prénoms | Grade | Qualité |
|-----------------------|--------------|----------------|
| Mr : HSSEIN | MCA | Président |
| Mr : KOULLALI | MAA | Examineur |
| Mr : BESOLTAN | MAA | Examineur |
| Mr : BELFDHEL | MAA | Encadreur |

PROMOTION 2016 /2017

REMERCIEMENT

Louange à ALLAH, le très grand et le seul et unique qui nous a donné la force et le courage pour terminer nos études et élaborer ce travail.

Avant de commencer la présentation de ce travail, Nous profitons de l'occasion pour remercier toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce projet de fin d'études.

Nous tenons à exprimer nos vifs remerciements pour mon grand et respectueux, Mr. Belefdhal seifeddine d'avoir accepté de nous encadrer pour notre projet de fin d'études, ainsi que pour ses précieux conseils et surtout pour nous avoir laissé une grande liberté dans la réalisation et la rédaction de ce travail, ses remarques pertinentes et son encouragement.

Maatallah Boumaza



Dedicace

Louange à Dieu, qui selon notre travail..

Je dédicace le fruit de ce travail de Dieu leur a commandé dans le livre saint notre très chère en présence de Dieu nous demandons et la satisfaction ainsi que les personnes âgées.

Ma mère à la source de l'amour et de la compassion.

Pour mon père que j'avais un lien et un soutien dans ma carrière dans l'espoir de mon succès et à atteindre mes objectifs.

à mes soeurs, mes frère et pour chaque membre de la famille petit et grand.

Tous les amis de la vie scolaire tous les compagnons du chemin et tous ce que j'avais un lien dans la réalisation de ce travail.

Pour tous les étudiants en sciences, particulier des étudiants du filière Génie électrique.

[Http://maomao520.yeah.net](http://maomao520.yeah.net)



Nabil



Dedicace

Louange à Dieu, qui selon notre travail..

Je dédicace le fruit de ce travail de Dieu leur a commandé dans le livre saint notre très chère en présence de Dieu nous demandons et la satisfaction ainsi que les personnes âgées.

La miséricorde de Dieu à mon père.

Ma mère à la source de l'amour et de la compassion, et que j'avais un lien et un soutien dans ma carrière dans l'espoir de mon succès et à atteindre mes objectifs.

à mes soeurs, mes frère et pour chaque membre de la famille petit et grand.

Tous les amis de la vie scolaire tous les compagnons du chemin et tous ce que j'avais un lien dans la réalisation de ce travail.

Pour tous les étudiants en sciences, particulier des étudiants de la filière Génie électrique.

[Http://maomao520.yeah.net](http://maomao520.yeah.net)



Elabbes

SOMMAIRE

Sommaire

Chapitre I : Modélisation d'un module photovoltaïque à vide

| | |
|---|----|
| I.1. Introduction | 3 |
| I.2. L'énergie solaire | 3 |
| I.3. La cellule PV | 4 |
| I.3.1. L'effet photovoltaïque | 5 |
| I.3.2. Technologie d'une cellule photovoltaïque | 5 |
| I.4. Regroupement des cellules | 8 |
| I.4.1. Regroupement en série | 8 |
| I.4.2. Regroupement en parallèle | 9 |
| I.4.3. Regroupement (série et parallèle) | 9 |
| I.5. Modélisation d'une cellule photovoltaïque | 10 |
| I.5.1. Cellule photovoltaïque idéal | 10 |
| I.5.2. Cellule photovoltaïque réel | 11 |
| I.6. Module photovoltaïque | 12 |
| I.7. Influence de la température | 15 |
| I.8. Influence de l'éclairement | 17 |
| 9. Conclusion | 18 |

Chapitre II : Adaptation du générateur PV

| | |
|---|----|
| II.1. Introduction..... | 19 |
| II.2. Étage d'adaptation entre un Générateur PV et une charge..... | 19 |
| II.3. Convertisseurs DC/DC..... | 19 |
| II.4. Adaptation du générateur PV | 25 |
| II.4.1 Schéma synoptique du system PV adapté..... | 25 |
| II.5. Principe et régimes de fonctionnement des convertisseurs DC/DC..... | 27 |

| | |
|--|----|
| I I.5.1. Régime continu..... | 27 |
| I I.5.1.1. Définition..... | 27 |
| II.5.1.2. Ondulation à la sortie..... | 29 |
| II.5.1.3. Ondulation à l'entrée..... | 31 |
| II.5.1.4. Condition d'adaptation..... | 33 |
| II.5.2. Régime discontinu..... | 34 |
| II.6. Analyse du fonctionnement de convertisseur dans l'environnement Matlab-Simulink..... | 35 |
| II.7. Caractéristiques électriques typiques du système PV..... | 36 |
| II.8. Influence du le rapport cyclique et la charge sur les grandeurs électrique (puissance et tension)... | 38 |
| II.8. conclusion..... | 39 |

Chapitre III : La commande MPPT adoptée

| | |
|--|----|
| III.1. Introduction..... | 40 |
| III.2. La commande MPPT | 40 |
| III.2.1. Suivi de la puissance maximale du générateur photovoltaïque | 40 |
| III.2.3. Classification des techniques MPPT | 42 |
| III.2.4. Les premiers types de technique MPPT | 43 |
| III.2.5. Evolution du point d'opération du générateur PV | 44 |
| III.3. Les méthodes de poursuite de MPP | 45 |
| III.3.1. Méthodes à contre réaction de tension..... | 45 |
| III.3.2. La méthode de court-circuit..... | 46 |
| III.3.3. Méthodes à contre réaction de puissance..... | 46 |
| III.3.4. Algorithme perturbation et observation | 46 |
| III.3.5. Algorithme incrémentation de la conductance | 48 |
| III.4. Simulation du système photovoltaïque adapte par la commande mppt..... | 50 |
| III.4.1. Résultats de simulation..... | 52 |
| III.4.1.1 Résultats de simulation de La commande MPPT P et O | 52 |

| | |
|--|----|
| III.4.1.2 Résultats de simulation de La commande MPPT Inc Cond | 54 |
| III.5. Conclusion | 57 |
| Conclusion générale | |

Liste des figures

Chapitre I : modélisation d'un module photovoltaïque à vide

| | |
|---|----|
| Fig. I.1 : Spectre d'irradiante solaire..... | 4 |
| Fig. I.2: Schéma électrique d'une cellule photovoltaïque..... | 4 |
| Fig. I.3 : Schéma d'une cellule photovoltaïque..... | 5 |
| Fig. I.4 : Cellule au Silicium Monocristallin..... | 6 |
| Fig. I.5 : Cellule au Silicium Poly-cristallin..... | 6 |
| Fig. I.6 : Cellule au Silicium amorphe (couche mince)..... | 7 |
| Fig. I.7 : Caractéristique courant tension de N_s cellule en série..... | 8 |
| Fig. I.8 : Caractéristique courant tension de (N_p) cellule en parallèle..... | 9 |
| Fig. I.9 : Modèle de cellule photovoltaïque idéal..... | 10 |
| Fig. I.10 : Modèle de la cellule photovoltaïque réel..... | 11 |
| Fig. I.11 Schéma block de courant I_{ph} | 14 |
| Fig. I.12 Schéma block de courant I_0 | 15 |
| Fig. I.13 Schéma block de courant I | 15 |
| Fig. I.14 La caractéristique de $I=f(V)$ avec l'effet de température..... | 16 |
| Fig. I.15 La caractéristique de $P=f(V)$ avec l'effet de température..... | 16 |
| Fig. I.16 : La caractéristique $I=f(v)$ avec l'effet de l'éclairement..... | 17 |
| Fig. I.17 : La caractéristique $P=f(v)$ avec l'effet l'éclairement..... | 17 |

Chapitre II : adaptation du générateur PV

| | |
|--|----|
| Fig. II.1 : Étage d'adaptation entre un GPV et une charge..... | 19 |
| Fig. II.2 : Le schéma de base du convertisseur dévolteur (Buck converter)..... | 21 |
| Fig. II.3 : Convertisseur Boost (élevateur de tension)..... | 21 |

| | |
|---|----|
| Fig. II : Convertisseur Boost durant l'état on..... | 22 |
| Fig. II.5 : Convertisseur Boost durant l'état off..... | 22 |
| Fig. II.6 : Convertisseur Buck-Boost..... | 23 |
| Fig. II.7 : Convertisseur Buck-Boost durant l'état on..... | 24 |
| Fig. II.8 : Convertisseur Buck-Boost durant l'état off..... | 24 |
| Fig. II.9 : Convertisseur Cuk..... | 24 |
| Fig. II.10 : schéma synoptique du système PV adapté par le convertisseur DC-DC (hacheur)..... | 26 |
| Fig. II.11 : Système PV formé par un générateur PV (2500), convertisseur d'énergie 'élevateur' et une charge résistive R_s | 27 |
| Fig. II.12 : Schéma de signal de commande | 29 |
| Fig. II.13 : Forme de l'ondulation de courant dans l'inductance, dans la diode I_D , en sortie I_s , et forme de l'ondulation de la tension de la sortie..... | 31 |
| Fig. II.14 : Forme du courant dans l'inductance, dans le condensateur d'entrée C_e et forme de l'ondulation de la tension d'entrée V_{pv} | 33 |
| Fig. II.15 : signal de commande et forme d'onde des différentes grandeurs électriques dans le convertisseur élévateur en régime discontinu en présence des condensateurs..... | 35 |
| Fig. II.16 : Résultat de simulation des courant d'entrée et de sortie I_s de convertisseur (survolteur) | 36 |
| Fig. II.17 : Résultat de simulation des tensions d'entrée V_{pv} et de sortie V_s de convertisseur (survolteur) | 36 |
| Fig. II.18 : Résultat de simulation des puissances d'entrée P_{pv} et de sortie P_s de convertisseur (survolteur) en fonction de temps lorsque $\alpha = 0.7$, $R_s = 8 \Omega$, éclairement = 1000 W/m^2 à 25 C° | 37 |

Chapitre III : la commande MPPT adoptée

| | |
|--|----|
| Fig. III.1 : Chaîne de conversion d'énergie solaire comprenant une commande MPPT..... | 41 |
| Fig. III.2 : Recherche et recouvrement du Point de Puissance Maximale (a) suite à une variation d'éclairement, (b) suite à une variation de charge,(c) suite à une variation de température..... | 42 |

| | |
|---|----|
| Fig.III.3 : Principe classique d'une MPPT..... | 43 |
| Fig.III.4.Principe de fonctionnement d'une commande MPPT..... | 44 |
| Fig.III.5 : Changement d'éclairement et conséquence sur les courbes de puissance d'un Générateur PV ainsi que sur l'adaptation source-charge..... | 45 |
| Fig.III.6 : L'organigramme de l'algorithme de perturbation et de l'observation (P et O)..... | 47 |
| Fig.III.7: Schéma block d'une commande MPPT de l'algorithme 'perturbation et observation'..... | 48 |
| Fig.III.8. L'organigramme de l'algorithme incrémental conductance | 49 |
| Fig.III.9: Schéma block d'une commande MPPT de l'algorithme Incrémental de la conductance..... | 50 |
| Fig.III.10. Schéma MATLAB SIMULINK d'un système photovoltaïque avec la commande MPPT (P et O)..... | 50 |
| Fig.III.11. Schéma MATLAB SIMULINK d'un système photovoltaïque avec la commande MPPT (Inc Cond)..... | 51 |
| Fig.III.12. Résultat de simulations typiques de l'influence du changement de l'éclairement sur les grandeurs électriques (puissance et tension) à l'entrée (Ppv, Vpv)et à la sortie (Ps, Vs) de convertisseur (survolteur) du système PV, Rs= 50 Ω..... | 52 |
| Fig.III.13. Résultat de simulations typiques de l'influence du changement de la température sur les grandeurs électriques (puissance et tension) à l'entrée (Ppv, Vpv)et à la sortie (Ps, Vs) de convertisseur (survolteur) du système PV, Rs= 50 Ω..... | 53 |
| Fig.III.14. Résultat de simulations typiques de l'influence du changement de l'éclairement sur les grandeurs électriques (puissance et tension) à l'entrée (Ppv, Vpv)et à la sortie (Ps, Vs) de convertisseur (survolteur) du système PV, Rs= 50Ω..... | 54 |
| Fig.III.15 Résultat de simulations typiques de l'influence du changement de la température sur les grandeurs électriques (puissances et tensions à l'entrée (Ppv, Vpv) et à la sortie (Ps, Vs) de convertisseur (survolteur) du système PV, Rs= 50 Ω, éclairement de 1000W/m ² | 55 |

Liste des symboles

E : Eclairement (W/m^2).

R_p: Résistance parallèle shunt(Ω).

R_s: Résistance série(Ω).

I_{ph} : Le photo-courant (A).

I_{sat} : Courant de saturation (A).

T_c : Température de jonction ($^{\circ}\text{K}$).

G : L'éclairement de référence ($1000 \text{ W}/\text{m}^2$).

I : Le coefficient de courant en fonction de température ($\text{A}/^{\circ}\text{C}$).

T_{ref}: La température de référence ($273 \text{ }^{\circ}\text{K}$).

n : Facture de non idéalité de la jonction.

I_{cc} : Le courant de court-circuit (A).

V_{co} : La tension de circuit ouvert (V).

N_s : Nombre de modules dans le panneau en série.

N_p : Nombre de modules dans le panneau en parallèle.

P_{max} : La puissance maximale produite PV (W).

V_{max} : Tension qui correspond à la puissance maximale (V).

I_{max} : Courant qui correspond à la puissance maximale (A).

V_{opt} : Tension optimale (V).

I_{opt} : Courant optimum (A).

V_{co} : Tension à circuit ouvert (V).

I_{cc} : Courant de court-circuit (A)

K : coefficient de Boltzman ($1.38.10^{-23} \text{ J} / \text{K}$)

T_c : Température de la cellule ($^{\circ}\text{C}$)

Abréviation utilisées

PV: Panneau Photovoltaïque.

GPV: Générateur Photovoltaïque.

MPPT: Maximum Power Point Tracking.

PPM: point de puissance maximum.

P et O: Perturbation et Observation.

Inc Cond: incrémental conductance .

DC: Courant Continu (Direct Curent).

AC: Courant Alternatif (Alternative Curent).

Introduction générale

Introduction Générale

La plus grande partie de l'énergie consommée actuellement provient de l'utilisation des combustibles fossiles comme le pétrole, le charbon, le gaz naturel ou encore l'énergie nucléaire. ces ressources deviennent de plus en plus rares, pendant que les demandes énergétiques du monde s'élèvent continuellement. Il est estimé que les réserves mondiales seront épuisées vers 2030 si la consommation n'est pas radicalement modifiée, et au maximum vers 2100 si des efforts sont produits sur la production et la consommation [1].

Etant donné que cette forme d'énergie couvre une grosse partie de la production énergétique actuelle, il s'avère nécessaire de trouver une autre solution pour prendre le relais, la contrainte imposée est d'utiliser une source d'énergie économique et peu polluante car la protection de l'environnement est devenue un point important.

A ce sujet, Les énergies renouvelables, comme l'énergie solaire photovoltaïque, éolienne ou hydraulique, ... apparaissent comme des énergies inépuisables et facilement exploitables. Si l'on prend l'exemple du soleil, une surface de 145000km² (4% de la surface des déserts arides) de panneaux photovoltaïques (PV) suffirait à couvrir la totalité des besoins énergétiques mondiaux [2].

Dans ce dernier cas, la conception, l'optimisation et la réalisation des systèmes Photovoltaïques sont des problèmes d'actualité puisqu'ils conduisent sûrement à une meilleure exploitation de l'énergie solaire. Pour une installation photovoltaïque, la variation de l'éclairement ou de la charge induit une dégradation de la puissance fournie par le générateur photovoltaïque, en plus ce dernier ne fonctionne plus dans les conditions optimums.

Dans ce contexte, de nombreux chercheurs se sont attachés à inventer des systèmes permettant de récupérer toujours le maximum d'énergie : c'est le principe nommé maximum power point tracker (MPPT) qui est l'objet principal de ce mémoire.

Dans ce travail nous nous sommes intéressés à l'étude et l'optimisation du fonctionnement d'un système photovoltaïque, Ce mémoire est partagé en trois chapitres :

Dans le premier chapitre nous présentons une généralité sur la technologie photovoltaïque. En commençant par des notions sur le rayonnement, Dans deuxième temps nous montrons le principe de l'effet photovoltaïque, ensuite on va montrer l'influence de la température et l'éclairement sur le rendement. Et nous finissons ce chapitre par la modélisation de notre panneau.

Le second chapitre concerne l'adaptation du générateur photovoltaïque à une charge résistive, on étudie quelques types convertisseurs DC-DC, utilisés dans les systèmes photovoltaïques et leur principe du fonctionnement. Après nous analysons son fonctionnement et son adaptation a une charge par le biais d'un convertisseur DC-DC (survolteur) en fonction de l'éclairement et la température.

Dans le dernier chapitre, nous présentons quelques méthodes de poursuite du point de puissance maximale (MPPT) des panneaux solaires. Ainsi nous analysons la fonctionnement électrique dans l'environnement Matlab-Simulink d'un système PV dont le le fonctionnement est régulé par une commande MPPT (Maximum Power Point Tracking) basées sur l'algorithme d'incrémentatation de la conductance et la méthode de perturbation et observation. Nous étudions la convergence du système PV vers le point de fonctionnement optimal (PPM) suites aux variations météorologiques (éclairement , température,).

CHAPITRE I

modélisation d'un module photovoltaïque à vide

I.1. Introduction

L'énergie solaire photovoltaïque provient de la transformation directe d'une partie du rayonnement solaire en énergie électrique. Cette conversion d'énergie s'effectue par le biais d'une cellule dite photovoltaïque (PV) basée sur un phénomène physique appelé effet photovoltaïque. Ce chapitre présente les concepts dont la connaissance est nécessaire à la compréhension du fonctionnement des cellules photovoltaïques constituées de semi-conducteur en silicium. On commencera par brève rappelle sur le principe de la conversion de l'énergie solaire en énergie électrique. Nous présenterons ensuite la modélisation de la chaîne de conversion photovoltaïque puis décrirons les modèles mathématiques et nous montrerons ensuite l'influence de la température et l'éclairement sur le rendement. A la fin on termine par conclusion.

I.2. L'énergie solaire

La distance de la terre au soleil est environ 150 million de kilomètres et la vitesse de la lumière est d'un peu plus de 300000 km/h [3], les rayons du soleil mettent donc environ 8 minutes à nous parvenir. La constante solaire est la densité d'énergie solaire qui atteint la frontière externe de l'atmosphère faisant face au soleil. Sa valeur est communément prise égale à 1360W/m². Au niveau du sol, la densité d'énergie solaire est réduit à 1000 W/ m² à cause de l'absorption dans l'atmosphère. Albert Einstein à découvert en travaillant sur l'effet photoélectrique que la lumière n'avait pas qu'un caractère ondulatoire, mais que son énergie est portée par des particules, les photons. L'énergie d'un photon étant donnée par la relation :

$$E = \frac{h.c}{\lambda} \quad (\text{I.1})$$

h : la constante de planck,

C : la vitesse de la lumière.

Ainsi, plus la longueur d'onde est courte, plus l'énergie du photon est grande [4].

Une façon commode d'exprimer cette énergie est:

$$E = \frac{1.26}{\lambda} \quad (\text{I.2})$$

Le soleil émet un rayonnement électromagnétique figure (I.1) compris dans une bande de longueur d'onde variant de 0,22 à 10 microns (μm) [3]. L'énergie associée à ce rayonnement solaire se décompose approximativement ainsi :

- 9% dans la bande des ultraviolets ($<0,4\mu\text{m}$),
- 47% dans la bande visible ($0,4$ à $0,8 \mu\text{m}$),
- 44% dans la bande des infrarouges ($>0,8\mu \text{m}$).

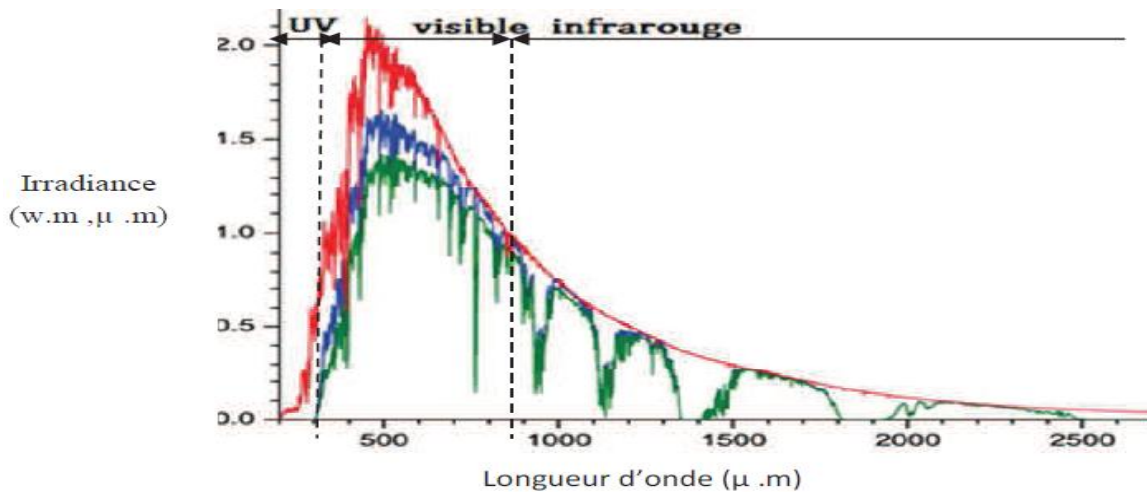


Fig. I.1 : Spectre d'irradiance solaire.

I.3. La cellule PV

Les cellules photovoltaïques ou les plaques solaires sont des composants optoélectroniques qui transforment directement la lumière solaire en électricité par un processus appelé « effet photovoltaïque », a été découverte par E. Becquerel en 1839 [5]. Elles sont réalisées à l'aide de matériaux semi-conducteurs, c'est à dire ayant des propriétés intermédiaires entre les conducteurs et les isolants. La taille de chaque cellule va de quelques centimètres carrés jusqu'à 100 cm^2 ou plus sa forme est circulaire, carrée ou dérivée des deux géométries. Les cellules se branchent en série, ce qui permet aux électrons générés par une cellule d'être repris par la suivante. Le but est d'avoir une différence de potentiel normalement entre 6 et 24 V. la figure (I.2) suivante représente le schéma électrique d'une cellule photovoltaïque [6].

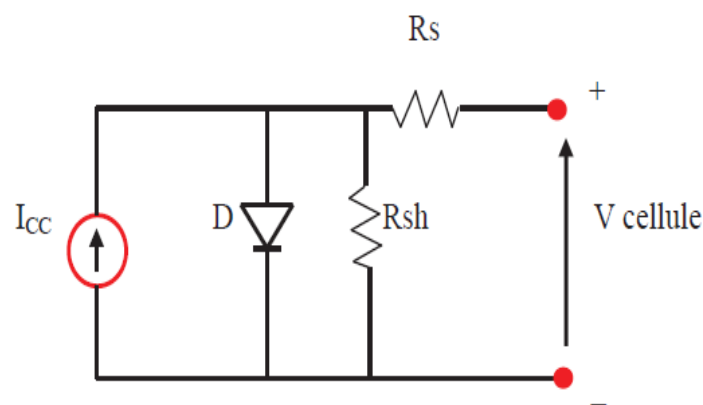


Fig. I.2: Schéma électrique d'une cellule photovoltaïque.

Les résistances R_s et R_{sh} permettent de tenir en compte des pertes liées aux défauts de fabrication. R_s représente les diverses résistances de contact et de connexion tandis que R_{sh} caractérise les courants de fuite dus à la diode et aux effets de bord de la jonction [7].

I.3.1. L'effet photovoltaïque

Une cellule photovoltaïque est basée sur le phénomène physique appelé effet photovoltaïque qui consiste à établir une force électromotrice lorsque la surface de cette cellule est exposée à la lumière. La tension générée peut varier entre 0.3 V et 0.7 V en fonction du matériau utilisé et de sa disposition ainsi que de la température de la cellule et du vieillissement de la cellule [8].

La figure (I.3) illustre une cellule PV typique où sa constitution est détaillée. Les performances de rendement énergétique atteintes industriellement sont de 13 à 14 % pour les cellules à base de silicium monocristallin, 11 à 12 % avec du silicium poly cristallin et enfin 7 à 8 % pour le silicium amorphe en films minces [9]. La photopile ou cellule solaire est l'élément de base d'un générateur photovoltaïque [10].

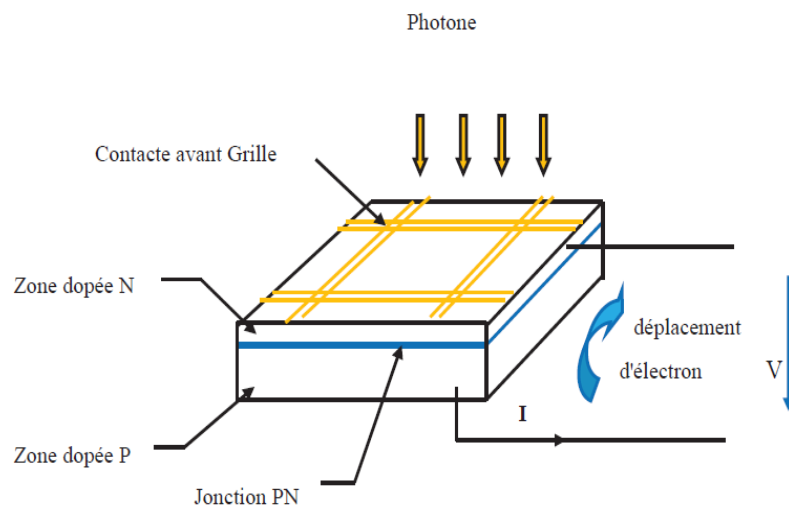


Fig. I.3. Schéma d'une cellule photovoltaïque.

I.3.2. Technologie d'une cellule photovoltaïque

✚ Silicium monocristallin

Le silicium cristallin est actuellement l'option la plus populaire pour les cellules commerciales, bien que beaucoup d'autres matériaux soient disponibles. Le terme « cristallin » implique que tous les atomes dans le matériau PV actif font partie d'une structure cristalline simple où il n'y a aucune perturbation dans les arrangements ordonnés des atomes.

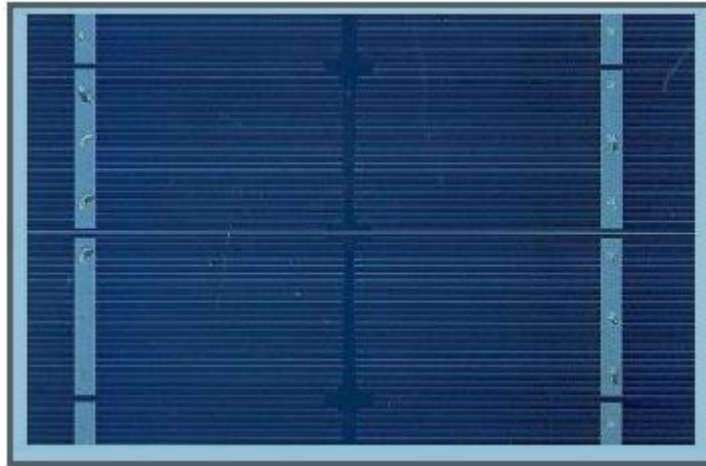


Fig. I.4 Cellule au Silicium Monocristallin.

✚ Silicium poly cristallin

Il est composé de petits grains de silicium cristallin. Les cellules à base de silicium poly cristallin sont moins efficaces que les cellules à base de silicium monocristallin. Les joints de grains dans le silicium poly cristallin gênent l'écoulement des électrons et réduisent le rendement de puissance de la cellule. L'efficacité de conversion PV pour une cellule à base de silicium poly cristallin modèle commercial s'étend entre 10 et 14%.

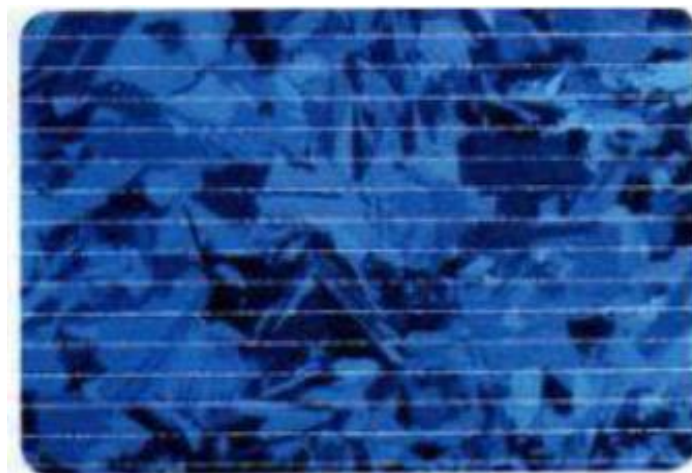


Fig. I.5 : Cellule au Silicium Poly-cristallin.

✚ Silicium amorphe (a-si)

Le silicium est déposé en couche mince sur une plaque de verre ou un autre support souple. L'organisation irrégulière de ses atomes lui confère en partie une mauvaise semi conduction.

Les cellules amorphes sont utilisées partout où une solution économique est recherchée ou lorsque très peu d'électricité est nécessaire, par exemple pour l'alimentation des montres, des calculatrices, ou des luminaires de secours. Elles se caractérisent par un fort coefficient d'absorption, ce qui autorise de très faibles épaisseurs, de l'ordre du micron. Par contre son rendement de conversion est faible (de 7 à 10 %) et les cellules ont tendance à se dégrader plus rapidement sous la lumière [4].

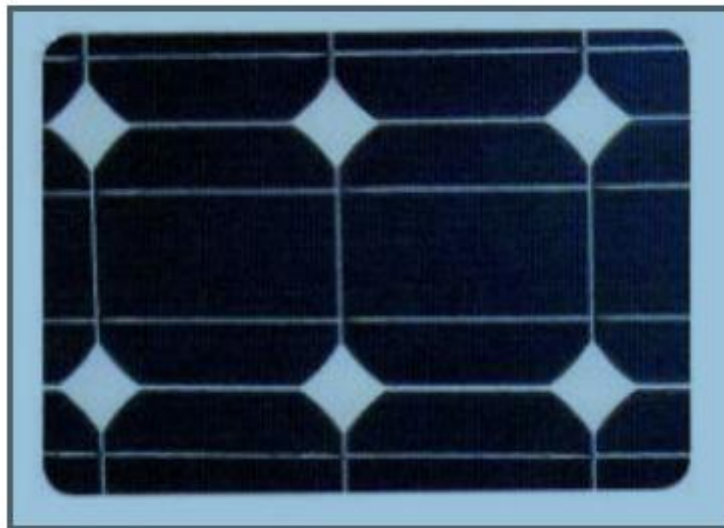


Fig. I.6 : Cellule au Silicium amorphe (couche mince).

✚ Nouvelle technologie

On utilise de plus en plus de matériaux organiques dans le domaine de l'optoélectronique, avec des perspectives d'électronique organique voire moléculaire, pour l'éclairage à l'aide de diodes électroluminescentes organiques (OLED : Organic Light- Emitting Diode). Bien que les optimisations des matériaux à mettre en œuvre ne soient pas les mêmes, le domaine du photovoltaïque bénéficie depuis quelques années des avancées technologiques de l'optoélectronique. Ainsi, bien que cette filière soit vraiment récente, les progrès annuels sont spectaculaires. Les matériaux organiques, moléculaires ou polymériques, à base de carbone, d'hydrogène et d'azote, sont particulièrement intéressants en termes d'abondance, de coût, de poids et de mise en œuvre [11].

Le tableau (I.1) présente les avantages et les inconvénients pour les technologies les plus utiliser d'une cellule photovoltaïque.

Tab. I.1: Avantage et inconvénient des cellules photovoltaïques.

| Type | Silicium mono cristallin | Silicium poly Cristallin | Amorphe |
|--------------|---|--|--|
| Durée de vie | 35 ans | 35 ans | < 10 ans |
| Avantage | Bon rendement en soleil direct | Bon rendement en soleil direct (moins que le monocristallin mais plus que l'amorphe) | Souplesse Prix moins élevé que les cristallins Bons rendements en diffus |
| Inconvénient | Mauvais rendement en soleil diffus (temps nuageux...), prix élevé | Mauvais rendement en soleil diffus (temps nuageux...), prix élevé | Mauvais rendement en plein soleil. |

I.4. Regroupement des cellules

I.4.1. Regroupement en série

Une association de (N_s) cellule en série figure (I.4) permet d'augmenter la tension du générateur photovoltaïque. Les cellules sont alors traversées par le même courant et la caractéristique résultant du groupement série est obtenues par addition des tensions élémentaires de chaque cellule. L'équation résume les caractéristique électrique d'une association série de (N_s) cellules [11].

$$V_{coNS} = N_s * V_{co} \tag{I.3}$$

$$I_{cc} = I_c \tag{I.4}$$

V_{coNS} : La somme des tensions en circuit ouvert de N_s cellules en série.

I_{ccNs} : courant de court circuit de N_s cellules en série.

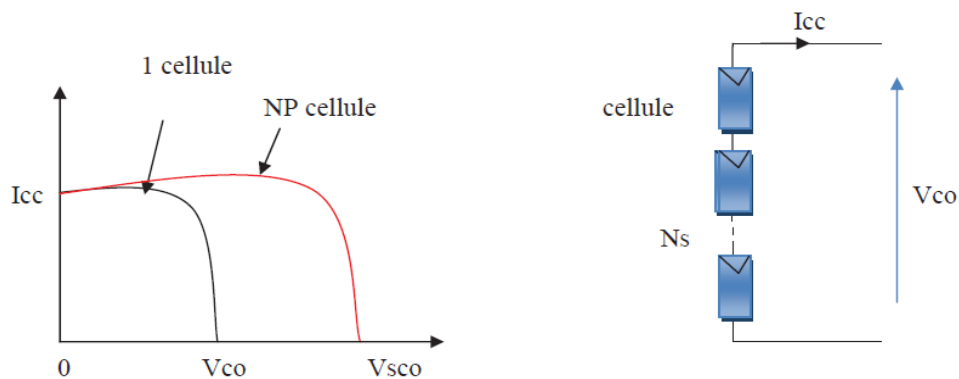


Fig. I.7 : Caractéristique courant tension de N_s cellule en série.

I.4.2. Regroupement en parallèle

$$I_{cc} = NP * I_{sc} \quad (I.5)$$

$$V_{co} = V_{coNP} \quad (I.6)$$

I_{ccNP} : la somme des courants de court circuit de (NP) cellule en parallèle.

V_{coNP} : tension du circuit ouvert de (Np) cellules en parallèle.

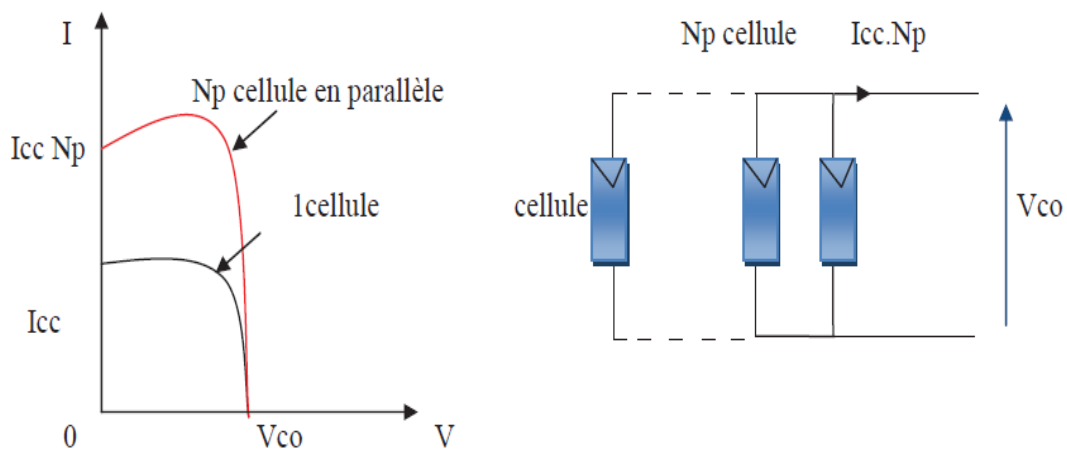


Fig. I.8 : Caractéristique courant tension de (Np) cellule en parallèle.

I.4.3. Regroupement (série et parallèle)

On utilise généralement ce type d'association pour en tirer une tension importante puisque l'association en série des photopiles délivre une tension égale à la somme des tensions individuelles et un courant égal à celui d'une seule cellule. La caractéristique d'un groupement de deux modules solaires est représentée ci-dessous, ce qui peut être généralisé sur une gamme de Ns modules solaires en série. Ce genre de groupement augmente le courant.

Afin d'obtenir des puissances de quelques kW, sous une tension convenable, il est nécessaire d'associer les modules en panneaux et de monter les panneaux en rangées de panneaux série et parallèle pour former ce que l'on appelle un générateur photovoltaïque [7].

I.5. Modélisation d'une cellule photovoltaïque

I.5.1. Cellule photovoltaïque idéal

Une cellule photovoltaïque peut être décrite de manière simple comme une source idéale de courant qui produit un courant I_{ph} proportionnel à la puissance lumineuse incidente, en parallèle avec une diode figure(I.6) qui correspond à l'aire de transition p-n de la cellule PV.

Après la loi de nœuds:

$$I = I_{ph} - I_d \quad (I.7)$$

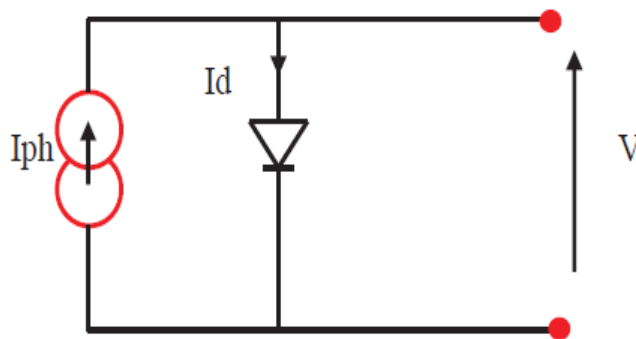


Fig. I.9 : Modèle de cellule photovoltaïque idéal.

Pour un générateur PV idéal, la tension aux bornes de la résistance est égale à celle aux bornes de la diode :

$$V = V_d \quad (I.8)$$

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

$$I_d = I_0 \cdot \left(\exp\left(\frac{V_d}{V_t}\right) - 1 \right) \quad (I.9)$$

Avec:

I_0 : Le courant de saturation inverse de la diode.

V_d : La tension au borne de diode.

V_t : $=KT/q$ potentielle thermique.

Donc la relation (1.7) sera :

$$I = I_{ph} - I_0 \cdot \left(\exp\left(\frac{V_d}{V_t}\right) - 1 \right) \quad (\text{I.10})$$

I.5.2. Cellule photovoltaïque réel

Le model photovoltaïque précédent ne rendait pas compte de tous les phénomènes présents lors de la conversion d'énergie lumineuse. En effet, dans le cas réel, on observe une perte de tension en sortie ainsi que des courants de fuite. On modélise donc cette perte de tension par une résistance en série **RS** et les courants de fuite par une résistance en parallèle **RP** [2].

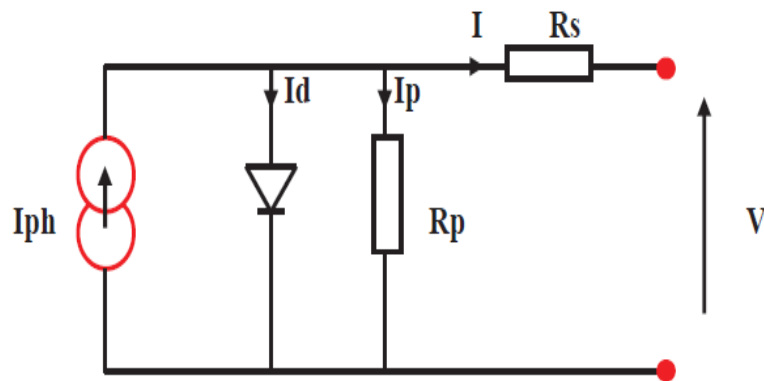


Fig. I.10 : Modèle de la cellule photovoltaïque réel.

Donc on a :

$$I = I_{ph} - I_d - I \quad (\text{I.11})$$

$$I_p = \left(\frac{V + R_s \cdot I}{R_p} \right) \quad (\text{I.12})$$

$$I_d = I_0 \cdot \left(\exp\left(\frac{V + I \cdot R_s}{V_t}\right) - 1 \right) \quad (\text{I.13})$$

Avec:

I : Le courant fourni par la cellule

$I_{ph} = I_{sc} \cdot \left(\frac{G}{1000} \right)$: Le photo-courant dépendant de l'éclairement (G).

I_0 : Le courant de saturation de la diode.

K : constante de Boltzmann ($1,38 \cdot 10^{-23}$ joule/Kelvin).

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

n : Le facteur de qualité de diode.

T : La température de cellule en kelvin.

Donc (I.11) sera:

$$I = I_{ph} - I_0 \cdot \left(\exp\left(\frac{V+I.R_s}{V_t}\right) - 1 \right) - \left(\frac{V+R_s.I}{R_p} \right) \quad (\text{I.14})$$

I.6. Module photovoltaïque

Nous avons choisi un module PV composé de 36 cellules en silicium monocristallin connectées en série ayant une puissance maximal de 2500 w est considéré dans les conditions standards $G=1000\text{w}/\text{m}^2$, $T=25^\circ\text{C}$. Pour réaliser la modélisation de ce module, nous avons utilisé MATLAB comme outil de tests et de simulation.

Tab. I.2: Caractéristique électrique d'un module photovoltaïque 2500.

| | |
|---|------|
| Puissance maximale (W) | 2500 |
| Tension en circuit ouvert V_{oc} (V) | 21.1 |
| Courant de court circuit I_{sc} (A) | 3.8 |
| Le nombre de cellules en série N_s | 36 |
| Le nombre de cellules en parallèles N_p | 1 |

Le courant de saturation de la diode est donné par la suite:

$$I_0 = \frac{I_{sc}}{\exp\left(q \cdot \frac{V+I.R_s}{n.K.T}\right)} - 1 \quad (\text{I.15})$$

Pour calculer I on considère $R_p = \infty$ donc $I_p = 0$ dans ce cas, l'équation (I.11) devient:

$$I = I_{ph} - I_0 \cdot \left(\exp\left(q \cdot N_s \frac{V+I.R_s}{n.K.T}\right) - 1 \right) \quad (\text{I.16})$$

Avec R_s dans le point V_{oc} :

$$dI = 0 - I_0 \cdot \left(\frac{V+R_s.I}{V_t} \right) \cdot \exp\left(\frac{V+R_s.I}{V_t}\right) \quad (\text{I.17})$$

Donc

$$R_s = -\frac{dI}{dV} - \frac{n.V_t}{I_0 \cdot \exp\left(\frac{V+I.R_s}{n.V_t}\right)} \quad (\text{I.18})$$

Telle que

$$R_s = -\frac{dI}{dV}\Big|_{v=v_{co}} - \frac{n.V_t}{I_0 \cdot \exp\left(\frac{V+R_s.I}{n.V_t}\right)} \quad (\text{I.19})$$

Toutes les constantes dans les équations ci-dessus peuvent être déterminées en utilisant les données de fabricants de panneaux photovoltaïques.

La méthode choisie pour la simulation de ce modèle est la méthode de Newton Raphson qui est décrit comme suit :

$$X_{n+1} = X_n - \frac{f(X_n)}{f'(X_n)} \quad (\text{I.20})$$

Avec : $V = V_{co}$

$f'(x)$: Le dérivé de la fonction.

x_n : La présente itération.

x_{n+1} : L'itération suivante.

$$f(I) = I_{sc} - I - I_0 \cdot \left[\exp\left(q \cdot \frac{V + R_s I}{n \cdot V_t}\right) - 1 \right] \quad (\text{I.21})$$

$$I_{n+1} = I_n - \frac{I_{sc} - I_n - I_0 \cdot \left(\frac{V + I_n R_s}{n \cdot V_t}\right)^{-1}}{-1 - I_0 \cdot \left(\frac{R_s}{n \cdot V_t}\right) \cdot \left[\exp\left(\frac{V + I_n R_s}{n \cdot V_t}\right)\right]} \quad (\text{I.22})$$

$$I_{sc}(T) = I_{sc}(T_{ref}) \cdot [1 + k_i \cdot (T - T_{ref})] \quad (\text{I.23})$$

k_i : le coefficient de variation du courant en fonction de la température.

k_v : le coefficient de variation du tension en fonction de la température.

T_{ref} : la température de référence 273 k (25°C).

G : l'irradiation solaire.

$$I_{ph} = I_{phn} + k_i \cdot (T - T_{ref}) \cdot \left(\frac{G}{1000}\right) \quad (\text{I.24})$$

Le courant de saturation du T (ref) écrire :

$$I_0 = I_0(T_{ref}) \cdot \left(\frac{T}{T_{ref}}\right)^{\frac{3}{n}} \cdot \left[\exp\left(-\frac{q \cdot E_g}{n \cdot K}\right) \cdot \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}}\right) \right] \quad (\text{I.25})$$

On peut écrire l'équation (I.25):

$$I_0 = \frac{I_{sc} + k_i \cdot (T - T_{ref})}{\exp\left(\frac{V_{co} + k_v \cdot (T - T_{ref})}{n \cdot V_t}\right) - 1} \quad (\text{I.26})$$

Pour la modélisation ou schéma block on donne :

$$I = I_{ph} \cdot N_{pp} - I_0 \cdot N_{pp} \cdot \exp \left[\frac{q \cdot T \cdot N_{ss}}{n \cdot k \cdot N_s} \cdot \left(V + \frac{I \cdot R_s}{N_{pp}} \cdot N_{ss} \right) - 1 \right] - \left(\frac{V + R_s \cdot I}{R_p} \right) \quad (I.27)$$

Avec :

N_{ss} : Nombre de module connecté en série (dans notre cas =1)

N_{pp} : Nombre de module connecté en parallèle (dans notre cas =1)

N_s : Nombre de cellule connecté en série.

A partir des équations (I.24-I.26-I.27) on peut donner le schéma block de : I_{ph} , I_0 et I .

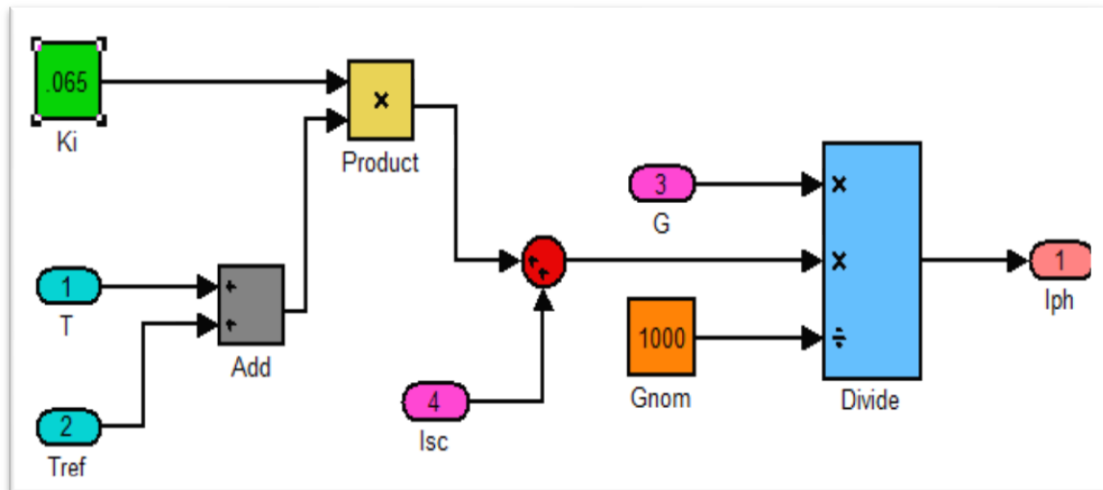


Fig. I.11 Schéma block de courant I_{ph} .

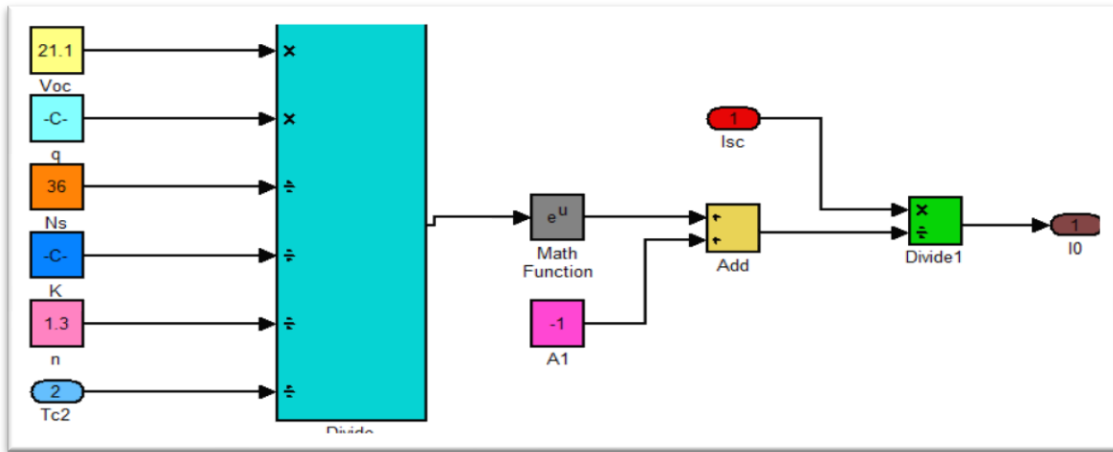


Fig. I.12 Schéma block de courant I_0 .

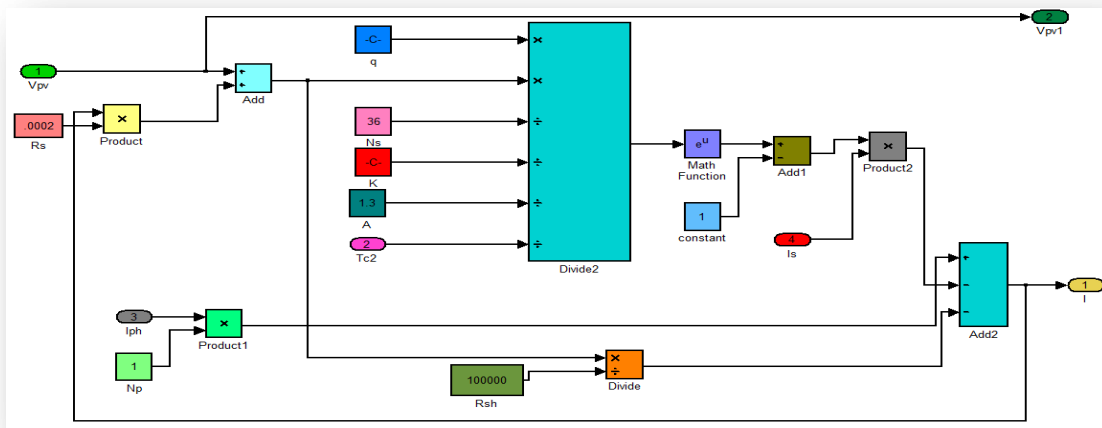


Fig. I.13 Schéma block de courant I.

I.7 Influence de la température

L'équation de Boltzmann donne : $I_{sc} = I_0 \cdot \exp(q \cdot V_0 / KT)$, l'expérience montre que la tension de circuit ouvert d'une cellule solaire diminue avec l'augmentation de la température de la cellule [13,14].

Nous présentons dans les figures (I.14 et I.15) les caractéristiques I-V et P-V d'un module photovoltaïque **2500** pour un niveau d'ensoleillement G donné et pour différentes températures :

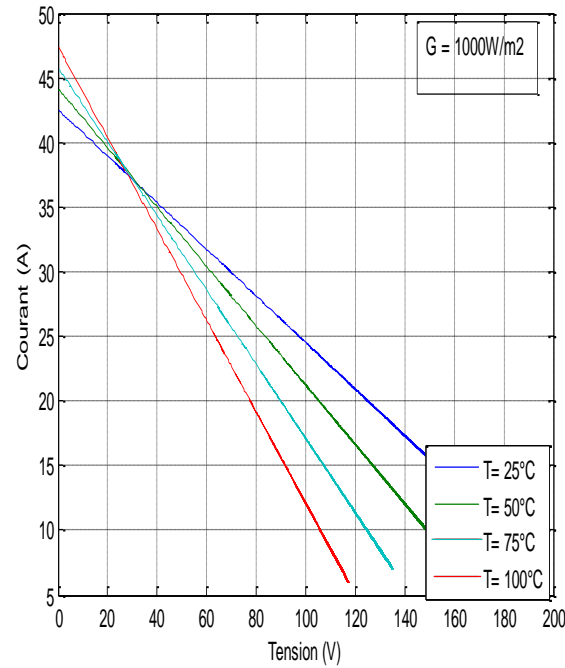


Fig. I.14 : La caractéristique de $I=f(V)$ avec l'effet de température.

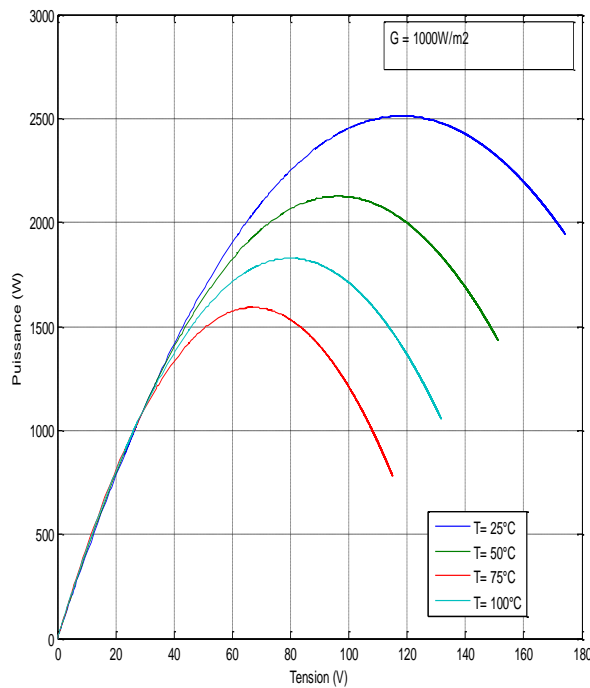


Fig. I.15 : La caractéristique de $P= f(V)$ avec l'effet de température.

Nous remarquons que le courant dépend de la température puisque le courant augmente légèrement à mesure que la température augmente, on constate que la température influence négativement sur la tension de circuit ouvert. Quand la température augmente la tension de circuit ouvert diminue. Et par contre la puissance maximale du générateur subit une diminution lorsque la température augmente figure (I.15).

I.8 Influence de l'éclairement

Nous avons fixé la température pour différents éclairements figure (I.16 et I.17).

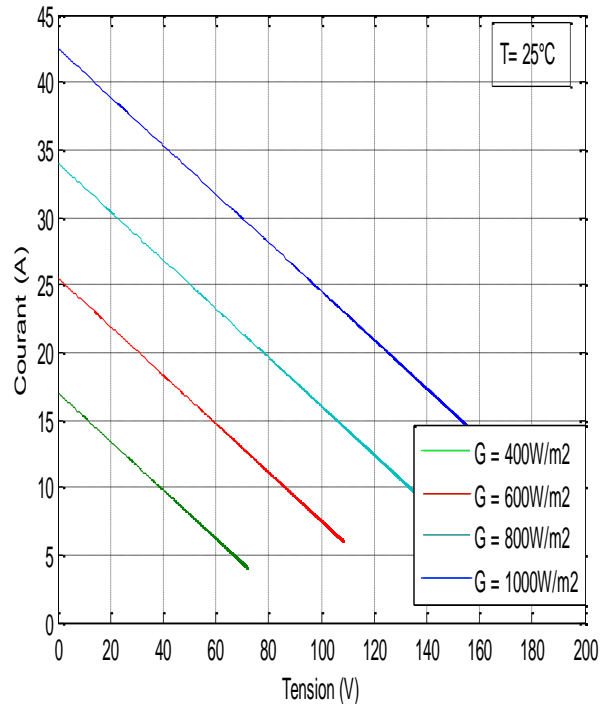


Fig. I.16 : La caractéristique $I=f(v)$ avec l'effet de l'éclairement.

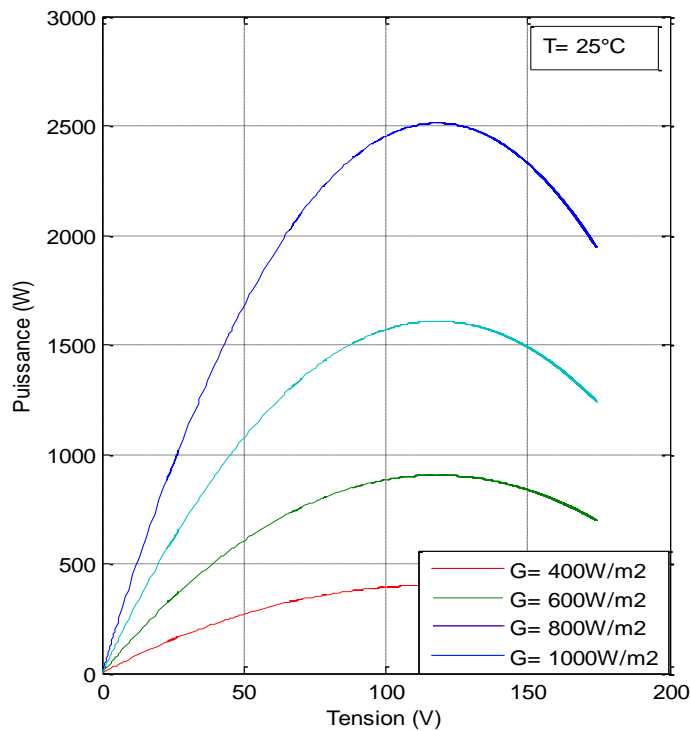


Fig. I.17 : La caractéristique $P=f(v)$ avec l'effet de l'éclairement.

Pour la figure (I.16) on remarque que pour l'éclairement $G=1000 \text{ w/m}^2$ le courant $I_{sc}=42\text{A}$ et pour $G=800\text{w/m}^2$ le courant $I_{sc}=33\text{A}$ on peut voir que le courant subit une variation importante, quand l'éclairement augmente le courant de court-circuit est augmenté, mais par contre la tension varie légèrement. Ce qui se traduit par une augmentation de la puissance, lorsque l'éclairement est augmenté figure (I.17).

I.9. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté les principales caractéristiques et les technologiques des éléments constitutifs d'un générateur PV et nous avons montré comment augmenter le courant ou la tension d'un générateur photovoltaïque ainsi nous avons montré bien l'influence de la température et l'éclairement sur le rendement de la cellule, et on constate que la puissance ne dépend pas seulement de la température mais dépend aussi de l'éclairement.

Pour le fonctionnement optimal d'un système photovoltaïque, il est nécessaire d'utiliser un étage d'adaptation entre le générateur PV et la charge ou un autre système que nous allons l'étudier dans le chapitre suivant.

CHAPITRE II

Adaptation du générateur PV

II.1. Introduction

La conception d'un étage d'adaptation permet aujourd'hui de relier aisément un générateur photovoltaïque (GPV) à une charge de type continue (DC), avec un rendement de conversion très élevé. En fait, le concept de cet étage correspond à la modélisation des fonctions basiques idéalisées d'un convertisseur à découpage continu-continu (DC/DC). Ce concept est nommé ainsi à cause des liens que le convertisseur crée entre ses quatre grandeurs électriques sur les ports d'entrée et de sortie qui sont ses courants et ses tensions d'entrée et de sortie [13].

II.2. Étage d'adaptation entre un Générateur PV et une charge

Un générateur photovoltaïque présente des caractéristiques I-V non linéaires avec de point de puissance maximum PPM. Ces caractéristiques dépendent entre autre du niveau d'éclairement et de la température de la cellule. De plus, selon les caractéristiques de la charge sur laquelle le GPV débite.

Afin d'extraire à chaque instant le maximum de puissance disponible aux bornes du générateur photovoltaïque et de la transférer à la charge, la technique utilisée classiquement est d'utiliser un étage d'adaptation entre le générateur photovoltaïque et la charge comme décrit dans la figure (II.1). Cet étage joue le rôle d'interface entre les deux éléments en assurant à travers une action de contrôle, le transfert du maximum de puissance fournie par le générateur pour qu'elle soit la plus proche possible de puissance maximale disponible [14].

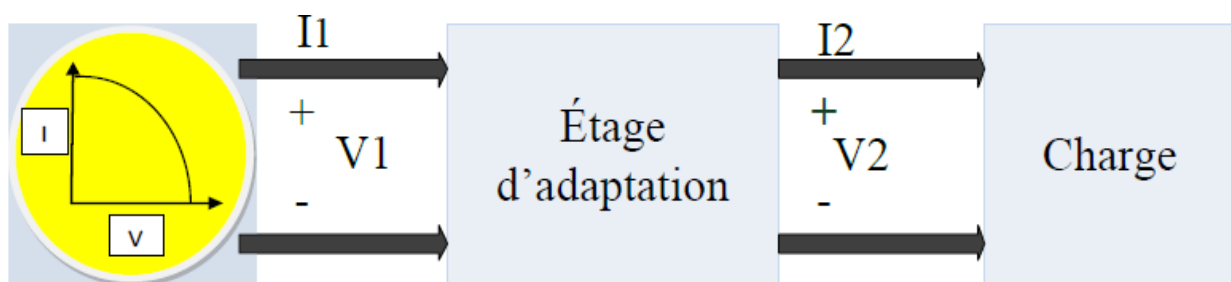


Fig. II.1. Étage d'adaptation entre un GPV et une charge.

Ce dernier par le biais d'une commande spécifique est alors susceptible de permettre au générateur de délivrer sa puissance maximale notée ; P_{max} ($P_{max} = V_{opt} \times I_{opt}$, où V_{opt} et I_{opt} , représentent respectivement les tensions et les courants optimaux du générateur photovoltaïque,

pour une courbe I-V donnée), tout en assurant que la tension ou bien le courant de la charge correspond bien aux caractéristiques de cette dernière. Pour que le générateur PV fonctionne le plus souvent possible dans son régime optimal, la solution communément adoptée est alors d'introduire un convertisseur statique qui joue le rôle d'adaptateur source-charge.

Le rôle du convertisseur DC-DC fait fonctionner les modules à leur point de puissance optimale, quel que soit l'éclairement et la charge pour délivrer cette puissance à l'utilisation.

II.3. Convertisseurs DC/DC

Pour la conversion de puissance, il est essentiel que le rendement soit maintenu élevé pour éviter la dissipation de la puissance et pour éviter les échauffements excessifs dans les composants électroniques. Pour cette raison toute la conversion de puissance échangée doit être réalisée autour, des composants de stockage d'énergie (inductance et condensateurs) et les commutateurs. Les interrupteurs de puissance utilisés dépendent du niveau de la puissance à convertir ou à commander. Les MOSFETS (transistors à effet de champ d'oxyde de métal) sont habituellement utilisés à la puissance relativement basse (quelques kW) et les IGBTs (transistors bipolaires à gâchette isolée) à des puissances plus élevées. Les thyristors ont été généralement utilisés et acceptés dans les plus hauts niveaux de puissance [14].

Le convertisseur continu - continu est un dispositif de l'électronique de puissance mettant en œuvre un ou plusieurs interrupteurs commandés et qui permet de modifier la valeur de la tension d'une source de tension continue avec un rendement élevé.

Le découpage se fait à une fréquence élevée. Si la tension délivrée en sortie est inférieure à la tension appliquée en entrée, le hacheur est dit dévolteur (ou abaisseur ou Buck). Dans le cas contraire, il est dit survolteur (ou élévateur ou Boost). Il existe des hacheurs capables de travailler dans les deux sens (Boost-Buck).

Certains hacheurs sont également réversibles : ils peuvent alors fournir de l'énergie à la charge. Il existe différentes méthodes de classification des convertisseurs DC-DC. L'une d'elles dépend de la propriété d'isolation de la partie primaire et secondaire. L'isolation est généralement réalisée par un transformateur, qui comporte une partie primaire sur le côté d'entrée et un secondaire à côté de la sortie. La chaîne de retour de la boucle de commande est réalisée par un autre plus petit transformateur ou optiquement par optocoupleur. Par conséquent, la sortie est isolée électriquement

de l'entrée. Ce type comprend les convertisseurs (Fly-back) avec un pont redresseur AC-DC supplémentaire à l'avant. Toutefois, car l'implémentation de ces transformateur encombrant est très grand et coûteux, convertisseurs DC-DC non-isolément sont plus préféré [15].

Les convertisseurs DC / DC non-isolés peuvent être classés comme suit:

✚ **Convertisseur Buck (dévolteur de tension)**

Un convertisseur Buck, ou hacheur série, est une alimentation à découpage qui convertit une tension continue en une autre tension continue de plus faible valeur.

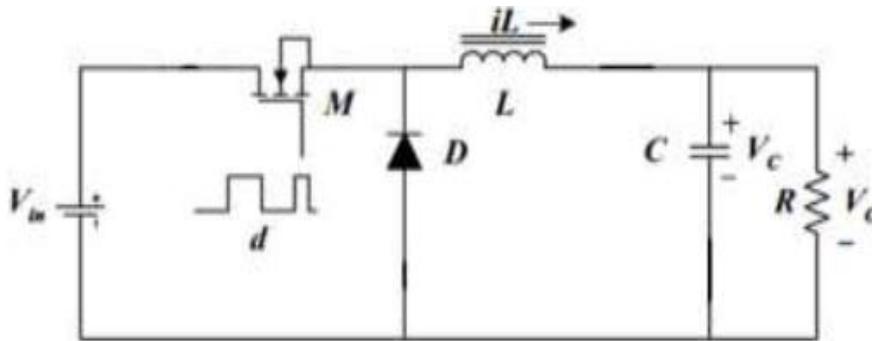


Fig. II.2. Le schéma de base du convertisseur dévolteur (Buck converter).

✚ **Convertisseur Boost (élevateur de tension)**

Un convertisseur Boost, ou hacheur parallèle, est une alimentation à découpage de la Fig. II.3 qui convertit une tension continue en une autre tension continue de plus forte valeur.

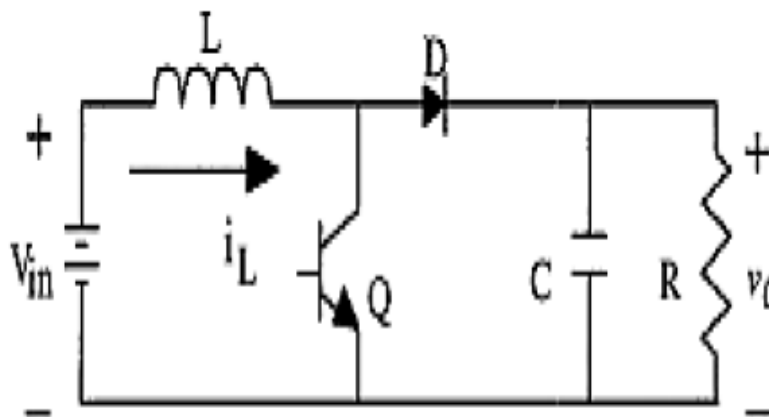


Fig. II.3. Convertisseur Boost (élevateur de tension).

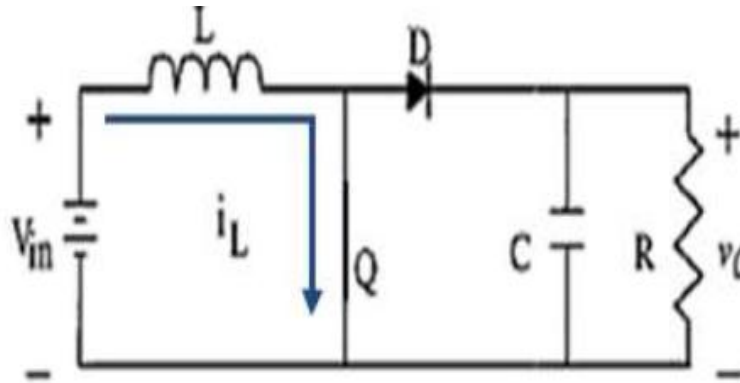


Fig. II.4. Convertisseur Boost durant l'état on.

Si le commutateur Q est ouvert à t_0 et si la chute de tension aux bornes de la diode est négligée, alors V_0 est égale à V_{in} .

Lorsque le commutateur est fermé (fig. II.4), la tension de la charge chute immédiatement à zéro si le condensateur C est omis. Le courant du circuit i_L circule à travers l'inductance L et augmente [16], [17] et les équations d'état sont:

$$\begin{cases} \frac{di_L}{dt} = \frac{1}{L}(V_{in}) \\ \frac{dv_0}{dt} = \frac{1}{C}(-\frac{v_0}{R}) \end{cases}, 0 < t < dT, Q : ON \tag{II.1}$$

Lorsque Q est désactivé (fig. II.5), l'inductance se trouve en série avec le générateur et sa f.é.m. S'additionne à celle du générateur (effet survolteur). Le courant i_L traversant l'inductance traverse ensuite la diode D, le condensateur C et la charge. Il en résulte un transfert de l'énergie accumulée dans l'inductance vers le condensateur. Le courant décroît ensuite progressivement, car $V_0 > V_{in}$:

$$\begin{cases} \frac{di_L}{dt} = \frac{1}{L}(V_{in} - V_0) \\ \frac{dv_0}{dt} = \frac{1}{C}(i_L - \frac{v_0}{R}) \end{cases}, dT < t < T, Q : OFF \tag{II.2}$$

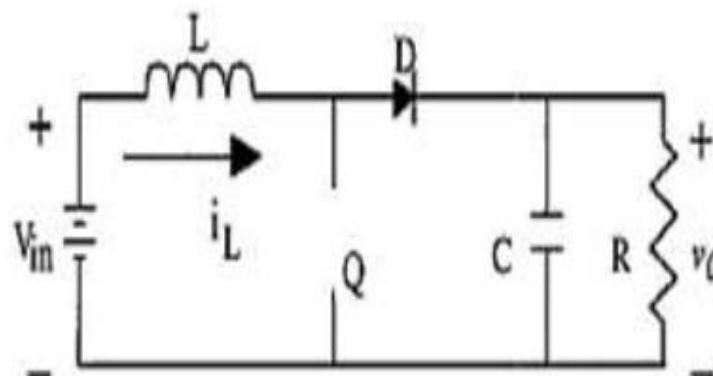


Fig. II.5. Convertisseur Boost durant l'état off.

La diode D permet d'éviter la décharge du condensateur C, lorsque le commutateur est activé.

Le condensateur est supposé assez grand pour pouvoir lisser la tension de la charge.

La tension de la charge est donnée par :

$$V_0 = \frac{1}{(1-\alpha)} V_{in} \quad (\text{II.3})$$

Avec $\alpha = \frac{T_{on}}{T_{off}}$: est le rapport cyclique ($0 < \alpha < 1$)

On considère ici uniquement le comportement du circuit en conduction continue.

✚ Convertisseur Buck-Boost (abaisseur- élévateur de tension, polarité opposée)

Un convertisseur Buck-Boost présenté par la Fig. II.6 c'est une alimentation à découpage qui convertit une tension continue en une autre tension continue de plus faible ou plus grande valeur mais de polarité inverse [17].

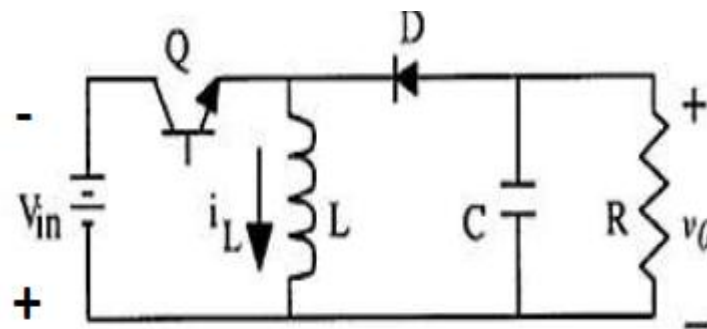


Fig. II.6. Convertisseur Buck-Boost.

Durant l'état «on», l'énergie apportée par la source est stockée dans l'inductance L (fig. II.7). Cette énergie est livrée ensuite à la charge pendant l'état «off» (fig. II.8). En raison de la présence de la diode D, le courant circule à travers l'inductance L seulement dans une direction durant les deux états. Par conséquent, V_0 a une polarité opposée à V_{in} . Pour cette raison, ce circuit est aussi appelé convertisseur inverseur. Les équations décrivant ce circuit peuvent être obtenues de la même manière qu'au paravent.

$$\begin{cases} \frac{di_L}{dt} = \frac{1}{L}(V_{in}) \\ \frac{dv_0}{dt} = \frac{1}{C}(-\frac{V_0}{R}) \end{cases}, \quad 0 < t < dT, Q : ON \quad (II.4)$$

$$\begin{cases} \frac{di_L}{dt} = \frac{1}{L}(V_0) \\ \frac{dv_0}{dt} = \frac{1}{C}(-i_L - \frac{V_0}{R}) \end{cases}, \quad dT < t < T, Q : OFF \quad (II.5)$$

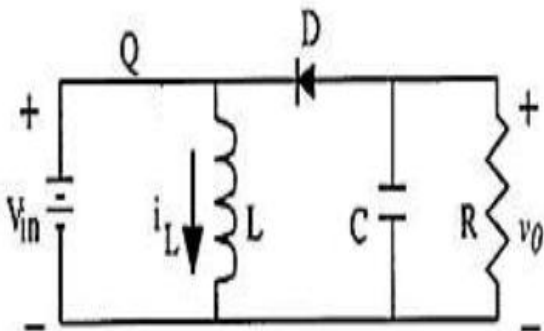


Fig. II.7. Convertisseur Buck-Boost durant l'état on.

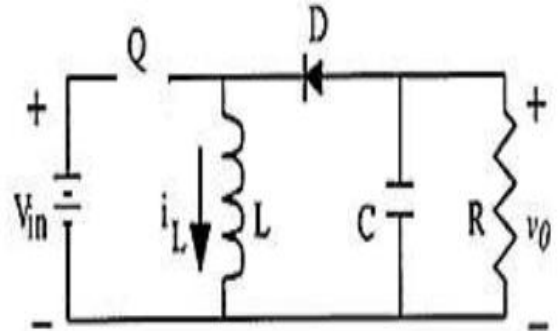


Fig. II.8. Convertisseur Buck-Boost durant l'état off.

En conclusion, l'amplitude de V_0 peut être inférieure ou supérieure à V_{in} suivant la valeur de ton et t off.

✚ Convertisseur Cuk (abaisseur- élévateur de tension)

Les convertisseurs Cuk sont dérivés de la cascade des convertisseurs abaisseurs et élévateurs. Tous les convertisseurs mentionnés précédemment transfèrent l'énergie entre l'entrée et la sortie à l'aide d'une inductance et l'analyse est basée sur l'équilibre de la tension aux bornes de l'inductance, par contre Le convertisseur Cuk utilise le transfert d'énergie capacitif et l'analyse est basée sur l'équilibre du courant du condensateur. La figure (II.9) montrée la topologie de circuit du convertisseur Cuk [17].

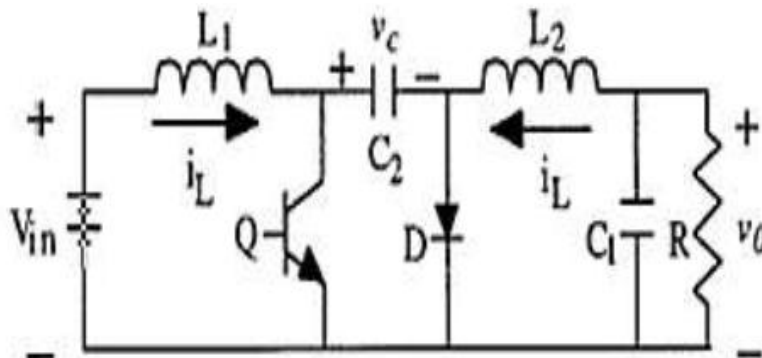


Fig. II.9. Convertisseur Cuk.

Pendant le mode de conduction continue de fonctionnement, les équations d'espace d'état sont :

$$\text{Lorsque } 0 < t < T, Q: ON \left\{ \begin{array}{l} \frac{di_{L1}}{dt} = \frac{1}{L_1}(V_{in}) \\ \frac{dv_c}{dt} = \frac{1}{C_2}(-i_{L2}) \\ \frac{di_{L2}}{dt} = \frac{1}{L_2}(-V_0 + V_c) \\ \frac{dv_0}{dt} = \frac{1}{C_1}\left(i_{L2} - \frac{v_0}{R}\right) \end{array} \right. \quad (\text{II.6})$$

$$dT < t < T, Q: OFF \left\{ \begin{array}{l} \frac{di_{L1}}{dt} = \frac{1}{L_1}(V_m - V_0) \\ \frac{dv_c}{dt} = \frac{1}{C_2}(i_{L1}) \\ \frac{di_{L2}}{dt} = \frac{1}{L_2}(-V_0) \end{array} \right. \quad (\text{II.7})$$

Dans les cas cités en haut, l'adaptation entre la source et la charge est réalisée en choisissant des valeurs adéquates du rapport cyclique.

Généralement, pour les convertisseurs DC/DC, l'interrupteur est commandé par un signal PWM (Pulse Width Modulation) ou MLI (Modulation de Largeur d'Impulsion). Un signal PWM est un signal rectangulaire de fréquence fixe, mais dont le rapport cyclique α est variable. La valeur du rapport cyclique permet de contrôler la quantité d'énergie transmise.

II.4. Adaptation du générateur PV

II.4.1 Schéma synoptique du système PV adapté

Dans la figure (II.10) représenté le schéma synoptique de l'adaptation DC-DC du générateur à une charge résistive [18] [19]. L'ensemble est constitué :

- D'un générateur PV. Dans notre cas c'est le générateur (2500) déjà modélisé dans le chapitre I.
- D'un quadripôle constitué d'un convertisseur d'énergie de type (boost) pour des applications nécessitant des tensions supérieures à 17 V [19] [20] [21]. Nous choisis ce convertisseur parce que sa son avec un haut rendement Une commande du convertisseur généralement un signal carré de fréquence bien déterminée et de rapport cyclique α variable, permettant la commande de l'interrupteur du convertisseur.
- Une commande MPPT (Maximum Power Point Tracking) dont le rôle essentiel est de poursuivre de point de puissance maximale (PPM) du générateur PV quelles soient les conditions météorologiques et les variations de la charge. Sa conception est fonctionnement seront présentés dans le chapitre III.

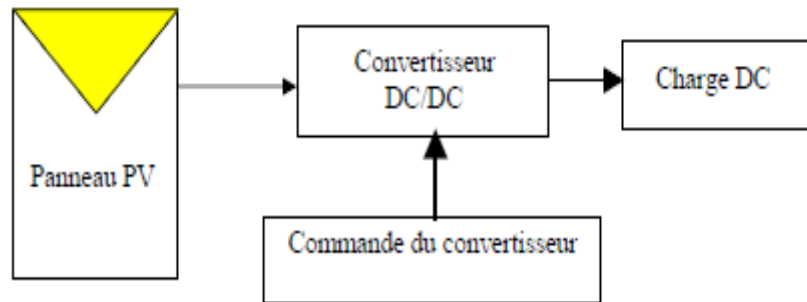


Fig. II.10 schéma synoptique du système PV adapté par le convertisseur DC-DC (hacheur).

Dans la figure II.11 nous avons représenté un système PV dont l'adaptation entre le générateur et la charge résistive R_s est réalisée par convertisseur DC-DC élévateur (boost).

Dans ce système :

- L'inductance et les capacités (L_1, C_e, C_s), si elles sont soigneusement calculées [18,19] permettent essentiellement de filtrer le courant et de minimiser le taux d'ondulation de la tension à l'entrée et à la sortie des convertisseurs [20] [21].

Le transfert d'énergie de l'entrée vers la sortie, se fait par l'intermédiaire de l'inductance L (ou d'un transformateur) qui stocke l'énergie ($\frac{L_1 I_{pv}^2}{2}$) sous forme magnétique puis la restitue au rythme du découpage (signal de commande). Le réglage de la tension de sortie se fait par action sur le temps de conduction de l'interrupteur (rapport cyclique).

- L'interrupteur du convertisseur est un transistor MOSFET de puissance IRF540. Nous avons choisi de tel transistor puisqu'il présente des performances satisfaisantes [18][21][22].

Faibles pertes de puissance par commutation et présentation d'une résistance R_D son très faible.

- La diode D est une diode 'roue libre'. Elle permet d'évacuer l'énergie stockée dans la self pendant le blocage de l'interrupteur. Nous préférons une diode Schottky [22][23].

De puissance dont la chute de tension à l'état passant est faible pour minimiser les pertes en conduction. Son choix se fait en fonction du courant I_d moyen, du courant I_{dmax} crête susceptible de la traverser et de la tension inverse V_R à supporter.

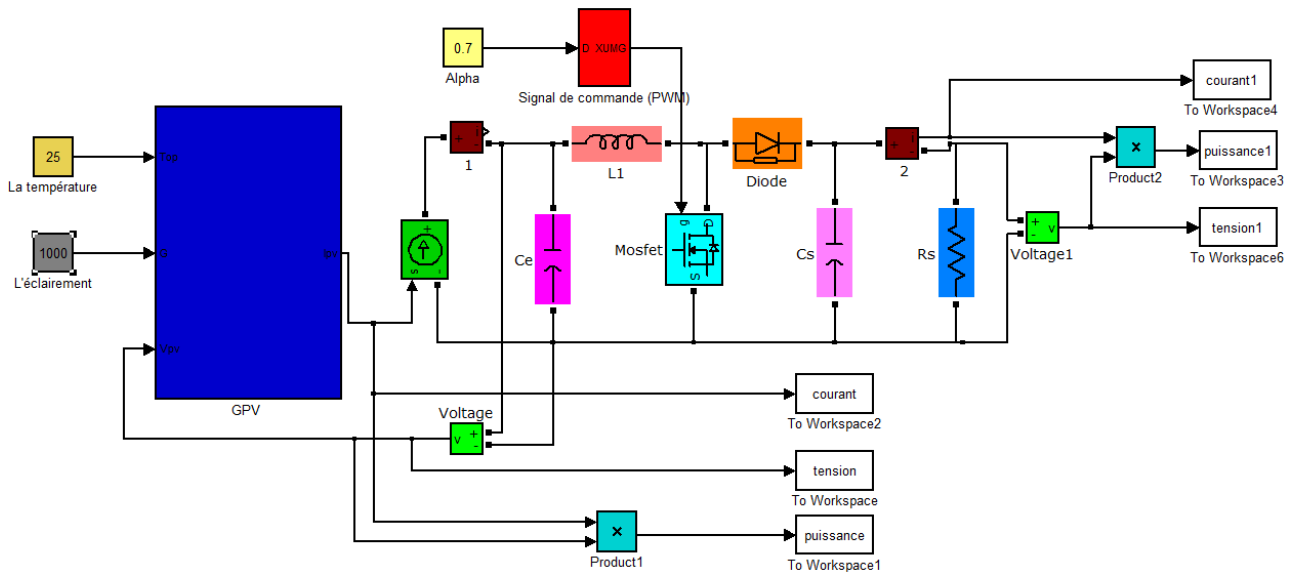


Fig. II.11 Système PV formé par un générateur PV (2500), convertisseur d'énergie 'élevateur' et une charge résistive Rs.

II.5. Principe et régimes de fonctionnement du convertisseur Boost

Le convertisseur boost peut fonctionner en trois modes: régime continu régime discontinu (interrompu) et critique [19] [24]. Nous avons analysé les différents courants et tensions à l'entrée et à la sortie de convertisseur boost ainsi que les deux régimes de fonctionnement (régime continu et régime discontinu) de convertisseur.

Dans la suite, nous mentionnons l'essentiel de ces analyses différentes régimes, tension V_s (courant I_s) de sortie du convertisseur en fonction de la tension V_{pv} (courant I_{pv}) à l'entrée de convertisseur.

II.5.1. Régime continu

II.5.1.1. Définition

Le régime de fonctionnement est appelé continu lorsque le courant dans l'inductance n'a pas le temps de s'annuler. Dans ce mode de fonctionnement, nous avons représenté sur, la figure (II.12) en présence des condensateurs C_e et C_s , la forme du signal de commande de la tension de sortie $V_s(t)$, du courant dans l'inductance $I_L(t)$, du courant drain $I_D(t)$ dans le transistor, la tension aux bornes de l'inductance au cours du fonctionnement et la tension moyenne V_{Lmoy} aux bornes de l'inductance doit être nulle [22] [25] [26] ; nous pouvons donc écrire d'après la loi des aires (figure II.12):

$$\alpha T V_{pv} = (1 - \alpha) T (V_s - V_{pv}) \tag{II.8}$$

À partir de cette dernière relation, nous déduisons :

$$V_s = \frac{V_{pv}}{1-\alpha} \quad (\text{II.9})$$

Cette équation montre que la tension V_s est fonction du rapport cyclique α et supérieure à celle d'entrée V_{pv} . Si nous admettons que la puissance échangée entre le générateur et la charge se conserve, nous pouvons écrire :

$$V_{pv} = V_s I_s \quad (\text{II.10})$$

En tenant compte de l'équation (II.9) et (II.10), nous déduisons la relation entre le courant de sortie et celui d'entrée

$$I_s = (1 - \alpha) I_{pv} \quad (\text{II.11})$$

Cette dernière équation montre que le courant de sortie I_s est fonction du rapport cyclique et il est inférieur à celui d'entrée I_{pv} .

Notons que dans une installation PV, on rajoute les condensateurs C_e et C_s (figure II.11)

Pour que la tension de sortie V_s (relation II.9) et le courant I_s (relation (II.11)) se maintiennent à des valeurs constantes (avec une ondulation acceptable) même pendant la fermeture de l'interrupteur MOSFET. Aussi, nous dimensionnons les composants du convertisseur pour que les tensions et courants à l'entrée et à la sortie présentent des faibles ondulations lors du passage de l'interrupteur de la fermeture à l'ouverture (et inversement).

$$\text{En posant} \quad Y = \frac{V_s}{V_{pv}} \quad (\text{II.12})$$

$$\text{et à partir de la relation, nous déduisons : } Y = \frac{V_s}{1-\alpha} \quad (\text{II.13})$$

L'expression (II.13) montre donc que ce rapport Y est constant pour un α donné:
C'est le régime continu.

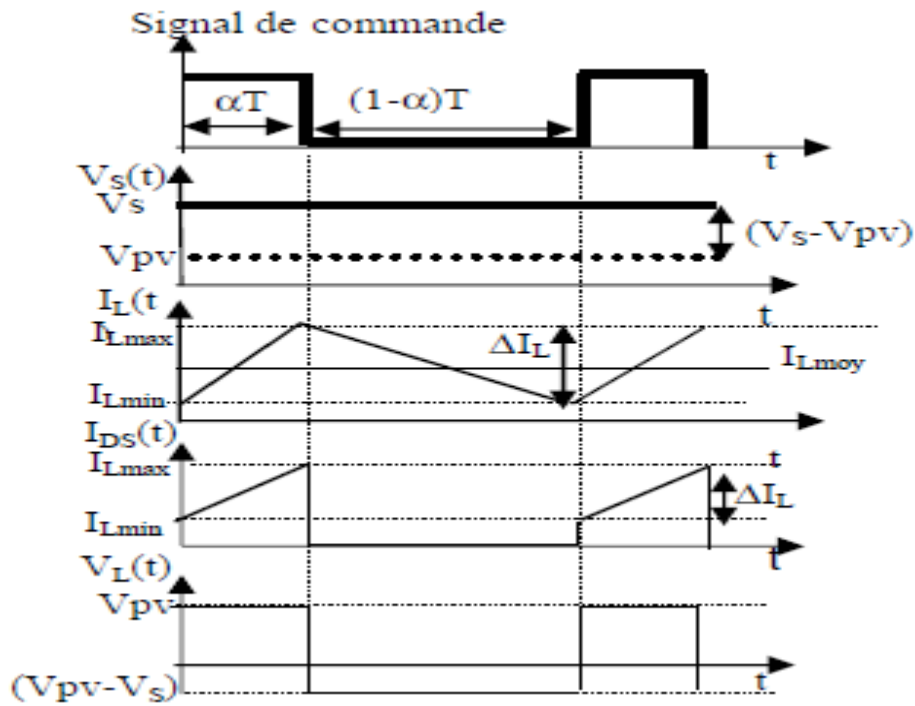


Fig. II.12 Schéma signal de commande.

II.5.1.2. Ondulation à la sortie

Lorsqu'on filtre à la sortie par le condensateur C_s , la tension de sortie présente des ondulations. Dans ce paragraphe nous déduisons l'ondulation ΔV_S de cette tension en régime continu : Pendant la fermeture du transistor ($0 < t < \alpha T$) on peut écrire:

$$V_L = V_{pv} = L \frac{dI_L}{dt} \tag{II.14}$$

Ou encore :

$$V_L = V_{pv} = L \frac{dI_L}{dt} \tag{II.15}$$

L'expression de l'ondulation du courant ΔI_L dans l'inductance est alors :

$$\Delta I_L = \alpha \frac{V_{pv}}{L_f} \tag{II.16}$$

Les formes de courant dans l'inductance I_L , dans la diode I_D et de sortie I_s sont représentées sur la figure II.13. L'ondulation de tension se déduit de l'équation différentielle régissant la tension de sortie V_s et le courant dans le condensateur I_s

$$V_s = \frac{1}{C_s} \int I_{cs} dt + V_{s0} = \frac{1}{C_s} \int (I_D - I_s) dt + V_{s0} \quad (\text{II.17})$$

Où :

I_D : Courant dans la diode,

I_{cs} : courant dans le condensateur de sortie C_s ,

V_{s0} : Tension de sortie déterminée à un instant donné.

Pendant la fermeture de l'interrupteur, le condensateur C_s se recharge à travers la charge R_s (la diode étant bloquée). Puisque la fréquence du signal de commande est importante, la phase de recharge du condensateur est rapide et le courant I_{cs} (ou I_s) est pratiquement constant. Donc, à partir de la relation (II.17), nous déduisons :

$$V_s(t) = \frac{1}{C_s} \int (-I_s) dt + V_{s0} \quad (\text{II.18})$$

Puisque la variation de V_s est linéaire, nous pouvons déduire l'expression de l'ondulation ΔV_s sous la forme :

$$\Delta V_s = |V_s(t = \alpha T) - V_{s0}| = \frac{I_s}{C_s} \alpha T = \frac{I_s \alpha}{C_s f} \quad (\text{II.19})$$

Nous remarquons que la tension de sortie (relation (II.17)) est linéaire lorsque le transistor est fermé (I_D est nul) et parabolique pendant l'ouverture du transistor (figure II.13).

Il apparaît donc une ondulation de la tension de sortie autour de la tension moyenne donnée par l'équation (II.9). Nous pouvons alors déduire la valeur du condensateur C_s de sortie pour une ondulation fixée.

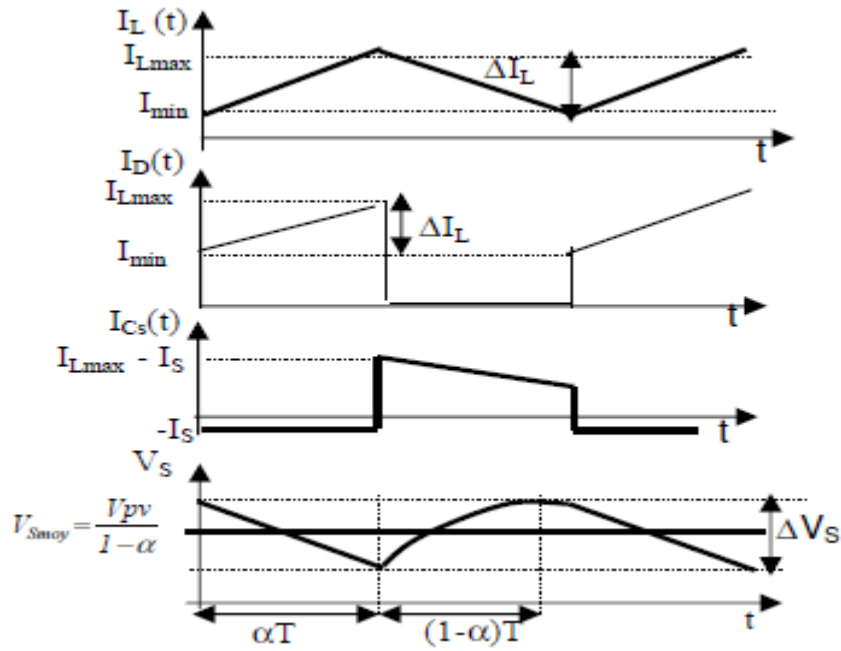


Fig. II.13 Forme de l'ondulation de courant dans l'inductance, dans la diode I_D , en sortie I_S , et forme de l'ondulation de la tension de la sortie.

II.5.1.3. Ondulation à l'entrée

Le courant dans l'inductance peut être décomposé en courant continu I_{Lmoy} égal au courant d'entrée I_{pv} superposé à un courant alternatif I_{Lalt} (triangulaire) :

$$I_L + I_{Lmoy} + I_{Lalt} = I_{pv} + I_{Lalt} \tag{II.20}$$

Les auteurs des références [23][26][27] ont analysé l'ondulation à l'entrée en considérant que le courant délivré par le générateur est quasiment constant (générateur de courant). Ou, dans notre cas, cette hypothèse n'est pas tout à fait rigoureuse puisque le générateur PV n'est pas un générateur linéaire. Le courant I_{pv} peut subir des ondulations suite aux fluctuations de la tension V_{pv} .

Ces ondulations du courant I_{pv} dépendent du taux d'ondulation de la tension V_{pv} et Peu vent être minimisées si nous faisons un bon choix du condensateur C_e .

Dans le cadre de nos simulations dans l'environnement Matlab-Simulink, nous avons vérifié que le courant I_{pv} est pratiquement constant. Le courant circulant dans le condensateur C_e est alors donné par :

$$I_{Ce} = I_{pv} - I_L \quad (\text{II.21})$$

En tenant compte de la relation (2.20) nous pouvons écrire :

$$I_{Ce} = -I_{Lalt} \quad (\text{II.22})$$

Sur la figure II.14 nous avons représenté la forme du courant dans l'inductance et à partir de la relation (II.22) nous avons déduit la forme du courant dans le condensateur. L'ondulation de tension se déduit de l'équation différentielle régissant la tension et le courant dans le condensateur. Nous pouvons écrire :

$$V_{pv} = \frac{1}{2} \int I_{Ce} dt + V_{pVpv_0} = \frac{-1}{C_e} \int I_{Lalt} dt + V_{pv_0} \quad (\text{II.23})$$

Où :

V_{pv_0} : Tension à l'entrée à un instant donné

L'intégration sur une demi période (figure 2.14) de l'équation (II.23), nous permet d'évaluer l'ondulation ΔV_{pv} de la tension d'entrée. Cette intégrale est égale à l'aire du triangle hachuré:

$$\Delta V_{pv} = \frac{1}{C_e} \left(\frac{1}{2} \frac{T}{2} \frac{\Delta I_L}{2} \right) \quad (\text{II.24})$$

En tenant compte des expressions de l'ondulation ΔI_L du courant (relation (II.16)),

L'expression:

$$\Delta V_{pv} = \frac{\alpha V_{pv}}{8LC_e f^2} \quad (\text{II.25})$$

de l'ondulation de la tension d'entrée peut se mettre sous l'expression.

A partir de cette expression, nous pouvons déterminer la valeur du condensateur d'entrée pour une ondulation fixée.

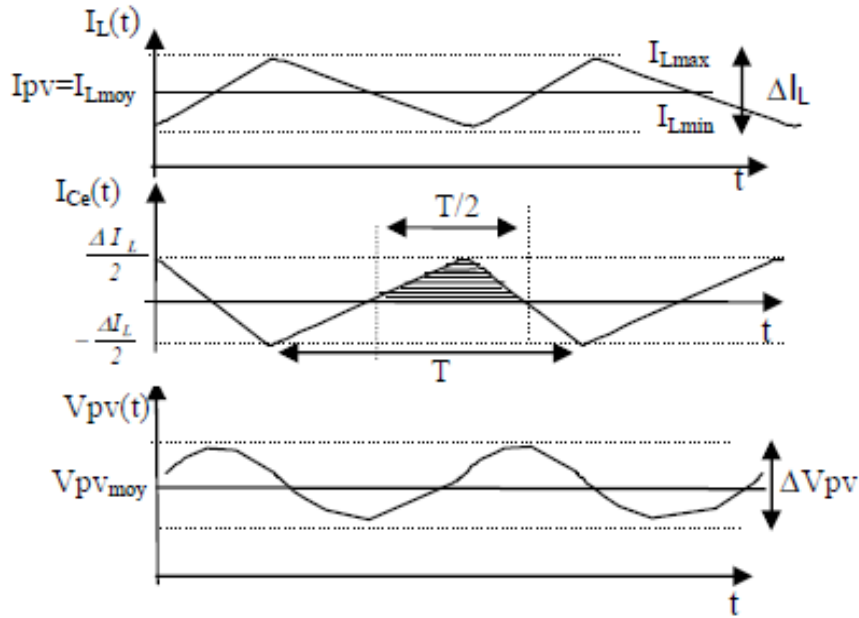


Fig. II.14 Forme du courant dans l'inductance, dans le condensateur d'entrée Ce et forme de l'ondulation de la tension d'entrée Vpv.

II.5.1.4. Condition d'adaptation

A partir des équations (II.9) et (II.10) nous pouvons déduire en régime continu la résistance à la sortie du panneau PV (R_{pv}) en fonction de α et R_s :

$$R_{pv} = \frac{V_{pv}}{I_{pv}} = (1 - \alpha)^2 R_s \tag{II.26}$$

Encore,

$$R_s = \frac{R_{pv}}{(1 - \alpha)^2} \tag{II.27}$$

A partir de cette expression nous pouvons déduire l'expression du rapport cyclique α en fonction des résistance R_{pv} et R_s

$$\alpha = 1 - \sqrt{\frac{R_{pv}}{R_s}} \tag{II.28}$$

Puisque le rapport cyclique α est inférieur à 1 ($\alpha < 1$), l'expression (II.28) montre que le convertisseur (figure II.11) ne joue le rôle d'un élévateur que si la charge R_s remplit la condition suivante :

$$R_s > R_{pv} \quad (\text{II.29})$$

Dans le cas du panneau (2500), lorsque l'éclairement varie de 200 à 1000 W/m^2 à une température 25°C, la résistance optimale R_{pv} du panneau varie de 23 Ω à 3.85 Ω .

Donc, la charge R_s doit être supérieure à 23 Ω (3.85 Ω) pour un éclairement de 200 W/m^2 (1000 W/m^2). Compte tenu des l'équation (II.27) et (II.28), nous pouvons déduire que l'adaptation entre le générateur PV et la charge a lieu en variant le rapport cyclique α .

Dans les conditions optimales et pour une charge R_s donnée, la résistance à la sortie du panneau ($R_{pv}=R_{opt}$) et le rapport cyclique ($\alpha=\alpha_{opt}$).

II.5.2. Régime discontinu

Le mode de fonctionnement du hacheur est appelé discontinu lorsque le courant dans l'inductance a le temps de s'annuler au cours d'une période à un temps t_2 inférieur à T ($t_2 < T$) [24]. Les différentes formes d'onde sont représentées sur la figure (II.15).

Comme précédemment, nous supposons que la puissance fournie par le panneau est quasiment transférée à la charge [28][29] sans aucune perte, puisque aucune énergie n'est dissipée dans les autres composants purement réactifs (nous négligeons les pertes par conduction et par commutation dans le transistor MOSFET et la diode ainsi que les pertes dans les résistances séries parasites).

Le courant débité par le panneau est aussi le courant moyen dans l'inductance. La conservation de la puissance et le courant moyen dans l'inductance, nous permettent de déduire:

$$I_{Smoy} = \frac{V_{pv}}{V_s} I_{Lmoy} \quad (\text{II.30})$$

$$I_{Lmoy} = \frac{V_{pv}\alpha}{2V_s L} t_2 \quad (\text{II.31})$$

La tension V_{Lmoy} moyenne aux bornes de l'inductance doit être nulle [27] [28]; comme précédemment, nous avons donc d'après la loi des aires :

$$I_{Smoy} = \frac{V_{pv}^2}{2fL} \frac{\alpha^2}{(V_s - E)} \tag{II.32}$$

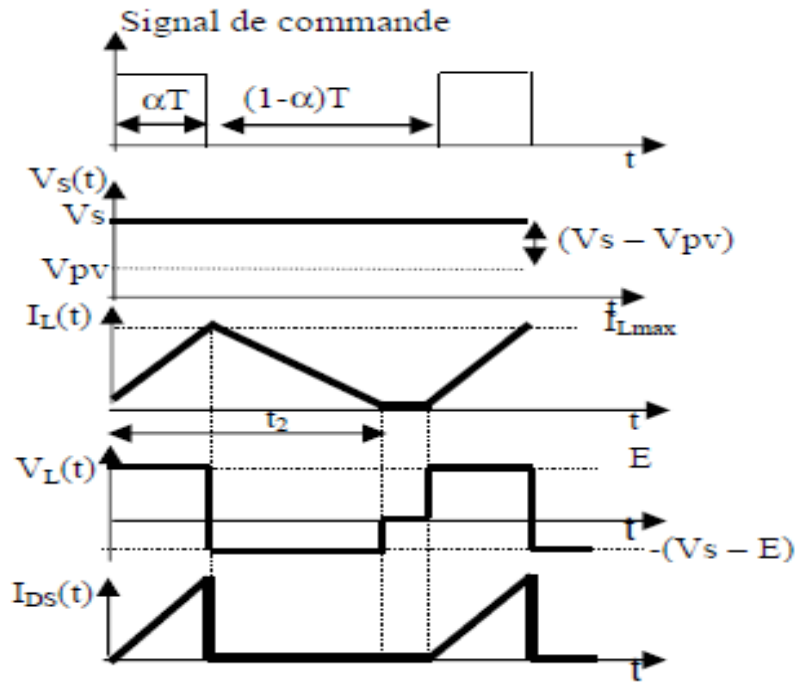


Fig. II.15 signal de commande et forme d'onde des différentes grandeurs électriques dans le convertisseur élévateur en régime discontinu en présence des condensateurs.

II.6. Analyse du fonctionnement de convertisseur dans l'environnement Matlab-Simulink

Nous avons implanté le système PV de figure (II.11) dans l'environnement Matlab Simulink. Ensuite, nous avons analysé l'adaptation du générateur PV (2500), pour un éclairement de $1000W/m^2$ à $25^\circ C$ et étudié l'effet de la charge résistive (R_s) et du rapport cyclique du signal commandant le convertisseur sur les grandeurs électriques (courant, tension, puissance,...) à l'entrée et à la sortie de convertisseur. Pour réduire le temps des simulations, l'interrupteur de convertisseur est commandé par un générateur d'impulsion délivrant un signal de fréquence 100 KHZ et de rapport cyclique variable. Nous avons vérifié que le fonctionnement du système PV est pratiquement identique.

II.7. Caractéristiques électriques typiques du système PV

Pour un éclairement de $1000\text{W}/\text{m}^2$ constant à la température de 25°C et lorsque le système est fermé par une charge résistive ($R_s=8\Omega$), nous avons simulé, dans l'environnement Matlab Simulink le fonctionnement du système PV de la figure (II.11) en fixant un rapport cyclique $\alpha = 0.7$. L'analyse temporelle nous a permis d'obtenir les résultats typiques de les tensions et des courants et de les puissances (figures Fig. II.16, Fig. II.17, Fig. II.18), à l'entrée et à la sortie du convertisseur.

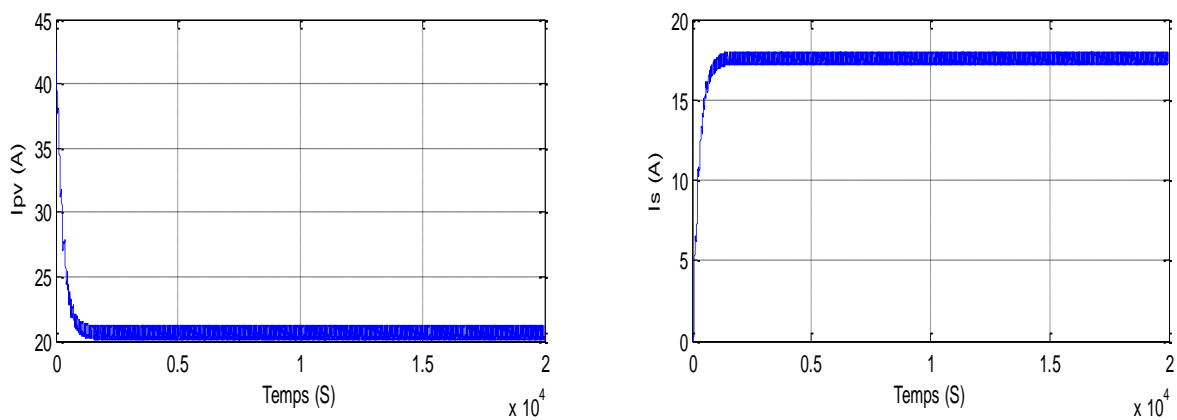


Fig. II.16. La résultat de simulation du courant d'entrée (I_{pv}) et de sortie (I_s) de convertisseur (survolteur).

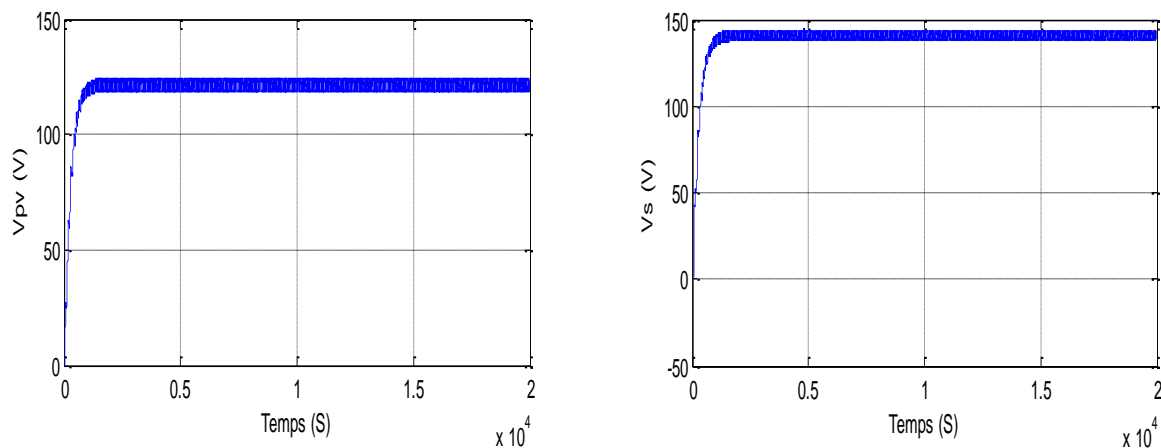


Fig. II.17. Résultat de simulation des tensions d'entrée V_{pv} et de sortie V_s de convertisseur (survolteur).

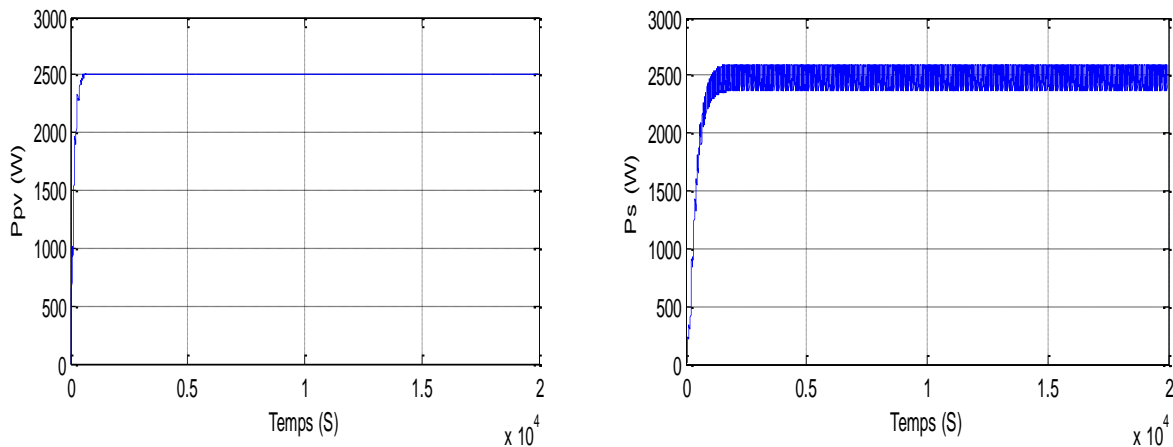


Fig. II.18. Résultat de simulation des puissances d'entrée P_{pv} et de sortie P_s de convertisseur (survolteur).

Il apparaît de résultat :

- Après un régime transitoire de 0.1 S au début de la conversion, le régime permanent est atteint.
- la tension de l'entrée du convertisseur se stabilise à une valeur de 124.6 V, et la tension de son sortie se stabilise à une valeur de 138.8 V.

Nous remarquons bien le comportement élévateur du convertisseur. Par la présence

de la capacité de filtrage C, la tension de sortie se stabilise autour de la valeur moyenne.

- le courant de l'entrée du convertisseur se stabilise à une valeur de 20.1 A et le courant de son sortie se stabilise à une valeur de 17.35 A.

Ces valeurs montrent que le courant de sortie obéit bien à la relation (II.11).

- La puissance d'entrée du convertisseur se stabilise à une valeur de 2500 W et dans son sortie est stabilise à une valeur de 2403 W.
- Dans ce cas, le rendement du convertisseur survolteur est de l'ordre de 96.12 %. Les pertes de puissances (97W) (soit 3.88%) sont attribuées en grande partie aux pertes par commutation et conduction dans le transistor MOSFET, par conduction dans la diode de roue libre et dans la self par pertes magnétiques.

II.8. L'influence du le rapport cyclique et de la charge sur les grandeurs électriques (puissance et tension)

Pour connaître l'influence du le rapport cyclique et de la charge sur les tensions et les puissances, nous avons présenté les tableaux suivant :

Tab. II.1 l'influence du le rapport cyclique sur les grandeurs électriques (puissance et tension) à l'entrée (P_{pv} , V_{pv}) et à la sortie (P_s , V_s) de convertisseur.

| α | 0.1 | 0.2 | 0.4 | 0.6 | 0.8 |
|---------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Tension V_{pv} (V) | 138.3 | 136.5 | 132.4 | 128.2 | 120.5 |
| Tension V_s (V) | 138.6 | 138.6 | 138.8 | 138.6 | 138.6 |
| Puissance P_{pv} (W) | 2439 | 2455 | 2475 | 2494 | 2500 |
| Puissance P_s (W) | 2403 | 2399 | 2408 | 2407 | 2391 |

D'après le tableau II.1 :

On remarque lorsque le rapport cyclique augmenter La tension a la sortie du panneau diminue, tandis que la tension du la sortie du le convertisseur est presque stable.

La puissance optimale a la sortie du panneau est très sensible au rapport cyclique, Lorsque le rapport cyclique augmente (diminue) autour du point optimal, la puissance augmente (diminue), la puissance du la sortie du le convertisseur est variable.

Tab. II.2. l'influence de la charge sur les grandeurs électriques (puissance et tension) à l'entrée (P_{pv} , V_{pv}) et à la sortie (P_s , V_s) de convertisseur.

| Résistance | 8 | 10 | 15 | 20 | 25 | 30 |
|------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Tension V_{pv} (V) | 120.5 | 129.7 | 144.6 | 153.5 | 159.5 | 163.8 |
| Tension V_s (V) | 138.6 | 154.9 | 187 | 212.5 | 233.9 | 252.6 |
| Puissance P_{pv} (W) | 2500 | 2488 | 2385 | 2286 | 2203 | 2135 |
| Puissance P_s (W) | 2391 | 2399 | 2332 | 2258 | 2188 | 2127 |

D'après le tableau II.2 :

Notons que La tension à la sortie du convertisseur passe par un maximum lorsque la va valeur de la charge est importante (supérieur à 20Ω).

Lorsque la charge entre 8 et 10Ω , pour un rapport cyclique $a=0.7$ les valeurs de puissance est très proche à cèle optimale (2500), puis diminue tan que la valeur de la résistance augmente.

II.9. Conclusion

Dans ce chapitre, l'intérêt de l'étage d'adaptation dans la chaine de conversion PV a été abordé. Nous avons présenté les différents types des convertisseurs entre les générateurs PV et les charges.

Nous analysons le fonctionnement d'un system photovoltaïque (GPV, charge résistive) par utilisé un convertisseur de type boost (survolteur).

La poursuite du point maximum de la puissance (MPPT) est une partie essentielle dans les systèmes photovoltaïques, dans le chapitre suivant nous mettrons en œuvre une commande MPPT (Perturbation et observation, Incrémentation de la conductance) dans le but de suivi la puissance optimale du générateur PV quelles que soient les conditions météorologiques.

CHAPITRE III

La commande MPPT adoptée

III.1. Introduction

La puissance de fonctionnement des panneaux solaires est facile à calculer. Elle vaut le produit tension courant. Mais, la détermination de la puissance de référence est plus délicate vue que cette dernière est fonction des paramètres météorologiques (température et éclairement). Cette référence variable, caractérisée par une fonction non linéaire, rend le fonctionnement à puissance maximale plus difficile à réaliser. Alors, une commande pour la poursuite du PPM s'impose. Cette commande, dite algorithme MPPT (Maximum Power Point Tracker), peut être plus ou moins compliquée. Elle est basée généralement sur l'ajustement du rapport cyclique du convertisseur statique jusqu'à se placer sur le PPM. Différentes méthodes MPPT ont été publiées dans la littérature afin d'obtenir un fonctionnement optimal. Dans ce chapitre on va étudier les différentes techniques de suivre le point de fonctionnement d'un générateur photovoltaïque, nous présentons les différentes méthodes (contre réaction de tension et contre réaction de puissance) pour optimiser la puissance.

III.2. La commande MPPT

Un MPPT est un principe permettant de suivre, comme son nom l'indique, le point de puissance maximale d'un générateur électrique non linéaire. Les systèmes MPPT sont généralement associés avec les générateurs photovoltaïques ou encore avec les générateurs éoliens [30].

III.2.1. Suivi de la puissance maximale du générateur photovoltaïque

La poursuite du point maximum de la puissance (MPPT) est une partie essentielle dans les systèmes photovoltaïques. Plusieurs techniques sont développées depuis 1968 date de publication de la première loi de commande de ce type adaptées à une source d'énergie renouvelable de type PV. Ces techniques se différencient entre elles par leur complexité, nombre de capteurs requis, la vitesse de convergence, coût, rendement et domaine d'application [30].

Cette commande MPPT est associée à un étage intermédiaire d'adaptation, permet de faire fonctionner un générateur PV de façon à produire en permanence le maximum de sa puissance. Ainsi, quels que soient les conditions météorologiques (température et l'éclairement), la commande du convertisseur place le système au point de fonctionnement maximum (V_{mpp} , I_{mpp}) [30]. L'adaptation d'impédance est souvent sous forme d'un convertisseur DC – DC comme représenté sur la figure (III.1)

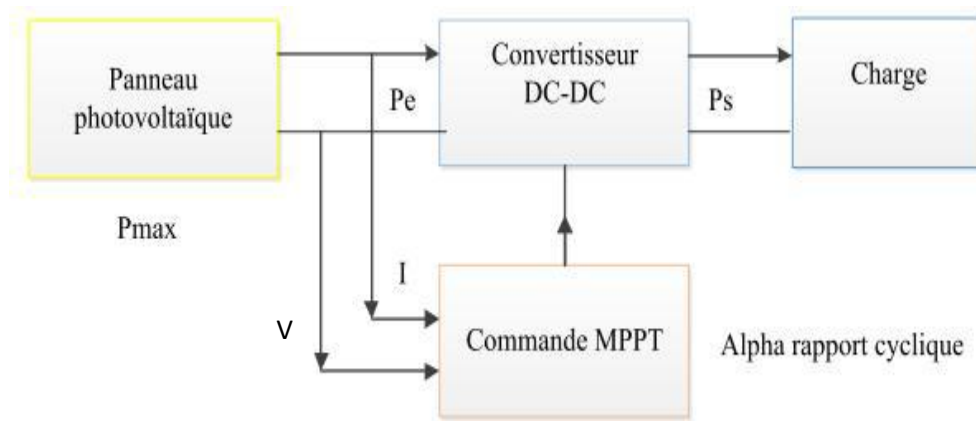


Fig. III.1. Chaîne de conversion d'énergie solaire comprenant une commande MPPT.

La technique de contrôle communément utilisée consiste à agir sur le rapport cyclique de manière automatique pour amener le générateur à sa valeur optimale de fonctionnement qu'elles que soient les instabilités météorologiques ou variations brutales de charges qui peuvent survenir. La figure (III.2) illustre trois cas de perturbations. Suivant le type de perturbation, le point de fonctionnement bascule du point de puissance maximal PPM1 vers un nouveau point P1 de fonctionnement plus ou moins éloigné de l'optimum.

- Pour une variation d'ensoleillement (cas a), Il suffit de réajuster la valeur du rapport cyclique pour converger vers le nouveau point de puissance maximum PPM2.
- Variations de température de fonctionnement du GPV (cas c). Bien qu'il faille également agir au niveau de la commande.
- Pour une variation de charge (cas b). On peut également constater une modification du point de fonctionnement qui peut retrouver une nouvelle position optimale grâce à l'action d'une commande.

En résumé, le suivi du PPM. Réalisé au moyen d'une commande spécifique nommée MPPT agit essentiellement sur le rapport cyclique du convertisseur statique (CS) pour rechercher et atteindre le PPM du GPV. Il existe plusieurs principes de fonctionnement des commandes MPPT plus ou moins performantes basées sur les propriétés du GPV [31].

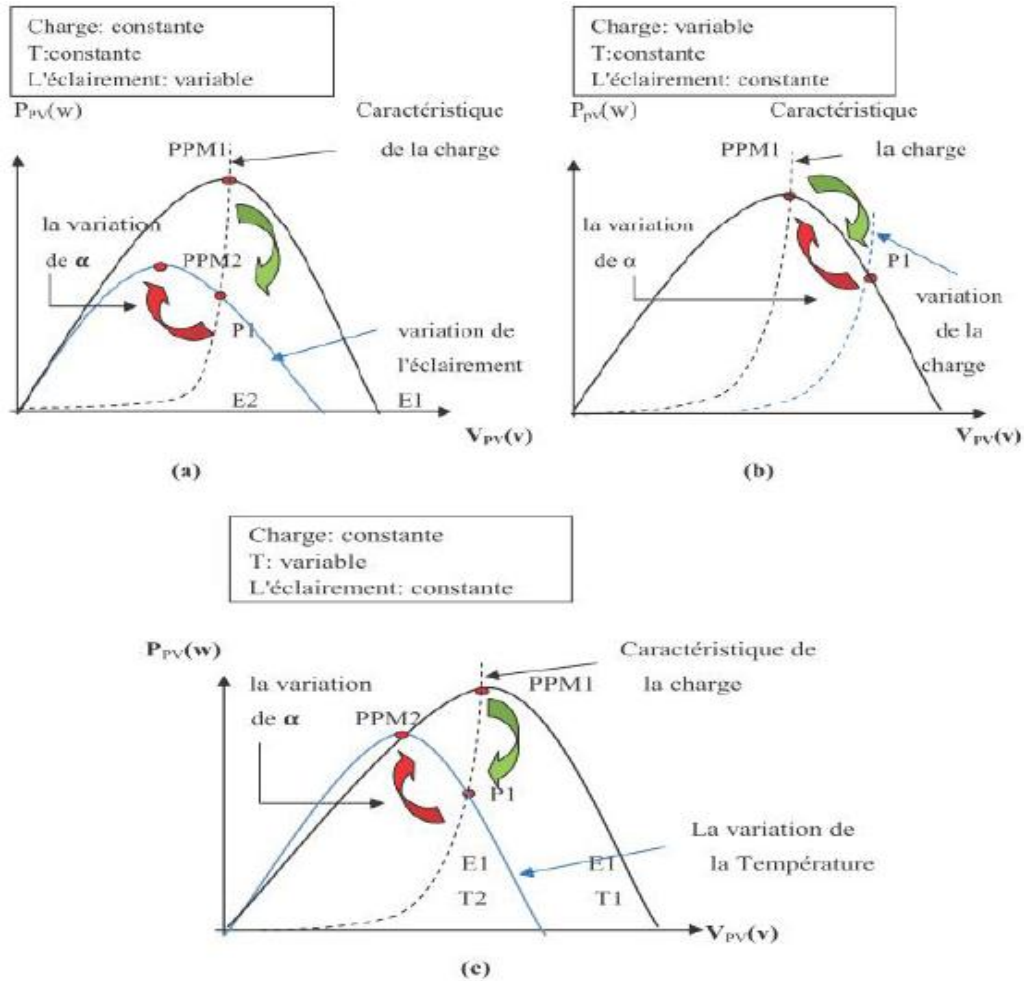


Fig. III.2. Recherche et recouvrement du Point de Puissance Maximale (a) suite à une variation d'éclairement, (b) suite à une variation de charge, (c) suite à une variation de température

III.2.2. Classification des techniques MPPT

Diverses publications sur les commandes assurant un fonctionnement de type commande MPPT apparaissent régulièrement dans la littérature depuis 1968, date de publication de la première loi de commande de ce genre, adaptée à une source d'énergie renouvelable de type photovoltaïque. Etant donné le grand nombre de publications dans ce domaine, la classification des différentes MPPT existantes en les regroupant selon leur principe de base, 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 [31].

III.2.3. Les premiers types de technique MPPT

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

Au photovoltaïque, son principe a d'abord été décrit par A.F. Bohringer. Cette commande est basée sur un algorithme de contrôle adaptatif, permettant de maintenir le système à son point de puissance maximum (PPM) [31].

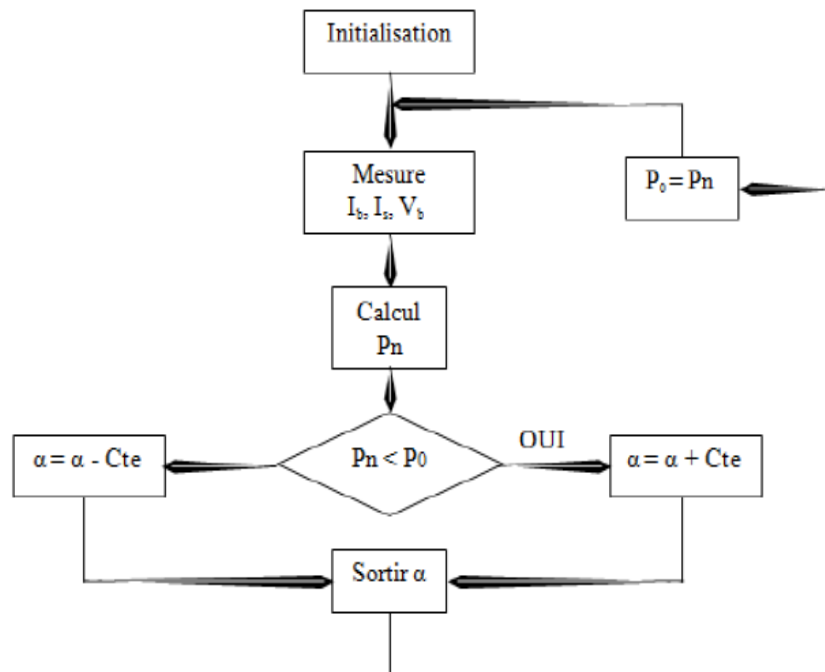


Fig.III.3. Principe classique d'une MPPT.

Le système démarre d'un rapport cyclique initial α_0 et d'une puissance initiale P_0 après avoir effectué la mesure du courant I_b et de la tension V_b aux bornes de la charge 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 inférieure à P_0 , alors α_0 est incrémenté, sinon 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 fonction de l'algorithme implanté ainsi que des performances du microprocesseur [32].

III.2.4. Evolution du point d'opération du générateur PV

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 ($t-1$) (figure.III.5).

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. Les commandes MPPT présentant finalement un bon compromis de rendements 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 [32].

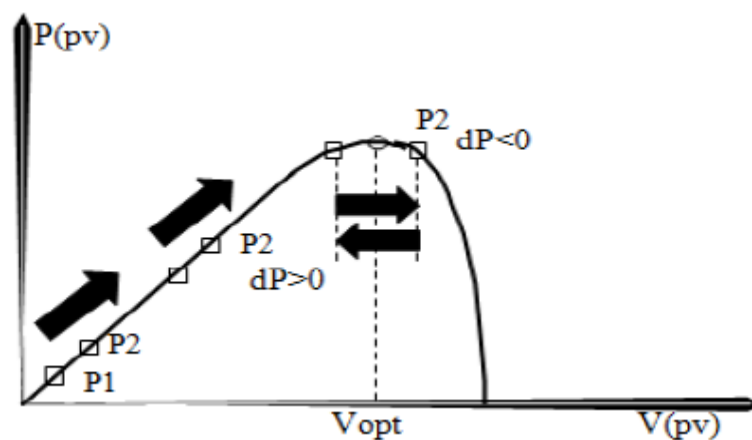


Fig.III.4. Principe de fonctionnement d'une commande MPPT.

Cependant, pour la plupart des commandes 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 [32].

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 et 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 générateur peut à tout instant avoir sa courbe de puissance modifiée et donc son PPM comme l'illustre la figure (III.5). 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 P2 et P1, 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 du PPM.

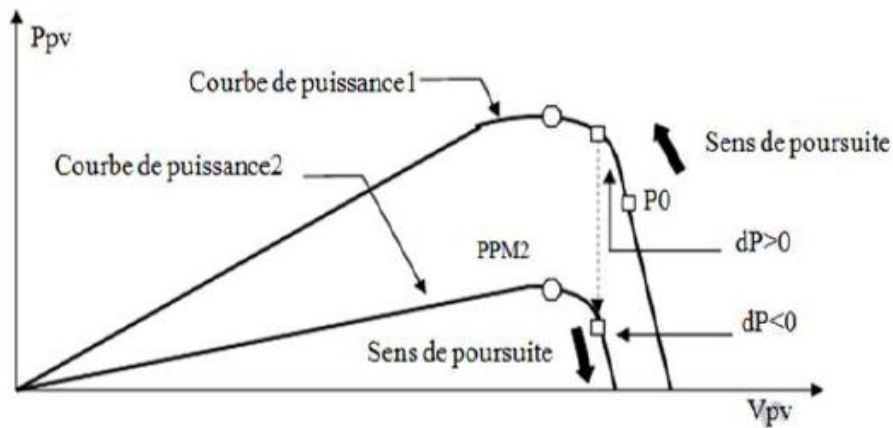


Fig.III.5.Changement d'éclairement et conséquence sur les courbes de puissance d'un générateur PV ainsi que sur l'adaptation source-charge.

III.3. Les méthodes de poursuite de MPP

Il existe de nombreux algorithmes utilisés pour trouver le point de puissance maximale. Idéalement, le suivi de la puissance se fait automatiquement pour s'adapter aux conditions météorologiques variables [33].

III.3.1. Méthodes à contre réaction de tension

$$K_1 = \frac{V_{MPP}}{V_{OC}} \cong Cte < 1 \quad (III.1)$$

La tension de circuit ouvert du générateur PV est mesurée et stockée en arrêtant le système cette opération s'effectuant à une certaine fréquence. Le MPP est calculé suivant l'équation (III .1).

et la tension de fonctionnement est ajustée sur le point de puissance maximale. Bien que cette méthode soit apparemment simple, il est difficile de choisir une valeur optimale de k_1 . Cette méthode souffre donc d'inexactitude mais présente l'avantage d'être simple et à bas prix. Aussi, l'interruption de service à la limite des systèmes avec stockage où la déconnexion des panneaux est « transparente » pour l'utilisateur.

III.3.2. La méthode de court-circuit

Cette méthode est similaire à la précédente et est basée sur la proportionnalité existant entre le courant de court-circuit et le courant au point de puissance maximale :

$$K_2 = \frac{I_{MPP}}{I_{OC}} \cong Cte < 1 \quad (III.2)$$

Cette méthode présente les mêmes avantages et inconvénients que ceux de la méthode de la tension de circuit ouvert.

III.3.3. Méthodes à contre réaction de puissance

Les méthodes à contre réaction de puissance se basent sur des algorithmes de recherche itérative pour trouver le point de fonctionnement du panneau afin que la puissance générée soit maximale sans interruption de fonctionnement du système.

La puissance extraite du panneau est calculée à partir des mesures de courant I et de tension V du panneau et la multiplication de ces deux grandeurs $P = V \times I$ [30].

III.3.4. Algorithme perturbation et observation

C'est l'algorithme de poursuite du point de puissance maximale (PPM) le plus utilisé, et comme son nom l'indique il est basé sur la perturbation du système par l'augmentation ou la diminution de la tension de référence ($V_{réf}$), ou en agissant directement sur le rapport cyclique du convertisseur (DC-DC), puis l'observation de l'effet sur la puissance de sortie en vue d'une éventuelle correction de ce rapport cyclique (D).

Si la valeur de la puissance actuelle $P(k)$ du générateur est supérieure à la valeur précédente $p(k-1)$ alors on garde la même direction de perturbation précédente sinon on inverse la perturbation du cycle précédent.

L'organigramme de l'algorithme de perturbation et de l'observation (P et O) est donné par la Figure (III.6) [33].

$D = \alpha$: rapport cyclique.

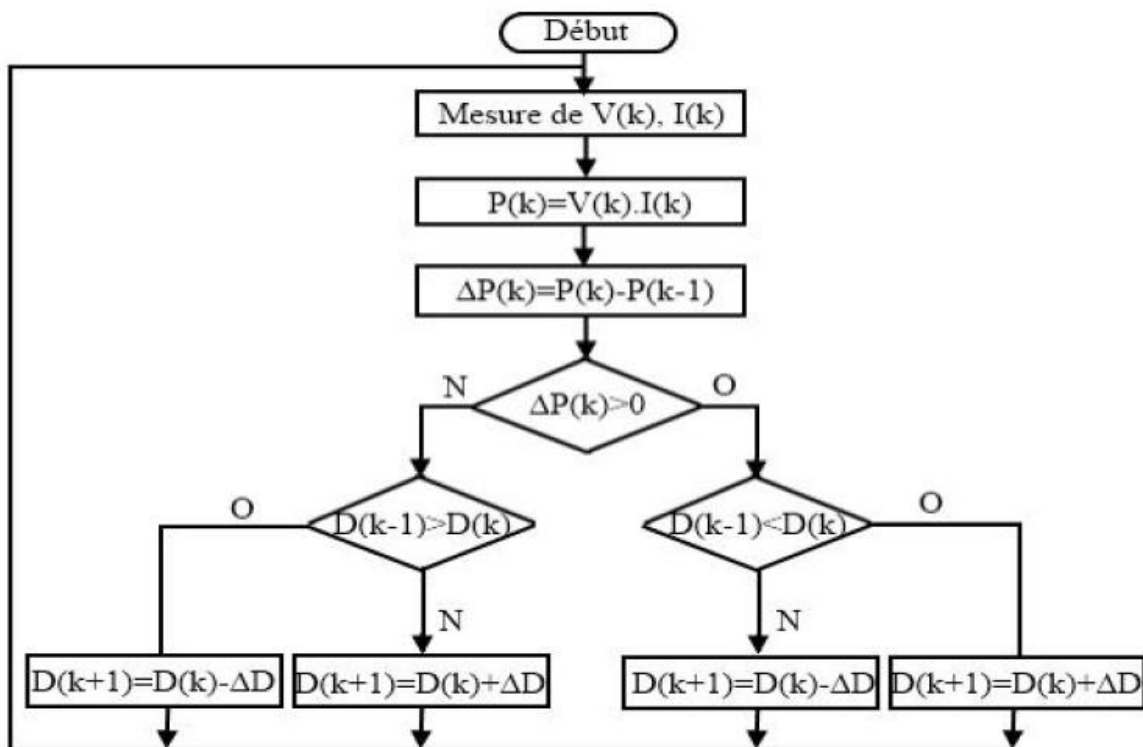


Fig.III.6. L'organigramme de l'algorithme de perturbation et de l'observation (P et O).

L'algorithme P et O (Figure. III.6) a comme avantage la précision et la rapidité de réaction. Il permet de déterminer le point de puissance maximale pour un ensoleillement et une température ou un niveau de dégradation des caractéristiques. Le problème avec cet algorithme est:

- l'oscillation autour du PPM dans les conditions de fonctionnement normales.
- La mauvaise convergence de l'algorithme dans le cas des variations brusques de la température et/ou de l'ensoleillement.

La méthode P et O est aujourd’hui largement utilisée de part sa facilité d’implémentation cependant elle présente quelques problèmes liés aux oscillations autour du PPM qu’elle engendre 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. Cependant, une faible valeur d’incrément ralenti la recherche du PPM, il faut donc trouver un compromis entre la précision et la rapidité. Ce qui rend cette commande difficile à optimiser [34].

L’implantation de cet algorithme sur l’environnement MATLAB/SIMULINK.

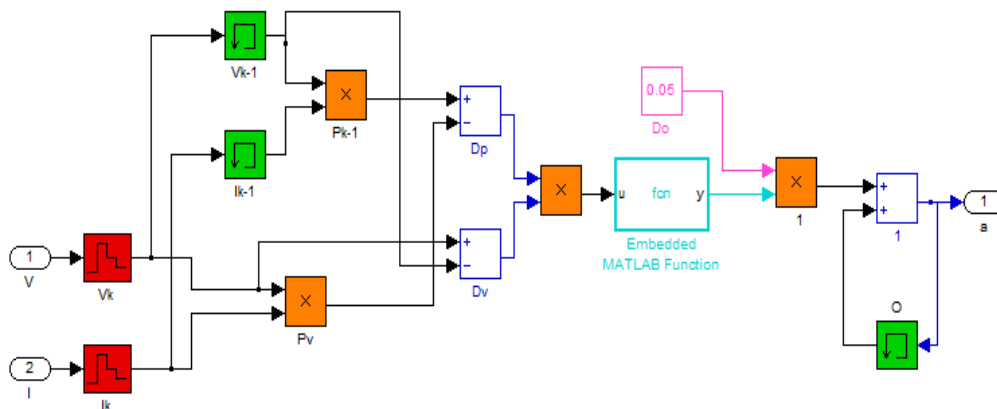


Fig.III.7. Schéma block d’une commande MPPT de l’algorithme ‘perturbation et observation.

III.3.5. Algorithme incrémentation de la conductance

L’algorithme par incrémentation de conductance se résulte en dérivant la puissance du panneau photovoltaïque par rapport à la tension et en mettant le résultat égal à zéro. Ceci peut être décrit par les équations suivantes [33]:

$$\frac{dP}{dV} = I + V \frac{dI}{dV} \tag{III.3}$$

$$\frac{1}{V} \frac{dP}{dV} = \frac{1}{V} \tag{III.4}$$

On définit la conductance de la source et incrémentation de la conductance puisque la tension V du panneau est toujours positive, la relation (II.7) explique que le point de puissance maximale MPP est atteint si la conductance de la source égale incrémentation de la conductance de la source

avec un signe moins, et qu'elle est à gauche de ce point lorsque la conductance est supérieure il l'incrémentale conductance et vice-versa [33], Comme suit:

$$\frac{dP}{dV} > 0 \quad \text{si} \quad \frac{1}{V} > -\frac{dI}{dV} \tag{III.5}$$

$$\frac{dP}{dV} = 0 \quad \text{si} \quad \frac{1}{V} = -\frac{dI}{dV} \tag{III.6}$$

$$\frac{dP}{dV} < 0 \quad \text{si} \quad \frac{1}{V} < -\frac{dI}{dV} \tag{III.7}$$

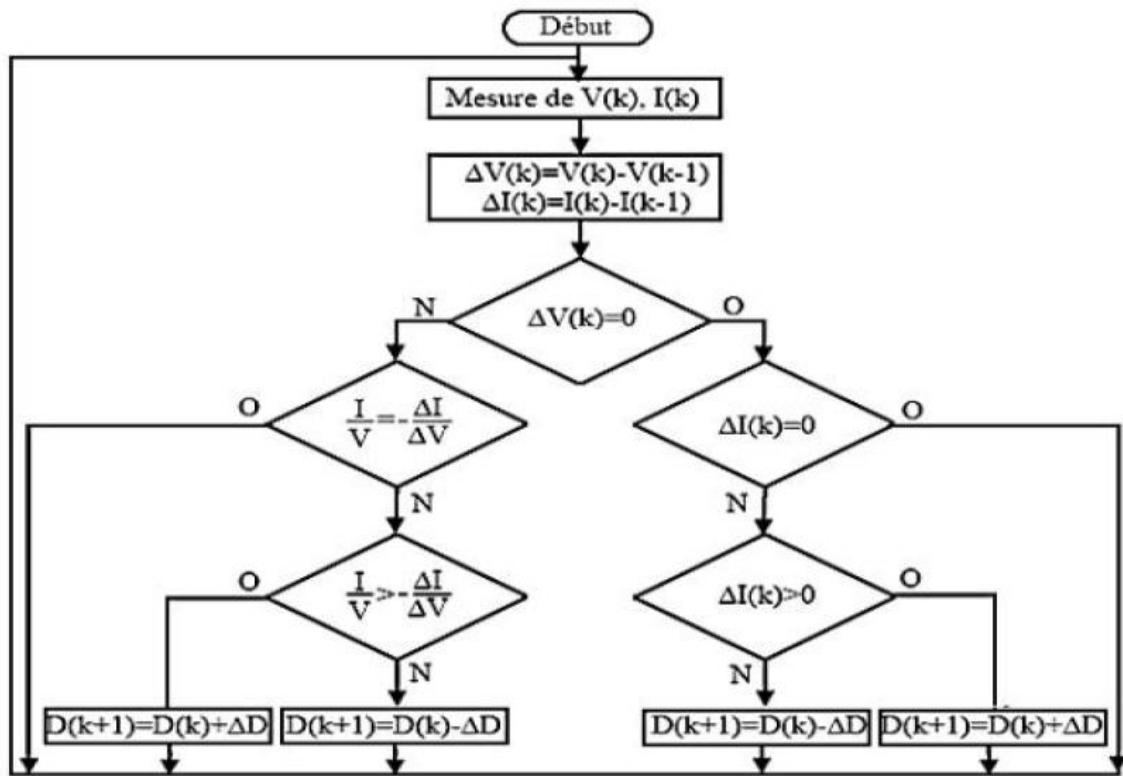


Fig.III.8. L'organigramme de l'algorithme incrémental de la conductance.

L'avantage de cet algorithme est la précision et la vitesse de recherche du PPM quand les conditions atmosphériques changent rapidement. Ceci peut être un remède au problème de l'algorithme P et O [35]. Cet algorithme présente des difficultés de mise en œuvre due à la complexité du circuit de commande et le calcul en temps réel de la dérivée nécessite un processeur de calcul rapide [35]. Autrement dit, l'exécution de la commande Inc Cond nécessite

plus de temps par rapport P et O. Pratiquement, même Inc Cond présente des oscillations autour du PPM.

L'implantation de cet algorithme sur l'environnement MATLAB/SIMULINK.

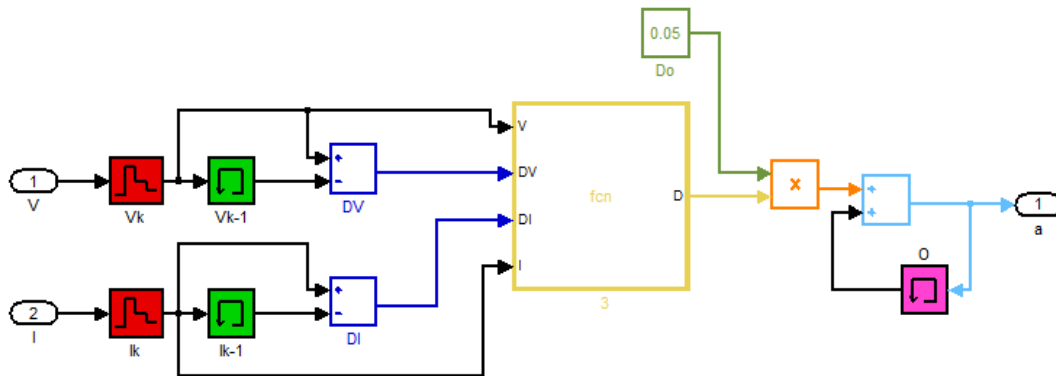


Fig.III.9. Schéma block d'une commande MPPT de l'algorithme Incrémentation de la conductance.

III.4. Simulation du système photovoltaïque adapté par la commande MPPT

Le schéma synoptique du système photovoltaïque complet est représenté sur la figure (III.10 ,III.11).

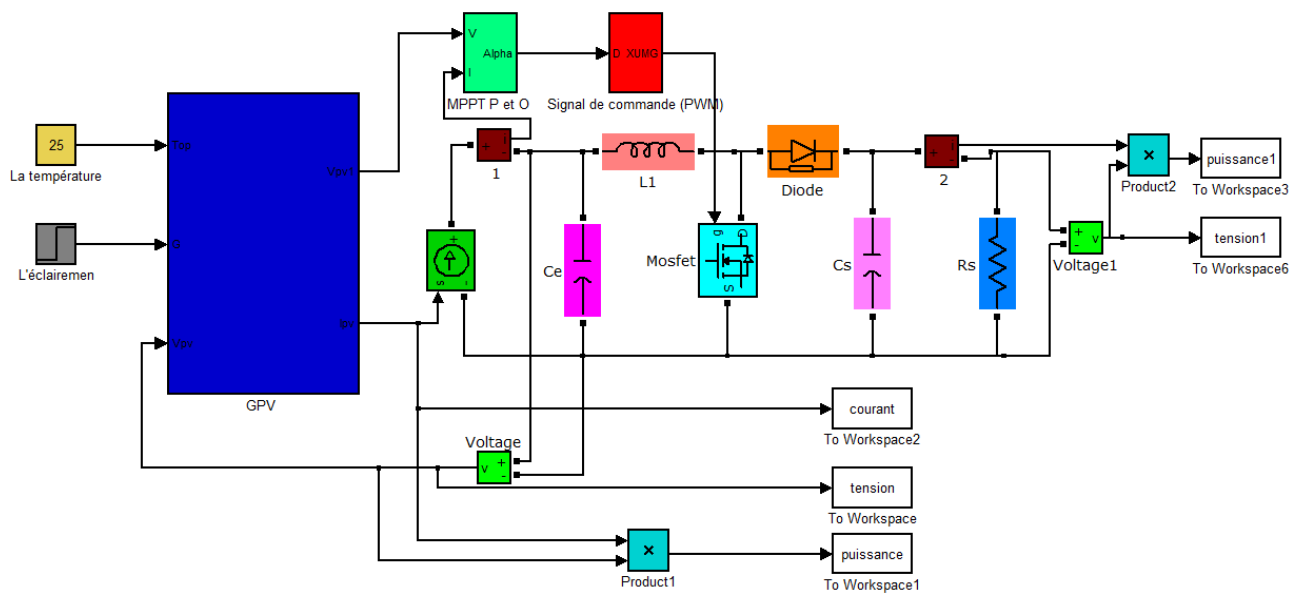


Fig.III.10. Schéma MATLAB SIMULINK d'un système photovoltaïque avec la commande MPPT (P et O).

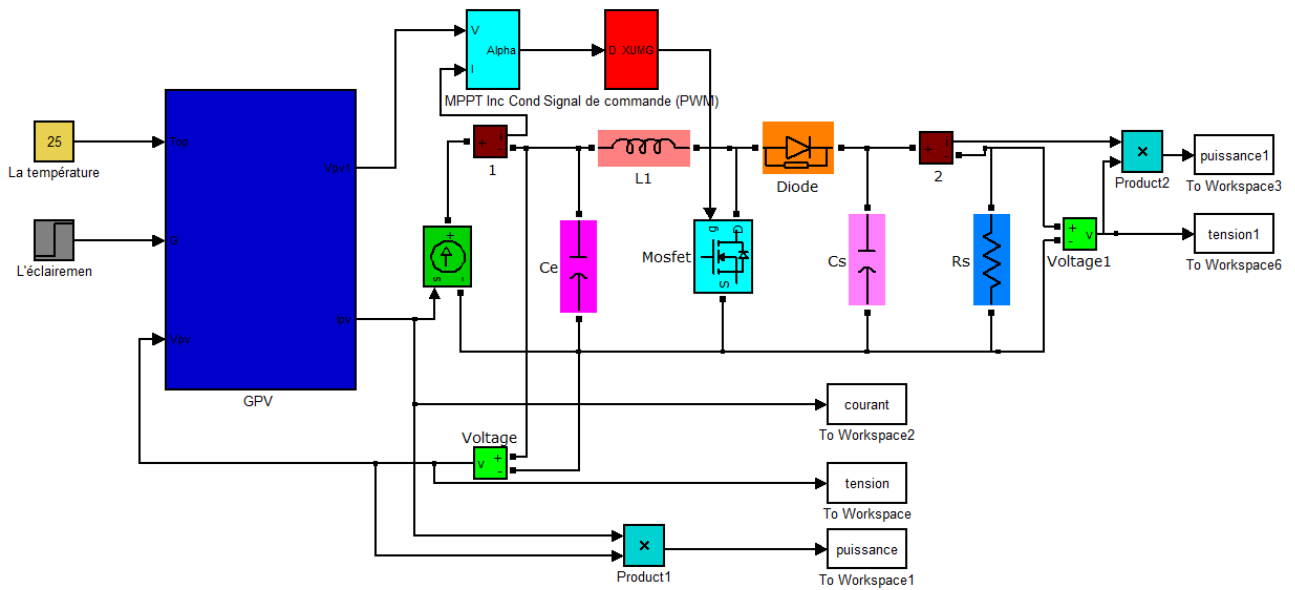


Fig.III.11. Schéma MATLAB SIMULINK d'un système photovoltaïque avec la commande MPPT (Inc Cond).

Dans ce système :

- Un générateur PV (2500).
- Un convertisseur d'énergie de type survolteur (élevateur) pour des applications nécessitant des tensions supérieures à la tension optimale du panneau un générateur d'impulsion délivrant un signal de fréquence 100 KHZ pour commandé l'interrupteur du convertisseur.
- Une commande MPPT (P et O fig.III.13, Inc Cond fig.III.14), dont le rôle essentiel est de poursuivre le point de puissance maximale (PPM) du générateur PV, quelles que soient les conditions météorologiques Son principe de régulation est basé sur la variation automatique du rapport cyclique α à la valeur adéquate de manière à maximiser continuellement la puissance à la sortie du panneau PV.
- Une charge résistive ($R_s=50\Omega$).

Dans ce chapitre nous analysons l'influence de changement brutal des conditions météorologiques sur le fonctionnement de système PV par utiliser de type de commande MPPT (P et O, Inc Cond).

III.4.1. Résultats de simulation

III.4.1.1 Résultats de simulation de La commande MPPT P et O

✚ L'incident est un changement brutal de l'éclairement

Lorsque le générateur PV subit des variations de l'éclairement, nous avons représenté sur la figure(III.12) les grandeurs électriques à la sortie de panneau et à la sortie du hacheur élévateur (puissance tension).

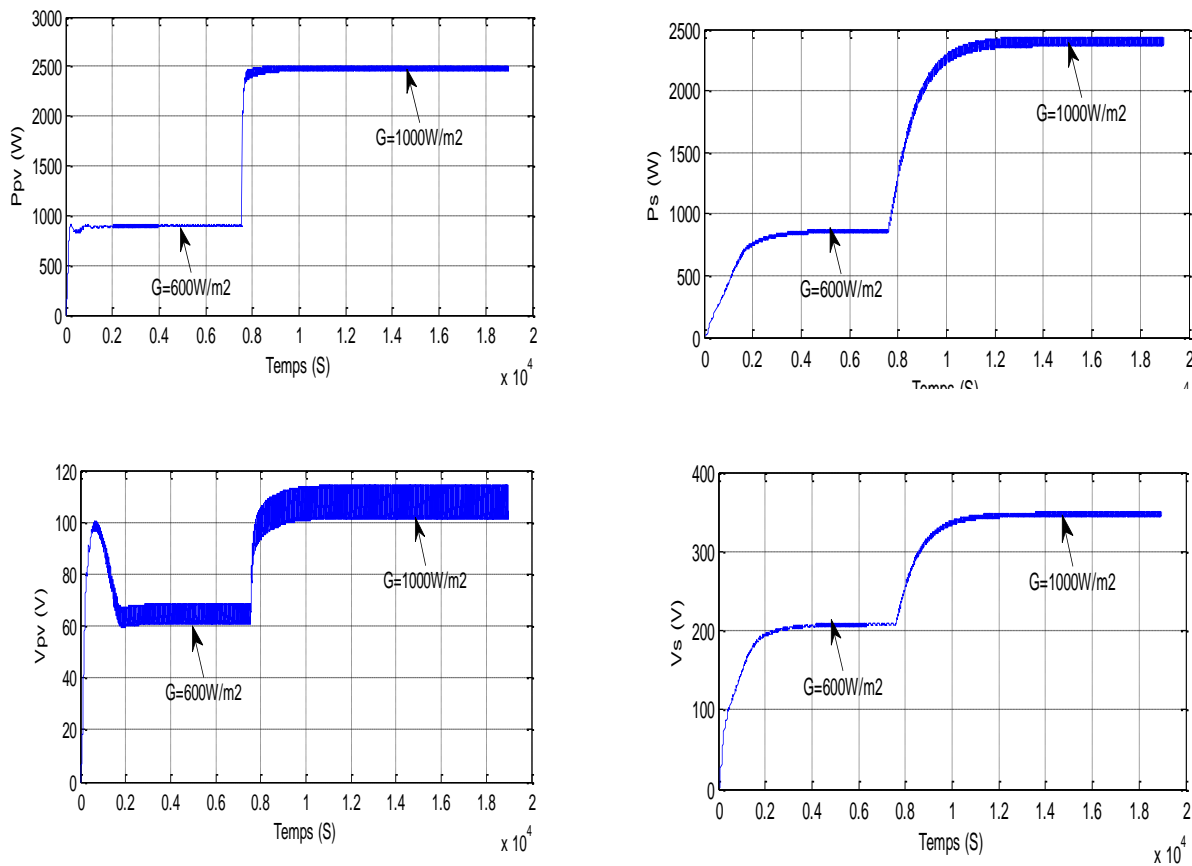


Fig.III.12. Résultat de simulations typiques de l'influence du changement de l'éclairement sur les grandeurs électriques (Puissance et tension) à l'entrée (P_{pv} , V_{pv}) et à la sortie (P_s , V_s) de convertisseur (survolteur) du système PV, $R_s = 50 \Omega$.

Il apparaît de résultat :

Après un régime transitoire de durée 0.2 S, la commande MPPT fait osciller le point de fonctionnement autour du point PPM.

Les différentes grandeurs électriques (puissances, tensions) se stabilisent autour des valeurs (902.7W, 850.9W, 67.95V, 206.6V).

À l'instant $t=0.78$ S, l'intensité d'éclairement changée, il apparaît que :

Le système converge vers un nouveau PPM.

Les différentes grandeurs électriques (puissances, tensions) se stabilisent autour des valeurs (2500W, 2367W, 113.2V, 344.6V).

✚ L'incident est un changement brutal de la température

Nous avons représenté sur la figure(III.13) les résultats de simulation typique des grandeurs électriques à l'entrée et à la sortie du hacheur élévateur pour un éclairement de 1000 W/m^2 et une charge de 50Ω , lorsque la température est variée de 25°C à 40°C .

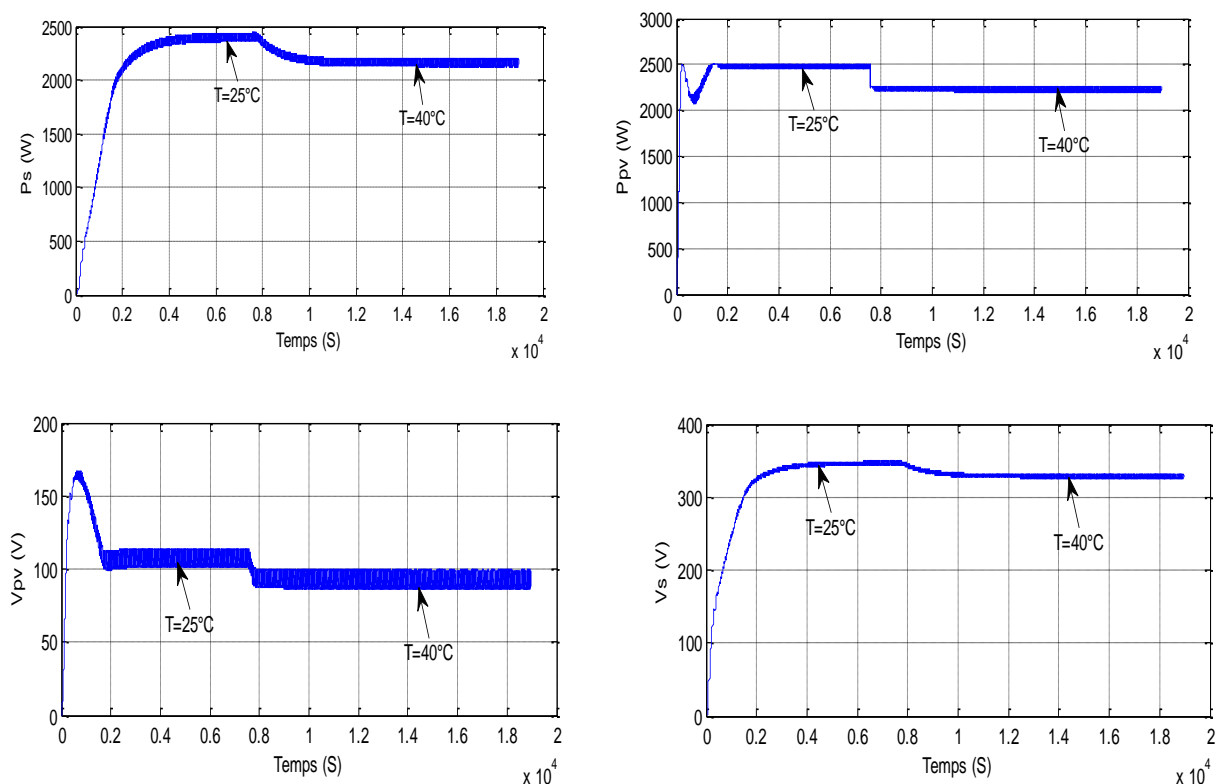


Fig.III.13. Résultat de simulations typiques de l'influence du changement de la température sur les grandeurs électriques (puissance et tension) à l'entrée (P_{pv} , V_{pv}) et à la sortie (P_s , V_s) de convertisseur (survolteur) du système PV, $R_s= 50 \Omega$.

Il apparaît qu'au bout de 0.2 S, le système PV converge vers le point PPM.

Les différentes grandeurs électriques (puissances, tensions) se stabilisent autour des valeurs (2500W, 2367W, 113.2V, 344.6V).

À l'instant $t=0.78$ S, la température multiplie à 40°C , il apparaît que :

Le système converge vers un nouveau PPM.

Les différentes grandeurs électriques (puissances, tensions) se stabilisent autour des valeurs (2261W, 2141W, 98.27V, 327.2V).

III.4.1.2 Résultats de simulation de La commande MPPT Inc Cond

✚ L'incident est un changement brutal de l'éclairement

Lorsque le générateur PV subit des variations de l'éclairement, nous avons représenté sur la figure(III.14) les grandeurs électriques à la sortie de panneau et à la sortie du hacheur élévateur (puissance, tension).

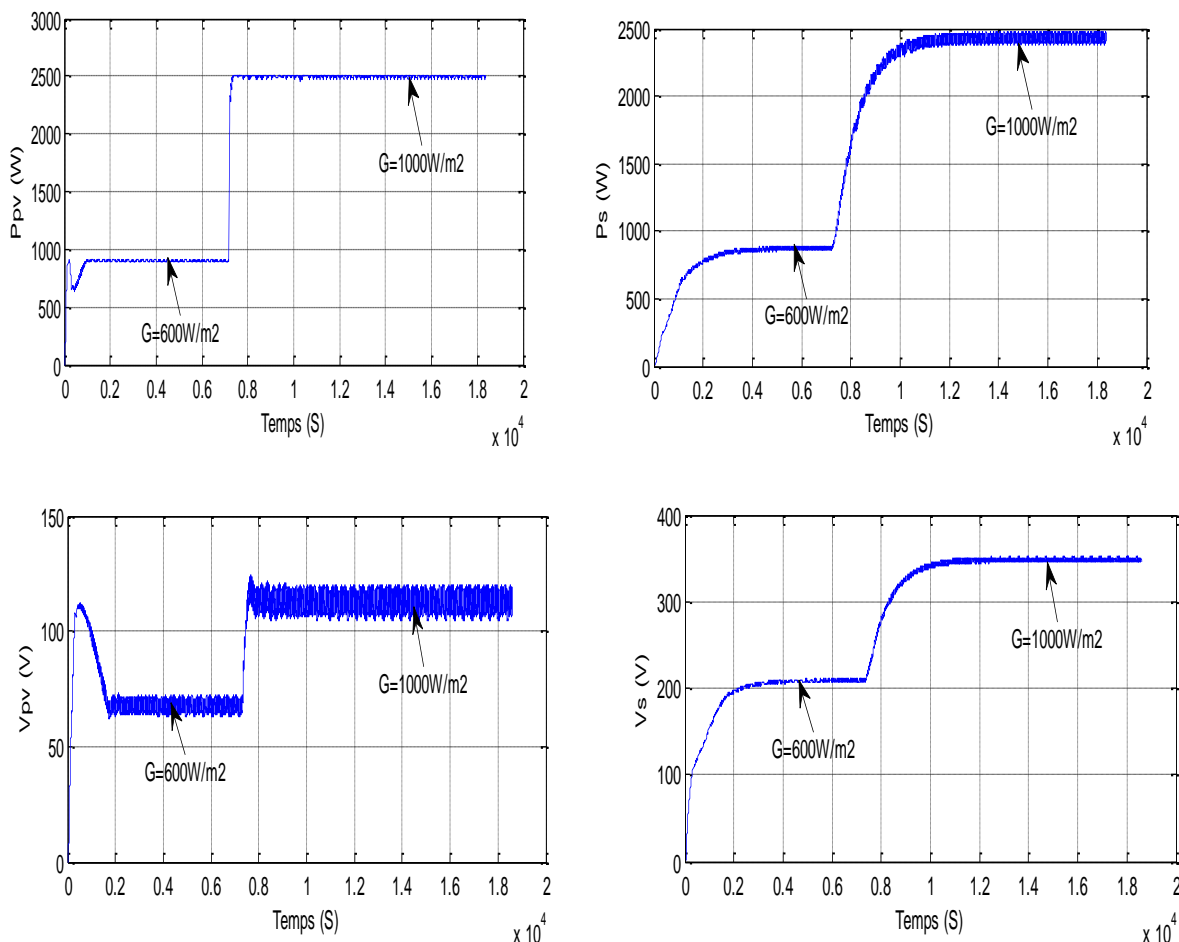


Fig.III.14. Résultat de simulations typiques de l'influence du changement de l'éclairement sur les grandeurs électriques (puissance et tension) à l'entrée (P_{pv} , V_{pv}) et à la sortie (P_s , V_s) de convertisseur (survolteur) du système PV, $R_s= 50\Omega$.

Il apparaît de résultat :

Après un régime transitoire de durée 0.1 S, la commande MPTT fait osciller le point de fonctionnement autour du point PPM.

Les différentes grandeurs électriques (puissances, tensions) se stabilisent autour des Valeurs (904.2W, 861.7W, 71.35V, 207.6V).

À l'instant $t=0.78$ S, l'intensité d'éclairement changée, il apparaît que :

Le système converge vers un nouveau PPM.

Les différentes grandeurs électriques (puissances, tensions) se stabilisent autour des valeurs (2500W, 2388W, 113.2V, 344.6V).

L'incident est un changement brutal de la température

Nous avons représenté sur la figure(III.15) les résultats de simulation typique des grandeurs électriques à l'entrée et à la sortie du hacheur élévateur pour un éclairement de 1000 W/m² et une charge de 50 Ω, lorsque la température est varié de 25°C à 40°C.

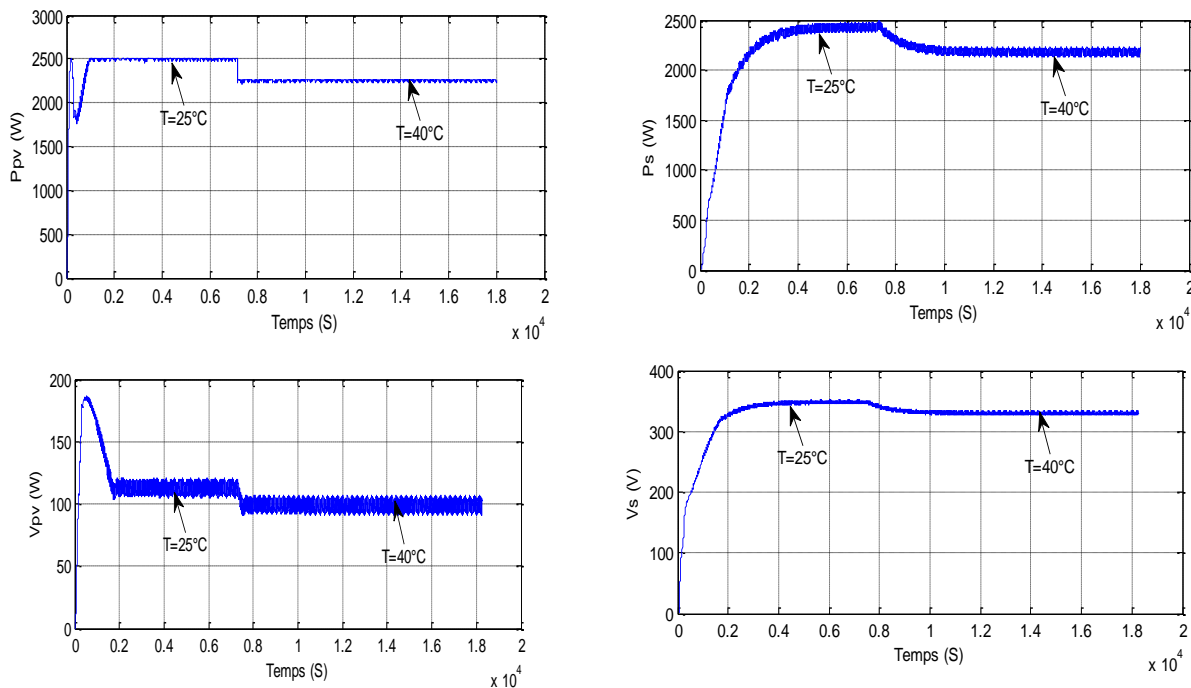


Fig.III.15 Résultat de simulations typiques de l'influence du changement de la température sur les grandeurs électriques (puissance et tension) à l'entrée (Ppv, Vpv)et à la sortie (Ps, Vs) de convertisseur (survolteur) du système PV, $R_s= 50 \Omega$, éclairement de 1000W/m².

Il apparaît qu'au bout de 0.1 S, le système PV converge vers le point PPM.

Les différentes grandeurs électriques (puissances, tensions) se stabilisent autour des valeurs (2500W, 2388W, 113.2V, 344.6V).

À l'instant $t=0.78$ S, la température multiplie à 40°C , Il apparaît que :

Le système converge vers un nouveau PPM.

Les différentes grandeurs électriques (puissances, tensions) se stabilisent autour des valeurs (2268W, 2162W, 98.27V, 327.2V).

L'ensemble des résultats obtenus montre que le convertisseur DC-DC et la commande MPPT (P et O, Inc Cond) effectuent correctement leurs rôles. Le convertisseur fournit dans les conditions optimales une tension à sa sortie supérieure à celle fournie par le générateur PV.

La commande MPPT adapte le générateur PV à la charge: transfert de la puissance maximale fournie par le générateur PV.

Pour calculer le rendement du système en résumé les valeurs des puissances obtenues dans les différents changements métrologiques par les deux méthodes MPPT (P et O, Inc Cond) dans les tableaux suivant (III.1, III.2).

Tab.III.1. Les valeurs de la puissance d'entrée, sortie (Ppv, Ps) du convertisseur de la méthode MPPT (P et O).

| | La puissance de l'entrée Ppv (W) | La puissance de sortie Ps (W) | Le rendement |
|--|----------------------------------|-------------------------------|--------------|
| à $T = 25^{\circ}\text{C}$, $G = 600\text{W}/\text{m}^2$ | 902.7 | 850.9 | 94% |
| à $T = 25^{\circ}\text{C}$ $G = 1000\text{W}/\text{m}^2$ | 2500 | 2367 | 94% |
| à $G = 1000\text{W}/\text{m}^2$ $T = 25^{\circ}\text{C}$ | 2500 | 2367 | 94% |
| à $G = 1000\text{W}/\text{m}^2$ $T = 40^{\circ}\text{C}$ | 2261 | 2141 | 94% |

Tab. III.2. Les valeurs de la puissance d'entrée, sortie (Ppv, Ps) du convertisseur de la méthode MPPT (Inc Cond).

| | La puissance de l'entrée Ppv (W) | La puissance de sortie Ps (W) | Le rendement |
|--|----------------------------------|-------------------------------|--------------|
| à T = 25°C, G = 600W/m ² | 904.2 | 861 | 95% |
| à T = 25°C G = 1000W/m ² | 2500 | 2388 | 95% |
| à G = 1000W/m ² T = 25°C | 2500 | 2388 | 95% |
| à G = 1000W/m ² T = 40°C | 2268 | 2162 | 95% |

Après les deux tableaux précédent on remarquer que le rendement de la méthode de la conductance incrémentielle plus fiable par rapport la méthode perturber et observer.

Notons que l'avantages de la méthode de la conductance incrémentielle sur P et O dans la mesure où il peut déterminer quand le MPPT a atteint le MPP, où P et O oscille autour du MPP. De plus, la conductance incrémentielle Peut suivre rapidement les conditions d'irradiation croissante et décroissante avec exactitude que perturber et observer. Un inconvénient de cet algorithme est la complexité accrue par rapport à P et O.

III.5. Conclusion

Dans ce chapitre on a étudié quelques méthodes MPPT basées sur contre réaction de puissance, comme l'algorithme d'incrémention de l'inductance et méthode de perturbation et observation.

Nous avons modélisé l'ensemble de la chaine de conversion sous MATLAB et l'algorithme de recherche du point de puissance maximale (MPPT) a été simulé.

Il est force le générateur GPV à travailler à son point de puissance maximale (MPP), induisant une amélioration globale du rendement du système de conversion électrique.

Conclusion générale

Conclusion générale

Le travail qu'on a présenté porte sur l'analyse d'une modélisation et simulation du fonctionnement électrique d'un système photovoltaïque (PV) adapté par une commande MPPT assurant la poursuite de la puissance maximale fournie par le générateur PV. Dans un premier temps, on a donné des généralités sur les systèmes PV, principe de l'effet PV, cellule PV. Ainsi on a étudié la modélisation du système photovoltaïque. Pour ce la, on a étudié d'abord la modélisation du générateur PV (2500) par la résolution de l'équation caractéristique non linéaire d'une cellule PV en utilisant la méthode de Newton-Raphson.

On a étudié, dans un deuxième temps, quelques types convertisseurs DC-DC, utilisés dans les systèmes photovoltaïques. Comme l'hacheur dévolteur, l'hacheur survolteur et l'hacheur mixte (dévolteur-survolteur). Ainsi, l'adaptation par le convertisseur DC-DC survolteur et on trouve les relations relient les grandeurs du convertisseur et le rapport cyclique du signal qui commande l'interrupteur du convertisseur.

On a décrit le mécanisme de la poursuite pour l'extraction de la puissance maximale sous différentes conditions de fonctionnement. On a présenté les méthodes MPPT basées sur contre réaction de puissance, comme l'algorithme d'incrémentacion de l'inductance et la méthode de perturbation et observation. Ces deux méthodes est utilisée dans ce travail cause de sa simplicité, et son exigence seulement des mesures de tension et du courant du panneau photovoltaïque pour chercher le point de fonctionnement correspondant à la puissance maximale.

D'après les résultats de la simulation obtenus, on peut dire que :

- Les performances du générateur se dégradent avec l'augmentation de la température, la diminution de l'intensité de l'éclairement et les variations de la charge. Les performances du générateur PV sont évaluées à partir des conditions standards (CST) : éclairement 1000W/m^2
- Le convertisseur DC-DC et la commande MPPT effectuent correctement leurs rôles. Le convertisseur fournit dans les conditions optimales une tension à sa sortie supérieure à celle fournie par le générateur PV. La commande MPPT adapte le générateur PV à la charge : transfert de la puissance maximale fournie par le générateur PV.
- Ces résultats, forts intéressants, montrent que l'utilisation de la commande MPPT permet d'améliorer d'une manière considérable le rendement des installations photovoltaïques.

Bibliographie

Bibliographie

- [1]. K. Kassmi et M. Hamdaoui et F. Olivié 'Conception et modélisation d'un système photovoltaïque adapté par une commande MPPT analogique', université de maroc , revue des énergies renouvelables ,pp 451 – 462, 2007.
- [2]. A. T.SINGO ' Système d'alimentation photovoltaïque avec stockage hybride pour l'habitat énergétiquement autonome' Thèse de doctorats, université Henri Poincaré, Nancy-I,2010.
- [3]. J. Royer et T. Djiako et E. Schiler, B. Sadasy. ' Le pompage photovoltaïque', université d'Ottawa, 1998.
- [4]. S.ABADA ' Etude et optimisation d'un générateur photovoltaïque pour la recharge d'une batterie avec un convertisseur sepic', Mémoire Maître es Sciences, Université laval, 2011.
- [5]. M. G. Villalva and J. R. Gazoli, and E. R. Filho 'Comprehensive approach to modeling and simulation of photovoltaic arrays',Jornal of power electronics, ,May 2009.
- [6]. A. Bilbao ' Réalisation d'un commande mppt numérique' université de rovira i virgili ,2006.
- [7]. H. BELGHITRI et H. ' Modélisation, simulation et optimisation d'un système hybride éolien- photovoltaïque' mémoire de magister, 2009.
- [8]. A. labouret et M. villosz préface de jean louis bal 'Energie solaire photovoltaïque', livre 4 édition,2008.
- [9]. B. Flèche - D. Delagnes 'Energie solaire photovoltaïque.doc', juin 2007, <http://www.scribd.com>.10/06/2016/22:00
- [10]. M.belhad ' Modélisation D'un Système De Captage Photovoltaïque Autonome', mémoire de magister université de bachar ,2008.
- [11]. S. PETIBON ' Nouvelles architectures distribuées de gestion et de conversion de l'énergie pour les applications photovoltaïques', université de Toulouse, 2009.
- [12]. L. ABBASSEN ' Etude de la connexion au réseau électrique d'une centrale photovoltaïque' Mémoire de magister, université mouloud Mammeri Tizi ouzo, 2011.
- [13]. BOUALEM, DENDIB, "Technique conventionnelles et avancée de poursuite MPP pour des application Mémoire de Magister, Departement photovoltaïque : étude comparative., " Université Ferhat Abbes-Sétif d'électronique TS4/6338, 2007
- [14]. A. Lyes, "Etude de la connexion au réseau électrique d'une centrale photovoltaïque" UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI DE TIZI OUZOU Mémoire de Magister, 2011.
- [15]. M. Biswal, Mater of Technology (Rearch), "control technique for dc-dc buk converter with improved performance", National Institute of technology , Rourkela, March 2011.
- [16]. M.H. Rashid, Power Electronics Handbook, Academic Press, 2001, p. 220 .
- [17]. J. Mahdavi, A. Emadi, and H. Toliyat, "application of state space averaging method to silidingmode control of PWM DC/DC converters,"in proc IEEE Ind. Conf., New Orleans, USA,Oct.1997,pp.820-827.
- [18]. A. Aziz, K. Kassmi, Ka. Kassmi, R. Maimouni, F. Olivié, G. Sarrabayrouse, A. Martinez, 'Adaptation DC-DC des systèmes photovoltaïques dans l'environnement Orcad - Pspice'

Rapport LAAS N°05269, 20p, Toulouse, Mai 2005.

- [19] .A. Aziz, K. Kassmi, F. Olivié, G. Sarrabayrouse, A. Martinez ‘‘Conception d'un système photovoltaïque adapté par des convertisseurs d'énergie DC-DC de type dévolteur ou survolteur fonctionnant à haute fréquence (0.1 MHz)’’ Rapport LAAS N°05346, 29p. Toulouse– France, Juillet 2005.
- [20] . A. Aziz, K. Kassmi, F. Olivié, G. Sarrabayrouse, A. Martinez, ‘‘Analyse dans l'environnement.
- [21]. A. Aziz, K. Kassmi, R. Maimouni, F. Olivié, G. Sarrabayrouse, A. Martinez, ‘‘Composants de puissance utilisés dans les convertisseurs des chaînes photovoltaïques en régime de commutation’’, Rapport LAAS N°04758, 27p., Toulouse – France, Septembre 2004.
- [22]. Ph Dondon. Site web <http://www.enseirb.fr/~dondon/puissance/flyback/Flyback.html>© Copyright 2000.
- [23].E.M atagne, document de travail relatif à l'énergie solaire photovoltaïque, université catholuede Louvain, faculté des sciences appliquée, état en octobre 2000.
- [24]. M..F. Shraif, ‘‘Optimisation et mesure de chaîne de conversion d'énergie photovoltaïque en énergie électrique’’, Thèse de l'université Paul Sabatier, LAAS/CNRS, N° 02569, Toulouse-France, 2002.
- [25]. Cours d'Electronique Industrielle- Traitement Electronique de l'Energie Electrique, hacheurs et onduleurs autonomes, E.N.S.E.E.I.H, Toulouse, groupe d'enseignants de la filière électronique avec la collaboration de chercheurs de LEEI,, Edition 1983.
- [26] .A. Aziz, K. Kassmi, R. Maimouni, F. Olivié, G. Sarrabayrouse, A. Martinez. ‘‘Synthèses bibliographiques sur les chaînes photovoltaïques, 4 – Convertisseur d'énergie : Hacheurs’’, rapport LAAS/CNRS N° 04760, 14p. Toulouse– France,septembre 2004Orcad – Pspice l'adaptation DC DC des systèmes photovoltaïques par des convertisseurs detype Boost fonctionnant à haute fréquence’’, rapport LAAS/CNRS N° 05267, 19p. Toulouse-France, juin 2005.
- [27]. J. Auvray, les systèmes électroniques ‘‘les alimentation à découpages’’
http://perso.wanadoo.fr/avj.cours/Cours/SE_016_Alimentations_decoupage.pdf 07/06/2016/23:00
- [28]. Girard Michel, Angelis Hugues, Girard Magali Alimentations à découpage IUT BTS Ecols d'ingénieurs. Cours et exercices corrigés, 2ème édition, DUNOD, SCIENCES SUP, Nov 2003.
- [29]. Henri FOCH, Raphaël ARCHES, Yvon CHÉRON, Bernard ESCAUT, Pierre MARTY et Michel METZ. Conversion continu - continu, Hacheurs, Techniques de l'Ingénieur, traité Génie électrique D 3160.
- [30]. F.Slama‘‘ Modélisation d'un système multi générateurs photovoltaïques interconnectés au réseau électrique ’’ Mémoire de Magister UNIVERSITE FERHAT ABBAS - SETIF-01/04/2011.
- [31]. Alain Bilbao learreta’’ Réalisation de commandes MPPT Numériques ’’ Rapport de stage Projet Fin d'Etudes Universtat Rovira Virgili 2006.
- [32]. S.Lhlah‘‘ Etude comparative des techniques MPPT Perturbation and Observation (P&O), Incrémental Conductance (Inc.CoN) et Hill climbing (H.C)’’ Mémoire Magister université El hadj Lakhdar Batna 2007.

- [33]. 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.
- [34]. V.Boitier , P. Maussion , C. CABAL 'Recherche du maximum de puissance sur les générateurs photovoltaïques', université de Toulouse, revue 3E.I, N°54, pp 90-96, septembre 2008.
- [35] 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, n°.1, Jan. 1995, pp. 59-64.

ملخص :

في هذا العمل قمنا بتحليل التصميم و محاكاة الاشتغال الكهربائي للنظام الكهروضوئي وفق الالية الرقمية " الاضطراب والملاحظة " لضمان متابعة الاستطاعة العظمى المفرغة عن طريق المولد الكهروضوئي في هذا التحليل قمنا بأخذ النظام الكهروضوئي او المولد الكهروضوئي ذو ال ن صف 2500 المنتج في الشروط النظامية ل لتجربة , استطاعة اعلاه 2500 واط, و تيار ذرقيته 42 امبير بجهد 120 فولت .نتائج المحاكاة المتحصل عليها تمت بواسطة Matlab/Simulink الذي دل علي المراقبة في السير الديناميكي ل لنظام الكهروضوئي.

الكلمات المفتاحية : نظام الكهروضوئي, المحول الرفع , آلية التحكم MPPT لتصميم, المحاكاة .

Résumé :

Dans ce travail, on a analysé la modélisation et la simulation du fonctionnement électrique d'un système photovoltaïque (PV) adapté par une commande MPPT « perturbation et observation, incrémentation de la conductance » assurant la poursuite de la puissance maximale fournie par le générateur PV. Dans notre analyse, on a conçu un système PV où le générateur PV est le module Kit 2500 produisant, dans les conditions standards de test (CST), une puissance crête de 2500W, un courant optimal de 42 A et une tension optimale de 120V. Les résultats de simulation obtenus sous Matlab/Simulink montrent la performance du contrôle dans le comportement dynamique des systèmes photovoltaïques.

Mots clés: Système PV – Convertisseur survolteur - Commande MPPT –Modélisation –Simulation.

Abstract

In this work, we analyze the modelisation and the simulation of the electric operation of a photovoltaic (PV) system adapted by an numerical control « perturbation and observation » ensuring the tracking of the maximum power provided by the PV generator. In our analysis, we conceived a PV system where the PV generator is the panel 2500, this panel gives under the test standard conditions (CST), a power peak of 2500W, an optimal current of 3.5A and an optimal voltage of 17.1V. The simulation results under Matlab/Simulink show the control performance and dynamic behaviour of photovoltaic system.

Keywords:

PV system, Boost converter, MPPT command, Modelisation, Simulation