

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA

FACULTE DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT Gene électrique
N° : Auto & Sys 18



FILIERE : AUTOMATIQUE
OPTION : AUTOMATIQUE ET
SYSTEMES

**Mémoire présenté pour l'obtention
Du diplôme de Master Académique**

Par: Ben Khaled Abdallah & Ayad Mustapha Fawzi

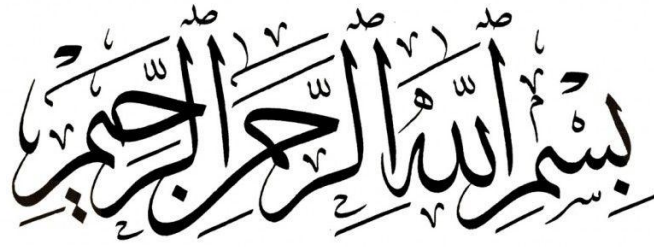
Intitulé

**Commande robuste du système PV par les
algorithmes MPPT**

Soutenu devant le jury composé de:

Dr. KHETTAB Khatir	Université M'sila	Rapporteur
Dr. IDIR Abdelhakim	Université M'sila	Co- Rapporteur
.....	Université M'sila	Président
.....	Université M'sila	Examineur

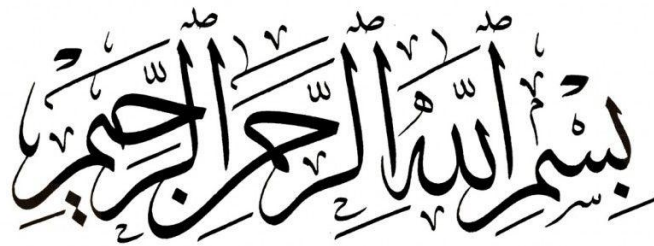
Année universitaire : 2020/2021



Dédicaces

Je dédie ce travail :

- ✚ A mon cher père et ma chère mère.*
- ✚ A ma chère mariée.*
- ✚ A mon fils bien-aimé Mohamed.*
- ✚ A mes chers frères et sœurs.*
- ✚ A toute ma famille.*
- ✚ A tous ceux qui ont sacrifié leur temps pour la science et à tous ceux qui utilisent la science pour le bien et la prospérité de l'humanité.*



Dédicaces

Je dédie ce travail :

- + A mon cher père et ma chère mère.*
- + A mes chers frères et sœurs.*
- + A toute ma famille.*
- + A tous ceux qui ont sacrifié leur temps pour la science et à tous ceux qui utilisent la science pour le bien et la prospérité de l'humanité.*

Ayad Mustapha Fawzi

Remerciements

Tout d'abord, nous remercions Allah, et tous ceux qui nous ont donnés la force et la patience pour accomplir cette tâche modeste

A la fin de ce travail, nous remercions sincèrement monsieur Dr. Khettab Khatir pour ses remarques, ses conseils considérables et ces critiques constructives.

Nous remercions de tous nos cœurs Dr. Idir Abdelhakim pour sa disponibilité et pour son soutien.

Un grand merci à Dr. Boudia Assam pour sa disponibilité, sa serviabilité et son aide précieuse. Travailler avec lui est un grand plaisir.

Nous remercions tous les enseignants qui nous ont encadré durant notre cursus universitaire et tous ceux qui, d'une manière ou d'une autre, nous ont toujours soutenus par leurs respects et leurs gentillesse.

Table des Matières

Liste des figures.....	I
Liste des tableaux.....	III
Symboles et notations	IV
Introduction générale	1

Chapitre I : généralité sur les systèmes photovoltaïques

I.1 Introduction	4
I.2 Historique de l'énergie photovoltaïque (PV)	4
I.3 Généralités sur les systèmes solaires.....	5
I.3.1 Spectre solaire	5
I.3.2 Rayonnement solaire	6
I.4 Le principe de conversion photovoltaïque	6
I.5 L'énergie solaire.....	7
I.6 Cellule photovoltaïque	8
I.6.1 Historique	8
I.6.2 Structure physique.....	8
I.6.3 Types des cellules PV.....	8
I.6.3.1 Cellules mono-cristallines :.....	9
I.6.3.2 Cellules poly-cristallines :.....	9
I.6.3.3 Cellules amorphes :	9
I.7 Système photovoltaïque	9
I.8 Constitution d'un générateur photovoltaïque	9
I.8.1 Le module (Ou panneau).....	9
I.8.2 Le générateur photovoltaïque.....	10
I.8.3 La cellule photovoltaïque	10
I.9 Influence des différents paramètres sur la caractéristique du PV	10
I.9.1	
Intitulé	1
I.9.2 Influence du rayonnement sur les modules.....	10
I.10 Avantages et inconvénients de l'énergie solaire.....	11
Intitulé	1

Chapitre II : Modélisation d'un module PV

II.1 Introduction.....	15
II.2 Modélisation mathématique d'un générateur photovoltaïque.....	15
II.2.1 Module à une seule diode	16
II.3 Convertisseur Continu-Continu (DC/DC) (Hacheurs).....	17
II.3.1 Introduction.....	17
II.3.2 définition	17
II.3.3 Principe de fonctionnement	17
II.3.4 Représentation du convertisseur DC/DC	18
II.3.5 Type des convertisseur DC/DC.....	18
II.3.5.1 Hacheur dévolteur (Buck).....	18
II.3.5.2 Hacheur dévolteur-survolteur (buck-boost)	19
II.3.5.3 Hacheur survolteur (Boost).....	20
II.4 Modélisation du convertisseur statique DC/DC.....	21
II.4.1 Structure du hacheur élévateur.....	21

II.4.1.1	Cellule de commutation	21
II.4.1.2	Caractéristique statique des interrupteurs et commutation	22
II.4.1.3	Relations fondamentales	23
II.4.2	Loi de convertisseur boost	24
II.4.3	Dimensionnement du filtre LC	25
II.4.3.1	Résistance (R):	25
II.4.3.2	L'inductance (L) :	25
II.4.3.3	Capacité (C) :	26
II.5	Principe du MLI (PWM).....	26
II.6	Techniques de commande MPPT	27
II.6.1	Introduction :	27
II.6.2	Principe de la Recherche du PPM.....	28
II.6.3	Techniques de commande MPPT	29
II.6.3.1	Méthodes indirectes	29
II.6.3.2	Méthodes directes	29
II.7	Méthode de perturbation et observation (P&O).....	30
II.7.1	Avantages et inconvénients de P&O.....	34
II.8	Conclusion.	34

Chapitre III : Simulation et résultats

III.1.1	Introduction.....	36
III.1.2	Principes généraux de la commande par mode glissant	36
III.1.2.1	Principe	36
III.1.2.2	Théorème	37
III.1.2.3	Objectif de la commande par mode glissant.....	37
III.1.2.4	Choix des surfaces de glissement.	38
III.1.2.5	Condition de convergence et d'existence du mode glissant.	38
III.1.2.5.1	Approche directe.....	38
III.1.2.5.2	Approche de Lyapunov.....	38
III.1.3	Synthèse des lois de commande.	39
III.1.4	Contrôle avec mode glissant d'un système photovoltaïque.....	40
III.1.4.1	Mode glissant avec surface imposé	41
III.1.4.2	Mode glissant avec surface Slotine.....	41
III.2	Simulation dans Matlab.....	41
III.2.1	Simulation et paramètres du système photovoltaïque	41
III.2.2	Simulation et paramètres de convertisseur boost.....	42
III.2.4	Simulation et paramètres de commande P&O.....	43
III.2.6	Les paramètres des méthodes MPPT	43
III.2.7	L'effet de convertisseur boost sur tension et puissance.....	44
III.2.8	L'effet de MPPT sur la puissance.....	45
III.2.9	Fonctionnement de MPPT sous des conditions constantes.....	45
III.2.10	Fonctionnement de MPPT sous des conditions variables.....	46
III.3	Conclusion	47
	Conclusion générale	54
	Résumé	55
	Références bibliographiques	54

Liste des figures

Chapitre I : généralité sur les systèmes photovoltaïques

Figure I. 1 Analyse spectrale du rayonnement solaire.....	5
Figure I. 2 Rayonnement solaire globale sur un collecteur photovoltaïque	6
Figure I. 3 Description d'une photopile ou cellule photovoltaïque.....	7
Figure I. 4 structured'un système PV autonome	9
Figure I. 5 Effet de la température sur la caractéristique I-V	11
Figure I. 6 Effet de la température sur la caractéristique P-V.	11
Figure I. 7 Effet de l'éclairement sur la caractéristique I-V	12
Figure I. 8 Effet de l'éclairement sur la caractéristique P-V, I-V.	12

Chapitre II : Modélisation d'un module PV

Figure II. 1 Schéma bloc du générateur photovoltaïque.	15
Figure II. 2 Schéma électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque.	16
Figure II. 3 Convertisseur DC/DC	18
Figure II. 4 Schéma du hacheur Buck.	18
Figure II. 5 Caractéristique du tension-courant.....	19
Figure II. 6 Variation de V de charge avec I de charge pour le convertisseur Buck.....	19
Figure II. 7 Schéma électrique du convertisseur dévolteur-survolteur.	20
Figure II. 8 Schéma du hacheur survolteur.	20
Figure II. 9 Structure du hacheur élévateur.....	21
Figure II. 10 Grandeurs électriques caractéristiques du boost.	21
Figure II. 11 Caractéristiques statiques.	22
Figure II. 12 Grandeurs caractéristiques (Tensions et courant).	23
Figure II. 13 Schéma topologique équivalent en utilisant un commutateur idéal du convertisseur survolteur.	24
Figure II. 14 Principe de la commande MLI.	26
Figure II. 15 Etage d'adaptation jouant le rôle d'interface de puissance entre un GPV et une charge pour le transfert de P _{MAX} du GPV.	27
Figure II. 16 Fluctuation du PPM avec l'intensité d'éclairement (A) et la charge R (B).	28
Figure II. 17 Fluctuation du PPM avec l'intensité de la température (C).	28
Figure II. 18 Recherche du PPM par la méthode (P&O)	30
Figure II. 19 Comportement de l'algorithme P&O sous un changement de l'éclairement.....	31
Figure II. 20 Organigramme de la méthode P&O.	32

Figure II. 21 Divergence de la commande P&O lors de variations d'irradiation.	33
---	----

Chapitre3 : Simulation et résultats

Figure III. 1 Principe de la commande par mode glissant.....	37
Figure III. 2 Représentation de la fonction signe.	40
Figure III. 3 Structure globale du système photovoltaïque.	40
Figure III. 4 Simulation de PV dans Matlab.	42
Figure III. 5 Simulation de convertisseur boost.	43
Figure III. 6 Simulation P&O.....	43
Figure III. 7 L'effet du convertisseur sur la puissance.....	44
Figure III. 8 l'effet du convertisseur sur la tension.	44
Figure III. 9 l'effet des commandes MPPT sur la puissance.	45
Figure III. 10 Allures des puissances sous conditions stables ($G=1000W/m^2$, $T=25C^\circ$).....	45
Figure III. 11 allures des tensions sous conditions stables ($G=1000W/m^2$, $T=25C^\circ$).....	46
Figure III. 12 allures des puissances sous conditions variable (temps de réponse).	46
Figure III. 13 allures des puissances sous conditions variable (le dépassement).....	47

Notations ET Symboles

Notations

IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor
MCC	Mode de Conduction continue
MLI	Modulation de Largeur d'Impulsion
MPPT	Maximum Power Point Tracking
PV	Photovoltaïque
P&O	Perturbation et observation
OEP	Optimisation par essaim particulier
MPP	Pointe de puissance maximale

Symboles

I_{cell}	Le Courant fourni par la cellule photovoltaïque
I_{ph}	Courant photonique, du modèle d'une cellule photovoltaïque
I_{pv}	Courant du système photovoltaïque
I_{sat}	Le courant de saturation
I_{rr}	Le courant de saturation de la diode
I_{sc}	Le courant de court-circuit
V_{oc}	La tension de circuit-ouvert
V_{cell}	La tension aux bornes de la cellule
G	Ensoleillement
q	Charge de l'électron
α	Coefficient de température de I_{ph} .
K	Constant de Boltzmann
E_g	L'énergie du band gap
n	Facteur d'idéalité de la jonction
N_s	Nombre de cellules connectées en série
N_p	Nombre de cellules connectées en parallèle
L_{Gpv}	Inductance du convertisseur du système photovoltaïque
P_{pv}	Puissance débitée par la source solaire photovoltaïque
C_{dc}	Condensateur de sortie du convertisseur Boost
C_{pv}	Condensateur d'entier du convertisseur Boost
F_s	Fréquence de système PV

Introduction générale

Introduction générale

Ces derniers temps, avec la croissance de la demande d'énergie, nous tournons de plus en plus vers les énergies alternatives, compte tenu également de l'augmentation du prix des énergies fossiles et de leur offre limitée. Le photovoltaïque est une alternative énergétique valable pour une production d'électricité plus propre et potentiellement illimitée, étant donné sa dépendance à l'étoile de notre système solaire, par rapport à l'utilisation de combustibles fossiles ou nucléaires. Les systèmes photovoltaïques sont également soumis, une fois mis en service, à de faibles coûts de maintenance et leur durée de vie est d'environ 25 à 30 ans.

La commande MPPT (Maximum power point tracking) [1] permet de chercher le point de fonctionnement optimal du générateur photovoltaïque suite à des variations climatiques et de charge. Son principe est basé sur la variation automatique du rapport cyclique du convertisseur statique (CS) pour maximiser continuellement la puissance du générateur photovoltaïque (GPV). Parmi les méthodes classiques pour la recherche du point de puissance maximale (MPPT), nous pouvons citer l'algorithme d'incrément de l'inductance et la méthode de perturbation et d'observation (P&O). Cette dernière donne de bons résultats, mais elle souffre de quelques inconvénients, le plus important est son manque d'efficacité dans des conditions de faibles irradiances.

Pour résoudre ces problèmes, l'utilisation des techniques de commande non linéaire comme la commande par mode glissant s'avère envisageable. Dans ce cadre, l'objectif principal de ce travail est de résoudre le problème de transfert d'énergie dans la chaîne de conversion photovoltaïque, autrement dit, garantir un fonctionnement optimal du générateur photovoltaïque pour extraire une puissance maximale et la transférer vers la charge. Dans ce Projet de fin d'étude, nous avons implémenté deux commandes qui sont la fameuse commande Perturbation & Observation (P&O) et la commande Mode glissant, ensuite nous avons comparé entre elles en termes de robustesse et de rapidité.

Le contenu de notre mémoire est organisé en trois chapitres principaux

Le 1^{er} chapitre est consacré aux principes de la conversion photovoltaïque. Nous rappelons le contexte et la problématique engendrée par l'optimisation de la production d'un GPV ainsi que ses principales caractéristiques, essentiellement les fluctuations de la puissance électrique en fonction de l'éclairement et la température ainsi que les notions de rendement dans une chaîne photovoltaïque.

Le 2^{ème} chapitre sera consacré à la modélisation du hacheur et du panneau photovoltaïque ainsi que leur principe de fonctionnement et nous montrerons ensuite l'influence de la température et l'éclairement sur le rendement du générateur photovoltaïque et en introduire le MPPT et la commande P&O et ces définition et expliqué son principe.

Dans le chapitre 3, on introduira la commande mode glissant avec deux méthodes, méthode mode glissant avec surface imposée et surface *Slotine*. En suite, on présentera l'application de l'approche P&O et de l'approche par mode glissant pour le système PV. Enfin, on présente les performances des approches présentées à travers les résultats de simulation obtenus, sous l'environnement Matlab. Finalement, le bilan des travaux réalisés, dans le cadre de ce mémoire, et les perspectives envisagées sont donnés en conclusion.

Chapitre I :

Généralité sur les systèmes photovoltaïques

Chapitre I

Généralités sur les systèmes photovoltaïques

I.1 Introduction

L'énergie solaire photovoltaïque provient de la transformation directe d'une partie de la lumière en électricité. Cette conversion s'effectue par le biais d'une cellule dite photovoltaïque (PV) basé sur un phénomène physique appelé effet photovoltaïque qui consiste à produire une force électromotrice lorsque la cellule est exposée à la lumière. La tension générée peut varier en fonction du matériau utilisé pour la fabrication de la cellule.

L'association de plusieurs cellules en série /parallèle donne lieu à un générateur photovoltaïque (GPV) qui a une caractéristique courant-tension (I-V) non linéaire présentant un point de puissance maximale. De nos jours et selon le besoin, l'énergie électrique produite est disponible sous forme d'électricité directe (alimenté une charge) ou stockée en batteries.

Pour bien comprendre ce phénomène, nous avons rappelé dans ce chapitre quelques notions de base sur l'effet photovoltaïque, Le principe de la cellule photovoltaïque et leurs différentes modèles et les convertisseurs DC /DC et la charge.

I.2 Historique de l'énergie photovoltaïque (PV)

Les dates le plus importantes dans l'histoire du photovoltaïque :[2]

1839 : Le physicien français Edmond Becquel découvre le processus de l'utilisation de l'ensoleillement pour produire du courant électrique dans un matériau solide. C'est l'effet photovoltaïque.

1875 : Werner Von Siemens expose devant l'Académie des Sciences de Berlin un article sur l'effet photovoltaïque dans les semi- conducteur. Mais jusqu'à la Seconde Guerre Mondial, le phénomène reste une curiosité de laboratoire.

1954 : Trois chercheurs américains, Chapain, Pearson et Prince, mettent au point une cellule solaire à haut rendement au moment où l'industrie spatiale naissante cherche des solutions nouvelles pour alimenter ses satellites.

1958: Une cellule avec un rendement de 9 % est mise au point. Les premiers satellites alimentés par des cellules solaires sont envoyés dans l'espace.

1973: La première maison alimentée par des cellules photovoltaïques est construite à l'Université de Delaware.

A partir **1980** des maisons PV ont été construite.

1983: La première voiture alimentée par énergie photovoltaïque parcourt une distance de 4000 km

en Australie.

A partir de 1995, des programmes des toits photovoltaïques ont été lancés au Japon et en Allemagne.

La première cellule photovoltaïque (ou photopile) a été développée aux États-Unis en 1954 par les chercheurs des laboratoires Bell, qui ont découvert que la photosensibilité du silicium pouvait être augmentée en ajoutant des "impuretés".

I.3 Généralités sur les systèmes solaires

L'énergie solaire est la ressource énergétique la plus abondante sur terre. Elle est à l'origine de la majorité des énergies renouvelables, mais elle est très atténuée. Le rayonnement solaire peut être utilisé pour produire soit directement de l'électricité à l'aide de semi-conducteur photovoltaïque, soit de la chaleur solaire thermique pour le chauffage ou la production électrique [3].

L'énergie solaire se présente bien comme une alternative aux autres sources d'énergie, elle représente un potentiel considérable. En effet, la terre reçoit plus de 3000 h de lumière solaire par année avec un haut niveau d'éclairement. Avec une optimisation des angles de réception, la moyenne annuelle journalière est de 5 à 7 kWh /m²/jour.

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

I.3.1 Spectre solaire

Le spectre solaire et la distribution spectrale en fonction de la longueur d'onde (λ) ou de la fréquence (n). Le Soleil émet un rayonnement électromagnétique compris dans une bande de longueur d'onde qui varie entre de 0,22 à 10 μm .

La (figure I.1) représente la variation de la répartition spectrale énergétique. L'énergie associée à ce rayonnement solaire se décompose approximativement ainsi :

- 6,4% dans la bande des ultraviolets ($0,20 < \mu < 0,38 \mu\text{m}$).
- 48% dans la bande visible ($0,38 < \mu < 0,78 \mu\text{m}$).
- 45,6% dans la bande des infrarouges ($0,78 < \mu < 10 \mu\text{m}$).

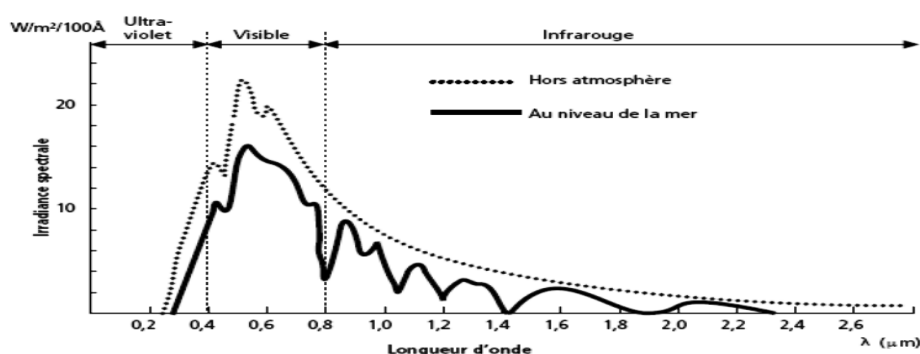


Figure I. 1Analyse spectrale du rayonnement solaire.

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 ($>0,8\mu\text{m}$).

L'atmosphère terrestre reçoit ce rayonnement à une puissance moyenne de 1,37 Kilowatt au mètre carré (kW/m^2), a plus au moins 3 %, selon que la terre s'éloigne ou se rapproche du soleil dans sa rotation autour de celui-ci. L'atmosphère absorbe toutefois une partie, de sorte que la quantité d'énergie atteignant la surface terrestre dépasse rarement $1200 \text{ W}/\text{m}^2$. La rotation et l'inclinaison de la terre font également que l'énergie disponible en un point donné varie selon la latitude, l'heure et la saison. Enfin, les nuages, le brouillard, les Particules atmosphériques et divers autres phénomènes météorologiques causent les variations horaires et quotidiennes qui tantôt augmentent, tantôt diminuent le rayonnement solaire et le rendent

I.3.2 Rayonnement solaire

Le soleil émet un rayonnement électromagnétique compris dans une bande de longueur d'onde variant de $0,22\mu\text{m}$ à $10\mu\text{m}$. La Figure I.2 représente la variation de la répartition spectrale énergétique.

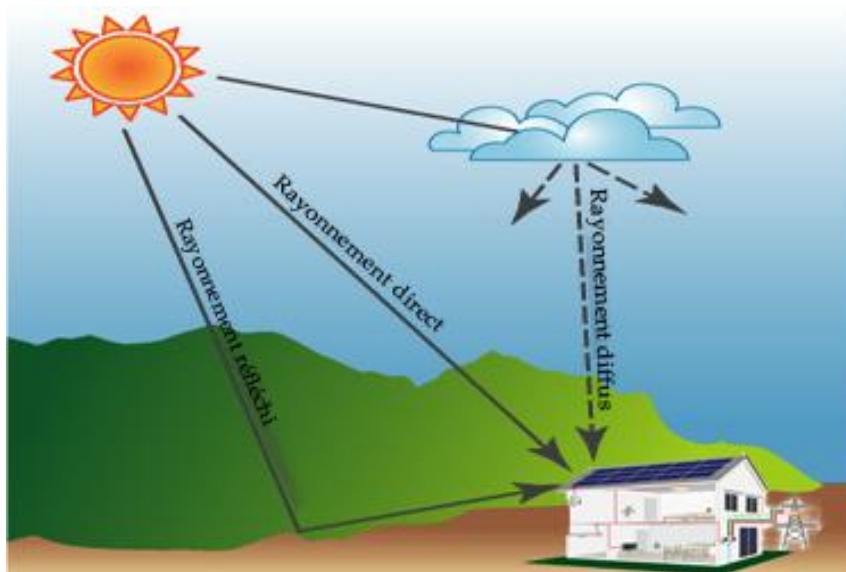


Figure I. 2 Rayonnement solaire globale sur un collecteur photovoltaïque

I.4 Le principe de conversion photovoltaïque

L'effet photovoltaïque utilisé dans les cellules solaires permet de convertir directement l'énergie lumineuse des rayons solaires en électricité par le biais de la production et du transport dans un matériau semi-conducteur de charges électriques positives et négatives sous l'effet de la lumière. Ce matériau comporte deux parties, l'une présentant un excès d'électrons et l'autre un déficit en électrons, dites respectivement dopée de type n et dopée de type p. Lorsque la première est mise en contact avec la

seconde, les électrons en excès dans le matériau n diffusent dans le matériau p. La zone initialement dopée n devient chargée positivement, et la zone initialement dopée p chargée négativement. Il se crée donc entre elles un champ électrique qui tend à repousser les électrons dans la zone n et les trous vers la zone p.

Une jonction (dite p-n) est formée[4] En ajoutant des contacts métalliques sur les zones n et p, une diode est obtenue. Lorsque la jonction est éclairée, les photons d'énergie égale ou supérieure à la largeur de la bande interdite communiquent leur énergie aux atomes, chacun fait passer un électron de la bande de valence dans la bande de conduction et laisse aussi un trou capable de se mouvoir, engendrant ainsi un pair électron - trou. Si une charge est placée aux bornes de la cellule, les électrons de la zone n rejoignent les trous de la zone p via la connexion extérieure, donnant naissance à une différence de potentiel le courant électrique circule[5].

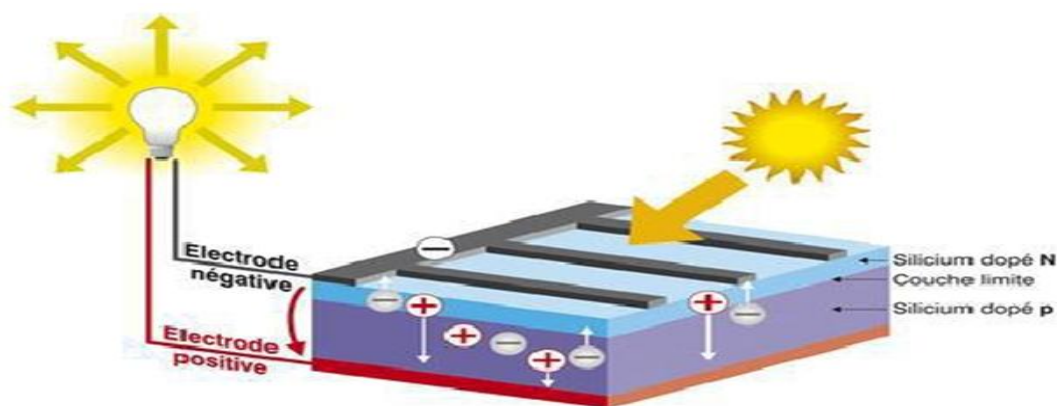


Figure I. 3 Description d'une photopile ou cellule photovoltaïque.

I.5 L'énergie solaire.

La constante solaire est la densité d'énergie solaire qui atteint la frontière externe de l'atmosphère faisant face au soleil. La valeur de l'éclairement est communément prise égale à l'absorption dans l'atmosphère. Albert Einstein a 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 :

$$E = \frac{h \cdot c}{\lambda}$$

h : la constante de Planck [j. s⁻¹].

C : la vitesse de la lumière [m. s⁻¹].

λ : la longueur d'onde [m].

Ainsi, plus la longueur d'onde est courte, plus l'énergie du photon est grande [3]. Une façon Commode d'exprimer cette énergie est :

$$E = \frac{1.26}{\lambda}$$

Le soleil émet un rayonnement électromagnétique compris dans une bande de longueur d'onde variant de 0,22 à 10 microns (μm).

I.6 Cellule photovoltaïque

I.6.1 Historique

Le physicien français Edmond Becquerel décrit le premier effet photovoltaïque en 1839 et Einstein en explique les mécanismes en 1912, mais cela resta une curiosité scientifique de laboratoire jusqu'aux années 50. Becquerel découvrit que certains matériaux délivrent une petite quantité d'électricité quand on les expose à la lumière.

L'effet fut étudié dans les solides tels que le sélénium par Heinrich Hertz dès les années 1870. Avec des rendements de l'ordre de 1%, le sélénium fut rapidement adopté par les photographes comme luxmètre[2].

Des progrès rapides furent obtenus dès les années 1950 par les équipes de *Bell Laboratoires* qui fabriquèrent la première cellule au silicium cristallin de rendement 4% à partir du procédé de tirage Czochralski. L'industrie des semi-conducteurs contribua largement au développement des cellules solaires. La taille des cellules PV accompagna la progression de la dimension des wafers de l'industrie des circuits intégrés, de 5,08 cm dans le début des années 70, à 7,62 cm à la fin des années 70, et à 10,16 cm au début des années 80, avant de s'émanciper par la découverte de la croissance de lingots multicristallins parallélépipédiques qui donnèrent des plaquettes carrées de 10 cm de côté et qui atteignent aujourd'hui couramment 12.5 à 15 cm de côté[5].

I.6.2 Structure physique

La cellule est composée d'un matériau semi-conducteur qui absorbe l'énergie lumineuse et la transforme directement en courant électrique. Un semi-conducteur est un matériau dont la concentration en charges libres est très faible par rapport aux métaux. Pour qu'un électron lié à son atome (bande de valence) devienne libre dans un semi-conducteur et participe à la conduction du courant, il faut lui fournir une énergie minimum pour qu'il puisse atteindre les niveaux énergétiques supérieurs (bande de conduction).

La cellule la plus commune d'aujourd'hui est une cellule simple au silicium de jonction PN avec un rendement qui arrive jusqu'à environ 17% [6]. Ce matériau semi-conducteur comporte deux parties, l'une présentant un excès d'électrons et l'autre un déficit en électrons, dites respectivement dopée de type n et dopée de type p (Figure I.3). Les contacts de la face éclairée de la cellule ont la structure d'une grille afin de n'occulter qu'une faible partie de la surface (5 à 10%). La face arrière peut être entièrement métallisée.

I.6.3 Types des cellules PV

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

I.6.3.1 Cellules mono-cristallines :

Ce sont celles qui ont le meilleur rendement (12-16%), mais aussi celles qui ont le coût le plus élevé, du fait d'une fabrication compliquée.

I.6.3.2 Cellules poly-cristallines :

Leur conception étant plus facile, leur coût de fabrication est moins important, cependant leur rendement est plus faible : (11% -13%).

I.6.3.3 Cellules amorphes :

Elles ont un faible rendement (8% - 10%), mais ne nécessitent que de très faibles épaisseurs de silicium et ont un coût peu élevé. Elles sont utilisées couramment dans les produits de petite consommation telles que les calculatrices solaires ou encore les montres.

I.7 Système photovoltaïque

Un système photovoltaïque est un système d'alimentation électrique, constitué principalement d'un générateur photovoltaïque composé d'un seul ou plusieurs panneaux solaires, d'un ensemble de batteries pour le stockage d'énergie électrique, d'un ou de plusieurs convertisseurs pour fournir les tensions d'alimentation adéquates.

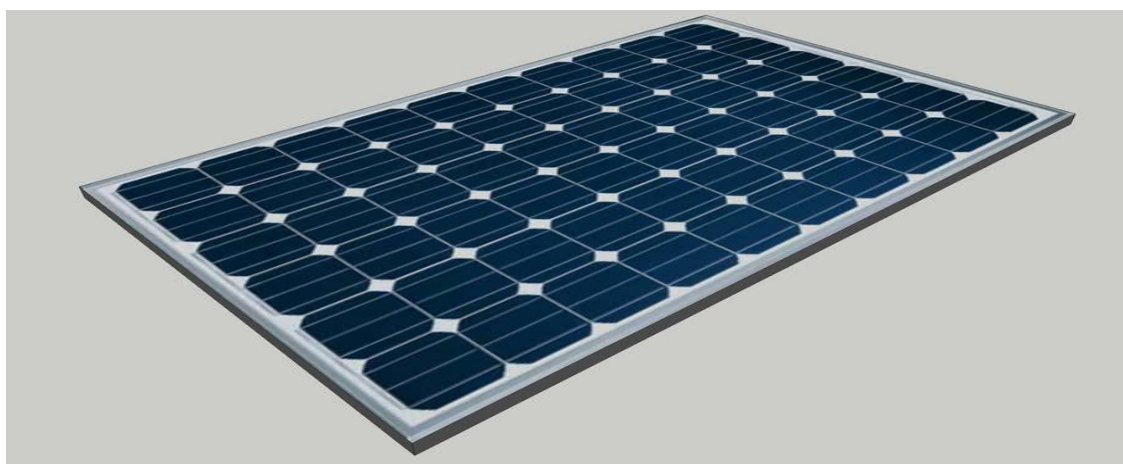


Figure I. 4 Structure d'un système PV autonome

I.8 Constitution d'un générateur photovoltaïque

Le générateur photovoltaïque est composé particulièrement par :

I.8.1 Le module (Ou panneau)

La cellule individuelle, unité de base d'un système photovoltaïque, ne produit qu'une très faible puissance électrique, typiquement de 1 à 3 W avec une tension de moins d'un volt. Pour produire plus de puissance, les cellules sont assemblées pour former un module (ou panneau). Les connections en série de plusieurs cellules augmentent la tension pour un même courant,

tandis que la mise en parallèle accroît le courant en conservant la tension. La puissance crête, obtenue sous un éclairage maximal sera proportionnelle à la surface du module. La rigidité de la face avant (vitre) et l'étanchéité sous vide offert par la face arrière soudée sous vide confèrent à l'ensemble de sa durabilité.

I.8.2 Le générateur photovoltaïque

L'interconnexion des modules entre eux, parmi bénéficier une puissance mieux grande, définit la allégorie de génital photovoltaïque. Le générateur photovoltaïque se compose de divers modules et d'un sextuor de composants qui adapte l'électricité produite par les modules aux spécifications des récepteurs.

I.8.3 La cellule photovoltaïque

Si des conducteurs électriques sont alors attachés au côté positif et négatif, formant un circuit électrique, les électrons sont capturés sous la forme de courant électrique I_{ph} [7]

I.9 Influence des différents paramètres sur la caractéristique du PV

Afin d'étudier l'impact des systèmes photovoltaïques, Nous avons choisi le modèle photovoltaïque avec les caractéristiques au tableau I.1, Le module est composé de 72 cellules solaires multi-cristallines en silicone connectées en série pour produire une puissance maximale de 200 W [8].

Les caractéristiques électriques de ce module photovoltaïque sont données dans le tableau I.1 ci-dessous :

Tableau I. 1 Caractéristiques électriques du module photovoltaïque.

Paramètre	Valeur
Puissance maximal (P_{max})	200w
Tension à P_{max} (V_{mp})	50V
Courant à P_{max} (I_{mp})	4A
Tension à circuit ouvert (V_{oc})	58.5V
Courant de court-circuit (I_{sc})	4.42v

I.9.1 Influence de la température sur les modules

Afin d'étudier l'effet de la température sur le système photovoltaïque, La figure I.5 ci-dessous montre les caractéristiques tension- courant tension-puissance pour différentes températures de fonctionnement du module PV.

On remarque que la température à une influence négligeable sur la valeur du courant de court-circuit. Par contre, la tension en circuit ouvert baisse assez fortement lorsque la température augmente, par conséquent la puissance extractible diminue.

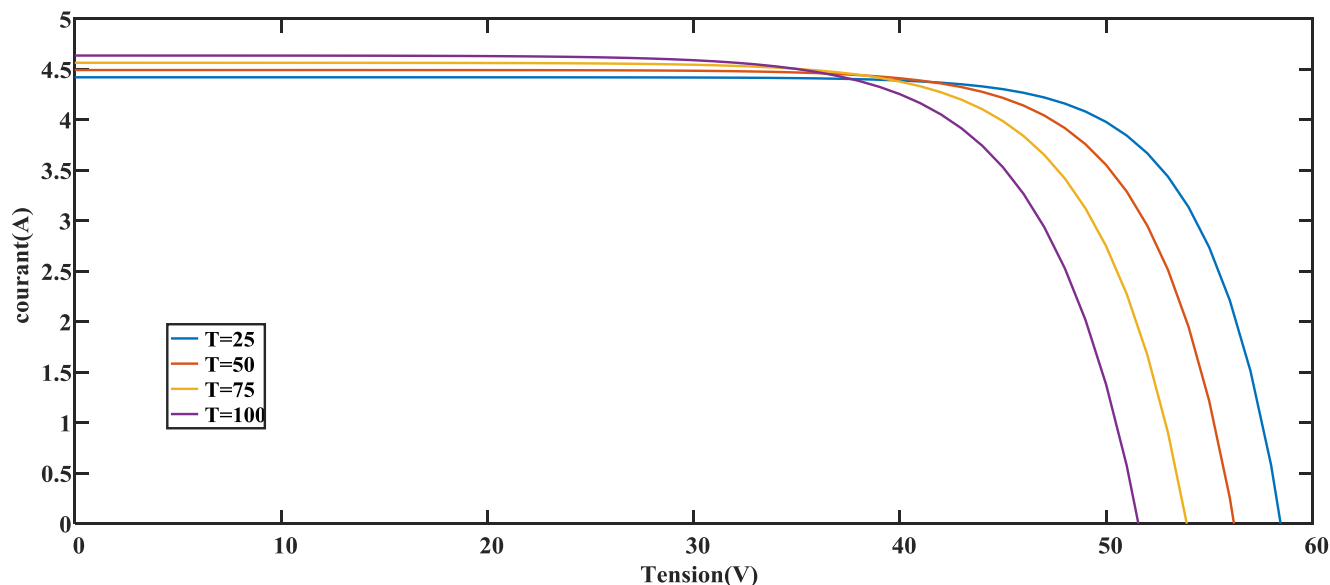


Figure I. 5 Effet de la température sur la caractéristique I-V

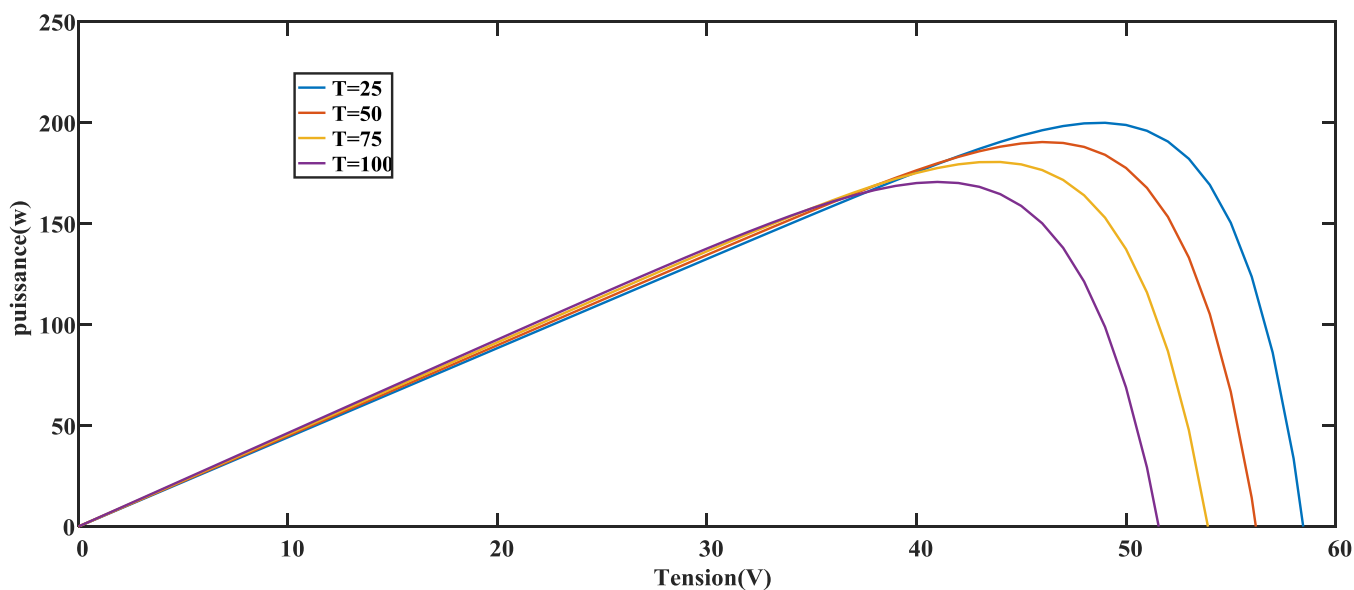


Figure I. 6 Effet de la température sur la caractéristique P-V.

On peut remarquer sur la figure I.6 que l'augmentation de la température se traduit aussi par une diminution de la puissance maximale disponible.

1.9.2 Influence du rayonnement sur les modules

Les figures I.7 et I.8 présentent l'effet de rayonnement pour les trois sorties de module photovoltaïque puissance courant-tension, on remarque que la valeur du courant de court-circuit et la puissance est directement proportionnelle à l'intensité du rayonnement. Par contre, la tension en circuit ouvert ne varie pas dans les mêmes proportions.

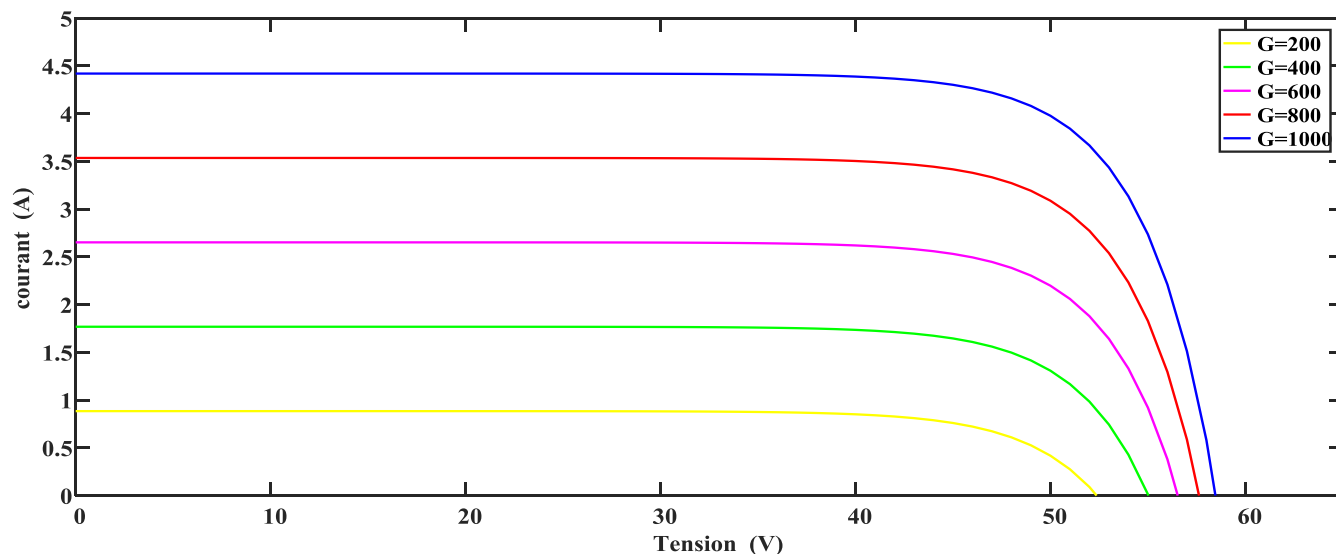


Figure I. 7 Effet de l'éclairement sur la caractéristique I-V

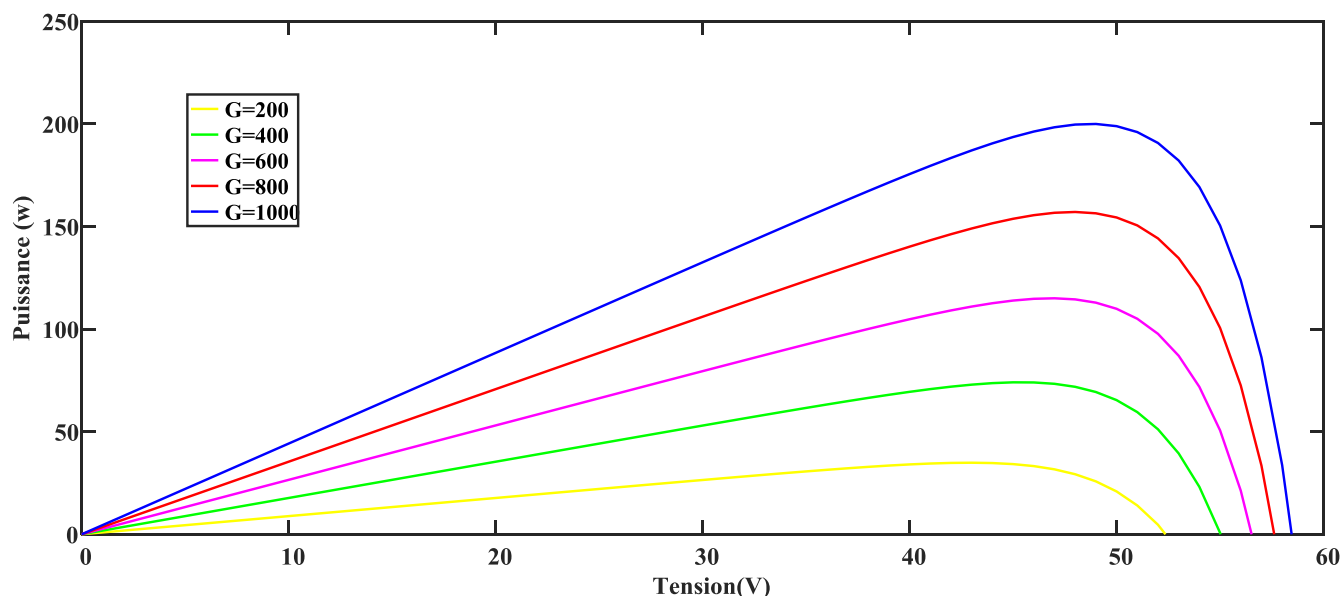


Figure I. 8 Effet de l'éclairement sur la caractéristique P-V, I-V.

On peut remarquer sur la figure I.8 que l'augmentation de l'éclairement se traduit aussi par une augmentation presque linéaire de la puissance maximale disponible.

I.10 Les avantages et inconvénients de l'énergie solaire

I.10.1 Les avantages:

La technologie photovoltaïque présente un grand nombre d'avantages.[2]

➤ D'abord, une haute fiabilité (elle ne comporte pas de pièces mobiles), qui la rend particulièrement appropriée aux régions isolées. C'est la raison de son utilisation sur les engins spatiaux.

➤ Ensuite, le caractère modulaire des panneaux photovoltaïques permet un montage simple et adaptable à des besoins énergétiques divers. Les systèmes peuvent être dimensionnés pour des applications de puissances allant du milliwatt au Mégawatt.

- Leurs coûts de fonctionnement sont très faibles vu les entretiens réduits et ils nécessitent ni combustible, ni transport, ni personnel hautement spécialisé.
- Enfin, la technologie photovoltaïque présente des qualités sur le plan écologique car le produit fini est non polluant, silencieux et n'entraîne aucune perturbation du milieu, si ce n'est par l'occupation de l'espace pour les installations de grandes dimensions.

I.10.2 Les Inconvénients

Le système photovoltaïque présente toutefois des inconvénients.[9]

- La fabrication du module photovoltaïque relève de la haute technologie et requiert des investissements d'un coût élevé.
- Le rendement réel de conversion d'un module est faible (la limite théorique pour une cellule au silicium cristallin est de 28%).
- Les générateurs photovoltaïques ne sont compétitifs par rapport aux générateurs Diesel que pour des faibles demandes d'énergie en région isolée.

Enfin, lorsque le stockage de l'énergie électrique sous forme chimique (batterie) est nécessaire, le coût du générateur photovoltaïque est accru. La fiabilité et les performances du système restent cependant équivalentes pour autant que la batterie et les composants de régulations associés soient judicieusement choisis.

I.11 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons rappelé quelques notions sur l'énergie photovoltaïque, les types d'énergie photovoltaïque et le potentiel solaire en Algérie. Nous avons ensuite expliqué le mode de fonctionnement d'un système photovoltaïque.

Chapitre II :

Modélisation d'un module PV

Chapitre II

Modélisation d'un module PV

II.1 Introduction

La modélisation mathématique des cellules solaires sont indispensable pour toute opération d'étude du fonctionnement, d'optimisation du rendement ou de diagnostic du générateur photovoltaïque. Le module photovoltaïque est présenté généralement par un circuit équivalent dont les paramètres sont calculés expérimentalement en utilisant la caractéristique courant-tension. Ces paramètres ne sont pas généralement des quantités mesurables ou incluses dans les données de la fabrication. La modélisation de ces dernières s'impose comme une étape cruciale et a conduit à une diversification dans les modèles proposés par les différents chercheurs, leurs différences se situent principalement dans les nombres de diodes la résistance shunt finie ou infinie le facteur d'idéalité constant ou non ainsi que les méthodes numériques utilisées pour détermination des différents paramètres inconnus.

II.2 Modélisation mathématique d'un générateur photovoltaïque

La modélisation d'un générateur photovoltaïque passe nécessairement par un choix judicieux des circuits électriques équivalents.

Pour développer un circuit équivalent précis pour une cellule PV, il est nécessaire de comprendre la configuration physique des éléments de la cellule aussi bien que les caractéristiques électrique de chaque élément. Plusieurs modèles mathématiques sont développés pour présenter un comportement non linéaire. Ces modèles se différencient entre eux par les procédures mathématiques et le nombre de paramètres.

Le schéma électrique équivalent du générateur photovoltaïque est réduit en un simple schéma bloc dans la Figure II.1 à deux entrées (E : l'éclairement et T : la température de la cellule) et deux sorties (I : le courant et V : la tension)[10]



Figure II. 1, Schéma bloc du générateur photovoltaïque.

II.2.1 Module à une seule diode

La figure II.2 montre le schéma équivalent d'une cellule PV réelle.

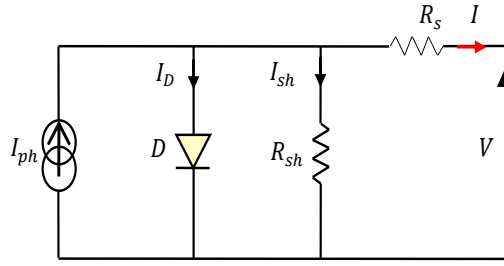


Figure II. 2 Schéma électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque.

La caractéristique I-V d'une cellule solaire dans la pratique généralement diffère dans une certaine mesure de la caractéristique idéale. La cellule solaire (ou circuit) peut également contenir des séries (R_s) et résistances parallèles (ou shunt, R_{sh}), conduisant à une caractéristique de la forme [11].

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

Avec:

I : Le courant délivré par le module.

I_{ph} : Photo courant.

I_d : Courant de diode.

I_{sh} : Le courant shunt.

$$I_d = I_{rs} \left[e^{\frac{V_d}{V_t}} - 1 \right] \quad (\text{II.2})$$

$$V = V_d - R_s I \quad (\text{II.3})$$

$$I_{sh} = \frac{V_d}{R_{sh}} \quad (\text{II.4})$$

Ce qui donne :

$$I = N_p I_{ph} - N_p I_{rs} \left[e^{\frac{q(V+R_s I)}{AKT N_s}} - 1 \right] - N_p \frac{q(V+R_s I)}{N_s R_{sh}} \quad (\text{II.5})$$

Le photo courant générée I_{ph} est lié à l'irradiation solaire par l'équation suivante:

$$I_{ph} = \frac{G}{1000} (I_{rs} + K_i(T - T_r)) \quad (\text{II.6})$$

Avec :

- I_{rs} : est le courant de saturation inverse des cellules.
- V : est la tension de sortie de cellule (V).
- A : est la constante d'idéalité de la diode.
- T : est la température de fonctionnement de la cellule de référence
- q : est la charge d'électrons ($1,60217646 \times 10^{-19}C$).
- K : est la constante de Boltzmann ($1,3806503 \times 10^{-23}J / K$)
- R_s et R_p : sont les résistances série et shunt de la cellule respectivement.
- I_{sc} : Courant de court-circuit de la cellule à la température de référence et à l'irradiation
- G : Irradiation solaire en W / m^2 .
- T_r : Température de référence de la cellule.
- K_i : Coefficient de température du courant de court-circuit.

D'une façon générale, on peut mettre le circuit électrique équivalent d'une cellule solaire en schéma bloc (sous Simulink) comportant tous les paramètres précédents, ce qui permet de tracer les caractéristiques de la cellule.[12]

II.3 Convertisseur Continu-Continu (DC/DC) (Hacheurs)

II.3.1 introduction

Le rôle du convertisseur DC/DC (dans le cadre du PV) est de faire l'adaptation entre la source (GPV) et la charge pour un transfert de puissance maximal. Ceci est fait en maintenant le PF sur ou assez proche du MPP pour n'importe quelles conditions de fonctionnement (rayonnement, température, caractéristique de charge, etc.). Contrairement au cas général où le convertisseur DC/DC est utilisé pour réguler la tension de sortie, ici c'est plutôt la tension d'entrée qui est régulée. La tension de référence (consigne) est alors constante ou imposée par un algorithme de commande. Si les pertes internes PL du convertisseur sont négligeables, alors les puissances d'entrée et de sortie sont égales. Dans ce qui suit, le principe de fonctionnement de quelques types de convertisseurs DC/DC est décrit.[13].

II.3.2 définition

Un hacheur est un convertisseur continu-continu qui permet de générer une source de tension continue variable à partir d'une autre source de tension continue. [14]

II.3.3 Principe de fonctionnement

Le rôle du convertisseur DC/DC (dans le cadre du PV) est de faire l'adaptation entre la source (GPV) et la charge pour un transfert de puissance maximal. Ceci est fait en maintenant le PF sur ou assez proche du MPP pour n'importe quelles conditions de fonctionnement (rayonnement, température,

caractéristique de charge, etc.). Contrairement au cas général où le convertisseur DC/DC est utilisé pour réguler la tension de sortie, ici c'est plutôt la tension d'entrée qui est régulée. La tension de référence (consigne) est alors constante ou imposée par un algorithme de commande.

Si les pertes internes PL du convertisseur sont négligeables, alors les puissances d'entrée et de sortie sont égales. Le commutateur du convertisseur est commandé par un signal PWM (Pulse With Modulation) ou MLI (Modulation Largeur d'Impulsion), avec une fréquence de commutation f_s fixe et un rapport cyclique D variable.

II.3.4 Représentation du convertisseur DC/DC

Un convertisseur DC/DC a pour vocation d'assurer la fluence d'énergie entre une source de tension continue et une source de courant continu. La représentation symbolique la plus couramment utilisée est donnée figure II.3.

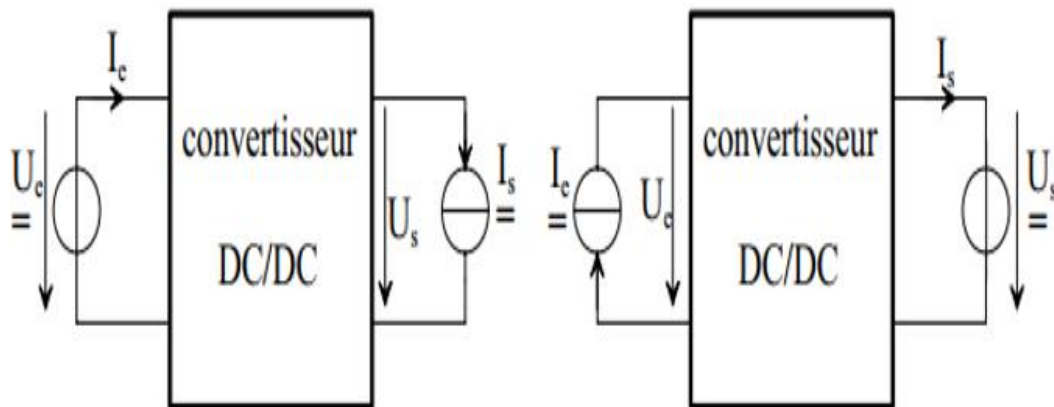


Figure II. 3 Convertisseur DC/DC

II.3.5 Type des convertisseur DC/DC

II.3.5.1 Hacheur dévolteur (Buck)

Il délivre une tension à la sortie plus basse que celle de l'entrée (panneaux).

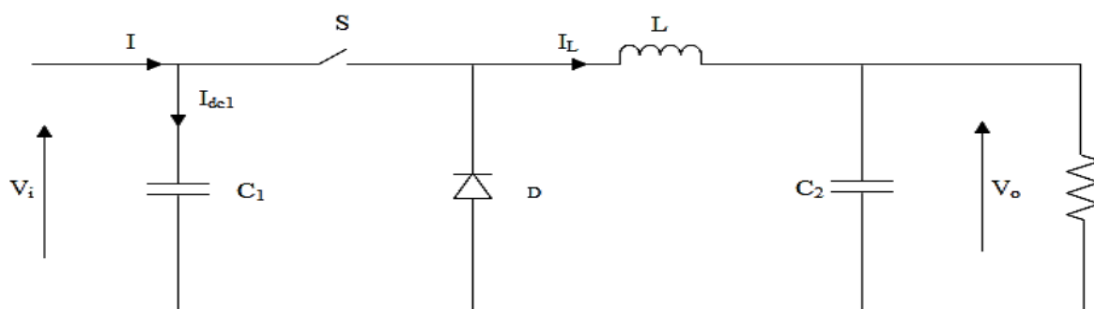


Figure II. 4 Schéma du hacheur Buck.

L'équation caractéristique du courant de l'inductance est[15] :

$$\frac{dI}{dt} = \frac{V_i - V_s}{L} \quad (II.7)$$

Le processus de commutation décrit par la position de l'interrupteur, dans le premier laps de temps (D.T), l'inductance se décharge. Dans le deuxième laps de temps (D-1) T, l'inductance libère avec une diminution de courant I_L . [16].

Les caractéristiques des courants et la tension représentant le fonctionnement du hacheur dévolteur sont données par les figures suivantes :

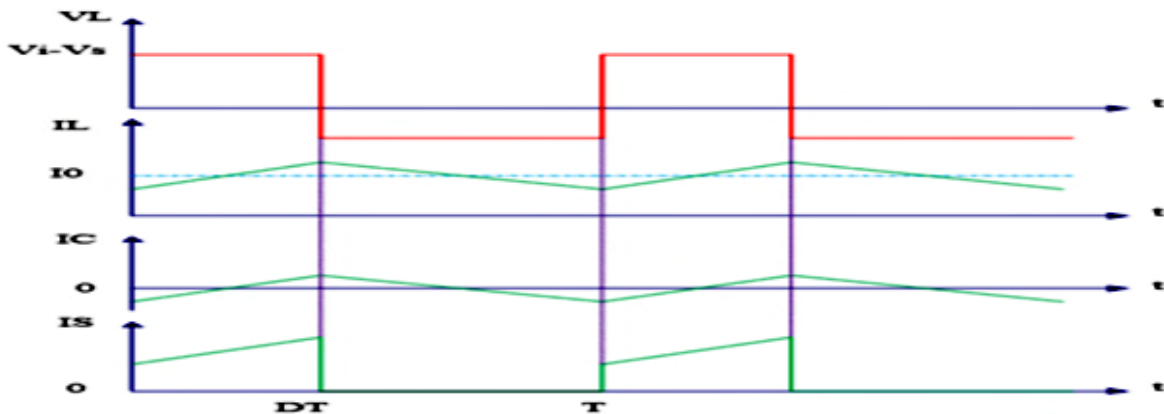


Figure II. 5 Caractéristique du tension-courant.

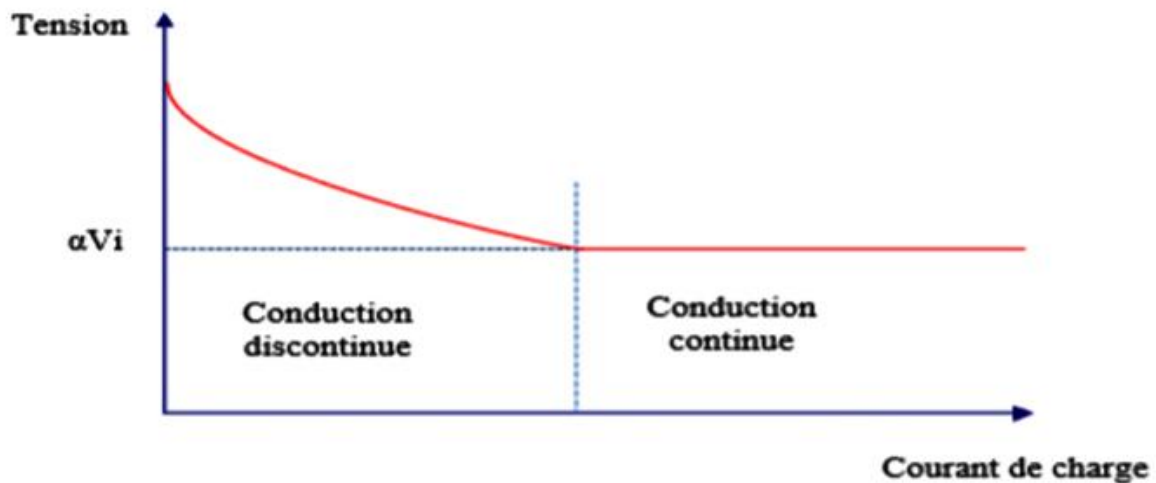


Figure II. 6 Variation de V de charge avec I de charge pour le convertisseur Buck.

II.3.5.2 Hacheur dévolteur-survolteur (buck-boost)

Un autre arrangement possible des commutateurs à semi-conducteurs permet d'ajouter un autre type de convertisseur $DC - to - DC$ connu sous le nom de convertisseur dévolteur survolteur.

En fait, ce nouveau convertisseur est obtenu en échangeant la diode D et l'inductance L du convertisseur dévolteur. Le circuit est illustré à la figure II.7.

Dans ce type de convertisseur, le gain de circuit peut être supérieur ou inférieur à un par rapport au changement de polarité. La différence fondamentale de cette classe de convertisseur avec les convertisseurs dévolteur et survolteur est que la tension de sortie est de signe opposé à celle de la source constante E[16].

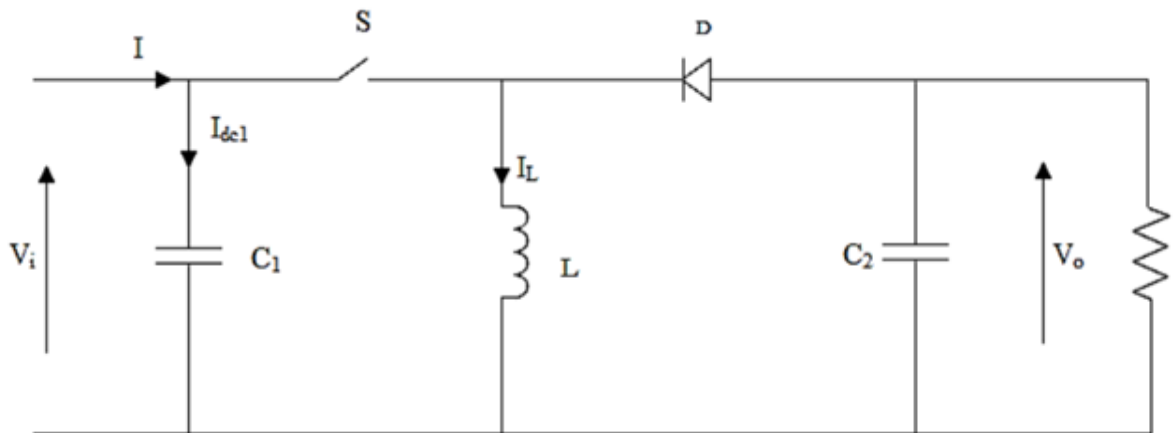


Figure II. 7 Schéma électrique du convertisseur dévolteur-survolteur.

Le rapport cyclique du hacheur dévolteur-survolteur est:

$$V_0 = \frac{a-1}{a} V_i \quad (\text{II.8})$$

II.3.5.3 Hacheur survolteur (Boost)

Le convertisseur élévateur est un convertisseur à découpage DC-DC élévateur. Avec l'aide du convertisseur élévateur, le faible niveau de tension d'entrée peut être augmenté jusqu'à un niveau de tension de sortie élevé utile, fonctionnant essentiellement comme un convertisseur Buck inversé. La topologie du convertisseur Boost est affichée dans la figure suivant.

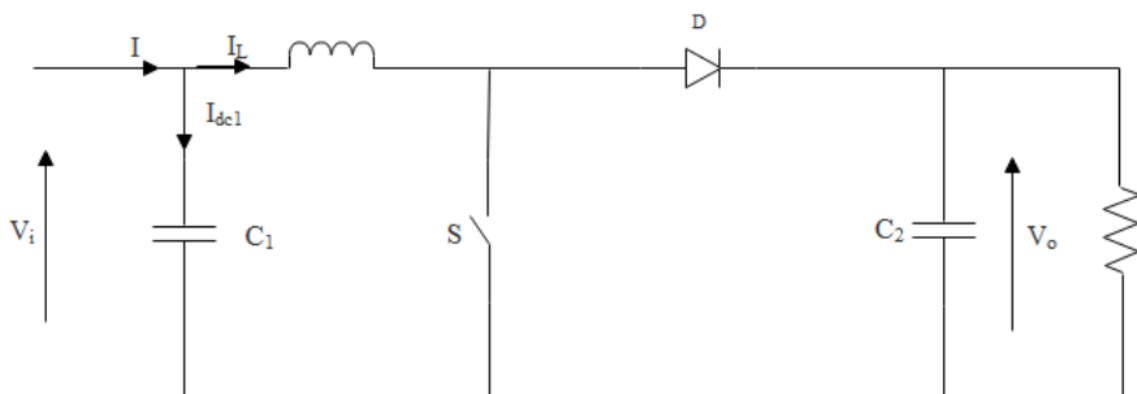


Figure II. 8 Schéma du hacheur survolteur.

Le rapport cyclique du hacheur survolteur est:

$$V_0 = \frac{1}{1-a} V_i \quad (\text{II.9})$$

II.4 Modélisation du convertisseur statique DC/DC

Dans notre travail on choisit un convertisseur statique DC/DC.

II.4.1 Structure du hacheur élévateur

II.4.1.1 Cellule de commutation

La structure du hacheur élévateur (boost) est constituée d'une seule cellule de commutation, comme représenté en figure II.9.

Par les mécanismes de mise en conduction et de blocage des deux interrupteurs, deux états sont possibles, ainsi que cela est illustré en figure II.10[17]. K1 passant et K2 bloqué, les conditions de fonctionnement sont les suivantes

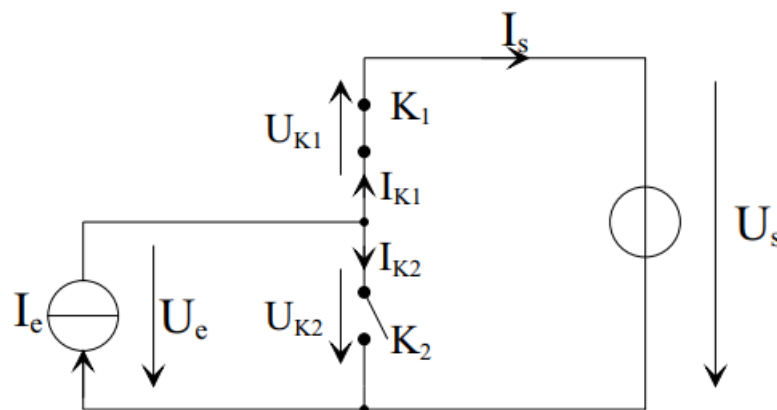


Figure II. 9 Structure du hacheur élévateur.

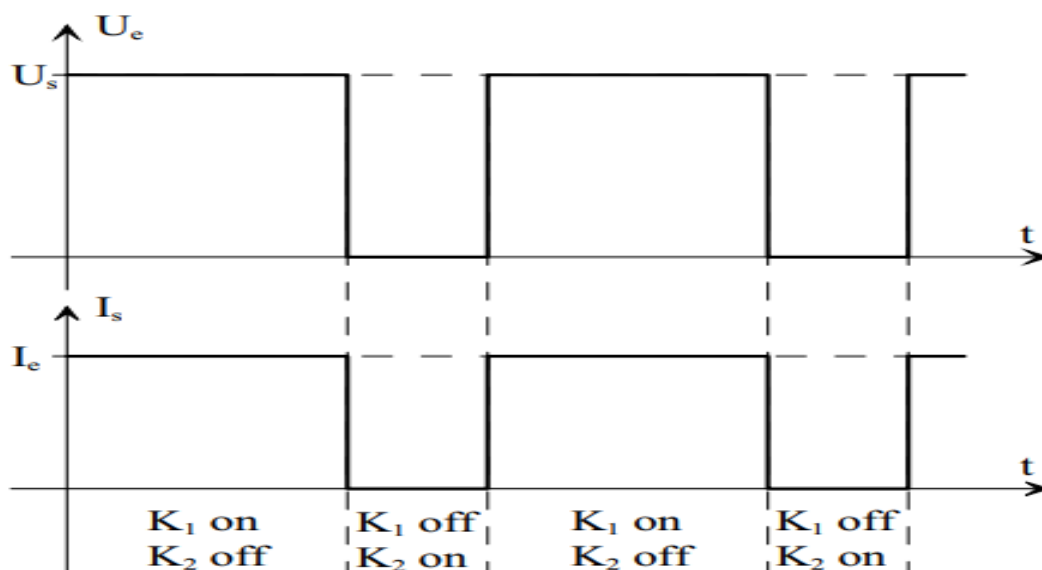


Figure II. 10 Grandeurs électriques caractéristiques du boost.

$$\begin{cases} U_e = U_s \\ I_s = I_e \end{cases} \quad (\text{II.10})$$

K1 bloqué et K2 passant, les conditions de fonctionnement sont les suivantes :

$$\begin{cases} U_e = 0 \\ I_s = 0 \end{cases} \quad (\text{II.11})$$

II.4.1.2 Caractéristique statique des interrupteurs et commutation

Nous considérons des sources de courant et de tension qui sont respectivement unidirectionnelles en tension et en courant.[18]

$$\begin{cases} -U_{k1} + U_{k2} = U_s \\ I_{k1} + I_{k2} = I_e \end{cases} \quad (\text{II.12})$$

Suivant les états respectifs des deux interrupteurs, on peut donc écrire :

$$\text{➤ } K_1 \text{ passant et } K_2 \text{ bloqué} \quad \begin{cases} U_{k2} = U_s \\ I_{k1} = I_e \end{cases} \quad (\text{II.13})$$

$$\text{➤ } K_1 \text{ bloqué et } K_2 \text{ passant} \quad \begin{cases} U_{k1} = -U_s \\ I_{k2} = I_e \end{cases} \quad (\text{II.14})$$

Nous démontrons ainsi que deux segments suffisent pour les caractéristiques statiques des interrupteurs K1 et K2, ainsi que nous le représentons figure II.11

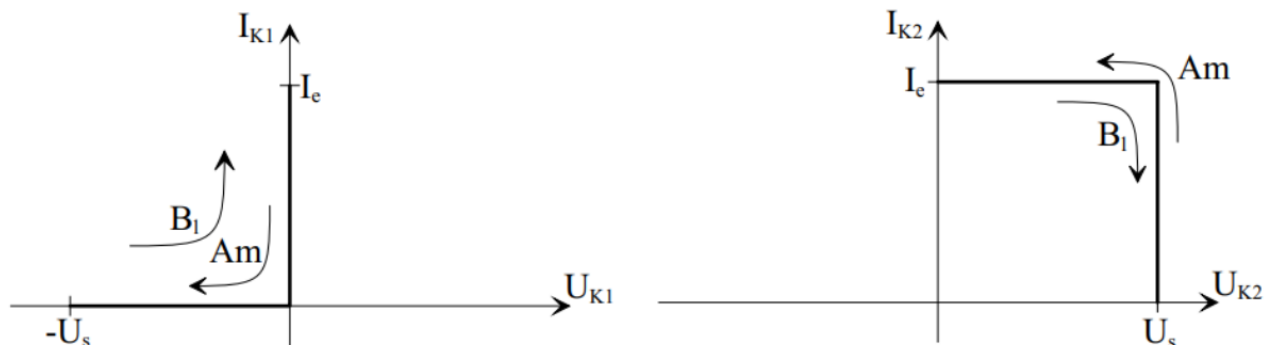


Figure II. 11 Caractéristiques statiques.

Outre la définition de la structure de base d'un hacheur élévateur « un quadrant », nous venons de mettre en évidence deux points importants. Le premier est relatif à la nature des commutations au sein de la cellule constituée par K1 et K2 : l'amorçage et le blocage commandés de K2 entraînent respectivement le blocage et l'amorçage spontanés de K1. Nous venons ainsi de définir une structure apte à fonctionner en commutation naturelle.

Le second est relatif aux natures des interrupteurs *K1 et K2* :

Interrupteurs K1 : cet interrupteur doit supporter une tension inverse, et doit pouvoir conduire un courant positif. En outre, son amorçage et son blocage peuvent être spontanés. Cet interrupteur sera donc de type diode.

Interrupteur K2 : cet interrupteur doit supporter une tension positive, et doit pouvoir conduire un courant positif. En outre, toutes les commutations de cet interrupteur doivent être commandées. Cet interrupteur pourra donc être de type transistor (bipolaire, MOS, IGBT ou GTO).

II.4.1.3 Relations fondamentales

Nous allons simplement préciser les natures des sources de courant et de tension, sachant que dans le présent contexte, nous nous attachons au transfert d'énergie de la source de courant vers la source de tension.

➤ source de courant : cette source fournit de la puissance. Nous avons donc choisi de la représenter par un générateur de tension U_{ei} (type batterie par exemple), en série duquel nous avons placé une inductance pour conférer à l'ensemble le caractère source de courant requis. La tension imposée au convertisseur par cette source est U_e .

➤ source de tension : cette source est la charge. Elle comprend une résistance (charge continue type), en parallèle de laquelle on place un condensateur pour conférer à l'ensemble le caractère source de tension requis.

Ce type de source de courant est en effet la charge « type » d'un hacheur élévateur. Les formes d'ondes des courants et tensions dans le convertisseur, ainsi que dans sa charge sont données à titre d'illustration en figure II.12.

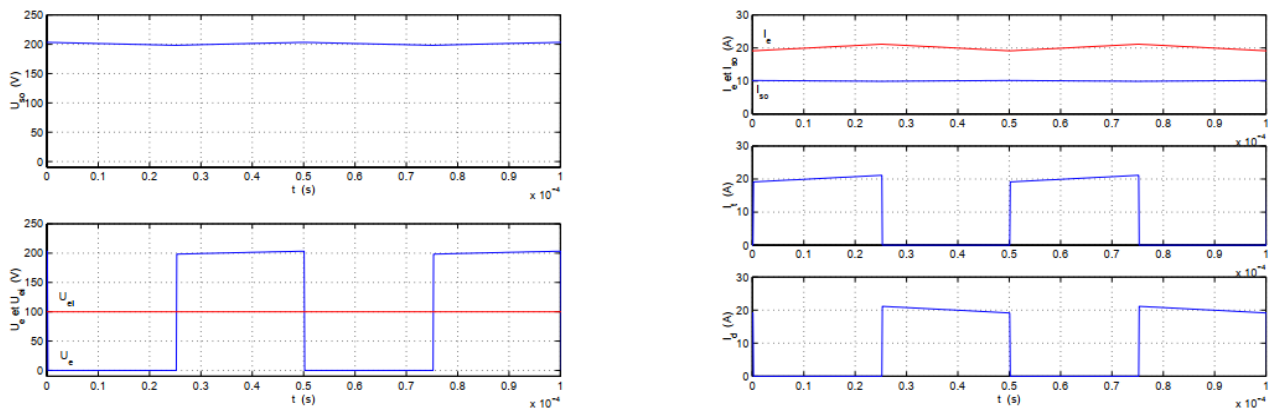


Figure II. 12 Grandeurs caractéristiques (Tensions et courant).

Suivant les états respectifs des interrupteurs T et D, la tension U_e vaut U_{so} ou bien $0V$, et est par conséquent constituée de créneaux. On notera le rapport 2 entre la tension U_{ei} et la tension U_{so} , ce qui justifie le qualificatif « élévateur » de ce convertisseur.

Le courant I_e dans l'inductance L_e : Ce courant est constitué d'une valeur moyenne, ainsi que d'une ondulation autour de cette valeur moyenne.

Le courant I_{so} dans la résistance de charge R_s , dont on peut considérer l'ondulation résiduelle comme parfaitement négligeable devant la valeur moyenne. Le condensateur C_s a en effet été dimensionné pour cela, suivant un critère que nous définirons ultérieurement.

Nous noterons également le rapport 2 existant entre la valeur moyenne de I_e et I_{so} . Le courant dans le transistor T : Lorsque celui-ci est passant, alors $I_t = I_e$. Cette phase correspond à la phase de croissance du courant dans l'inductance L . Le courant dans la diode D : lorsque celle-ci est passante, alors $I_e = I_d = I_s$. Cette phase correspond à la phase de décroissance de courant dans l'inductance L_e .

Dans le cadre du fonctionnement d'un hacheur élévateur tel que nous l'avons illustré, nous pratiquerons les hypothèses de travail suivantes afin de déterminer les relations fondamentales qui en régissent le fonctionnement :

Nous considérons la période de commutation T des interrupteurs largement inférieure à la période T_0 de résonance du circuit constitué par L_e et C_s lorsque le transistor T est passant.

En régime permanent, la composante moyenne I_{cs} du courant dans le condensateur C_s est nulle. Par conséquent, et compte tenu des hypothèses précédentes : $I_s = I_{so}$ et $I_{cs} = i_s$.

Nous considérons que les ondulations de la tension U_{so} sont négligeables devant sa valeur moyenne. Ainsi, pour la tension de sortie, nous considérerons que $U_s = U_{so} = \ll U_s \gg$.

Nous devons souligner que ces hypothèses de travail ne sont quasiment pas restrictives, car le dimensionnement des éléments de ce convertisseur permet d'agir dans le sens du respect de ces hypothèses, qui sont souvent des critères de dimensionnement.

II.4.2 Loi de convertisseur boost

La figure(II.9) présente le schéma topologique équivalent avec un commutateur idéal dans la et on définit l'état $u=1$ et l'état $u=0$.

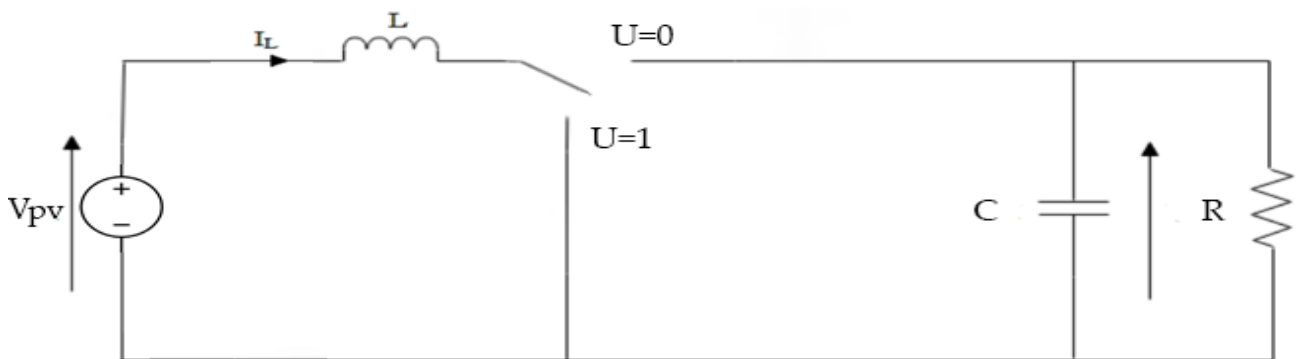


Figure II. 13 Schéma topologique équivalent en utilisant un commutateur idéal du convertisseur survolteur.

En appliquant les lois de Kirchhoff :

- Lorsque la position du commutateur est réglée sur $u = 1$, nous obtenons les équations suivantes :

$$L \frac{di}{dt} = E \quad (\text{II.10})$$

$$C \frac{dv}{dt} = -\frac{v}{R} \quad (\text{II.11})$$

- Lorsque la position du commutateur est réglée sur $u = 0$, nous obtenons les équations suivantes :

$$L \frac{di}{dt} = -v + E \quad (\text{II.12})$$

$$C \frac{dv}{dt} = i - \frac{v}{R} \quad (\text{II.13})$$

La dynamique du convertisseur survolteur est ensuite décrite par système d'équations suivantes :

$$L \frac{di}{dt} = -(1 - u)v + E \quad (\text{II.14})$$

$$C \frac{dv}{dt} = (1 - u)i - \frac{v}{R} \quad (\text{II.15})$$

II.4.3 Dimensionnement du filtre LC

Nous allons dimensionner les paramètres passifs liés à le hacheur survolteur (L et C)[19].A partir l'équation (II.8) pour un rapport cyclique (α) la tension de sortie en fonction de la tension d'entrée est donnée par :

$$\alpha = 1 - \frac{V_{pc}}{V_c} \quad (\text{II.16})$$

II.4.3.1 Résistance (R):

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

$$P_c = \frac{V_c^2}{R} \quad (\text{II.17})$$

$$R = \frac{V_c^2}{P_c} \quad (\text{II.18})$$

II.4.3.2 L'inductance (L) :

Nous aurons ainsi :

$$\Delta i_L = \frac{1}{2} (i_L(aT_s) - i_L(0)) \quad (\text{II.19})$$

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

$$V_L = L \frac{di_L}{dt} \quad (\text{II.20})$$

Donc

$$V_{Pv} = L \frac{di_L}{dt} \quad (\text{II.21})$$

II.4.3.3 Capacité (C) :

Nous aurons ainsi :

$$i_c = C \frac{dv_c}{dt} \quad (\text{II.22})$$

Donc

$$C = \frac{V_c}{2\Delta V_c R F_c} \alpha v \quad (\text{II.23})$$

II.5 Principe du MLI (PWM)

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

Une méthode pour réguler la tension de sortie afin d'obtenir une tension moyenne fixe consiste à ajuster en permanence le rapport cyclique de commande de D sans modifier TS.

Cette méthode qui consiste à faire varier la largeur des impulsions de commande de l'interrupteur est appelée méthode de Modulation de Largeur d'Impulsion (MLI) ou encore PWM (Pulse With Modulation).

Le signal de contrôle de l'interrupteur S devra être élaboré par comparaison entre le rapport cyclique D et une tension en dents de scie V_{DS} .

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

Le schéma de principe est donné par la Figure II.14

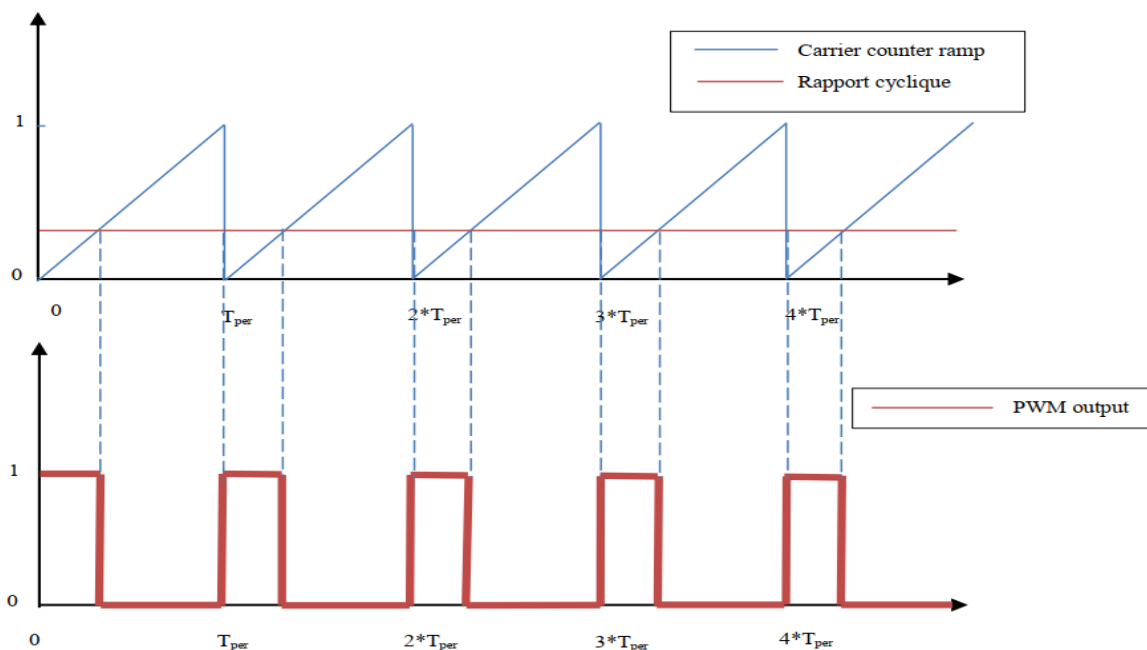


Figure II. 14 Principe de la commande MLI.

II.6 Techniques de commande MPPT

II.6.1 Introduction :

Dans le chapitre précédent, nous avons montré pour qu'un GPV fonctionne dans les conditions optimales et présentes des caractéristiques $I(V)$ non linéaires avec des 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, nous pouvons trouver un très fort écart entre la puissance potentielle du générateur et celle réellement transférée à la charge en mode connexion directe, donc afin d'extraire à chaque instant le maximum de puissance disponible aux bornes du GPV et de la transférer à la charge, il doit être doté d'un quadripôle d'adaptation qui joue le rôle d'interface entre les deux éléments. Ce quadripôle peut être un convertisseur DC-DC survolteur ou dévolteur selon les applications.

L'adaptation du générateur PV à la charge peut se faire par le biais du convertisseur en réglant le rapport cyclique du signal commandant l'interrupteur du convertisseur en assurant à travers cette action de contrôle, le transfert du maximum de puissance fournie par le générateur pour qu'elle soit la plus proche possible de P_{MAX} disponible [1]

Le problème qui se pose est de concevoir une approche d'adaptation (commande MPPT : Maximum Power Point Tracking) qui permet d'ajuster ce rapport cyclique d'une manière automatique à sa valeur optimale en fonction des instabilités météorologiques ou variations de la charge qui peuvent survenir à tout moment.

En ce qui concerne la conception des commandes MPPT, différentes approches d'adaptation sont disponibles : implantation analogique, analogique-numérique et numérique.

Dans ce travail de thèse, nous avons opté pour l'approche d'adaptation par la commande MPPT numérique puisque sa technique de réalisation est simple malgré qu'elle soit un peu plus coûteuse par rapport aux autres implantations.

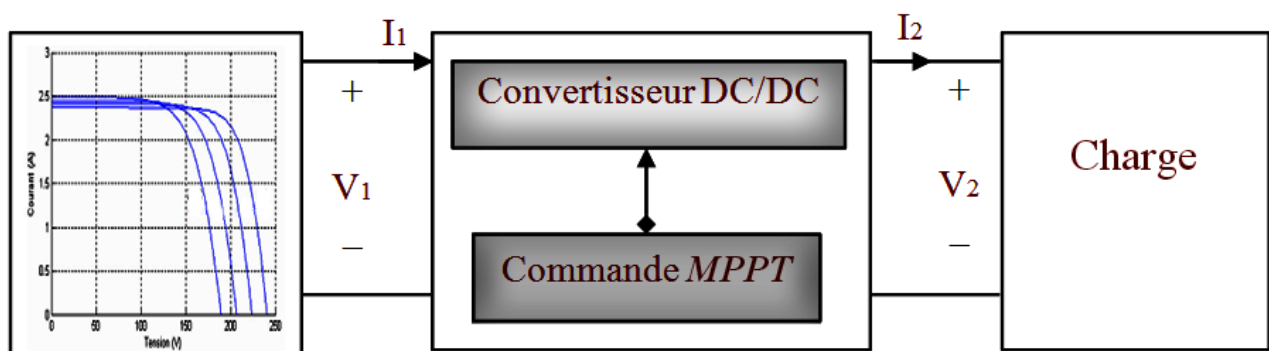


Figure II. 15 Etage d'adaptation jouant le rôle d'interface de puissance entre un GPV et une charge pour le transfert de P_{MAX} du GPV.

II.6.2 Principe de la Recherche du PPM

Ce principe assure que le système sera toujours amené à son optimum de puissance est décrit schématiquement par la figure II.16 et II.17. Ces dernières illustrent trois cas de perturbation. Suivant le type de perturbation, le point de fonctionnement bascule du point de puissance maximal $PPM1$ vers un nouveau point P de fonctionnement plus ou moins éloigné de l'optimum. Dans ces cas, pour une variation d'ensoleillement il suffit de réajuster la valeur du rapport cyclique pour converger vers le nouveau point de puissance maximale $PPM2$.

Dans le cas de la figure II.16.b pour une variation de charge on peut également constater une modification du point de fonctionnement qui peut retrouver une nouvelle position optimale grâce à l'action d'une commande. Enfin dans le cas de la figure II.17 la variation du point de fonctionnement peut se produire suite à la variation de la température de fonctionnement du GPV, bien qu'il faut également agir au niveau de la commande.

Dans le cas réel, cette variation est due aux trois cas précédents en même temps.

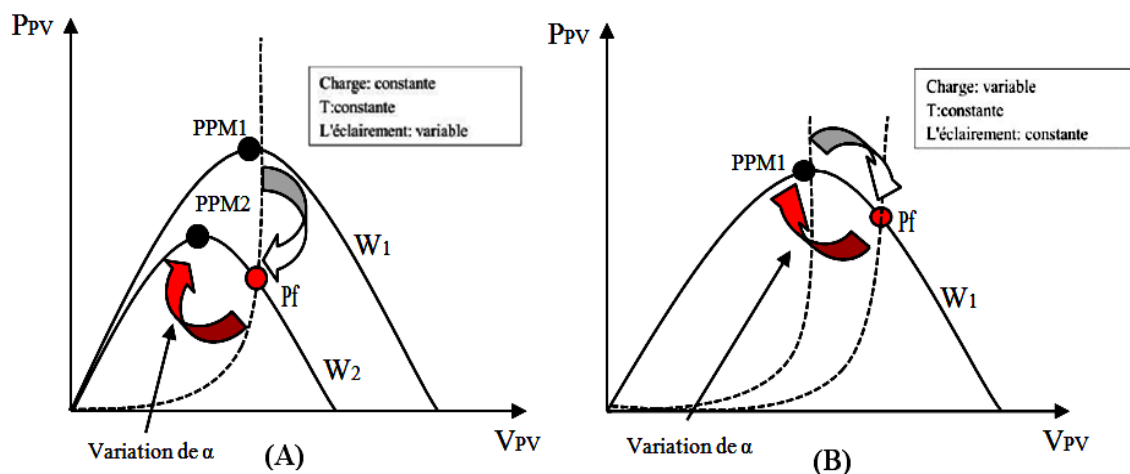


Figure II. 16 Fluctuation du PPM avec l'intensité d'éclairement (A) et la charge R (B).

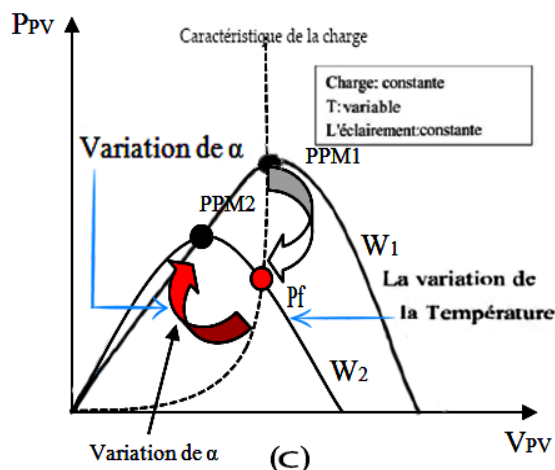


Figure II. 17 Fluctuation du PPM avec l'intensité de la température (C).

II.6.3 Techniques de commande MPPT

Au cours des dernières décennies, de nombreuses méthodes pour trouver le MPPT ont été développées. Ces techniques diffèrent dans de nombreux aspects tels que les capteurs nécessaires, la complexité, le coût, la portée de l'efficacité, la vitesse de convergence, le suivi correct lors de l'irradiation ou le changement de température, le matériel nécessaire pour la mise en œuvre, entre autres [1].

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

II.6.3.1 Méthodes indirectes

Ce type de commandes MPPT utilisent le lien existant entre les variables mesurées (I_{cc} ou V_{co}), qui peuvent être facilement déterminées, et la position approximative du MPP. Il compte aussi les commandes se basant sur une estimation du point de fonctionnement du GPV réalisée à partir d'un modèle paramétrique défini au préalable. Il existe aussi des commandes qui établissent une poursuite de la tension optimale en prenant en compte uniquement les variations de la température des cellules donnée par un capteur.

Ces commandes ont l'avantage d'être simples à réaliser. Elles sont plutôt destinées à des systèmes peu coûteux et peu précis pouvant fonctionner dans des zones géographiques où il y'a peu de changements climatiques. Parmi ces méthodes, on retrouve la méthode de la tension de circuit ouvert du générateur, la méthode de court-circuit etc.[20].

II.6.3.2 Méthodes directes

Ce type de commande MPPT détermine le point de fonctionnement optimal MPP à partir des courants, tensions ou puissances mesurés dans le système. Il peut donc réagir à des changements imprévisibles du fonctionnement du GPV.

Généralement, ces procédures sont basées sur un algorithme de recherche, avec lequel le maximum de la courbe de puissance est déterminé sans interruption du fonctionnement. Pour cela, la tension du point de fonctionnement est incrémentée dans des intervalles réguliers. Si la puissance de sortie est plus grande, alors la direction de recherche est maintenue pour l'étape suivante, sinon elle sera inversée. Le point de fonctionnement réel oscille alors autour du MPP. Ce principe de base peut être préservé par d'autres algorithmes contre des erreurs d'interprétation. Ces erreurs peuvent survenir, par exemple, à cause d'une mauvaise direction de recherche, résultant d'une haute puissance qui est due à une augmentation rapide du niveau de rayonnement.

La détermination de la valeur de la puissance du générateur PV, indispensable pour la recherche du MPP, nécessite la mesure de la tension et du courant du générateur, ainsi que la multiplication de ces deux variables Parmi ces méthodes, on retrouve la méthode de différentiation, la méthode Perturbe &

Observe (P&O), l'incrément de conductance, etc....[20].

II.7 Méthode de perturbation et observation (P&O)

Le principe des commandes *MPPT* de type P&O consiste à perturber la tension V_{pv} . Comme son nom l'indique, cette méthode fonctionne en perturbant le système et observant l'impact sur la puissance à la sortie du GPV [21,22]. Ainsi, comme le montre la figure II.18, on peut déduire que si une incrémentation positive de la tension V_{pv} engendre un accroissement de la puissance P_{pv} , cela signifie que le point de fonctionnement se trouve à gauche du PPM. Si au contraire, la puissance décroît, cela implique que le système a dépassé le PPM. Un raisonnement similaire peut être effectué lorsque la tension décroît. A partir de ces diverses analyses sur les conséquences d'une variation de tension sur la caractéristique $P(v)$, il est alors facile de situer le point de fonctionnement par rapport au PPM, et de faire converger ce dernier vers le maximum de puissance à travers un ordre de commande approprié. En résumé, si suite à une perturbation de tension, la puissance PV augmente, la direction de perturbation est maintenue. Dans le cas contraire, elle est inversée pour reprendre la convergence vers le nouveau PPM.

La Figure II.18 représente l'algorithme de la méthode P&O. L'inconvénient majeur de cette technique réside dans le cas de changement rapide des conditions atmosphériques (comme une journée nuageuse avec éclaircies), cette méthode peut déplacer le point de fonctionnement dans une direction fautive et les pertes de puissance risquent d'être encore plus importantes, cet ajustement incorrect continuera jusqu'à ce que le changement de l'éclairement ralentisse ou se stabilise, et avant que de nouvelles perturbations soient effectuées il est nécessaire que le convertisseur statique fonctionne en régime établi c'est pour cela cette méthode est jugée trop lente à retrouver le nouveau point de fonctionnement.

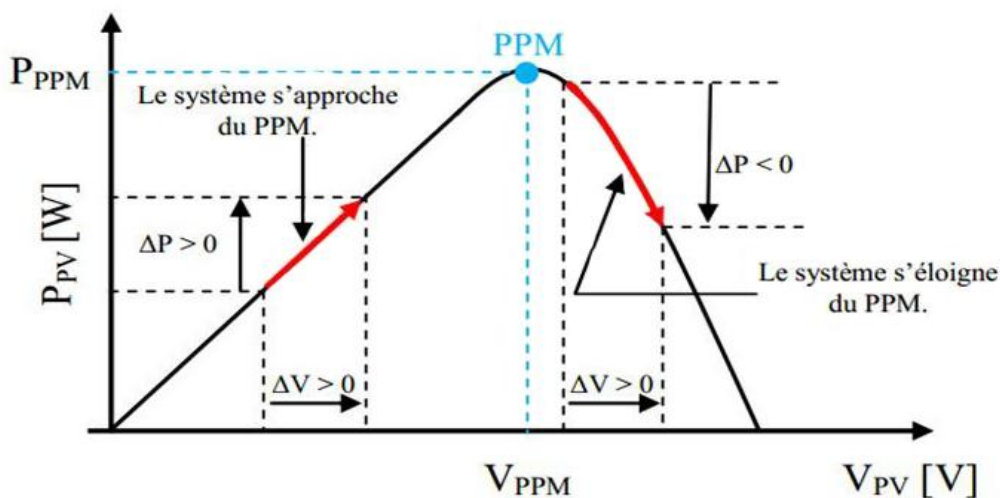


Figure II. 18 Recherche du PPM par la méthode (P&O)

Sur la (figure II.19) on considère que le point de fonctionnement est sur la courbe (1), le MPPT oscille autour du MPP, du point A2 vers le point A puis vers le point A1 et vice versa, si la valeur de l'éclairement augmente la courbe $P(V)$ du panneau se déplace vers la courbe (2) alors le MPPT perturbe

le point de fonctionnement du point A vers le point $B1$ ce si nous amène à $\Delta P > 0$ avec [$\Delta P = P(K) - P(K-1)$] le MPPT continu à perturber les tensions dans la même direction c'est-à-dire vers le point $B2$.

Si l'éclairement augmente toujours le point de fonctionnement se déplace vers le point $C1$ de la courbe (3) au lieu du point $B2$ sur la courbe (2) alors le MPPT a toujours $\Delta P > 0$ et il déplace le point de fonctionnement vers le point $C2$.

A partir des points $A \rightarrow B1 \rightarrow C1 \rightarrow C2$ l'algorithme P&O continu à s'éloigner du MPP ce qui donne une puissance qui sera perdue et le rendement diminué.

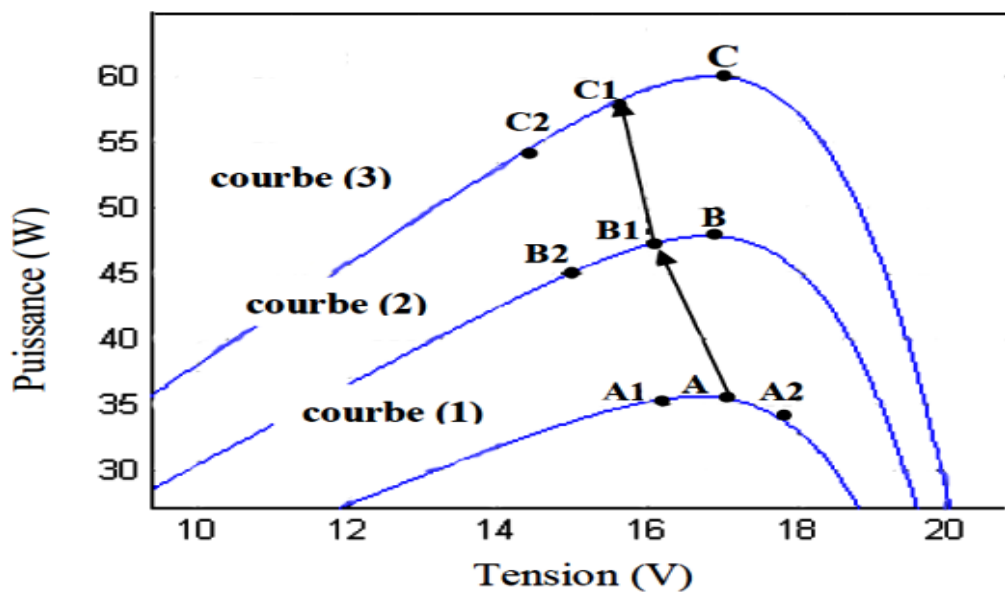


Figure II. 19 Comportement de l'algorithme P&O sous un changement de l'éclairement.

La figure II.20 représente l'algorithme classique associé à une commande MPPT de type P&O, où l'évolution de la puissance est analysée après chaque perturbation de tension. Pour ce type de commande, deux capteurs (courant et tension du GPV) sont nécessaires pour déterminer la puissance du GPV à chaque instant.

La méthode P&O est aujourd'hui largement utilisée de par 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. Néanmoins, une faible valeur d'incrément ralentit la recherche du PPM, il faut donc trouver un compromis entre précision et rapidité. Ce qui rend cette commande difficile à optimiser.

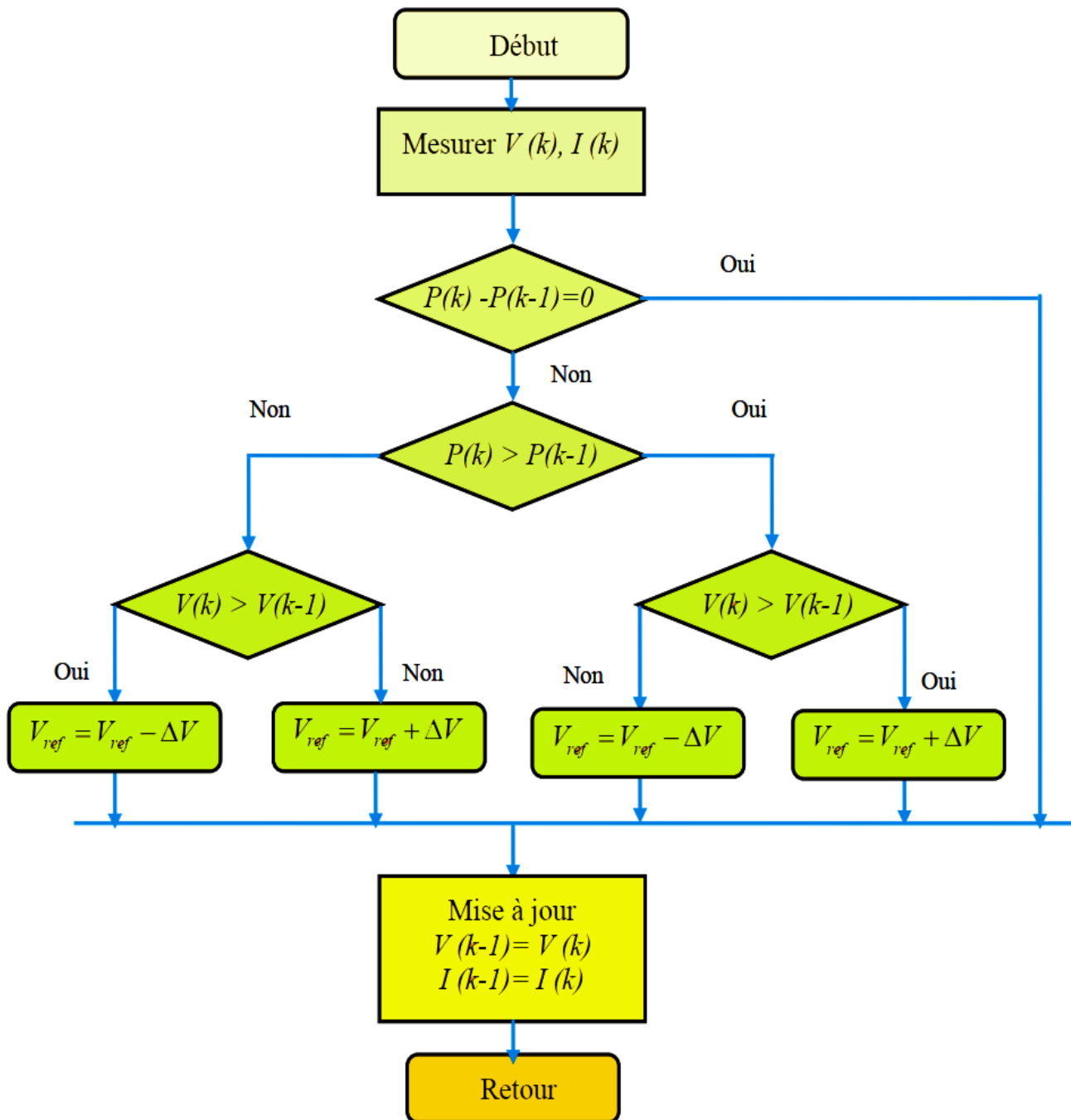


Figure II. 20 Organigramme de la méthode P&O.

Ce problème a été mis en évidence [23], où la recherche du PPM est effectuée avec deux valeurs fixes d'incrément (le deuxième incrément est le double du premier), à partir des oscillogrammes proposés, le temps mis pour atteindre le nouveau PPM lors d'une variation de puissance de l'ordre de 8 W est de 200 ms pour le premier l'incrément, alors que celui-ci est divisé par deux pour l'incrément de forte valeur. En contrepartie, les oscillations autour du PPM sont maintenues pour ce dernier. Malheureusement, la qualité des relevés ne permet pas d'évaluer la précision statique de la MPPT, obtenue avec ces deux incréments proposés par l'auteur ni le choix d'autres incréments si la technologie

du panneau change. Par contre, une étude comparative entre différents algorithmes de recherche[24] . Dans cet article, l'auteur a développé un banc de mesure et une procédure de tests qui permettent d'évaluer différentes commandes MPPT sous les mêmes conditions climatiques durant une journée de fonctionnement. Les principes de recherche analysés sont, outre la méthode P&O, l'incrément de conductance et une méthode basée sur la mesure de la tension en circuit ouvert (V_{oc}), détaillées toutes deux dans la suite du document.

Il ressort de cette étude que la commande MPPT testée, basée sur le principe P&O, affiche un rendement MPPT de l'ordre de 96,5 %. Cependant, aucune indication n'est fournie par l'auteur sur la valeur de la variable d'incrément et si cette valeur est une valeur moyenne ou une valeur liée aux conditions climatiques. En effet, il est connu que ce type de commande permet d'obtenir un rendement plus important durant une journée relativement ensoleillée, où le PPM évolue lentement et proportionnellement au soleil. Par contre pour une journée présentant de forts changements d'irradiations très fréquents, cette commande présente plus de pertes, engendrées par le temps de réponse de la commande pour atteindre le nouveau PPM.

En effet, si on analyse en détail ce mode de recherche, il présente des erreurs d'interprétation au niveau de la direction à suivre pour atteindre le PPM lorsque des variations brusques des conditions climatiques ou/et de charge apparaissent, comme cela est décrit sur la figure II.21.

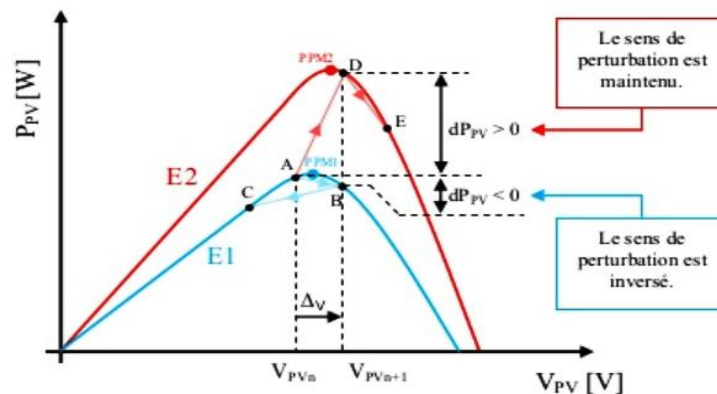


Figure II. 21 Divergence de la commande P&O lors de variations d'irradiation.

Pour plus de clarté, prenons l'exemple d'un éclairage donné, noté E1, avec un point de fonctionnement se situant en A. Suite à une perturbation de tension de valeur ΔV , ce dernier bascule en B, impliquant, dans un fonctionnement sans variation d'éclairage, une inversion du signe de la perturbation due à la détection d'une dérivée de la puissance négative entraînant en régime d'équilibre, des oscillations autour du PPM causées par la trajectoire du point de fonctionnement entre les points B et C. On peut noter que des pertes de transfert de la puissance seront plus ou moins importantes en fonction des positions respectives des points B et C par rapport à A. Lors d'un changement d'irradiation (évolution des caractéristiques $P(V)$ (E1 à E2)), le point de fonctionnement se déplace alors de A vers D, qui est interprété par une variation positive de la puissance. Le système n'ayant pas la possibilité de voir l'erreur

de trajectoire lié au changement de caractéristique, le signe de la perturbation ne change pas et le système s'éloigne momentanément du PPM en direction du point E. Au mieux, ceci occasionne une non-optimisation de la puissance direction du point E. Au mieux, ceci occasionne une non-optimisation de la puissance et se retrouver en butée, soit en circuit ouvert soit en court-circuit entraînant une perte définitive du PPM. Ceci entraînant, en cas de conditions météorologiques défavorables, de fortes lacunes au niveau de la commande.

Ce cas de figure est d'ailleurs [25], à l'aide de simulations. Pour mettre en évidence ce désagrément, il analyse le comportement de la commande P&O lorsqu'une variation d'ensoleillement, correspondant à une évolution linéaire de l'irradiation de 125 W/m^2 à 800 W/m^2 , se produit sur une durée de 25 secondes.

Contrairement à la perturbation, la recherche du PPM ne se fait pas linéairement, la commande à tendance à s'éloigner momentanément du PPM, pour converger par la suite vers ce dernier. Dans cet essai, le temps de recouvrement de la commande MPPT s'effectue au bout de 40 secondes, soit 15 secondes après que l'éclairement se MPPT s'effectue au bout de 40 secondes, soit 15 secondes après que l'éclairement de 94,5% pour une durée de fonctionnement de 100 secondes. Ici, comme précédemment, aucune indication n'est formulée sur la valeur de la variable d'incrément utilisée ; il est donc difficile d'évaluer les performances réelles de cette commande. Pour remédier aux différents problèmes liés à la commande P&O, on a introduit d'autres types de commandes.

II.7.1 Avantages et inconvénients de P&O

➤ Avantages

- Structure de régulation simple
- Nombre des paramètres mesures réduit

➤ Inconvénients

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

II.8 Conclusion.

Dans ce chapitre nous avons présenté plusieurs méthodes de commandes MPPT basées sur contre de réaction de puissance, comme la méthode de perturbation et observation (P&O). Cette commande MPPT utilise directement la tension et le courant du panneau photovoltaïque pour chercher le point de fonctionnement correspondant à la puissance maximale.

Nous avons constaté que l'algorithme P&O est mieux utilisé du fait de son efficacité de rapprocher le point de fonctionnement du générateur PV le plus près possible du PPM et de sa simplicité d'implantation.

Nous nous somme basé sur la commande MPPT de type perturbation et observation (P&O) celle quand va utiliser au cours de notre travaille.

Chapitre III :

Simulation et résultats

Chapitre III

Simulation et Résultats

III.1 Technique MPPT par Mode glissant.

III.1.1 Introduction.

Ces dernières années, la théorie du contrôle appliquée à la commande des systèmes électriques a considérablement amélioré les performances dynamiques de ces systèmes. Dans le domaine des convertisseurs statiques, les travaux de recherche visent à améliorer la stabilité, réduire la sensibilité aux perturbations et améliorer les performances dynamiques et statiques[26].

La commande à structure variable (CSV) est, par sa nature, une commande non linéaire, elle est basée sur la commutation de fonctions des variables d'état, utilisées pour créer une variété ou hyper-surface de glissement, dont le but est de forcer la dynamique du système à correspondre avec celle définie par l'équation de l'hyper-surface. Quand l'état est maintenu sur cette hyper-surface, le système se trouve en régime glissant. Sa dynamique est alors insensible aux perturbations extérieures et paramétriques tant que les conditions du régime glissant sont assurées [27].

Nous nous intéressons, dans ce chapitre, à la comparaison des différentes lois de commande non linéaires par la méthode de mode glissant provenant de deux approches différentes du contrôle: le premier est non-linéaire et la seconde semi-linéaire. Nous rappellerons tout d'abord les principes du contrôle par mode glissant. Ensuite, nous décrivons les différentes lois de commande à base du mode glissant. Enfin, nous simulons les différentes lois de commande appliquées sur les deux convertisseurs Buck et Boost.

III.1.2 Principes généraux de la commande par mode glissant

III.1.2.1 Principe

La commande par mode glissant est une commande robuste qui se base sur le concept de changement de structure du contrôleur avec l'état du système afin d'obtenir la réponse désirée. Le contrôle généré par la commande par mode glissant est du type tout ou rien. Dans ce type de commande, l'état du système définit l'état de commutation de l'organe de contrôle. L'idée est de diviser l'espace d'état par une frontière de décision appelée surface de glissement, qui délimite deux sous espaces correspondant à deux états possibles de l'organe de commande (figure III.1). La stabilisation sur la surface de glissement est obtenue à l'aide d'une commutation à chaque franchissement de la frontière de décision [28,29].

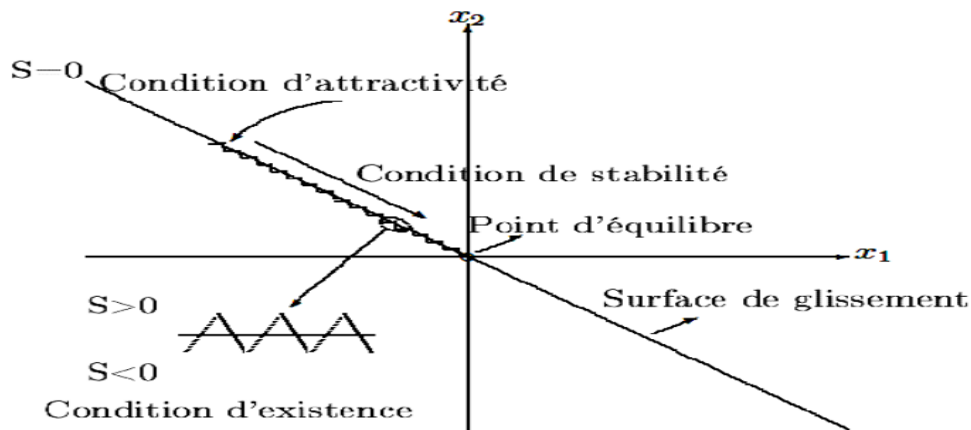


Figure III. 1 Principe de la commande par mode glissant.

Ce principe de commande repose donc essentiellement sur l'utilisation d'une commande discontinue ayant pour but de maintenir l'évolution du système sur une surface de commutation (surface de glissement) judicieusement choisie. La synthèse doit donc viser à rendre la surface de glissement attractive (condition d'attractivité) depuis tout point de l'espace d'état. Une fois la surface atteinte, il faut assurer le glissement le long de cette surface (condition de glissement) et la stabilité du système (condition de stabilité). En d'autre terme, il faut trouver la condition pour laquelle la dynamique du système glisse sur la surface vers le point d'équilibre désiré (figure III.1). Sur la surface, la dynamique du système est indépendante de celle du processus initial, ce qui implique que ce type de contrôle entre dans le domaine des commandes robustes. Ces notions de stabilité sont démontrées en tenant compte du principe de stabilité suivant le critère de Lyapunov (théorème 1) rappelé ci-dessous.

III.1.2.2 Théorème

Soit $V(x)$ une fonction différentiable de R^n dans R^n , dite fonction de Lyapunov, qui satisfait les conditions suivantes :

$$\begin{cases} V(0) = 0 \\ V(x) > 0 & \forall x \neq 0 \\ V(x)' > 0 & \forall x \neq 0 \end{cases} \quad (\text{III.1})$$

Si ces trois conditions sont satisfaites, $x=0$ est un point d'équilibre stable, si la dernière condition devient $V'(x) < 0$ pour $x \neq 0$, le point $x=0$ est asymptotiquement stable.

Dans le cas de la commande par mode glissant, cette fonction de Lyapunov est déduite à l'aide d'une pseudo-sortie qui est la surface de glissement $S(x, t)=0$.

III.1.2.3 Objectif de la commande par mode glissant

L'objectif de la commande par mode glissant se résume en deux points essentiels:

- Synthétiser une surface $s(x, t)$ tel que toutes les trajectoires du système obéissent à un comportement désiré de poursuite, régulation et stabilité.

➤ Déterminer une loi de commande (commutation) $u(x, t)$ qui est capable d'attirer toutes les trajectoires d'état vers la surface de glissement et les maintenir sur cette surface.

III.1.2.4 Choix des surfaces de glissement.

Cette surface peut être linéaire ou non linéaire. Elle est construite de façon que le système ait toujours une dynamique désirée, et généralement choisie avec un degré relatif égal à un. On considère le modèle d'état suivant :

$$[X] = [A][X] + [B][U] \quad (\text{III.2})$$

Où $[X] \in \mathbb{R}^n$ est le vecteur d'état, $[U] \in \mathbb{R}^m$ le vecteur de commande, avec $n > m$.

Généralement, le choix du nombre des surfaces de glissement est égal à la dimension du vecteur de commande $[U]$.

Afin d'assurer la convergence d'une variable d'état x vers sa valeur de référence x^* , plusieurs travaux proposent la forme générale suivante :

$$S = \left(\frac{d}{dt} + \lambda\right)^{n-1} e \quad (\text{III.3})$$

Avec:

e : la variable à régler.

λ : une constante positive qui interprète la bande passante du contrôle désiré.

n : degré relatif, égale au nombre de fois qu'on fait dériver la sortie pour faire apparaître la commande.

S : est une équation différentielle linéaire autonome dont la réponse e tend vers zéro pour un choix correct du gain λ et c 'est l'objectif de la commande.

III.1.2.5 Condition de convergence et d'existence du mode glissant.

Les conditions d'existence et de convergence sont les critères qui permettent aux différentes dynamiques du système de converger vers la surface de glissement et d'y rester indépendamment de la perturbation externe et des variations paramétriques [30]. On présente deux types de conditions qui sont :

III.1.2.5.1 Approche directe.

Cette approche est la plus ancienne, elle est proposée et étudiée par Emilianov et Utkin. Elle est donnée sous la forme :

$$S(x) * \dot{S}(x) < 0 \quad (\text{III.4})$$

III.1.2.5.2 Approche de Lyapunov

Il s'agit de choisir une fonction de Lyapunov $V(x) > 0$ (fonction scalaire positive) pour les variables d'état du système et de choisir une loi de commande qui fera décroître cette fonction ($V'(x) < 0$).

Cette fonction est généralement utilisée pour garantir la stabilité des systèmes non linéaires. En définissant par exemple une fonction de Lyapunov pour le système comme suit :

$$V(x) = \frac{1}{2} S^2(x) \quad (\text{III.5})$$

En dérivant cette dernière

$$V'(x) = S(x) * S'(x) \quad (III.6)$$

III.1.3 Synthèse des lois de commande.

Dans ce cas, la structure d'un contrôleur par mode glissant est constituée de deux parties, une concernant la linéarisation exacte (U_{eq}) et une deuxième stabilisante (U_n), cette dernière est importante dans la technique de la commande par mode glissant, car elle est utilisée pour éliminer les effets d'imprécision du modèle et de rejeter les perturbations.

$$U(T) = U_{eq} + U_n \quad (III.7)$$

Tel que :

$U_{eq}(t)$: est la commande équivalente, elle est déduite, en considérant que la dérivée de la surface est nulle ($\dot{s}(x)=0$)

$U_n(t)$: est un terme introduit pour satisfaire la condition de convergence $S(x)*S'(x)<0$. Il détermine ainsi le comportement dynamique du système durant le mode de convergence, donc pour garantir l'attractivité de la variable à contrôler vers la surface de glissement.

Pour mettre en évidence le développement précédent, on considère le modèle d'état (III.7) on cherche à déterminer l'expression de la commande U . La dérivée de la surface $S(x)$ est :

$$S'(x) = \frac{ds}{dt} = \frac{\partial S}{\partial X} \frac{\partial X}{\partial t} \quad (III.8)$$

En remplaçant (III.2) et (III.7) dans (III .8), on trouve :

$$S'(x) = \frac{\partial S}{\partial X} \{ [A][X] + [B]U_{eq} \} + \frac{\partial S}{\partial X} [B]U_n \quad (III.9)$$

Durant le mode de glissement et le régime permanent, la surface est nulle, et par conséquent, sa dérivée et la partie discontinue sont aussi nulles. D'où, on déduit L'expression de la commande équivalente:

$$U_{eq} = - \frac{\frac{\partial S}{\partial X} [A][X]}{\frac{\partial S}{\partial X} [B]} \quad (III.10)$$

Durant le mode de convergence, en remplaçant la commande équivalente par son expression dans (III.6), on obtient la nouvelle expression de la dérivée de la surface :

$$S'(x) = \frac{\partial S}{\partial X} [B]U_n \quad (III.11)$$

Et la condition d'attractivité $S(x) S'(x)<0$ devient :

$$s(x) \frac{\partial S}{\partial X} [B]U_n < 0 \quad (III.12)$$

Afin de satisfaire la condition d'attractivité, le signe de U_n doit être opposé à celui de la forme la plus simple que peut prendre la commande discrète et celle d'une fonction *signe*.

$$U_n = K_x \text{sign}(x) \quad (\text{III.13})$$

$$\text{sign}(X) = \begin{cases} 1 & \text{si } x < 0 \\ -1 & \text{si } x > 0 \end{cases} \quad (\text{III.14})$$

Le choix de ce gain (K_x) est très influent car, s'il est très petit le temps de réponse sera très long et, s'il est choisi très grand, nous aurons des fortes oscillations au niveau de l'organe de commande. Ces oscillations peuvent exciter les dynamiques négligées (phénomène de chattering).

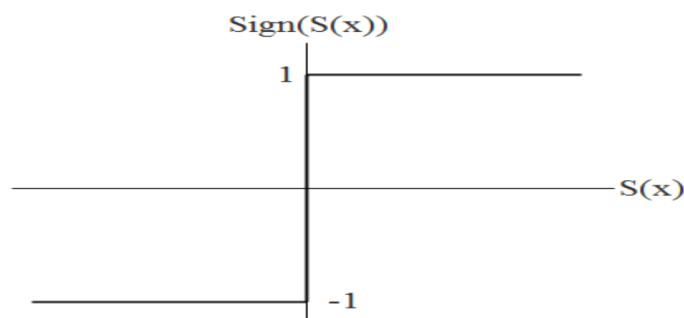


Figure III. 2 Représentation de la fonction signe

III.1.4 Contrôle avec mode glissant d'un système photovoltaïque.

Un système photovoltaïque peut être présenté comme suivant :

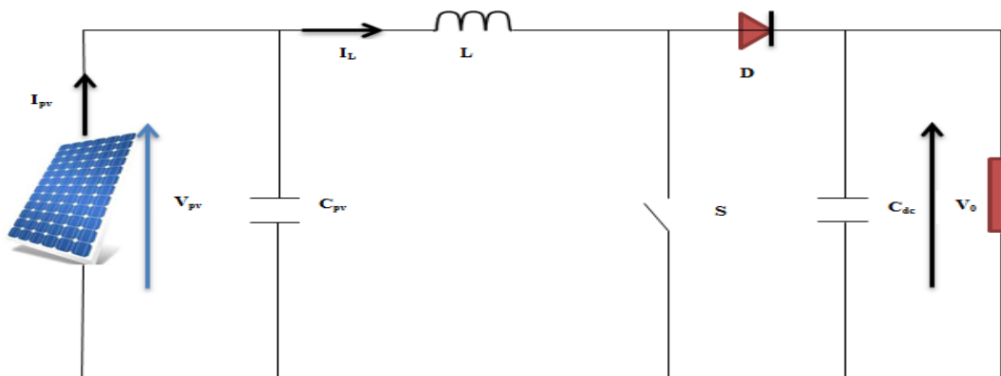


Figure III. 3 Structure globale du système photovoltaïque

On a modélisé ce système avec l'équation suivant :

$$\begin{cases} \frac{dx_1}{dt} = \frac{1}{C_{pv}} i_{pv} - \frac{1}{C_{pv}} x_2 \\ \frac{dx_2}{dt} = \frac{1}{L} x_1 - \frac{1-a}{L} V_o \end{cases} \quad (\text{III.15})$$

Avec $x = [x_1 x_2]^T = [V_{pv} I_l]^T$.

Dans cette étude, nous introduisons le concept de la technique du contrôle approché. En sélectionnant la surface de glissement en tant [31,32].

III.1.4.1 Mode glissant avec surface imposé

La surface de glissement est défini par :

$$S = \frac{\partial P_{pv}}{\partial V_{pv}} \quad (III.16)$$

La commande équivalente est déterminée de la condition suivante :

$$S = \left[\frac{\partial S}{\partial x} \right]^T \dot{X} = \left[\frac{\partial S}{\partial x} \right]^T (f(x) + g(x)u_{eq}) = 0 \quad (III.17)$$

Le contrôle équivalent est donné alors:

$$u_{eq} = \frac{\left[\frac{\partial S}{\partial x} \right]^T f(x)}{\left[\frac{\partial S}{\partial x} \right]^T g(x)} = 1 - \frac{V_{pv}}{V_o} \quad (III.18)$$

Et :

$$u_n = K * sign(S) \quad (III.19)$$

Le contrôle de commande est donné comme:

$$u = u_n + u_{eq} = 1 - \frac{V_{pv}}{V_o} + K * sign(S) \quad (III.20)$$

III.1.4.2 Mode glissant avec surface Slotine

Pour la deuxième méthode, nous utilisons la surface de Slotine, la surface de Slotine sélectionnée par l'application dans le contrôleur de mode coulissant est : [29], [33-35]

D'après l'équation III.15 on a n=2 et par l'application sur l'équation III.3

$$S = \left(\frac{d}{dt} + \lambda \right) e \quad (III.21)$$

$$S = \dot{e} + \lambda e \quad (III.22)$$

$$e = V_{pv} - V_{ref} \quad (III.23)$$

En remplaçant les équations III.15 et III.23 dans III.22, la surface de Slotine est:

$$S = \dot{x}_1 - \dot{V}_{ref} + \lambda e \quad (III.24)$$

$$S = \frac{1}{C_{pv}} (i_{pv} - x_2) - \dot{V}_{ref} + \lambda \dot{e} \quad (III.25)$$

Le dérivé de surface est:

$$\dot{S} = \frac{1}{C_{pv}} (i_{pv} - \dot{x}_2) - \ddot{V}_{ref} + \lambda \dot{e} = -K sign(S) \quad (III.26)$$

La commande obtenue en remplaçant les équations III.3 dans III.26 est:

$$u = 1 - \frac{LC_{pv}}{v_o} [V_{ref}'' + \frac{1}{LC_{pv}} x_1 - K sign(S) - \lambda \dot{e} + \frac{i_{pv}}{C_{pv}}] \quad (III.27)$$

III.2 Simulation dans Matlab.

III.2.1 Simulation et paramètres du système photovoltaïque

Dans cette partie on a proposé et simulé un système photovoltaïque avec les caractéristiques données au *tableau III.1* et la structure proposée dans le logiciel Matlab.

Tableau III. 1 Les caractéristiques électriques du module photovoltaïque.

Paramètre	Valeur
Puissance maximal (P_{max})	200w
Tension à P_{max} (V_{mp})	50V
Courant à P_{max} (I_{mp})	4A
Tension à circuit ouvert (V_{oc})	58.5V
Courant de court-circuit (I_{sc})	4.42V

La figure III.4 donne le schéma block sous Matlab /Simulink de modèle PV.

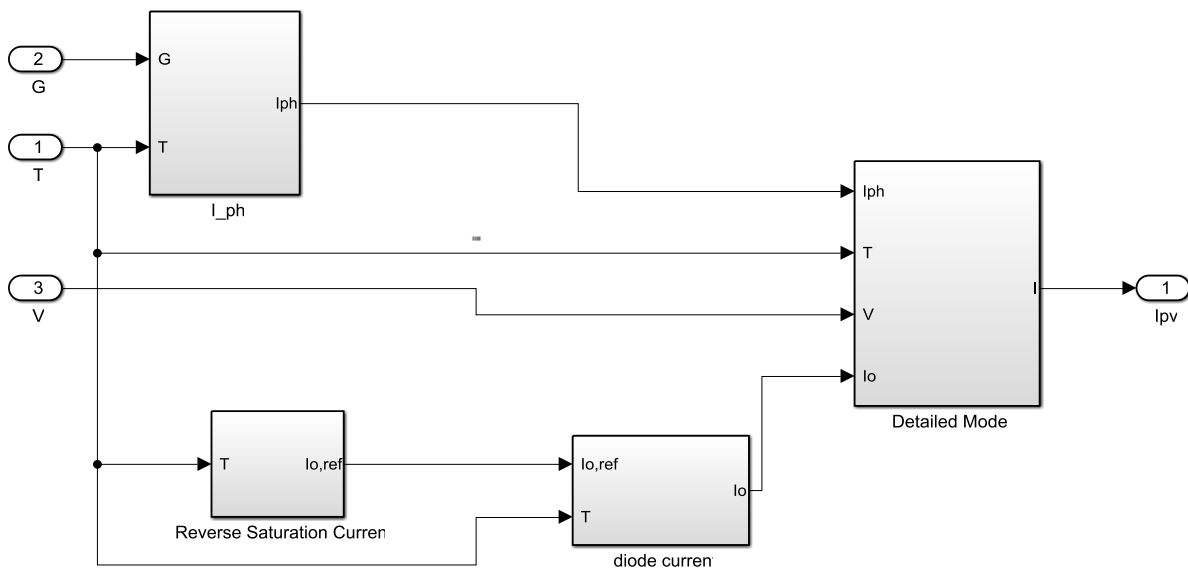


Figure III. 4 Simulation de PV dans Matlab.

III.2.2 Simulation et paramètres de convertisseur boost

Les paramètres utilisés sont présentés dans le *tableaux III.2*. On suppose que les interrupteurs utilisés sont parfaites.

III.2.3 Tableau III. 2 Paramètres du convertisseur boost.

Paramètre	Valeur
C1	3e-4Ω
C2	2e-4Ω
L	2e-2H

La *figure III. 5* donne le modèle Simulink du convertisseur boost.

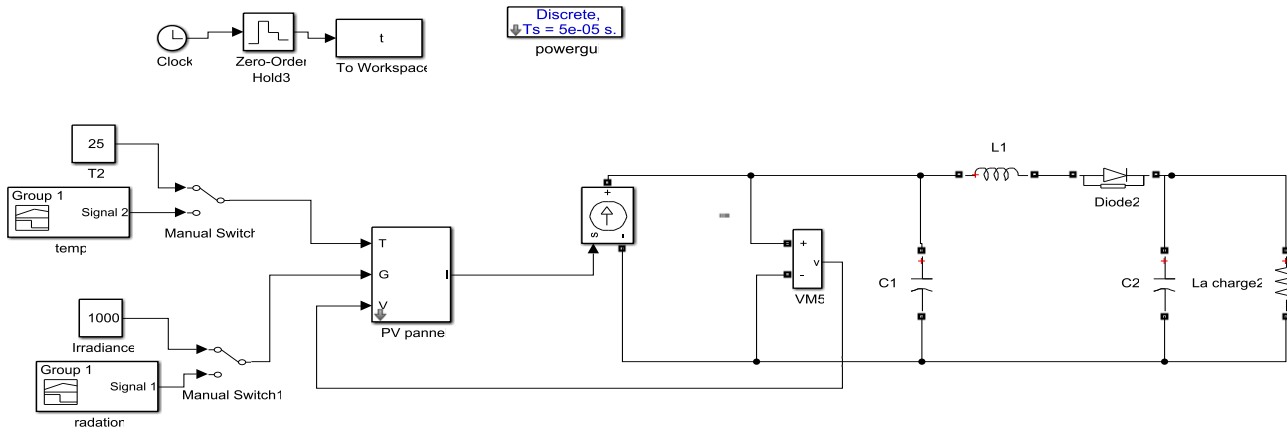


Figure III. 6 Simulation de convertisseur boost.

III.2.4 Simulation et paramètres de commande P&O.

III.2.5 La figure III. 6 donne le modèle Simulink du la méthode Perturber et Observer (P&O).

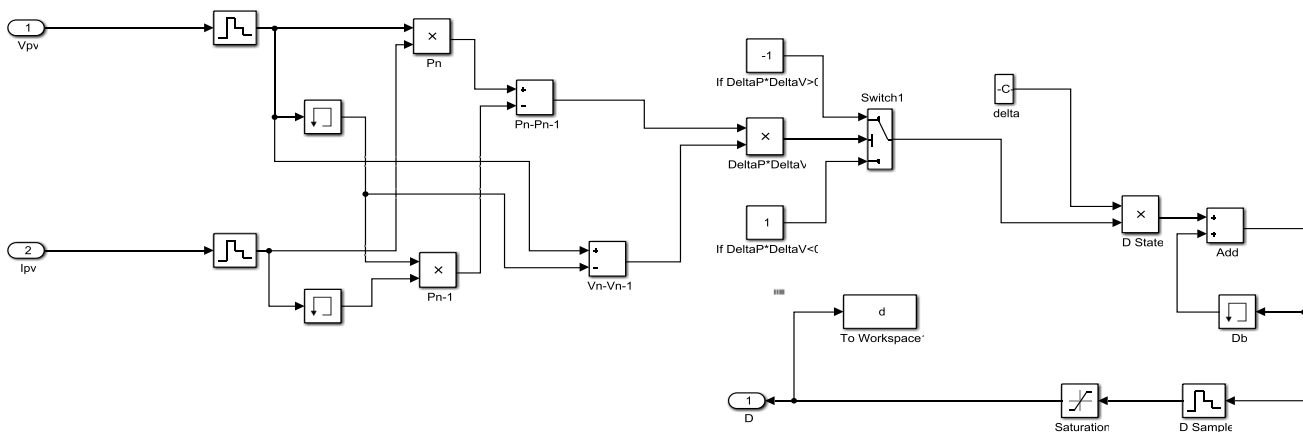


Figure III. 7 Simulation P&O.

III.2.6 Les paramètres des méthodes MPPT

Les tableaux III.3 et III.4 donnent les paramètres des méthodes MPPTs ainsi leurs entrées respectivement.

Tableau III. 3 Les paramètres des MPPT méthodes

Techniques	Paramètres	Valeurs
P&O	Delta	0.001
Mode glissant avec surface imposé	K	0.03
Mode glissant avec surface Slotine	K	20
	Λ	0.03

Tableau III. 4 les entrés des MPPT méthodes

Techniques	Les entrés	nombres
P&O	V_{pv}, I_{ph}	2
Mode glissant avec surface imposé	V_{pv}, I_{ph}, V_o	3
Mode glissant avec surface Slotine	$V_{pv}, I_{ph}, V_o, I_L, V_{ref}$	5

D'après le tableau III.4, la méthode mode glissant avec surface de Slotine utilisé présente plus d'entrées comparativement aux deux autres méthodes utilisées.

III.2.7 L'effet de convertisseur boost sur tension et puissance

Dans ce test, la température et l'ensoleillement sont maintenus constants. On prend la température à $T=25^{\circ}\text{C}$ et l'ensoleillement à $1000\text{W}/\text{m}^2$ et la charge $R=20\Omega$.

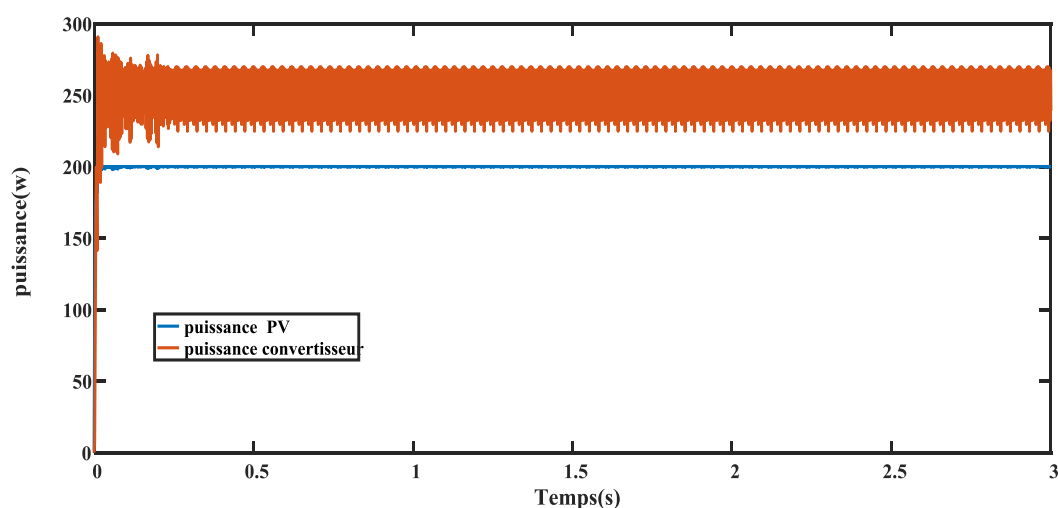


Figure III. 8 Effet du convertisseur sur la puissance.

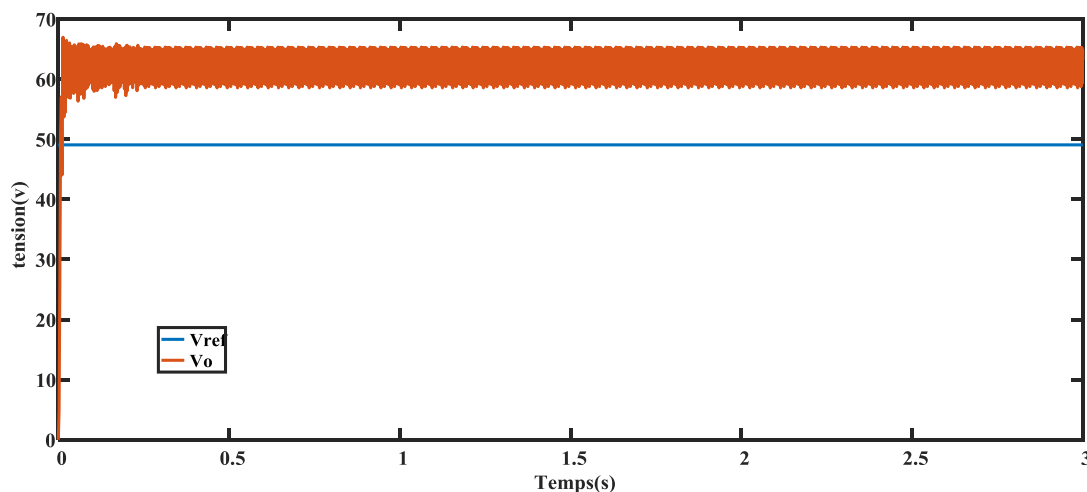


Figure III. 9 Effet du convertisseur sur la tension.

Les figure III.7 et III.8 montrent que le convertisseur peut élever la puissance et la tension.

III.2.8 L'effet de MPPT sur la puissance.

Dans ce test, la température et l'ensoleillement sont maintenus constants. On prend la température à $T=25^{\circ}\text{C}$ et l'ensoleillement à $1000\text{W}/\text{m}^2$.

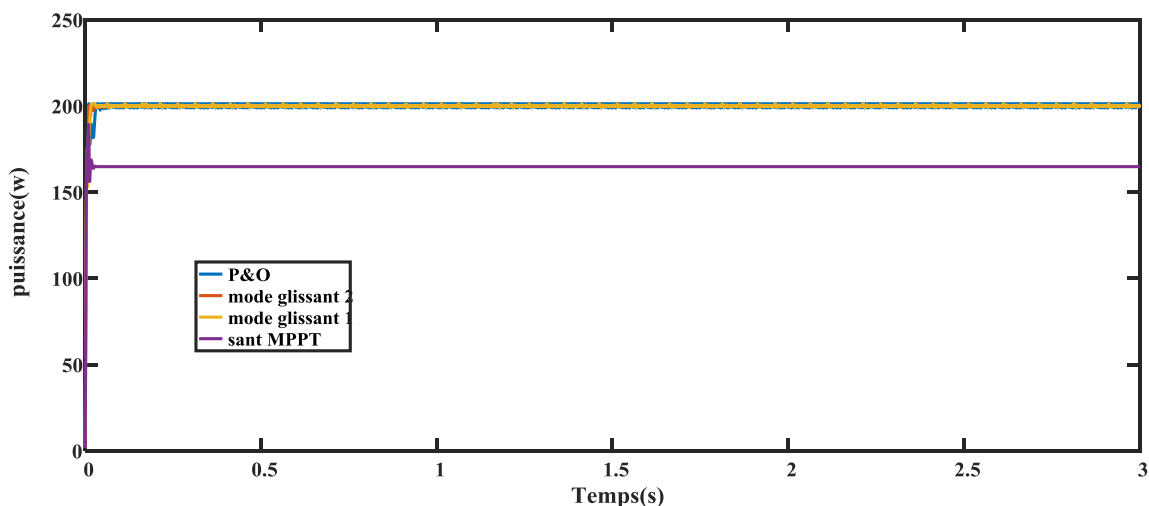


Figure III. 10 Effet des commandes MPPT sur la puissance.

La figure III.9 montre clairement que les trois méthodes de (P&O, Mode glissement surface imposé, Mode de glissement surface Slotine) garantissent le point de puissance maximale.

III.2.9 Fonctionnement de MPPT sous des conditions constantes.

Dans ce test, la température et l'ensoleillement sont maintenus constants. On prend la température à $T=25^{\circ}\text{C}$ et l'ensoleillement à $1000\text{W}/\text{m}^2$.

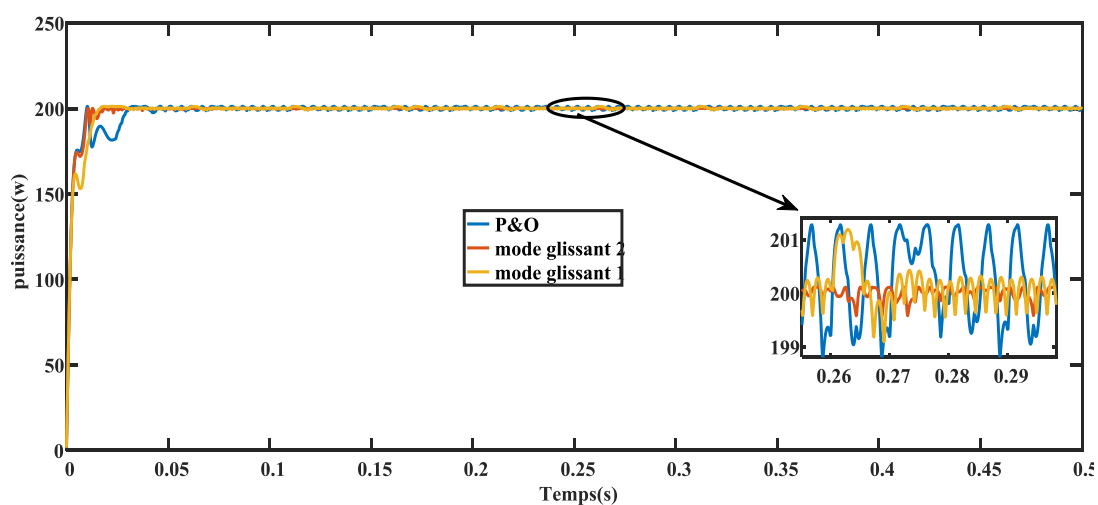


Figure III. 11 Allures des puissances sous conditions stables ($G=1000\text{W}/\text{m}^2$, $T=25^{\circ}\text{C}$).

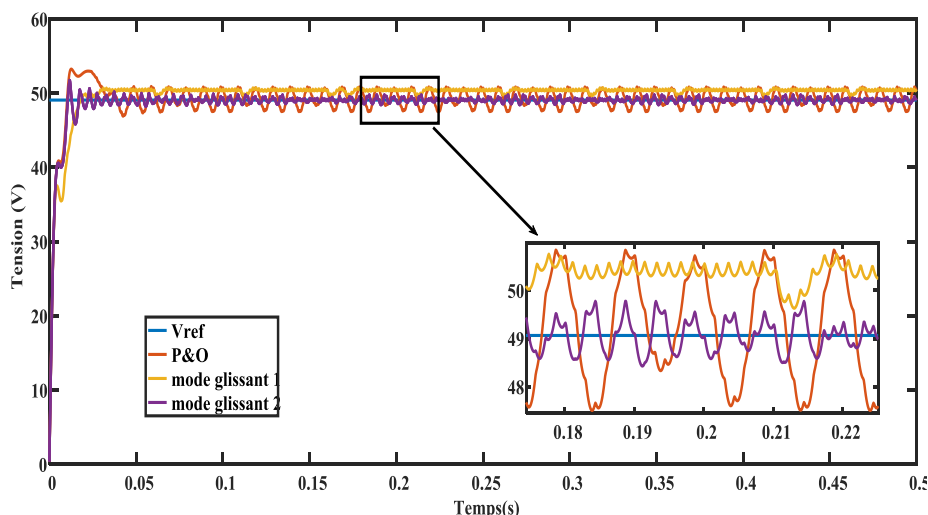


Figure III. 12 allures des tensions sous conditions stables ($G=1000W/m^2$, $T=25C^\circ$).

La figure III.10 montre clairement que les trois méthodes (P&O, Mode glissement surface imposé, Mode de glissement surface Slotine) garantissent le point de puissance maximale. La technique mode glissement surface Slotine assure le point maximum avec moins d'oscillation par rapport aux autres méthodes.

Comme on peut le voir sur la figure III.11, les trois méthodes suivent exactement la tension de référence, la méthode Mode de glissement surface Slotine suit la référence avec une performance élevée (moins d'oscillation et d'erreur) par rapport aux autres méthodes.

III.2.10 Fonctionnement de MPPT sous des conditions variables

Afin d'étudier le comportement du système face aux changements de l'éclairement, nous allons appliquer le test suivant comme indiqué sur la figure III.6. On a fait varier rapidement l'ensoleillement de ($1000W/m^2$ à $800W/m^2$, $T=25C^\circ$) puis de ($800W/m^2$ à $1000W/m^2$, $T=25C^\circ$).

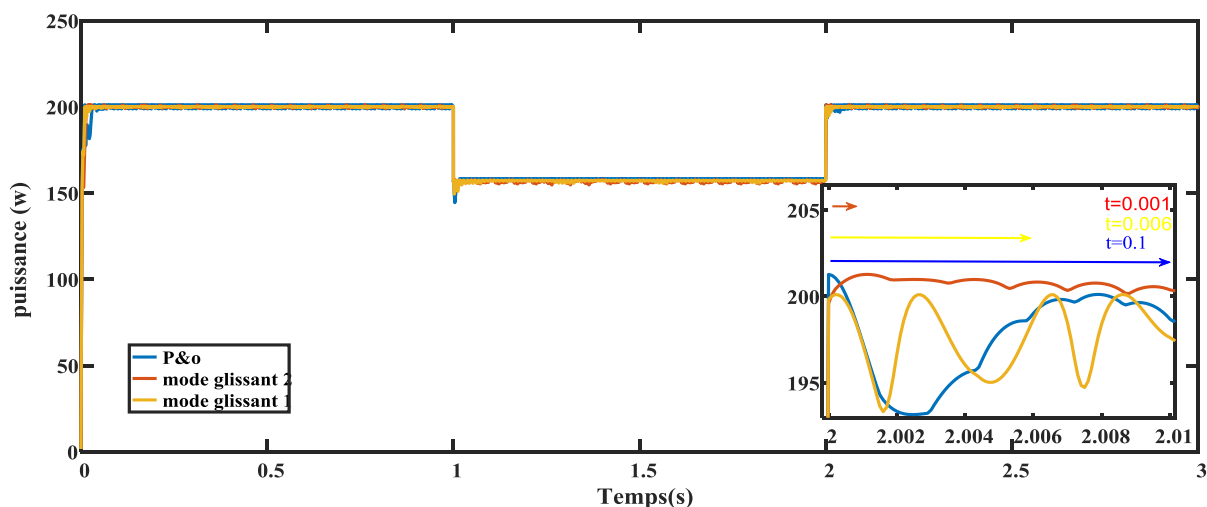


Figure III. 13 allures des puissances sous conditions variables (temps de réponse).

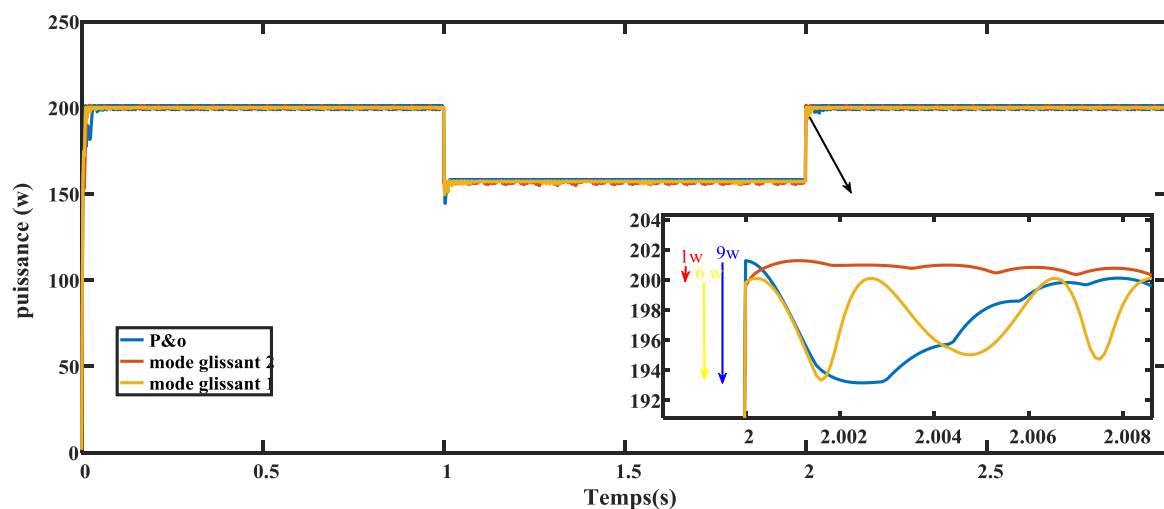


Figure III. 14 allures des puissances sous conditions variable (le dépassement).

D'après la figure III.12 et figure III.13, le dépassement, l'oscillation et le temps de réponse de la puissance de sortie des méthodes MPPT proposés sont présentés au tableau III.5. Dans lequel on peut observer une amélioration considérable obtenue avec la méthode MPPT mode glissant avec surface Slotine. Une comparaison des performances MPPT a été montrée dans le tableau III.5.

Visant à comparer et ajuster de manière appropriée chaque algorithme en fonction à l'application, il devient nécessaire de fournir des mesures de performance qui peuvent être utilisées pour les critères de comparaison. Au-delà des mesures typiques des réponses dynamiques, il existe également des mesures supplémentaires qui peuvent être utilisées. Parce que l'énergie transmise est essentielle pour l'utilisation du PV comme source d'énergie, les mesures importantes sont le dépassement et l'oscillation.

Tableau III. 5 Performances des Méthodes MPPT étudiées

	Dépassement (w)	Oscillation (W)	Temps de réponse (S)
P&O	9	2.3	0.1
Mode glissant surface imposé	7	0.7	0.006
Mode glissant surface Slotine	1	0.5	0.001

III.3 Conclusion

Le fonctionnement du générateur photovoltaïque à un rendement optimal nécessite l'insertion de convertisseurs statiques (généralement un convertisseur DC-DC) entre le générateur et la charge. Pour assurer le fonctionnement d'un générateur photovoltaïque à son point de puissance maximale (MPP), des contrôleurs MPPT sont souvent utilisés. Ces contrôleurs minimisent l'erreur entre la puissance de fonctionnement et la puissance maximale de référence variable en fonction des conditions climatiques.

Dans ce chapitre, nous avons appliqué trois commandes MPPT (P&O, mode glissant avec surface imposé et surface Slotine au système PV associant panneau PV – hacheur – charge. Nous avons ensuite présenté des résultats de simulation pour une variation de la température et de l'éclairement. Les résultats de simulation montre un fonctionnement relativement satisfaisant du système PV en utilisant la commande MPPT-P&O. Cependant, la commande mode glissant avec surface Slotine offre de meilleures performances, en régime statique et en régime dynamique, que la commande P&O et mode glissant avec surface imposé.

Conclusion Générale

Conclusion générale

Le travail présenté dans ce mémoire porte sur l'amélioration des performances du fonctionnement d'un système photovoltaïque (PV) commandé par la technique MPPT tout en assurant la poursuite de la puissance maximale fournie par le panneau photovoltaïque. Pour que ces systèmes de production soient rentables, c'est-à-dire : simple, fiable et à moindre coût, il faut optimiser toute la chaîne de production pour obtenir de bons rendements. Le travail mené dans ce mémoire a été porté sur l'optimisation de fonctionnement d'un générateur PV dans la chaîne de conversion photovoltaïque. Un générateur PV possède une caractéristique $I - V$ non-linéaire et un seul point de fonctionnement optimal (puissance maximale) varié en fonction de l'éclairement et de la température. Pour maintenir le fonctionnement du générateur à ce point, et obtenir un bon rendement, un contrôle en permanence du GPV via un étage d'adaptation est indispensable.

Après la présentation des modèles du GPV, le hacheur élévateur (Boost) et sa stratégie de commande MLI, nous avons ensuite donné l'aspect théorique des trois techniques pour le suivi du point de fonctionnement de puissance maximale du système PV. Nous avons commencé par la méthode la plus utilisée MPPT par perturbation et observation (MPPT-P&O); qui a un organigramme simple à implémenter et qui assure une convergence acceptable. Ensuite nous avons introduit les deux méthodes mode glissant à surface imposée et surface Slotine.

Nous pouvons aussi, conclure que :

- ✚ Les performances du panneau PV se dégradent avec la diminution de l'intensité d'éclairement presque linéairement.
- ✚ Les performances du panneau PV se dégradent avec l'augmentation de la température, mais peut être négligeable par rapport l'effet de l'éclairement.
- ✚ Le convertisseur survolteur fournit une tension à sa sortie supérieure à celle fournie par le panneau PV.
- ✚ Un fonctionnement relativement satisfaisant du système PV est atteint en utilisant la commande MPPT-P&O.
- ✚ La commande mode glissant offre de meilleures performances, en régime statique et en régime dynamique, que la commande MPPT-P&O. La commande mode glissant avec surface Slotine donne un meilleur résultat, plus rapide moins d'oscillation et capable d'être adapté avec différentes conditions.

En perspectives, on propose quelques tâches à traiter ultérieurement, comme :

- ✚ Effectuer des essais expérimentaux avec des panneaux solaires réels;
- ✚ Étendre le principe de la technique MPPT proposée sur d'autres topologies de ;
- ✚ L'amélioration de l'algorithme Perturbation et Observation peut intégrer une autre approche comme la logique floue...etc.

Résumé :

La puissance produite par un module photovoltaïque est influencée par l'intensité de l'irradiation solaire et la température des cellules. Aussi afin de maximiser les performances des systèmes d'énergie renouvelable il est nécessaire de poursuivre le point de puissance maximale de la source d'entrée.

Dans ce travail on a présenté trois méthode de poursuite du point de puissance maximale utilisant P&O, le mode glissant avec surface imposé et le mode glissant avec surface Slotine, afin d'améliorer les performances de conversion de l'énergie photovoltaïque et comparé les trois techniques et présenté ces performances.

Ensuite, une étude comparative entre ces trois algorithmes a été réalisée. Il convient de mentionner que notre système se compose d'un panneau photovoltaïque, d'un convertisseur DC-DC et d'un contrôle MPPT afin de sélectionner le contrôle le plus fiable en termes d'efficacité, de temps de réponse et d'oscillations.

Mots clés : Convertisseur DC-DC, MPPT, Photovoltaïque, mode glissant, systèmes, P&O.

Abstract:

The intensity of direct solar radiation and the temperature of the cells have quite an influence on the power generated by solar panels. It also is essential to track the maximum power point of the input source in order to maximize the performance of renewable energy systems.

In order to improve the performance of photovoltaic energy conversion, we provided three methods of tracking the point of maximum power using P&O, the sliding mode with imposed surface, and the sliding mode with Slotine surface, and evaluated the three techniques.

Then, a comparative study between these three algorithms has been performed. It is worth mentioning that our system consists of a PV panel, a DC-DC converter and an MPPT control in order to select the most reliable control in terms of efficiency, response time and oscillations.

Keywords: DC-DC converter, MPPT, Photovoltaic, sliding mode, P&O, systems.

الملخص:

تؤثر شدة الإشعاع الشمسي المباشر ودرجة حرارة الخلايا بشكل كبير على الطاقة التي تولدها الألواح الشمسية. من الضروري أيضًا متابعة أقصى نقطة طاقة لمصدر الإدخال من أجل تعظيم أداء أنظمة الطاقة المتجددة من أجل تحسين أداء تحويل الطاقة الكهروضوئية ، قدمنا ثلاث طرق لتتبع نقطة الطاقة القصوى باستخدام P&O ، ووضع الانزلاق مع السطح المفروض ، ووضع الانزلاق مع السطح المشقوق.

ثم تم إجراء دراسة مقارنة بين هاتين الخوارزميات. من الجدير بالذكر أن نظامنا يتكون من لوحة الكهروضوئية ومحول DC-DC وجهاز تحكم MPPT من أجل تحديد التحكم الأكثر موثوقية من حيث الكفاءة ووقت الاستجابة والتذبذبات
الكلمات الرئيسية: محول ، MPPT ، الخلايا الكهروضوئية ، الوضع المنزلق ، أنظمة P&O

Références bibliographiques

- [1] M. F. Shraif, “Optimisation et mesure de chaîne de conversion d’énergie photovoltaïque en énergie électrique.” Toulouse 3, 2002.
- [2] Y. BOUVIER and S. PEHLIVANIAN, “Une histoire à écrire: le photovoltaïque.”
- [3] B. FELLAH, “Système hybride photovoltaïque-éolien, de production d’électricité. Application aux sites de Tlemcen et de Bouzaréah,” 2012.
- [4] B. Assam, S. Messalti, and A. Harrag, “New Improved Hybrid MPPT Based on Backstepping-sliding Mode for PV System,” *J. Eur. des Syst. Autom.*, vol. 52, no. 3, 2019, doi: 10.18280/jesa.520313.
- [5] A. Labouret, P. Cumunel, J. P. Braun, and B. Faraggi, “Cellules solaires, les bases de l’énergie photovoltaïque 4 ème édition,” *ETSF éditions Tech. Sci. français*, 2010.
- [6] M. Taleb, “Performance of a Maximum Power Point Tracker (MPPT) Photovoltaic Generator (PVG),” *Electr. Power Components Syst.*, vol. 35, pp. 367–375, Apr. 2007, doi: 10.1080/15325000601023589.
- [7] S. A. Tadjer, A. Idir, and F. Chekired, “Comparative performance evaluation of four photovoltaic technologies in saharan climates of Algeria: Ghardaïa pilot station,” *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science (IJEECS)*, vol. 18, no. 2, pp. 586-598, 2020.
- [8] M. A. Abdourraziq and M. Maaroufi, “Experimental Verification of the main MPPT techniques for photovoltaic system,” *Int. J. Power Electron. Drive Syst.*, vol. 8, no. 1, p. 384, 2017.
- [9] A. Boudia, “Contribution à l’étude d’un système photovoltaïque connecté au réseau électrique avec un système de stockage à base d’une inductance supraconductrice (SMES).” Univ M’sila, 2020.
- [10] Y. Lasmi, “Optimisation de la poursuite du point de puissance maximale (MPPT) d’un système photovoltaïque par les techniques intelligentes.” 2018.
- [11] S. Messalti, “A new neural networks MPPT controller for PV systems,” in *IREC2015 the sixth international renewable energy congress*, 2015, pp. 1–6.
- [12] M. R. Vincheh, A. Kargar, and G. A. Markadeh, “A hybrid control method for maximum power point tracking (MPPT) in photovoltaic systems,” *Arab. J. Sci. Eng.*, vol. 39, no. 6, pp. 4715–

- 4725, 2014.
- [13] A. Oi, “Design and simulation of photovoltaic water pumping system,” *Calif. Polytech. State Univ.*, 2005.
- [14] S. Farhani, E. M. Barhoumi, and F. Bacha, “Design and hardware investigation of a new configuration of an isolated DC-DC converter for fuel cell vehicle,” *Ain Shams Eng. J.*, vol. 12, no. 1, pp. 591–598, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.asej.2020.07.014>.
- [15] A. J. Forsyth and S. V Mollov, “Modelling and control of DC-DC converters,” *Power Eng. J.*, vol. 12, no. 5, pp. 229–236, 1998.
- [16] H. J. Sira-Ramirez and R. Silva-Ortigoza, *Control design techniques in power electronics devices*. Springer Science & Business Media, 2006.
- [17] A. ZORIG and H. E. GHADBANE, “Simulation par PIL de la commande par mode glissant de deux convertisseurs buck et boost entrelacés.” UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF-M’SILA, 2019.
- [18] B. Abdenoure, “Commande par mode de glissement des convertisseurs Buck et Boost intégrés dans un système photovoltaïque.” UNIVERSITE DE MOHAMED BOUDIAF M’SILA FACULTE DE TECHNOLOGIE, 2016.
- [19] J. Linares-Flores, A. H. Méndez, C. García-Rodríguez, and H. Sira-Ramírez, “Robust nonlinear adaptive control of a ‘boost’ converter via algebraic parameter identification,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 61, no. 8, pp. 4105–4114, 2013.
- [20] E. Lakhdar and C. Khalid, “Etude et Optimisation du transfert d’énergie électrique en conversion photovoltaïque par la recherche du point de puissance maximal (MPPT),” 2020.
- [21] N. Kacimi, S. Grouni, A. Idir, and M. Seghir Boucherit, “New improved hybrid MPPT based on neural network-model predictive control-kalman filter for photovoltaic system,” *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, vol. 20, no. 3, p. 1230, 2020.
- [22] N. Khaehintung, T. Wiangtong, and P. Sirisuk, “FPGA implementation of MPPT using variable step-size P&O algorithm for PV applications,” in *2006 International Symposium on Communications and Information Technologies*, 2006, pp. 212–215.
- [23] W. J. A. Teulings, J. C. Marpinard, A. Capel, and D. O’sullivan, “A new maximum power point tracking system,” in *Proceedings of IEEE Power Electronics Specialist Conference-PESC’93*, 1993, pp. 833–838.
- [24] D. P. Hohm and M. E. Ropp, “Comparative study of maximum power point tracking algorithms,” *Prog. photovoltaics Res. Appl.*, vol. 11, no. 1, pp. 47–62, 2003.
- [25] D. Sera, T. Kerekes, R. Teodorescu, and F. Blaabjerg, “Improved MPPT algorithms for rapidly

- changing environmental conditions,” in *2006 12th International Power Electronics and Motion Control Conference*, 2006, pp. 1614–1619.
- [26] M. Ahmed, “Sliding mode control for switched mode power supplies,” 2004.
- [27] T. Amieur, “Commande des systemes non linéaires par mode glissant flou.” Université Mohamed Khider-Biskra, 2009.
- [28] S. Hajri, “Commande dynamique par mode glissant: application à la robustification des processus complexes.” Lille 1, 1997.
- [29] J.-J. E. Slotine and W. Li, *Applied nonlinear control*, vol. 199, no. 1. Prentice hall Englewood Cliffs, NJ, 1991.
- [30] A. Idir, A. Ahriche, K. Khettab, Y. Bensafia, M. Kidouche, “Real time simulation of sensorless control based on backEMF of PMSM on RT- Lab/ARTEMIS real-time digital simulator,” *International Journal of Advances in Applied Sciences*, vol. 8, 2019.
- [31] Y. Levron and D. Shmilovitz, “Maximum power point tracking employing sliding mode control,” *IEEE Trans. Circuits Syst. I Regul. Pap.*, vol. 60, no. 3, pp. 724–732, 2013.
- [32] C.-C. Chu and C.-L. Chen, “Robust maximum power point tracking method for photovoltaic cells: A sliding mode control approach,” *Sol. Energy*, vol. 83, no. 8, pp. 1370–1378, 2009.
- [33] A. Kechich and B. Mazari, “La commande par mode glissant: Application à la machine synchrone à aimants permanents (approche linéaire),” *Afrique Sci.*, vol. 4, no. 1, pp. 21–37, 2008.
- [34] A. Idir, A. Ahriche, K. Khettab, Y. Bensafia, M. Kidouche, “Real time simulation of sensorless control based on backEMF of PMSM on RT- Lab/ARTEMIS real-time digital simulator,” *International Journal of Advances in Applied Sciences*, vol. 8, 2019.
- [35] Ahriche A, Kidouche M, Idir A, et al. (2016) Combining sliding mode and second Lyapunov function for flux estimation. *Revue Roumaine des Sciences Techniques Série Electrotechnique et Energétique* 61(2): 106–110.
- [36] A. Boudia, S. Messalti, and A. Harrag, “Modeling and Control of Power System Containing PV System and SMES using Sliding Mode and Field Control Strategy,” 2020.