

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA

FACULTE DE TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT GENIE ELECTRIQUE

N° :



DOMAINE : Sciences et Technologies

FILIERE : Energie Renouvelable en
Electrotechnique

OPTION : Energie Renouvelable

Mémoire présenté pour
l'obtention Du diplôme de
Master Académique

Par : **TIHAR RAZKI** & **KHALFALLAH ALI**

Intitulé

**Etude comparative par simulation des différents
algorithmes de commande MPPT dans une chaine de
conversion PV**

Soutenu devant le jury composé de :

Mr. Bouchelaghem Ahmed	Université Mohamed Boudiaf de M'Sila	Président
Mr. Saigaa Djamel	Université Mohamed Boudiaf de M'Sila	Encadreur
Mr. Azi Alaeddin Ahmed		Co-encadreur
Mr. Drif Mahmoud	Université Mohamed Boudiaf de M'Sila	Examineur

Année universitaire : 2021/2022



Remerciements

Nous tenons à remercier to d'abord notre créateur {Allah} pour nous avoir donné de la force à accomplir ce travail.

Spécialement nos chers parents pour qui ont toujours la pour nous.

Notre encadreur : Dr. Saigaa Djamel pour leur aide et conseil.

Remerciements speciale pour Mr. Alaeddine Ahmed Azi de nous avoir suivre et guider durant ce travail.

Nos remerciements sont adressés à tous les membres du jury, pour l'honneur qu'ils nous font en acceptant d'examiner ce mémoire et pour leur Bienveillante attention.

Nous adressons nos remerciements à tous nos professeurs honorés depuis plus de 3 ans ... et plus particulièrement a mes parents, que Dieu les préservent et de les sauvegardent.

Enfin, nous adressons nos sincères remerciements à tous Nos proches et amis qui nous ont toujours soutenues et Encouragés au cours de la réalisation de ce mémoire.



Dédicace

Je dédie ce modeste travail...

*Avant tous, je remercie ALLAH le tout puissant de
M'avoir donné le courage et la patience pour réaliser
Ce travail A la lumière de ma vie, ma mère.*

*A mon très cher père. A ma grand-mère, mon deuxième mère
et a ma tante.*

*A mes adorables sœurs et mon petit frère Modjibe Elrahman.
A l'esprit de mon cher frère Saddam Hossin .*

*A les copins de la chambre d 83 et tous mes copins sans
exepsion.*

Dédicace

Je dédie ce modeste travail...

*Avant tous, je remercie ALLAH le tout puissant de
M'avoir donné le courage et la patience pour réaliser
Ce travail.*

*A mes très chers parents ma mère et mon père. A tous la
famille GASMI et KHALFALLAH.*

A mes adorables sœurs et mon frère Mohamed.

A tous mes copins sans exception.

ALI

Résumé

Les énergies renouvelables présentant de nombreux avantages dans la vie humaine en raison de ses multiples utilisations, parmi lesquelles nous trouvons l'énergie Photovoltaïque. L'inconvénient majeur de cette énergie est qu'elle soit non linéaire et opère au point requis par la charge.

Donc une intelligence d'optimisation est indispensable pour faire fonctionner un GPV à son maximum, et cette intelligence traduis par une commande soit utilisée pour piloter un dispositif intermédiaire soit un convertisseur DC-DC qui a lui se positionnera entre le GPV et la charge.

Pour fonctionner un système PV efficacement, nous utilisons une configuration de convertisseurs DC-DC pilotés par un système MPPT spécifique doit être respectée. Afin d'arriver a une configuration optimale, nous avons établis une étude par simulation de trois types de convertisseurs DC-DC les plus utilisés pilotés chaqu'un par trois types de commandes MPPT pour évaluer la convergence en (temps et en qualité) vers le point de puissance maximale.

Mots clés : Energie renouvelable, générateur photovoltaïque, MPPT, convertisseur DC-DC.

Abstract:

Renewable energies have many advantages in human life due to their multiple uses, among which we find photovoltaic energy is the most widely used. The major disadvantage of this energy is that it is non-linear and operates at the point required by the load.

Therefore optimization intelligence is essential to operate a GPV to its maximum, and this intelligence translates into a command either used to drive an intermediate device or a DC-DC converter which will be positioned between the GPV and the load.

To operate a PV system efficiently, we use a configuration of DC-DC converters driven by a specific MPPT system must be respected.

In order to arrive at an optimal configuration, we have established a study by simulation of three types of the most used DC-DC converters driven each one by three types of MPPT commands to evaluate the convergence in (time and quality) towards the maximum power point.

Keywords:

Renewable energy, photovoltaic generator, MPPT, DC-DC converters, radiating

Sommaire

Résumé :	6
Abstract:	6
Introduction générale :	1
CHAPITRE 1-SYSTEME DE CONVERSION PHOTOVOLTAIQUE	
1.1 Introduction	3
1. 2 Cellule PV	3
1.2.1. Types de cellules photovoltaïques	4
1.2.1.1. Les cellules monocristallines	4
1.2.1.2. Les cellules poly-cristallines	4
1.2.1.3. Cellule en silicium amorphe	5
1.2.2. Modélisation de cellule PV	5
1.2.2.1. Modèle idéal	5
1.2.2.2. Modèle réel à une diode	6
1. 3 Générateurs PV	7
1.3.1. Association des cellules PV	7
1.3.1.1 Association en série	7
1.3.1.2 Association en parallèle	8
1.4 La puissance maximale (Pmp)	9
1.4 L'effet du rayonnement et de la température sur un GPV	9
1.4.1 Influence de l'éclairement sur les modules photovoltaïques	10
1.4.2 Influence de la température sur les modules photovoltaïques	11
1.5 Connexion directe d'un GPV	11
1.6 Introduction d'un Etage DC-DC	13
1.7 Conclusion	14
CHAPITRE 2-Convertisseurs DC-DC et Techniques MPPT	
2.1 Introduction	15
2.2 Les convertisseurs DC-DC	15
2.2.1 Exemples de convertisseurs DC-DC	15
2.2.1.1 Convertisseurs DC-DC isolés	15
2.2.1.2 Convertisseurs DC-DC non isolés	15
2.2.2 Convertisseur Buck (abaisseur)	16
Conduction continue	16
2.2.3 Convertisseur Boost (survolteur)	17
Conduction continue	18
2.2.4 Hacheur Buck-Boost (dévolteur-survolteur)	20
Conduction continue	21
2.3 Définition d'un MPPT	22
2.3.1. Classification Des Commandes MPPT Selon Le Type De Recherche	23
2.3.1.1. Méthodes indirectes	23
2.3.1.2. Méthodes directes	23
2.3.2. Les différents algorithmes de commandes MPPT	23
2.3.2.1. Algorithme Perturber et Observer (P&O)	23
2.3.2.2. Algorithmes Perturber et Observer (P&O) avec pas variable	24
2.3.2.3. Algorithme Incrément de la Conductance (INC)	25
2.3.2.4. Algorithme "Hill Climbing"	26
2.3.2.5. Algorithme de Fraction de la Tension Voc (FCO)	27

2.3.2.6. Algorithme de Fraction du Courant Isc (FCC)	28
2.3.2.7. Les commandes MPPT basées sur le principe de la logique floue (FLC)	29
2.3.2.8. Les commandes MPPT de réseaux de neurones artificiels (ANN).....	29
2.4. Conclusion	30

CHAPITRE 3-SIMULATION DES COMMANDES MPPT DANS UNE CHAINE DE CONVERSION PHOTOVOLTAIQUE

3.1 Introduction	32
3.2 Les caractéristiques du module SOLAREX MSX-60	32
3.3 Schéma de caractérisation du Module MSX-60 :	32
3.4 Résultat de simulation :	32
3.5 Effet du changement climatique (Rayonnement/Température) :	33
3.5.1 Effet du Rayonnement :	33
3.5.1.1 Schéma de simulation :	33
3.5.1.2 Résultat de simulation :	33
3.5.2 Effet de la Température :	34
3.5.2.1 Schéma de simulation :	34
3.5.2.2 Résultat de simulation :	34
3.6 Les techniques de poursuite du point de puissance maximale (MPPT):	35
3.6.1 La méthode P&O:	35
3.6.1.1 P&O avec DC-DC Boost:	35
3.6.1.2 Résultat de simulation de la commande MPPT P&O avec DC-DC Boost sous STC:	36
3.6.1.3 Résultat de simulation de la commande MPPT P&O avec DC-DC Boost sous changement de rayonnement G:	36
3.6.1.4 P&O avec DC-DC Buck:	37
3.6.1.5 Résultat de simulation de la commande MPPT P&O avec DC-DC Buck sous STC:	37
3.6.1.6 Résultat de simulation de la commande MPPT P&O avec DC-DC Buck sous changement de rayonnement G:	37
3.6.1.7 P&O avec DC-DC Buck-Boost:	38
3.6.1.8 Résultat de simulation de la commande MPPT P&O avec DC-DC Buck-Boost sous STC:	38
3.6.1.9 Résultat de simulation de la commande MPPT P&O avec DC-DC Buck-Boost sous changement de rayonnement G:	39
3.6.2 La méthode Incrément de Conductance (INC):	39
3.6.2.1 INC avec DC-DC Boost:	39
3.6.2.2 Résultat de simulation de la commande MPPT INC avec DC-DC Boost sous STC:	40
3.6.2.3 Résultat de simulation de la commande MPPT INC avec DC-DC Boost sous changement de rayonnement G:	40
3.6.2.4 INC avec DC-DC Buck:	41
3.6.2.5 Résultat de simulation de la commande MPPT INC avec DC-DC Buck sous STC:	41
3.6.2.6 Résultat de simulation de la commande MPPT INC avec DC-DC Buck sous changement de rayonnement G:	41
3.6.2.7 INC avec DC-DC Buck-Boost:	42
3.6.2.8 Résultat de simulation de la commande MPPT INC avec DC-DC Buck-Boost sous STC:	42
3.6.2.9 Résultat de simulation de la commande MPPT INC avec DC-DC Buck-Boost sous changement de rayonnement G:	43

3.6.3 La méthode Hill_Climbing (HC):	43
3.6.3.1 HC avec DC-DC Boost:	44
3.6.3.2 Résultat de simulation de la commande MPPT HC avec DC-DC Boost sous STC:	44
3.6.3.3 Résultat de simulation de la commande MPPT HC avec DC-DC Boost sous changement de rayonnement G:	44
3.6.3.4 HC avec DC-DC Buck:	45
3.6.3.5 Résultat de simulation de la commande MPPT HC avec DC-DC Buck sous STC:	45
3.6.3.6 Résultat de simulation de la commande MPPT HC avec DC-DC Buck sous changement de rayonnement G:	45
3.6.3.7 HC avec DC-DC Buck-Boost:	46
3.6.3.8 Résultat de simulation de la commande MPPT HC avec DC-DC Buck-Boost sous STC:	46
3.6.3.9 Résultat de simulation de la commande MPPT HC avec DC-DC Buck-Boost sous changement de rayonnement G:	47
3.7 La comparaison :	48
3.8 Discussion :	48
3.9 Dédutions :	48
3.8 Conclusion	49
CONCLUSION GENERALE	50
PERSPECTIVES:	50

LISTE DE FIGURES

Figure 1.1 Caractéristique électrique d'une cellule photovoltaïque.....	4
Figure 1.2 Principaux types de cellules PV.....	5
Figure 1.3 circuit équivalent du modèle idéal d'une cellule	5
Figure 1.4 Circuit équivalent du modèle réel d'une cellule PV.	6
Figure 1.5 Générateur photovoltaïque.....	7
Figure 1.6 Schéma de deux cellules photovoltaïques associées en série	7
Figure 1.7 Caractéristiques électriques d'une association de ns cellules PV identiques en série.....	8
Figure 1.8 Caractéristiques électriques d'une association de np cellules PV identiques en parallèle.	8
Figure 1.9 les caractéristiques électriques d'un module PV par rapport de celle de cellules.	9
Figure 1.10 Caractéristique I-V d'un générateur photovoltaïque.....	9
Figure 1.11 Caractéristique P-V d'un générateur photovoltaïque.	9
Figure 1.12 Caractéristiques I(V) d'un GPV	10
Figure 1.13 Caractéristique d'un générateur photovoltaïque pour différents éclairagements	11
Figure 1.14 Influence de la température sur la caractéristique électrique.....	11
Figure 1.15 Couplage direct	12
Figure 1.16 Schéma synoptique d'un système de conversion Photovoltaïque.....	13
Figure 1.17 Convertisseur DC-DC	14
Figure 2.16 Convertisseur Buck	16
Figure 2.17 L'état de l'interrupteur S du convertisseur Buck	16
Figure 2.18 Formes d'ondes courant/tension dans un convertisseur Buck	17
Figure 2.19 Convertisseur Boost	18
Figure 2.20 les deux configurations d'un convertisseur Boost suivant l'état de l'interrupteur S	18
Figure 2.21 Formes d'ondes courant/tension dans un convertisseur Boost.....	19
Figure 2.22 Convertisseur Buck-Boost	20
Figure 2.23 Les deux configurations d'un convertisseur Buck-Boost suivant l'état de l'interrupteur S	21
Figure 2.24 Formes d'ondes courant/tension dans un convertisseur Buck-Boost	21
Figure 2.25 Recherche du PPM par la méthode P&O	24
Figure 2.26 Organigramme de l'algorithme P&O.34.....	24
Figure 2.27 partiel organigramme d'algorithme P&O variable.	25
Figure 2.28 Positionnement du point de fonctionnement suivant la valeur de $\Delta I_{PV}/\Delta V_{PV}$ sur les caractéristiques de I-V	26
Figure 2.29 Organigramme de l'algorithme INC.	26
Figure 2.30 Organigramme de l'algorithme Hill Climbing.....	27
Figure 2.31 Organigramme de l'algorithme FCO	28
Figure 2.32 Organigramme de l'algorithme FCC	28
Figure 2.33 Les commandes MPPT basées sur le principe de la logique floue (a)exemple de structure de base de la commande floue. (b) exemple d'une table de vérité pour une commande logique floue	29
Figure 2.34 Exemple d'un réseau de neurones	30
Figure 3.1 Schéma de Caractérisation du Module MSX-60.....	32
Figure 3.1 Schéma de Caractérisation du Module MSX-60.....	32
Figure 3.2 Courbes I(V) P(V) du Module MSX-60	33
Figure 3.5.1.1 Schéma de simulation de l'effet du rayonnement.....	33
Figure 3.5.1.2 Courbes I(V) P(V) de l'effet du rayonnement	34

Figure 3.5.2.1 Schéma de simulation de l'effet de la Température.....	34
Figure 3.5.2.2 Courbes I(V) P(V) de l'effet de la Température	35
Figure 3.6.1.1 Schéma de simulation de la commande MPPT avec un DC-DC Boost.....	35
Figure 3.6.1.2 Courbes Iload(t) Pload(t) Vload(t) de la MPPT P&O.....	36
Figure 3.6.1.3 Courbes Iload(t) Pload(t) Vload(t) de la MPPT P&O sous changement de G.	36
Figure 3.6.1.4 Schéma de simulation de la commande MPPT avec un DC-DC Buck	37
Figure 3.6.1.5 Courbes Iload(t) Pload(t) Vload(t) de la MPPT P&O avec DC/DC Buck. .	37
Figure 3.6.1.6 Courbes Iload(t) Pload(t) Vload(t) de la MPPT P&O avec DC-DC Buck sous changement de G.	38
Figure 3.6.1.7 Schéma de simulation de la commande MPPT avec un DC-DC Buck-Boost	38
Figure 3.6.1.8 Courbes Iload(t) Pload(t) Vload(t) de la MPPT P&O avec DC/DC Buck- Boost.....	39
Figure 3.6.1.9 Courbes Iload(t) Pload(t) Vload(t) de la MPPT P&O avec DC-DC Buck-Boost sous changement de G.	39
Figure 3.6.2.1 Schéma de simulation de la commande MPPT avec un DC-DC Boost.....	40
Figure 3.6.2.2 Courbes Iload(t) Pload(t) Vload(t) de la MPPT INC.....	40
Figure 3.6.2.3 Courbes Iload(t) Pload(t) Vload(t) de la MPPT INC sous changement de G.	41
Figure 3.6.2.4 Schéma de simulation de la commande MPPT avec un DC-DC Buck	41
Figure 3.6.2.5 Courbes Iload(t) Pload(t) Vload(t) de la MPPT INC avec DC/DC Buck. ...	41
Figure 3.6.2.6 Courbes Iload(t) Pload(t) Vload(t) de la MPPT INC avec DC-DC Buck sous changement de G.	42
Figure 3.6.2.7 Schéma de simulation de la commande MPPT avec un DC-DC Buck-Boost	42
Figure 3.6.2.8 Courbes Iload(t) Pload(t) Vload(t) de la MPPT INC avec DC/DC Buck- Boost.....	43
Figure 3.6.2.9 Courbes Iload(t) Pload(t) Vload(t) de la MPPT INC avec DC-DC Buck- Boost sous changement de G.	43
Figure 3.6.3.1 Schéma de simulation de la commande MPPT avec un DC-DC Boost.....	44
Figure 3.6.3.2 Courbes Iload(t) Pload(t) Vload(t) de la MPPT HC.	44
Figure 3.6.3.3 Courbes Iload(t) Pload(t) Vload(t) de la MPPT HC sous changement de G.	45
Figure 3.6.3.5 Schéma de simulation de la commande MPPT avec un DC-DC Buck	45
Figure 3.6.3.6 Courbes Iload(t) Pload(t) Vload(t) de la MPPT HC avec DC/DC Buck.	45
Figure 3.6.3.7 Courbes Iload(t) Pload(t) Vload(t) de la MPPT HC avec DC-DC Buck sous changement de G.	46
Figure 3.6.3.8 Schéma de simulation de la commande MPPT avec un DC-DC Buck-Boost	46
Figure 3.6.3.9 Courbes Iload(t) Pload(t) Vload(t) de la MPPT HC avec DC/DC Buck- Boost.....	47
Figure 3.6.3.10 Courbes Iload(t) Pload(t) Vload(t) de la MPPT HC avec DC-DC Buck- Boost sous changement de G.	47

LISTE DE TABLEAU

Tableau 2.1 Complexité de chaque type de convertisseur DC-DC.....	22
Tableau 3.1 Caractéristiques du Module MSX-60	32
Tableau 3.2 Effet du rayonnement sur le PPM.....	34
Tableau 3.3 Effet de la Température sur le PPM	35
Tableau 3.4 Résultats de la MPPT P&O sous changement de G	37
Tableau 3.5 Résultats de la MPPT P&O sous changement de G	38
Tableau 3.6 Résultats de la MPPT INC sous changement de G	41
Tableau 3.7 Résultats de la MPPT P&O sous changement de G	42
Tableau 3.8 Résultats de la MPPT INC sous changement de G	43
Tableau 3.9 Résultats de la MPPT HC sous changement de G.....	45
Tableau 3.10 Résultats de la MPPT HC sous changement de G.....	46
Tableau 3.11 Résultats de la MPPT HC sous changement de G.....	47
Tableau 3.12 Comparaison des Résultats de Simulation des convertisseurs DC-DC pilotés par différentes commandes MPPT	48

Liste de symbole:

MPPT: Le point de puissance maximal.

Vco: La tension à vide ou le point de circuit ouvert.

Isc: Le courant de court-circuit.

PV: photovoltaïque.

STC: Standard Test Conditions.

Np: cellules en parallèles.

Ns: cellules en series.

Pmp: la puissance maximale.

GPV: générateur photovoltaïque.

Isc: courant de court-circuit.

Voc: la tension du circuit ouvert.

DC: courant continu.

η_{MPPT} : Le rendement du point de fonctionnement.

P&O: Perturb & Observ.

INC: l'incrément de conductance.

FCO: Fraction de la Tension Voc.

FCC: Fraction du Courant Isc.

Buck, Boost, Buck-Boost: des convertisseurs DC-DC.

Introduction générale

Introduction générale :

Tout au long de l'histoire, l'énergie a toujours été présentée dans la vie de la planète. L'évolution de nos sociétés humaines est très étroitement liée à la découverte d'énergie. Le soleil est une source énergétique quasiment illimitée, il pourrait couvrir plusieurs milliers de fois notre consommation globale d'énergie. L'énergie solaire incidente sur la surface de la terre est collectée et convertie soit en énergie thermique (conversion photo thermique), soit en électricité (conversion photovoltaïque) puis utilisée ou éventuellement stockée. Cette nouvelle voie permettra non seulement d'assurer la sécurité énergétique des pays et l'approvisionnement en cette matière dans le futur [1] mais également de limiter, voire réduire les émissions néfastes de CO₂ qui ne peuvent qu'engendrer des dégâts conséquents sur l'environnement et donc sur la qualité de la vie humaine.

En Algérie, une attention spéciale est prêtée au développement de la filière solaire avec pour objectif d'atteindre 10 % puis 20 % de la production électrique par des sources renouvelables en 2020 et en 2030. Selon les statistiques fournies par le ministère de l'énergie, l'Algérie dispose de l'un des gisements solaires les plus élevés au monde avec un potentiel de 169.44 TWh en solaire thermique, 13.9 TWh en solaire photovoltaïque et 35 TWh en énergie du vent. La durée d'insolation sur la quasi-totalité du territoire national dépasse les 2000 heures annuellement et peut atteindre les 3900 heures (hauts plateaux et Sahara). L'énergie reçue quotidiennement sur une surface horizontale de 1 m² est de l'ordre de 5 kWh sur la majeure partie du territoire national, soit près de 1700 kWh/m²/an au Nord et 2263 kWh/m²/an au Sud du pays [2].

L'énergie solaire photovoltaïque provient de la transformation directe d'une partie du rayonnement solaire en énergie électrique, suite à l'atténuation du rayonnement solaire par les différents phénomènes atmosphériques.

Cette conversion d'énergie s'effectue par le biais d'une cellule dite photovoltaïque basée sur un phénomène physique appelé effet photovoltaïque. L'association de ces cellules selon certaines topologies forme les générateurs photovoltaïques. Ces générateurs renouvelables sont couplés généralement à un système de stockage assurant une disponibilité en continue d'énergie. Il existe différents types de cellules solaires (ou cellules photovoltaïques), et chaque type de cellules à un rendement et un coût qui lui est propre. Cependant, quel que soit leur type, leur rendement reste assez faible, de 8 à 26% de l'énergie qu'elles reçoivent. Selon ce rendement qui reste assez faible, on a opté d'utiliser un étage convertisseur DC-DC commandé. En fait, le concept de cet étage correspond à la modélisation des fonctions basiques idéalisées d'un convertisseur à découpage continu-continu (DC/DC).

La puissance de sortie des générateurs PV montre une caractéristique fortement non-linéaire, qui dépend des conditions climatiques telles que l'éclairement et la température. Extraire la puissance maximale possible des systèmes PV installés dans diverses conditions environnementales demeure toujours un vaste sujet de recherches scientifiques. De nos jours, il y a eu de nombreuses Méthodes de suivi des points de puissances maximales (MPPT) proposées pour résoudre ce problème, comme Perturber et observer (P&O) , Hill- Climbing (HC), incrémental conductance (INC) , méthode de logique floue, parabolique et d'autres méthodes avancées [17].

P&O, HC et INC sont largement utilisés dans l'industrie en raison à faible coût et facile à mettre en œuvre. Une taille de pas fixe est utilisé à la fois pour les étapes transitoires et permanentes, ainsi, il est difficile d'optimiser leur régime permanent et la performance dynamique simultanément.

Nous avons élaboré dans ce modeste travail le comportement de ces méthodes par une simulation séparée des quelques convertisseurs DC-DC dotés d'un commande MPPT et voir

Introduction générale

et discuter par la suite la réponse de chaque méthodes dans différents conditions climatiques (Température et rayonnement).

Le présent mémoire est organisé en trois chapitres comme suit :

Dans le premier chapitre nous allons présenter les différents éléments de base d'un système de conversion PV ainsi que l'influence des conditions climatiques sur ce système.

Dans le deuxième chapitre nous présentons les types des convertisseurs les plus utilisés à savoir: le convertisseur BOOST, BUCK et BOOST-BUCK. Par la suite nous évoquons les techniques de poursuite du point de puissance maximale (MPPT). Ces techniques ont pour rôle le pilotage des convertisseurs DC-DC qui peuvent nous conduire à faire travailler le GPV dans son point de puissance maximale.

CHAPITRE 1-SYSTEME DE CONVERSION PHOTOVOLTAIQUE

CHAPITRE 1-SYSTEME DE CONVERSION PHOTOVOLTAIQUETION GENERALE

1.1 Introduction

La consommation mondiale d'électricité observée durant ces dernières décennies est fortement liée au développement de l'industrie, du transport et des moyens de communications. De nos jours, une grande partie de la production électrique est produite à partir de ressources fossiles non renouvelables comme le charbon, le gaz naturel, le pétrole et l'uranium. Leur vitesse de régénération est extrêmement lente à l'échelle humaine. Ce qui entraînera à plus ou moins courte échéance un risque non nul d'épuisement de ces ressources. D'autant plus que la demande ne cesse de croître et tend dès à présent à être supérieure à l'offre, se traduisant par exemple par une forte fluctuation du prix mondial du pétrole. D'autre part, ce type de consommation énergétique n'est pas neutre sur l'impact environnemental.

Pour les hydrocarbures et le charbon par exemple, d'importantes émissions de gaz à effet de serre sont générées quotidiennement jouant un rôle prépondérant au niveau du dérèglement climatique et de l'augmentation de la pollution. Ce constat pousse à rechercher de plus en plus de solutions innovantes palliant le déficit énergétique et limitant l'impact négatif sur l'environnement. Ainsi, le développement des sources non polluantes à base d'énergie renouvelable est de plus en plus sollicité à la fois par les producteurs d'énergie et les pouvoirs publics [3].

On distingue plusieurs types de sources d'énergies renouvelables dont on cite : l'énergie hydroélectrique, l'énergie géothermique, l'énergie éolienne, l'énergie de la biomasse et l'énergie photovoltaïque. Excepté l'énergie géothermique qui provient de la chaleur des profondeurs de la terre, ces sources d'énergie proviennent directement ou indirectement du soleil. Elles sont donc disponibles indéfiniment tant que celui-ci brillera. L'énergie photovoltaïque est la plus jeune des énergies renouvelables, elle a l'avantage d'être non polluante, souple et fiable [4].

Dans ce chapitre nous allons présentés les différents éléments de base d'un système de conversion PV.

1. 2 Cellule PV

La cellule PV ou encore photopile est le plus petit élément d'une installation photovoltaïque. Elle est composée de matériaux semi-conducteurs et transforme directement l'énergie lumineuse en énergie électrique. [5]

Le fonctionnement de la cellule photovoltaïque est basée sur l'effet photovoltaïque et générée une tension peut varier entre 0.3 V et 0.7 V en fonction du matériau utilisé et de sa disposition ainsi que de la température et du vieillissement de la cellule.

Sous un éclairage et une température donnée, chaque cellule photovoltaïque est caractérisée par une courbe courant-tension ($I=f(V)$) et une courbe puissance-tension ($P=f(v)$), figure (1.1) représentant l'ensemble des configurations électriques que peut prendre une cellule PV.

CHAPITRE 1-SYSTEME DE CONVERSION PHOTOVOLTAIQUETION GENERALE

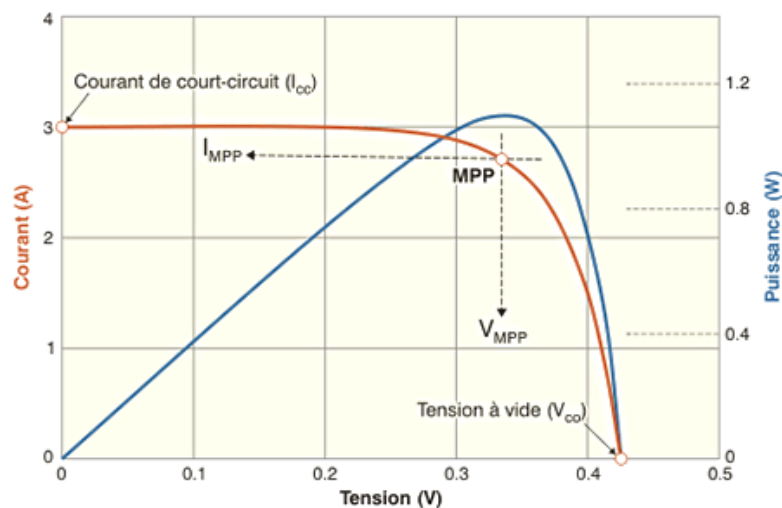


Figure (1. 1) : Caractéristique électrique d'une cellule photovoltaïque.

Trois paramètres physiques définissent ces courbes [7]:

- La tension à vide ou le point de circuit ouvert (V_{co}) : Cette valeur représenterait la tension générée par une cellule éclairée non raccordée (un courant nulle aux bornes de cellule PV).
- Le courant de court-circuit (I_{sc}) : Cette valeur représenterait le courant généré par une cellule éclairée raccordée à elle-même (court-circuitée).
- Le point de puissance maximal (MPP en anglais : maximum power point) à lequel la puissance est le maximum que la cellule PV peut fournir (P_{mpp}). Cette puissance est obtenu pour une tension et un courant optimaux appelés V_{mpp} , I_{mpp} .

Les caractéristiques d'une cellule PV est directement dépendante de l'éclairement et de la température. Pour permettre une comparaison de l'efficacité de différentes cellules, ces caractéristiques sont définies dans des conditions de test bien précises (STC = Standard Test Conditions). Ces conditions sont : éclairement de $1\ 000\ \text{W/m}^2$ et température de 25°C , le changement de l'un de ces deux paramètres influera les trois paramètres de cellule cités précédemment.

1.2.1. Types de cellules photovoltaïques

Il existe différents types de cellules PV en fonction de la nature et des caractéristiques des matériaux utilisés, figure (1.2). Le type le plus commun est la cellule de silicium cristallin (Si). On trouve:

1.2.1.1. Les cellules monocristallines

Les cellules monocristallines figure (1.2.a), sont les photopiles de la première génération. Elles sont élaborées à partir d'un bloc de silicium cristallisé en une seule pièce, Ces cellules sont en général d'un bleu uniforme, Elles ont un bon rendement entre 12 et 20% pour les cellules industrielles mais la méthode de production est laborieuse et coûteuse.

1.2.1.2. Les cellules poly-cristallines

Les cellules poly-cristallines, figure (1.2.b), sont élaborées à partir d'un bloc de silicium composé de cristaux multiples. Ce genre de cellule est également bleu, Elles ont un rendement plus faible entre 10 et 14% selon les fabricants, mais leur coût de production est moindre.

CHAPITRE 1-SYSTEME DE CONVERSION PHOTOVOLTAIQUETION GENERALE

1.2.1.3. Cellule en silicium amorphe

Le silicium n'est pas cristallisé, figure (1.2.c), il est déposé sur une feuille de verre. La cellule est grise très foncée, Leur rendement (10% environ), C'est la cellule des calculatrices et des montres dites "solaires". [8]



a. Cellule monocristalline b. Cellule poly-cristalline c. Cellule amorphe

Figure (1. 2) : Principaux types de cellules PV.

1.2.2. Modélisation de cellule PV

Il existe plusieurs modèles électriques caractérisant le fonctionnement de la cellule photovoltaïque, et ils ont comme facteur commun la considération de la cellule PV comme générateur du courant idéal. Nous allons cités les deux modèles les plus utilisés de cellule PV lorsqu'il s'agit d'une étude par modélisation ou par simulation.

1.2.2.1. Modèle idéal

C'est le modèle le plus simple pour représenter la cellule PV. Dans ce modèle toutes les pertes sont négligeables, il ne tient compte que du phénomène de diffusion. La cellule PV dans ce modèle se compose d'une source idéale de courant qui produit un courant I_{ph} proportionnel à la puissance lumineuse incidente, en parallèle avec une diode qui correspond à l'aire de transition PN de la cellule PV [9]. Le schéma électrique équivalent de la cellule PV pour ce modèle est représenté par la figure (1.6).

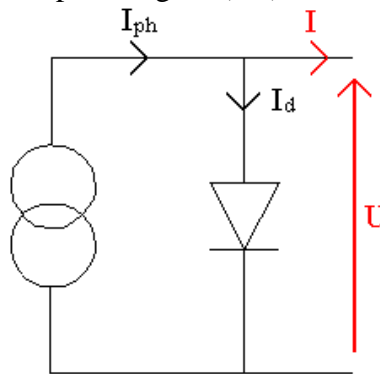


Figure (1. 3): circuit équivalent du modèle idéal d'une cellule

L'équation caractéristique de ce modèle est déduite d'une manière directe à partir de la loi de Kirchhoff [9]:

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

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

$$I_d = I_s \left(e^{V_d/V_{th}} - 1 \right) \dots \dots \dots (2)$$

CHAPITRE 1-SYSTEME DE CONVERSION PHOTOVOLTAIQUETION GENERALE

Alors:

$$I = I_{ph} - I_s \left(e^{V_d/A*V_{th}} - 1 \right) \dots \dots \dots (3)$$

Où :

I_{ph} est le photo-courant

A : est le facteur d'idéalité de la diode.

I_s : courant de saturation de la diode donné par : $I_s = k_1 T^3 e^{-\frac{V_g}{KT}}$

V_{th} : tension thermique à la température T : $V_{th} = \frac{KT}{q}$

Avec :

q : charge d'électron ($1.602 \cdot 10^{-19}$ C),

K : constante de Boltzmann ($1.381 \cdot 10^{-23}$ J/k)

K_1 : constante ($1.2 \text{ A/cm}^2 \text{ K}^3$)

T : température effective de la cellule en Kelvin

V_g : énergie de gap (pour le silicium cristalline est égale à 1.12 eV)

1.2.2.2. Modèle réel à une diode

Ce modèle est le plus utilisé dans des nombreuses recherches grâce à son comportement qui est plus proche à une cellule PV par rapport au modèle idéal d'une part, et sa simplicité pour le calcul mathématique par rapport au d'autres modèle comme le modèle à deux diodes d'une autre part.

Dans ce modèle la cellule PV est représentée comme une source de courant produit le photo-courant I_{ph} , modélise la conversion du flux lumineux en énergie électrique, monté en parallèle avec une diode qui modélise la jonction PN. Pour optimiser la modélisation de quelques phénomènes au niveau de la cellule, ce modèle comme le montre la figure (1.4) contient une résistance série R_s modélise les pertes ohmiques du matériau et une Résistance shunt R_{sh} modélise les courants parasites qui traversent la cellule [10].

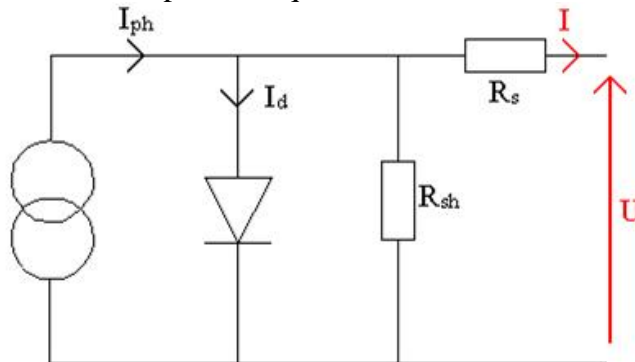


Figure (1. 4) : Circuit équivalent du modèle réel d'une cellule PV.

Le courant généré par ce modèle est donné par [9]:

$$I = I_{ph} - I_d - I_{Rsh} \dots \dots \dots (4)$$

$$I_{Rsh} = \frac{V_d}{R_{sh}} \dots \dots \dots (5)$$

$$V_d = U + R_s I \dots \dots \dots (6)$$

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

$$I = I_{ph} - I_s \left(e^{\frac{(U+R_s I)}{A*V_{th}}} - 1 \right) - \frac{U + R_s I}{R_{sh}} \dots \dots \dots (7)$$

CHAPITRE 1-SYSTEME DE CONVERSION PHOTOVOLTAIQUETION GENERALE

Ce modèle est connu aussi sous le nom L5P (Lumped, 1Mechanism model with5 Paramètres). Il fait donc intervenir les cinq paramètres inconnus suivants : (I_{ph} , I_s , A , R_s et R_{sh}) [9].

1.3 Générateurs PV

La cellule photovoltaïque élémentaire de quelques dizaines de centimètres carrés constitue un générateur de très faible puissance délivrant, au maximum, quelques watts sous une tension inférieure ou égale à un volt. Cette puissance est insuffisante pour les applications électriques courantes.

Pour produire plus de puissance, plusieurs cellules doivent être connectées selon une certaine topologie que ce soit en série, en parallèles ou l'association des deux afin de créer ce qu'on appelle un module photovoltaïque. Ces modules sont raccordés entre eux pour arriver à un générateur PV qui peut satisfaire les besoins en énergie.

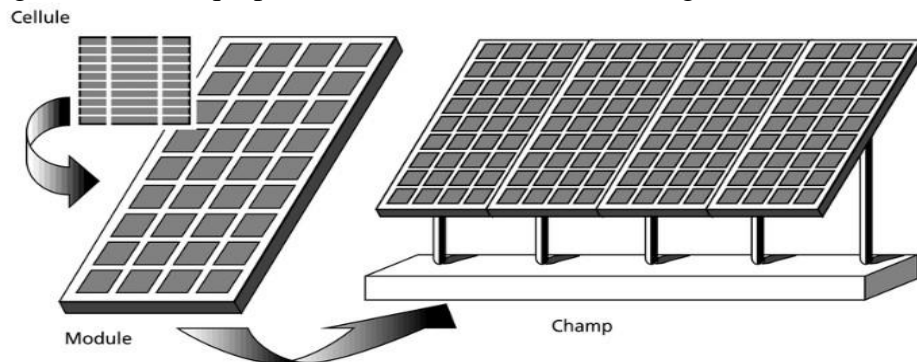


Figure (1.5) : Générateur photovoltaïque.

1.3.1. Association des cellules PV

1.3.1.1 Association en série

Dans un groupement en série, les cellules sont traversées par le même courant et la caractéristique résultante du groupement en série est obtenue par addition des tensions à courant donné.

$$I_{ssc} = I_{sc} \dots \dots \dots (8)$$

$$V_{soc} = n_s * V_{oc} \dots \dots \dots (9)$$

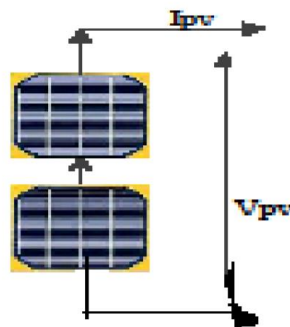


Figure (1.6) Schéma de deux cellules photovoltaïques associées en série

La connexion en série des cellules permet d'augmenter la tension de l'ensemble. Une association en série de n_s cellules identique permet de générer une tension V_s de n_s fois que la tension générée par une cellule, figure (1.7) :

CHAPITRE 1-SYSTEME DE CONVERSION PHOTOVOLTAIQUETION GENERALE

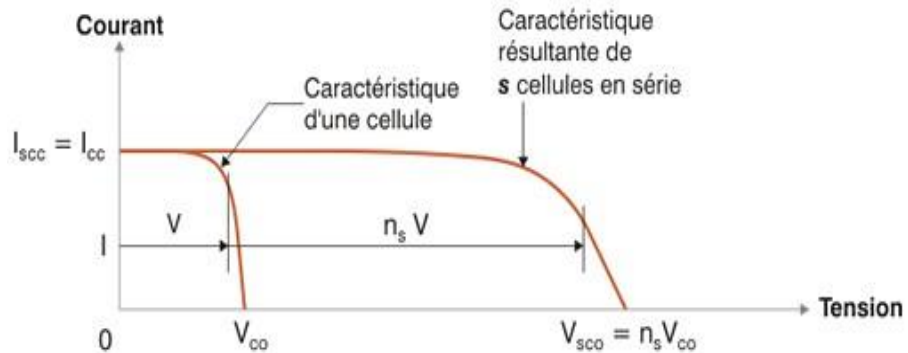


Figure (1.7) : Caractéristiques électriques d’une association de ns cellules PV identiques en série.

1.3.1.2 Association en parallèle

Tandis que la mise en parallèle des cellules PV permet d'accroître le courant. Le courant obtenu par une association en parallèle de np cellules identiques est plus grand np fois que le courant générer par une cellule, figure (1.8).

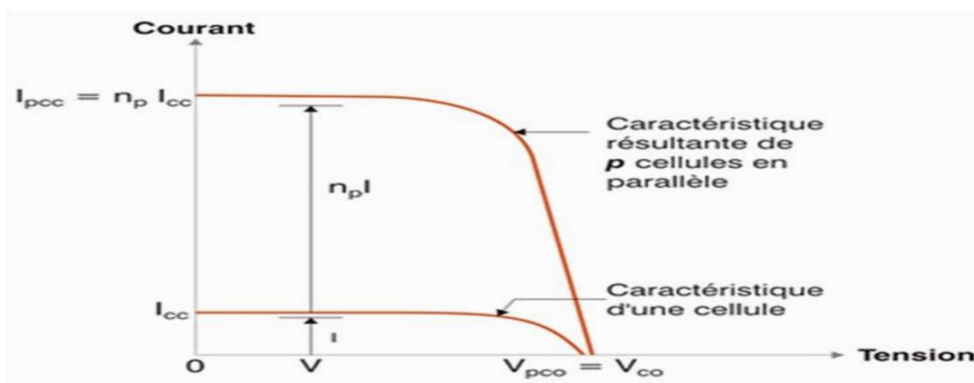


Figure (1.8) : Caractéristiques électriques d’une association de np cellules PV identiques en parallèle.

Le câblage série/parallèle est donc utilisé pour obtenir globalement un générateur PV aux caractéristiques souhaitées. La puissance disponible en sortie du générateur PV est donnée par l’équation (10) :

$$P_{GPV} = n_s * n_p * V_{Cel} * I_{Cel} \dots \dots \dots (10)$$

Avec :

- P_{GPV} : la puissance disponible en sortie du GPV.
- V_{Cel} : la tension à la sortie d'une cellule.
- I_{Cel} : le courant de sortie d’une cellule.

La figure (1.9) représente la référence entre les caractéristiques I-V d’une cellule photovoltaïque et celui d’un module photovoltaïque composent de ns cellules en série et np cellules en parallèles :

CHAPITRE 1-SYSTEME DE CONVERSION PHOTOVOLTAIQUETION GENERALE

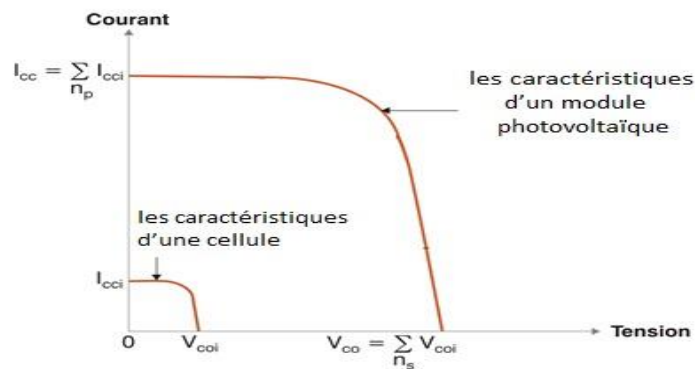


Figure (1.9) : les caractéristiques électriques d'un module PV par rapport de celle de cellules.

1.4 La puissance maximale (Pmp)

La puissance maximale débitée par le panneau photovoltaïque donnée par le produit entre la tension V_{op} et le courant I_{op} comme représente la formule suivante:

$$P_{max} = V_{op} * I_{op} \dots \dots \dots (11)$$

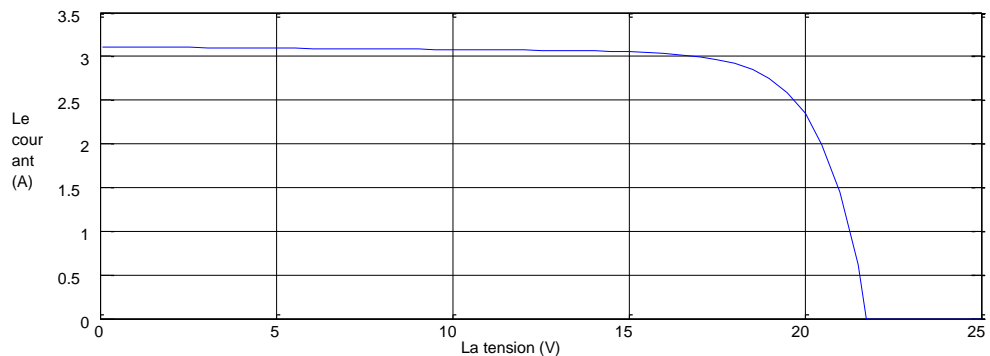


Figure 1.10 Caractéristique I-V d'un générateur photovoltaïque

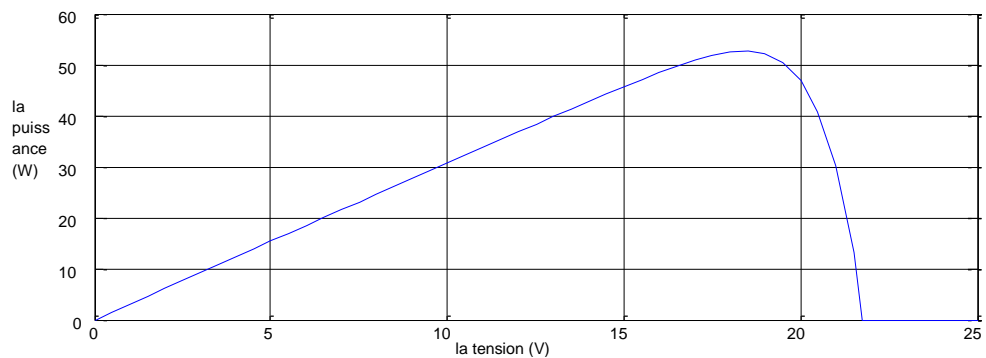


Figure 1.11 Caractéristique P-V d'un générateur photovoltaïque.

1.4 L'effet du rayonnement et de la température sur un GPV

Les caractéristiques électriques d'un générateur photovoltaïque varient en fonction de la température, de l'éclairement et, de façon générale, des conditions de fonctionnement lorsqu'il est connecté à une charge donnée.

CHAPITRE 1-SYSTEME DE CONVERSION PHOTOVOLTAÏQUE GÉNÉRALE

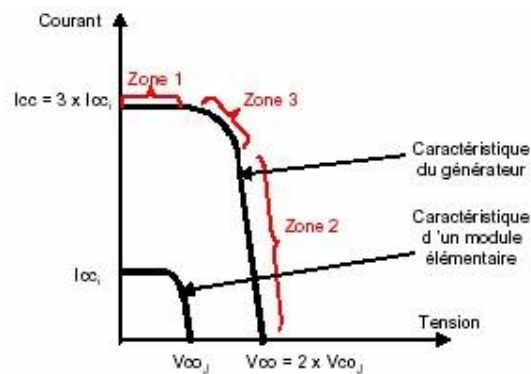


Figure 1.12 Caractéristiques I(V) d'un GPV

Selon l'association en série et/ou parallèle de ces modules, les valeurs du courant de court-circuit I_{sc} et de la tension du circuit ouvert V_{oc} sont plus ou moins importantes. La caractéristique d'un générateur PV constitué de plusieurs cellules a une allure générale assimilable à celle d'une cellule élémentaire, sous réserve qu'il n'y ait pas de déséquilibre entre les caractéristiques de chaque cellule (irradiation et température uniformes).

D'après la figure 1.12, nous pouvons décomposer la caractéristique I(V) d'un générateur photovoltaïque en 3 zones :

- La zone 1 assimilable à un générateur de courant et I_{sc} proportionnel à l'irradiation, d'admittance interne pouvant être modélisée par R_{sh} .
- La zone 2 assimilable à un générateur de tension V_{oc} d'impédance interne équivalente à R_s .
- La zone 3 où l'impédance interne du générateur varie très fortement de R_s à R_{sh} .

Le point de fonctionnement pour lequel la puissance fournie par le générateur soit maximale est situé dans la Zone 3.

Ils est caractérisé par le couple (I_{opt}, V_{opt}) , et seule une charge dont la caractéristique passe par ce point, permet d'extraire la puissance maximale disponible dans les conditions considérées.

1.4.1 Influence de l'éclairement sur les modules photovoltaïques

La figure (figure 1.13) présente un exemple des courbes (I, V) pour différents niveaux d'éclairement.

CHAPITRE 1-SYSTEME DE CONVERSION PHOTOVOLTAIQUETION GENERALE

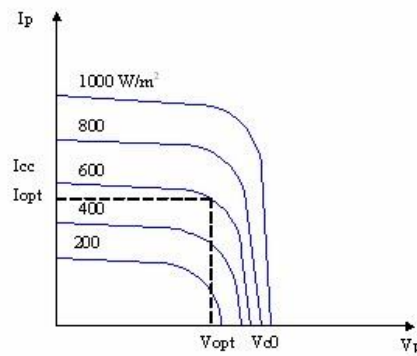


Figure 1.13 Caractéristique d'un générateur photovoltaïque pour différents éclairagements

On remarque que la valeur du courant de court circuit est directement proportionnelle à l'intensité du rayonnement [1.8]. Par contre, la tension en circuit ouvert ne varie pas dans les mêmes proportions, elle reste quasiment identique même à faible éclairement.

1.4.2 Influence de la température sur les modules photovoltaïques

La figure (figure 1.14) présente des courbes courant-tension pour différentes températures de fonctionnement:

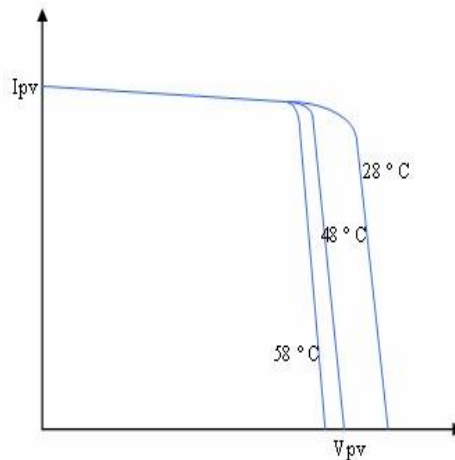


Figure 1.14 Influence de la température sur la caractéristique électrique

On remarque que, la température a une influence négligeable sur la valeur du courant de court-circuit. Par contre, la tension en circuit ouvert baisse assez fortement lorsque la température augmente, par conséquent la puissance extractible diminue. Lors du dimensionnement d'une installation, la variation de la température du site sera impérativement à prendre en compte.

1.5 Connexion directe d'un GPV

Le système le plus simple que l'on puisse concevoir se compose d'un générateur photovoltaïque GPV et d'une charge qui utilise directement l'énergie produite du GPV.

CHAPITRE 1-SYSTEME DE CONVERSION PHOTOVOLTAIQUETION GENERALE

Cette énergie est dépendante fortement de l'éclairement, de la nature de la charge et de la température.

La connexion directe est surtout utilisée en raison de sa simplicité de mise en œuvre, son coût minimal dû fondamentalement à l'absence d'électronique, sans parler d'un faible coût.

La figure 1.15 montre ce cas. L'inconvénient de cette configuration, c'est qu'elle n'offre aucun type de 'réglage' de fonctionnement. Le transfert de la puissance optimale disponible aux bornes du GPV vers la charge n'est pas non plus garanti. La connexion directe du générateur photovoltaïque à une charge reste actuellement le principe de fonctionnement le moins cher et le plus répandu. Il faut s'assurer, auparavant, que la charge accepte bien la connexion directe au générateur photovoltaïque: c'est le problème de dimensionnement.

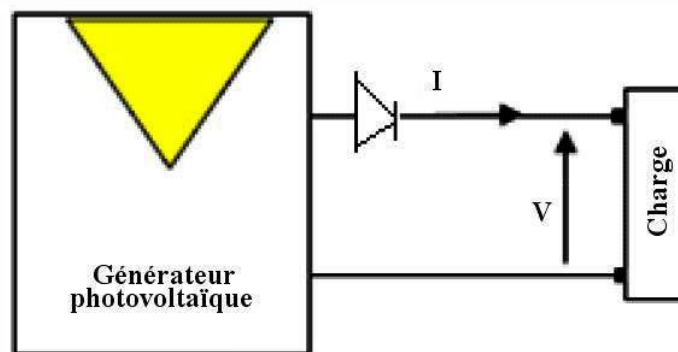


Figure 1.15 Couplage direct

Une précaution doit être prise pour éviter de détériorer le générateur par un retour de courant sur ce dernier. Ainsi, une diode anti-retour est placée entre la source et la charge. Le principe du couplage direct GPV-Charge repose sur le transfert de la puissance de sortie de la source photovoltaïque vers l'équipement à alimenter, sans aucun système intermédiaire. Ce fonctionnement est reconnu sous la nomination 'fonctionnement au fil du soleil'. Le point de fonctionnement est particulièrement dominé par plusieurs facteurs à savoir [11-12]:

- La charge,
- Les conditions de fonctionnement: éclairement, température,
- Les types de connexions établies des modules photovoltaïques (parallèle, série, mixte).

L'inconvénient majeur de cette connexion est sa dépendance directe entre la puissance fournie par le générateur et la charge. En fait, la puissance fournie par le module photovoltaïque résulte de l'intersection entre la caractéristique courant-tension $I-V$ du GPV et celle de la charge. Les caractéristiques électriques d'un GPV peuvent changer rapidement en fonction de l'éclairement solaire, de la température et à plus long terme du vieillissement des cellules.

CHAPITRE 1-SYSTEME DE CONVERSION PHOTOVOLTAIQUETION GENERALE

Pour les systèmes sans batterie, il y a possibilité d'avoir recours à un stockage mais qui ne sera pas sous forme électrochimique.

Exemple:

- Pompage \Rightarrow stockage par réservoir d'eau.
- Réfrigération \Rightarrow stockage de froid.

Le choix de tel ou tel système se fera en fonction de différents critères: simplicité, application, environnement, etc.

Toutefois l'étude de systèmes photovoltaïques se ramène à l'étude de l'adaptation de la charge constituée, soit d'une batterie, d'une charge quelconque par rapport à l'ensemble des modules solaires.

1.6 Introduction d'un Etage DC-DC

Comme il est vu précédemment, on recherchera à optimiser le système pour avoir le meilleur rendement d'adaptation du système (rapport de l'énergie électrique fournie à l'utilisation à l'énergie électrique qu'aurait pu fournir le générateur fonctionnant toujours à son point de puissance maximum).

Un système photovoltaïque est donc constitué du GPV, et des charges à alimenter. Ces charges sont de type courant continu ou courant alternatif.

Les diverses composantes d'un système photovoltaïque sont représentées symboliquement sur le schéma généralisé dans la figure (1-16).

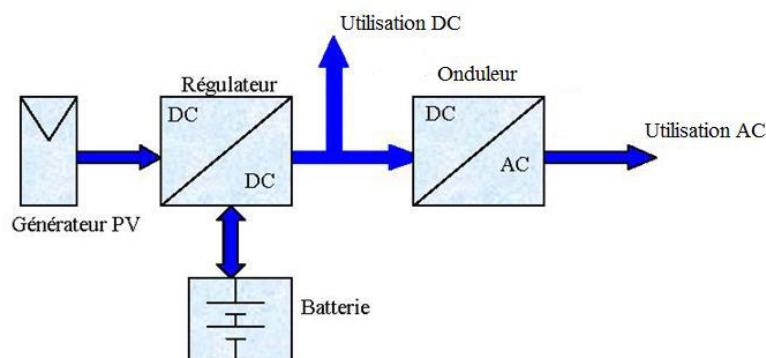


Figure 1.16 Schéma synoptique d'un système de conversion Photovoltaïque

La figure 1.17 montre la représentation d'un convertisseur DC/DC, qui peut être utilisé comme interface entre la source et la charge.

CHAPITRE 1-SYSTEME DE CONVERSION PHOTOVOLTAIQUETION GENERALE

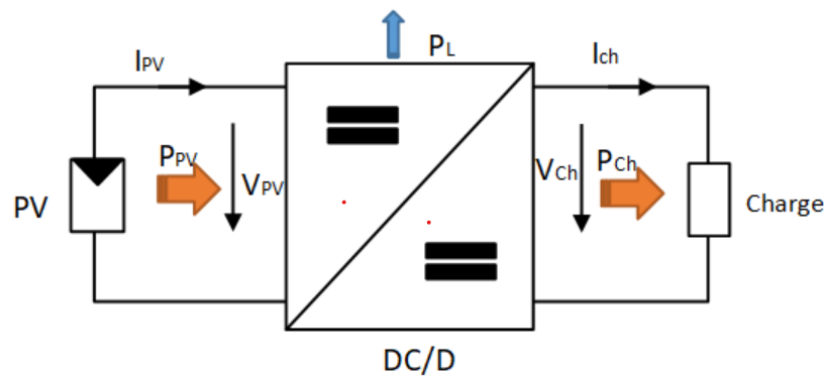


Figure 1.17 Convertisseur DC-DC

L'utilisation des convertisseurs DC-DC permet le contrôle de la puissance électrique dans les circuits fonctionnant en courant continu avec une très grande souplesse et un rendement élevé.

Les circuits des hacheurs se composent de condensateurs, d'inductances et de commutateurs. Dans le cas idéal, tous ces dispositifs ne consomment aucune puissance active, c'est la raison pour laquelle on a de bons rendements. Le commutateur est réalisé avec un dispositif semi-conducteur, habituellement un transistor MOSFET ou un IGBT fonctionnant en mode (bloqué/saturé). Si le dispositif semi-conducteur est bloqué, son courant est zéro d'où une dissipation de puissance nulle. Si le dispositif est dans l'état saturé, la chute de tension à ses bornes sera presque nulle et par conséquent la puissance perdue sera très faible [12].

1.7 Conclusion

Les cellules solaires et modules photovoltaïques sont donc des composants de conversion d'énergie qui produisent de l'électricité sous forme d'un courant continu lorsqu'ils sont exposés à la lumière. L'association des cellules PV en série et en parallèle selon une certaine topologie forme des modules et des générateurs PV.

Les conditions climatiques telles que l'éclairement et la température jouent un rôle inversement proportionnel avec le rendement d'un GPV traduit par augmentation ou diminution du courant et de la tension.

L'énergie électrique fournie par le GPV peut être exploitée par connexion directe à la charge chose que peut aléatoirement bénéficier de ça totalité, et par conséquent l'introduction d'un étage convertisseur DC-DC améliorera cette exploitation.

Même si on utilise un convertisseur DC-DC cela peut forcément extraire la puissance maximale depuis le GPV sauf si on va le faire piloter avec une intelligence d'optimisation qui peut converger vers le point de puissance maximale.

Il s'agit des convertisseurs DC-DC dotés d'une commande MPPT qui vont faire le sujet du prochain chapitre.

CHAPITRE 2-
Convertisseurs DC-DC et
Techniques MPPT

2.1 Introduction

Les dispositifs électroniques de nouvelle technologie doivent satisfaire certains critères tels que la haute qualité, la fiabilité, la dimension, le poids et le coût réduit. Les régulateurs de puissance linéaire, dont le principe de fonctionnement est basé sur un diviseur de courant ou de tension, peuvent fournir une tension de sortie de très haute qualité [24]. Cependant, ce type de régulateurs reste inefficace du fait que leur domaine principal d'application est à des niveaux de puissance faibles .

Les régulateurs de commutation appelés convertisseurs DC/DC utilisent des interrupteurs électroniques, à base de semi-conducteurs tels que: le thyristor, transistor de puissance ou l'IGBT...etc. parce qu'ils engendrent une faible perte de puissance lors de basculement d'un état à un autre. Ces convertisseurs assurent des rendements élevés de conversion d'énergie et ils peuvent fonctionner à des fréquences élevées. Les caractéristiques dynamiques des convertisseurs DC/DC s'améliorent avec l'augmentation des fréquences de fonctionnement. Les fréquences de fonctionnement élevées permettent donc de parvenir à une réponse dynamique plus rapide aux changements rapides dans le courant de charge ou de la tension d'entrée [25].

2.2 Les convertisseurs DC-DC

Un Convertisseur DC-DC est un circuit d'électronique de puissance ou un dispositif électromécanique qui convertit une source de courant continu (DC) d'un niveau de tension spécifié à un autre différent. C'est un type de convertisseur de puissance électrique. Les niveaux de puissance considérés par de tels circuits vont de très bas (petites batteries) à très haut (transmission de puissance à haute tension voire très haute tension).

Comme l'ensemble des convertisseurs de puissance, un convertisseur DC-DC se compose de cellules de commutations. Ces cellules sont dimensionnées afin d'augmenter ou de diminuer la tension continue (respectivement un courant continu) de part et d'autre du convertisseur.

Afin de réaliser une telle transformation, chaque interrupteur de puissance de la cellule de commutation sera composé soit d'un MOSFET ou d'un IGBT et l'autre interrupteur sera une diode. Dans d'autres (plus rares) cas les deux interrupteurs seront des thyristors.

2.2.1 Exemples de convertisseurs DC-DC

Le champ d'application des convertisseurs DC-DC est très étendu. Suivant le niveau de puissance transférée, la tension d'entrée, la tension de sortie et l'efficacité recherchée.

Plusieurs exemples sont donnés ci-dessous.

2.2.1.1 Convertisseurs DC-DC isolés

Le convertisseur DC-DC **isolé** peut délivrer la même tension en sortie qu'en entrée mais stabilisée et débarrassée des parasites dû à la conversion, grâce à une isolation galvanique. La tension de sortie peut être modulable. Il est possible de l'utiliser comme chargeur de batterie.

Il est recommandé pour alimenter des appareils électroniques sensibles.

2.2.1.2 Convertisseurs DC-DC non isolés

Il existe plusieurs topologies des convertisseurs DC-DC non isolés. Nous allons citer les plus utilisés dans la littérature comme indiqué suivant :

- Convertisseur DC-DC bidirectionnel Boost, montage élévateur de tension pour des puissances réduites.
- Convertisseur DC-DC bidirectionnel Buck, montage abaisseur de tension.

- Convertisseur DC-DC bidirectionnel non-inverseur Boost-Buck. Ce montage peut être abaisseur ou élévateur.
- Convertisseur DC-DC bidirectionnel Buck-Boost inversé.

2.2.2 Convertisseur Buck (abaisseur)

Le convertisseur illustré dans la figure.2.16 est un convertisseur Buck, ou hacheur série. C'est une alimentation à découpage qui convertit une tension continue en une autre tension continue de plus faible valeur.

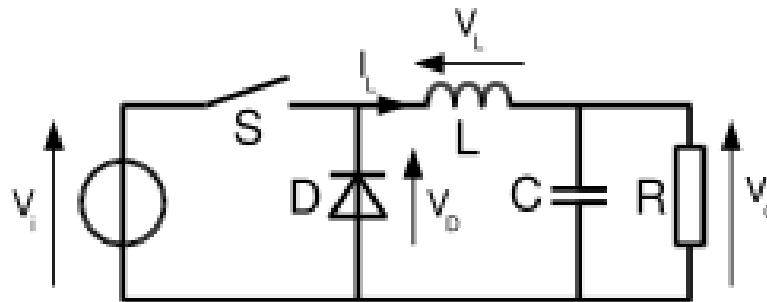
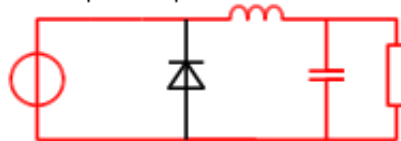


Figure2.16 Convertisseur Buck

Le fonctionnement d'un convertisseur Buck peut être divisé en deux configurations suivant l'état de l'interrupteur S (voir figure 2.17) :

Interrupteur passant



Interrupteur bloqué

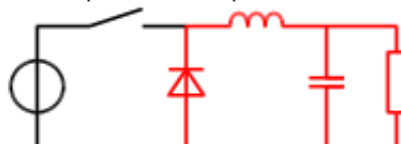


Figure2.17 L'état de l'interrupteur S du convertisseur Buck

- **Dans l'état passant**, l'interrupteur S est fermé, la tension aux limites de l'inductance vaut $V_L = V_i - V_o$. Le courant traversant l'inductance augmente linéairement. La tension aux limites de la diode étant négative, aucun courant ne la traverse.
- **Dans l'état bloqué**, l'interrupteur est ouvert. La diode devient passante afin d'assurer la continuité du courant dans l'inductance. La tension aux limites de l'inductance vaut $V_L = -V_o$. Le courant traversant l'inductance décroît.

Conduction continue

Lorsqu'un convertisseur Buck travaille en mode de conduction continue, le courant I_L traversant l'inductance ne s'annule jamais. La figure 2.18 montre les formes d'ondes du courant et de la tension dans un convertisseur Buck.

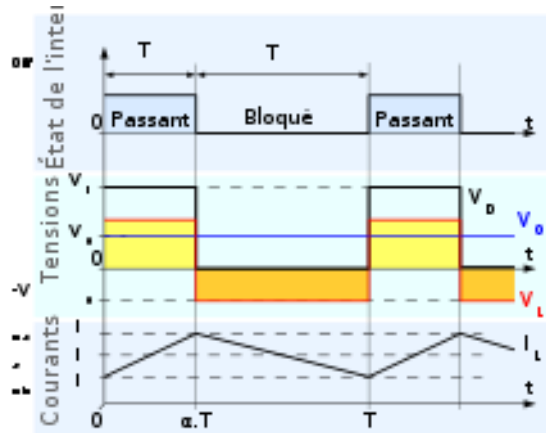


Figure 2.18 Formes d'ondes courant/tension dans un convertisseur Buck

Le taux d'accroissement de I_L est donné par :

$$V_L = L \frac{dI_L}{dt} \dots \dots \dots (12)$$

Avec V_L égale $V_i - V_o$ pendant l'état passant et $-V_o$ durant l'état bloqué. Donc, l'augmentation de I_L durant l'état passant est donnée par :

$$\Delta I_{L_{on}} = \int_0^{\alpha T} dI_L = \int_0^{\alpha T} \frac{V_L}{L} dt = \frac{(V_i - V_o) \cdot \alpha \cdot T}{L} \dots \dots \dots (13)$$

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

$$\Delta I_{L_{off}} = \int_{\alpha T}^T dI_L = \int_{\alpha T}^T \frac{V_L}{L} dt = \frac{V_o \cdot (T - \alpha \cdot T)}{L} \dots \dots \dots (14)$$

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

$$E = \frac{1}{2} L * I_L^2 \dots \dots \dots (15)$$

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

$$\Delta I_{L_{on}} + \Delta I_{L_{off}} = 0 \dots \dots \dots (16)$$

En remplaçant $\Delta I_{L_{on}}$ et $\Delta I_{L_{off}}$ par leur expression, on obtient :

$$\frac{(V_i - V_o) \cdot \alpha \cdot T}{L} - \frac{V_o \cdot (T - \alpha \cdot T)}{L} = 0 \dots \dots \dots (17)$$

Ce qui peut se réécrire de la façon suivante :

$$V_o = \alpha \cdot V_i \dots \dots \dots (18)$$

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

2.2.3 Convertisseur Boost (survolteur)

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

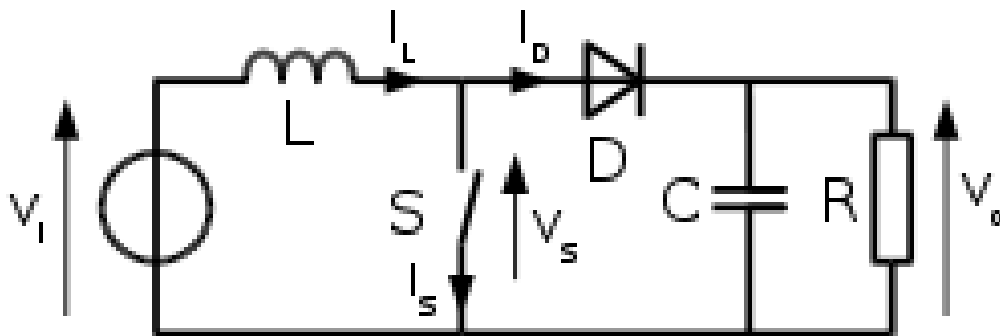


Figure 2.19 Convertisseur Boost

Le fonctionnement d'un convertisseur Boost peut être divisé en deux phases différentes selon l'état de l'interrupteur S (voir la figure 2.20):

- Une phase d'accumulation d'énergie: quand l'interrupteur S est fermé (état passant), cela entraîne l'augmentation du courant dans l'inductance par conséquent le stockage d'une quantité d'énergie sous forme d'énergie magnétique. La diode D est alors bloquée et la charge est alors déconnectée de l'alimentation.
- Quand l'interrupteur est ouvert, l'inductance se trouve alors en série avec le générateur et sa f.e.m s'additionne à celle du générateur (effet survolteur). Le courant traversant l'inductance traverse ensuite la diode D, le condensateur C et la charge R. Il en résulte un transfert de l'énergie accumulée dans l'inductance vers la capacité.

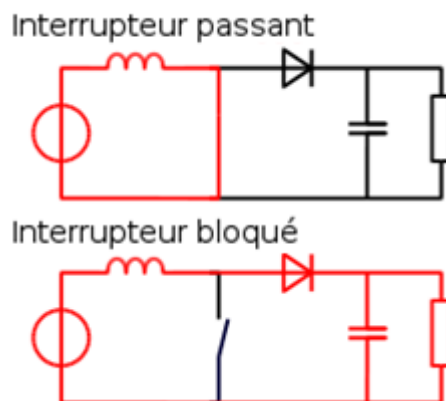


Figure 2.20 les deux configurations d'un convertisseur Boost suivant l'état de l'interrupteur S

Conduction continue

Lorsqu'un convertisseur Boost travaille en mode de conduction continue, le courant I_L traversant l'inductance ne s'annule jamais. La figure 2.21 montre les formes d'ondes du courant et de la tension dans un convertisseur Boost.

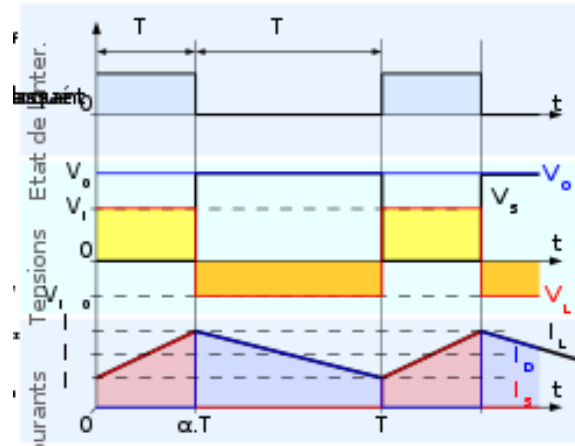


Figure 2.21 Formes d'ondes courant/tension dans un convertisseur Boost

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

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

$$V_i = L \frac{dI_L}{dt} \dots \dots \dots (19)$$

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

$$\Delta I_{L_{on}} = \int_0^{\alpha T} dI_L = \int_0^{\alpha T} \frac{V_i}{L} dt = \frac{V_i \cdot \alpha \cdot T}{L} \dots \dots \dots (20)$$

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

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

$$V_i - V_o = L \frac{dI_L}{dt} \dots \dots \dots (21)$$

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

$$\begin{aligned} \Delta I_{L_{off}} &= \int_0^{(1-\alpha)T} dI_L = \int_0^{(1-\alpha)T} \frac{(V_i - V_o)}{L} dt \\ &= \frac{(V_i - V_o)(1 - \alpha)T}{L} \dots \dots \dots (22) \end{aligned}$$

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

$$E = \frac{1}{2} L * I_L^2 \dots \dots \dots (23)$$

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

$$\Delta I_{L_{on}} + \Delta I_{L_{off}} = 0 \dots \dots \dots (24)$$

En remplaçant $\Delta I_{L_{on}}$ et $\Delta I_{L_{off}}$ par leur expression, on obtient :

$$\Delta I_{L_{on}} + \Delta I_{L_{off}} = \frac{V_i \cdot \alpha \cdot T}{L} + \frac{(V_i - V_o) \cdot (1 - \alpha)T}{L} = 0 \dots \dots \dots (25)$$

Ce qui peut se réécrire de la façon suivante :

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{1}{1 - \alpha} \dots \dots \dots (26)$$

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

2.2.4 Hacheur Buck-Boost (dévolteur-survolteur)

Un convertisseur Buck-Boost est une alimentation à découpage qui convertit une tension continue en une autre tension continue de plus faible ou plus grande valeur mais de polarité inverse. Un inconvénient de ce convertisseur est que son interrupteur ne possède pas de limite reliée au zéro, compliquant ainsi sa commande.

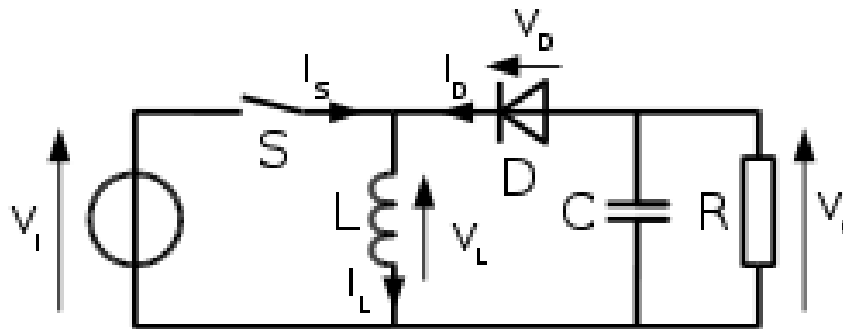
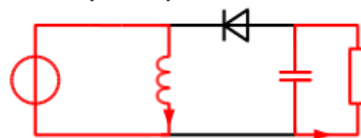


Figure 2.22 Convertisseur Buck-Boost

Le fonctionnement d'un convertisseur Buck-Boost peut être divisé en deux configurations suivant l'état de l'interrupteur S (voir figure 2.23) :

- Dans l'état passant, l'interrupteur S est fermé, conduisant ainsi à une augmentation de l'énergie stockée dans l'inductance.
- Dans l'état bloqué, l'interrupteur S est ouvert. L'inductance est reliée à la charge ainsi qu'à la capacité. Il en résulte un transfert de l'énergie accumulée dans l'inductance vers la capacité et la charge.

Interrupteur passant



Interrupteur bloqué

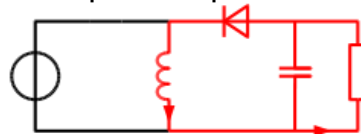


Figure 2.23 Les deux configurations d'un convertisseur Buck-Boost suivant l'état de l'interrupteur S

Comparé aux convertisseurs Buck et Boost, les principales différences sont:

- La tension de sortie est de polarité inverse de celle d'entrée.
- La tension de sortie peut fluctuer de 0 a $-\infty$ (pour un convertisseur parfait).

Conduction continue

Lorsqu'un convertisseur Buck-Boost travaille en mode de conduction continue, le courant I_L traversant l'inductance ne s'annule jamais. La figure 2.24 montre les formes d'ondes du courant et de la tension dans un convertisseur Boost.

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

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

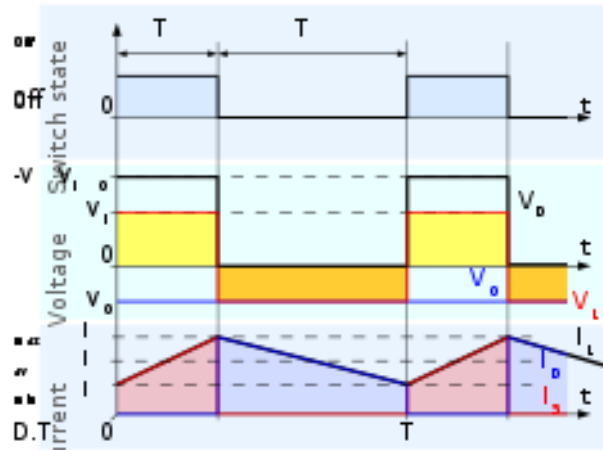


Figure 2.24 Formes d'ondes courant/tension dans un convertisseur Buck-Boost

$$V_i = L \frac{dI_L}{dt} \dots \dots \dots (27)$$

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

$$\Delta I_{L_{on}} = \int_0^{\alpha T} dI_L = \int_0^{\alpha T} \frac{V_i}{L} dt = \frac{V_i \cdot \alpha \cdot T}{L} \dots \dots \dots (28)$$

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

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

$$\frac{dI_L}{dt} = \frac{V_o}{L} \dots \dots \dots (29)$$

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

$$\Delta I_{L_{off}} = \int_0^{(1-\alpha)T} dI_L = \int_0^{(1-\alpha)T} \frac{V_o}{L} dt = \frac{V_o(1-\alpha)T}{L} \dots \dots \dots (30)$$

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

CHAPITRE 2-Convertisseurs DC-DC et Techniques MPPT

$$E = \frac{1}{2} L * I_L^2 \dots \dots \dots (31)$$

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

$$\Delta I_{L_{on}} + \Delta I_{L_{off}} = 0 \dots \dots \dots (32)$$

En remplaçant $\Delta I_{L_{on}}$ et $\Delta I_{L_{off}}$ par leur expression, on obtient :

$$\Delta I_{L_{on}} + \Delta I_{L_{off}} = \frac{V_i \cdot \alpha \cdot T}{L} + \frac{V_o(1 - \alpha)T}{L} = 0 \dots \dots \dots (33)$$

Ce qui peut se réécrire de la façon suivante :

$$\frac{V_o}{V_i} = -\frac{\alpha}{1 - \alpha} \dots \dots \dots (34)$$

Grâce à cette dernière expression, on peut voir que la tension de sortie est toujours négative (le rapport cyclique α variant entre 0 et 1), que sa valeur absolue augmente avec α , théoriquement jusqu'à l'infini quand α approche 1. Si on omet la polarité, ce convertisseur est à la fois dévolteur (comme le convertisseur Buck) et survolteur (comme le convertisseur Boost). C'est pour cela qu'on le qualifie de Buck-Boost.

Le tableau suivant donne une idée sur la complexité de chaque type de convertisseur.

Type	Fonction	Interrupteur	Diode	Transformateur	Complexité
Buck	Abaisseur	1	1	Non	Faible
Boost	Elévateur	1	1	Non	Faible
Buck-Boost	Abaisseur/ Elévateur	1	1	Non	Faible
Flyback	Abaisseur/ Elévateur	1	1	Oui	Moyen
Half Forward	Abaisseur/ Elévateur	1	1	Oui	Moyen
Push Pull	Abaisseur/ Elévateur	2	2	Oui	Forte
Half Bridge	Abaisseur/ Elévateur	2	2	Oui	Forte
Full Bridge	Abaisseur/ Elévateur	4	4	Oui	Très Forte

Tableau 2.1 Complexité de chaque type de convertisseur DC-DC.

2.3 Définition d'un MPPT

La commande MPPT « Maximum Power Point Tracking » est une méthode permet au générateur PV de travailler à sa puissance maximale quel que soit les conditions météorologiques d'irradiations et de température .Le principe de cette commande est basé sur la variation automatique du rapport cyclique α d'un convertisseur DC-DC à la valeur adéquate de manière à maximiser continuellement la puissance à la sortie du panneau PV.

Les hacheurs sont utilisé comme interface de puissance à contrôler par le régulateur MPPT, afin d'adapter la tension de sortie du hacheur à la tension requise par la charge. A partir de cette règle et selon le type de contrôleur, on peut raisonner sur plusieurs et différentes méthodes, afin d'extraire le maximum de puissance d'un panneau solaire [13].

Le rendement du point de fonctionnement (η_{MPPT}), permet de mesurer l'efficacité de la commande qui a en charge le contrôle du convertisseur de puissance.

$$\eta_{MPPT} = \frac{P_{pv}}{P_{mpp}} \dots \dots \dots (35)$$

Les performances d'une commande MPPT ne se résument pas à ce seul paramètre (η_{MPPT}). D'autres critères utiliser pour évaluer la qualité de ce type de commande tels que les capteurs nécessaires, la complexité, le coût, la portée de l'efficacité, la vitesse de convergence, le suivi correct lors de changement l'irradiation et / ou le changement de température et le matériel nécessaire pour la mise en œuvre [15].

2.3.1. Classification Des Commandes MPPT Selon Le Type De Recherche

2.3.1.1. Méthodes indirectes

Ce type de commandes utilise le lien existant entre les variables mesurées (I_{sc} ou V_{oc}), qui peuvent être facilement déterminées, et la position approximative du MPP. Il compte aussi les commandes se basant sur une estimation du point de fonctionnement du GPV réalisée à partir d'un modèle paramétrique défini au préalable.

Il existe aussi des commandes qui établissent une poursuite de la tension optimale en prenant en compte uniquement les variations de la température des cellules donnée par un capteur. Ces commandes ont l'avantage d'être simples à réaliser. Elles sont plutôt destinées à des systèmes peu coûteux et peu précis devant fonctionner dans des zones géographiques où il y a peu de changements climatiques. Parmi ces méthodes, on retrouve la méthode de la tension de circuit ouvert du générateur, la méthode de court-circuit etc. [16]

2.3.1.2. Méthodes directes

Ce type de commande 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 hausse de 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 différenciation, la méthode Perturbe & Observe (P&O), l'incrément de conductance, etc. [16]

2.3.2. Les différents algorithmes de commandes MPPT

Au cours des dernières décennies, de nombreuses méthodes pour trouver le MPP ont été développées. Parmi ces méthodes, Les méthodes les plus couramment rencontrées sont communément appelées: Perturb & Observ (P&O), l'incrément de conductance (INC), Hill Climbing, Fraction de la Tension V_{oc} (FCO), Fraction du Courant I_{sc} (FCC) et les commandes MPPT basées sur des différents méthodes d'intelligence artificielle.

2.3.2.1. Algorithme Perturber et Observer (P&O)

La méthode P&O est généralement la plus utilisée en raison de sa simplicité et sa facilité de réalisation. Cet Algorithme utilisée comme entrée les valeurs de tension V_{pv} et de courant

I_{pv} , et comme sortie la valeur de rapport cyclique α [19]. Le principe de cet algorithme (Comme son nom l'indique et comme représente-la figure (2.26)) est d'effectuer une perturbation sur la tension V_{pv} tout en agissant sur le rapport cyclique α puis suite à cette perturbation, on calcule la puissance fournie par le panneau $P(k)$ et la compare à la précédente $P(k-1)$ [16] : Si la puissance augmente, on s'approche du (MPP) et la variation du rapport cyclique est maintenue dans le même sens. Au contraire si la puissance diminue, on s'éloigne du MPP. Alors, on doit inverser le sens de la variation du rapport cyclique. Comme illustre la figure (2.25) [17]

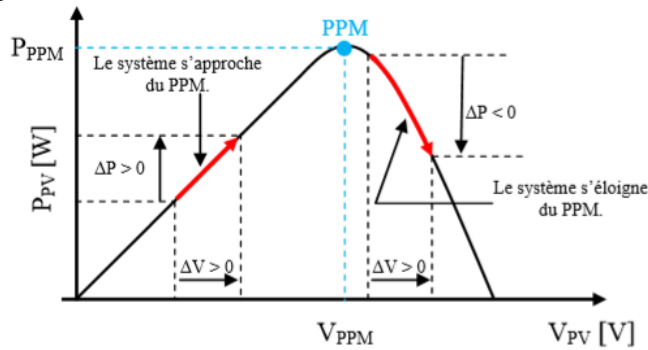


Figure 2.25 Recherche du PPM par la méthode P&O .

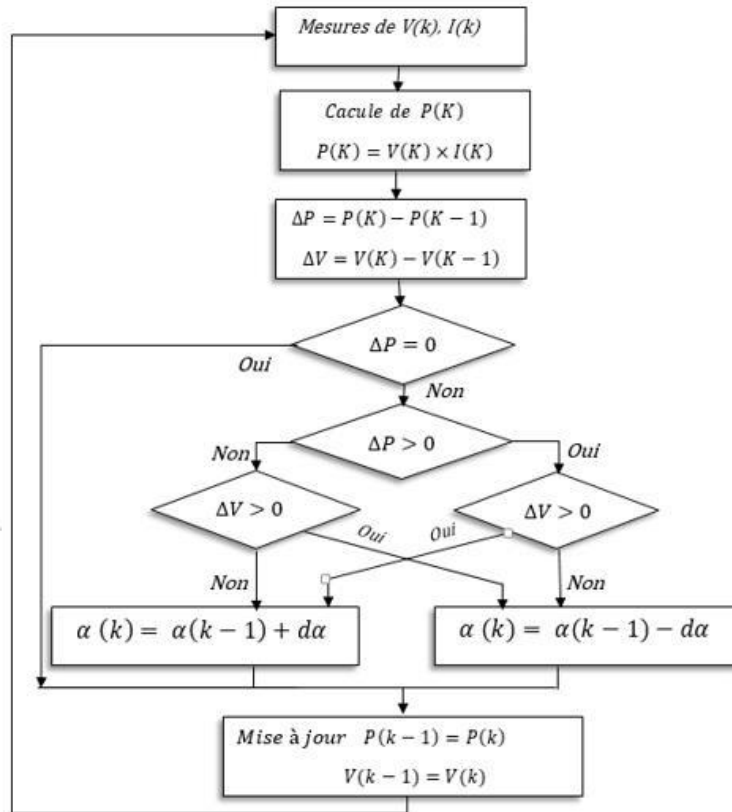


Figure 2.26 Organigramme de l'algorithme P&O.

2.3.2.2. Algorithmes Perturber et Observer (P&O) avec pas variable

Le choix de pas ($d\alpha$) d'algorithme P&O influe sur l'oscillation autour le point de puissance maximal et le temps de convergence d'algorithme vers cette point. Pour cela, on trouve des algorithmes P&O avec pas variable entre deux ou plusieurs valeurs afin de faire une combinaison adéquate entre la précision et la rapidité, l'un de ces algorithmes est celle proposé par [14]. Dans cet algorithme le pas est varié entre deux valeurs C_1 et C_2 selon la comparaison entre la valeur absolue de variation de puissance et une certaine valeur comme illustre dans le partiel organigramme suivant :

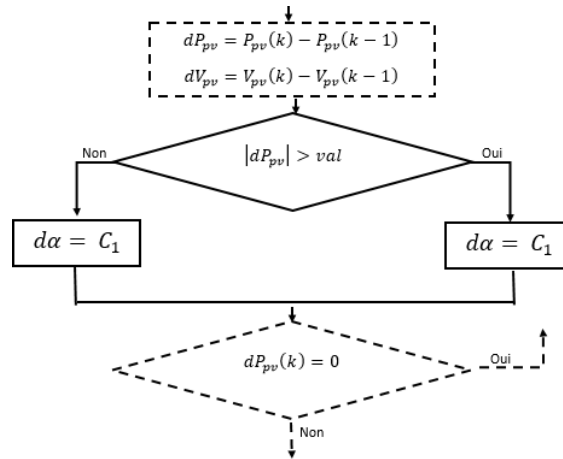


Figure 2.27 partiel organigramme d'algorithme P&O variable.

Un autre algorithme P&O avec pas variable est proposé par [20]. Dans cet algorithme le pas va changer son valeur dans chaque itération selon la variation de puissance et de tension suivant l'équation (36) :

$$d\alpha(k) = d\alpha_{fixe} \frac{dp}{dv} \dots \dots \dots (36)$$

La différence entre les deux algorithmes précédant est le nombre des valeurs qui peut le pas prendre. Dans le premier algorithme le pas peut prendre deux valeurs uniquement mais dans le deuxième algorithme le pas peut prendre plusieurs valeurs (un nombre indéterminé de pas).

2.3.2.3. Algorithme Incrément de la Conductance (INC)

L'algorithme de la conductance incrémentale est un algorithme qui s'adapte bien aux variations rapides des conditions météorologiques du site, il est relativement plus stable que la méthode P&O, cependant son implémentation pratique est plus difficile [21].

Le principe de cet algorithme est basé sur la connaissance de la valeur de la conductance $G = I/V$ et l'incrément de la conductance $(\Delta I/\Delta V)$ pour en déduire la position du point de fonctionnement par rapport MPP.

- Si l'incrément de conductance $(\Delta I/\Delta V)$ est supérieur à l'opposé de la conductance $(-G)$, on diminue le rapport cyclique.
- Si l'incrément de conductance est inférieur à l'opposé de la conductance, on augmente le rapport cyclique.

Ce processus est répété jusqu'à atteindre le MPP, ou la dérivée de la puissance est égale à zéro (figure (2.28)) comme indiqué dans l'Equation (37) [22]:

$$\frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} = 0 \dots \dots \dots (37)$$

Cette équation peut être réécrite comme suit :

$$\frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} = \frac{d(I_{pv} * V_{pv})}{dV_{pv}} = \frac{V_{pv} * dI_{pv}}{dV_{pv}} + \frac{I_{pv} * dV_{pv}}{dV_{pv}} \dots \dots \dots (38)$$

$$\frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} = V_{pv} \frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} + I_{pv} \dots \dots \dots (39)$$

Ce qui implique que :

$$\frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} + \frac{I_{pv}}{V_{pv}} = 0 \dots \dots \dots (40)$$

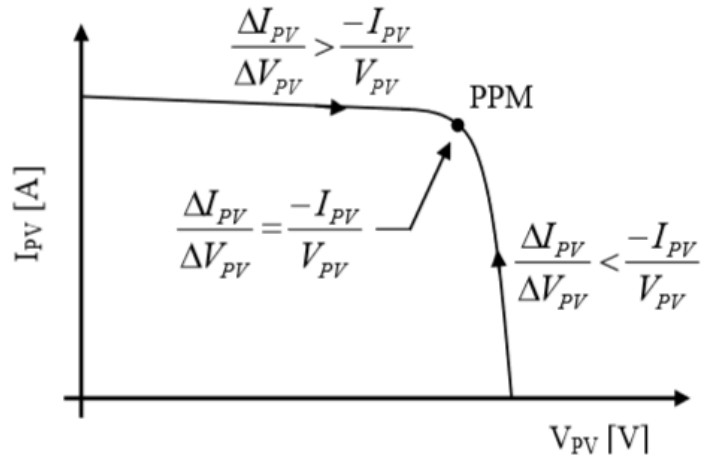


Figure 2.28 Positionnement du point de fonctionnement suivant la valeur de $\Delta I_{PV}/\Delta V_{PV}$ sur les caractéristiques de I-V.

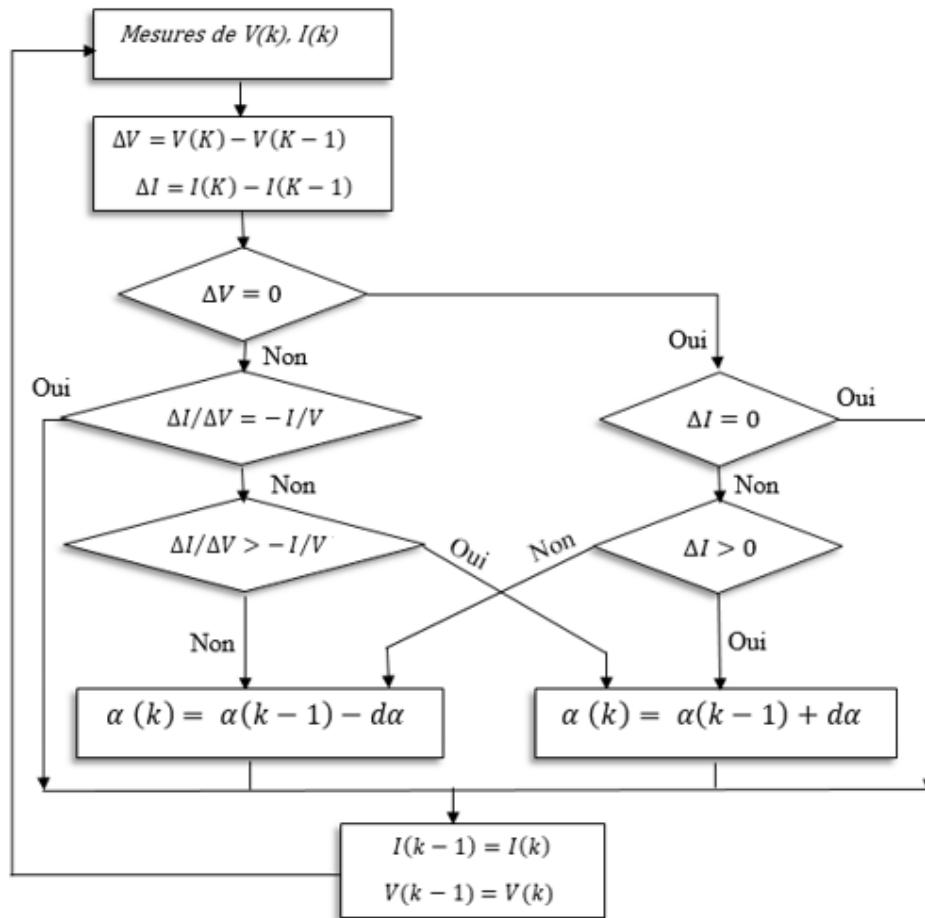


Figure 2.29 Organigramme de l’algorithme INC

2.3.2.4. Algorithme “Hill Climbing”

La technique de contrôle nommée Hill Climbing est l’un des techniques les plus utilisées pour la commande MPPT grâce à sa simplicité à mettre en œuvre [23] mais elle possède des oscillations autour du PPM en régime établi et une perte occasionnelle de la recherche du PPM lors de changement rapide des conditions climatiques [15]. L’algorithme de cette méthode est illustré sur la figure (2.30) [23]:

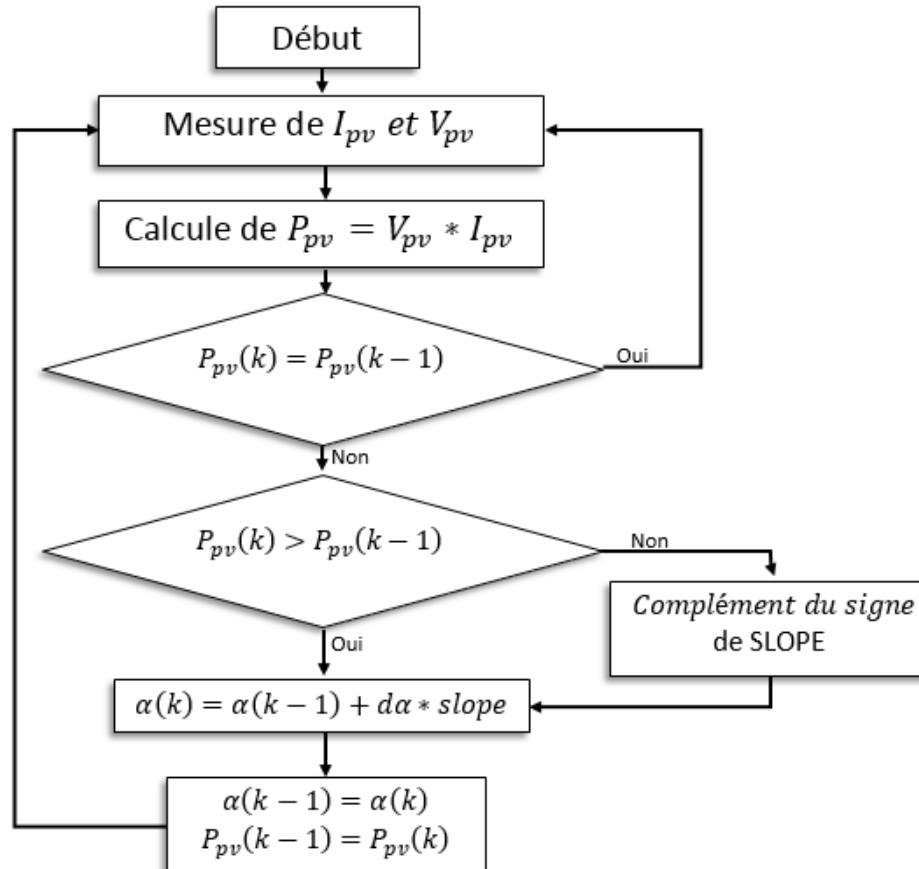


Figure 2.30 Organigramme de l’algorithme Hill Climbing.

Avec:

- SLOPE: correspond à une variable qui prend la valeur « 1 » ou « -1 » suivant la direction que l’on doit donner à la recherche pour augmenter la puissance en sortie du panneau.

Périodiquement, la puissance de panneau est comparé à la valeur déterminée précédemment, en fonction du résultat de comparaison, le signe de la valeur Slope change ou reste identique. Une fois le PPM atteint, le système oscille autour de ce dernier indéfiniment [15].

2.3.2.5. Algorithme de Fraction de la Tension Voc (FCO)

Cette technique de recherche du PPM est consistée à comparer la tension du panneau VPV avec une tension de référence qui correspond à la tension optimale Vmpp. L’erreur de tension est alors utilisée pour ajuster le rapport cyclique du convertisseur. La tension de référence est obtenue à partir de la connaissance de la relation linéaire existante entre Vmpp et Voc d’un module PV [15]:

$$V_{mpp} = k_v * V_{oc} \dots \dots \dots (41)$$

Où kv est un facteur de tension dépendant des caractéristiques de la cellule PV et qui varie entre 0.73 et 0.8 [17].

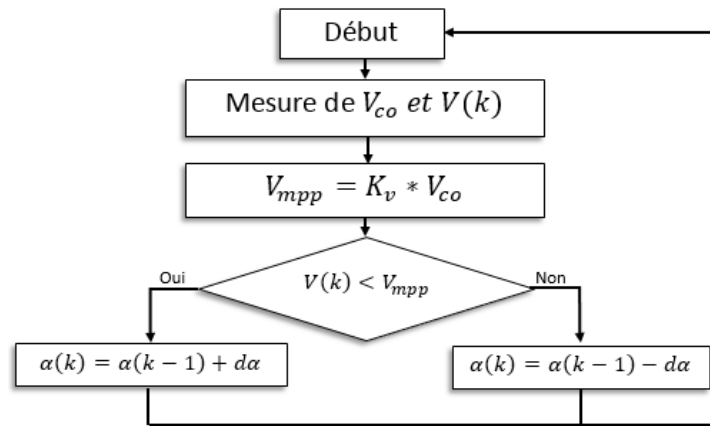


Figure 2.31 Organigramme de l’algorithme FCO

Pour en déduire la tension optimale, on doit mesurer la tension du circuit ouvert Voc. Par conséquent, le point de fonctionnement du panneau est maintenu proche de point optimal en ajustant la tension de panneau à la tension optimale calculée. Le processus permet d’agir cycliquement sur le rapport cyclique pour atteindre la tension optimale [17].

L’inconvénient majeur de cette technique réside dans la nécessité d’effectuer la mesure de Voc de temps en temps et l’obligation de déconnecter la charge du PV durant cette mesure impliquant une perte de transfert de puissance à chaque mesure [14].

2.3.2.6. Algorithme de Fraction du Courant Isc (FCC)

Cette technique est basée sur la relation linéaire entre le courant de court-circuit et le courant optimal donné par l’équation suivante :

$$I_{mp} = k_i * I_{sc} \dots \dots \dots (42)$$

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

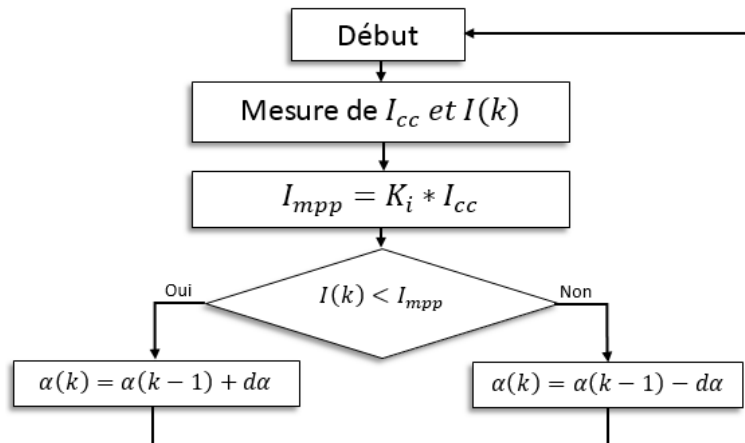


Figure 2.32 Organigramme de l’algorithme FCC

En effet, le PPM est obtenue en amenant le courant du panneau au courant optimal. L’équation (40) montre que le courant Impp peut être déterminé par une mesure d’Isc.

La mesure de Isc implique une perte de transfert de puissance du à la mise en court-circuit du GPV. Cependant, cette méthode peut s’avérer plus précise que la précédente car la température n’influence pas trop ce coefficient [14-17].

2.3.2.7. Les commandes MPPT basées sur le principe de la logique floue (FLC)

Les commandes basées sur la logique floue sont utilisées dans les systèmes de poursuite du point à maximum de puissance, cette commande offre l'avantage d'être une commande robuste et qui ne nécessite pas la connaissance exacte du modèle mathématique du système. De plus, elles peuvent traiter des non linéarités [15-17].

Le fonctionnement de cet algorithme se fait en trois étapes :

- La fuzzification : permet la conversion des variables physiques d'entrée en ensembles flous. Durant cette étape, les variables d'entrées numériques sont converties en variable linguistique pouvant prendre les cinq valeurs suivantes : NB (Negative Big), NS (Negative Small), ZE (Zero), PS (Positive Small), PB (Positive Big). par l'utilisation de la structure de base de la commande logique floue. comme illustre la figure (2.33.a).

Les paramètres d'entrées E et ΔE sont liés aux équations suivantes [15]:

$$E = \frac{P(k) - P(k - 1)}{V(k) - V(k - 1)} \dots \dots \dots (43)$$

$$\Delta E = E(k) - E(k - 1) \dots \dots \dots (44)$$

- L'inférence : Dans l'étape d'inférence, on prend des décisions à partir des variables d'entrées E et ΔE sur le variable de sortie Δα à l'aide de tableau de règles d'inférence représenté dans la figure (2.33.b) [15]. En effet, on établit des relations logiques entre les entrées et la sortie tout en définissant les règles d'appartenance. Par la suite, on dresse le tableau de règles d'inférence [17].

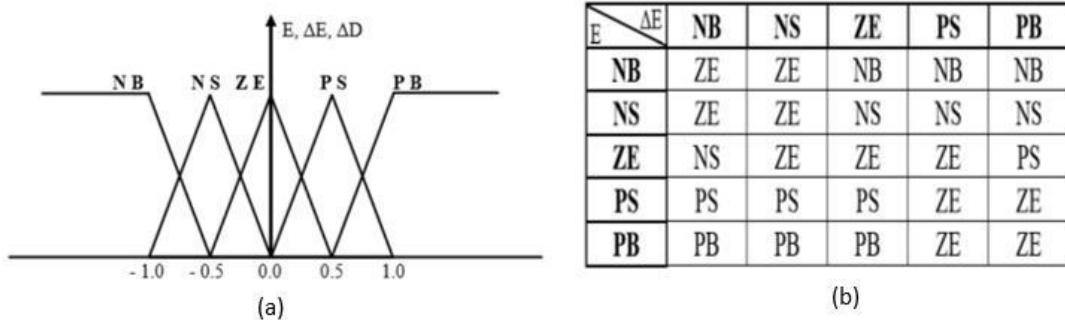


Figure 2.33 Les commandes MPPT basées sur le principe de la logique floue (a) exemple de structure de base de la commande floue. (b) exemple d'une table de vérité pour une commande logique floue.

- La defuzzification: Cette étape ne s'applique qu'à la variable de sortie Δα. Durant cette étape, Δα sera converti d'une variable linguistique à une variable numérique afin de pouvoir piloter le convertisseur de puissance pour atteindre le PPM. [17]

Cette commande présente les meilleures performances en termes de précision et de rapidité de recouvrement de PPM. Mais l'inconvénient de cette commande est que sa précision est liée à la complexité de la table de vérité employée donc la nécessité du choix obligatoire d'un microcontrôleur ayant une grande capacité de calculs cela entraîne obligatoirement une consommation énergétique non négligeable liée au microprocesseur ainsi qu'un surcoût [15].

2.3.2.8. Les commandes MPPT de réseaux de neurones artificiels (ANN)

L'idée de base d'ANN est de faire un modèle artificiel du cerveau humain Afin de produire un ordinateur qui peut prendre des décisions comme un être humain.

CHAPITRE 2-Convertisseurs DC-DC et Techniques MPPT

Les réseaux de neurones sont composés généralement de trois couches différenciées : Couche d'entrée (Input layer), Couche cachée (Hidden layer), Couche de sortie (Output layer). Comme le montre la figure (2.17) [15].

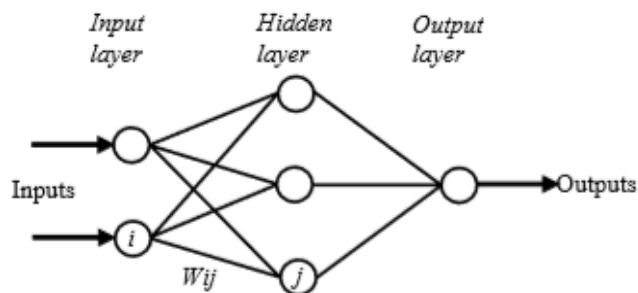


Figure 2.34 Exemple d'un réseau de neurones.

Le nombre de nœuds au niveau des différentes couches est variable en fonction du degré d'apprentissage souhaité et de la précision de la commande souhaitée. Pour une commande MPPT, les variables d'entrées peuvent donc être les paramètres caractéristiques d'un GPV (Voc, Isc) associées ou non à des données atmosphériques. La sortie est généralement un ou plusieurs signaux de référence comprenant au moins le rapport cyclique permettant de commander le convertisseur pour fonctionner le plus souvent possible au PPM.

La qualité de la recherche du PPM dépend essentiellement de [15]:

- L'algorithme utilisé dans la couche cachée et de la construction proprement dite du réseau.
- Le choix de la valeur du poids W_{ij} : Pour identifier avec précision les différents PPM éventuels, les poids W_{ij} doivent être initialement déterminés avec le plus de soin possible à travers des procédures d'apprentissage laborieuses et spécifiques à chaque GPV, chaque site d'implantation et chaque type de charge. De plus, cet apprentissage doit être révisé régulièrement (typiquement chaque mois) pour mettre à jour les relations entre les entrées et les sorties du réseau. Ce qui rend cette commande fastidieuse en entretien et en maintenance.

2.4. Conclusion

Afin de profiter mieux de la puissance délivrée par le GPV, L'adaptation de cette dernière ne peut avoir lieu que l'ors d'introduction initialement d'un étage de conversion DC-DC statique (Hacheur).

Nous avons cités les types de convertisseur les plus utilisés à savoir: le convertisseur BOOST, BUCK et BOOST-BUCK.

Par la suite nous avons évoqué aussi les techniques les plus connues de pilotage des convertisseurs DC-DC qui peuvent nous conduire à faire travailler le GPV dans son point de puissance maximale. Ces techniques sont appelées, Techniques de poursuite du point de puissance maximale (MPPT).

Le chapitre qui suit présente les différents résultats de simulation de quelques algorithmes étudiée et discuté dans ce chapitre.

**CHAPITRE 3-
SIMULATION DES
COMMANDES MPPT
DANS UNE CHAINE DE
CONVERSION
PHOTOVOLTAIQUE**

CHAPITRE 3-SIMULATION DES COMMANDES MPPT DANS UNE CHAINE DE CONVERSION PHOTOVOLTAIQUE

3.1 Introduction

Nous avons effectué dans ce chapitre les simulations de la courbe I-V d'un Module PV de type SOLAREX MSX-60 et par la suite nous avons injecté un étage d'adaptation il s'agit du convertisseur DC-DC ploter par une commande MPPT.

Nous avons utilisés le logiciel PSIM qui est un logiciel de simulation pouvant être utilisé en électricité générale, électrotechnique et électronique (analogique, logique). Il est constitué de deux programmes:

- PSIM: Dessin du schéma et simulation (Calcul des variables).
- SIMVIEW: Tracé des courbes.

Nous avons étudiés le comportement de ce GPV sous plusieurs valeurs de rayonnements et de températures.

Nous avons par la suite injecté 03 types de convertisseurs DC-DC qui sont le Boost, le Buck et le Buck-Boost.

Pour chaque convertisseur DC-DC nous avons appliqué 03 types de commandes MPPT voire P&O, Incrément de conductance et le Hill_Climbing.

Afin de visualiser le comportement de chaque commande MPPT lors du changement des conditions climatiques nous avons fait varier le rayonnement en appliquant plusieurs valeurs.

3.2 Les caractéristiques du module SOLAREX MSX-60

Characteristics du GPV SOLAREX MSX-60	
Characteristics	Value
NUMBER OF CELLS NS=	36
Maximum power (Pmax)	60 W
Voltage at Pmax (Vmp)	17.1 V
Current at Pmax (Imp)	3.5 A
Guaranteed minimum Pmax	58 W
Short-circuit current (Isc)	3.8 A
Open-circuit voltage (Voc)	21.1 V
BAND ENERGY EG	1.12
IDEALITY FACTOR A	1.2
SHUNT RESISTANCE RSH	1000
SERIES RESISTANCE RS	0.008

Tableau 3.1 Caractéristiques du Module MSX-60

3.3 Schéma de caractérisation du Module MSX-60 :

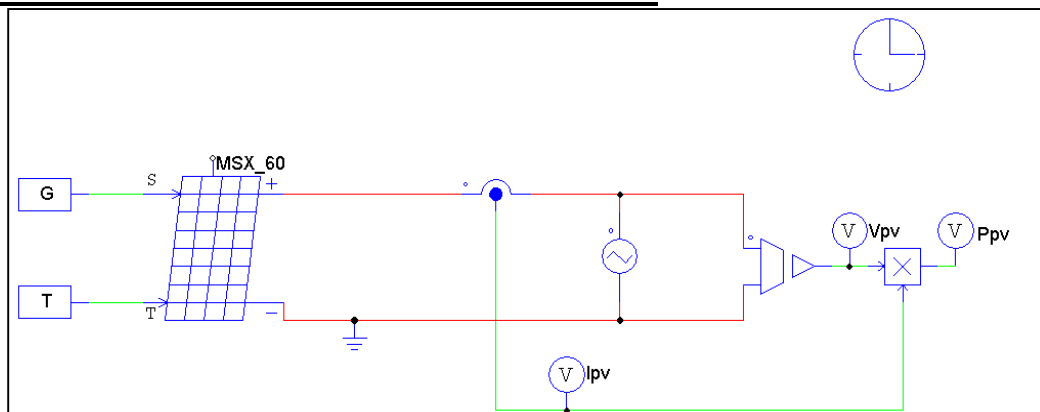


Figure 3.1 Schéma de Caractérisation du Module MSX-60

3.4 Résultat de simulation :

CHAPITRE 3-SIMULATION DES COMMANDES MPPT DANS UNE CHAINE DE CONVERSION PHOTOVOLTAIQUE

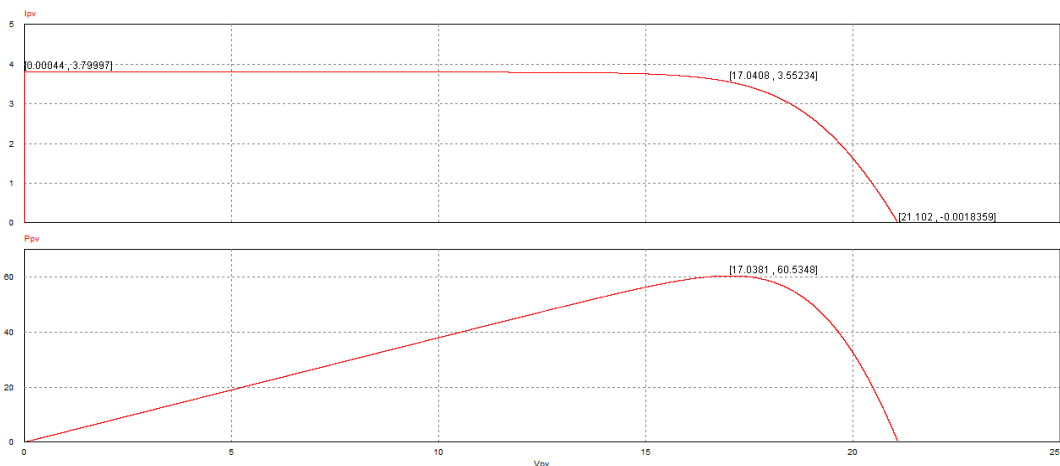


Figure 3.2 Courbes I(V) P(V) du Module MSX-60

La figure 3.2 présente l'évolution de la puissance et le courant du module en fonction de la tension aux conditions STC.

On remarque que la courbe I(V) démarre depuis la combinaison (0.00044, 3.79997) qui correspond à la valeur de $I_{sc}=3.8A$ et passe par la combinaison (17.0408, 3.55234) qui correspond au point de puissance maximale et par conséquent le point (17.0381, 60.5348) dont $P_{mp}=60W$ et finalement termine vers le point (21.102, -0.0018359) qui correspond à la valeur $V_{oc}=21.1V$.

3.5 Effet du changement climatique (Rayonnement/Température):

3.5.1 Effet du Rayonnement :

3.5.1.1 Schéma de simulation :

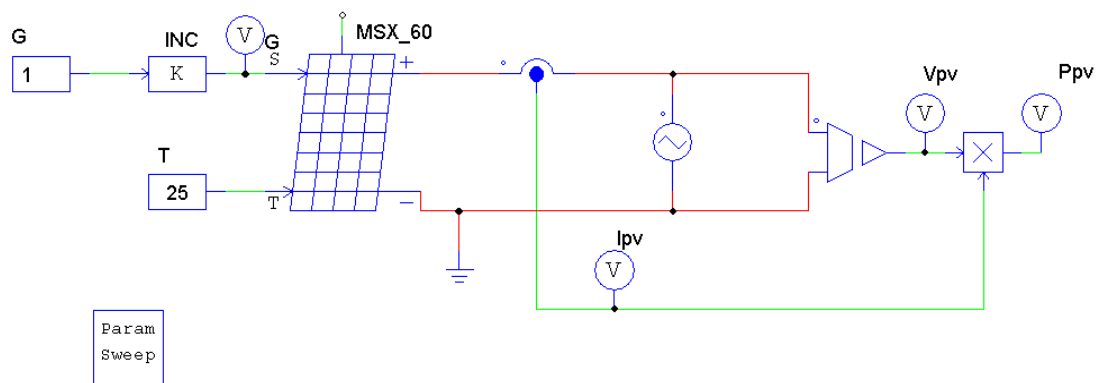


Figure 3.5.1.1 Schéma de simulation de l'effet du rayonnement

3.5.1.2 Résultat de simulation:

CHAPITRE 3-SIMULATION DES COMMANDES MPPT DANS UNE CHAÎNE DE CONVERSION PHOTOVOLTAÏQUE

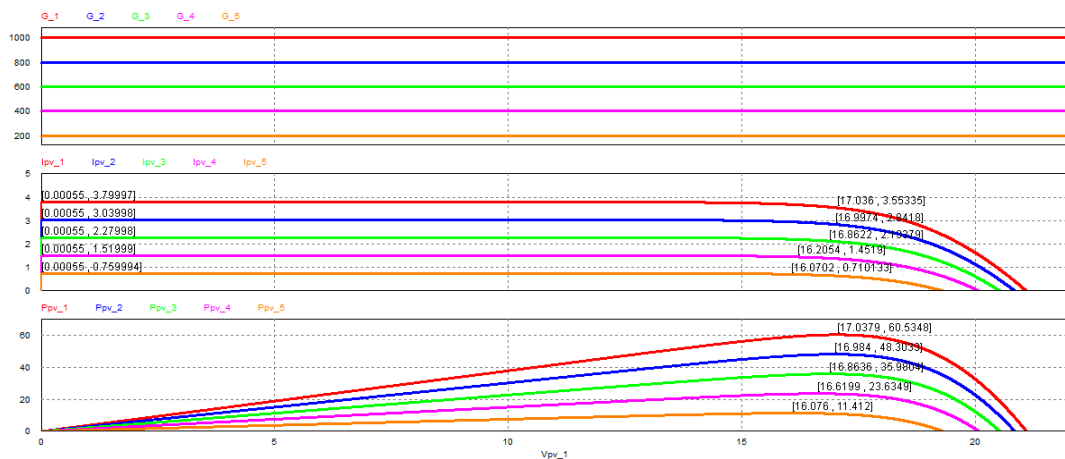


Figure 3.5.1.2 Courbes I(V) P(V) de l'effet du rayonnement

La figure 3.5.1.2 présente l'évolution de la puissance et le courant du module en fonction de la tension aux pour chaque valeur du rayonnement.

Ces résultats se résument dans le tableau suivant:

Rayonnement (W/m ²)	Imp (A)	Vmp (V)	Pmp (W)
STC (1000)	3.55335	17.036	60.5348
800	2.8418	16.9974	48.3033
600	2.13379	16.8622	35.9804
400	1.4519	16.2054	23.6349
200	0.710133	16.0708	11.412

Tableau 3.2 Effet du rayonnement sur le PPM

On remarque que le courant généré par le GPV diminue lors de la diminution de l'intensité du rayonnement et par conséquent la puissance. On peut dire que la tension ne change pas de grande valeur par changement du rayonnement.

3.5.2 Effet de la Température :

3.5.2.1 Schéma de simulation :

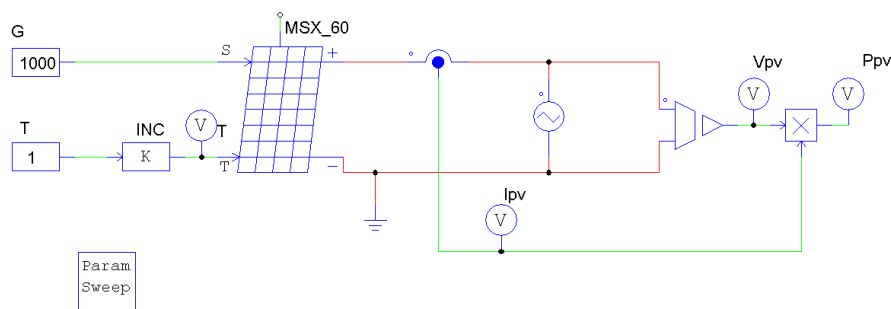


Figure 3.5.2.1 Schéma de simulation de l'effet de la Température

3.5.2.2 Résultat de simulation:

CHAPITRE 3-SIMULATION DES COMMANDES MPPT DANS UNE CHAINE DE CONVERSION PHOTOVOLTAÏQUE

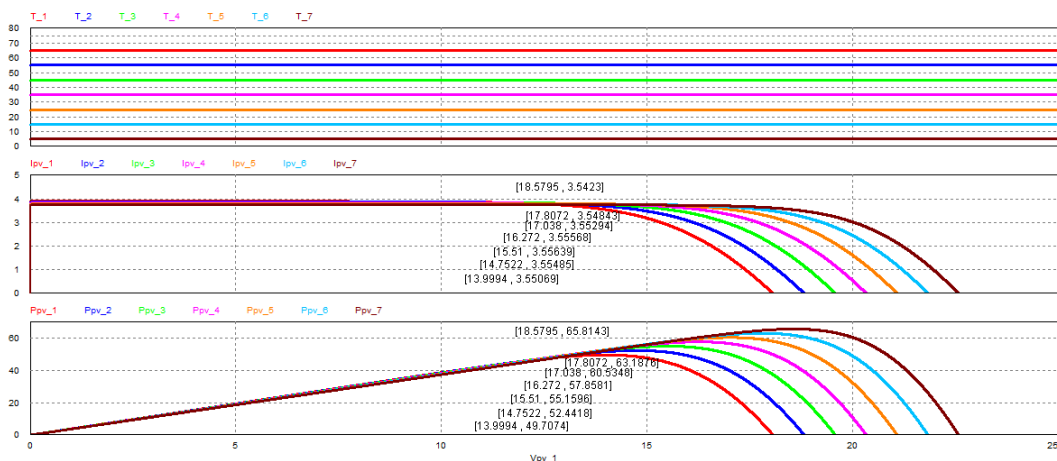


Figure 3.5.2.2 Courbes I(V) P(V) de l'effet de la Température

La figure 3.5.2.2 présente l'évolution de la puissance et le courant du module en fonction de la tension pour chaque valeur de la température.

Ces résultats se résument dans le tableau suivant:

Température (°C)	Imp (A)	Vmp (V)	Pmp (W)
5	3.5423	18.5795	65.8143
15	3.54843	17.8072	63.1876
STC (25)	3.55294	17.038	60.5348
35	3.55568	16.272	57.8581
45	3.55639	15.51	55.1596
55	3.55485	14.7522	52.4418
65	3.55069	13.9994	49.7074

Tableau 3.3 Effet de la Température sur le PPM

On remarque que la tension aux bornes du GPV diminue lors de l'augmentation de la température et par conséquent la puissance. On peut dire que le courant reste presque inchangé par rapport au changement de la température

3.6 Les techniques de poursuite du point de puissance maximale (MPPT):

3.6.1 La méthode P&O:

Nous avons appliqué cette méthode pour 03 convertisseurs DC-DC voire Buck, Boost et Buck-Boost.

3.6.1.1 P&O avec DC-DC Boost:

Nous avons connecté le MSX-60 à un convertisseur DC-DC de type Boost comme montré dans la figure suivante :

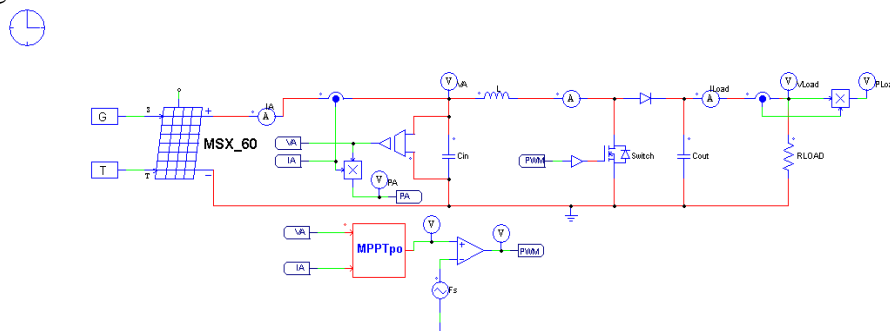


Figure 3.6.1.1 Schéma de simulation de la commande MPPT avec un DC-DC Boost

CHAPITRE 3-SIMULATION DES COMMANDES MPPT DANS UNE CHAINE DE CONVERSION PHOTOVOLTAIQUE

3.6.1.2 Résultat de simulation de la commande MPPT P&O avec DC-DC Boost sous STC:

Le résultat de simulation sera sous condition STC dont $G=1000\text{w/m}^2$ et $T=25^\circ\text{c}$

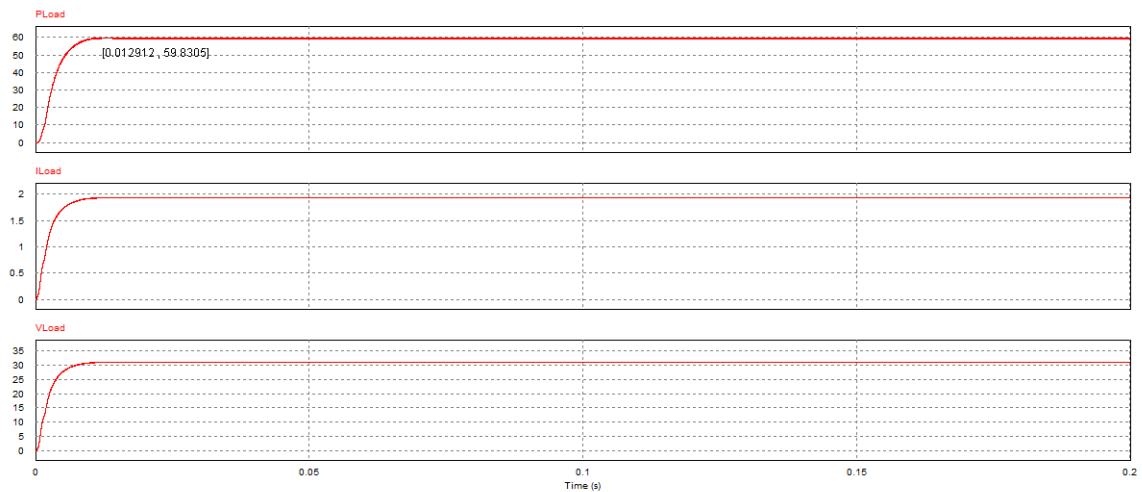


Figure 3.6.1.2 Courbes Iload (t) Pload (t) Vload (t) de la MPPT P&O.

On remarque que la puissance atteint la valeur maximale de 59.8305W dans un temps $t=0.012912\text{s}$ et reste stable.

On peut déduire que la technique, P&O pour un DC-DC Boost répond d'une manière optimale sous STC.

3.6.1.3 Résultat de simulation de la commande MPPT P&O avec DC-DC Boost sous changement de rayonnement G:

Le résultat de simulation sera sous changement brusque du rayonnement G avec $T=25^\circ\text{c}$

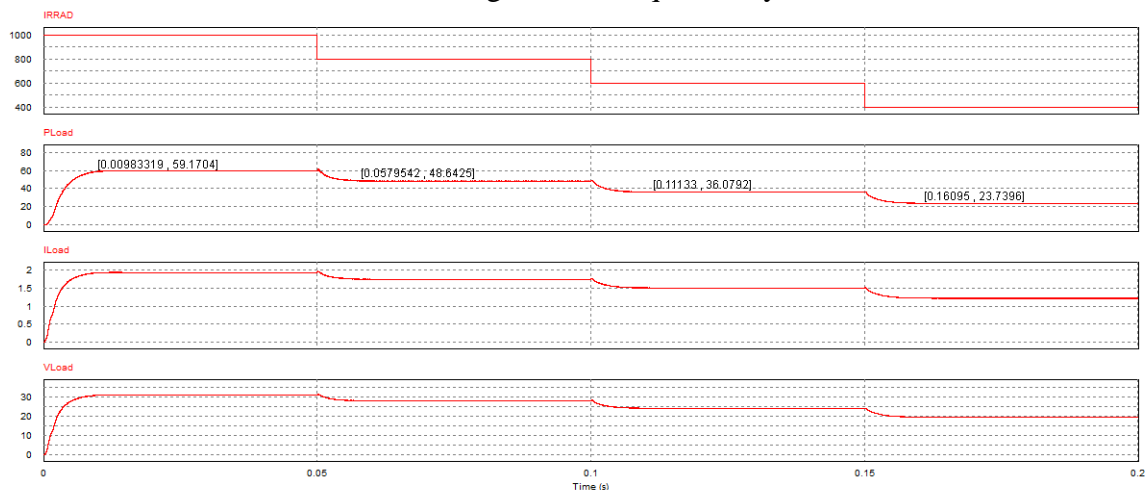


Figure 3.6.1.3 Courbes Iload(t) Pload(t) Vload(t) de la MPPT P&O sous changement de G.

On remarque que pour chaque valeur de rayonnement G la commande P&O conduit le système PV vers la puissance maximale dans 0.01s comme montré dans le tableau suivant:

CHAPITRE 3-SIMULATION DES COMMANDES MPPT DANS UNE CHAINE DE CONVERSION PHOTOVOLTAIQUE

Rayonnement (W/m ²)	Pmp (W)	t (s)
STC (1000)	59,1704	0,01
800	48,6425	0,008
600	36,0792	0,01
400	23,7396	0,01
		Moy=0,01

Tableau 3.4 Résultats de la MPPT P&O sous changement de G

3.6.1.4 P&O avec DC-DC Buck:

Nous avons connecté le MSX-60 à un convertisseur DC-DC de type Buck comme montré dans la figure suivante :

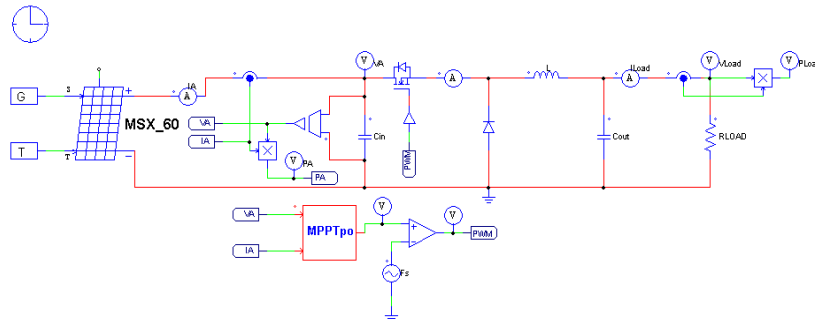


Figure 3.6.1.4 Schéma de simulation de la commande MPPT avec un DC-DC Buck

3.6.1.5 Résultat de simulation de la commande MPPT P&O avec DC-DC Buck sous STC:

Le résultat de simulation sera sous condition STC dont $G=1000\text{w/m}^2$ et $T=25^\circ\text{c}$

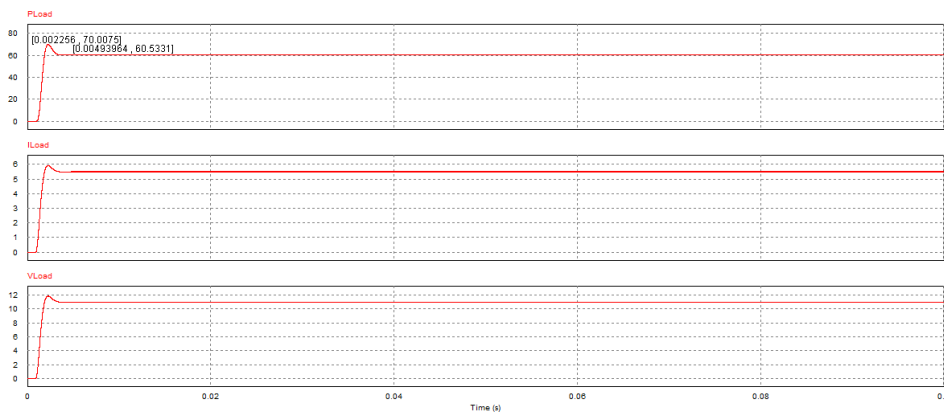


Figure 3.6.1.5 Courbes Iload(t) Pload(t) Vload(t) de la MPPT P&O avec DC/DC Buck.

On remarque que la puissance atteint la valeur maximale de 60.5331W dans un temps $t=0.004939\text{s}$ et reste stable. On peut déduire que la technique P&O pour un DC-DC Buck aussi réponde d'une manière optimale sous STC.

3.6.1.6 Résultat de simulation de la commande MPPT P&O avec DC-DC Buck sous changement de rayonnement G:

Le résultat de simulation sera sous changement brusque du rayonnement G avec $T=25^\circ\text{c}$

CHAPITRE 3-SIMULATION DES COMMANDES MPPT DANS UNE CHAINE DE CONVERSION PHOTOVOLTAIQUE

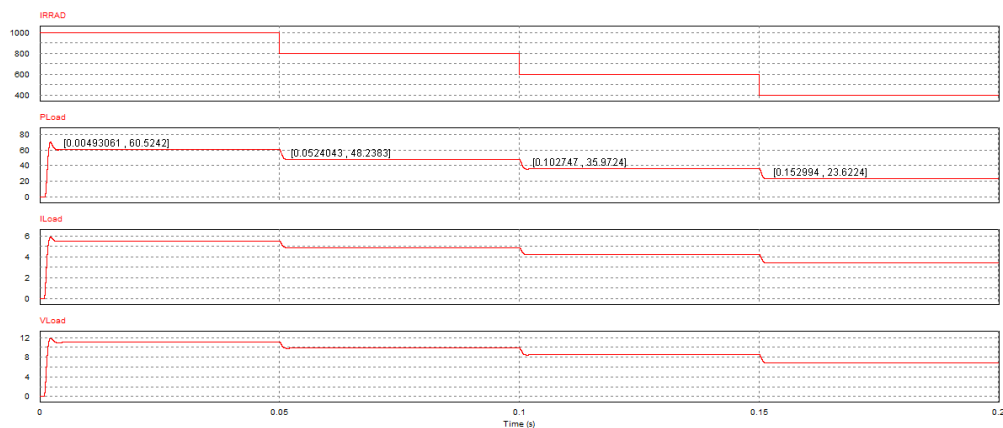


Figure 3.6.1.6 Courbes Iload(t) Pload(t) Vload(t) de la MPPT P&O avec DC-DC Buck sous changement de G.

On remarque que pour chaque valeur de rayonnement G la commande P&O conduit le système PV vers la puissance maximale dans 0.01s comme montré dans le tableau suivant:

Rayonnement (W/m ²)	Pmp (W)	t (s)
STC (1000)	60,5242	0,00493061
800	48,2383	0,0024043
600	35,9724	0,002747
400	23,6224	0,002994
		Moy=0,0032

Tableau 3.5 Résultats de la MPPT P&O sous changement de G

3.6.1.7 P&O avec DC-DC Buck-Boost:

Nous avons connecté le MSX-60 à un convertisseur DC-DC de type Buck-Boost comme montré dans la figure suivante:

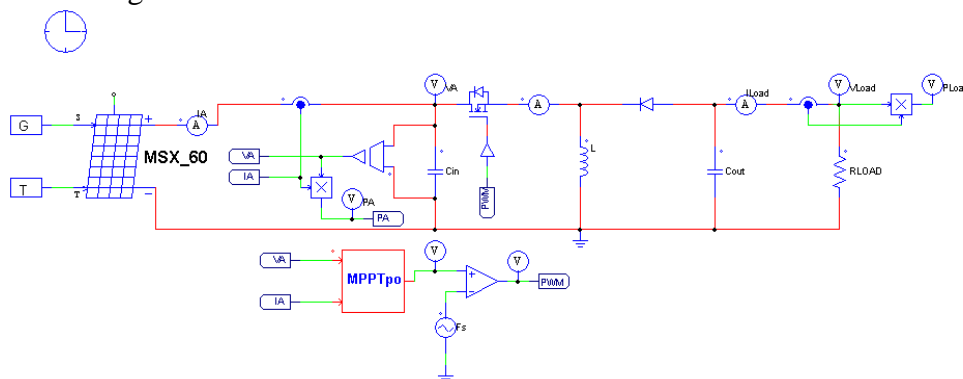


Figure 3.6.1.7 Schéma de simulation de la commande MPPT avec un DC-DC Buck-Boost

3.6.1.8 Résultat de simulation de la commande MPPT P&O avec DC-DC Buck-Boost sous STC:

Le résultat de simulation sera sous condition STC dont G=1000w/m2 et T=25°C

CHAPITRE 3-SIMULATION DES COMMANDES MPPT DANS UNE CHAINE DE CONVERSION PHOTOVOLTAIQUE

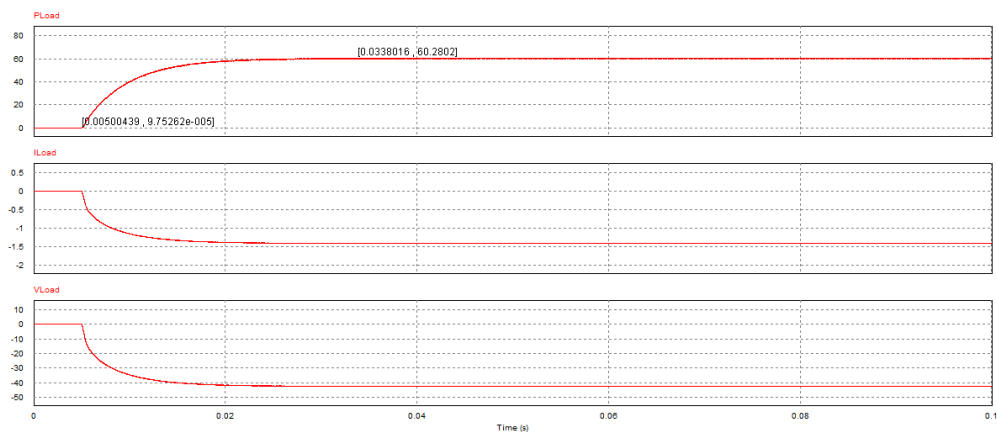


Figure 3.6.1.8 Courbes Iload(t) Pload(t) Vload(t) de la MPPT P&O avec DC/DC Buck-Boost.

On remarque que la puissance atteint la valeur maximale de 60.2802W dans un temps $t=0.0338s$ avec ondulation.

3.6.1.9 Résultat de simulation de la commande MPPT P&O avec DC-DC Buck-Boost sous changement de rayonnement G:

Le résultat de simulation sera sous changement brusque du rayonnement G avec $T=25^{\circ}c$

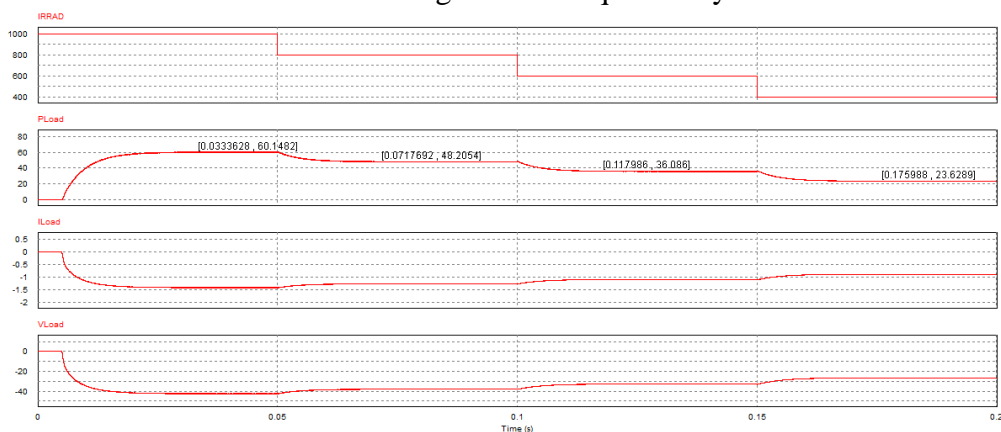


Figure 3.6.1.9 Courbes Iload(t) Pload(t) Vload(t) de la MPPT P&O avec DC-DC Buck-Boost sous changement de G.

On remarque que pour chaque valeur de rayonnement G la commande P&O conduit le système PV vers la puissance maximale dans 0.0024s comme montré dans le tableau suivant:

Rayonnement (W/m ²)	Pmp (W)	t (s)
STC (1000)	60,1482	0,03336
800	48,2054	0,02176
600	36,086	0,017986
400	23,6289	0,025988
		Moy=0,024

Tableau 3.5 Résultats de la MPPT P&O sous changement de G

3.6.2 La méthode Incrément de Conductance (INC):

Nous avons appliqué cette méthode pour 03 convertisseurs DC-DC voire Buck, Boost et Buck-Boost.

3.6.2.1 INC avec DC-DC Boost:

CHAPITRE 3-SIMULATION DES COMMANDES MPPT DANS UNE CHAINE DE CONVERSION PHOTOVOLTAIQUE

Nous avons connecté le MSX-60 à un convertisseur DC-DC de type Boost comme montré dans la figure suivante :

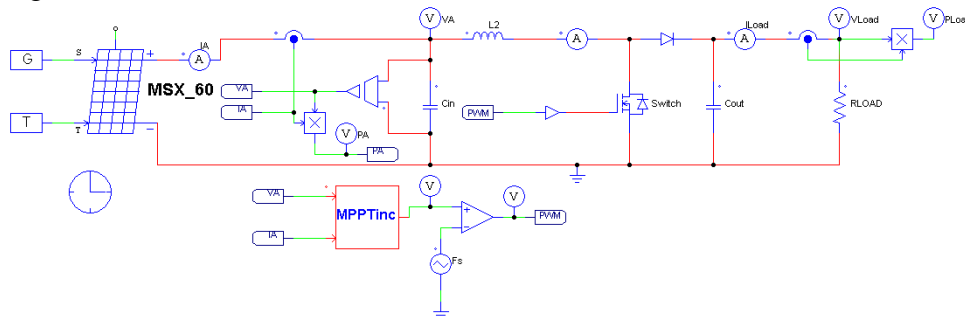


Figure 3.6.2.1 Schéma de simulation de la commande MPPT avec un DC-DC Boost

3.6.2.2 Résultat de simulation de la commande MPPT INC avec DC-DC Boost sous STC:

Le résultat de simulation sera sous condition STC dont $G=1000\text{w/m}^2$ et $T=25^\circ\text{c}$

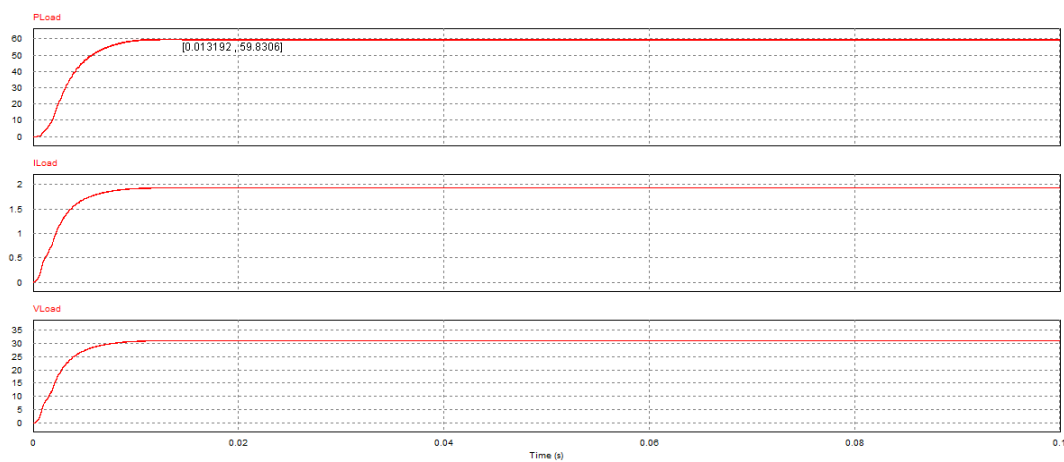


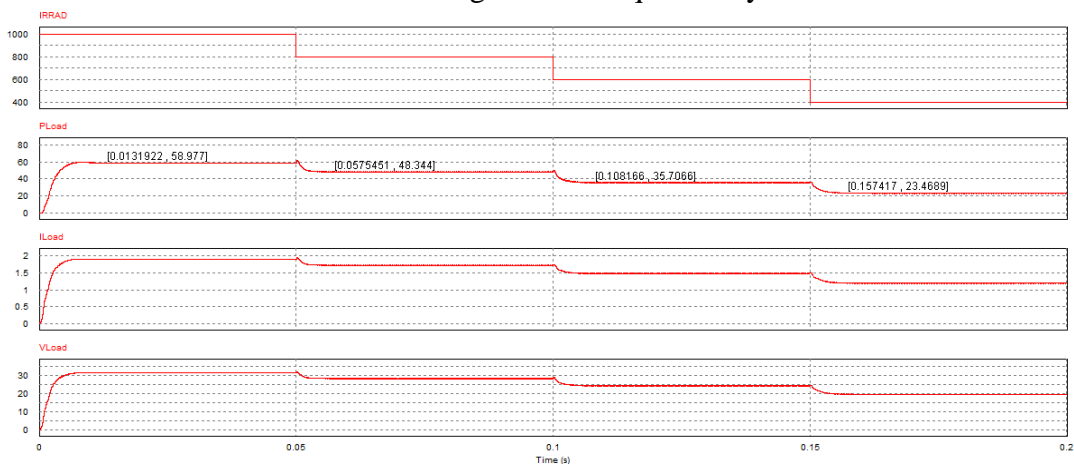
Figure 3.6.2.2 Courbes Iload(t) Pload(t) Vload(t) de la MPPT INC.

On remarque que la puissance atteint la valeur maximale de 59.8306W dans un temps $t=0.013192\text{s}$ et reste stable.

On peut déduire que la technique INC pour un DC-DC Boost répond d'une manière optimale sous STC.

3.6.2.3 Résultat de simulation de la commande MPPT INC avec DC-DC Boost sous changement de rayonnement G:

Le résultat de simulation sera sous changement brusque du rayonnement G avec $T=25^\circ\text{c}$



CHAPITRE 3-SIMULATION DES COMMANDES MPPT DANS UNE CHAINE DE CONVERSION PHOTOVOLTAIQUE

Figure 3.6.2.3 Courbes $I_{load}(t)$ $P_{load}(t)$ $V_{load}(t)$ de la MPPT INC sous changement de G .

On remarque que pour chaque valeur de rayonnement G la commande INC conduit le système PV vers la puissance maximale dans 0.01s comme montré dans le tableau suivant:

Rayonnement (W/m ²)	Pmp (W)	t (s)
STC (1000)	58,977	0,0131922
800	48,344	0,0075451
600	35,7066	0,008166
400	23,4689	0,007417
		Moy=0,01

Tableau 3.6 Résultats de la MPPT INC sous changement de G

3.6.2.4 INC avec DC-DC Buck:

Nous avons connecté le MSX-60 à un convertisseur DC-DC de type Buck comme montré dans la figure suivante:

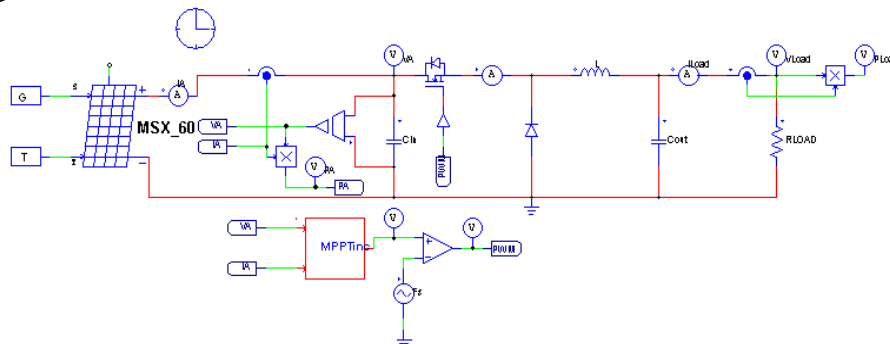


Figure 3.6.2.4 Schéma de simulation de la commande MPPT avec un DC-DC Buck

3.6.2.5 Résultat de simulation de la commande MPPT INC avec DC-DC Buck sous STC:

Le résultat de simulation sera sous condition STC dont $G=1000\text{w/m}^2$ et $T=25^\circ\text{c}$

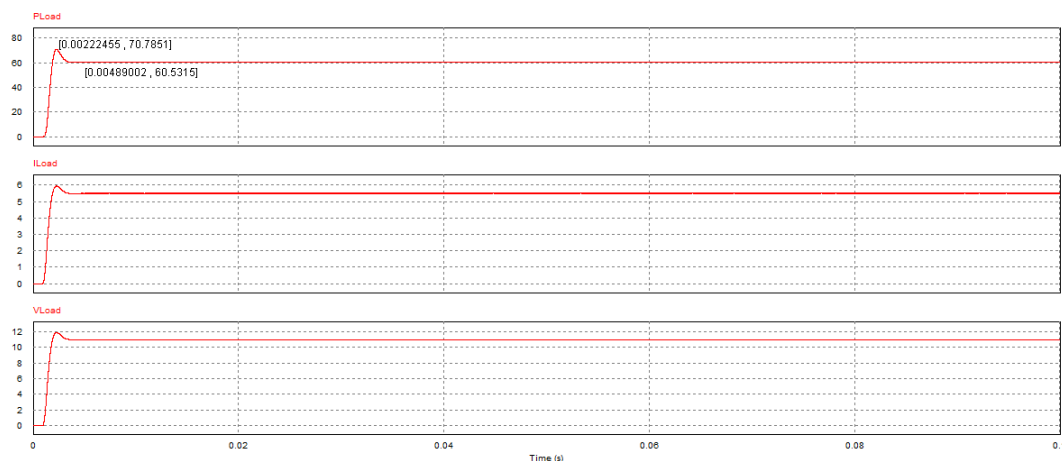


Figure 3.6.2.5 Courbes $I_{load}(t)$ $P_{load}(t)$ $V_{load}(t)$ de la MPPT INC avec DC/DC Buck.

On remarque que la puissance atteint la valeur maximale de 60.5331W dans un temps $t=0.00489\text{s}$ et reste stable. On peut déduire que la technique INC pour un DC-DC Buck aussi réponde d'une manière optimale sous STC.

3.6.2.6 Résultat de simulation de la commande MPPT INC avec DC-DC Buck sous changement de rayonnement G :

CHAPITRE 3-SIMULATION DES COMMANDES MPPT DANS UNE CHAINE DE CONVERSION PHOTOVOLTAÏQUE

Le résultat de simulation sera sous changement brusque du rayonnement G avec $T=25^{\circ}\text{C}$

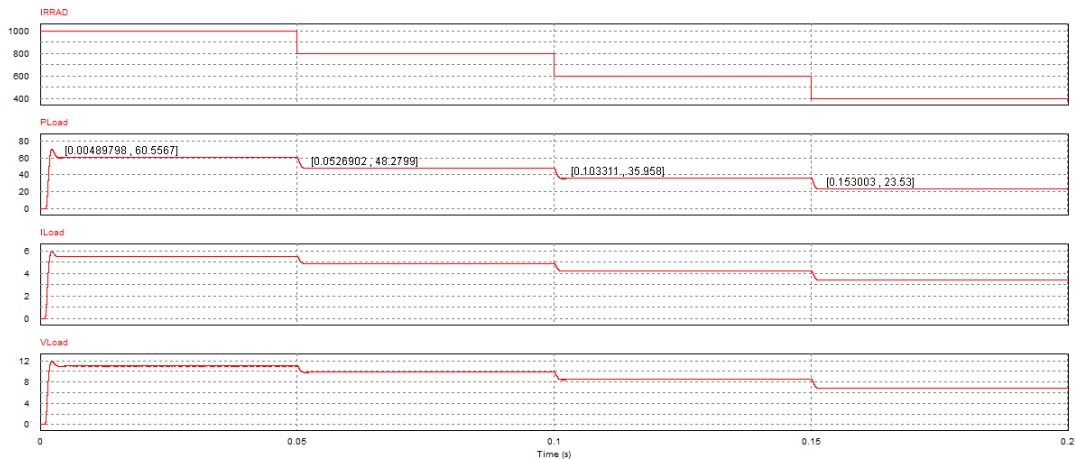


Figure 3.6.2.6 Courbes $I_{load}(t)$ $P_{load}(t)$ $V_{load}(t)$ de la MPPT INC avec DC-DC Buck sous changement de G.

On remarque que pour chaque valeur de rayonnement G la commande INC conduit le système PV vers la puissance maximale dans 0.0034s comme montré dans le tableau suivant:

Rayonnement (W/m^2)	P_{mp} (W)	t (s)
STC (1000)	60,5567	0,00489798
800	48,2799	0,0026902
600	35,958	0,003311
400	23,53	0,003003
		Moy=0,0034

Tableau 3.7 Résultats de la MPPT P&O sous changement de G

3.6.2.7 INC avec DC-DC Buck-Boost:

Nous avons connecté le MSX-60 à un convertisseur DC-DC de type Buck-Boost comme montré dans la figure suivante :

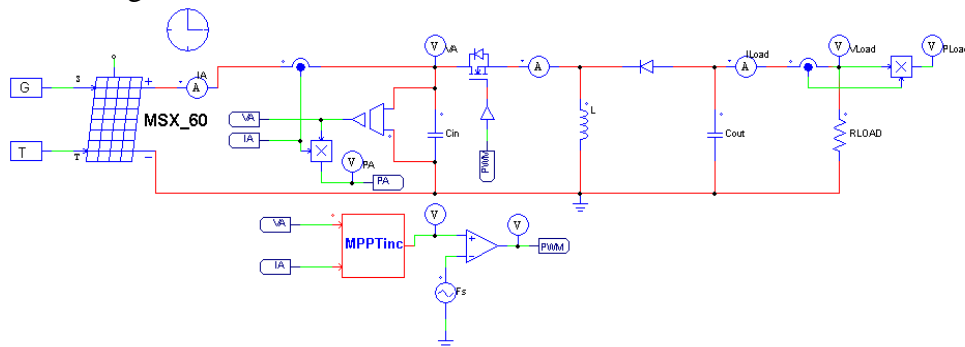


Figure 3.6.2.7 Schéma de simulation de la commande MPPT avec un DC-DC Buck-Boost

3.6.2.8 Résultat de simulation de la commande MPPT INC avec DC-DC Buck-Boost sous STC:

Le résultat de simulation sera sous condition STC dont $G=1000\text{w}/\text{m}^2$ et $T=25^{\circ}\text{C}$

CHAPITRE 3-SIMULATION DES COMMANDES MPPT DANS UNE CHAINE DE CONVERSION PHOTOVOLTAIQUE

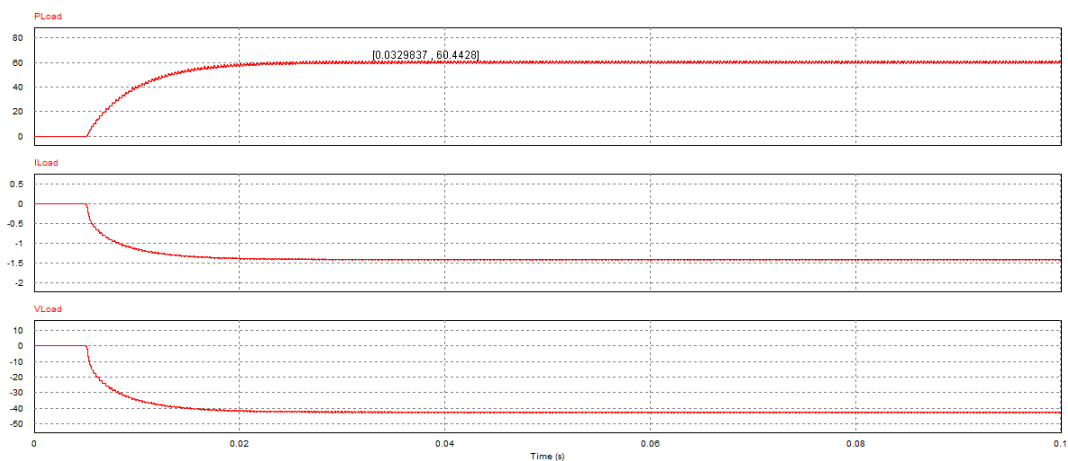


Figure 3.6.2.8 Courbes Iload(t) Pload(t) Vload(t) de la MPPT INC avec DC/DC Buck-Boost.

On remarque que la puissance atteint la valeur maximale de 60.4428W dans un temps $t=0.0329s$ avec ondulation.

3.6.2.9 Résultat de simulation de la commande MPPT INC avec DC-DC Buck-Boost sous changement de rayonnement G:

Le résultat de simulation sera sous changement brusque du rayonnement G avec $T=25^{\circ}c$

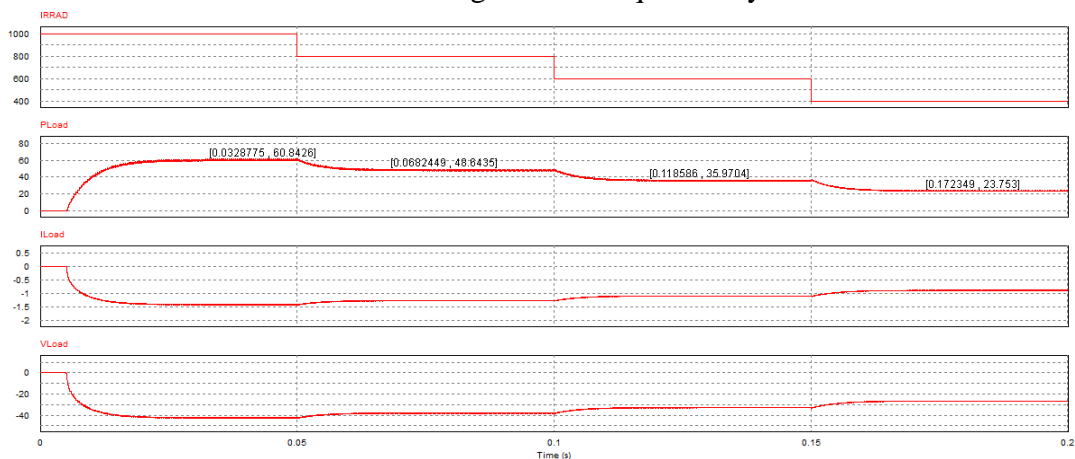


Figure 3.6.2.9 Courbes Iload(t) Pload(t) Vload(t) de la MPPT INC avec DC-DC Buck-Boost sous changement de G.

On remarque que pour chaque valeur de rayonnement G la commande INC conduit le système PV vers la puissance maximale dans 0.0024s comme montré dans le tableau suivant:

Rayonnement (W/m ²)	Pmp (W)	t (s)
STC (1000)	60,8426	0,0328775
800	48,6435	0,0182449
600	35,9704	0,018586
400	23,753	0,022349
		Moy=0,023

Tableau 3.8 Résultats de la MPPT INC sous changement de G

3.6.3 La méthode Hill_Climbing (HC):

Nous avons appliqué cette méthode pour 03 convertisseurs DC-DC voire Buck, Boost et Buck-Boost.

CHAPITRE 3-SIMULATION DES COMMANDES MPPT DANS UNE CHAINE DE CONVERSION PHOTOVOLTAÏQUE

3.6.3.1 HC avec DC-DC Boost:

Nous avons connecté le MSX-60 à un convertisseur DC-DC de type Boost comme montré dans la figure suivante :

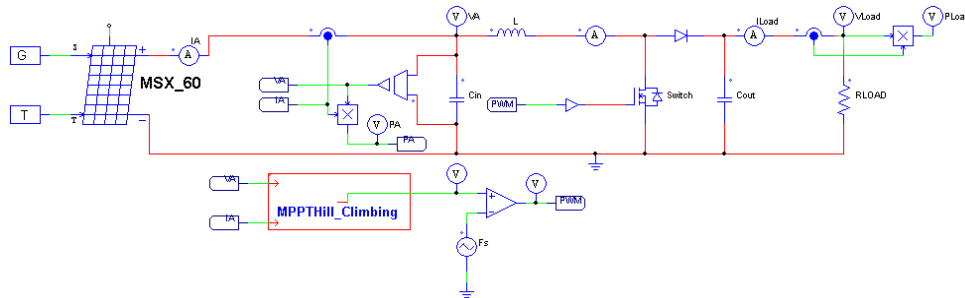


Figure 3.6.3.1 Schéma de simulation de la commande MPPT avec un DC-DC Boost

3.6.3.2 Résultat de simulation de la commande MPPT HC avec DC-DC Boost sous STC:

Le résultat de simulation sera sous condition STC dont $G=1000\text{w/m}^2$ et $T=25^\circ\text{c}$

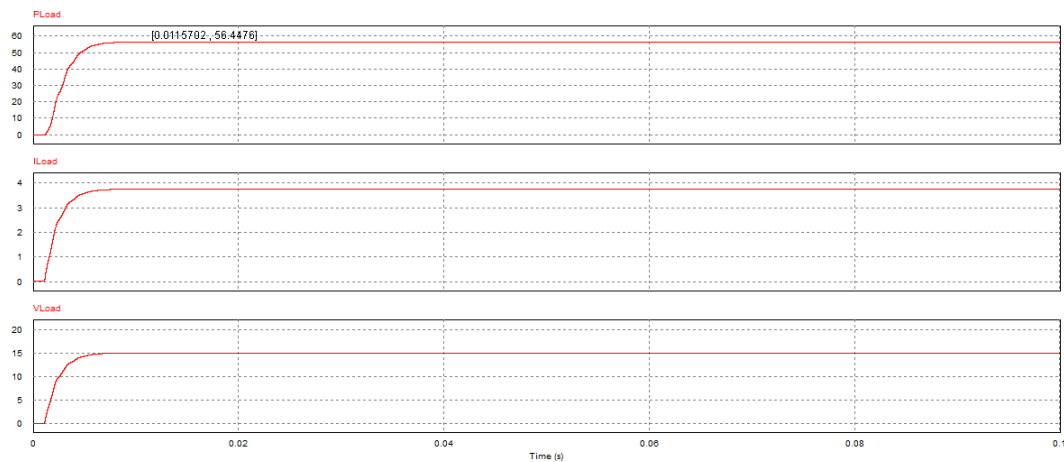


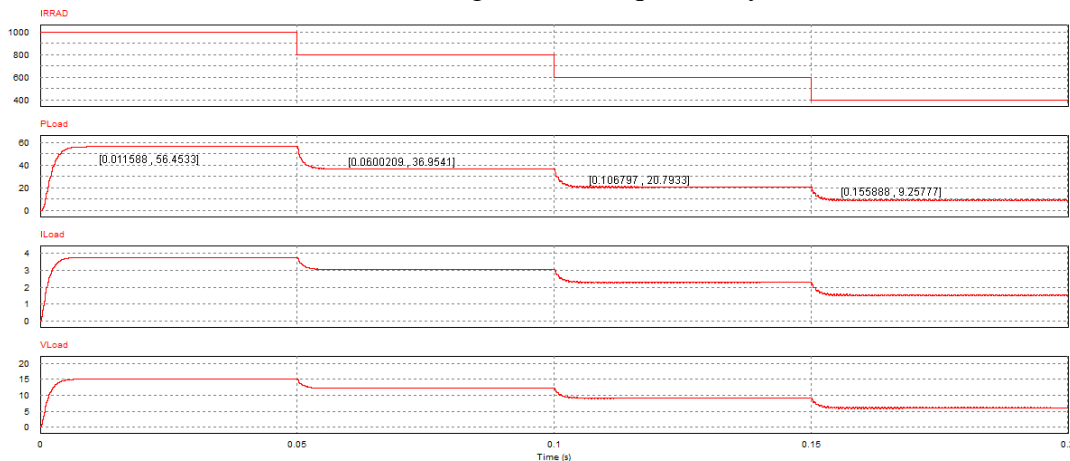
Figure 3.6.3.2 Courbes $I_{load}(t)$ $P_{load}(t)$ $V_{load}(t)$ de la MPPT HC.

On remarque que la puissance atteint la valeur maximale de 56.4476W dans un temps $t=0.01157\text{s}$ et reste stable sans Ondulations.

On peut déduire que la technique HC pour un DC-DC Boost répond d'une manière optimale sous STC.

3.6.3.3 Résultat de simulation de la commande MPPT HC avec DC-DC Boost sous changement de rayonnement G:

Le résultat de simulation sera sous changement brusque du rayonnement G avec $T=25^\circ\text{c}$



CHAPITRE 3-SIMULATION DES COMMANDES MPPT DANS UNE CHAINE DE CONVERSION PHOTOVOLTAIQUE

Figure 3.6.3.3 Courbes Iload(t) Pload(t) Vload(t) de la MPPT HC sous changement de G. On remarque que pour chaque valeur de rayonnement G la commande HC conduit le système PV vers la puissance maximale dans 0.0085s comme montré dans le tableau suivant:

Rayonnement (W/m ²)	Pmp (W)	t (s)
STC (1000)	56,4533	0,011588
800	36,9541	0,0100209
600	20,7933	0,006797
400	9,25777	0,005888
Moy=0,0085		

Tableau 3.9 Résultats de la MPPT HC sous changement de G.

3.6.3.4 HC avec DC-DC Buck:

Nous avons connecté le MSX-60 à un convertisseur DC-DC de type Buck comme montré dans la figure suivante :

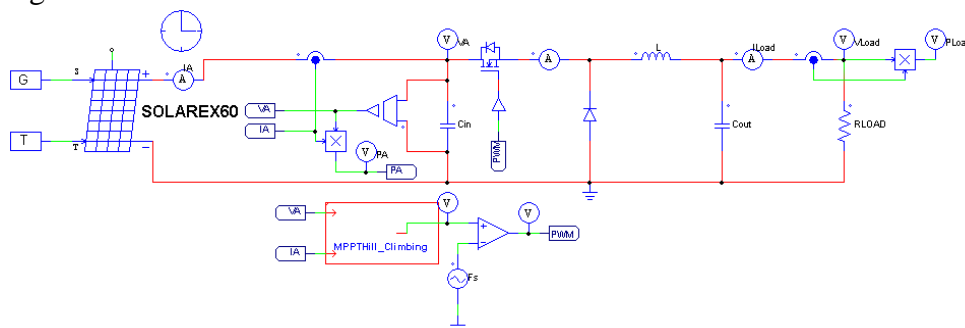


Figure 3.6.3.5 Schéma de simulation de la commande MPPT avec un DC-DC Buck

3.6.3.5 Résultat de simulation de la commande MPPT HC avec DC-DC Buck sous STC:

Le résultat de simulation sera sous condition STC dont G=1000w/m² et T=25°C

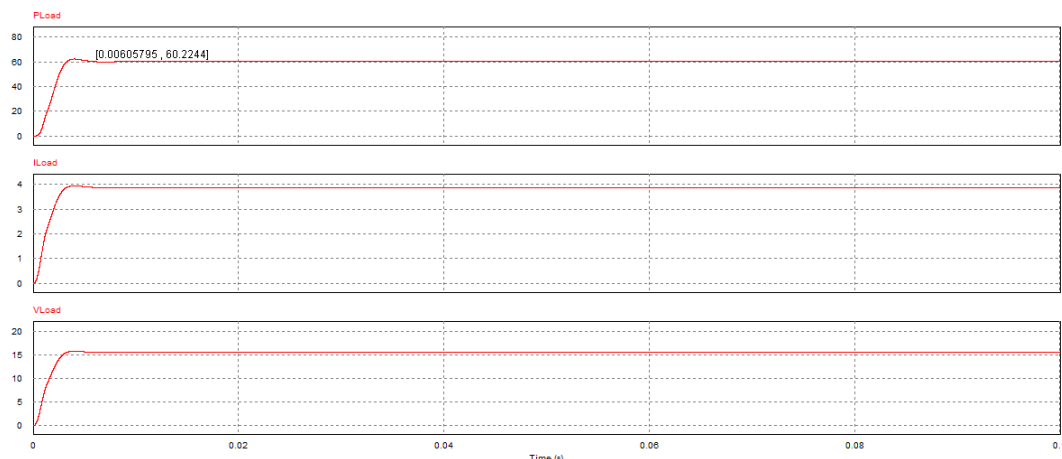


Figure 3.6.3.6 Courbes Iload(t) Pload(t) Vload(t) de la MPPT HC avec DC/DC Buck.

On remarque que la puissance atteint la valeur maximale de 60.5331W dans un temps t=0.006057s et reste stable sans ondulations. On peut déduire que la technique HC pour un DC-DC Buck aussi répond d'une manière optimale sous STC.

3.6.3.6 Résultat de simulation de la commande MPPT HC avec DC-DC Buck sous changement de rayonnement G:

Le résultat de simulation sera sous changement brusque du rayonnement G avec T=25°C

CHAPITRE 3-SIMULATION DES COMMANDES MPPT DANS UNE CHAINE DE CONVERSION PHOTOVOLTAIQUE

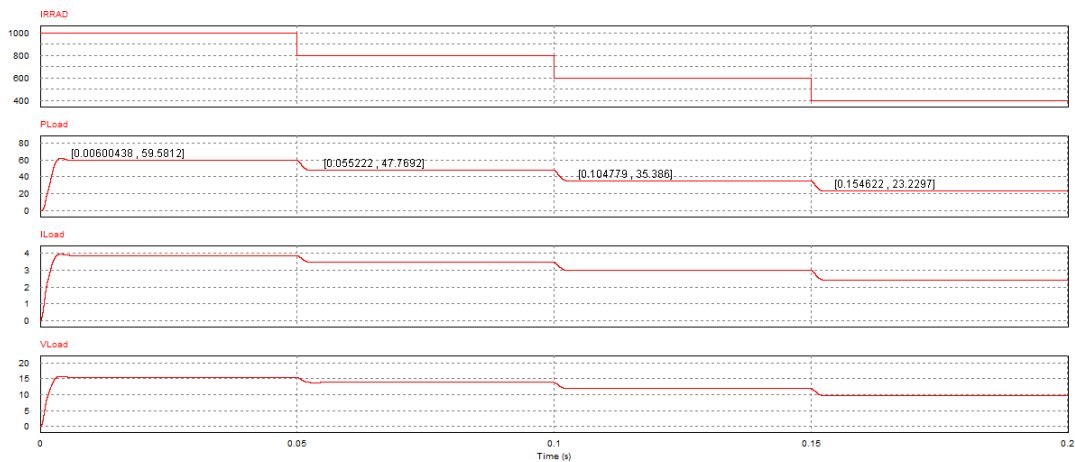


Figure 3.6.3.7 Courbes Iload(t) Pload(t) Vload(t) de la MPPT HC avec DC-DC Buck sous changement de G.

On remarque que pour chaque valeur de rayonnement G la commande HC conduit le système PV vers la puissance maximale dans 0.0051s comme montré dans le tableau suivant:

Rayonnement (W/m ²)	Pmp (W)	t (s)
STC (1000)	59,5812	0,00600438
800	47,7692	0,005222
600	35,386	0,004779
400	23,2297	0,004622
		Moy=0,0051

Tableau 3.10 Résultats de la MPPT HC sous changement de G

3.6.3.7 HC avec DC-DC Buck-Boost:

Nous avons connecté le MSX-60 à un convertisseur DC-DC de type Buck-Boost comme montré dans la figure suivante :

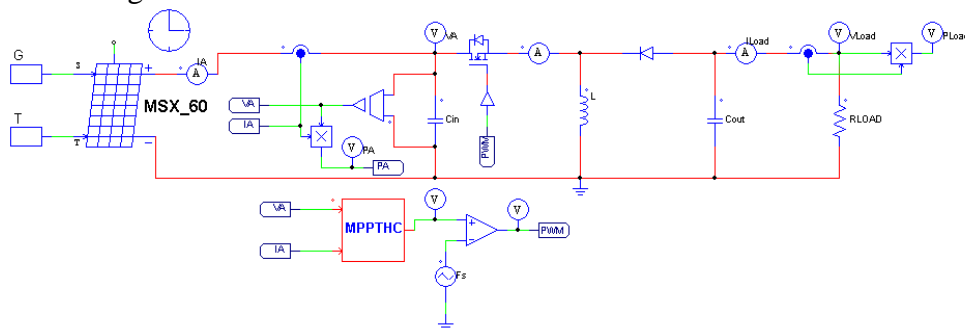


Figure 3.6.3.8 Schéma de simulation de la commande MPPT avec un DC-DC Buck-Boost

3.6.3.8 Résultat de simulation de la commande MPPT HC avec DC-DC Buck-Boost sous STC:

Le résultat de simulation sera sous condition STC dont $G=1000\text{w/m}^2$ et $T=25^\circ\text{c}$

CHAPITRE 3-SIMULATION DES COMMANDES MPPT DANS UNE CHAINE DE CONVERSION PHOTOVOLTAIQUE

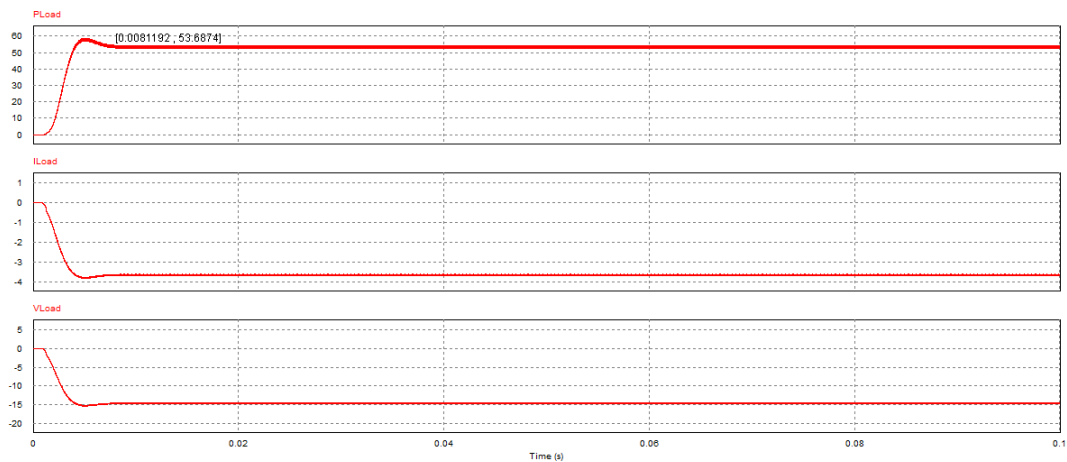


Figure 3.6.3.9 Courbes Iload(t) Pload(t) Vload(t) de la MPPT HC avec DC/DC Buck-Boost.

On remarque que la puissance atteint la valeur maximale de 53.6874W dans un temps $t=0.008119s$ avec ondulations.

3.6.3.9 Résultat de simulation de la commande MPPT HC avec DC-DC Buck-Boost sous changement de rayonnement G:

Le résultat de simulation sera sous changement brusque du rayonnement G avec $T=25^{\circ}c$

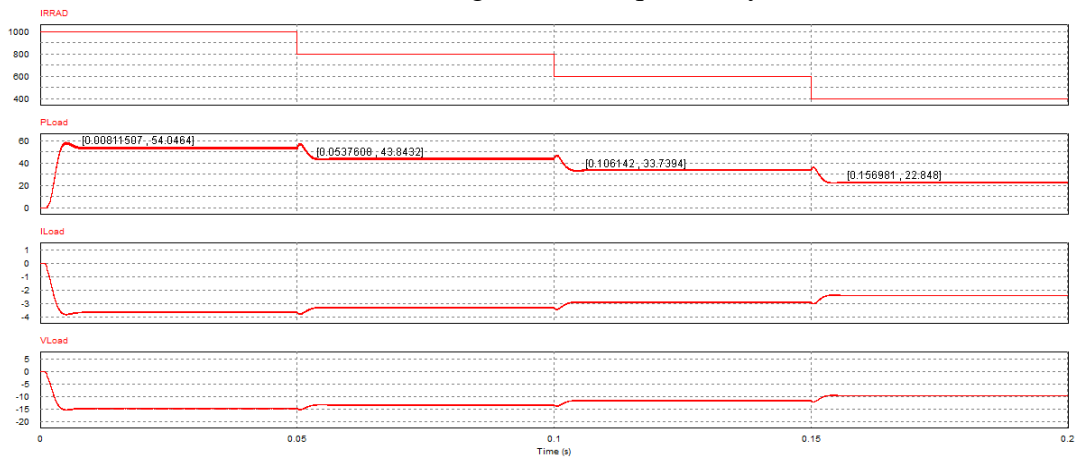


Figure 3.6.3.10 Courbes Iload(t) Pload(t) Vload(t) de la MPPT HC avec DC-DC Buck-Boost sous changement de G.

On remarque que pour chaque valeur de rayonnement G la commande INC conduit le système PV vers la puissance maximale dans 0.0062s comme montré dans le tableau suivant:

Rayonnement (W/m ²)	Pmp (W)	t (s)
STC (1000)	54,0464	0,00811507
800	43,8432	0,00376
600	33,7394	0,006142
400	22,848	0,006981
		Moy=0,0062

Tableau 3.11 Résultats de la MPPT HC sous changement de G

CHAPITRE 3-SIMULATION DES COMMANDES MPPT DANS UNE CHAINE DE CONVERSION PHOTOVOLTAIQUE

3.7 La comparaison:

Type de convertisseur DC-DC	La commande appliquée	Temps de réponse (s)	Puissance maximale atteinte (W)	Ondulations dans la puissance
BOOST	P&O	0,01	59,1704	Non
	INC	0,01	58,977	Non
	Hill_Climbing	0,0085	56,4533	Non
BUCK	P&O	0,0032	60,5242	Non
	INC	0,0034	60,5567	Non
	Hill_Climbing	0,0051	59,5812	Non
BUCK-BOOST	P&O	0,024	60,1482	Oui
	INC	0,023	60,8426	Oui
	Hill_Climbing	0,0062	54,0464	Oui

Tableau 3.12 Comparaison des Résultats de Simulation des convertisseurs DC-DC pilotés par différentes commandes MPPT

3.8 Discussion:

Nous trouvons que pour un convertisseur DC-DC Boost si nous utilisons une commande MPPT de type Hill_Climbing nous aurons une convergence très rapide vers la puissance maximale a $P_{mp}= 56.4533W$ par rapport aux commande P&O et INC et cela dans un temps $t=0.0085s$.

Par contre si on veut atteindre la valeur maximale de la puissance toujours pour un convertisseur BOOST nous devons utiliser une commande MPPT de type P&O dont la puissance atteinte soit $P_{mp}=59.1704$ dans un temps $t=0.01s$.

Dans le cas d'un convertisseur DC-DC BUCK trouve que le temps de réponse le plus court soit en utilisant une commande MPPT de type P&O avec $t=0.0032s$ et la puissance maximale atteinte dans ce cas sera $P_{mp}=60.5242W$.

Pour que la puissance soit juste maximale une commande MPPT de type INC est recommandée avec $P_{mp}=60.5567W$.

Dans le cas d'un convertisseur DC-DC BUCK-BOOST trouve que le temps de réponse le plus court soit en utilisant une commande MPPT de type Hill_Climbing avec $t=0.0062s$ et la puissance maximale atteinte dans ce cas sera $P_{mp}=54.0464W$.

Pour que la puissance soit juste maximale une commande MPPT de type INC est recommandée avec $P_{mp}=60.8426W$.

3.9 Dédutions:

Nous pouvons déduire que le choix d'une commande MPPT peut s'établir selon un cahier de charge qui se repose sur un temps de réponse de cette commande soit le temps nécessaire pour arriver a la puissance maximale ainsi que la valeur de cette dernière (la P_{mp}).

Si nous devons tenir en compte la qualité de la puissance délivrée par ce système par rapport aux ondulations, un convertisseur DC-DC de type BUCK-BOOST n'est pas recommandé sinon une étude plus approfondis du dimensionnement de ce type de convertisseur doit avoir lieu.

CHAPITRE 3-SIMULATION DES COMMANDES MPPT DANS UNE CHAINE DE CONVERSION PHOTOVOLTAIQUE

3.8 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudiée l'adaptation de puissance et courant entre la source et la charge pour profiter mieux la puissance délivrée par le GPV. Pour cela, nous avons parlé et discutée sur les convertisseurs DC-DC statique (Hacheurs). On utiliser trois types de convertisseur ont été étudiée en détaille, à savoir: le convertisseur BOOST, BOCK et BOCK-BOOST. Nous avons parlé des commandes MPPT qui pilotaient les convertisseurs DC-DC. Avec les commentaires des différents résultats de simulation des algorithmes étudiée.

CONCLUSION GENERALE

Le soleil est une source énergétique quasiment illimitée, il pourrait couvrir plusieurs milliers de fois notre consommation globale d'énergie. La cellule photovoltaïque soit le composant élémentaire constituant un générateur photovoltaïque selon une physique d'association bien spécifiée.

Bien qu'un générateur photovoltaïque délivre une énergie d'un comportement non linéaire et afin de le faire fonctionner au maximum du rayonnement nous devons utiliser une certaine intelligence d'optimisation pour piloter un convertisseur DC-DC jouant un rôle d'adaptation d'impédance entre le GPV et la charge à alimenter. Cette intelligence d'optimisation se traduit par les commandes MPPT.

Le travail présenté dans ce mémoire avait pour objectif d'établir une comparaison par simulation de différents systèmes de conversion photovoltaïques alimentés par le même GPV de type MSX-60 du fabricant SOLAREX qui peut délivrer une puissance allant jusqu'à une valeur maximale de 60W afin d'alimenter une charge purement résistive par l'intermédiaire de trois types de convertisseurs DC-DC pilotés à chaque étape de simulation par trois types de commandes MPPT.

Nous avons choisis trois types de convertisseurs les plus utilisés dans la littérature à savoir: le convertisseur BOOST, BUCK et BOOST-BUCK.

Par la suite nous avons fait piloter ces convertisseurs avec trois commandes MPPT les plus utilisés (P&Q, INC et HILL-CLIPPING).

Nous avons réalisé la simulation sous le logiciel PSIM et nous avons trouvé que les résultats sont satisfaisants en ce qui concerne les formes des courbes de la tension, du courant et de la puissance.

Nous avons effectué la simulation pour le cas où notre système PV soit dans les conditions standard STC ainsi que pour le cas d'un changement brusque du rayonnement.

À partir des résultats obtenus, nous allons pouvoir décider selon une certaine recommandation quel convertisseur DC-DC utiliser et avec quelle commande MPPT devons nous dans ce cas le piloter.

PERSPECTIVES:

Notre étude servira par la suite à concevoir un système intelligent qui peut décider quelle technique soit la mieux adaptée afin de poursuivre de la manière la plus optimale (temps de réponse très court, minimum d'ondulation) le point de puissance maximale.

Nous pouvons aussi nous servir de cette étude afin de contribuer à résoudre les problèmes liés aux ombrages partielles des GPV en ce qui concerne la poursuite du point de puissance maximale.

REFERENCES

LA LISTE DES REFERENCES

- [1]: BOULHARES Ikhlas, KADIRI Hanane, mémoire de Master «Etude comparative des performances de différentes commandes MPPT» université Ahmed Draïa –Adrar, 2020.
- [2]: Ministère de l’Energie Algérien
<http://www.memalgeria.org/francais/index.php?page=potentiels>
- [3]: SaidChikha «Optimisation de la puissance dans les systèmes photovoltaïques » Mémoire de magister, université Larbi Ben M’hidi Oum El Bouaghi, 2011.
- [4]: BoukhersDjamil «optimisation d’un système d’énergie photovoltaïque application au pompage. » Magister en électrotechnique université Mentouri de Constantine , 2007
- [5]: K.HELALI, Modélisation d’une Cellule Photovoltaïque: Etude Comparative, mémoire de magister, université MOULOUD MAMMERI de TIZI-OUZOU 2012.
- [6]: T.Fethallah et O. LAMOUDI, Etude et Réalisation d'un Système Photovoltaïque Optimisé par Logique Floue, mémoire de Master, université KasdiMerbah Ouargla, 2018.
- [7]: N. DEBILI, Etude et optimisation en environnement Matlab/Simulink d'un système de pompage Photovoltaïque, mémoire de magister, université de CONSTANTINE, 2015.
- [8]: T.Mambrini, Caractérisation de panneaux solaires photovoltaïques en conditions réelles d’implantation et en fonction des différentes technologie, Thèse Doctorat, universite paris-sud, 2014.
- [9]: A.AZIZI, Modélisation optimisation d’un système de production d’énergie photovoltaïque avec un système de stockage hybride, Thèse Doctorat, université BADJI MOKHTAR-ANNABA, 2019.
- [10]: R.KHENFER, Détection et isolation de défauts combinant des méthodes à base de données appliquées aux systèmes électro-énergétiques, Thèse Doctorat, université Ferhat abbés -SETIF, 2015.
- [11]:K. Khouzam, ‘Optimum Load Matching in Direct-Coupled Photovoltaic Power Systems -Application to Resistive Loads’, PES 1990 WM215-4, IEEE Transactions on Energy Conversion, EC-5, N°2, pp. 265 – 271, 1990.
- [12]: P. Izzo, ‘Etude d’un Circuit Electronique et Algorithmique Destiné à la Gestion de Systèmes Autonomes de Production d’Energie Photovoltaïque’, Thèse de Doctorat, Université de Montpellier II, Décembre 2002.
- [13]: NedjmaAouchiche. Conception d’une commande MPPT optimale à base d’intelligence artificielle d’un système photovoltaïque.. Autre. Université Bourgogne Franche-Comté, 2020.
- [14]: A.GUELAL, A.MOKHTARI et M.KHERCHI, La Commande MPPT Basée sur les Algorithmes Intelligents Destinée aux Applications Photovoltaïques : Etude comparative et implémentation sur FPGA, Le 4ème Séminaire International sur les Energies Nouvelles et renouvelable, Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables,Ghardaïa – Algeria 24 - 25 Octobre 2016.
- [15]: C.CABAL, Optimisation énergétique de l’étage d’adaptation électronique dédié à la conversion photovoltaïque, Thèse Doctorat, universite de TOULOUSE, 2008.
- [16]: F.BENADEL, Etude et Simulation D’une Commande MPPT Pour Système PV, mémoire de Master, université de Mohamed Boudiaf - M’SILLA, 2016.

REFERENCES

- [17]: A.Hanen, H.Abid, K.Loukil, A.Toumi et M. Abid, Etude comparative de cinq algorithmes de commande MPPT pour un système photovoltaïque, Conférence Internationale des Energies Renouvelables (CIER'13) Tunisie, 2013.
- [18]: M. Elyaquouti, S. HAKIM....et A.IHLAL, Implementation in ARDUINO of MPPT using variable step size P&O algorithm in PV installations, International Journal of power Electronics and drive system, Vol. 8, No. 1, , pp. 434~443 March 2017.
- [19]: A.Talha, Développement d'une Méthode MPPT pour un Système Photovoltaïque, Premier Séminaire International sur les Energies Nouvelles et Renouvelables, SIENR'2010, Ghardaïa, Algeria, October 2010.
- [20]: H.Bahri et A.Harrag, Variable Step Size P&O MPPT Controller to Improve Static and Dynamic PV System Performances, Journal of Advanced Engineering and Computation, Vol 2, N°2, 2018.
- [21]: A.Rhif, Etudes et Applications sur les Energies Renouvelables, Proceedings of Engineering & Technology, ISSN: 1737-9334, 2019.
- [22]: H. H. MOLINARO et B. MULTON, Energie électrique: génération photovoltaïque, Culture Sciences de l'Ingénieur, Paris, 2020.
- [23]: A. BENSLIMANE et A.MERABTI, A comparative study between hill climbing algorithm and fuzzy logic controller algorithm of MPPT for GPV system, EasyChairpreprint № 2695, 2020.
- [24] Babaei E, Esmaeel M, Mahmoodieh S. Electrical Power and Energy Systems Systematical method of designing the elements of the Cuk converter. Int J Electr Power Energy Syst, Vol 55, pp 351–361. 2014.
- [25] J. M. Enrique, E. Duran, Theoretical assessment of the maximum power point tracking efficiency of photovoltaic facilities with different converter topologies, Solar Energy, Vol 81, pp 31-38, 2007.