

**République algérienne démocratique et populaire**  
**Ministère de l'Enseignement supérieur et de la Recherche**  
**scientifique**



**Université Echahid Hamma Lakhdar, El-Oued**

**Faculté de technologie**

**Département de génie électrique**

***Mémoire de fin d'études***



*Présenté pour obtenir le diplôme de*

***MASTER ACADÉMIQUE***

*Domaine: Science et technologie*

*Département : Génie électrique*

*Spécialité: Commande électrique*

**Thème**

**Commande prédictive des convertisseurs  
CC/AC**

**Défendu le Devant le jury :**

DR.LAMMOUCHI ZAKARIA Président

DR.MESBAHI NADIR

DR.CHIKA SAID

**Présenté par :**

Kir aimen

Mehellou abdelhai

Lamer mohammed salah

Kadi djeber

**2021/2022**



**DIDICACE**

*A mon père et a ma mere*

*Mes freres et soeurs*

*A ma grande famille*

*A mes amis*

*Qui me connait de pres et de loin*

*Amén*

*abdelhai*

*mohammed salah*

*djeber*

*LOVE*

## REMERCIEMENT

*Le premier qui remercie le pot de nuit et les bords de la journée est Ali Al-Qahar.*

*Le premier et le dernier. Le visible et l'intérieur. Qui nous a noyés avec ses innombrables grâces. Et c'est lui qui nous a bénis avec ses bénédictions non annoncées. et c'est lui qui nous a envoyé son serviteur et messenger, Muhammad bin Abdullah, sur lui les meilleures prières et la plus pure des livraisons. Envoyez-lui sa lecture. Il nous a exhortés à demander la connaissance partout où elle existait*

*Merci à Allah pour tout cela et merci de nous avoir aidés et nous sommes impatients d'être patients pour les difficultés auxquelles nous avons été confrontés pour accomplir*  
*• cette humble oeuvre*

*Lorsque l'effort est spécial et que le don est efficace, les âmes s'élèvent vers les débouchés de la créativité et élèvent le phare de l'excellence lorsque les remerciements ont un sens et que la louange est utile, que Allah bénisse vos pas et bénisse dans votre quête, nous vous donnons vos remerciements Chikha said.*

*Nous remercions également tous ceux qui nous ont aidés de près ou de loin, et nous formons tous les professeurs et les travailleurs du Département de génie électrique et les professeurs de la Faculté de technologie.*

*En fin de compte, nous ne pouvons que prier Allah de nous donner le paiement, la guidance, la chasteté et la richesse. et de nous guider par des mahdis. iements et votre appréciation à l'enseignant.*

# **Table de Matière**

<i>Dédicaces</i> .....	I
<i>Remerciement</i> .....	II
<i>Table de Matière</i> .....	III
<i>Introduction générale</i> .....	1

## **Chapitre I : Aperçu sur le générateur photovoltaïque**

<b>1.1 Introduction</b> .....	7
<b>1.2. Historique</b> .....	7
<b>1.3. La conversion photovoltaïque</b> .....	8
1.3.1. Principe de la conversion photovoltaïque .....	8
1.3.2. Répartition du rayonnement solaire .....	10
<b>1.4. Le générateur photovoltaïque</b> .....	11
1.4.1. Principe .....	11
1.4.2. Constitution d'un générateur photovoltaïque .....	12
<b>1.5 Avantages et des inconvénients du Générateur PV</b> .....	13
1.5.1 Les avantages .....	13
1.5.2 Les inconvénient .....	14
<b>1.6. Connexion directe (source charge)</b> .....	14
<b>1.7 Étage d'adaptation entre un Générateur PV et une Charge</b> .....	15
<b>1.8. Etage d'adaptation en utilisant un convertisseur DC-DC</b> .....	16
<b>1.9 Fonctionnement d'un générateur PV à sa Puissance Maximale</b> .....	18
<b>1.10 Conclusion</b> .....	20
<b>1.11 Bibliographies</b> .....	21

## ***Chapitre II :Modélisation de la chaine de conversion d'énergie photovoltaïque***

<b><i>2.1 Introduction</i></b> .....	23
<b><i>2.2 Modélisation du générateur photovoltaïque (GPV)</i></b> .....	23
<b><i>2.3 Performances du GPV</i></b> .....	25
2.3.1. <i>Caractéristique Courant-Tension</i> .....	25
2.3.2. <i>Influence de la temperature</i> .....	27
2.3.3. <i>Association des Cellules photovoltaïques en Série</i> .....	28
2.3.4. <i>Association des cellules photovoltaïques en parallèle</i> .....	29
2.3.5. <i>Association des cellules photovoltaïques en parallèle</i> .....	30
<b><i>2.4. Etage d'adaptation type survolteur (Boost)</i></b> .....	31
<b><i>2.5.Modélisation et analyse de fonctionnement de l'hacheur Boost</i></b> .....	32
<b><i>2.6 Modélisation de Bus continue</i></b> .....	34
<b><i>2.7 Modélisation d'onduleur de tension</i></b> .....	34
<b><i>2.8 Modélisation d'onduleur de tension réseau</i></b> .....	37
<b><i>2.9 Conclusion</i></b> .....	41
<b><i>2.10 Bibliographies</i></b> .....	42

## ***Chapitre III:Fonctionnement d'une chaine de conversion photovoltaïque raccordé au réseau électrique***

<b><i>3.1 Introduction</i></b> .....	44
<b><i>3.2 Principe de la recherche du point de puissance maximal</i></b> .....	44
3.2.1 Généralités.....	44
3.2.2 Les premiers types de commande MPPT.....	45
3.2.3 Principe des commandes "Perturb and Observe" (P&O).....	46
<b><i>3.3 Philosophie de la commande prédictive à états finis (FS-MPC)</i></b> .....	48
<b><i>3.4 Commande FS-MPC de l'onduleur raccorder au réseau électrique</i></b> .....	49
3.4.1 Modèle continu de la liaison au réseau .....	49

3.4.2	Modèle discret de la liaison au réseau.....	50
3.4.3	Fonction du coût pour le contrôle de l'onduleur .....	50
<b>3.5</b>	<b><i>Simulation du system photovoltaïque avec hacheur commandé en MPPT</i></b>	<b>51</b>
3.5.1	Schéma du montage.....	52
3.5.2	Résultat de simulation.....	54
3.5.3	l'efficacité du système en termes de changement de changement d'irradiance.....	57
<b>3.6</b>	<b><i>Conclusion</i></b> .....	<b>59</b>
<b>3.7</b>	<b><i>Bibliographies</i></b> .....	<b>60</b>
	<b><i>Résumé</i></b> .....	

Introduction général

## Introduction générale

Les distributeurs d'énergie électrique s'efforcent de fournir un produit de qualité caractérisé par un système triphasé équilibré de tensions sinusoïdales. Cependant, vu la prolifération d'équipements à caractéristiques courant /tension non linéaire, la distorsion harmonique de l'onde tension prend de plus en plus d'ampleur, c'est notamment le cas d'équipements à convertisseurs statiques (redresseurs, gradateurs et cyclo-convertisseurs) dont la propriété est d'injecter des courants non sinusoïdaux dans le réseau d'alimentation, les redresseurs à diodes étant l'une des premières sources de perturbations harmoniques.

En effet, les perturbations provoquées par ces convertisseurs sont bien connues ; il s'agit d'une dégradation du facteur de puissance et d'une génération des courants alternatifs non sinusoïdaux riches par des harmoniques. Les incidences sont à l'origine de la déformation de la tension du réseau, de la réduction de sa capacité de transport et de l'augmentation des pertes.

Les convertisseurs AC-CC constituent une classe importante des convertisseurs statiques, et présentent des variantes de topologies très riches. Ils sont présents dans d'innombrables applications modernes, tels que les appareils électroniques et informatiques. D'un point de vue commande, ces convertisseurs posent un défi de taille, et ceci pour diverses raisons. En premier lieu, leurs modèles sont non linéaires et présentent des structures variables avec les états des interrupteurs de puissance (systèmes hybrides). En deuxième lieu, leurs comportements, malgré que stables en boucle ouverte, présentent des caractéristiques non satisfaisantes, tels que les grands dépassements et les longs temps d'établissement.

La recherche dans ce domaine s'est considérablement développée ces dernières années. Il considère plusieurs aspects, notamment la qualité d'énergie électrique, les topologies des convertisseurs, les structures et les performances des interrupteurs de puissance ainsi que les techniques de commande

Dans ce mémoire nous allons essayer d'appréhender le problème de la commande des convertisseurs AC-CC en utilisant une technique de commande très célèbre dans le domaine des systèmes linéaires, à savoir la commande prédictive.

Ce mémoire est organisé en trois chapitres :

- **Dans le premier chapitre**, nous rappelons la production de l'énergie électrique à partir de la transformation directe des conditions atmosphérique (éclairage et température). Différentes données et plusieurs caractéristiques principales étudiées sur l'effet photovoltaïque. On a étudié ensuite le principe de l'algorithme de « Tracking » de base.
- **Dans le second chapitre**, Nous présentons la modélisation des éléments constituant une chaîne de conversion d'énergie solaire connectée au réseau électrique. Cette dernière est constituée d'un GPV, hacheur Boost, Dc-link, onduleur à deux niveaux et le réseau électrique.
- **Dans le troisième chapitre**, nous nous sommes intéressés à étudier un exemple d'application sur l'énergie solaire, c'est l'intégration de la puissance générée par GPV au réseau triphasé. La transformation de cette puissance contrôlée par un onduleur triphasé à deux niveaux (étage d'adaptation DC-AC) avec comme objectif d'obtenir un facteur de puissance unitaire (courant injecter au réseau en phase avec sa tension). Les signaux de commande de l'onduleur sont générés par la technique de commande FS-MPC. Dans l'autre côté, L'extraction de la puissance maximale par la commande MPPT (Maximum Power Point Tracking) avec l'algorithme P&O présentés afin d'assurer un transfert optimal d'énergie électrique au réseau.

## Bibliographique

[1] **Chellah Samira**, "Analyse stochastique de la résultante d'injection de courants harmoniques dans un réseau électrique", mémoire de magistère, université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2012

[2] **Belhaouchet Nouri**, "Fonctionnement à fréquence de commutation constante des convertisseurs de puissance en utilisant des techniques de commande avancées", thèse de doctorat, université Ferhat Abbas de Sétif, 2011.

# Chapitre 1: Aperçu sur le générateur photovoltaïque

## 1.1 Introduction:

L'énergie solaire photovoltaïque (ou énergie photovoltaïque ou EPV) est une énergie électrique produite à partir du rayonnement solaire grâce à des panneaux ou des centrales solaires photovoltaïques. Elle est dite renouvelable, car sa source (le Soleil) est considérée comme inépuisable à l'échelle du temps humain.

## 1.2. Historique:

Le terme photovoltaïque vient du grec " phos, photos " qui désigne la lumière et de " voltaïque ", mot dérivé du physicien italien Alessandro VOLTA, connu pour ses travaux sur l'électricité.

L'énergie solaire photovoltaïque fut découverte en 1839 par Antoine César Becquerel physicien Français, né à Chatillon-Coligny (Loiret) le 7 mars 1788 et mort à Paris le 18 janvier 1878. L'effet photovoltaïque permet la transformation de l'énergie lumineuse en électricité. Ce principe repose sur la technologie des semi-conducteurs. Il consiste à utiliser les photons pour libérer les électrons et créer une différence de potentiel entre les bornes de la cellule qui génère un courant électrique continu.

A la différence des autres énergies renouvelables, l'énergie solaire est disponible partout sur la terre. L'Europe reçoit en moyenne chaque jour 3kWh par mètre carré même si les déserts les plus ensoleillés recueillent 7kWh. Il n'y a donc pas de problème de gisement pour cette source.

Les premières applications ont lieu dès les années 60 avec l'équipement de satellites spatiaux. Puis à partir de 1970, les premières utilisations terrestres ont concerné l'électrification des sites isolés. La conversion photovoltaïque de l'énergie solaire est apte à répondre à une demande croissante d'énergie renouvelable. Elle est considérée comme devant prendre une part significative dans l'approvisionnement énergétique mondial. Celle-ci sera d'autant plus grande et d'autant plus rapide que des méthodes permettant de produire de l'électricité solaire à moindre coût seront utilisées.

La puissance des installations est exprimée en Watt crête (Wc). Le Wc est la puissance fournie par un module photovoltaïque pour un ensoleillement normalisé de 1000W par m<sup>2</sup>, à une température de 25°C. Le rendement électrique est le rapport puissance lumineuse incidente sur puissance électrique fournie. Les modules existants permettent des rendements électriques compris entre 5 et 15%.

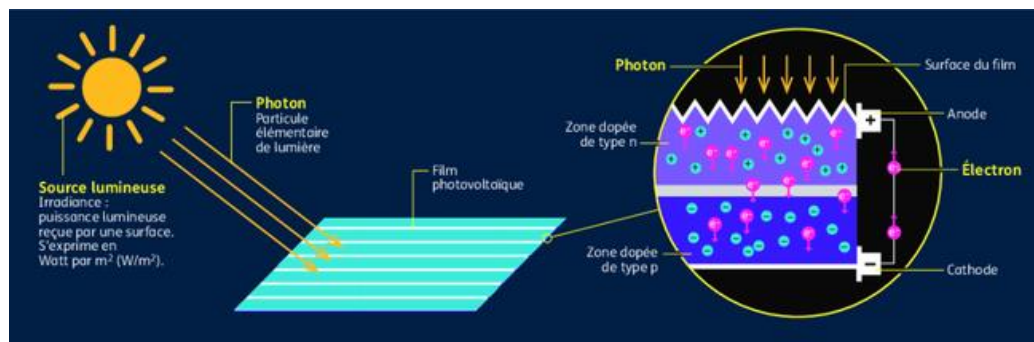
Actuellement le matériau semi-conducteur le plus utilisé est le silicium, sous forme de plaquettes, offrant le meilleur rendement de conversion de l'énergie solaire en électricité.

### 1.3. La conversion photovoltaïque:

La conversion photovoltaïque largement utilisée peut-être simplement définie comme la conversion de l'énergie photonique en énergie électrique via l'absorption de la lumière par la matière.

La conversion photovoltaïque est basée sur l'effet photovoltaïque, c'est-à-dire sur la conversion de l'énergie lumineuse provenant du soleil en énergie électrique. Pour réaliser cette conversion, on utilise des dispositifs appelés cellules solaires, constitués de matériaux semi-conducteurs dans lesquels un champ électrique constant a été créé artificiellement.

Les cellules photovoltaïques classiques utilisent deux couches de matériaux semi-conducteurs (généralement du silicium), dont l'un a un excès d'électrons (n) l'autre un déficit (p). En arrivant sur la cellule, les photons déplacent les électrons ainsi qu'un courant continu. La figure suivante explique la forme générale du processus



**Figure I.1:** la forme général de la conversion photovoltaïque

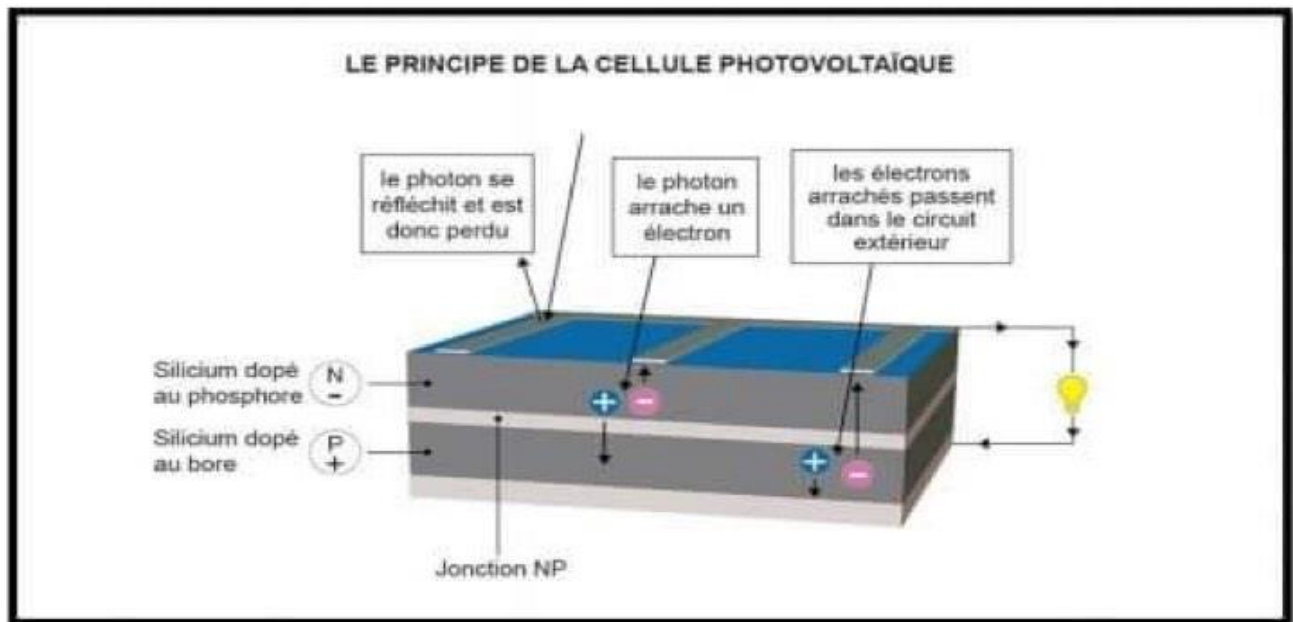
#### 1.3.1. Principe de la conversion photovoltaïque:

Le fonctionnement de la cellule photovoltaïque est fondé sur les propriétés de semi-conducteurs qui, percutés par les photons, mettent en mouvement un flux d'électrons. Les photons sont des particules élémentaires qui transportent l'énergie solaire à 300 000 km/s et qu'Albert Einstein appelait dans les années 1920 les « grains de lumière ». Lorsqu'ils frappent un élément semi-

conducteur comme le silicium, ils arrachent des électrons à ses atomes. Ces électrons se mettent en mouvement, de façon désordonnée, à la recherche d'autres « trous » où se repositionner.

Mais pour qu'il y ait un courant électrique, il faut que ces mouvements d'électrons aillent tous dans le même sens. Pour les y aider, on va associer deux types de silicium. La face exposée au soleil est « dopée » avec des atomes de phosphore qui comportent plus d'électrons que le silicium, l'autre face est dopée avec des atomes de bore qui comportent moins d'électrons. Cette double face devient une sorte de pile : le côté très chargé en électrons devient la borne négative (N), le côté avec moins d'électrons devient la borne positive (P). Entre les deux il se crée un champ électrique.

Quand les photons viennent exciter les électrons, ceux-ci vont migrer vers la zone N grâce au champ électrique, tandis que les « trous » vont vers la zone P. Ils sont récupérés par des contacts électriques déposés à la surface des deux zones avant d'aller dans le circuit extérieur sous forme d'énergie électrique. Un courant continu se crée. Une couche anti-reflet permet d'éviter que trop de photons se perdent en étant réfléchis par la surface. Voir le schéma.



**Figure I.2:** Le principe de la cellule photovoltaïque

### 1.3.2. Répartition du rayonnement solaire:

L'Algérie s'est engagée sur la voie des énergies renouvelables afin d'apporter des solutions globales et durables aux défis environnementaux et aux problématiques de préservation des ressources énergétiques d'origine fossile à travers le lancement d'un programme ambitieux pour le développement des énergies renouvelables qui a été adopté par le Gouvernement en février 2011, révisée en mai 2015 et placée au rang de priorité nationale en février 2016, par Monsieur le Président de la République Mr Abdelaziz BOUTEFLIKA, lors du Conseil Restreint Gouvernement.

L'Algérie s'engage dans une nouvelle ère énergétique durable. Le programme des énergies renouvelables dans sa version actualisée, consiste à installer une puissance d'origine renouvelable de l'ordre de 22 000 MW à l'horizon 2030 pour le marché national, avec le maintien de l'option de l'exportation comme objectif stratégique, si les conditions du marché le permettent.[7]

La Algérie a à la fois le potentiel et la motivation pour maximiser ses ressources naturelles et devenir un chef de file des énergies renouvelables. Outre son statut de deuxième pays le plus peuplé d'Afrique du Nord, l'Algérie se distingue par sa taille relative, sa richesse, sa situation géographique, ses réserves de gaz, son potentiel d'énergie renouvelable.

La figure suivante représente les dépôts solaires à partir d'images satellites, ce qui montre que les dépôts solaires sont faibles au nord et augmentent au fur et à mesure que l'on se dirige vers le sud, ce qui prouve qu'il existe une opportunité d'utiliser l'énergie solaire dans le sud algérien.

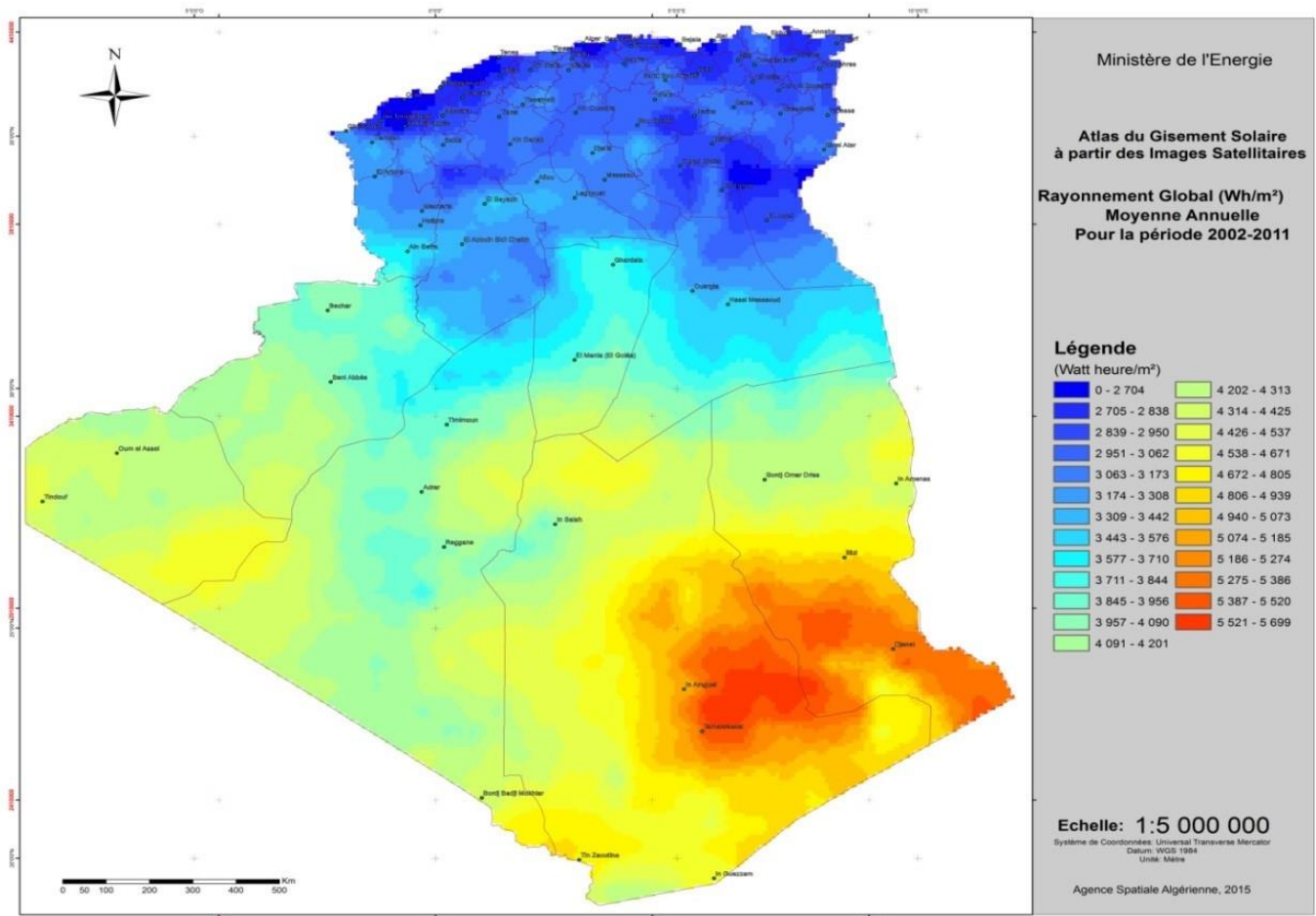
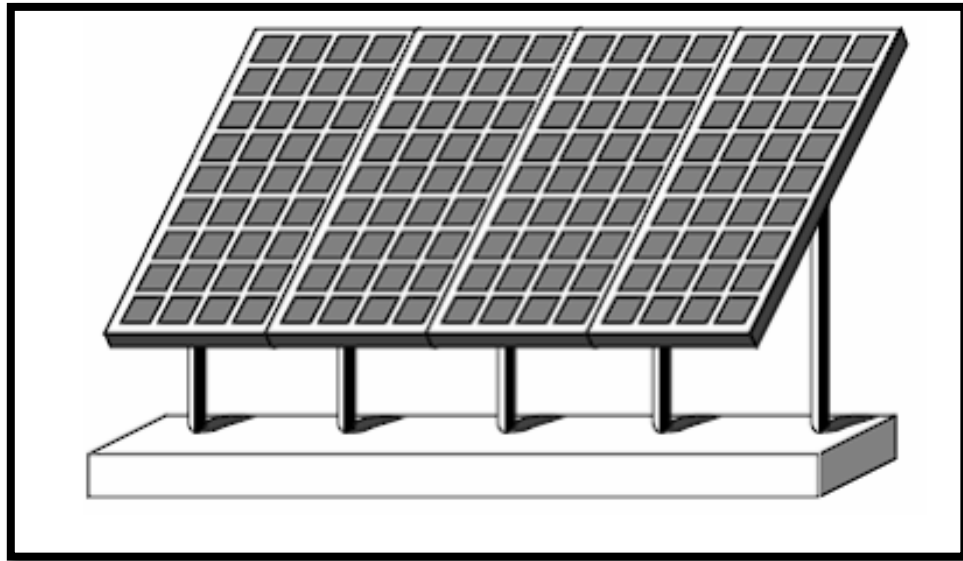


Figure I.3: Etage d'adaptation en utilisant un convertisseur DC-DC

## 1.4. Le générateur photovoltaïque.

### 1.4.1. Principe

Un générateur solaire est composé de plusieurs modules constitués de cellules photovoltaïques qui sont connectées en série et en parallèle pour créer le courant et la tension requis. Les performances du générateur sont déterminées par la variabilité des modules qui composent le générateur, ainsi que les cellules qui composent les modules. La tension de sortie du générateur photovoltaïque est déterminée par le nombre de modules connectés en série, tandis que le courant de sortie est déterminé par le nombre de modules connectés en parallèle. Une rangée photovoltaïque est un ensemble intégré de modules solaires ainsi que l'ossature porteuse.[1]



**Figure I.4:** champ photovoltaïque

Le courant et la tension de sortie du générateur solaire dans une rangée photovoltaïque sont:

$$V_{\text{out}} = \sum_n^1 V_n = V_1 + V_2 + V_3 + V_4 + \dots V_n \dots \dots \dots (I.1)$$

$$I_{\text{out}} = \sum_m^1 I_m = I_1 + I_2 + I_3 + I_4 + \dots I_m \dots \dots \dots (I.2)$$

La puissance de sortie du générateur solaire ( $P_{\text{out}}$ ) est donnée par:

$$P_{\text{out}} = \sum_n^1 V_n \sum_m^1 I_m = (V_1 + V_2 + V_3 + V_4 + \dots V_n)(I_1 + I_2 + I_3 + I_4 + \dots I_m) \dots \dots \dots (I.3)$$

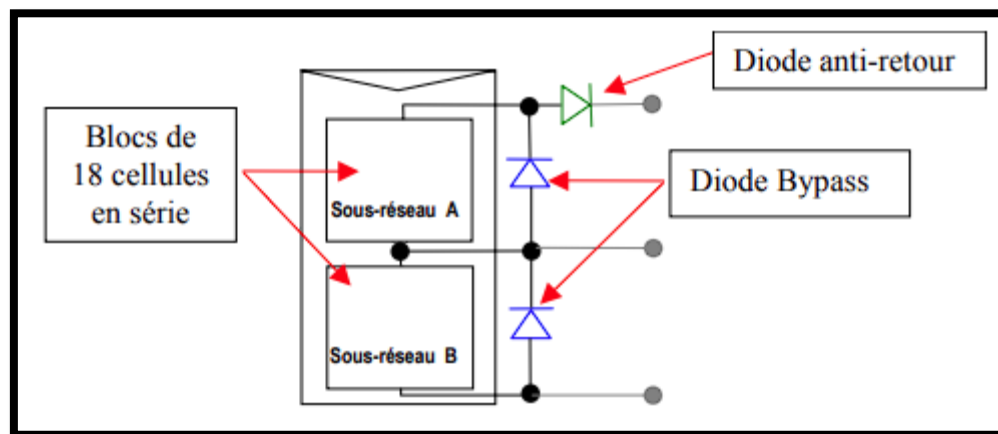
### 1.4.2. Constitution d'un générateur photovoltaïque

L'association de plusieurs cellules PV en série/parallèle donne lieu à un GPV. Si les cellules se connectent en série, les tensions de chaque cellule s'additionnent, augmentant la tension totale du générateur. D'une autre part, si les cellules se connectent en parallèle, c'est l'ampérage qui augmentera.

La plupart des panneaux PV commerciaux sont constitués par des sous-réseaux de cellules connectés en série. Chacun de ces sous-réseaux est lui-même constitué d'un groupe de cellules PV connectés en série. Le nombre de cellules par sous-réseaux est le fruit d'un compromis économique entre protection et pertes d'une partie importante du GPV en cas de défaut partiel.

Nous pouvons remarquer que comme pour une cellule, la caractéristique électrique  $I(V)$  d'un GPV est non linéaire et présente un point de puissance maximale (PPM). Ce point a également un courant et une tension associés appelés  $I_{opt}$  et  $V_{opt}$  respectivement. Le point de fonctionnement d'un GPV est fonction de l'impédance de la charge qu'il alimente. Cette charge pourrait être une charge résistive ou un bus de tension continue (par exemple, connecté sur une batterie). Dans le cas d'une batterie, c'est elle qui impose le point de fonctionnement du GPV lors d'une connexion directe.

La suivante figure montre la schématisation classiquement adoptée pour un GPV élémentaire. Pour tous les essais que nous avons menés dans cette thèse, nous avons eu à notre disposition des modules PV référencés BP585 constitués de deux fois 18 cellules PV. Leur environnement de fonctionnement traditionnel comprend la connexion de deux diodes by-pass et d'une diode anti-retour. Les connexions physiques permettent de travailler avec ou sans les diodes en fonction des conditions souhaitées.[1]



**Figure I. 5:** Schématisation d'un GPV élémentaire avec diodes by-pass et diode anti-retour.

## I.5 Avantages et des inconvénients du Générateur PV:

### 1.5.1 Les avantages [1]:

- Le soleil est une source d'énergie propre et renouvelable, qui ne produit ni le gaz ni le déchet toxique par son utilisation.
- Le processus photovoltaïque est complètement à semi-conducteurs et d'un seul bloc. Il n'y a aucune pièce mobile et aucun matériau n'est consommé ou émis.

- Les systèmes photovoltaïques ont les avantages suivants par rapport aux options de concurrence de puissance:
  - ils ne font pas de pollution, sans émissions ou odeurs discernables.
  - ils peuvent être des systèmes autonomes qui actionnent sûrement sans surveillance pendant de longues périodes.
  - ils ne consomment aucun carburant, leur carburant est abondant et libre.
  - ils peuvent être combinés avec d'autres sources d'énergie pour augmenter la fiabilité de système.
  - ils n'exigent aucun raccordement à une source d'énergie ou à un approvisionnement en carburant existant.

### 1.5.1 Les inconvénient :

- Prix: les cellules solaires sont encore lointaines pour produire une fraction significative de l'énergie du monde requise en raison de la charge de placement initiale.[2]
- Rayonnement du soleil: l'intensité d'irradiance du rayonnement du soleil en un jour, toujours, change et flotte, et il ne pas toujours disponible dans tous les lieux.[3]

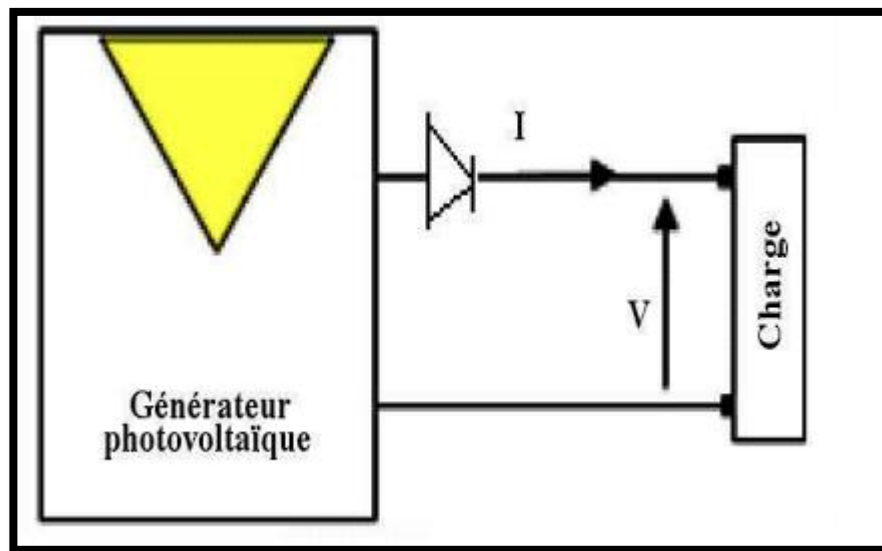
## 1.6. Connexion directe (source charge) :

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. 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 oeuvre, son coût minimal dû fondamentalement à l'absence d'électronique, sans parler d'un faible coût.

La figure 1 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 I.6:** Principe du couplage direct

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 [4][5]:

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

### 1.7 Étage d'adaptation entre un Générateur PV et une Charge :

Un générateur photovoltaïque a une caractéristique IV non linéaire avec un point de puissance maximale de MPP. Ces caractéristiques dépendent du niveau d'éclairement et de la température de la cellule. De plus, selon les caractéristiques de la charge que le GPV distribue, on peut constater une énorme différence entre la puissance potentielle du générateur et la puissance réelle délivrée à la charge en mode connexion directe. . Pour extraire à tout moment la puissance maximale disponible aux pôles du générateur PV et la transférer à la charge, la technique couramment utilisée consiste à utiliser une phase d'adaptation entre le générateur photovoltaïque et la charge comme le montre la figure suivante. Cet étage joue le rôle d'interface entre les deux éléments en assurant à travers une

action de contrôle, le transfert du maximum de puissance fournie par le générateur pour qu'elle soit la plus proche possible de puissance maximale disponible.

Le rôle du convertisseur DC-DC fait fonctionner les modules à leur point de puissance optimal, quelles que soient la luminosité et la charge, pour fournir cette puissance à l'utilisateur.[6]

### 1.8. Etage d'adaptation en utilisant un convertisseur DC-DC :

- Le Convertisseurs DC-DC :** Un convertisseur DC-DC (hacheur) est un dispositif électrique qui permet de transformer une tension continue de valeur fixe en une tension continue réglable. Il est constitué de condensateur, d'inductance et d'un interrupteur qui peut être un transistor (pour faible puissance) ou un thyristor (pour grand puissance). Le rôle de ce convertisseur est de faire fonctionner les modules à leur point de puissance maximale quelques soient l'éclairément et la température pour délivrer cette puissance à l'utilisation. Les convertisseurs de tension continue DC-DC se démarquent par leur fonction. Ils saugmentent, abaissentou inversent la tension.
- Hacheur dévolteur (Buck)**Le hacheur série, hacheur abaisseur ou bien dévolteur est un appareil qui convertit une tension continue en une autre tension continue de plus faible valeur. La source d'entrée est de type tension continue et la charge de sortie continue de type source de courant [1].

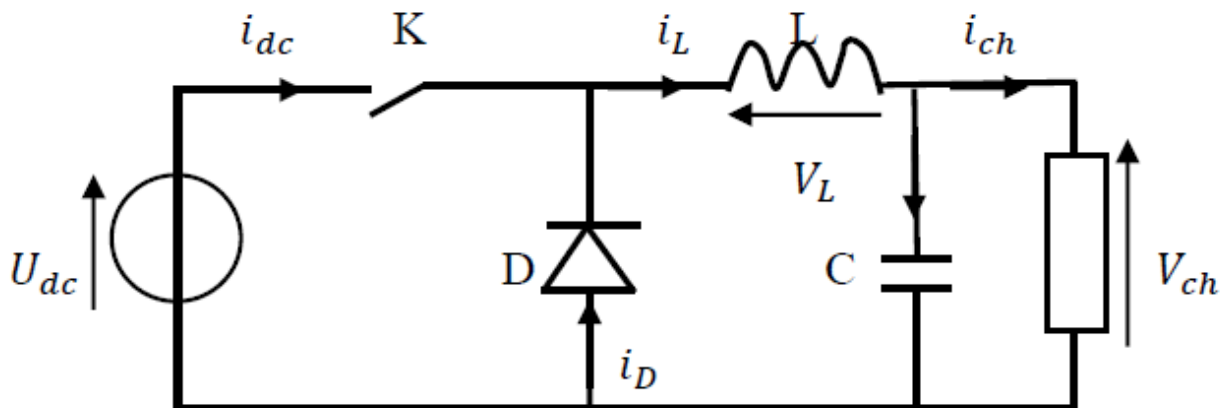
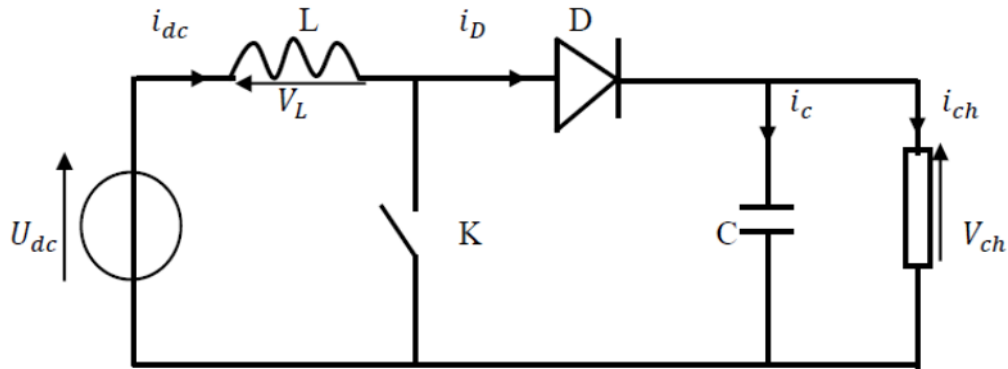


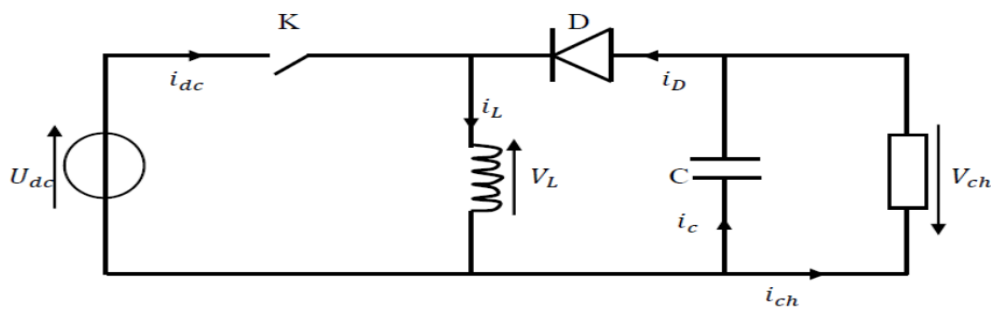
Figure I.7: Hacheur série (abaisseur)

- Hacheur parallèle (Boost) :** Le hacheur parallèle est appelé aussi hacheur élévateur, hacheur survolteur ou hacheur de type Boost. La source d'entrée est de type courant continu (inductance en série avec une source de tension) et la charge de sortie est de type tension continue (condensateur en parallèle avec la charge résistive). L'interrupteur « K » peut être remplacé par un transistor puisque le courant est toujours positif et que les commutations doivent être commandées (au blocage et à l'amorçage) [2].



**Figure I.8:** Hacheur parallèle (élévateur).

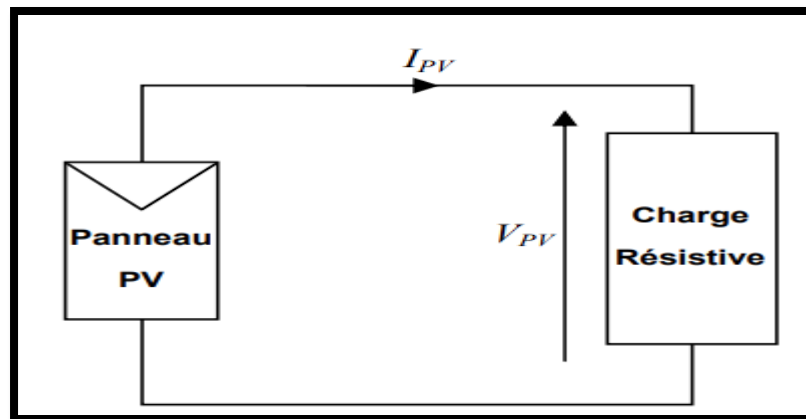
- Hacheur abaisseur-élévateur (Buck-Boost) :** Hacheur abaisseur-élévateur est aussi appelé dévolteur-survolteur ou de type Buck-Boost. Le hacheur abaisseur-élévateur est un convertisseur indirect DC-DC à stockage inductif. La source d'entrée est de type tension continue (filtrage capacitif en parallèle avec une source de tension) et la charge de sortie continue de type source de tension (condensateur en parallèle avec la charge résistive). Le convertisseur dévolteur-survolteur combine les propriétés des deux convertisseurs précédents [3].



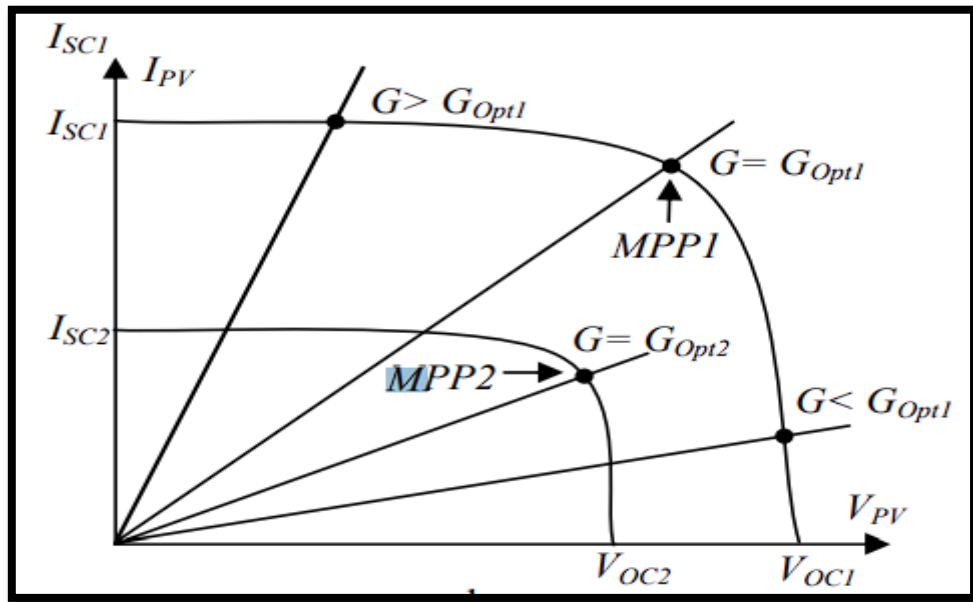
**Figure I.9:** Hacheur abaisseur-élévateur (Buck-Boost)

## 1.9 Fonctionnement d'un générateur PV à sa Puissance Maximale:

La conception de systèmes photovoltaïques optimisés doit prendre en compte la nature même de la source. Pour un générateur photovoltaïque (PV), la production de puissance varie fortement en fonction de l'éclairement, de la température, mais aussi du vieillissement global du système. Il faut donc arriver à concilier ces comportements avec ceux propres à une charge, qu'elle soit de nature continue (DC) comme des batteries ou bien alternative (AC) comme le réseau électrique 240V/50Hz. Dans ces conditions, pour qu'une connexion source-charge soit possible, un point de fonctionnement correspondant à l'intersection des deux caractéristiques électriques doit exister. Pour mieux comprendre ceci, prenons le cas d'une connexion directe entre un générateur PV et une charge résistive R, comme illustré dans la suivant figure



**Figure I.7 :** Connexion directe entre un générateur PV et une charge résistive.



**Figure I. 8:** Différents points de fonctionnements résultant de l’association d’un panneau PV sous deux éclairagements et d’une charge résistive variable.

Pour calcul la puissance de générateur PV il y a plusieurs méthodes nous mention un d'eux

Le modèle d’essai présenté ci-dessous permet de calculer la puissance maximale fournie par le module, en utilisant la température et l’éclairement solaire incident. Ce modèle a été élaboré et validé expérimentalement par Lu Lin en 2004[7][8]

$$P_m = -(a \times G + b) T_c + c \times G + d \dots\dots\dots(I.4)$$

- **P<sub>m</sub>** : Puissance maximale produite (W);
- **a , b, c et d** sont des constantes positives qui peuvent être connues expérimentalement;
- **T<sub>c</sub>** : Température de la cellule, qui varie en fonction de l’éclairement et de la température ambiante, selon la relation linéaire suivante (7, 8).

$$T_c = T_a + [(NOCT - 20) / 800] \dots\dots\dots (I.5)$$

- **T<sub>a</sub>** : Température ambiante (K);
- **NOCT** : Température nominale de fonctionnement de la cellule solaire (Nominal Operating Cell Temperature).
- Elle est définie comme étant la température de la cellule, si le module est soumis sous certaines conditions comme l’éclairement solaire (800 W/m<sup>2</sup>),

- la distribution spectrale (AM 1.5), la température ambiante (20 °C) et la vitesse de vent ( $> 1\text{m/s}$ );
- **G** : Eclairement solaire incident sur un plan incliné ( $\text{W/m}^2$ ).

### **1.10 Conclusion :**

Nous avons parlé dans ce chapitre de le générateur photovoltaïques de son histoire et du principe de travail, en mentionnant quelques équations basées dessus, comme nous avons mentionné ses avantages et ses inconvénients, et nous parlerons dans la prochaine chapitre de modélisation de la chaîne de conversion d'énergie photovoltaïque .

## Bibliographique

- [1] M.Arrouf, "Optimisation de L'ensemble onduleur, Moteur et Pompe", Constantine: Université Mentouri de Constantine, 2007.
- [2] B. L. a. M. Ehsani, "Advanced simulation model for brushless dc motor drives, Electric Power Compon", 2003.
- [3] H. J., "Electrical machine and their applications", New York: New York: Pergamon, 1984.
- [4] K. Khouzam, "Optimum Load Matching in Direct-Coupled Photovoltaic Power Systems - Application to Resistive Loads", IEEE Transactions on Energy, 1990.
- [5] P. Izzo, "Etude d'un Circuit Electronique et Algorithmique Destiné à la Gestion de Systèmes Autonomes de Production d'Energie Photovoltaïque", Université de Montpellier II, Décembre 2002.
- [6] H. Mohamed, "Etude simulation d'un générateur de panneau", UNIVERSITE BADJI MOKHTAR ANNABA, 2019.
- [7] L. Lu, "Investigation on Characteristics and Application of Hybrid Solar/Wind Power", The Hong Kong Polytechnic University, 2004.
- [8] L. L. a. H. Yang, "A Study on Simulation of the Power Output and Practical Models for Building Integrated Photovoltaic Systems", ASME Journal of Solar Energy Engineering, 2004.
- [9] "Ministre de l'énergie et des mines," [Online]. Available: <https://www.energy.gov.dz/?rubrique=energies-nouvelles-renouvelables-et-maitrise-de-lrenergie>.

# Chapitre II:

Modélisation de la chaîne de conversion d'énergie photovoltaïque

## II.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous allons étudier la modélisation de la cellule et le générateur photovoltaïque (composé de 36 cellules connectées en série et deux en parallèle) dans les conditions standard ( $E=1000\text{W/m}^2$ ,  $T=25^\circ\text{C}$ ), nous allons traiter l'effet de la température et l'éclairement sur l'énergie de la cellule PV, et l'effet de regroupement de cellule (série, parallèle, série – parallèle) sur l'énergie produite.

Dans le but de concevoir une interface de puissance plus performante, Le convertisseur Boost est choisi dans cette étude grâce à sa structure simple et son rapport de transformation en tension le plus élevé par rapport aux autres topologies.

## II.2 Modélisation du générateur photovoltaïque (GPV) :

Une cellule solaire est la pierre angulaire d'un panneau solaire. Un module photovoltaïque est formé en connectant plusieurs cellules solaires en série et en parallèle. Considérant une seule cellule solaire ; il peut être modélisé en utilisant une source de courant, une diode et deux résistances. Ce modèle est connu sous le nom de modèle de cellule solaire à une seule diode. Deux modèles de diodes sont également disponibles mais seul le modèle à une seule diode est considéré ici :

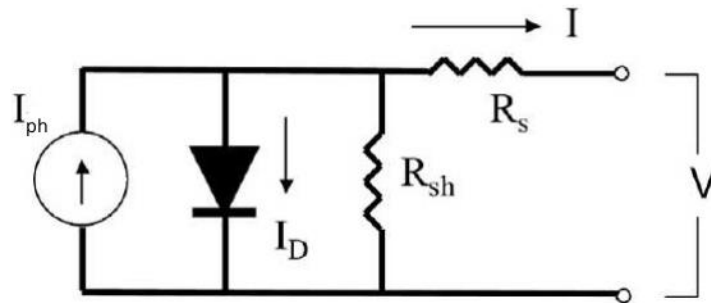


Figure II.1 Schéma électrique d'une cellule photovoltaïque

La photopile présentée comporte en réalité une résistance série ( $R_s$ ) et une résistance Shunt ( $R_{sh}$ ). Ces résistances auront une certaine influence sur la caractéristique  $I=f(V)$ .

- **La résistance série** : elle représente la résistance interne de la cellule, elle dépend principalement de la résistance du semi-conducteur utilisé, de la résistance de contact des grilles collectrices et de la résistivité de ces grilles [1].
- **La résistance shunt** : elle est due à un courant de fuite au niveau de la jonction, elle dépend de la façon dont celle-ci a été réalisée [2].

La cellule PV est généralement représentée par le modèle à une seule diode. La diode unique Le circuit équivalent d'une cellule solaire est illustré à la figure 2.1. L'équation des caractéristiques I-V de la cellule solaire est donnée comme suit :

$$I = I_{ph} - I_0 \left\{ e^{\left[ \frac{q(V+I.R_s)}{nK N_s T} \right]} - 1 \right\} - \frac{V+I.R_s}{R_{sh}} \dots \dots \dots (II.1)$$

- **Le photo-courant:**

Le courant généré par la lumière dépend principalement de l'insolation solaire et de la température de fonctionnement de la cellule, qui est décrite comme :

$$I_{ph} = [I_{sc} + K_I(T - T_{ref})] \cdot \frac{G}{G_{ref}} \dots \dots \dots (II.2)$$

$I_{sc}$  [A] : est le courant de court-circuit à 25°C et 1KW/m2.

$K_I$  [A/K]: est le coefficient de température du courant de court-circuit.

$T_{ref}$  [K] : est la température de référence.

$G$  [W/m<sup>2</sup>]:est l'ensoleillement KW/m2.

$G_{ref}$  [W/m<sup>2</sup>] : Irradiation de référence (1000 W/m<sup>2</sup>).

- **Le courant de saturation  $I_0$ :**

Le courant de diode des cellules ou le courant de saturation varie avec la température de la cellule qui est décrite comme :

$$I_0 = I_{RS} \left( \frac{T}{T_{ref}} \right)^3 e^{\left[ \frac{qE_{g0}}{K} \left( \frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T} \right) \right]} \dots \dots \dots (II.3)$$

Avec

$E_{g0}$  [eV] : Énergie de gap du semi-conducteur.

- **Le courant de saturation inverse de la diode**

Son expression est donnée par l'équation :

$$I_{rs} = \frac{I_{sc}}{e^{\left( \frac{q.V_{oc}}{KAT} \right)} - 1} \dots \dots \dots (II.4)$$

$V_{oc}$  [V] : Tension de circuit ouvert du module (donnée par le constructeur).

$q$  [°C] : Charge de l'électron (1.602. 10<sup>-19</sup> °c).

$N_s$  : Nombre de cellules connectées en série.

**A** : Constante d'idéalité de la jonction ( $1 < A < 2$ ).

**K [J/K]** : Constante de Boltzmann ( $1.3805 \cdot 10^{-23}$  J/K).

### II.3. Performances du GPV :

#### II.3.1. Caractéristique Courant-Tension :

La figure II.2 représente la caractéristique courant – tension d'une cellule solaire dans les conditions de  $E=1000$  W/m<sup>2</sup> et  $T=25^\circ\text{C}$ .

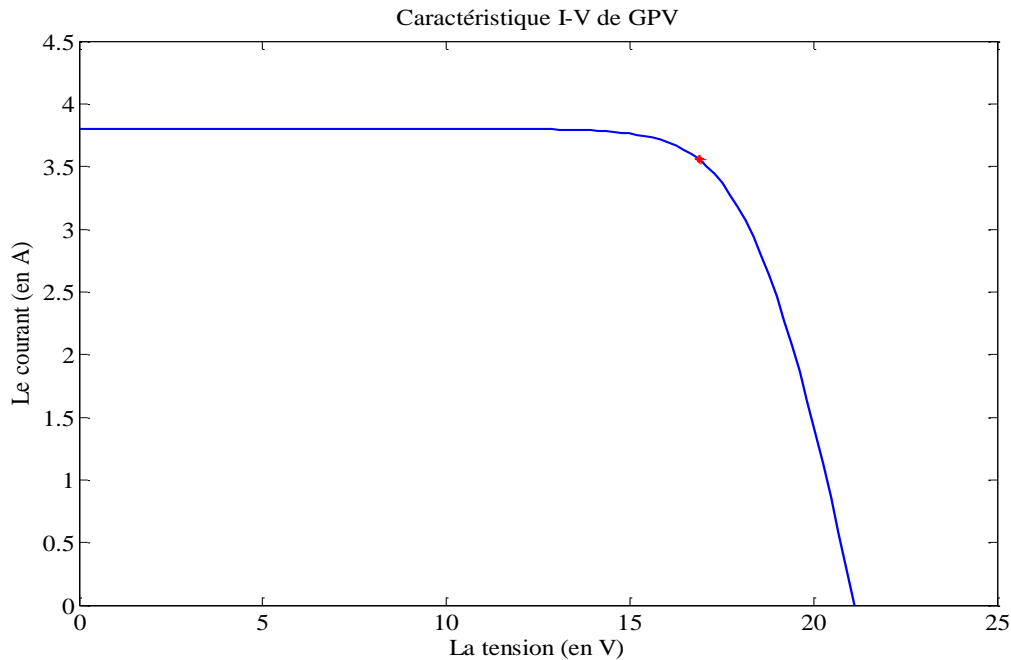


Figure II.2 : Caractéristique typique I-V d'une cellule solaire

La puissance maximale débitée par le panneau photovoltaïque donnée par :

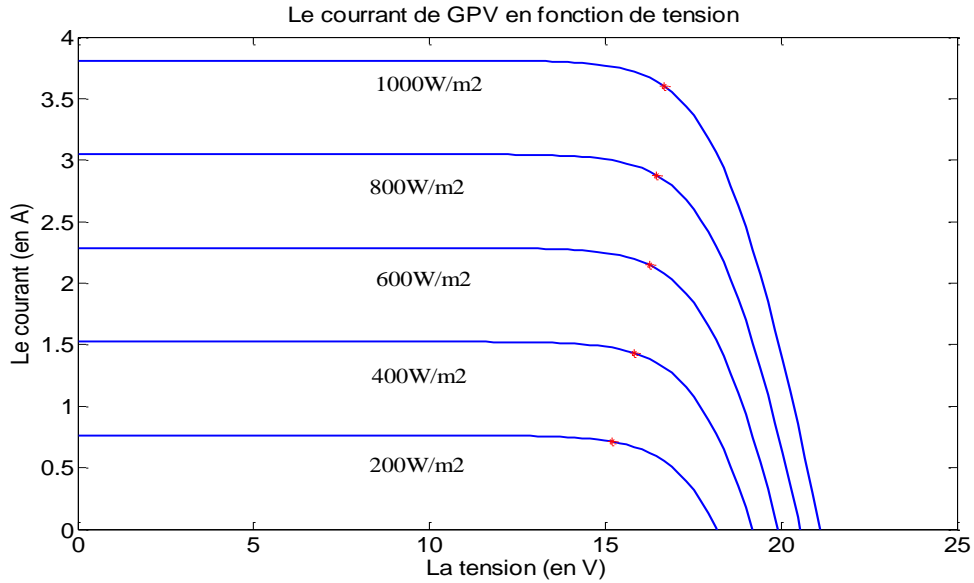
$$P_{max} = V_{op} \times I_{op} \dots \dots \dots (II.5)$$

### II.3. Performances du GPV :

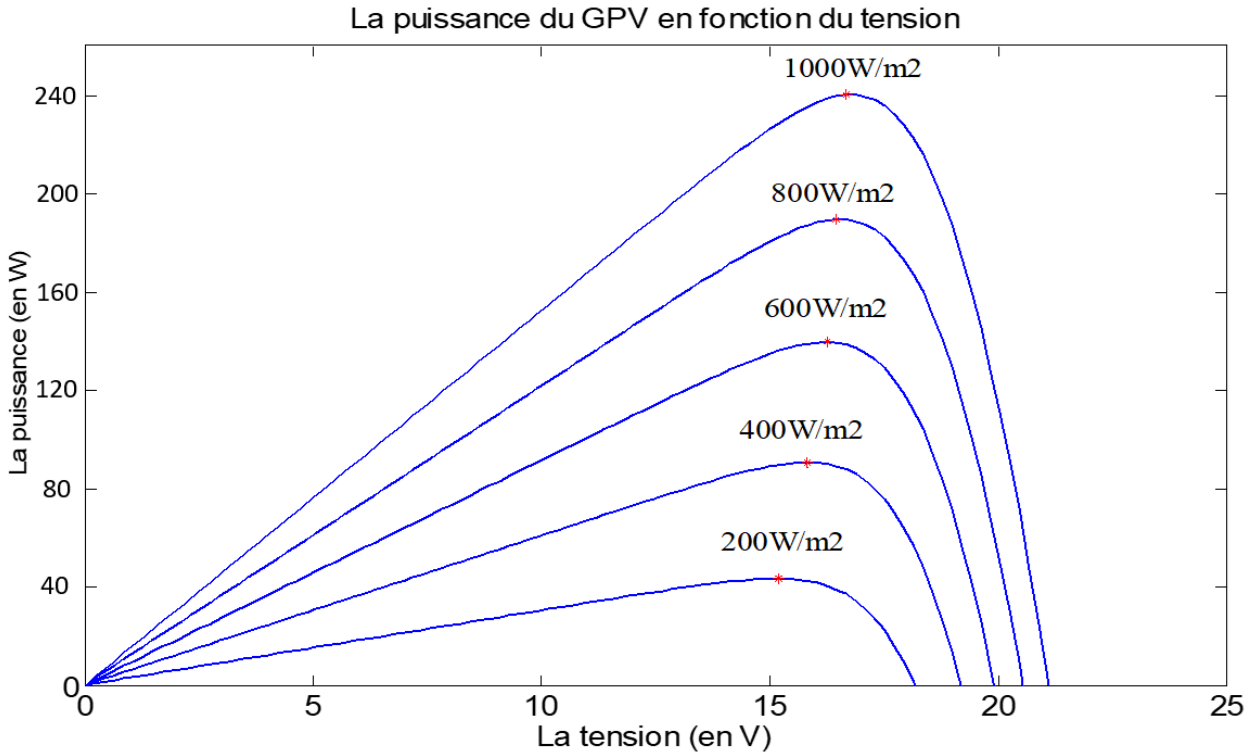
#### II.3.1. Caractéristique Courant-Tension :

En faisant varier l'éclairement entre [200 et 1000 W/m<sup>2</sup> avec un pas de 200W/m<sup>2</sup>] les figures 2.3 et 2.4 présentent respectivement les caractéristiques courant/tension et puissance/tension d'un module photovoltaïque pour différents éclairagements.

La figure II.3 illustre la variation de la puissance délivrée par la cellule en fonction de la tension pour différentes valeurs d'éclairement, ce qui nous permet de déduire l'influence de l'éclairement sur la caractéristique  $P(V)$ .



**Figure II.2:** Caractéristique  $I(V)$  pour d'éclairement ( $T=25^{\circ}\text{C}$ )

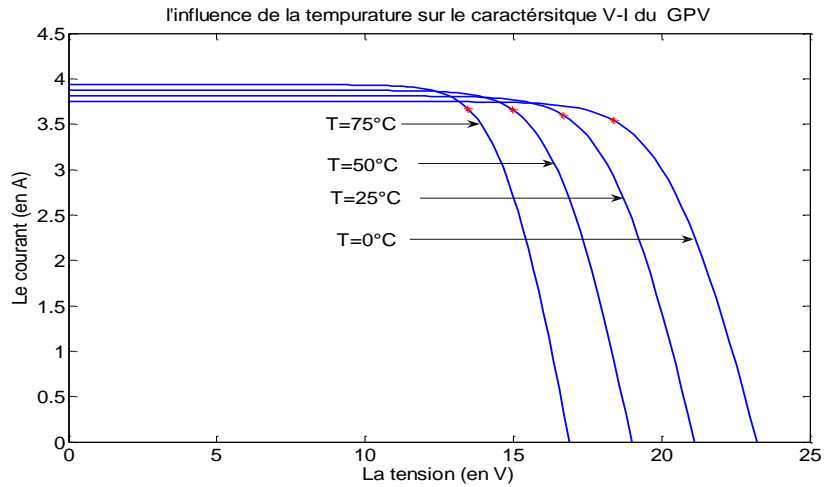


**Figure II.3 :**Caractéristique  $P(V)$  pour d'éclairement ( $T=25^{\circ}\text{C}$ )

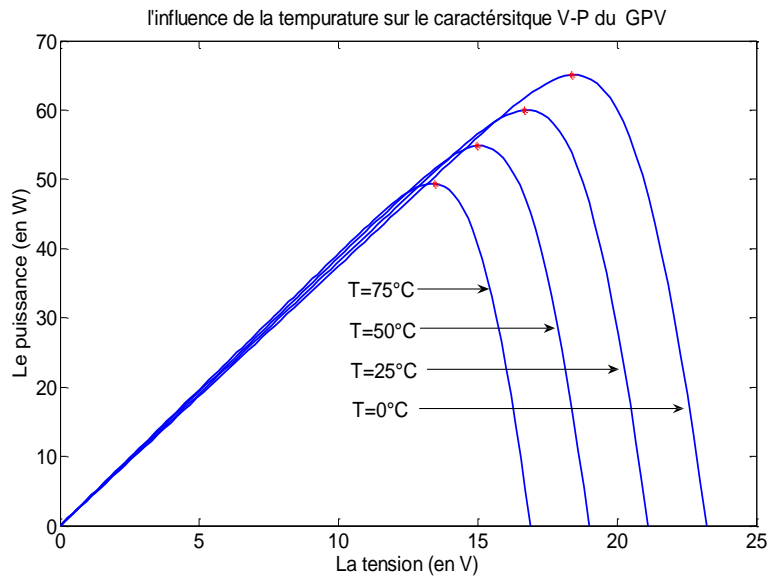
### II.3.2. Influence de la température:

La température a une influence considérable sur le comportement de la cellule et donc sur son rendement. Cette influence se traduit principalement par une diminution de la tension générée (et une très légère augmentation du courant).

Suivant les modèles, ce comportement induit, par degré, une perte de 0.5 % du rendement par rapport au rendement maximum de la cellule[3].



**Figure II.4:**Caractéristique I(V) pour température



**Figure II.5:** Caractéristique I(V) pour température

**II.3.3. Association des Cellules photovoltaïques en Série :**

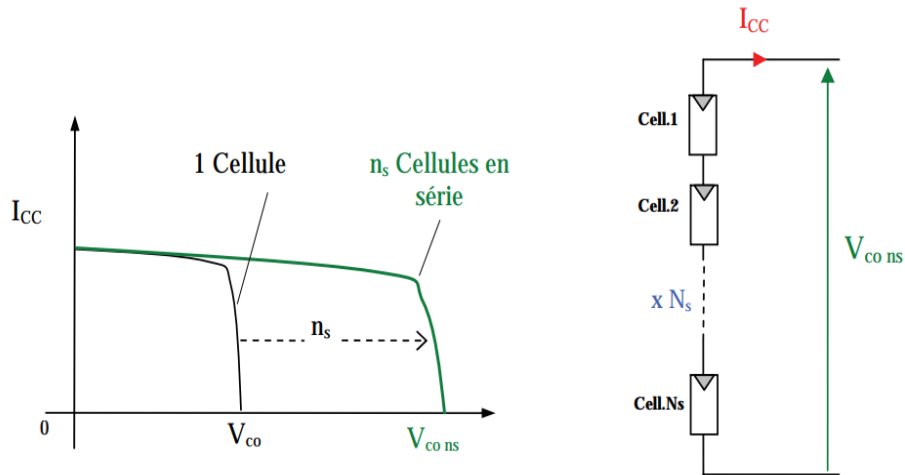
Une association de  $N_s$  cellules en série permet d'augmenter la tension du générateur photovoltaïque (*GPV*). Les cellules sont alors traversées par le même courant et la caractéristique résultant du groupement série est obtenue par addition des tensions élémentaires de chaque cellule[9], figure 2.1. L'équation (II.5)résume les caractéristiques électriques d'une association série de ns cellules [4].

$$V_{co_{ns}} = n_s * V_{co} I_{cc} = I_{cc_{n_s}} \dots \dots \dots (II.6)$$

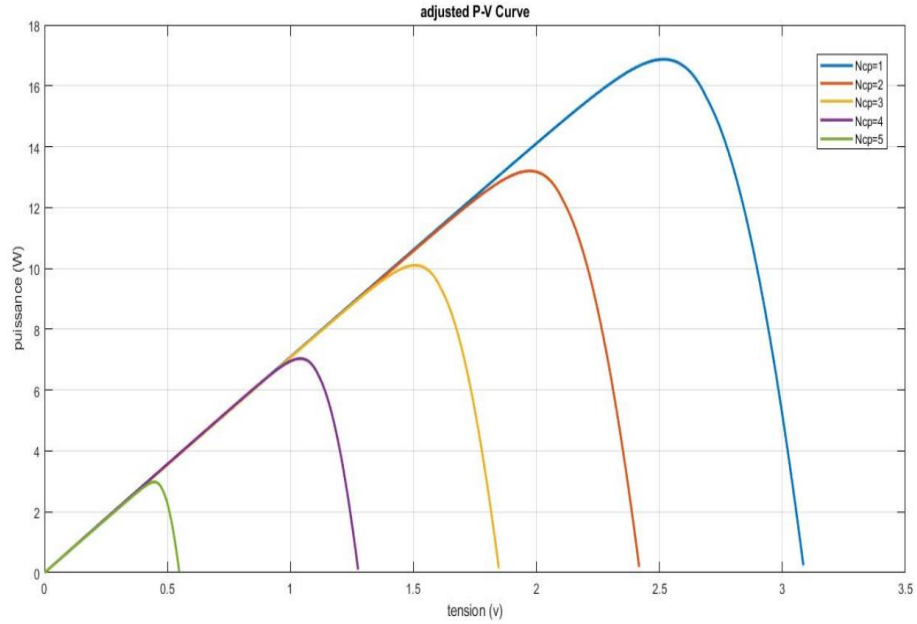
$V_{co_{ns}}$  : la somme des tensions en circuit ouvert de Ns cellules en série.

$I_{cc_{n_s}}$  : courant de court-circuit de Ns cellules en série.

Ce système d'association est généralement le plus communément utilisé pour les modules photovoltaïques du commerce.



**Figure II.7 :** Caractéristiques résultantes d'un groupement de ns cellules en série [4].



**Figure II.8 :**Caractéristique  $P(V)$  pour différents nombres de cellule en série

**II.3.4. Association des cellules photovoltaïques en parallèle :**

D'autre part, une association parallèle de  $N_p$  cellules est possible et permet d'accroître le courant de sortie du générateur ainsi créé. Dans un groupement de cellules identiques connectées en parallèle, les cellules sont soumises à la même tension et la caractéristique résultant du groupement est obtenue par addition des courants, Figure 2.6. L'équation (II.6).Résume à son tour les caractéristiques électriques d'une association parallèle de  $N_p$ cellules[4].

$$I_{sc_{np}} = n_p * I_{sc} \text{ avec } V_{oc_{np}} = V_{oc} \dots \dots \dots (II.7)$$

$I_{sc_{np}}$  : la somme des courants de court-circuit de ( $N_p$ ) cellules en parallèle.

$V_{oc_{np}}$  : la tension du circuit ouvert de ( $N_p$ ) cellules en parallèle.

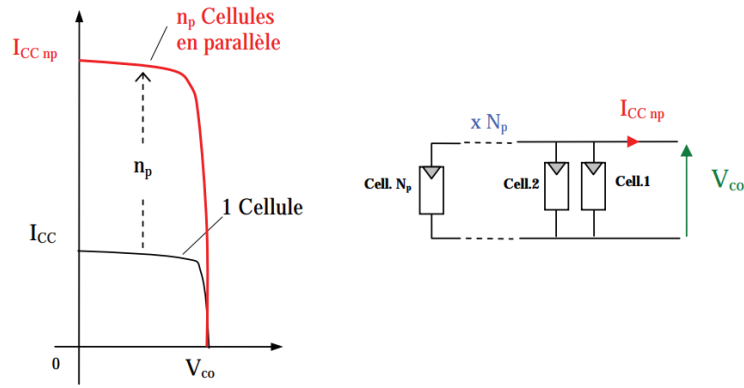


Figure II.9: Caractéristiques résultant d'un groupement de  $N_p$  cellules en parallèle [4].

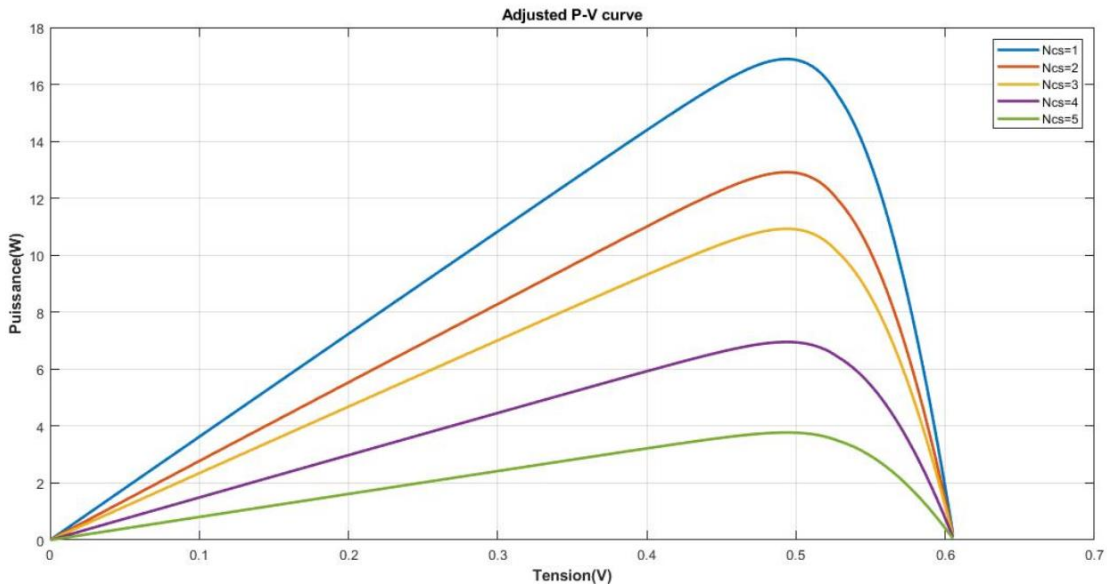


Figure II.10 :Caractéristique P(V) pour différents nombres de cellule en parallèle

### II.3.5. Association des cellules photovoltaïques en parallèle :

Lorsqu'une batterie connectée à un GPV, présente une tension de batterie systématiquement supérieure à la tension de circuit ouvert du générateur photovoltaïque. Alors, aucun transfert de puissance ne peut avoir lieu. Ainsi, l'un des intérêts à introduire un étage d'adaptation comme indiqué sur la figure 2.11, est d'assurer que le transfert d'énergie est toujours possible et qu'il peut s'effectuer dans des conditions de fonctionnement optimales pour la source *PV* et la charge. Pour cela, il suffit d'effectuer un choix sur l'étage d'adaptation selon ses propriétés de conversion de puissance et la présence d'au moins un degré de liberté lui permettant d'adapter les tensions et les

courants autant en valeur qu'en forme entre son port d'entrée et son port de sortie pour respecter au mieux les contraintes d'une part du GPV et d'autre part, de la charge[5].

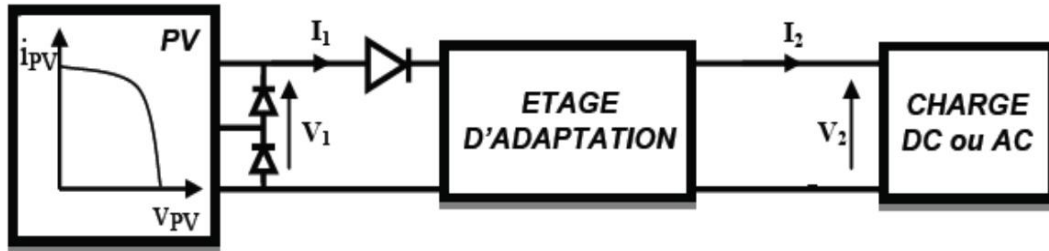


Figure II.11 :Connexion d'un GPV à une charge à travers un étage d'adaptation.

#### II.4. Etage d'adaptation type survolteur (Boost) :

Le schéma de réalisation de l'étage d'adaptation d'un GPV à partir d'un convertisseur de type boost est présenté en figure 2.12. Cette structure élévatrice est plutôt destinée aux applications où la tension de la batterie est supérieure à la tension de circuit ouvert  $U_{oc}$  du générateur [6].

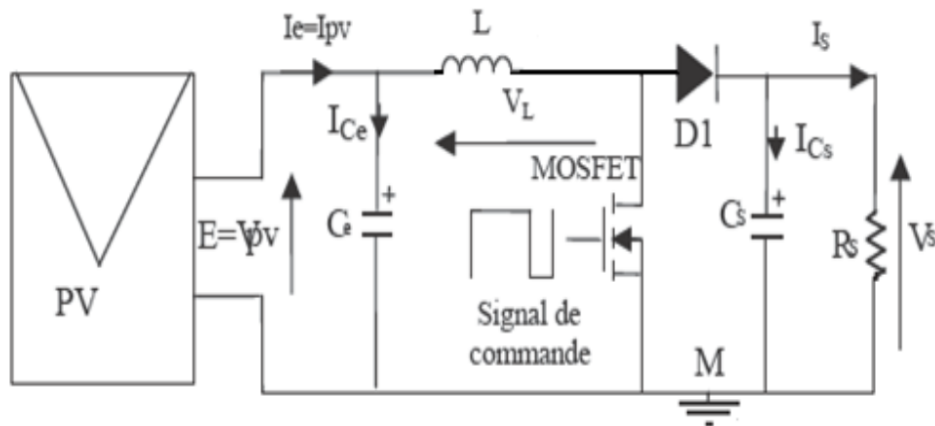


Figure II.126 : Schémas d'hacheur de type élévateur

Les équations de la tension et de courant en régime établi sont :

$$V_s = \frac{V_{PV}}{1-\alpha} \dots \dots \dots (II.8)$$

Les équations de la courant de sortie  $I_S$  est en fonction du rapport cyclique et il inférieure à celui d'entrée :

$$I_s = (1 - \alpha)I_{PV} \dots \dots \dots (II.9)$$

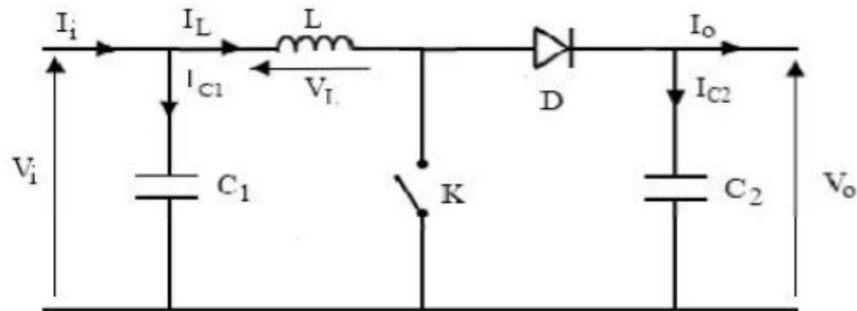
L'adaptation optimale est alors réalisée lorsque  $I_{PV}$  et  $V_{PV}$  valent respectivement  $I_{opt}$  et  $V_{opt}$ . Ceci correspond alors à une résistance optimale  $R_{opt}$  du générateur répondant à l'équation suivante :

$$R_{opt} = \frac{V_{opt}}{I_{opt}} = (1 - \alpha)^2 \frac{V_s}{I_s} = (1 - \alpha)^2 R_s \dots \dots \dots (II.10)$$

**II.5.Modélisation et analyse de fonctionnement de l'hacheur Boost :**

L'hacheur parallèle est appelé aussi hacheur élévateur, hacheur survolteur ou hacheur de type Boost. La source d'entrée est de type courant continu (inductance en série avec une source de tension) et la charge de sortie est de type tension continue (condensateur en parallèle avec la charge résistive). L'interrupteur « K » peut être remplacé par un transistor puisque le courant est toujours positif et que les commutations doivent être commandées (au blocage et à l'amorçage) [7].

La figure (12) représente le schéma de principe d'un convertisseur boost.

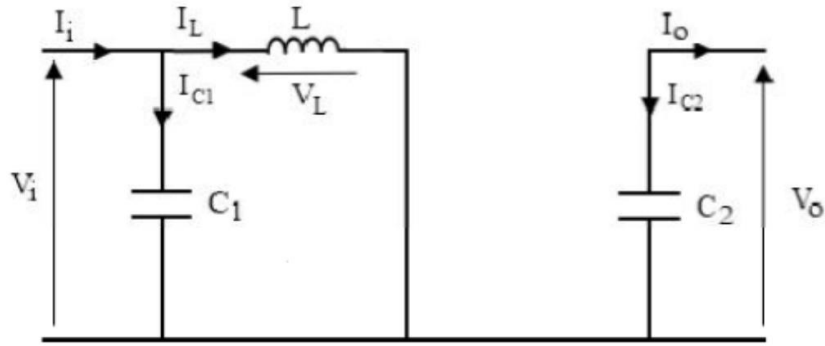


**Figure II.13 :** Schéma de l'hacheurboost

Quand l'interrupteur est fermé pendant la durée, le courant dans l'inductance croît linéairement. La tension aux bornes de K est nulle. Pendant le temps, l'interrupteur s'ouvre et l'énergie emmagasinée dans l'inductance commande la circulation du courant dans la diode de roue libre D. En écrivant que la tension aux bornes de l'inductance est nulle, on arrive à  $V_o(1 - \alpha) = V_i$

Les grandeurs d'état sont définies comme suit :

**Etat 1:**  $0 \leq t < \alpha.T$



**Figure II.7 :** Schéma électrique d'un hacheur boost fermé

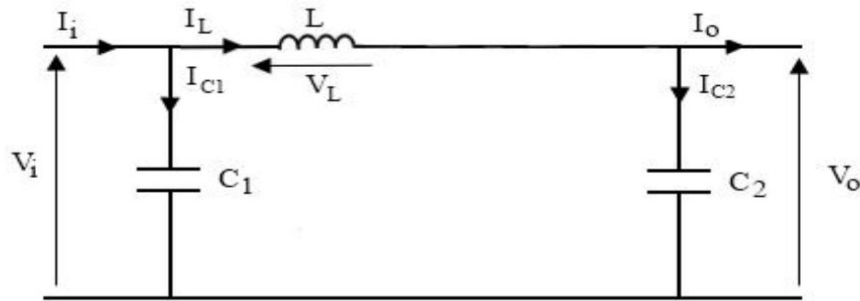
Comme pour le circuit, l'application des lois de Kirchhoff sur les circuits équivalents des deux phases de fonctionnement donnent les équations suivantes:

$$I_{C1}(t) = C_1 \frac{dV_i(t)}{dt} = I_i(t) - I_L(t) \dots \dots \dots (II.11)$$

$$I_{C2}(t) = C_2 \frac{dV_o(t)}{dt} = -I_o(t) \dots \dots \dots (II.12)$$

$$V_L(t) = L \frac{dV_L(t)}{dt} = V_i(t) \dots \dots \dots (II.13)$$

**Etat 2:**  $\alpha.T \leq t < T$



**Figure II.8:** Schéma électrique d'un hacheur boost ouvert

$$I_{C1}(t) = C_1 \frac{dV_i(t)}{dt} = I_i(t) - I_L(t) \dots \dots \dots (II.14)$$

$$I_{C2}(t) = C_2 \frac{dV_o(t)}{dt} = I_L(t) - I_o(t) \dots \dots \dots (II.15)$$

$$V_L(t) = L \frac{dV_L(t)}{dt} = V_i(t) - V_o(t) \dots \dots \dots (II.16)$$

## II.6 Modélisation de Bus continue :

$$\frac{dV_{dc}}{dt} = \frac{1}{C_{dc}} [S_a i_{fa} + S_b i_{fb} + S_c i_{fc}] \dots \dots \dots (II.17)$$

$$\frac{dV_{dc}}{dt} = \frac{2}{3k^2} \frac{1}{C_{dc}} [u_\alpha i_\alpha + u_\beta i_\beta] \dots \dots \dots (II.18)$$

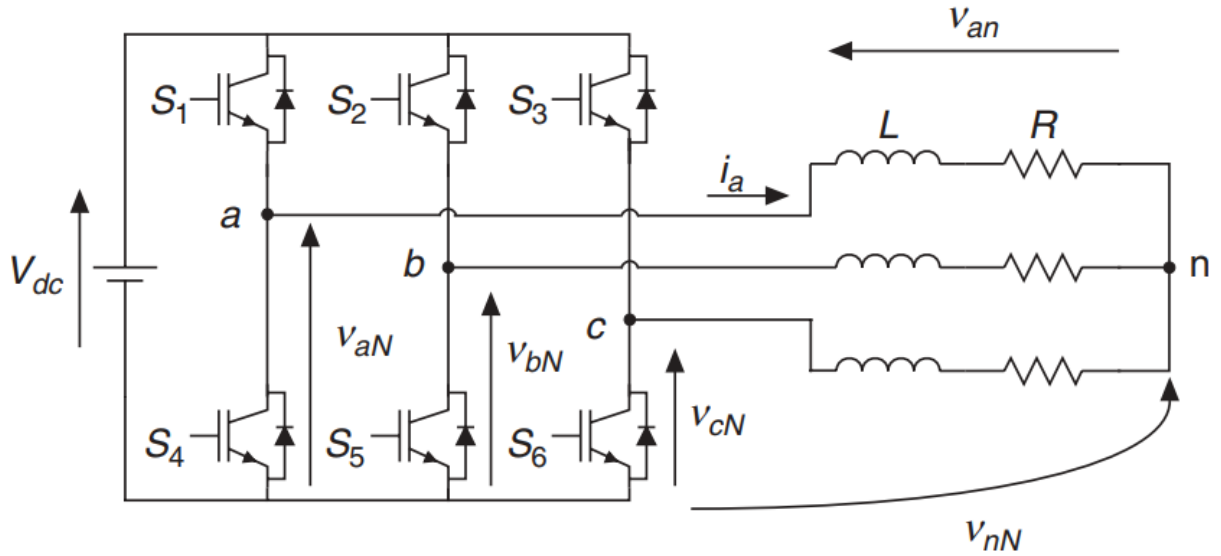
- $k = \frac{2}{3}$ , dans ce cas l'amplitude du signal sinusoïdal dans le repère (a,b,c) est égale à l'amplitude du signal dans le nouveau système d'axes ("conservation d'amplitude", dite Transformation de Clarke).
- $k = \sqrt{\frac{2}{3}}$ , le produit scalaire des courants et des tensions dans le repère (a,b,c) est le même que celui dans le nouveau système d'axes ("conservation de la puissance", dite Transformation de Concordia).

$$P = \frac{3}{2} \Re(U_L I_L^*) = \frac{3}{2} (U_{L\alpha} I_{L\alpha} + U_{L\beta} I_{L\beta}) \dots \dots \dots (II.19)$$

$$Q = \frac{3}{2} \Im(U_L I_L^*) = \frac{3}{2} (U_{L\beta} I_{L\alpha} - U_{L\alpha} I_{L\beta}) \dots \dots \dots (II.20)$$

## II.7 Modélisation d'onduleur de tension :

Les onduleurs triphasés constitués de trois bras chaque bras se compose de deux interrupteurs. Les interrupteurs choisis, constituent bien une cellule de commutation. Leur fonctionnement doit être complémentaire afin de ne jamais court-circuiter la source continue[8]. Donc les interrupteurs doivent être bidirectionnels en courant et se compose soit d'un thyristor ou transistor.



**Figure II.16 :** Circuit d'alimentation de l'onduleur source de tension

l'état de commutation des interrupteurs de puissance  $S_x(x = 1 \dots 6)$ .

$$S_a = \begin{cases} 1 & \text{si } S_1 \text{ on et } S_4 \text{ off} \\ 0 & \text{si } S_1 \text{ on et } S_4 \text{ on} \end{cases}$$

$$S_b = \begin{cases} 1 & \text{si } S_2 \text{ on et } S_5 \text{ off} \\ 0 & \text{si } S_2 \text{ on et } S_5 \text{ on} \end{cases}$$

$$S_c = \begin{cases} 1 & \text{si } S_3 \text{ on et } S_6 \text{ off} \\ 0 & \text{si } S_3 \text{ on et } S_6 \text{ on} \end{cases}$$

Ces signaux de commutation définissent la valeur des tensions de sortie et  $V_{dc}$  est la tension de la source.

$$V_{an} = S_a V_{dc}$$

$$V_{bn} = S_b V_{dc}$$

$$V_{cn} = S_c V_{dc}$$

Considérant le vecteur unitaire  $a$  qui représente le déphasage de  $120^\circ$  entre les phases, le vecteur tension de sortie peut être défini comme :

$$a = e^{j2\pi/3} = -\frac{1}{2} + j\sqrt{3}/2 \dots \dots \dots (II.21)$$

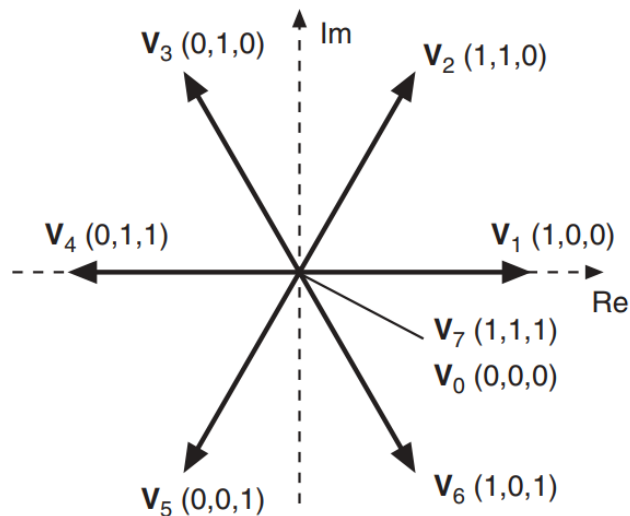
$$V = \frac{2}{3}(V_{an} + V_{bn} + V_{cn}) \dots \dots \dots (II.22)$$

Où  $V_{an}$ ,  $V_{bn}$  et  $V_{cn}$  sont les tensions phase-neutre (N) de l'onduleur.

En considérant toutes les combinaisons possibles des signaux de déclenchement  $S_a$ ,  $S_b$  et  $S_c$ , huit états de commutation et par conséquent huit vecteurs de tension sont obtenus, comme indiqué dans le tableau 2.1 dans la figure 2.17, notez que  $V_0 = V_7$ , résultant en un ensemble fini de seulement sept vecteurs de tension différents dans le plan complexe.

**tableauII.1** : Etats de commutation.

$S_a$	$S_b$	$S_c$	$V$
0	0	0	0
1	0	0	$\frac{2}{3} V_{dc}$
1	1	0	$\frac{V_{dc}}{3} + j \frac{\sqrt{3}}{3} V_{dc}$
0	1	0	$-\frac{V_{dc}}{3} + j \frac{\sqrt{3}}{3} V_{dc}$
0	1	1	$-\frac{2}{3} V_{dc}$
0	0	1	$-\frac{V_{dc}}{3} - j \frac{\sqrt{3}}{3} V_{dc}$
1	0	1	$\frac{V_{dc}}{3} - j \frac{\sqrt{3}}{3} V_{dc}$
1	1	1	0



**Figure II.17.9** Présentation du vecteur de tension.

## II.8 Modélisation d'onduleur de tension réseau :

La capacité  $C_{dc}$  est l'élément principal de stockage de l'énergie et l'inductance  $L_f$  est utilisée pour le couplage des deux sources de tension et le filtrage du courant généré par l'onduleur. Dans ce modèle, on considère que tous les éléments sont linéaires et invariants dans le temps. De même, les interrupteurs et les sources de tensions sont considérés comme idéaux[9].

Définitions des vecteurs:

$$v_{s(a,b,c)} = [v_{sa} v_{sb} v_{sc}]^T : \text{le vecteur des tensions de la source ;}$$

$$v_{f(a,b,c)} = [v_{fa} v_{fb} v_{fc}]^T : \text{le vecteur de tension de l'onduleur relativement au nœud N}$$

$v_{f(a,b,c)K} = [v_{faK} v_{fbK} v_{fcK}]^T$  : le vecteur des tensions de l'onduleur relativement au nœud K ;

$$i_{s(a,b,c)} = [i_{sa} i_{sb} i_{sc}]^T : \text{le vecteur des courants de source d'alimentation ;}$$

$$i_{c(a,b,c)} = [i_{ca} i_{cb} i_{cc}]^T : \text{le vecteur des courants de la charge non linéaire ;}$$

$$i_{f(a,b,c)} = [i_{fa} i_{fb} i_{fc}]^T : \text{le vecteur des courants du filtre ;}$$

$v_{dc}$  : la tension de la capacité de stockage ;

$v_{Nk}$  : la tension entre les nœuds N et K ;

En appliquant la loi des mailles, les expressions du vecteur  $v_{f(a,b,c)}$  sont définies par :

$$v_{fa} = v_{sa} - L_f \frac{di_{fa}}{dt} - Ri_{fa} = S_a V_{dc} - v_{NK} \dots \dots \dots (II.23)$$

$$v_{fb} = v_{sb} - L_f \frac{di_{fb}}{dt} - Ri_{fb} = S_b V_{dc} - v_{NK} \dots \dots \dots (II.24)$$

$$v_{fc} = v_{sc} - L_f \frac{di_{fc}}{dt} - Ri_{fc} = S_c V_{dc} - v_{NK} \dots \dots \dots (II.25)$$

$$C_{dc} \frac{dV_{dc}}{dt} = S_a i_a + S_b i_b + S_c i_c \dots \dots \dots (II.26)$$

Où  $R$  représente la résistance interne de l'inductance de couplage  $L_f$ . En faisant la somme des trois premières équations de (II.27) sachant les conditions sur le système de (II.26), il vient[8] :

$$v_a + v_b + v_c = 0 \dots \dots \dots (II.27)$$

$$v_{NK} = \frac{S_a + S_b + S_c}{3} \cdot V_{dc} \dots \dots \dots (II.28)$$

En introduisant (II.28), les équations (II.27) précédentes peuvent être mises sous forme de système d'état comme suit[9] :

$$\frac{di_{fa}}{dt} = -\frac{R}{L_f} i_{fa} - \frac{V_{dc}}{L_f} \left( S_a - \frac{S_a + S_b + S_c}{3} \right) + \frac{1}{L_f} v_{Sa}$$

$$\frac{di_{fb}}{dt} = -\frac{R}{L_f} i_{fb} - \frac{V_{dc}}{L_f} \left( S_b - \frac{S_a + S_b + S_c}{3} \right) + \frac{1}{L_f} v_{Sb}$$

$$\frac{di_{fc}}{dt} = -\frac{R}{L_f} i_{fc} - \frac{V_{dc}}{L_f} \left( S_c - \frac{S_a + S_b + S_c}{3} \right) + \frac{1}{L_f} v_{Sc}$$

$$\frac{dV_{dc}}{dt} = \frac{1}{C_{dc}} [S_a i_{fa} + S_b i_{fb} + S_c i_{fc}] \dots \dots \dots (II.29)$$

Du système d'équations (II.27) il est possible de définir de nouvelles fonctions de commande  $(u_a, u_b, u_c)$  tel que :

$$\begin{aligned} u_a &= \left( S_a - \frac{S_a + S_b + S_c}{3} \right) \\ u_b &= \left( S_b - \frac{S_a + S_b + S_c}{3} \right) \\ u_c &= \left( S_c - \frac{S_a + S_b + S_c}{3} \right) \end{aligned} (II.30)$$

Il est important de souligner que les fonctions logiques précédentes  $S_j$  représentent les tensions  $v_{fjK}$  normalisées relativement à la tension du bus continu  $V_{dc}$ , tandis que les nouvelles fonctions de commande représentent les tensions normalisées  $v_{fj}$  qui sont référées au nœud N. En examinant

l'équation précédente (II.28) il est possible d'exprimer les fonctions logiques et les fonctions de commandes sous une forme plus compacte :

$$u_{abc} = u_{Ts} S_{abc}$$

Avec :

$$\begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix}; S_{abc} = \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix}; u_{Ts} = \begin{bmatrix} \frac{2}{3} & -\frac{1}{3} & -\frac{1}{3} \\ -\frac{1}{3} & \frac{2}{3} & -\frac{1}{3} \\ -\frac{1}{3} & -\frac{1}{3} & \frac{2}{3} \end{bmatrix}$$

En considérant les huit combinaisons possibles des trois interrupteurs, le Tableau 2.2 peut être déduit.

$S_a$	$S_b$	$S_c$	$(S_a + S_b + S_c)/3$	$u_a$	$u_b$	$u_c$
0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	1/3	2/3	-1/3	-1/3
1	1	0	2/3	1/3	1/3	-2/3
0	1	0	1/3	-1/3	2/3	-1/3
0	1	1	2/3	-2/3	1/3	1/3
0	0	1	1/3	-1/3	-1/3	2/3
1	0	1	2/3	1/3	-2/3	1/3
1	1	1	1	0	0	0

**Tableau II.2 :** Les fonctions de commande dans le repère (a,b,c) .

$$x_{\alpha\beta} = \alpha\beta T_{abc} x_{abc}$$

$$x_{abc} = abc T_{\alpha\beta} x_{\alpha\beta}$$

Avec :

$$\alpha\beta T_{abc} = k \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix}, \quad abc T_{\alpha\beta} = \frac{2}{3k} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix}$$

$$\frac{di_{f\alpha}}{dt} = -\frac{R}{L_f} i_{f\alpha} - \frac{V_{dc}}{L_f} u\alpha + \frac{1}{L_f} v_{s\alpha}$$

$$\frac{di_{f\beta}}{dt} = -\frac{R}{L_f} i_{f\beta} - \frac{V_{dc}}{L_f} u\beta + \frac{1}{L_f} v_{s\beta}$$

## **II.9 Conclusion :**

Dans ce chapitre, une description et modélisation explicite des différents composants de la chaîne de conversion photovoltaïque raccordé au réseau électrique ont été décrites, à citer : le générateur photovoltaïque, ainsi que les convertisseurs introduits.

## 2.10 Bibliographies

- [1]HARAOUBIA Mohamed, «Etude simulation d'un générateur de panneau photovoltaïque», THÈSE MASTER, UNIVERSITE BADJI MOKHTAR ANNABA, 2019.
- [2]: R. Chenni, M. Makhlouf, T. Kerbache, A. Bouzid, "A detailed modeling method for photovoltaic cells", Science Direct, Energy 32, 2007.
- [3]sahli Abdeslam, «Filtrage actif et contrôle de puissances :application aux systèmes photovoltaïquesinterconnectés au réseau» thèse magister, UNIVERSITE FERHAT ABBAS – SETIF ALGERIE 2012
- [5]:A. Menadi, S. Abdeddaim, A. Betka and M. T. Benchouia, "Real Time Implementation of A Fuzzy Logic Based Mppt Controller for Grid Connected Photovoltaic System," International Journal of Renewable Energy Research (IJRER), vol. 5, pp. 236-244,
- [6]: A. Aziz, "Propriétés Electriques des Composants Electroniques Minéraux et Organiques, Conception et Modélisation d'une Chaîne Photovoltaïque pour une Meilleure Exploitation de l'Energie Solaire", Doctorat en Sciences (Electronique), Université Mohamed Premier, N°86/06, 2006, Oujda, Maroc, Université Paul Sabatier, N°06234, Toulouse, France, 2006.
- [7] H. LEQUEU – [DIV435] – Fichier : IUT-EDP-9, 2004/2005.
- [8] Abdelmadjid CHAOUI, "FILTRAGE ACTIF TRIPHASE POUR CHARGES NON LINEAIRES", Thèse de doctorat, L'UNIVERSITÉ DE SETIF, 05-10-2010
- [9]S. Castellan, S. Quaia, S. Roitti, and G. Sulligoi, "Power electronic conditioning systems for industrial photovoltaic fields: Centralized or string inverters?," International Conference in Clean Electrical Power, ICCEP'07, pp. 208-214, 2007.
- [10]A. F. Boehinger, "Self-adaptive DC converter for solar spacecraft power supply", IEEE Transactions On Aerospace and Electronic Systems, pp. 102-111, 1968
- [11]AymenBlorfan, « contribution à l'étude de l'association d'une source photovoltaïque et d'un filtre actif» thèse pour obtenir le grade de docteur de l'Université de Haute-Alasace
- [12] M. PETIBON Stéphane, «Nouvelles architectures distribuées de gestion et de conversion de l'énergie pour

# Chapitre III

*Fonctionnement d'une chaîne de conversion photovoltaïque raccordé au réseau électrique*

### **III.1 Introduction :**

Dans ce chapitre nous avons faire l'étude de la commande perturbe and observe P&O pour chercher le point où la puissance du générateur photovoltaïque est maximale et l'étude de la commande prédictive à états finis pour le contrôle de l'onduleur dans l'objectif d'injecté la puissance maximale générée par l'algorithme P&O dans le réseau électrique.

Nous avons utilisé MATLAB pour simuler la chaîne de conversion photovoltaïque.

### **III.2 Principe de la recherche du point de puissance maximal:**

#### **III.2.1 Généralités:**

Des lois de commandes spécifiques existent pour amener des dispositifs à fonctionner à des points maximums de leurs caractéristiques sans qu'a priori ces points soient connus à l'avance, ni sans que l'on sache à quel moment ils ont n'éte modifiés ni qu'elles sont les raisons de ce changement. Pour le cas des sources énergétiques, cela se traduit par des points de puissance maximum. Ce type de commande est souvent nommé dans la littérature (Recherche du Point de Puissance Maximum, MPPT). Le principe de ces commandes est d'effectuer une recherche du point de puissance maximal (PPM) tout en assurant une parfaite adaptation entre le générateur et sa charge de façon à transférer le maximum de puissance [1]. La figure (3.1) représente une chaîne élémentaire de conversion photovoltaïque élémentaire associée à une commande MPPT.

Cette méthode est donc basée sur le contrôle de la puissance instantanée délivrée par le champ de modules PV en fonction de variations de la tension continue aux bornes du champ PV[8].

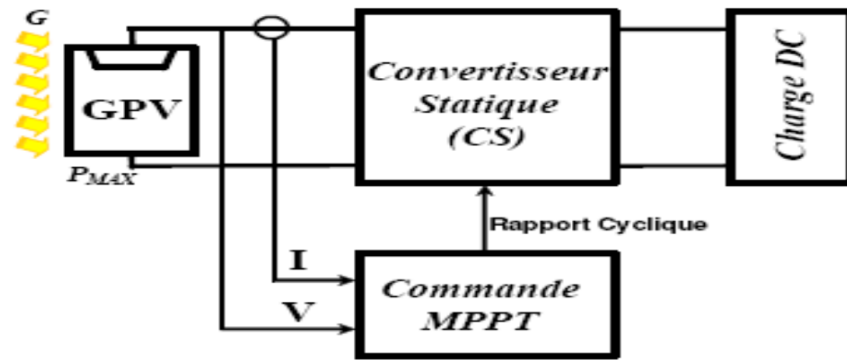
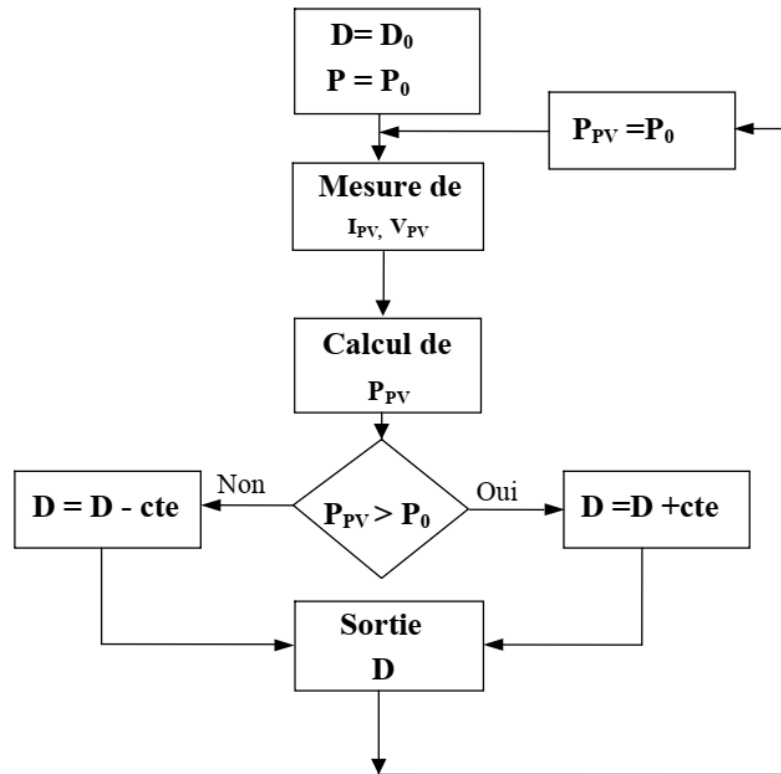


Figure 3.1 Chaîne élémentaire de conversion photovoltaïque avec CS contrôlé par une commande MPPT sur charge DC

### III.2.2 Les premiers types de commande MPPT :

L'algorithme mis en œuvre dans les premières commandes MPPT était relativement simple. En effet, les capacités des microcontrôleurs disponibles à l'époque étaient faibles et les applications, surtout destinées au spatial avaient beaucoup moins de contraintes en variation de température et d'éclairement que les applications terrestres. Appliqué initialement au photovoltaïque, son principe a d'abord été décrit par A.F. Boehringer [2]. Cette commande est basée sur un algorithme de contrôle adaptatif, permettant de maintenir le système à son point de puissance maximum (PPM). Ce dernier est décrit en figure 2 et peut être implanté entièrement en numérique [1].



**Figure III.2 :** Principe de la première commande MPPT numérique [11].

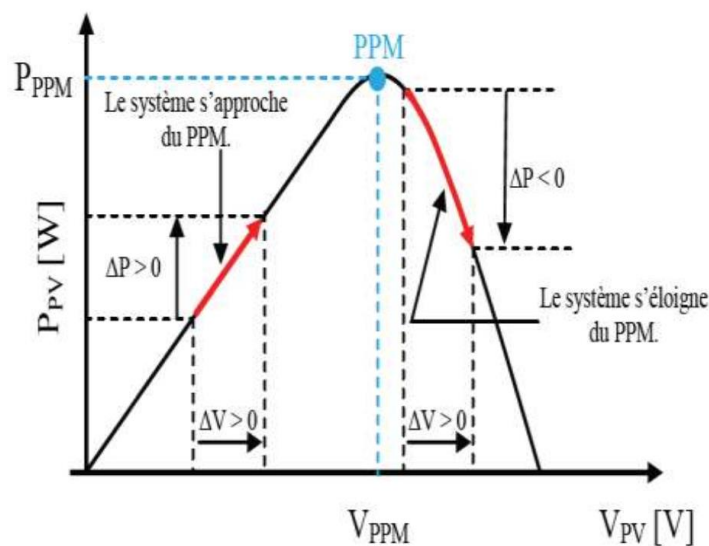
Il consiste à calculer la puissance à l'instant  $t_i$  à partir des mesures de  $I_{PV}$  et  $V_{PV}$ , et de la comparer à celle stockée en mémoire, correspondant à l'instant  $t_{i-1}$ . De là, un nouveau rapport cyclique  $\alpha$  est calculé et est appliqué au convertisseur statique. Ce principe est toujours valable du point de vue théorique et appliqué de nos jours sur des algorithmes numériques plus performants [8].

### III.2.3 Principe des commandes "Perturb and Observe" (P&O):

Le principe des commandes MPPT de type P&O consiste à perturber la tension  $V_{PV}$  d'une faible amplitude autour de sa valeur initiale et d'analyser le comportement de la variation de puissance  $P_{pv}$  qui en résulte ainsi, comme l'illustre la figure 4.3, on peut déduire que si une incrémentation positive de la tension  $V_{PV}$  engendre un accroissement de la puissance  $P_{pv}$ , cela signifie que le point de fonctionnement se trouve à gauche du PPM. Si au contraire, la puissance décroît, cela implique que le système a dépassé le PPM [7]. Un raisonnement similaire peut être effectué lorsque la tension décroît. À partir de ces diverses analyses sur les

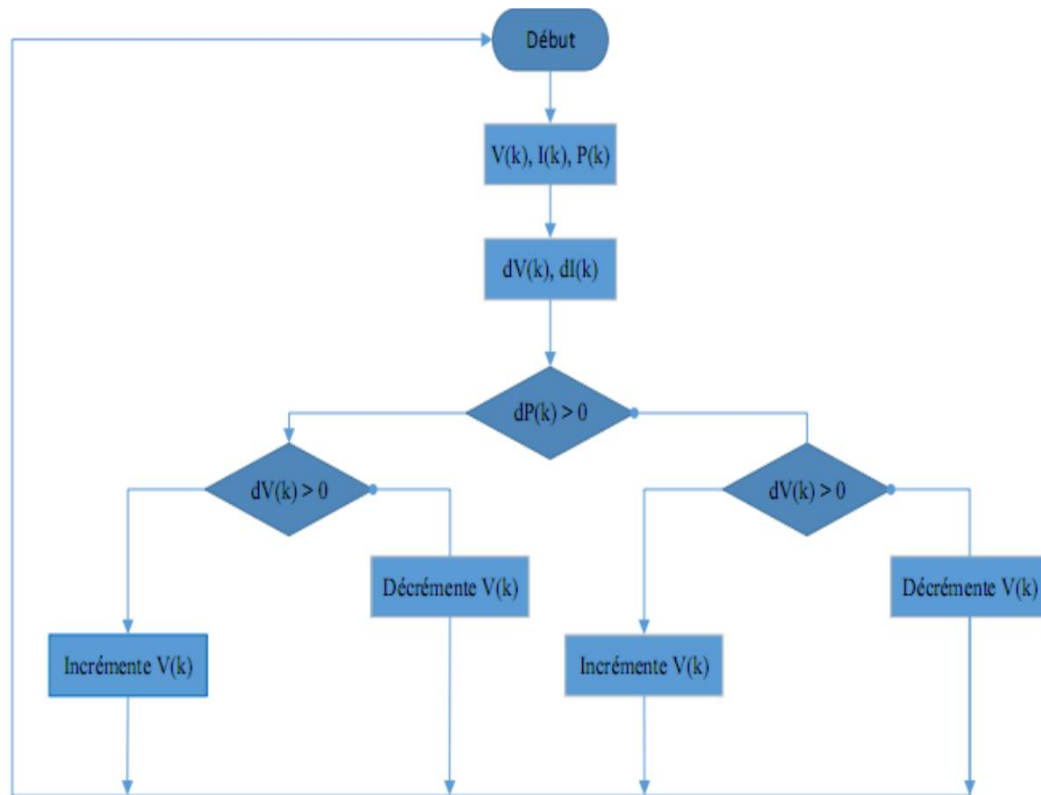
conséquences d'une variation de tension sur la caractéristique  $P_{PV}$  ( $V_{PV}$ ), il est alors facile de situer le point de fonctionnement par rapport au PPM, et de faire alors facile de situer le point de fonctionnement par rapport au PPM, et de faire converger ce dernier vers le maximum de puissance à travers un ordre de commande approprié[3].

En résumé, si suite à une perturbation de tension, la puissance  $PPV$  augmente, la direction de perturbation est maintenue. Dans le cas contraire, elle est inversée pour reprendre la convergence vers le nouveau PPM. La figure 3.4 représente l'algorithme classique associé à une commande MPPT de type (P&O), où l'évolution de la puissance est analysée après [3].



**Figure III.3 :** Schéma de principe de la commande MPPT de type P&O

La figure 3.4 représente l'algorithme classique associé à une commande MPPT de type P&O, où l'évolution de la puissance est analysée après chaque perturbation de tension.



**Figure III.3 :** Organigramme de la méthode P&O

### III.3 Philosophie de la commande prédictive à états finis (FS-MPC) :

La stratégie de la commande prédictive est très similaire à la stratégie utilisée pour la conduite automobile. Le conducteur connaît la trajectoire de référence désirée (le tracé de la route) sur un horizon de commande fini (celui du son champ visuel), et en prenant en compte les caractéristiques de la voiture (modèle mental du comportement du véhicule), il décide quelles actions (accélérer, freiner ou tourner le volant) il faut réaliser afin de suivre la trajectoire désirée.

Seule la première action de conduite est exécutée à chaque instant, et la procédure est répétée à nouveau pour les prochaines actions.

Cette conception consiste à prendre en compte, à l'instant présent, le comportement futur, en utilisant explicitement un modèle numérique du système afin de prédire la sortie dans le futur sur un horizon fini. Cependant, il n'existe pas une stratégie unique mais plutôt tout un

ensemble de méthodes de commande prédictive, assez similaires, bâties autour de principes communs, mais présentant néanmoins quelques différences dans l'interprétation des concepts clés.

Une des richesses de ces méthodes provient du fait que, pour une consigne connue ou pré calculée (au moins sur un certain horizon), il est ainsi possible d'exploiter pleinement les informations de trajectoires prédéfinies situées dans le futur, puisque le but de la stratégie prédictive est de faire coïncider la sortie du processus avec cette consigne dans le futur, sur un horizon fini, en accord avec le diagramme temporel de la Figure 5 c'est pourquoi cette méthode apparaît tout indiquée dans les problèmes de poursuite et plus spécialement de suivi de trajectoire. C'est le cas de nombreux servomécanismes et notamment de la commande d'axes en machine-outil ou en robotique, domaines où les trajectoires à suivre sont parfaitement connues[4].

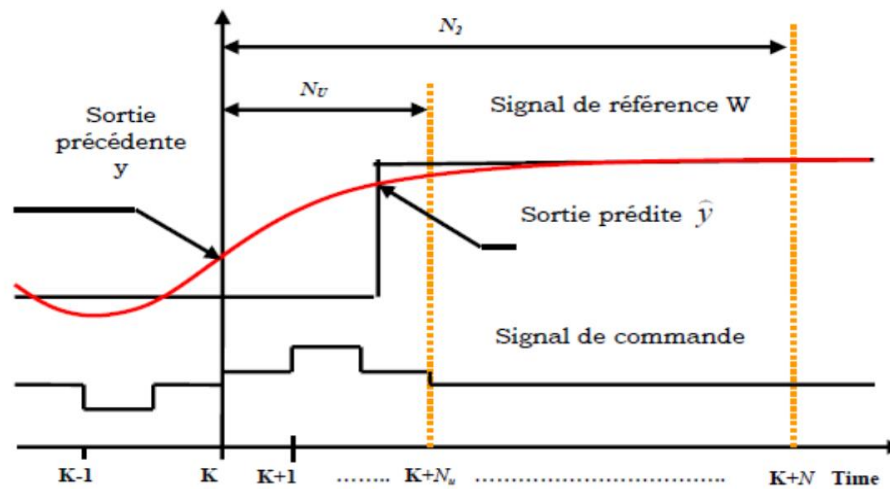


Figure III.4 : Schéma de Principe de la commande prédictive

### III.4 Commande FS-MPC de l'onduleur raccorder au réseau électrique :

#### III.4.1 Modèle continu de la liaison au réseau :

Le modèle de la liaison au réseau en fonction de composante directes'exprime comme suit :

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{-R_L}{L} i_L(t) - \frac{V_C(t)}{L} + \frac{V_C(t)}{L} u(t) + \frac{V_{in}}{L} \dots \dots \dots (III.1)$$

$$\frac{dV_C(t)}{dt} = \frac{1}{C_f} i_L(t) - \frac{1}{C_f} i_L(t) u(t) - \frac{1}{RC_f} V_C(t) \dots \dots \dots (III.2)$$

$$u(t) = \begin{cases} 1 & S1 = 1 \\ 0 & S1 = 0, \dots \dots \dots \end{cases} (III.3)$$

S1 représente l'interrupteur contrôlable, *DI* pour la diode, *L* pour l'inductance avec *RL* comme résistance interne et *C<sub>f</sub>* pour le condensateur de sortie. Du point de vue de la stratégie de contrôle, le principal défi dans la gestion du flux de puissance entre le côté basse tension et le côté haute tension est de fournir une tension constante *V<sub>C</sub>* lorsqu'une perturbation de charge apparaît aux bornes de sortie[5].

Où *u(t)* est l'entrée du système, qui est liée aux états du commutateur *S1*. Dans ce cas, *S1* = 1 signifie que le commutateur *S1* est ON et *S1* = 0 signifie que le commutateur *S1* est OFF.

#### III.4.2 Modèle discret de la liaison au réseau :

En appliquant la méthode d'approximation d'Euler décrite précédemment à l'équation, on obtient le modèle discret suivant :[5]

$$i_L(k + 1) = \left(1 - \frac{TR_L}{L}\right) i_L(K) + (u(K) - 1) \frac{T}{L} V_C(K) + \frac{T}{L} V_{in} \dots \dots \dots (III.4)$$

$$V_C(k + 1) = \frac{T}{C_f} i_L(k) + \left(1 - \frac{T}{C_f R}\right) V_C(k) - \frac{T}{C_f} i_L(k) u(k) \dots \dots \dots (III.5)$$

$$u(k) = \begin{cases} 1 & S1 = 1 \\ 0 & S1 = 0, \dots \dots \dots \end{cases} (III.6)$$

*T* est le temps d'échantillonnage.

#### III.4.3 Fonction du coût pour le contrôle de l'onduleur :

L'objectif du schéma de contrôle de courant est de minimiser l'erreur entre les courants mesurés et les valeurs de référence. Cette exigence peut être écrite sous la forme d'une

fonction de coût. La fonction de coût est exprimée en coordonnées orthogonales et mesure l'erreur entre les références et les courants prédits :

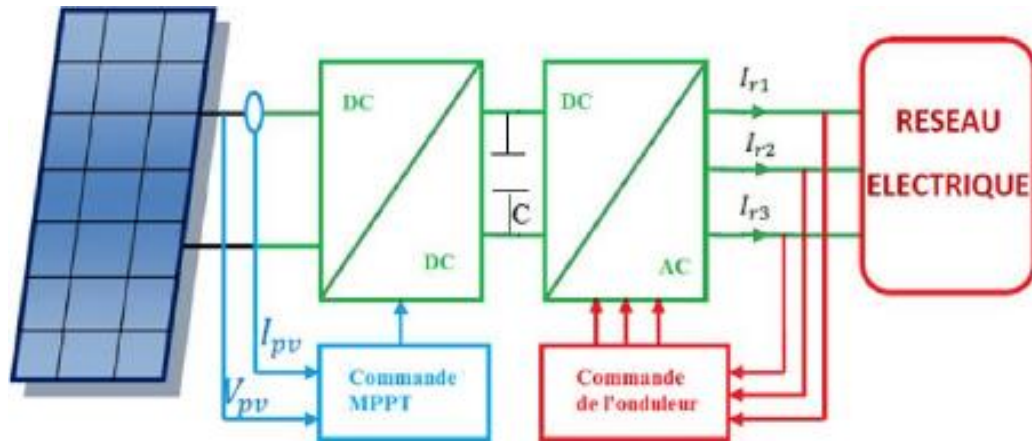
$$g = |i_{\alpha}^*(k+1) - i_{\alpha}^p(k+1)| + |i_{\beta}^*(k+1) - i_{\beta}^p(k+1)| \dots \dots \dots (III.7)$$

Où  $i_{\alpha}^p(k+1)$  et  $i_{\beta}^p(k+1)$  sont les parties réelle et imaginaire du vecteur courant de charge prédit  $i^p(k+1)$ , pour un vecteur tension donnée. Cette prédiction est obtenue à l'aide du modèle de charge. Les courants de référence  $i_{\alpha}^*(k+1)$  et  $i_{\beta}^*(k+1)$  sont les parties réelle et imaginaire du vecteur courant de référence  $i^*(k+1)$ . Pour simplifier, nous supposons que ce courant de référence ne change pas suffisamment dans un intervalle d'échantillonnage, nous considérerons donc  $i^*(k+1) = i^*(k)$ . Cette hypothèse peut introduire un retard d'un échantillon dans le suivi de référence, ce qui n'est pas un problème si une fréquence d'échantillonnage élevée est considérée [6].

### III.5 Simulation du system photovoltaïque avec hacheur commandé en MPPT :

#### III.5.1 Schéma du montage

Il est composé en fait de deux étages de conversion en cascade, permettant un transfert adéquat de l'énergie extraite du générateur PV au réseau BT. Le premier étage dit « continu », se compose de deux modules PV connecté en série et un convertisseur DC-DC boost, qui élève la tension optimale du générateur à une tension convenable du bus continu, servent ainsi comme un adaptateur d'impédance. Le deuxième étage dit « alternatif », se compose à son tour, d'un onduleur de tension connecté au réseau.



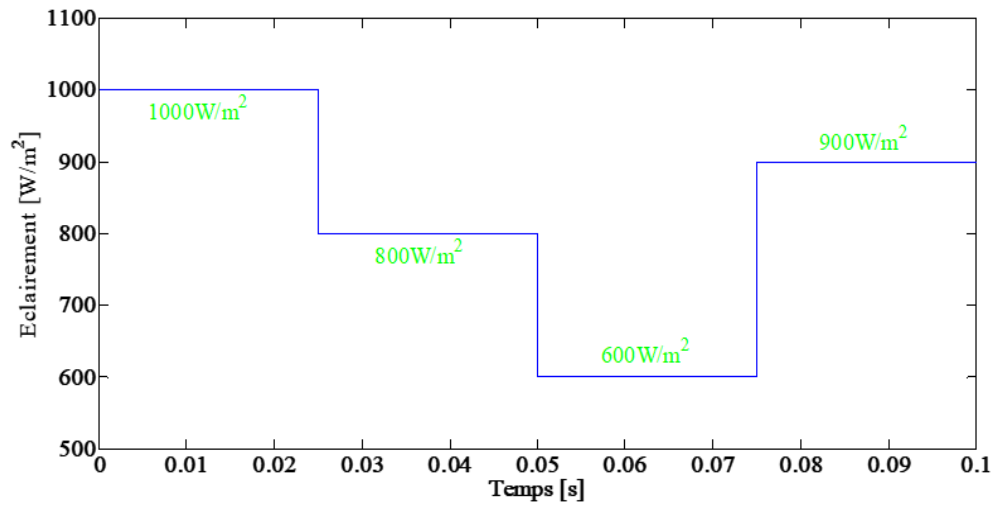
**Figure III.5:** Schéma du Montage du système photovoltaïque connecté au réseau.

### III.5.2 Résultat de simulation

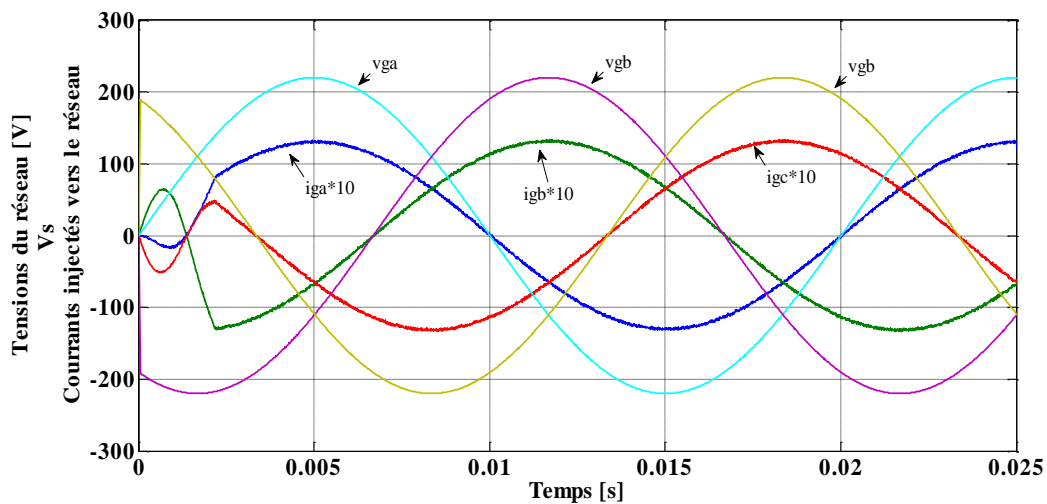
Les résultats de la simulation à l'aide de Matlab/Simulink pour la topologie modifiée avec FS-MPC sont fournis pour montrer l'efficacité et les performances du contrôle.

### III.5.3 l'efficacité du système en termes de changement de changement d'irradiance :

Dans cette étude, nous effectuons des simulations à l'aide du programme Matlab pour étudier la vitesse de réponse du changement dans le système lorsqu'un changement rapide d'irradiance se produit ( $1000\text{W/m}^2 \rightarrow 800\text{W/m}^2 \rightarrow 600\text{W/m}^2 \rightarrow 900\text{W/m}^2$ ) avec une température de  $25^\circ\text{C}$ .

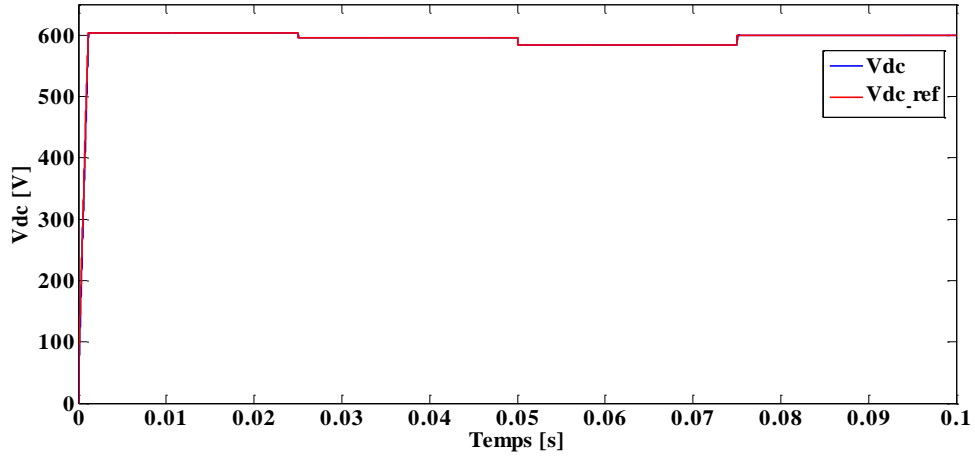


**Figure III.6 :** Profile de variation d'éclairement (25°C).

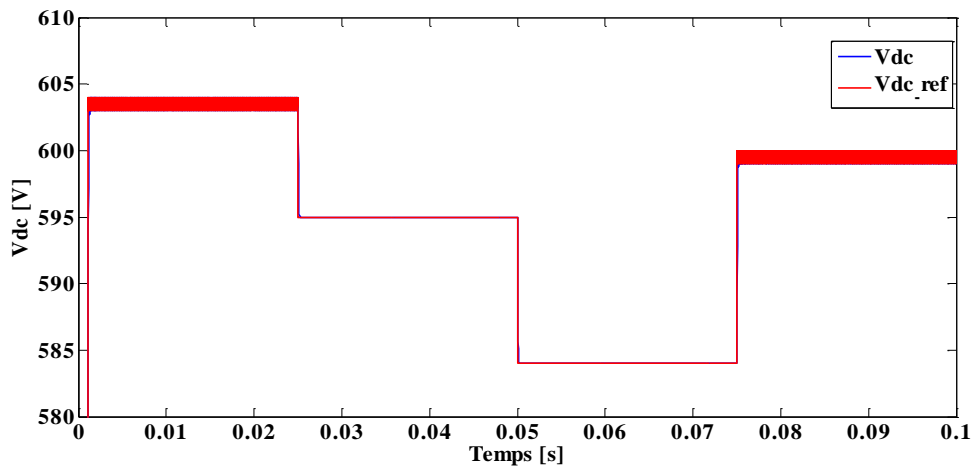


**Figure III.7 :** courants injectés dans le réseau électrique (en phase)

La figure III.7 montre la réponse du système lorsqu'un changement rapide d'irradiance se produit ( $1000\text{W/m}^2 \rightarrow 800\text{W/m}^2 \rightarrow 600\text{W/m}^2 \rightarrow 900\text{W/m}^2$ ) avec une température de  $25^\circ\text{C}$ . Peut voir que le courant injectés dans le réseau électrique variés suit la variation d'irradiance et il est en phase avec la tension du réseau.



**Figure III.9 :** Réponse de la tension de bus continue en fonction de temps et la variation d'éclairement



**Figure III.10 :** Zoom sur la réponse de bus continue  $V_{dc}$

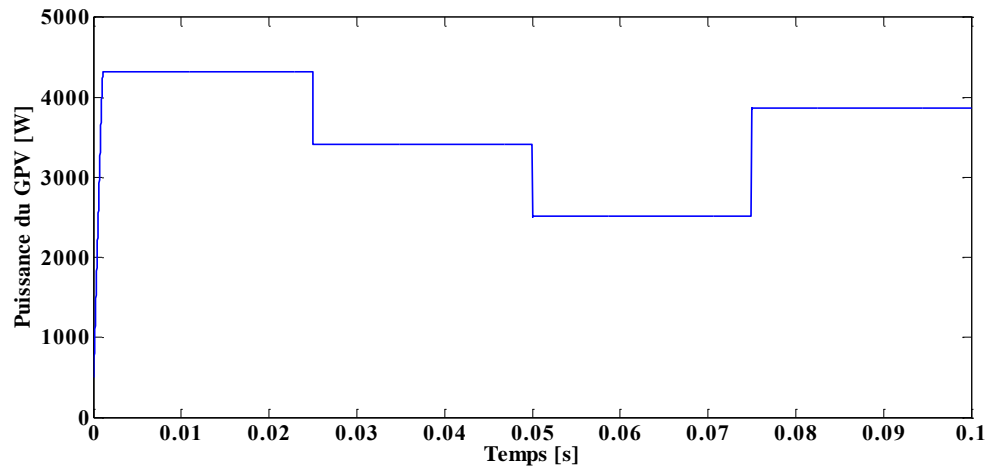


Figure III.11 : Puissance de sortie du GPV

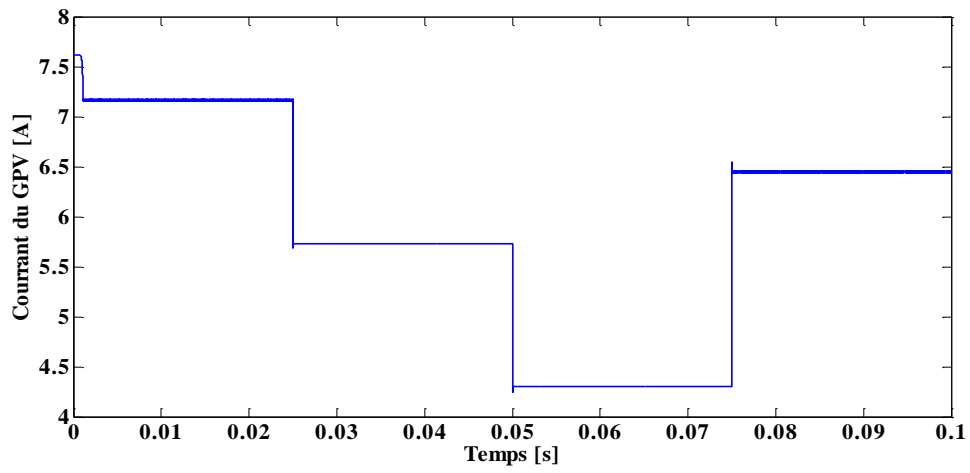


Figure III.12 : Courant de sortie de GPV

### III.5.2 Test d'efficacité du système en termes de changement de température :

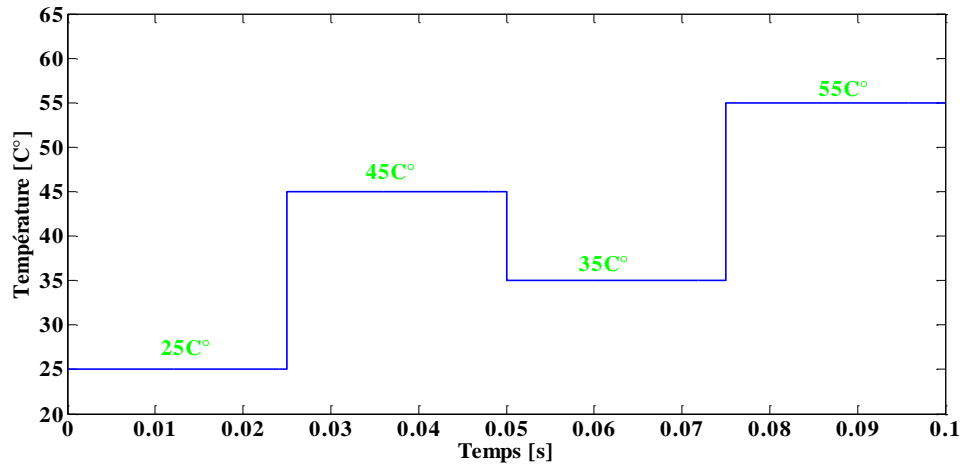


Figure III.13 : Profile de variation dans la température.

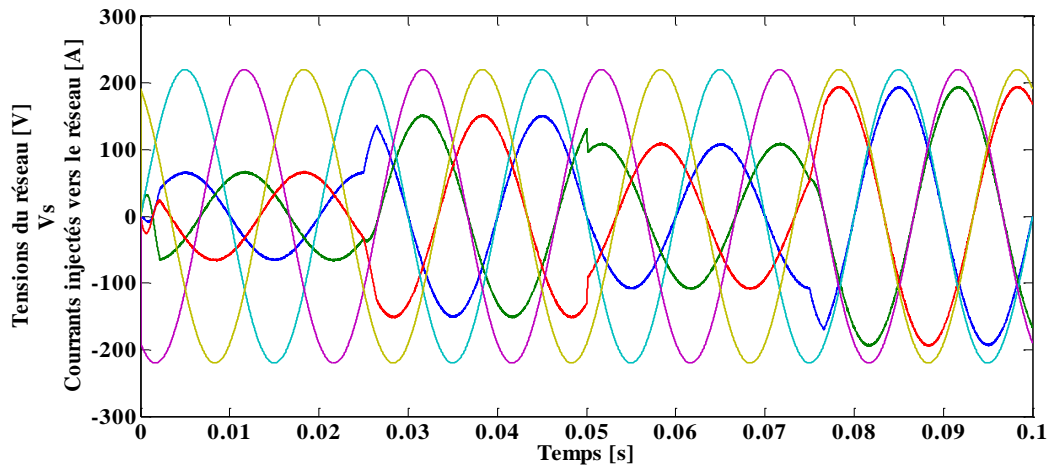


Figure III.14 : Courants injectés dans le réseau électrique

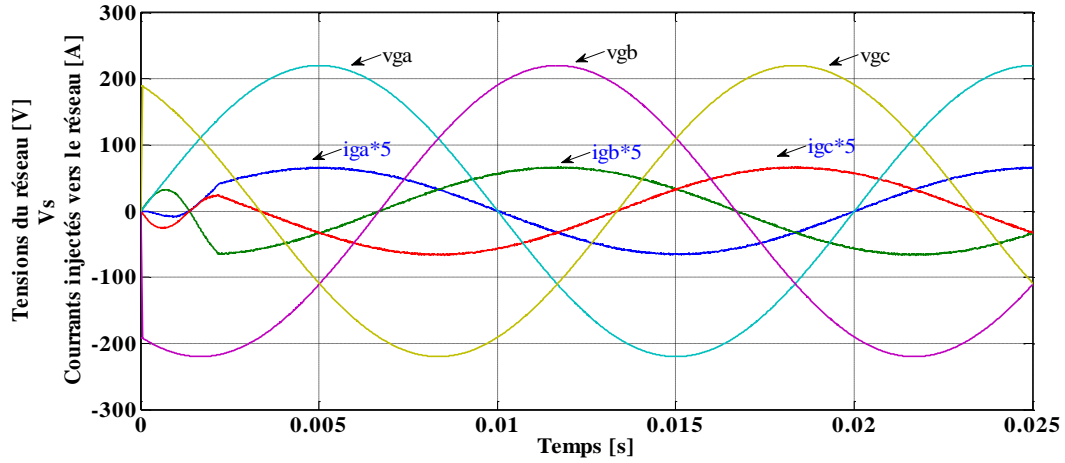


Figure III.15 : Zoom sur les courants injectés dans le réseau électrique

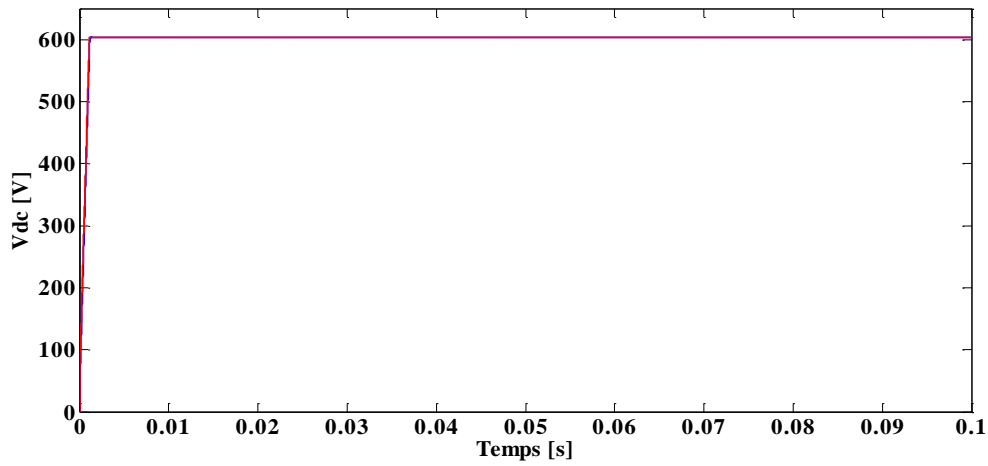


Figure III.16 : Réponse du bus continue

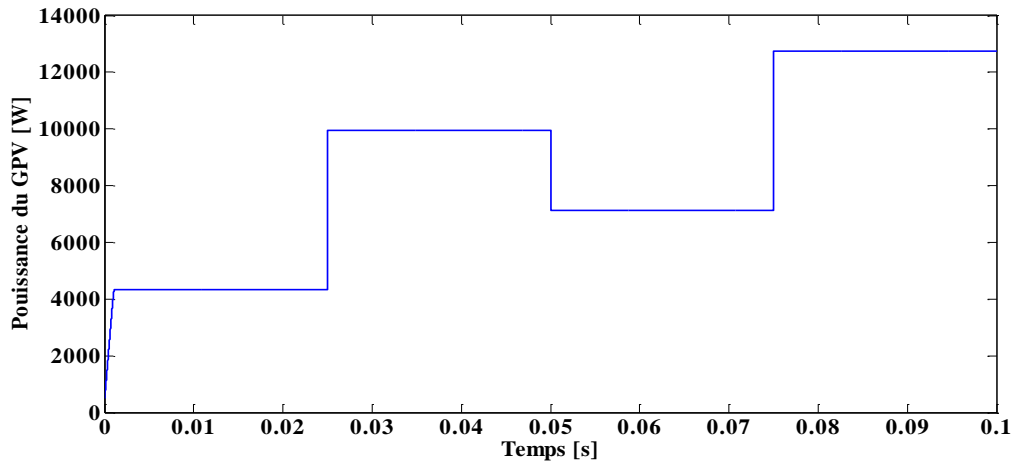


Figure III.17 : Puissance du GPV

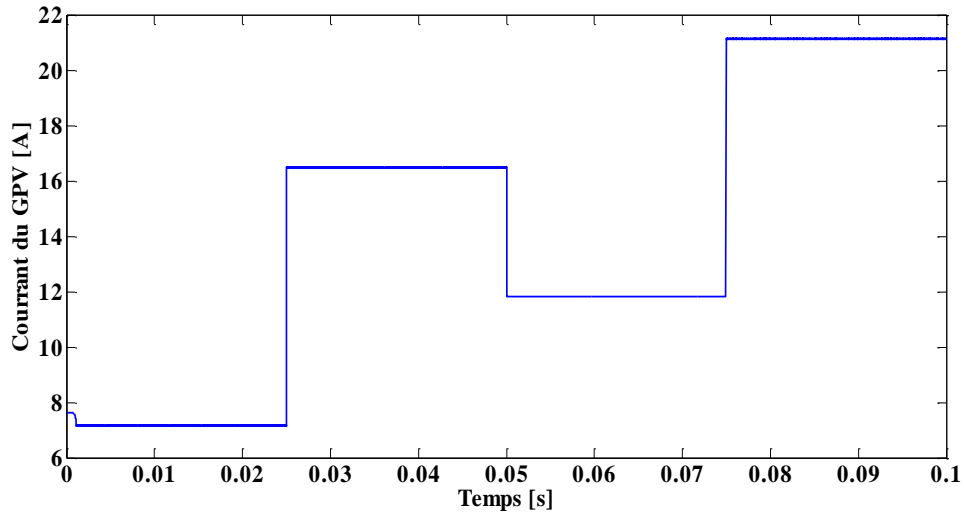


Figure III.18 : Courant du GPV

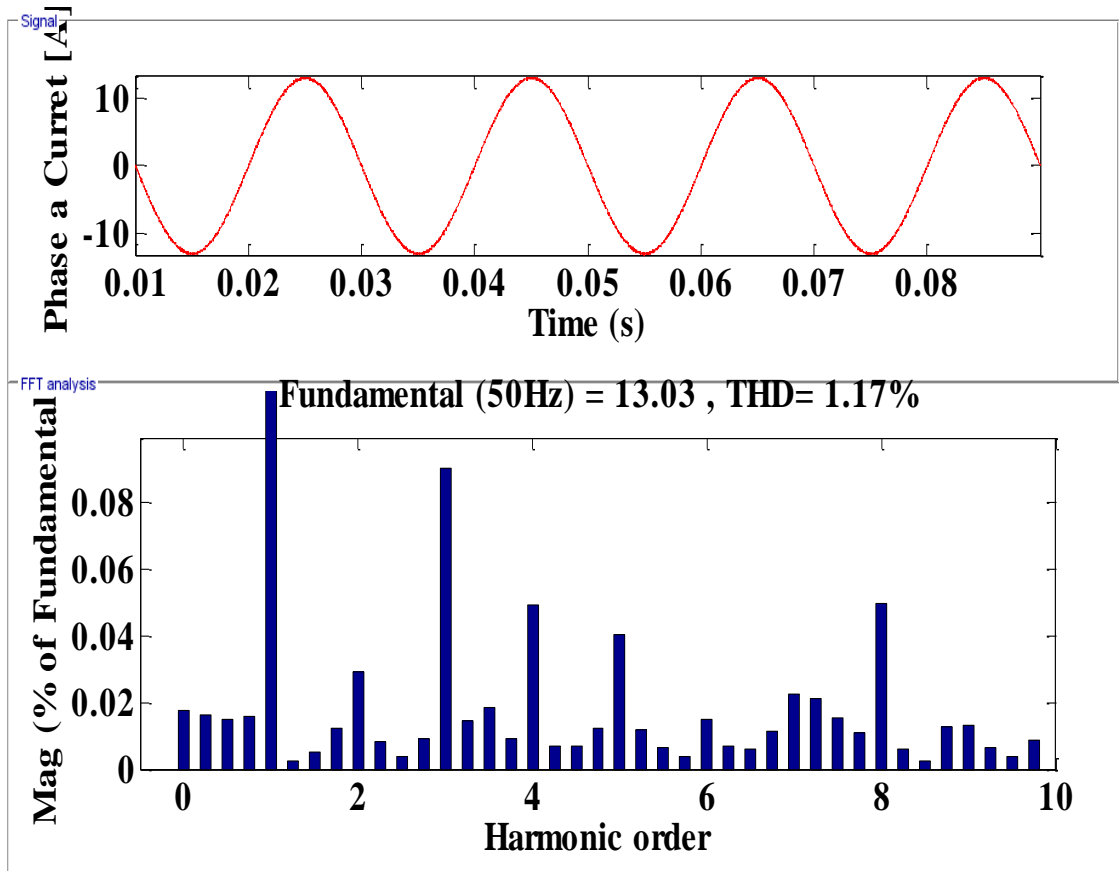


Figure III.19 : Spectre d'harmonique de courant.

### **III.6 Conclusion :**

Une stratégie de contrôle améliorée est proposée pour contrôler efficacement une chaîne de conversion photovoltaïque connectée au réseau. La méthode utilise d'abord un contrôle prédictif associé à un onduleur triphasé à deux niveaux. L'approche prédictive utilise la nature discrète du convertisseur de puissance et génère des courants de réseau sinusoïdaux avec un facteur de puissance unitaire côté réseau sans aucun type de contrôleurs ou de modulateurs.

Les résultats montrent que le contrôle prédictif est une méthode très puissante car il offre une bonne propriété de suivi et montre de hautes performances. La méthode est un outil attrayant avec une approche conceptuellement différente de la modulation PWM et SVM pour contrôler les convertisseurs de puissance.

### III.7 Bibliographies

- [1] Cédric CABAL, "Optimisation énergétique de l'étage d'adaptation électronique dédié à la conversion photovoltaïque", Thèse de doctorat soutenue le 15 décembre 2008.
- [2] A. F. Boehinger, "Self-adaptive DC converter for solar spacecraft power supply", IEEE Transactions On Aerospace and Electronic Systems, pp. 102-111, 1968.
- [3] HARA OUBIA Mohamed, «Etude simulation d'un générateur de panneau photovoltaïque», THÈSE MASTER, UNIVERSITE BADJI MOKHTAR ANNABA, 2019.
- [4] KessamAbderahim, «commande prédictive de l'association d'une source photovoltaïque connectée au réseau électrique et d'un filtre actif parallèle», THÈSE MASTER, UNIVERSITE LARBI BEN M'HIDI DE OUM EL BOUAGHI, Juin 2018.
- [5] Long Cheng, Pablo Acuna, Ricardo P. Aguilera, Mihai Ciobotaru, «Model predictive control for DC-DC boost converters with constant switching frequency», THÈSE Doctorat, 2016 IEEE 2nd Annual Southern Power Electronics Conference (SPEC), December 2016.
- [6] Jose Rodriguez and Patricio Cortes, «PREDICTIVE CONTROL OF POWER CONVERTERS AND ELECTRICAL DRIVES», THÈSE MASTER, Universidad Tecnica Federico Santa Maria, Valparaiso, Chile, 2012.
- [7] Akihiro Oi, "design and simulation of photovoltaic water pumping system", faculty of California polytechnic state university, 2005
- [8] **M. Boukli Hacene Omar**, « conception et réalisation d'un générateur photovoltaïque muni d'un convertisseur MPPT pour une meilleure gestion énergétique » thèse magister, Université de Tlemcen 2010.
- [9] **D. Sera, L. Mathe, T. Kerekes, S. V. Spataru, and R. Teodorescu**, "On the Perturb-and-Observe and Incremental Conductance MPPT Methods for PV Systems," IEEE J. Photovoltaic
- [10] **D. Sera, L. Mathe, T. Kerekes, S. V. Spataru, and R. Teodorescu**, "On the Perturb-and-Observe and Incremental Conductance MPPT Methods for PV Systems," IEEE J. Photovo

[11] **Boualem BOUKEZATA, Abdelmadjid CHAOUI, Jean Paul GAUBERT et Mabrouk HACHEMI**, « Système solaire photovoltaïque connecté au réseau électrique et associé à un filtre actif parallèle».article, Université de Sétif 1, Algérie, Université de Poitiers, Franceltaic, Jul. 2013.

# Conclusion générale

## Conclusion générale

Les travaux présentés dans cette mémoire sont focalisés sur l'optimisation de la production d'énergie photovoltaïque ainsi que son transfert vers une charge avec le moins de pertes possibles en utilisant des algorithmes de contrôle développés et proposés basés sur FS-MPC.

Dans un premier temps, nous avons présenté des généralités sur les systèmes photovoltaïques nous avons démontré le fonctionnement de la cellule photovoltaïque. Ensuite, nous avons présenté la structure des panneaux photovoltaïques plus les différents types de systèmes et avantages et des inconvénients de systèmes photovoltaïques.

Dans un deuxième temps, nous avons présenté la modélisation mathématique de la cellule et le générateur photovoltaïque et d'onduleur de tension et étudié aussi l'influence de la température et de l'éclairement sur l'énergie produite par la cellule PV, ainsi l'influence de l'association de cellule (série, parallèle et série / parallèle) sur l'énergie produite et présenté le circuit électrique de l'hacheur Boost qu'il est utilisé dans cette mémoire.

Une application très intéressante dans le domaine de l'énergie solaire, c'est l'intégration de la puissance générée à partir du générateur photovoltaïque dans un réseau triphasé, il représente un exemple d'actualité et l'un des plus importants domaines de recherche du moment. Dans ce système nous avons choisi la technique de commandes "Perturbe and Observe" (P&O) pour capter la puissance maximale du GPV et la technique de commande FS-MPC pour but d'injecté la puissance maximale vers le réseau électrique d'une façon optimale.

*Annex*

*Annex (01)*

Partie de système	Les éléments	Les valeurs
Les modules photovoltaïques	$N_s^M$	5
	$N_p^M$	6
	$V_{oc}$	21.1V
	$I_{sc}$	3.81A
Paramètres du hacheur	Fréquence de commutation	50kHz
	Capacité d'entrée $C_e$	500 $\mu$ f
	Inductance $L$	1mH
Capacité du bus continu	$C_{dc}$	500 $\mu$ f
	Tension DC-link de référence	400V
Réseau monophasé	La tension de réseau $v_g$	220.sin( $\omega.t$ )
	L'inductance de réseau $l_g$	50mH
	La résistance de réseau $r_g$ .	0.152 $\Omega$
	La fréquence de réseau $f$	50Hz



## Résumé

Ce travail présente le comportement d'un système de génération photovoltaïque connecté au réseau électrique. Notre objectif c'est l'étude de l'injection de puissance maximale générée par le GPV tout en assurant une bonne qualité d'énergie à travers un système de conversion en deux étages, composées d'un convertisseur continu-continu (Boost) avec un contrôleur MPPT appliqué pour la poursuite du point de puissance maximale du système PV dans des conditions variables d'éclairement et Température contrôlé par la commande prédictive directe des courants. Résultats ont été fournis à l'aide obtenus par simulation effectuée à l'aide du logiciel Matlab.

**Mots clefs:** photovoltaïque, MPPT, Boost, Commande prédictive.

## Summary

This work presents the behavior of a photovoltaic generation system connected to the electricity grid. Our objective is the study of the maximum power injection generated by the GPV while ensuring good energy quality through a two-stage conversion system, composed of a continuous-continuous converter (Boost) with an MPPT controller applied for the pursuit of the maximum power point of the PV system under variable conditions of illumination and Temperature controlled by the direct predictive control of currents. Results were provided using simulation using Matlab software.

**Keywords:** photovoltaic, MPPT, Boost, Predictive control.