

UNIVERSITE IBN-KHALDOUN TIARET

FACULTE DES SCIENCES APPLIQUEES  
DEPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE



MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

Pour l'obtention du diplôme de Master

Domaine : Sciences et Technologie

Filière : Génie Electrique

Spécialité : Commande Des Systèmes Electriques

THEME

**Intégration de l'énergie photovoltaïque dans le  
réseau électrique à basse tension via l'onduleur à  
trois niveaux**

**Préparé par :**

Mr. KIDOUH Mustapha.

Mlle. ZERGAOUI Azza.

**Devant les Jurys :**

**Nom et Prénoms**

Mr. ALLAOUH Tayeb.

Mr. KOUADRIA Selman.

Mr. BELABBES Belkacem.

**Grade**

Professeur

MAB

MAA

**Qualité**

Président

Examineur

Rapporteur



## Dédicaces

*Nous dédions ce humble travail avec grand amour ,sincérité, fierté:*

*A nos chères parents, source de tendresse noblesse et affection .*

*A nos frères et nos sœurs en témoignage de la fraternité avec nos  
souhails de bonheur, de santé et de succès.*

*A tout les membres de nos familles,*

*A tous nos amis ,tous nos professeurs  
et à tout qui compulse ce modeste travail.*

*Mustapha et Azza*

## *Remerciements*

*Louange à ALLAH, notre grand seigneur, de nous avoir éclairé le chemin du savoir et de nous avoir donné la bonne volonté et la patience pour l'achèvement de ce travail.*

*Que le salut d'ALLAH soit sur son prophète MOHAMMED, notre éducateur et guide du bon chemin.*

*Nous remercions vivement Monsieur BELABBASBelkacem, pour L'honneur qu'il nous fait en encadrement, et son entière disponibilité durant toutes les étapes de notre projet.*

*Ensuite nous adressons nos vifs remerciements et notre sincère gratitude au Monsieur ALLAOUI Tayeb de nous avoir fait l'honneur de présider le jury de ce mémoire.*

*Nos remerciements vont aussi à Monsieur KOUADRIASelman pour avoir accepté la tâche d'examiner ce mémoire et pour le jugement scientifique qu'il a bien voulu y porter.*

*Un grand Merci aux enseignants ainsi que l'administration de génie électrique.*

*En fin nous adressons nos remerciements à tous ceux qui ont contribué par leurs conseils ou leurs encouragements à l'aboutissement de ce travail.*

## sommaire

Introduction générale.....1

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

I.1 Introduction.....2

I.2 Energie solaire .....3

I.2.1 Technologies solaires.....3

I.2.2 Applications techniques de l'énergie solaire .....4

I.3 Photovoltaïque (PV).....4

I.3.1 Effet photoélectrique.....4

I.3.2 Cellules solaires .....5

I.3.3 Module photovoltaïque .....5

I.3.3.1 Classification des cellules solaires.....6

I.3.3.2 Les types de cellules selon le type de cristal.....6

I.3.4 Panneau solaire .....7

I.4 Avantages et les inconvénients de l'énergie photovoltaïque [12] .....8

I.4.1 Avantages .....8

I.5 Modélisation d'une cellule photovoltaïque.....9

I.5.1 Cellule photovoltaïque idéal.....9

I.5.2 Cellule photovoltaïque réel .....10

I.6 Regroupement des cellules .....14

I.6.1 Regroupement en série .....14

I.6.2 Regroupement en parallèle.....15

I.7 convertisseur DC-DC (Hacheur Boost) .....15

I.8 Commande MPPT.....16

I.9 Méthode Perturbation et Observation (P&O).....16

### **Chapitre II: l'onduleur 3 niveaux à structure NPC**

II.1 introduction.....18

II.2 L'onduleur triphasé à trois niveaux type N.P.C .....18

II.3 Topologie de l'onduleur 3 niveaux N.P.C .....20

## Sommaire

II.4 Modélisation de l'onduleur à trois niveaux à structure NPC .....	21
II.4.1 Différentes configuration d'un bras d'onduleur .....	21
II.4.2 Commandabilité de l'onduleur à trois niveaux à structure NPC .....	22
II.4.3 Fonction de connexion d'un onduleur à trois niveaux .....	22
II.4.4 Fonction de conversion d'un onduleur à trois niveaux .....	23
II.5 Stratégie de Commande de l'onduleur à trois niveaux à structure NPC .....	24
II.6 Conclusion .....	25

### **Chapitre III: chaine photovoltaïque**

III.1 Introduction .....	26
III.2 Système PV connecté à un réseau électrique .....	26
III.3 La stratégie de puissance instantanée .....	26
III.5 Résultats des simulations .....	28
III.6 Conclusion.....	35

Liste des figures

<b>Figure I. 1 :</b> Cella photovoltaïque. ....	6
<b>Figure I. 2 :</b> Module photovoltaïque. ....	6
<b>Figure I. 3 :</b> Cellule solaire fabriquée à partir d'une plaquette de silicium monocristallin. ....	7
<b>Figure I. 4 :</b> Cellule solaire fabriquée à partir d'une plaquette de silicium poly cristallin. ....	8
<b>Figure I. 5 :</b> cellule amorphe. ....	8
<b>Figure I. 6 :</b> Panneau solaire. ....	9
<b>Figure I. 7 :</b> Modèle de cellule photovoltaïque idéal. ....	10
<b>Figure I. 8 :</b> Modèle de la cellule photovoltaïque réel. ....	11
<b>Figure I. 9 :</b> Caractéristique de $P=f(v)$ ....	12
<b>Figure I. 10 :</b> Influence de l'éclairement sur la caractéristique $I=f(V)$ . ....	13
<b>Figure I. 11 :</b> Influence de l'éclairement sur la caractéristique $P=f(V)$ ....	14
<b>Figure I. 12 :</b> Influence de la température sur la caractéristique $I=f(V)$ . ....	14
<b>Figure I. 13 :</b> Influence de la température sur la caractéristique $P=f(V)$ . ....	15
<b>Figure I. 14 :</b> Caractéristique courant tension de $N_s$ cellule en série.....	15
<b>Figure I. 15 :</b> Caractéristique courant tension de $(N_p)$ cellule en parallèle. ....	16
<b>Figure I. 16 :</b> Schéma électrique du convertisseur Boost.....	16
<b>Figure I. 17 :</b> Présentation du point maximale.....	17
<b>Figure I. 18 :</b> Organigramme de l'algorithme MPPT de la Perturbation & Observation. ....	18
<b>Figure II. 1:</b> Onduleur NPC 3 Niveaux.....	20
<b>Figure II. 2:</b> Séquences de fonctionnement d'un bras d'onduleur NPC à trois niveaux.....	21
<b>Figure II. 3:</b> Séquences de fonctionnement d'un bras d'onduleur NPC à trois niveaux.....	22
<b>Figure II. 4:</b> Différentes configuration d'un bras d'onduleur. ....	22
<b>Figure III.1 :</b> schéma globale du système PV connecté au réseau.....	27
<b>Figure III.3:</b> Régulation de $V_{dc}$ ....	29
<b>Figure III.4:</b> Commande de puissance. ....	29
<b>Figure III.5:</b> Puissance délivrée par le GPV.....	30
<b>Figure III.7:</b> Caractéristique des tensions simples à la sortie de l'onduleur.....	32
<b>Figure III.8:</b> caractéristique de la tension $V_{dc}$ pour 3 charges différentes.....	32
<b>Figure III.9:</b> caractéristique de la tension $V_{dc}$ pour une charge variable.....	33
<b>Figure III.10:</b> Caractéristique des courants de réseau électrique. ....	33
<b>Figure III.11:</b> Caractéristique des courants à la sortie de l'onduleur. ....	34
<b>Figure III.12:</b> Caractéristique des courants de la charge. ....	34
<b>Figure III.14:</b> THD pour les courants. ....	35

**Liste Des Tableaux**

**Tableau II. 1** : Réalisation des différents niveaux pour l'onduleur NPC 3N. ....21

**Tableau II. 2** : États possibles de l'onduleur NPC à 3 niveaux.....23



# Introduction Générale



## Introduction générale

Dans le système électrique actuel, la majorité de l'énergie est injectée à partir des centrales de grandes puissances (de la centaine aux milliers de MW) sur le réseau, et une exploitation centralisée permet d'optimiser la gestion de la production pour le bénéfice des clients. Les réseaux de distribution ne sont pas conçus pour accueillir de la production d'énergie, leurs structures et leurs exploitations sont fortement marquées par le fait que l'énergie y est transportée des niveaux de tension les plus hauts vers le plus bas[1] .

Poussée par un contexte favorable (volonté politique, intérêt économique...), la production décentralisée se développe dans de nombreux pays. Les énergies renouvelables offrent la possibilité de produire de l'électricité proprement et surtout dans une moindre dépendance des ressources, à condition d'accepter leurs fluctuations naturelles et parfois aléatoires[2].

La production de l'électricité à partir des énergies renouvelables peut se faire par plusieurs façons que nous citons à titre d'exemple[3]:

- L'électricité produite par le photovoltaïque
- L'électricité produite par l'éolien
- L'électricité produite par l'hydraulique
- L'électricité produite par Energie de la mer

L'énergie produite par le photovoltaïque est de nature continue ce qui n'est pas adéquat dans le cas où on veut raccorder ce dernier avec le réseau de distribution [4]. Pour cela il faut concevoir un système capable de transformer l'énergie continue en énergie alternatif, cette conversion se passe par le biais d'un onduleur commandé en modulation de largeur d'impulsion par hystérésis afin de contrôler l'amplitude, la fréquence et la phase du courant injecté dans le réseau.

Le déroulement de cette thèse se fera de la manière suivante :

Dans le premier chapitre, nous représentons une généralité sur les générateurs photovoltaïques ce dernier spécifier l'énergie photovoltaïque (PV), les avantages et les inconvénients de PV, modélisation d'une cellule PV, regroupement des cellules, la commande MPPT, le convertisseur statique (DC/DC).

Dans le deuxième chapitre, on fera l'étude théorique du convertisseur statique (onduleur à trois niveaux structure NPC) où on va voir comment décrire et modéliser les convertisseurs afin de pouvoir les commander.

Le troisième chapitre sera consacré à la simulation d'un système GPV connecté au réseau à travers un onduleur à trois niveau à structure NPC avec et interprétation des résultats.

Finalement, nous terminerons ce mémoire par une conclusion générale qui résume notre étude dans sa partie théorique et simulation des résultats et quelques perspectives de recherche envisagées.

# Chapitre I

- Généralité sur le générateur photovoltaïque

## **I.1 Introduction**

Le soleil est une source énergétique quasiment illimitée, il pourrait couvrir plusieurs milliers de fois notre consommation globale d'énergie. C'est pourquoi, l'homme cherche depuis longtemps à mettre à profit cette énergie importante et diffusée sur l'ensemble de la planète.

L'énergie solaire photovoltaïque provient de la transformation directe d'une partie du rayonnement solaire en énergie électrique. Cette conversion d'énergie s'effectue par le biais d'une cellule dite photovoltaïque (PV) basée sur un phénomène physique appelé effet photovoltaïque[5].

Pour comprendre le fonctionnement de cette énergie et en optimiser son utilisation, nous effectuons dans ce chapitre un bref rappel sur le principe de l'effet photovoltaïque, la cellule photovoltaïque et ses performances ainsi que le convertisseur statique utilisé et la commande MPPT.

## **I.2 Energie solaire**

L'énergie solaire est l'énergie électromagnétique transmise par le soleil et qui est générée par la fusion nucléaire. Elle est à l'origine de toute forme de vie terrestre et représente environ 420 trillions de kilowattheures (kWh). L'énergie solaire est plusieurs milliers de fois plus importante que toutes les énergies cumulées utilisées par le monde entier[6].

Le rayonnement lumineux et la chaleur du soleil sont utilisés par les humains l'Antiquité, ce qui a abouti à une série de technologies qui n'ont cessé de se développer. Le rayonnement solaire, ainsi que les ressources à énergie solaire secondaires telles que l'énergie éolienne et renouvelable disponible sur Terre. Seule une minuscule part de l'énergie solaire disponible est utilisée.

La production d'électricité à énergie solaire repose sur des moteurs thermiques et sur l'effet photovoltaïque. Les utilisations de l'énergie solaire n'ont de limites que celles du génie humain. Pour ne citer que quelques-unes de ses applications : le chauffage et la climatisation de locaux à travers une architecture solaire, la création d'eau potable via la distillation et la désinfection, la domestication de la lumière du jour, l'eau chaude solaire, la cuisson solaire et la production de chaleur haute température à des fins industrielles[7]. Pour collecter l'énergie solaire, le moyen le plus courant est d'utiliser des panneaux solaires.

### **I.2.1 Technologies solaires**

Sont largement caractérisées comme étant soit solaires passives, soit solaires actives selon la façon dont elles capturent, transforment et distribuent l'énergie solaire. Les techniques solaires actives incluent l'utilisation de panneaux photovoltaïques et de capteurs solaires pour exploiter l'énergie. Les techniques solaires passives incluent le fait d'orienter un bâtiment vers le soleil, de choisir des matériaux présentant une masse thermique ou des

---

propriétés de dispersion de la lumière favorables, et de concevoir des locaux qui laissent circuler l'air naturellement[8].

### **I.2.2 Applications techniques de l'énergie solaire**

En s'appuyant sur la technologie solaire, l'énergie solaire peut être profitable de plusieurs façons[9] :

- Les cellules solaires produisent de l'électricité à courant continu (photovoltaïque).
- Les panneaux solaires génèrent de la chaleur (thermo solaire).
- Les centrales héliothermiques génèrent de l'électricité à partir de la chaleur et de la vapeur.
- Les plantes et les déchets végétaux peuvent être traités pour produire des liquides exploitables (par ex., éthanol, huile de colza) ou des gaz (comme du biogaz).
- Les cuisinières solaires ou les fours solaires permettent de réchauffer les aliments ou de stériliser les équipements médicaux.

### **I.3 Photovoltaïque (PV)**

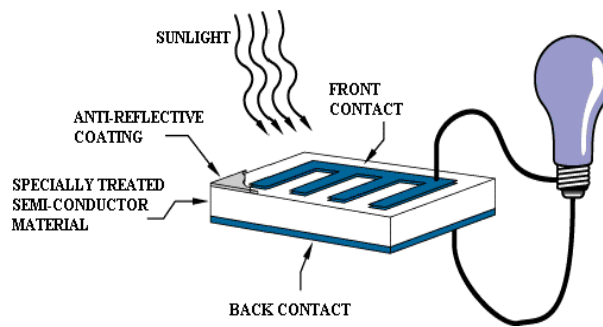
Le phénomène photovoltaïque est la transformation directe de la lumière en électricité à l'échelle atomique. Certains matériaux se caractérisent par une propriété connue sous le nom d'effet photoélectrique qui leur fait absorber les photons de la lumière et libérer des électrons. Lorsque ces électrons libres sont capturés, il en résulte un courant électrique qui peut être utilisé comme de l'électricité[10].

#### **I.3.1 Effet photoélectrique**

L'effet photoélectrique d'abord été observé par un physicien français, Edmond Becquerel, en 1839, qui a découvert que des matériaux spécifiques produisaient de petites quantités de courant électrique lorsqu'ils étaient exposés à la lumière. En 1905, Albert Einstein a décrit la nature de la lumière et l'effet photoélectrique sur lequel s'appuie la technologie photovoltaïque, ce qui lui a valu plus tard de remporter un Prix Nobel de physique. Le tout premier module photovoltaïque a été fabriqué par les Laboratoires Bell en 1954. Il a été présenté comme une batterie solaire et était surtout une simple curiosité car il était trop cher pour que son utilisation se généralise. Dans les années 60, l'industrie spatiale a commencé à faire la première utilisation sérieuse de la technologie pour fournir de l'électricité à bord des engins spatiaux. Par le biais des programmes spatiaux, la technologie a évolué, sa fiabilité a été établie et son coût a commencé à baisser. Durant la crise énergétique des années 70, la technologie photovoltaïque s'est imposée comme source d'électricité pour des applications non spatiales[11].

**I.3.2 Cellules solaires**

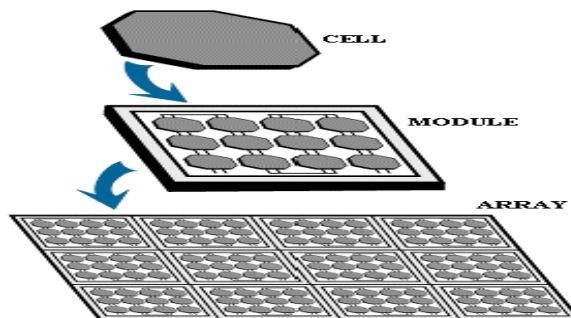
Sont fabriquées à partir des mêmes types de matériaux semi-conducteurs, comme le silicium, que ceux utilisés dans le secteur de la microélectronique. Pour la cellule solaire illustrée dans la Figure I.1, une fine plaquette semi-conductrice est spécialement traitée pour former un champ électrique, positif sur une face et négatif sur l'autre. Lorsqu'une énergie lumineuse frappe la cellule solaire, les électrons se détachent des atomes du matériau semi-conducteur. Si des conducteurs électriques sont fixés sur les faces positive et négative, pour former un circuit électrique, les électrons peuvent être capturés sous forme de courant électrique, c'est-à-dire de l'électricité. Cette électricité peut ensuite être utilisée pour alimenter une charge, telle qu'une lampe ou un outil. Plusieurs cellules solaires reliées électriquement entre elles et montées sur une structure ou un cadre de support constituent[12].



**Figure I. 1 :** Cellule photovoltaïque.

**I.3.3 Module photovoltaïque**

La figure I.2 illustre un module photovoltaïque. Ces modules sont conçus pour fournir de l'électricité à une certaine tension, telle qu'un système 12 volts classique. Le courant produit dépend directement de la quantité de lumière qui frappe le module. Plusieurs modules peuvent être installés ensemble pour former un **champ**. En général, plus la surface d'un module ou d'un champ est grande, plus la production d'électricité sera importante. Les modules et champs photovoltaïques produisent de l'électricité en courant continu (cc). Ils peuvent être reliés aussi bien en série qu'en parallèle de façon à produire toute combinaison de tension et de courant requise[13].



**Figure I. 2 :**Module photovoltaïque.

### I.3.3.1 Classification des cellules solaires

- ✓ Les cellules solaires peuvent être classées selon différents critères, le plus courant étant l'épaisseur du matériau. On distingue les cellules à couche épaisse des cellules à couche mince.
- ✓ Autre critère : le matériau. Comme matériaux semi-conducteurs, on peut utiliser des composés de tellure de cadmium (Cdte), d'arséniure de gallium (GaAs) ou de cuivre-indium sélénium, mais le plus courant à l'échelle mondiale est le silicium.
- ✓ La structure du cristal, cristalline (mono-/poly cristalline) ou amorphe.
- ✓ Outre les matériaux semi-conducteurs, il existe également de nouvelles approches du matériau, telles que les cellules solaires organiques et les cellules solaires à colorant.

### I.3.3.2 Les types de cellules selon le type de cristal

Pour produire une cellule en silicium monocristallin Figure I.3. Il faut un matériau semi-conducteur absolument pur. Les barreaux monocristallins sont extraits du silicium fondu puis sciés en fines plaques. Ce processus de production garantit un niveau d'efficacité relativement élevé.



**Figure I. 3** : Cellule solaire fabriquée à partir d'une plaquette de silicium monocristallin.

La production de cellules poly cristallines est plus rentable Figure I.4. Au cours de ce processus, du silicium liquide est versé dans des blocs qui sont ensuite sciés en plaques. Durant la solidification du matériau, des structures en cristal de différentes tailles se forment, en bordure desquelles des défauts apparaissent. La cellule solaire est rendue moins efficace par ces défauts dans le cristal.



**Figure I. 4 :**Cellule solaire fabriquée à partir d'une plaquette de silicium poly cristallin.

Si une couche de silicium est déposée sur du verre ou un autre matériau de substrat, on obtient ce que l'on appelle une cellule amorphe ou à couche mince Figure I.5. L'épaisseur de la couche est inférieure à  $1\ \mu\text{m}$  (épaisseur d'un cheveu humain :  $50\text{-}100\ \mu\text{m}$ ), donc les coûts de production sont moins élevés en raison du faible coût des matériaux. Toutefois, les cellules amorphes sont moins efficaces que les deux autres types de cellules. C'est la raison pour laquelle elles ont principalement été utilisées dans les équipements de faible puissance (montres, calculatrices de poche) ou en éléments de façade. Mais, désormais, elles sont également utilisées dans les fermes solaires de classe mégawatt.



**Figure I. 5 :**cellule amorphe.

### I.3.4 Panneau solaire

Le panneau solaire ou (champ solaire) Figure I.6 se compose de modules photovoltaïques interconnectés en série et/ou en parallèle afin de produire la puissance requise. Ces modules sont montés sur une armature métallique qui permet de supporter le champ solaire avec un angle d'inclinaison spécifique[15]. Pour chaque panneau on peut avoir autant de sorties que de modules, ce que fait qu'on aura besoin de boîte de dérivation qui regroupe le tous, alors cette boîte de dérivation fixée sur une structure du montage a comme rôle d'effectuer les connections entre les modules pour obtenir une puissance optimale en sortie. Cette dernière dépend de la surface, de



l'orientation et de l'inclinaison des panneaux, et de l'intensité du rayonnement solaire, et par la technologie utilisée dans la construction.



**Figure I. 6** : Panneau solaire.

## **I.4 Avantages et les inconvénients de l'énergie photovoltaïque [12]**

### **I.4.1 Avantages**

L'énergie photovoltaïque offre de multiples avantages :

- ✓ La production de cette électricité renouvelable est propre. Elle n'est pas toxique.
- ✓ Les systèmes photovoltaïques sont extrêmement fiables.
- ✓ L'énergie photovoltaïque est particulièrement attractive pour les sites urbains, dus à leur opération silencieuse.
- ✓ La lumière du soleil étant disponible partout, l'énergie photovoltaïque est exploitable aussi bien en montage dans un village isolé que dans le centre d'une grande ville.
- ✓ L'électricité photovoltaïque est produite au plus près de son lieu de consommation, de manière décentralisée, directement chez l'utilisateur.
- ✓ Les matériaux employés (verre, aluminium) résistent aux pires conditions climatiques (notamment à la grêle).
- ✓ La durée de vie des panneaux photovoltaïques est très longue. Certains producteurs garantissent les panneaux solaires pour une durée de 25 ans.

### **I.4.2 Inconvénients**

- ✓ La fabrication des panneaux photovoltaïques relève de la haute technologie demandant énormément de recherche et développement et donc des investissements coûteux.
- ✓ Les rendements des panneaux photovoltaïques sont encore faibles.
- ✓ Nécessite un système d'appoint (batteries) pour les installations domestiques.
- ✓ Le coût d'investissement sur une installation photovoltaïque est cher.

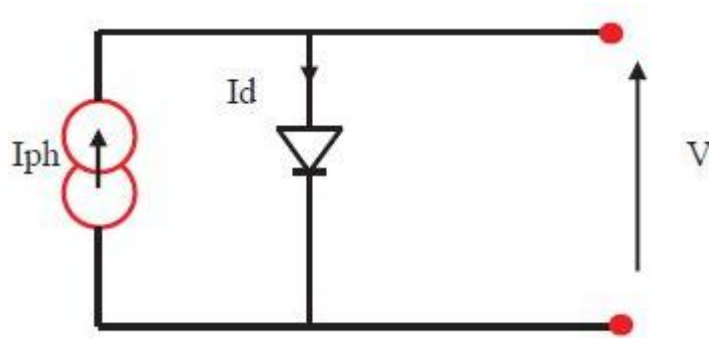
**I.5 Modélisation d'une cellule photovoltaïque**

**I.5.1 Cellule photovoltaïque idéal**

Une cellule photovoltaïque peut être décrite de manière simple comme une source idéale de courant qui produit un courant  $I_{ph}$  proportionnel à la puissance lumineuse incidente, en parallèle avec une diode comme elle est illustrée dans la Figure I.7 qui correspond à l'aire de transition p-n de la cellule PV.

Après la loi de nœuds :

$$I = I_{ph} - I_d \tag{I.1}$$



**Figure I. 7 :**Modèle de cellule photovoltaïque idéal.

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

$$V = V_d \tag{I.2}$$

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

$$I_d = I_o. \left( \exp\left(\frac{V_d}{V_t}\right) - 1 \right) \tag{I.3}$$

Avec :

$I_o$  : Le courant de saturation inverse de la diode.

$V_d$ : La tension à la borne de diode.

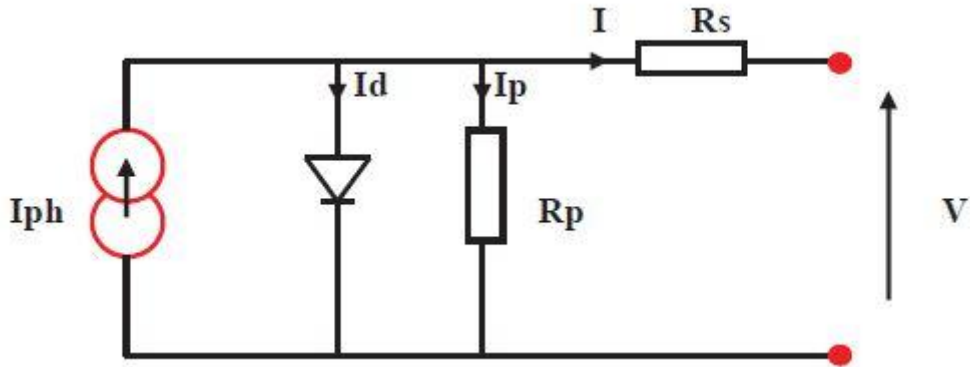
$V_t$ :  $=KT/q$  potentielle thermique.

Donc la relation (I.1) sera :

$$I = I_{ph} - I_o. \left( \exp\left(\frac{V_d}{V_t}\right) - 1 \right) \tag{I.4}$$

**I.5.2 Cellule photovoltaïque réel**

Le model photovoltaïque précédent ne rendait pas compte de tous les phénomènes présents lors de la conversion d'énergie lumineuse. En effet, dans le cas réel, on observe une perte de tension en sortie ainsi que des courants de fuite. On modélise donc cette perte de tension par une résistance en série  $R_s$  et les courants de fuite par une résistance en parallèle  $R_p$  comme elle est illustrée dans la Figure I.8.



**Figure I. 8 :**Modèle de la cellule photovoltaïque réel.

Donc on a :

$$I = I_{ph} - I_d - I_p \tag{I.5}$$

$$I_p = \left( \frac{V + R_s \cdot I}{R_p} \right) \tag{I.6}$$

$$I_d = I_0 \cdot \left( \exp \left( \frac{V + R_s \cdot I}{V_t} \right) - 1 \right) \tag{I.7}$$

Avec :

$I$ : Le courant fourni par la cellule.

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

$I_0$ : Le courant de saturation de la diode.

$K$  : constante de Boltzmann ( $1,381 \cdot 10^{-23}$  joule/Kelvin).

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

$n$ : Le facteur de qualité de diode.

$T$ : La température de cellule en kelvin.

Donc (I.5) sera:

$$I = I_{ph} - \left( \exp \left( \frac{V + R_s \cdot I}{V_t} \right) - 1 \right) - \left( \frac{V + R_s \cdot I}{R_p} \right) \tag{I.8}$$

**I.5.3 Caractéristiques d'une cellule PV**

**a) Puissance**

La partie intéressante de la caractéristique courant-tension pour l'utilisateur c'est celle que génère de l'énergie, donc ce ne sera ni au point de tension de circuit ouvert, ni au point de court-circuit, qui ne génère aucune énergie puisque la puissance est le produit du courant par la tension, donc la puissance maximale génère par la cellule.

$$P_m = I_m \cdot V_m \tag{I.9}$$

✓ La puissance de panneau constitué des cellules parallèle

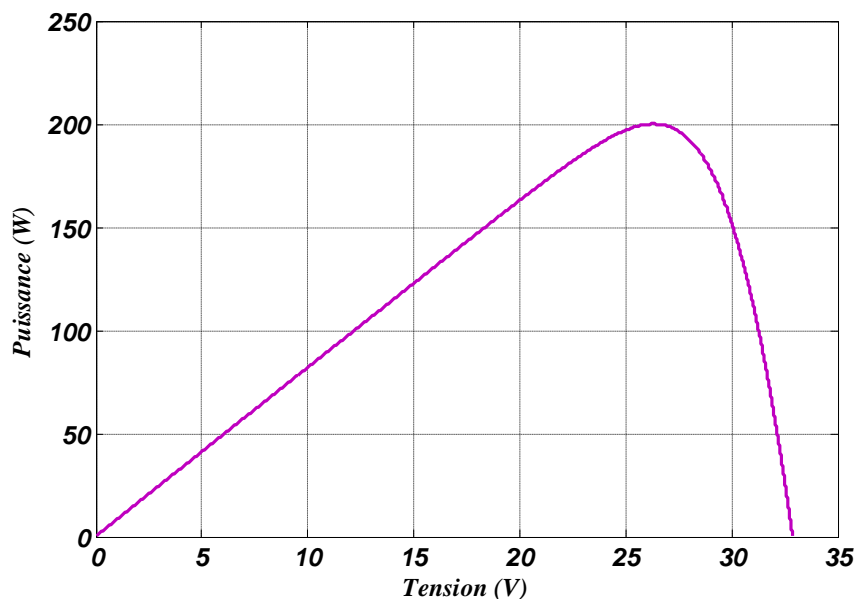
$$P_p = N_p \cdot I \cdot V \tag{I.10}$$

✓ La puissance de panneau constitué des cellules série :

$$P_s = N_s \cdot I \cdot V \tag{I.11}$$

✓ La puissance de panneau constitué des cellules série et parallèle :

$$P_p = N_p \cdot I \cdot V \cdot N_s \tag{I.12}$$



**Figure I. 9** :Caractéristique de  $P=f(v)$

$P_m$  : La puissance maximale.

$I_m$  : Le courant maximum.

$V_m$ : La tension maximale.

$N_s$  : Le nombre des cellules associé en série.

$N_p$  : Le nombre des cellules associé en parallèle.

**b) Courant de court-circuit  $I_{cc}$**

Soit le courant débité par la cellule quand la tension à ses bornes est nulle .en pratique ce courant est très proche de la photo courant  $I_{ph}$ .

**c) Tension de circuit ouvert  $V_{co}$**

Soit la tension qui apparait aux bornes de la cellule quand le courant débité est nul.

**d) Facteur de forme**

Qui indique le degré d'idéalité de la caractéristique, soit le rapport :

$$FF = \frac{P_m}{V_{co} \cdot I_{cc}} \tag{I.13}$$

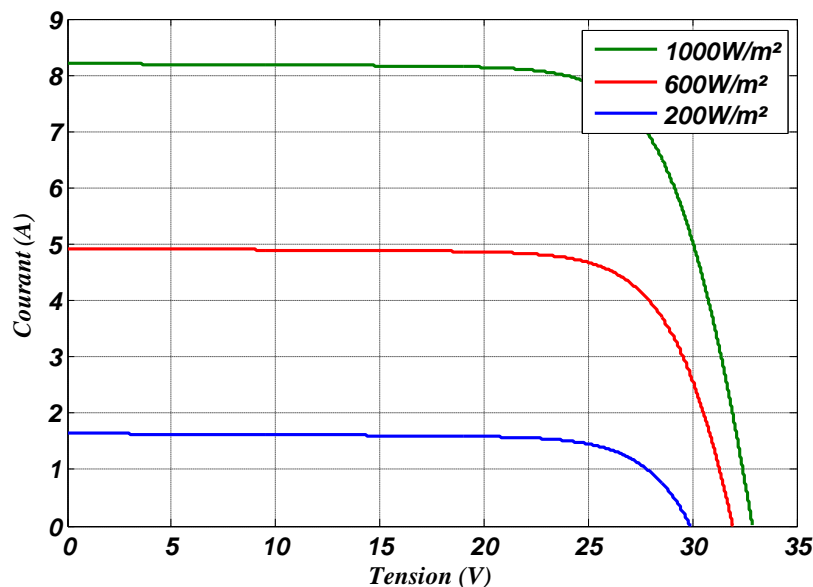
**e) Rendement**

On définit le rendement énergétique d'une cellule par le rapport entre la puissance maximale fournie par la cellule et la puissance incidente :

$$\eta = \frac{P_m}{E \cdot S} \tag{I.14}$$

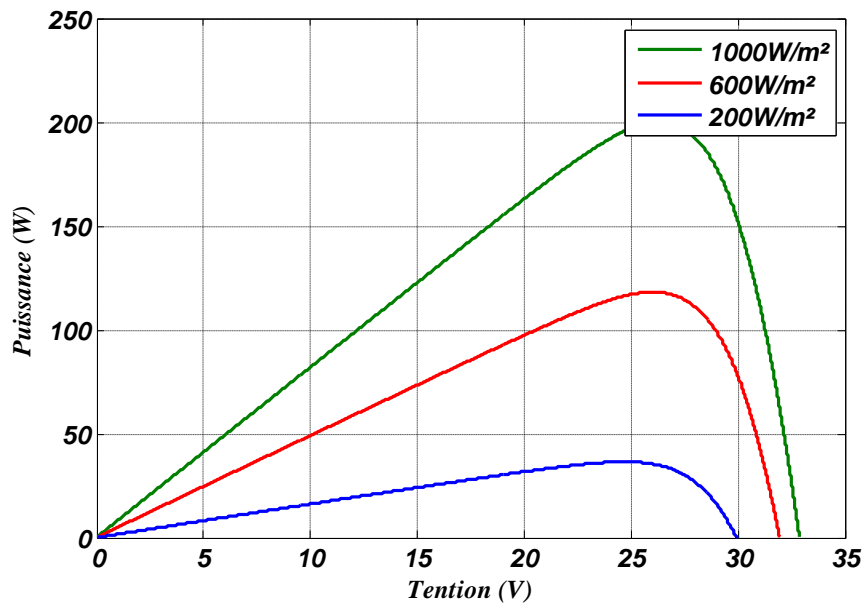
**f) Influence de l'éclairement et la température sur les courbes  $I=f(V)$  et  $P=f(V)$**

La Figure I.10 montre l'influence de l'éclairement sur la caractéristique  $I=f(V)$ . A une température constante, on constate que le courant subit une variation importante, mais par contre la tension varie légèrement[16]. Car le courant de court-circuit est une fonction linéaire de l'éclairement alors que la tension de circuit ouvert est une fonction logarithmique [2, 3, 5, 6].



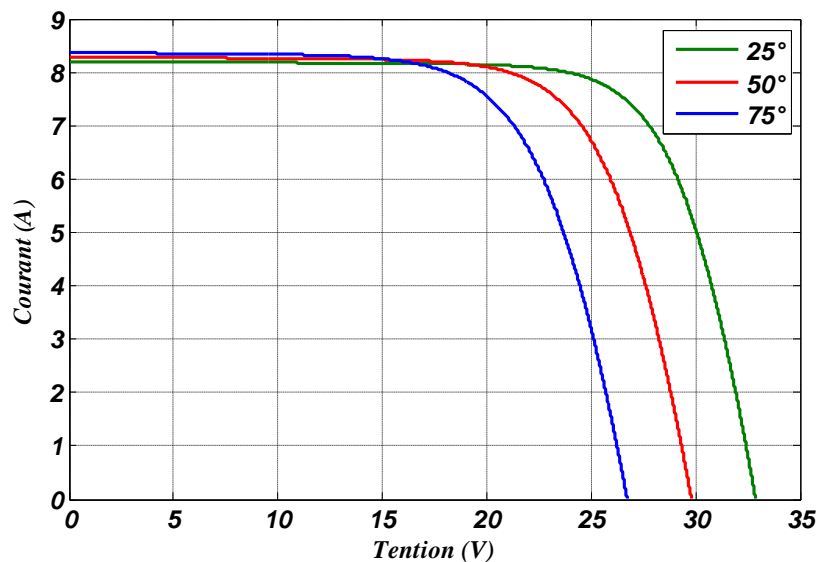
**Figure I. 10 :**Influence de l'éclairement sur la caractéristique  $I=f(V)$ .

La Figure I.11 illustre la variation de la puissance délivrée par le générateur en fonction de la tension pour différentes valeurs d'éclairement, ce qui nous permet de déduire l'influence de l'éclairement sur la caractéristique  $P(V)$  [5]



**Figure I. 11 :**Influence de l'éclairement sur la caractéristique  $P=f(V)$

La Figure I.12 montre l'influence de la température sur la caractéristique  $I=f(V)$ . Il est essentiel de comprendre l'effet de changement de la température d'une cellule solaire sur la caractéristique  $I=f(V)$ . Le courant dépend de la température puisque le courant augmente légèrement à mesure que la température augmente, mais la température influe négativement sur la tension de circuit ouvert. Quand la température augmente la tension de circuit ouvert diminue. Par conséquent la puissance maximale du générateur subit une diminution [3].



**Figure I. 12 :**Influence de la température sur la caractéristique  $I=f(V)$ .

La Figure I.13 illustre la variation de la puissance délivrée par le générateur en fonction de la tension pour différentes valeurs de la température, ce qui nous permet de déduire l'influence de la température sur la caractéristique  $P=f(V)$  [5].

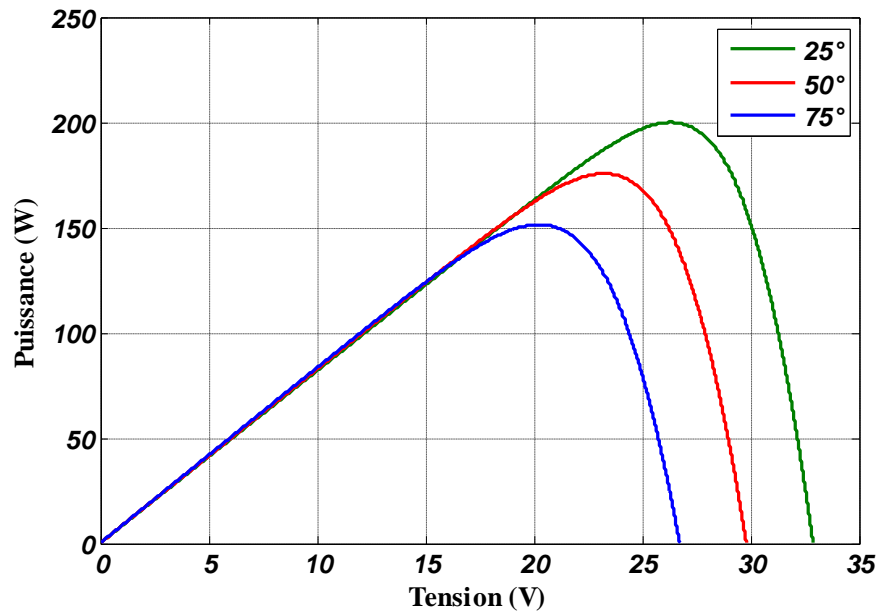


Figure I. 13 :Influence de la température sur la caractéristique  $P=f(V)$ .

**I.6 Regroupement des cellules**

**I.6.1 Regroupement en série**

Une association de ( $N_s$ ) cellule en série illustrée dans la Figure I.14 permet d'augmenter la tension du Générateur photovoltaïque. Les cellules sont alors traversées par le même courant et la caractéristique résultant du groupement série est obtenues par addition des tensions élémentaires de chaque cellule. L'équation résume les caractéristique électrique d'une association série de ( $N_s$ ) cellules.

$$V_{coNS} = N_s \cdot V_{co} \tag{I.15}$$

$$I_{cc} = I_c \tag{I.16}$$

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

$I_{ccNS}$ : Courant de court-circuit de  $N_s$  cellules en série.

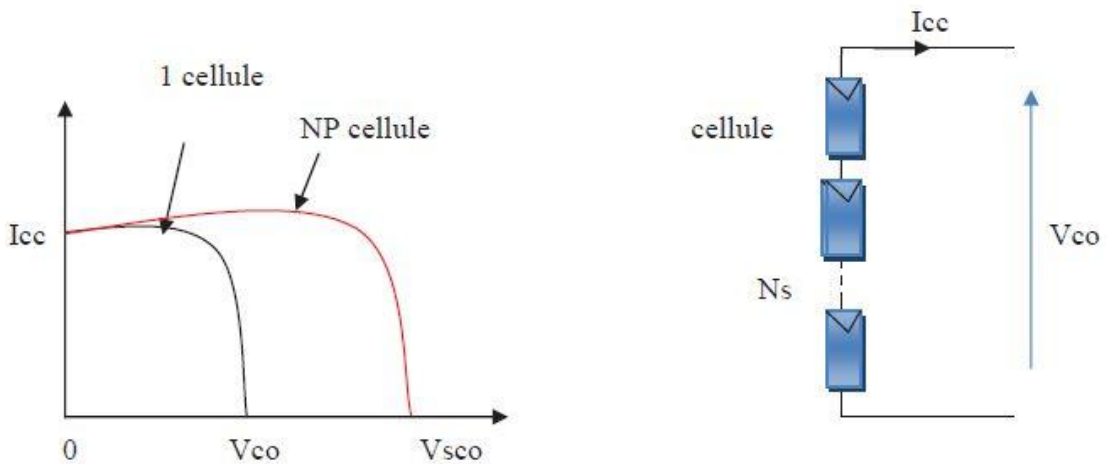


Figure I. 14 :Caractéristique courant tension de  $N_s$  cellule en série

**I.6.2 Regroupement en parallèle**

Une association parallèle de ( $Np$ ) cellule présenter dans la Figure I.15 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 résultante du groupement est obtenue par addition des courants.

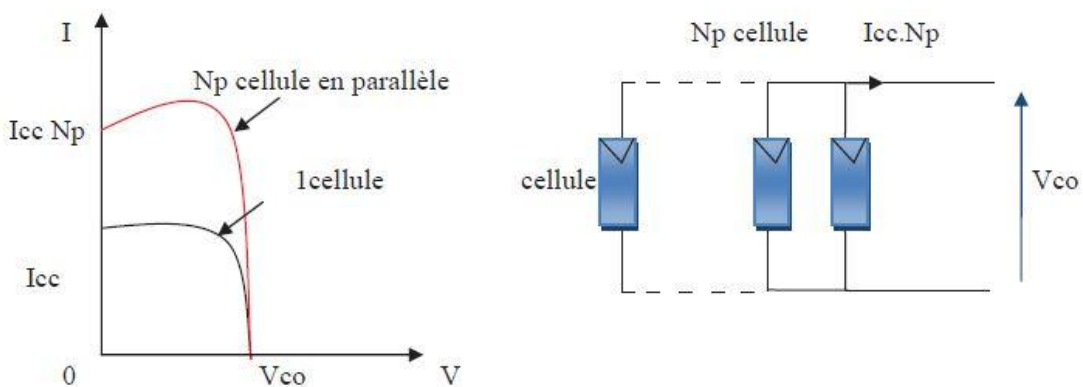
Avec :

$I_{ccNp}$ : La somme des courants de court circuit de  $Np$  cellule en parallèle.

$V_{coNp}$ : Tension du circuit ouvert de  $Np$  cellules en parallèle.

$$I_{cc} \cdot Np = Np \cdot I_c \tag{I.17}$$

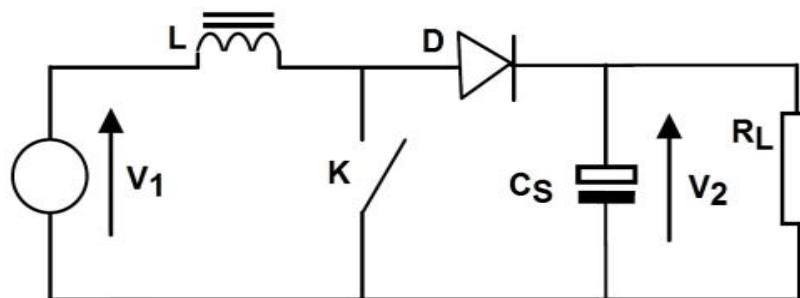
$$V_{co} = V_{co} \cdot Np \tag{I.18}$$



**Figure I. 15 :**Caractéristique courant tension de ( $Np$ ) cellule en parallèle.

**I.7 convertisseur DC-DC (Hacheur Boost)**

Le convertisseur DC-DC est une interface qui permet l'adaptation entre le panneau PV et la charge afin d'extraire la puissance maximale du panneau.



**Figure I. 16 :** Schéma électrique du convertisseur Boost.

Pour  $t \in [0, \alpha T]$  le transistor est passant. Par la suite, le convertisseur peut être modélisé par les équations suivantes:

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{V_1}{L} \tag{I.19}$$



$$\frac{dV_2}{dt} = -\frac{V_2}{R_L \times C_S} \tag{I.20}$$

Pour  $t \in [\alpha T, T]$  le transistor est bloqué. Par la suite, le convertisseur peut être modélisé par les équations suivantes:

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{V_1 - V_2}{L} \tag{I.21}$$

$$\frac{dV_2}{dt} = \frac{i_L}{C_S} - \frac{V_2}{R_L \times C_S} \tag{I.22}$$

Où  $\alpha$  est le rapport cyclique.

### I.8 Commande MPPT

La caractéristique de la cellule solaire  $V-I$  n'est pas linéaire et varie en fonction de l'éclairement et la température. Il y a un point sur la courbe  $V-P$ , on appelle le point de puissance maximale ce point n'est pas connu, mais peut être calculé. Grâce aux méthodes et les algorithmes (Perturbation et Observation 'P&O', incrémentation de la conductance et la commande MPPT flou, méthode à contre réaction de puissance .....etc.)[17].Après la recherche bibliographique nous avons constaté que la méthode P&O[18] est la méthode la plus utilisées pour MPPT parce que elle est efficace est simple à implanter.

### I.9 Méthode Perturbation et Observation (P&O)

Le principe de la méthode P&O est présenté dans la Figure I.17. Ce processus fonctionne par une perturbation du système en augmentant ou en diminuant la tension de fonctionnement du module et observer son effet sur la puissance de sortie de la rangée[19].

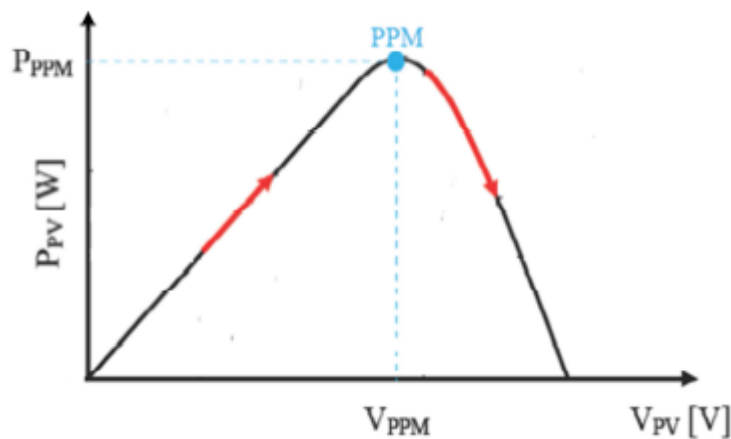


Figure I. 17 : Présentation du point maximale.

La Figure I.18montre l'organigramme de l'algorithme de la méthode 'P&O'. D'après la figure, la tension et le courant  $V$  et  $I$ , sont mesurés pour calculer la puissance de sortie courante  $P(k)$  de la range. Cette valeur  $P(k)$  est comparée à la valeur  $P(k-1)$  de la dernière mesure. Si la puissance de sortie a augmenté, la perturbation continuera dans la même direction. Si la puissance a diminué

depuis la dernière mesure, la perturbation de la tension de sortie sera renversée en direction opposée du dernier cycle.

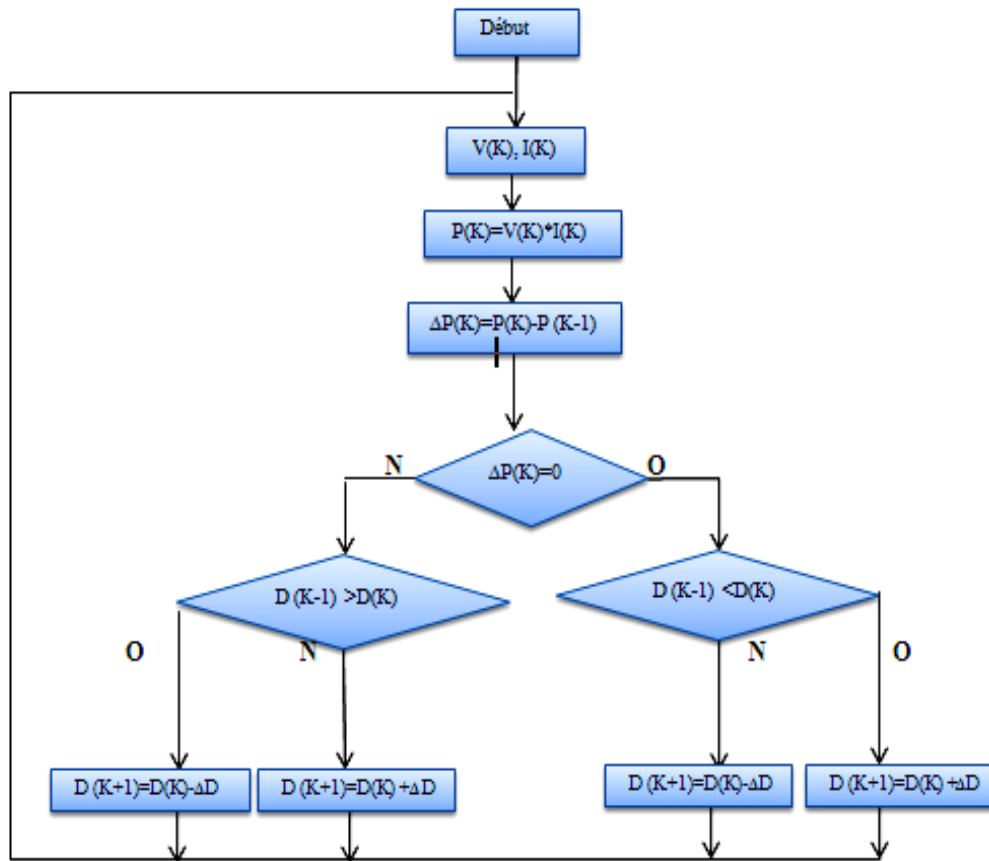


Figure I. 18 :Organigramme de l’algorithme MPPT de la Perturbation & Observation.

### I.10 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté les principales caractéristiques et les technologies des éléments constitutifs d’un générateur PV et nous avons montré comment augmenter le courant ou la tension d’un générateur photovoltaïque ainsi nous avons montré bien l’influence de la température et l’éclairement sur le rendement de la cellule, et on constate que la puissance ne dépend pas seulement de la température mais dépend aussi de l’éclairement, les convertisseurs DC-DC (hacheurs) et leurs commande MPPT pour chercher le point où la puissance du générateur photovoltaïque maximale.

Dans le chapitre prochain, on présentera une étude sur l’onduleur triphasé à trois niveaux à structure NPC utilisé pour intégrer le système PV au réseau électrique.

## Chapitre II

- l'onduleur 3 niveaux à structure NPC

## II.1 introduction

Les systèmes de production des énergies renouvelables sont fréquemment étudiés à cause de leur intérêt majeur en matière de développement durable. Par conséquent, les structures de contrôle de l'onduleur connectées au réseau sont une partie importante de la conversion et de la transmission d'énergie, elles doivent être améliorées pour répondre aux exigences de la connexion au réseau de distribution[20].

Les performances et en particulier la rentabilité des onduleurs utilisés pour le raccordement des systèmes de production des énergies renouvelables au réseau électrique de distribution sont des éléments-clés qui influencent fortement la qualité de l'énergie produite et le rendement de l'installation entière[21].

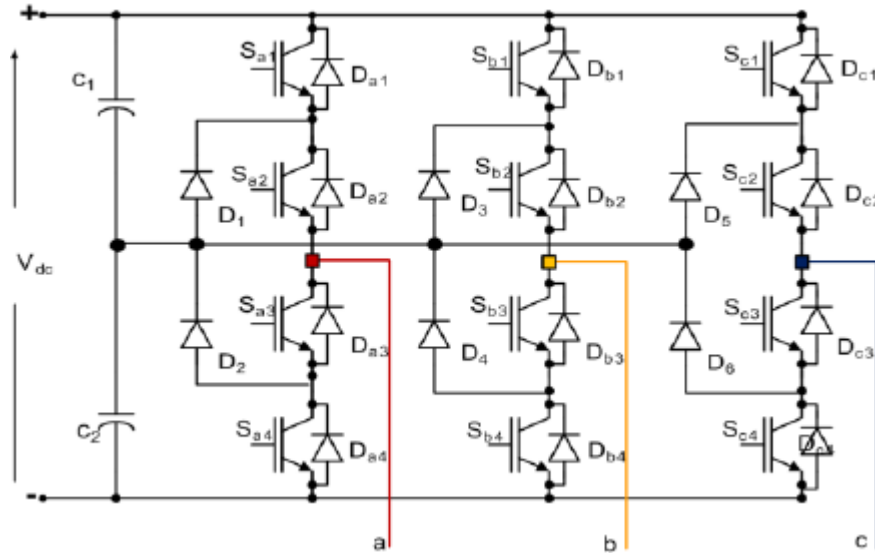
Les onduleurs multi niveaux sont très utilisés dans les applications de puissance de l'ordre de 10 kW du fait de leur capacité à générer une très bonne qualité des formes d'ondes, en réduisant la fréquence de commutation des interrupteurs, et leur niveau de tension lors du blocage des dispositifs de puissance. Cependant, ce type d'onduleur doit être modifié pour à la fois limiter les courants de fuite à la terre et à améliorer la robustesse du système[16][17].

Ce chapitre présente une architecture d'onduleur à trois niveaux dédiés aux applications photovoltaïques. Une description de cet onduleur sera proposée[18].

## II.2 L'onduleur triphasé à trois niveaux type N.P.C

Une des structures de référence dans la conversion multi niveaux est le convertisseur NPC à trois niveaux (Neutral Point Clamped) (Figure II.1). Ce convertisseur utilise la mise en série d'interrupteurs, la répartition de la tension aux bornes des interrupteurs à l'état bloqué étant réalisée avec des diodes connectées au point milieu (N)[25]. Ces diodes de clamp permettent d'assurer une tension de blocage à  $E/2$  aux points A et B.

Le bus continu d'entrée est composé de deux capacités en série (C1 et C2), formant un point milieu noté (O) qui permet à l'onduleur d'accéder à un niveau de tension supplémentaire par rapport à l'onduleur classique à deux niveaux[20]. La tension totale du bus continu vaut E, dans les conditions normales de fonctionnement, celle-ci est uniformément répartie sur les deux capacités qui possèdent alors une tension  $E/2$  à leurs bornes. Chacun des trois bras (a, b et c) de l'onduleur est composé de quatre interrupteurs commandés (K1, K2, K3 et K4 pour le bras a) et deux diodes de maintien connectées au point milieu du bus continu[27]



**Figure II. 1:** Onduleur NPC 3 Niveaux.

Dans le cas d'une utilisation de cette structure en Onduleur, les niveaux de tensions en sortie réalisables sont au nombre de 3 :  $-E/2$ , 0 et  $E/2$ . Les possibilités pour réaliser les différents niveaux sont résumées dans le Tableau II.1

Tension de sortie	Interrupteurs rendus passant	Sens du courant	Le courant circule dans
$E/2$	K1 et T2	$I_s > 0$	K1 et K2
		$I_s < 0$	D1 et D2
0	K2 et T3	$I_s > 0$	X1 et K2
		$I_s < 0$	X2 et K3
$-E/2$	K3 et T4	$I_s > 0$	D4 et D3
		$I_s < 0$	K4 et K3

**Tableau II. 1 :** Réalisation des différents niveaux pour l'onduleur NPC 3N.

Les interrupteurs K1 et K3 (respectivement K2 et K4) sont commandés de manière complémentaire. Tous les interrupteurs ne sont pas actifs pendant la totalité de la période de modulation : 2 interrupteurs sur 4 sont dans un état bloqué :

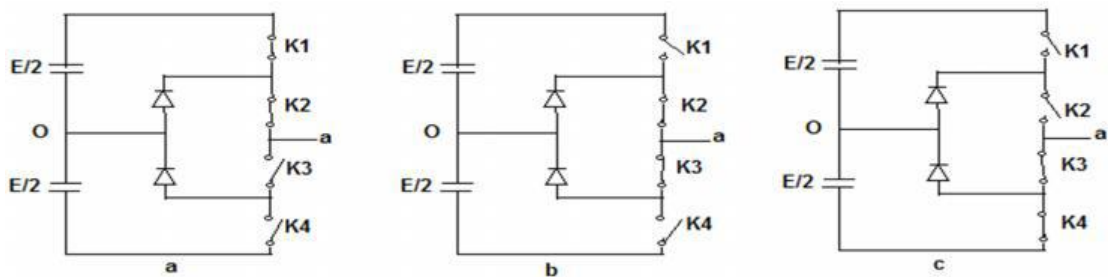
- ✓ Si la modulante est positive, alors l'interrupteur K2 est toujours passant et K4 bloqué. Si K1 est amorcé alors l'interrupteur K3 doit être bloqué, la tension en sortie est alors  $E/2$ . Au contraire si K1 est à l'état OFF et K3 est ON, la tension de sortie est égale à 0V.
- ✓ De même si le signal modulant est négatif, les interrupteurs figés sont K1 à l'état bloqué et K3 à l'état passant. Si K2 est amorcé et K4 bloqué alors la tension de sortie est fixée 0V et si K2 est à l'état OFF et K4 est ON, la tension de sortie est égale à  $-E/2$ .

**II.3 Topologie de l'onduleur 3 niveaux N.P.C**

Pour des raisons de simplicité, nous limiterons l'étude à un bras d'onduleur NPC de trois niveaux, l'objectif visé est de déterminer les valeurs que peut prendre la tension  $V_{ao}$  pour les différents états possibles des interrupteurs statiques, et de montrer les séquences de conductions des interrupteurs. Pour un convertisseur NPC à N-niveaux de tensions, nous avons N séquences de fonctionnement possibles permettant de générer les N niveaux de tensions (Figure II.2). Et en particulier pour le NPC à trois niveaux on a trois séquences de fonctionnement[28]:

**Séquences 1 : Génération du niveau maximum**

Dans ce cas, les interrupteurs K1, K2 sont passants et K3, K4 sont bloqués comme le montre la figure (II.2). La tension de sortie  $V_{ao}$  est:  $V_{ao}=+E/2$ . La tension inverse appliquée aux interrupteurs k3, k4 vaut:  $V_{k3}=V_{k4}=+E/2$ .



**Figure II. 2:** Séquences de fonctionnement d'un bras d'onduleur NPC à trois niveaux.

**Séquences 2 : Génération du niveau intermédiaire**

Les interrupteurs K2, K3 sont passants et K1, K4 sont bloqués, dans ce cas le point a est relié directement au point O à travers l'une des diodes de maintien, comme le montre la figure (4-b). La tension de sortie  $V_{ao}$  est donc nulle,  $V_{ao} = 0$ . La tension inverse appliquée aux interrupteurs K1, K4 vaut:  $V_{k1}=V_{k4}=+E/2$

**Séquences 3 : Génération du niveau minimum**

Dans ce cas, les interrupteurs K1, K2 sont bloqués et K3, K4 sont passants comme le montre la Figure (II.3). La tension de sortie  $V_{ao}$  est:  $V_{ao} = -E/2$  Et La tension inverse appliquée aux interrupteurs K1, K2 vaut:  $V_{k1}=V_{k2}=E/2$ . Les 3 états ou séquences de commutation possibles sont résumés au tableau:

K1	K2	K3	K4	$V_{ao}$
1	1	0	0	$E/2$
0	1	1	0	0
0	0	1	1	$-E/2$

**Tableau II. 2 :** États possibles de l'onduleur NPC à 3 niveaux.

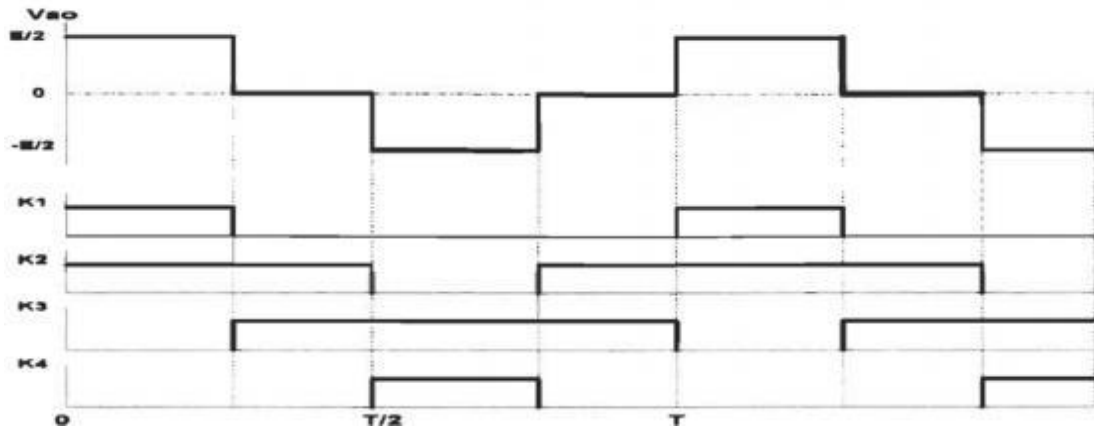


Figure II. 3: Séquences de fonctionnement d'un bras d'onduleur NPC à trois niveaux.

## II.4 Modélisation de l'onduleur à trois niveaux à structure NPC

### II.4.1 Différentes configuration d'un bras d'onduleur

L'analyse topologique d'un bras de l'onduleur triphasé à trois niveaux montre qu'il existe cinq configurations possibles pour ce dernier, cette topologie est illustrée dans Figure II.4

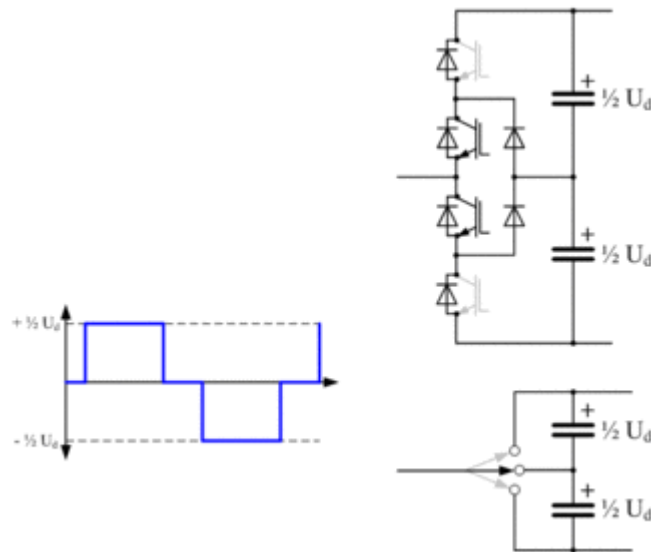


Figure II. 4: Différentes configuration d'un bras d'onduleur.

#### Première configuration E0:

Tous les interrupteurs sont ouverts :  $V_1=0$ .

#### Deuxième configuration E1:

Les interrupteurs KA1 et KA2 sont fermés :  $V_1=E/2$ .

#### Troisième configuration E2:

Les interrupteurs DclA1 et KA2 sont fermés :  $V_1=0$ .

#### Quatrième configuration E3:

Les interrupteurs KA3 et KA4 sont fermés :  $V_1=-E/2$ .

**Cinquième configuration E4:**

Les interrupteurs DclA2 et KA3 sont fermé :  $V_1=0$ .

**II.4.2 Commandabilité de l'onduleur à trois niveaux à structure NPC**

Le système des tensions de référence triphasé est donné par les équations:

$$\begin{cases} V_{r1} = V_m \cdot \sin(\omega t) \\ V_{r2} = V_m \cdot \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) \\ V_{r3} = V_m \cdot \sin(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \end{cases} \quad \text{II.1}$$

Les équations logiques des deux variables de sorties sont :

$$\begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} f_{11}^b - f_{10}^b \\ f_{21}^b - f_{20}^b \\ f_{31}^b - f_{30}^b \end{bmatrix} \cdot \frac{E}{2} \quad \text{II.2}$$

**II.4.3 Fonction de connexion d'un onduleur à trois niveaux**

Pour modéliser l'onduleur, on utilise les notions de fonction de connexion et fonction de conversion. La fonction de connexion d'un interrupteur  $K_{cj}$  appartenant à un bras ( $c$ ) est  $f_{cj}$  avec ( $j=1, 2, 3, 4$ ) [quatre interrupteurs par bras] et  $f_{bcm}$  la fonction de connexion d'un demi bras. Pour un bras [ $c$ ] ( $c=1, 2, 3$ ), les fonctions de connexions des demi bras s'expriment en fonction des fonctions de connexion des interrupteurs par[23] :

$$\begin{cases} f_{c1}^b = f_{c1} \cdot f_{c2} \\ f_{c0}^b = f_{c3} \cdot f_{c4} \end{cases} \quad \text{II.3}$$

$f_{c1}^b$ : Fonction de connexion du demi-bras du haut

$f_{c0}^b$ : Fonction de connexion du demi-bras du bas.

Pour le premier bras :

$$\begin{cases} f_{11}^b = f_{11} \cdot f_{12} \\ f_{10}^b = f_{13} \cdot f_{14} \end{cases} \quad \text{II.4}$$

Pour le deuxième bras :

$$\begin{cases} f_{21}^b = f_{21} \cdot f_{22} \\ f_{20}^b = f_{23} \cdot f_{24} \end{cases} \quad \text{II.5}$$

Pour le troisième bras :



$$\begin{cases} f_{31}^b = f_{31} \cdot f_{32} \\ f_{30}^b = f_{33} \cdot f_{34} \end{cases} \quad \text{II.6}$$

Il est nécessaire pour un bras d'onduleur que les fonctions de connexion vérifient la relation :

$$\begin{cases} f_1 + f_2 = 1 \\ f_3 + f_4 = 1 \end{cases} \quad \text{II.7}$$

#### II.4.4 Fonction de conversion d'un onduleur à trois niveaux

La fonction de conversion d'un onduleur de tension à trois niveaux permet d'exprimer la tension de sortie en fonction de la tension d'entrée. Les expressions des tensions  $V_{am}$ ,  $V_{bm}$ ,  $V_{cm}$  sont [23]:

$$\begin{cases} V_{am} = \frac{E}{2} [f_{11}^b - f_{10}^b] \\ V_{bm} = \frac{E}{2} [f_{21}^b - f_{20}^b] \\ V_{cm} = \frac{E}{2} [f_{31}^b - f_{30}^b] \end{cases} \quad \text{II.8}$$

L'absence de la composante homopolaire permet d'écrire :  $V_{an} + V_{bn} + V_{cn} = 0$ .

$$\begin{cases} V_{am} = V_{an} + V_{mn} \\ V_{bm} = V_{bn} + V_{mn} \\ V_{cm} = V_{cn} + V_{mn} \end{cases} \quad \text{II.9}$$

De ces trois expressions nous pouvons avoir :

$$V_{an} = \frac{1}{3} \cdot (V_{an} + V_{bn} + V_{cn}) \quad \text{II.10}$$

Donc:

$$\begin{cases} V_{an} = \frac{1}{3} \cdot (2V_{an} - V_{bn} - V_{cn}) \\ V_{bn} = \frac{1}{3} \cdot (-V_{an} + 2V_{bn} - V_{cn}) \\ V_{cn} = \frac{1}{3} \cdot (-V_{an} - V_{bn} + 2V_{cn}) \end{cases} \quad \text{II.11}$$

Soit sous forme matricielle :

$$\begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} f_{11}^b - f_{10}^b \\ f_{21}^b - f_{20}^b \\ f_{31}^b - f_{30}^b \end{bmatrix} \cdot \frac{E}{2} \quad \text{II.12}$$

## II.5 Stratégie de Commande de l'onduleur à trois niveaux à structure NPC

Le but de la commande de l'onduleur est de permettre la meilleure reproduction des courants perturbés de référence, à travers les ordres de commande appliqués aux drivers interrupteurs de puissance. Les deux principales familles de commande des convertisseurs statiques sont :

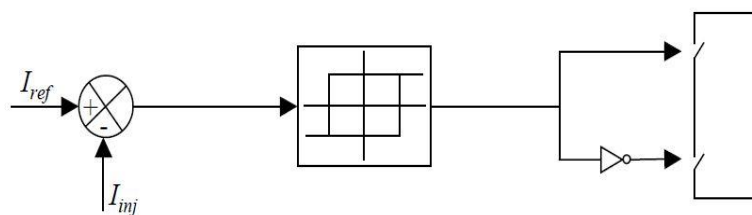
- ✓ la commande par hystérésis
- ✓ la commande par modulation de largeur d'impulsion (MLI).

Dans ce travail nous avons opté pour la commande par hystérésis afin de contrôler l'onduleur

### II.5.1 Commande par hystérésis

La commande par hystérésis, appelée aussi commande en tout ou rien, est une commande non linéaire qui utilise l'erreur existant entre le courant de référence et le courant produit par l'onduleur[30]. L'erreur est comparée à un gabarit appelé bande d'hystérésis. Dès que l'erreur atteint la bande inférieure ou supérieure, un ordre de commande est envoyé de manière à rester à l'intérieur de la bande[31]. La simplicité de la mise en œuvre, comme le montre la Fig. II.12, est le principal atout de cette technique. En revanche, les commutations évoluant librement à l'intérieur de la bande d'hystérésis, on ne peut maîtriser correctement le spectre haute fréquence dû aux fréquences de commutations.

Afin de résoudre ce problème de la maîtrise des fréquences de commutation et de sa répercussion sur les interrupteurs, une autre stratégie de commande peut être proposée à savoir la *commande par hystérésis modulée*[32]. Mais dans cette stratégie de commande, il est difficile de définir la largeur de la bande de l'hystérésis. De plus, le fonctionnement avec une fréquence de commutation quasi fixe nous empêche de conserver l'avantage d'une rapidité illimitée obtenue par la commande par hystérésis[33].



**Figure II. 5:**Principe de commande des courants par hystérésis

## II.6 Conclusion

On a vu dans ce chapitre l'onduleur de tension triphasé à trois niveaux à structure NPC et on a discuté sur sa topologie et la configuration d'un seul bras et aussi présenté les fonctions de connexion et conversion de ce dernier puis on a parlé brièvement sur les stratégies de commande du NPC ou on a cité les deux fameuses techniques (hystérésis et MLI).

Dans le chapitre suivant nous allons présenter l'intégration de l'énergie PV dans le réseau électrique à travers un onduleur à trois niveaux.

# Chapitre III

- Chaîne photovoltaïque

### III.1 Introduction

Dans ce chapitre nous allons donner la description de notre chaîne globale étudiée dans ce mémoire ;qui est constituée d'un générateur photovoltaïque connectée à un réseau par l'intermédiaire d'un hacheur élévateur et un onduleur à trois niveaux [34] dont les paramètres seront cités en annexe A. Nous allons aussi présenter le dimensionnement du régulateur pour le contrôle de la tension du bus continu ( $V_{dc}$ ) [35] ainsi que le contrôle de la puissance instantanée et donner l'interprétation des différents résultats de simulation.

### III.2 Système PV connecté à un réseau électrique

Cette chaîne se compose d'un générateur photovoltaïque et un hacheur survolteur et sa commande puis un onduleur triphasé à trois niveaux à structure NPC et en suite il y a un filtre puis notre réseau comme le montre la figure III.1[36].

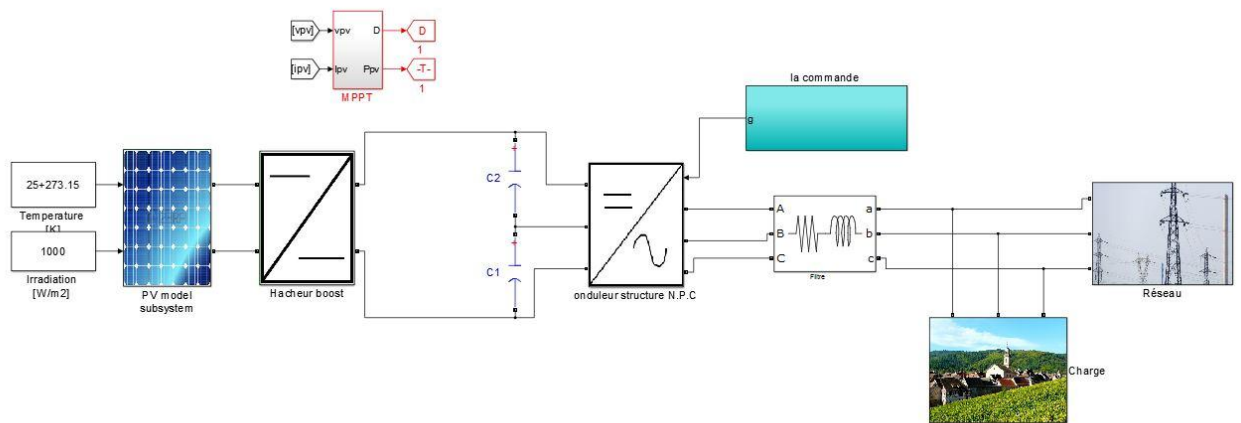


Figure III.1 :schéma globale du système PV connecté au réseau

### III.3 La stratégie de puissance instantanée

Lors de l'intégration de notre chaîne dans le réseau électrique, l'échange des puissances actives et réactives produites par le réseau est contrôlé par une régulation dite en P/Q (théorie de p\_q). Le but de ce contrôle est d'imposer les puissances actives et réactive injectées, par le GPV, au nœud de connexion, en utilisant la transformation de Concordia pour la tentions du réseau  $V_{Sabc}$  et le courant de la charge  $I_{Iabc}$ , ces deux derniers vont passer d'une référence stationnaire (abc) à une référence ( $\alpha\beta$ ) selon l'équation [37]:

$$V_{S\alpha\beta} = MV_{Sabc} \text{ et } I_{I\alpha\beta} = MI_{Iabc} \quad \text{III.1}$$

Avec :

$$M = \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \tag{III.2}$$

en appliquant la théorie p\_q , les puissances respectivement active et réactive peuvent être calculé comme suit [37]:

$$P = V_{s\alpha}I_{l\alpha} + V_{s\beta}I_{l\beta} \tag{III.3}$$

$$Q = V_{s\alpha}I_{l\beta} - V_{s\beta}I_{l\alpha} \tag{III.4}$$

Les équations III.3 et III.4 peuvent être utilisées pour obtenir la référence de courant  $I_{c*\alpha}$  et  $I_{c*\beta}$  dans la transformation de système de référence, tel qu'il est exprimé dans L'équation III.8

$$\begin{bmatrix} I_{c*\alpha} \\ I_{c*\beta} \end{bmatrix} = \frac{1}{V_{s\alpha}^2 + V_{s\beta}^2} \cdot \begin{bmatrix} V_{s\alpha} & V_{s\beta} \\ V_{s\beta} & -V_{s\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P \\ -Q \end{bmatrix} \tag{III.5}$$

En utilisant la transformation inverse, les courants de référence seront calculés comme ceci

$$\begin{bmatrix} I_{c*a} \\ I_{c*b} \\ I_{c*c} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{c*\alpha} \\ I_{c*\beta} \end{bmatrix} \tag{III.6}$$

la Figure III.2 représente le schéma globale de la commande de la puissance de l'onduleur , qui a pour entrée les tentions du réseau  $V_{Sabc}$  et les courants de la charge  $I_{labc}$  plus les courants venant de l'onduleur  $I_{cabc}$  à la sortie la gachette de l'onduelur est attaqué pour contrôlé les interrupteurs de ce denmier.

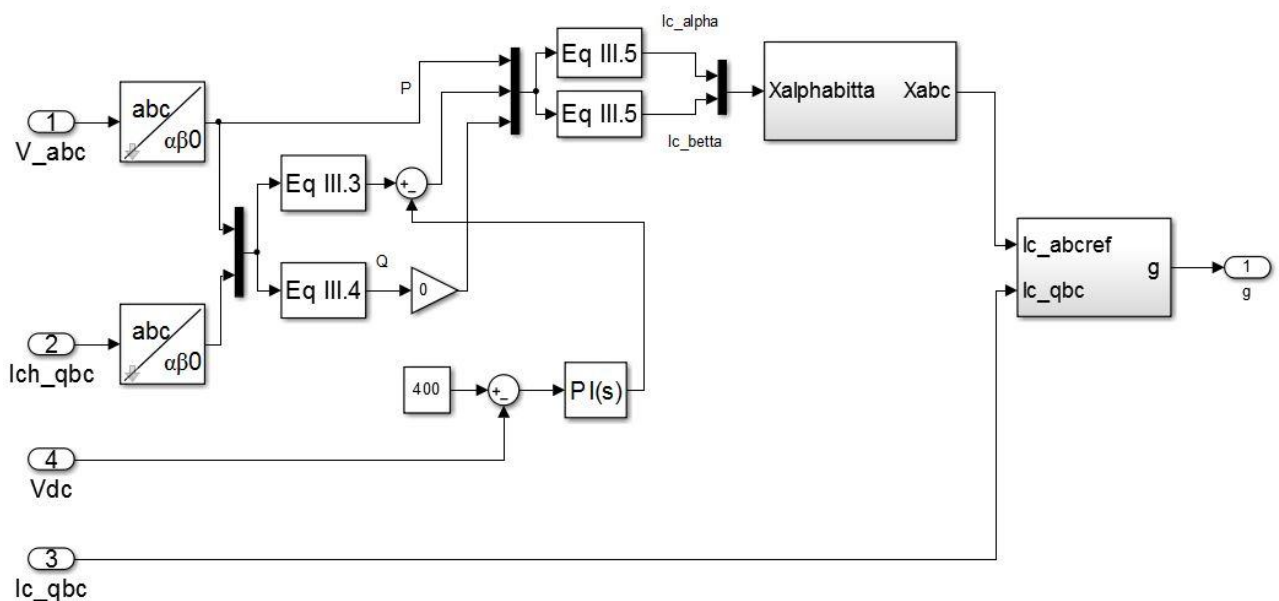
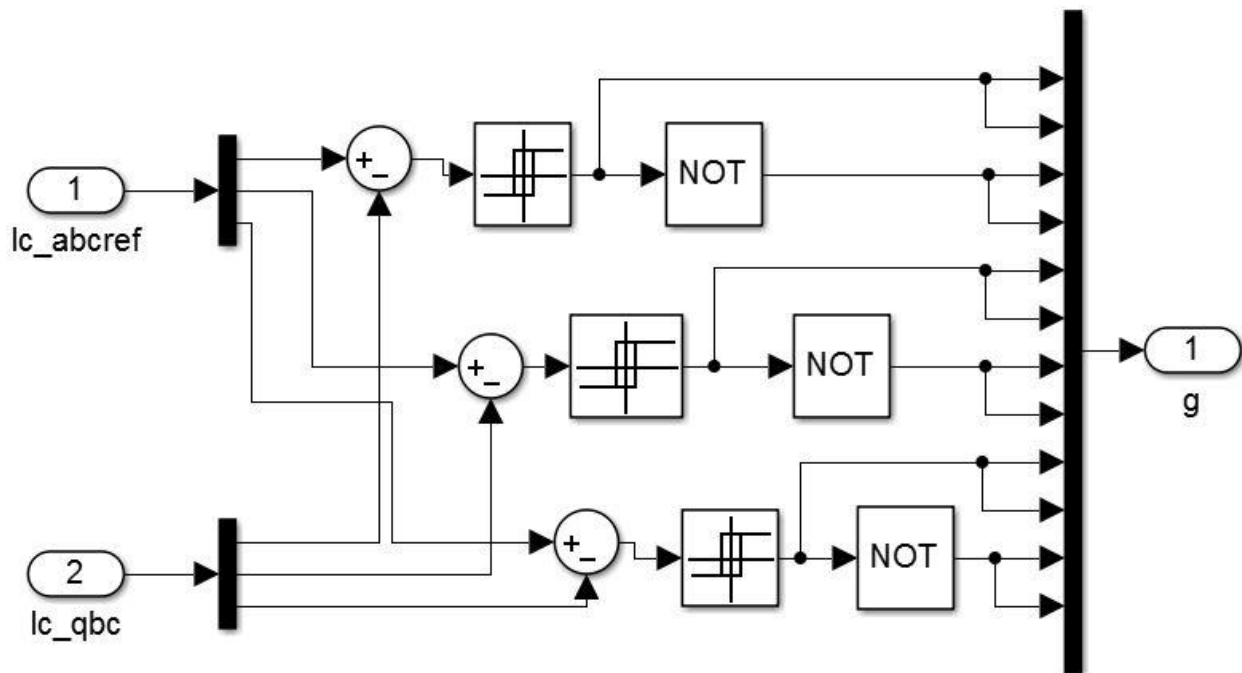


Figure III. 2: Commande de puissance.

La Figure (III.3) représente le bloc de la technique de l'hystérésis injecté dans la commande de l'onduleur ou la sortie va attaquer la gâchette de l'onduleur

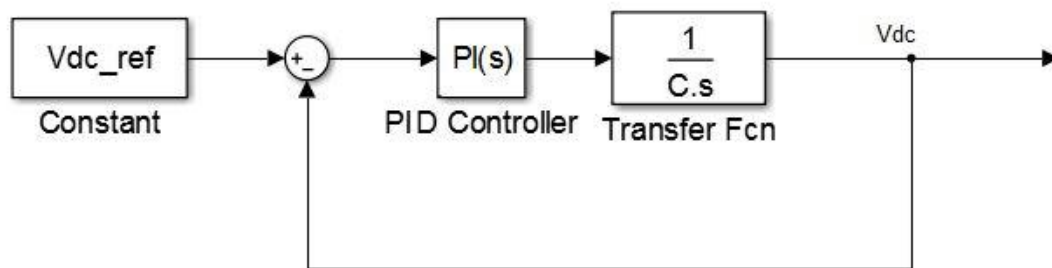


**Figure III.3:** technique de l'hystérésis appliquée à l'onduleur

#### III.4 Contrôle de $V_{dc}$ et dimensionnement du régulateur

Pour un fonctionnement normal des 2 convertisseurs la tension moyenne aux bornes des condensateurs doit être maintenue à une valeur constante[38].

La régulation de cette tension s'effectue en absorbant ou en fournissant de la puissance active au réseau. Suite à un écart entre  $V_{dc\_ref}$  et  $V_{dc}$  la puissance à la sortie du régulateur s'ajoute à la puissance active et donne lieu à un courant fondamental corrigeant la tension  $V_{dc}$ . la boucle suivante représente la régulation avec PI.



**Figure III. 4:** Régulation de  $V_{dc}$

### III.5 Résultats des simulations

Pour construire la chaîne complète, on va raccorder les trois sous-systèmes à savoir le GPV, le hacheur (Boost) et l'onduleur commandé par la technique de contrôle des courants par hystérésis. Cette chaîne va intégrer dans un réseau électrique. L'échange des puissances active et réactive produites par le générateur photovoltaïque est contrôlé par la stratégie de puissance instantanée.

La simulation est effectuée sous l'environnement MATLAB/SymPowerSystems. La chaîne de conversion photovoltaïque alimente une charge de 20KW. A l'instant  $t=0$ sec, on branche notre chaîne au réseau électrique, après 0.25 s on va augmenter la charge pour atteindre 40KW.

Pour le test de  $V_{dc}$  on va fixer la charge à 3 valeurs différentes allant de 12kw à 40 kw pour voir si le système suit la référence des tensions qui vaut 400v.

Les configurations utilisées dans cette simulation sont :

- ✓ Temps de simulation égale 0.5s.
- ✓ Un module solaire de 10 cellules en série et 12 cellules en parallèle.
- ✓ la charge varie de 12kw à 40 kW tout dépend les essais.
- ✓ la température et l'ensoleillement sont maintenus constants ( $1000 \text{ W/m}^2$ ,  $25^\circ \text{ C}$ ).

La Figure III.5 représente la puissance à la sortie du GPV, et d'après les résultats obtenus, notre panneau délivre une puissance maximale qui est égale à 25 KW et on frôle l'effet de MPPT et la méthode de P&O qui force le PV à produire le maximum d'énergie possible.

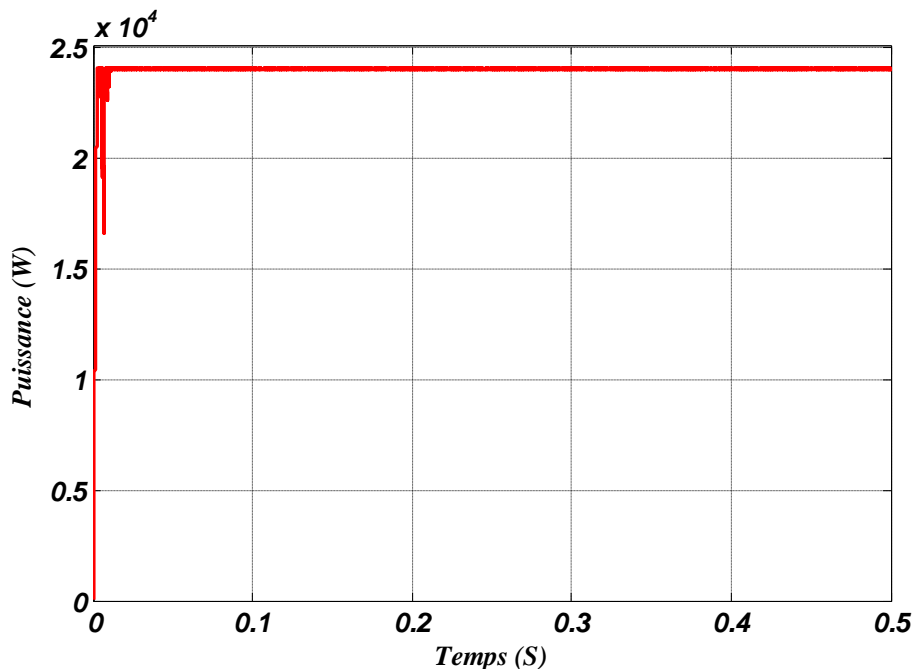


Figure III.5: Puissance délivrée par le GPV.



Figure III.6 représente les puissances pour 3 différentes charges on constate que pour les 3 essais, le rapport entre ses 3 dernières est toujours le même autrement dit la somme de la puissance délivré par le PV et celle du réseau égale à celle qui est consommée par la charge.

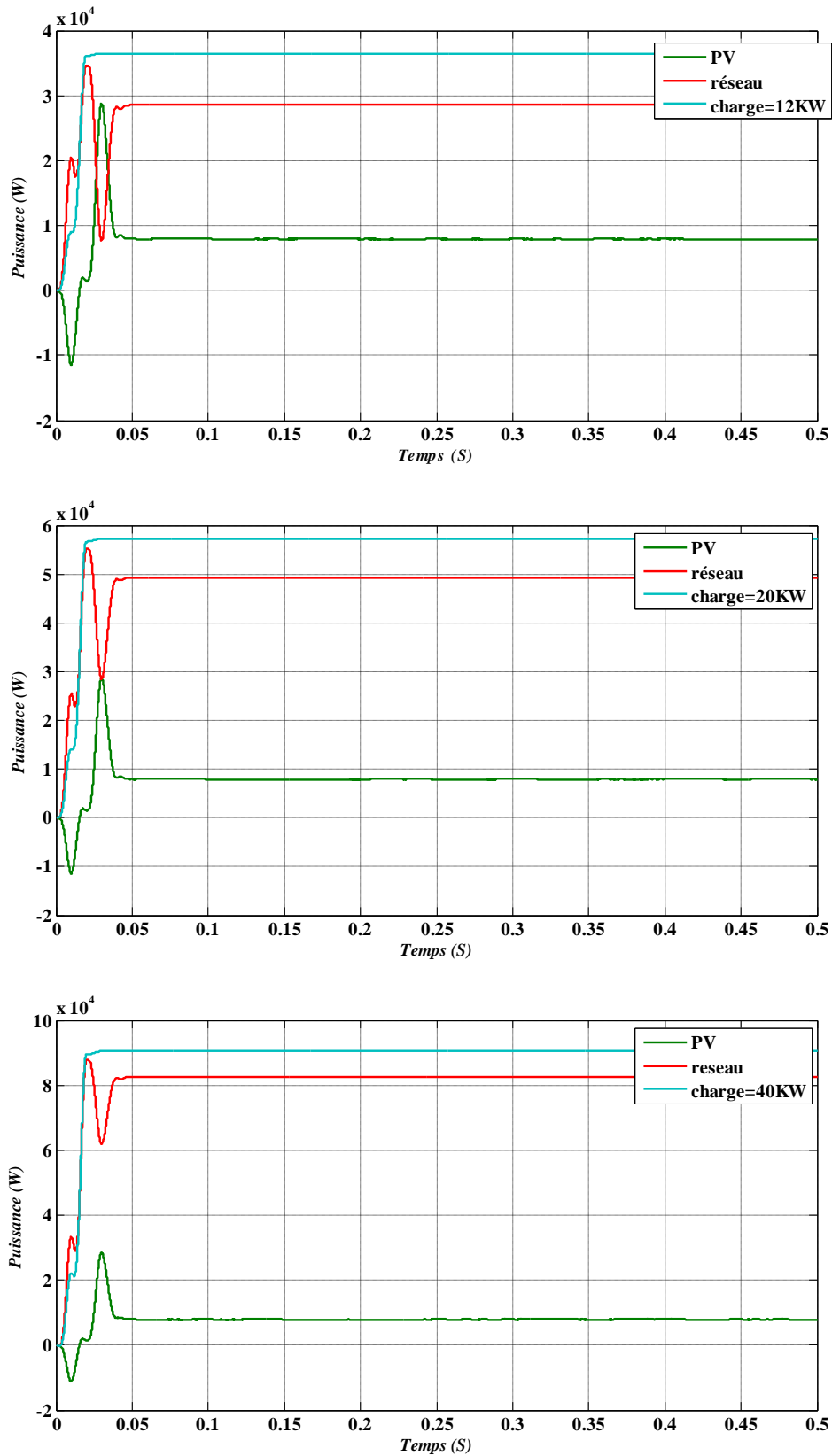
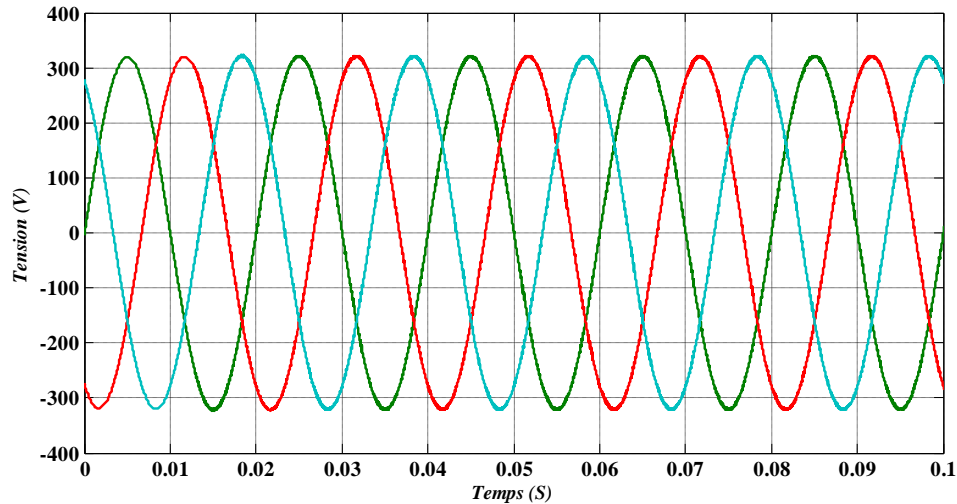


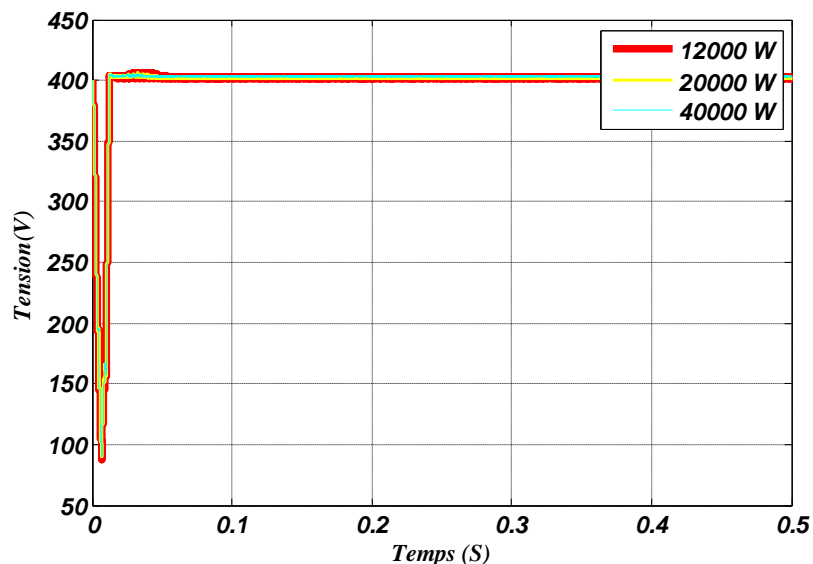
Figure III.6: Puissance pour 3 différentes charges.

La Figure III.7 présente les tensions injectées dans le réseau électrique, ces tensions ont 230V comme valeur efficace et une fréquence de 50Hz, ce sont deux conditions nécessaires pour faire le couplage entre les sources de tensions.



**Figure III.7** Caractéristique des tensions simples à la sortie de l'onduleur.

La Figure III.8 représente la tension  $V_{dc}$  au bornes des 2 condensateurs du bus continu, cet essai est assuré par 3 charges différentes allant de 12KW jusqu'à 40KW ; on remarque une chute de tension qui atteint 100V puis la tension  $V_{dc}$  suit sa référence  $V_{dc\text{réf}}=400\text{V}$  rapidement dans les 3 charges et dans les 3 cas ils sont confondus avec la référence.



**Figure III.8:** caractéristique de la tension  $V_{dc}$  pour 3 charges différentes

La Figure III.9 représente la tension  $V_{dc}$  mais cette fois pour une charge variable, on constate que la chute de tension aux environs de 100 V au début de simulation puis elle reprend sa consigne

qui vaut 400V, on remarque aussi une légère fluctuation qui reprend vite la référence mais cette fois avec un écart qui est négligeable.

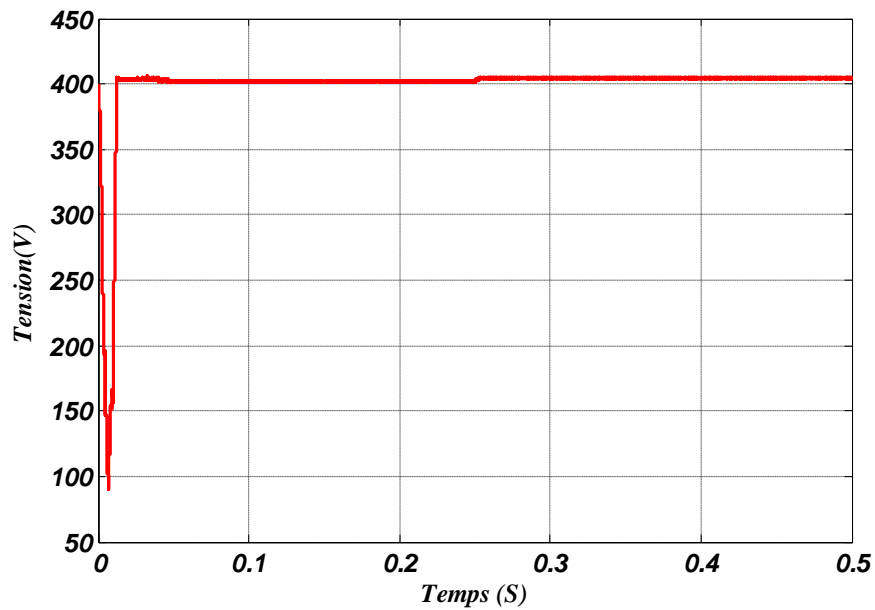


Figure III.9 caractéristique de la tension  $V_{dc}$  pour une charge variable.

La Figure III.10 représente le courant débité par le réseau avec son zoom, il est évident que l'augmentation de la puissance de la charge après 0.25 s oblige le réseau à produire un courant important.

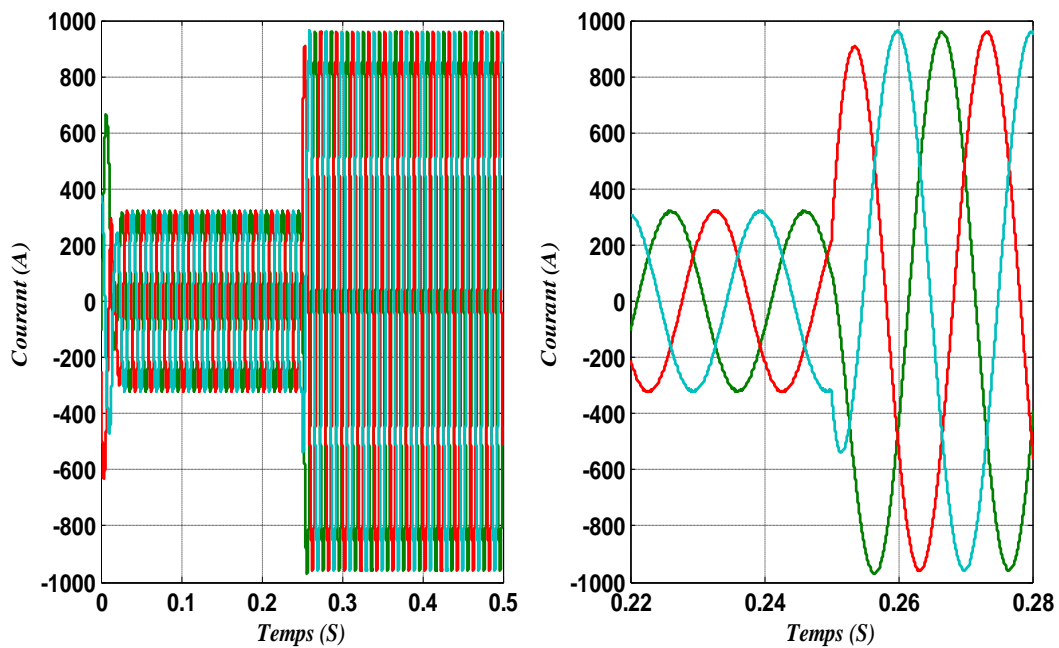
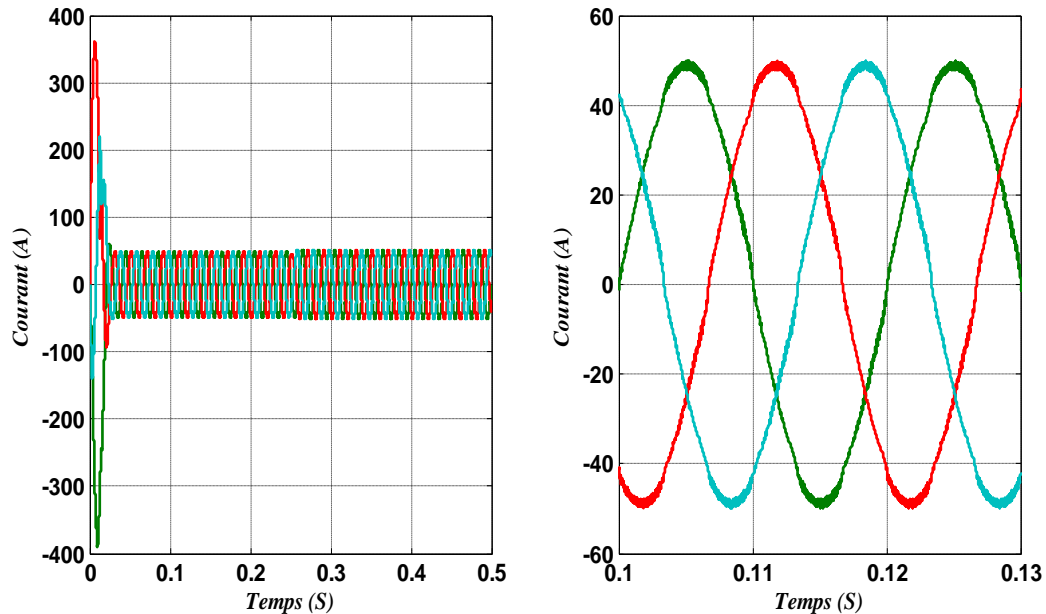


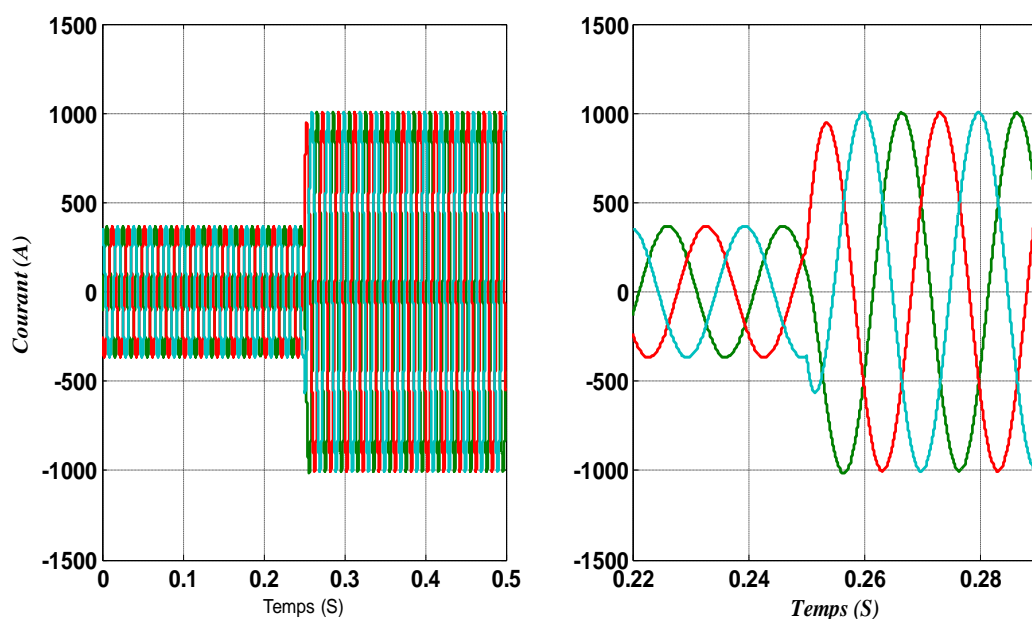
Figure III.10: Caractéristique des courants de réseau électrique.

La Figure III.11 représente l'allure des courants sortants du PV et son zoom, ils ont un  $I_{eff}$  qui est proche de 35A est qui est constant le long de la simulation, donc notre PV garde sa puissance quel que soit la variation de la charge et cette puissance qu'il délivre va soulager notre réseau suite à l'augmentation de la charge.



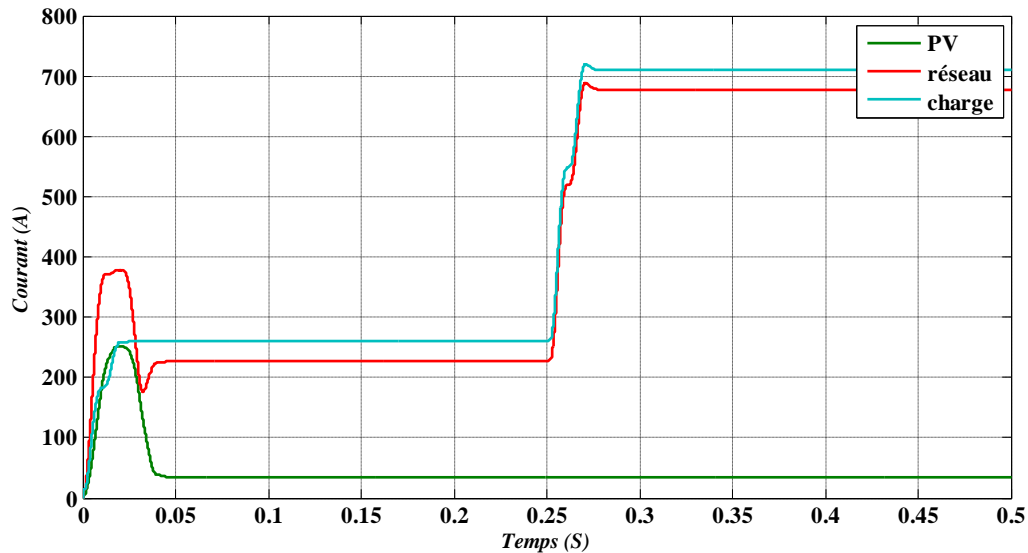
**Figure III.11:**Caractéristique des courants à la sortie de l'onduleur.

La Figure III.12 présente Le courant de charge et son zoom. Il montre l'appel de courant après 0.25s suite à l'augmentation de la puissance de charge. Par observation on peut conclure que le courant de charge est égal à la somme de courant débité par le générateur photovoltaïque et le courant de réseau, donc notre générateur photovoltaïque soulage le réseau électrique.



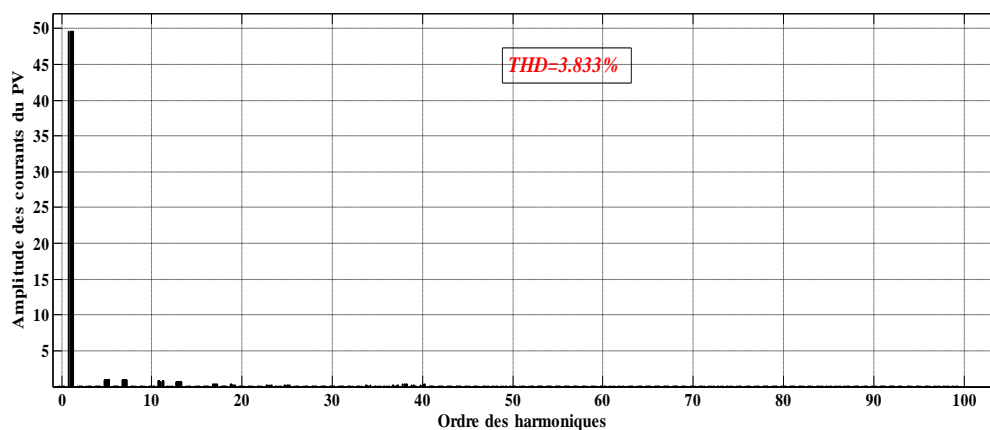
**Figure III.12:**Caractéristique des courants de la charge.

La Figure III.13 présente les courants effacés pour les trois principaux éléments de notre chaîne qui sont le PV le réseau et la charge, comme c'est déjà mentionné ultérieurement, il est clair que le courant du PV est toujours constant et celui du réseau augmente après 0.25 s à cause de l'appel de la charge, et il est évident que le courant de cette dernière reste toujours la somme des deux premiers.



**Figure III.13:** La valeur efficace des 3 trois courants de la chaîne.

Figure III.14 représente les THD pour le PV, réseau et la charge qui vaut 3.83% et 0.18% et 0.011% respectivement. On constate que ses THD sont inférieures à 5% donc on a amélioré la qualité d'énergie et la condition d'intégration du PV au réseau est vérifiée donc notre PV n'est pas polluant. Ceci est dû à l'utilisation de l'onduleur à trois niveaux.



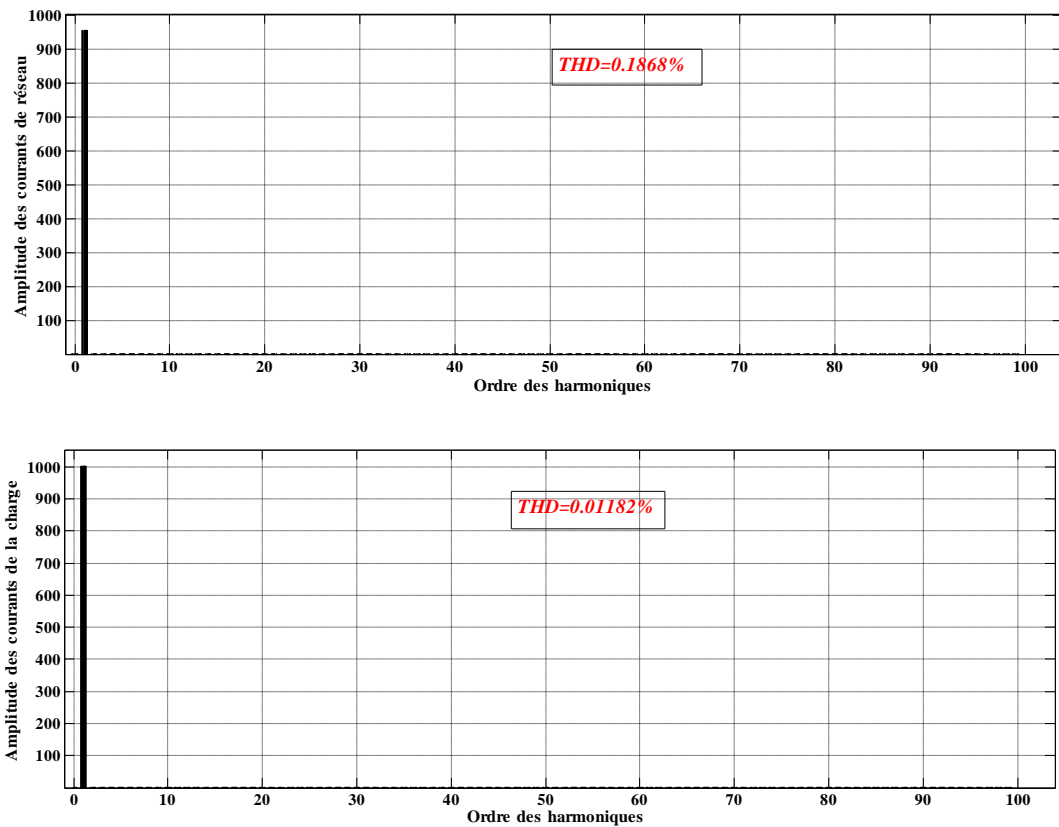
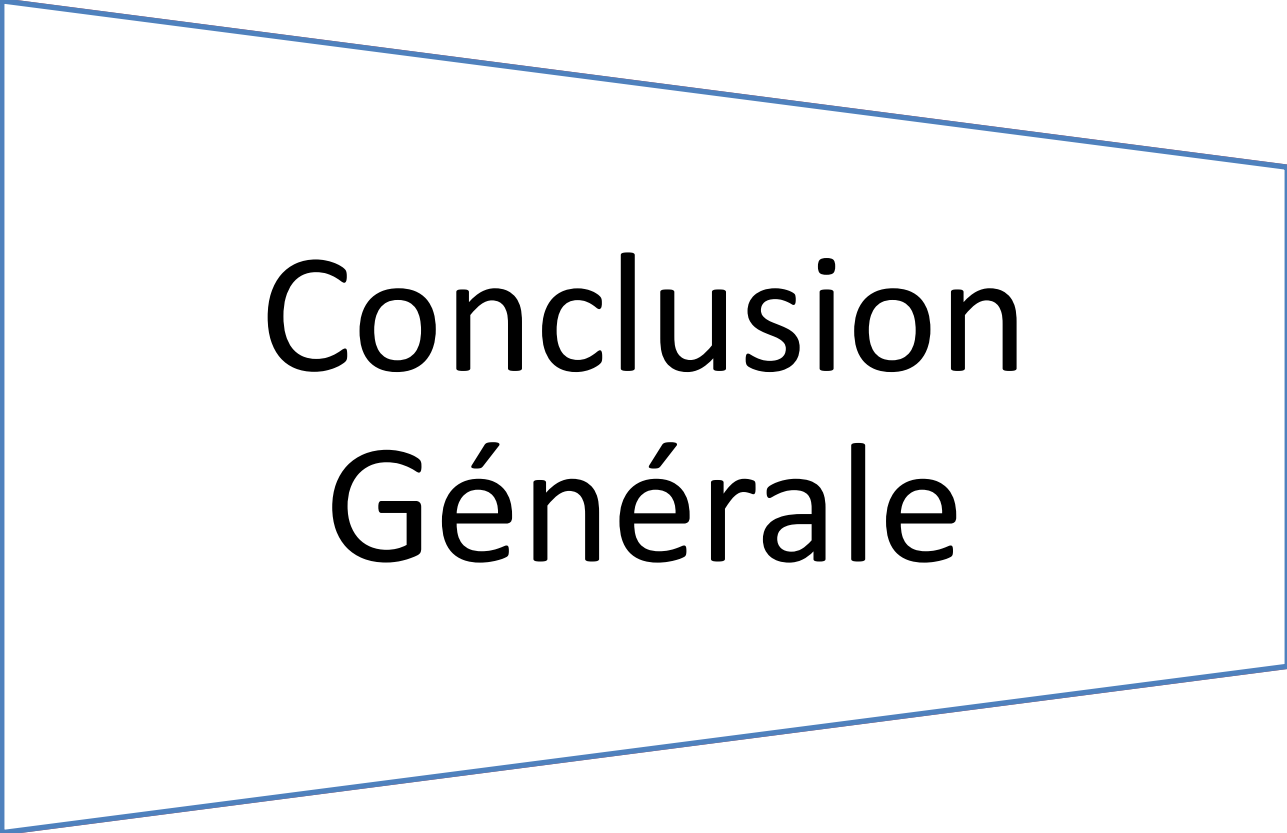


Figure III.14:THD pour les courants.

### III.6 Conclusion

On a vu dans ce chapitre la structure globale de la chaîne de conversion solaire couplée au réseau électrique. La stratégie de commande par la puissance instantanée donne des meilleures performances avec des régimes transitoires très rapides et l'utilisation de l'onduleur à 3 niveaux a donné une très bonne qualité d'énergie donc un réseau moins pollué.



# Conclusion Générale

# Conclusion générale

---

## Conclusion générale

L'énergie solaire est la base de toutes les formes d'énergies conventionnelles et renouvelables. L'énergie solaire photovoltaïque a de nombreux avantages autant sur le plan environnemental qu'économique dans la mesure où son utilisation n'émet aucun gaz à effet de serre. Avantageux sur le plan économique car de nombreuses firmes spécialisées dans la fabrication de cellules solaires et de système d'interfaçage du photovoltaïque avec le réseau ont vu le jour.

Le travail qu'on a présenté porte sur l'analyse et la modélisation en suite la simulation du fonctionnement électrique d'un système photovoltaïque (PV) raccordé au réseau à basse tension et adapté par une commande numérique (commande MPPT) assurant la poursuite de la puissance maximale fournie par le générateur PV. Dans un premier temps, on a donné des généralités sur les systèmes PV, principe de l'effet PV, cellule PV.

On a aussi étudié les types de convertisseurs les plus fréquemment utilisés dans les systèmes photovoltaïques. On parle de l'hacheur survolteur (Boost) et l'onduleur triphasé à trois niveaux à structure N.P.C.

Puis on a décrit le mécanisme de la poursuite pour l'extraction de la puissance maximale sous différentes conditions de fonctionnement par la méthode MPPT et plus précisément la méthode citée avant est P&O.

En deuxième temps, on a discuté minutieusement tout ce qui concerne notre type d'onduleur choisi de sa structure à son introduction dans la chaîne on passant par ses différentes commandes possible et topologies et configuration et modélisation.

A la fin on a terminé par une brève introduction sur les conditions d'essais de la chaîne globale comme la température et l'éclairement, puis introduis un schéma de la chaîne complète.

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

Le générateur PV fournie une puissance impotente ce qui valide l'efficacité de la méthode MPPT en ce qui concerne l'extraction de la puissance maximale possible du PV.

Ensuite, la sortie de l'onduleur donne environ 20% de la puissance produite auparavant ceci à un rapport avec le contrôle de la puissance dans la chaîne mais ça n'a pas empêché d'avoir une tension constante dans le bus continu après une chute de tension dans le régime transitoire .

En terme de qualité d'énergie qui circule dans la chaîne ,l'utilisation de l'onduleur 3 niveaux a amélioré la qualité menant un a réseau non pollué avec des taux de THD qui sont moins de 5%.



## Conclusion générale

---

Finalement afin de poursuivre et compléter ce modeste travail, beaucoup de voies restent à explorer comme :

- ✓ utiliser de nouvelles techniques de commande plus avancées comme la logique floue pour MPPT.
- ✓ faire une étude pour constater le comportement de notre réseau face à des défauts plus importants (différents types de courts-circuits).
- ✓ étudier une autre configuration de réseau hybride (solaire éolien).



# Annexes

**ANNEXE A :**

Paramètres de panneau photovoltaïque :

- Résistance en série :  $R_s = 0.221\Omega$ ;
- Résistance en parallèle :  $R_p = 415.405\Omega$ ;
- Nombre des cellules en parallèles :  $N_{pp} = 12$ ;
- Nombre des cellules en séries :  $N_{ss} = 10$ ;
- Le photo-courant généré dans les conditions nominales :  
 $I_{pvn} = 8.21A$ ;
- Le photo-courant généré :  $I_{pv} = 8.21A$ ;
- La tension en circuit ouvert dans les conditions nominales :  
 $V_{ocn} = 32.9V$ ;
- La tension en circuit ouvert :  $V_{oc} = 32.9V$ ;
- Courant de saturation en circuit ouvert :  $I_{sc} = 8.214A$ ;
- Courant maximal :  $I_{mp} = 7.61A$ ;
- Tension maximal :  $V_{mp} = 26.3V$ ;
- Tension/température coefficient :  $K_v = 0,1230$ ;
- Courant/température coefficient :  $K_i = 0,0032$ ;
- L'ensoleillement nominal :  $G_n = 1000\text{w/m}^2$ ;
- Le facteur de non idéalité de la jonction P-N :  $a = 1.3$ ;
- La constante de Boltzmann :  $K = 1.3806503 \cdot 10^{-23} J / K$ ;
- La charge de l'électron :  $q = 1.60217646 \cdot 10^{-19} C$ ;

La température de la jonction dans les conditions nominales :  $T_n = 298.15K$ ;

**ANNEXE B :**

1) Paramètres hacheur survolteur (Boost) :

- Capacité :  $C_h = 10^{-3} F$
- Inductance :  $L_h = 11 \cdot 10^{-6} H$

2) Les condensateurs du bus continu :

- $C_1 = C_2 = 220e-6$

**ANNEXE C :**

- *Filtre RL raccordé à l'onduleur :*

$$R=0.0050 \text{ Ohm}$$

$$L=9.10^{-3} \text{ H}$$

- *Filtre RL raccordé au réseau:*

$$R=0.0035 \text{ Ohm}$$

$$L=2.3*10^{-5} \text{ H}$$

- *Filtre RL raccordé à la charge:*

$$R=8.2*10^{-4} \text{ Ohm}$$

$$L=8.2*10^{-4} \text{ H}$$



# Bibliographie

- [1] M. MERAD-BOUDIA, “Injection de l’électricité produite par les énergies renouvelables dans le réseau électrique,” 2010.
- [2] G. L. Bourque, *Le modèle québécois de développement: de l’émergence au renouvellement*. PUQ, 2000.
- [3] K. Mamadou, “Prévision de la disponibilité énergétique des accumulateurs électrochimiques par estimation d’Etats d’Energie (SoE),” Institut National Polytechnique de Grenoble-INPG, 2010.
- [4] A. Saliha, “Modélisation et commande d’un système de pompage photovoltaïque,” 2015.
- [5] T. AMEL, “Centrales Solaires.”
- [6] R. Gibrat, “Source de l’énergie des marées: énergie cinétique de la Terre ou énergie thermique du Soleil?,” *Houille Blanche*, no. 2, pp. 255–266, 1962.
- [7] S. Petibon, “Nouvelles architectures distribuées de gestion et conversion de l’énergie pour les applications photovoltaïques,” Université Paul Sabatier-Toulouse III, 2009.
- [8] H. Le Treut and J.-M. Jancovici, *L’effet de serre: allons-nous changer le climat?* Editions Flammarion, 2011.
- [9] J.-P. DELÉAGE, “Nucléaire et croissance: critique écologique,” 1978.
- [10] R. Balian, “Physique fondamentale et énergétique: les multiples visages de l’énergie,” in *Conférence de l’École d’Été de Physique, Caen: Académie des sciences*, 2001.
- [11] M. Viseur, “Etude de faisabilité de l’utilisation de l’hydrogène comme vecteur alternatif d’énergie,” *Mém. Master2007-2008 Univ. Libre Brux.*, 2008.
- [12] Z. NAKOUL, “OPTIMISATION D’UNE CENTRALE SOLAIRE A BASE D’UN GENERATEUR PV [Application Aux Sites Tlemcen Et Bouzaréah],” 2010.
- [13] A. Labouret and M. Viloz, *Installations photovoltaïques-5e éd.: Conception et dimensionnement d’installations raccordées au réseau*. Dunod, 2012.
- [14] O. Gergaud, “Modélisation énergétique et optimisation économique d’un système de production éolien et photovoltaïque couplé au réseau et associé à un accumulateur,” École normale supérieure de Cachan-ENS Cachan, 2002.
- [15] F. Ghaleb, “Lummière et Cellule Solaire,” 2016.
- [16] A. CHEBANA, “contrôle d un système photovoltaïque connecte au reseau,” 2015.
- [17] A. Benzahia, “Réalisation d’un prototype d’un système de poursuite solaire,” 2015.

- [18] I. Kravtsoff, "Optimisation d'un système hybride de génération d'énergie électrique permettant de minimiser la consommation et l'empreinte environnementale.," Supélec, 2015.
- [19] A.-M. Lienhardt, "Etude de la Commande et de l'Observation d'une Nouvelle Structure de Conversion d'Energie de type SMC (Convertisseur Multicellulaire Superposé)," 22-Nov-2006. [Online]. Available: <http://ethesis.inp-toulouse.fr/archive/00000335/>. [Accessed: 30-May-2016].
- [20] C. Benzazah, M. A. Lafkih, and L. Lazrak, "Etude comparative entre deux topologies d'onduleurs triphasés, classique à 2-niveaux et NPC à 3-niveaux avec deux différentes méthodes de commande MLI-ST et SWM [Comparative study between two topologies three-phase inverters, conventional 2-level and NPC 3-level with two methods different of control, SPWM and SWM]," *Int. J. Innov. Appl. Stud.*, vol. 9, no. 2, p. 841, 2014.
- [21] C.-M. Wu, "Etude prospective de la topologie MMC et du packaging 3D pour la réalisation d'un variateur de vitesse en moyenne tension.," Université de Grenoble, 2015.
- [22] A. CALDEIRA, "Développement d'un nouvel onduleur mixte à 5 niveaux pour les applications photovoltaïques domestiques 3 kW."
- [23] L. Croci, "Gestion de l'énergie dans un système multi-sources photovoltaïque et éolien avec stockage hybride batteries/supercondensateurs.," Université de Poitiers, 2013.
- [24] T. Abdelkrim and E. M. Berkouk, "Commande non linéaire par mode de glissement d'un filtre actif parallèle à sept niveaux," in *Conférence Internationale Francophone d'Automatique CIFA*, 2008.
- [25] M. Bouarroudj-Berkani, "Etude de la fatigue thermo-mécanique de modules électroniques de puissance en ambiance de températures élevées pour des applications de traction de véhicules électriques et hybrides," École normale supérieure de Cachan-ENS Cachan, 2008.
- [26] M. Kudelski, "Analyse et conception de moteurs synchrones chemisés à commutation électronique," 1998.
- [27] M. A. BERTHON, M. G. GATEAU, M. A. RUFER, M. J.-P. FERRIEUX, M. D. FREY, M. P.-O. JEANNIN, and M. H. Stephan, "Onduleur triphasé à structure innovante pour application aéronautique."
- [28] S. L. Capitaneau, "Optimisation de la fonction MLI d'un onduleur de tension deux-niveaux," 2002.

- [29] A. De Bernardinis, “Architectures de convertisseurs statiques et contrôle-commande associé pour les systèmes pile à combustible et mécatroniques de puissance: Application aux véhicules électriques,” Ecole Normale Supérieure de Cachan, 2015.
- [30] G. Condon, “Condensation de Bose-Einstein: des potentiels périodiques d’extension finie aux manipulations dans l’espace des phases,” Université de Toulouse, Université Toulouse III-Paul Sabatier, 2015.
- [31] A. Kolli, “Analyse d’une architecture de puissance dédiée aux modes traction-recharge dans un véhicule électrique. Optimisation de la commande et fonctionnement en mode dégradé,” Université Paris Sud-Paris XI, 2013.
- [32] M. Brunet, “Composants passifs intégrés dédiés à la conversion et au stockage de l’énergie,” Université Paul Sabatier-Toulouse III, 2013.
- [33] L. Belhadji, “Optimisation du contrôle commande d’un système hydraulique réversible à vitesse variable,” Grenoble, 2013.
- [34] R. Electricques, “Contribution à l’Etude des Performances des Onduleurs Multiniveaux sur les Réseaux de Distribution,” UNIVERSITE DE BISKRA, 2014.
- [35] J.-Y. Le Boudec and M. Paolone, “Pilotage automatique des réseaux de distribution en temps réel,” *Bull. SEVVSE*, vol. 2015, no. EPFL-ARTICLE-213150, pp. 37–40, 2015.
- [36] M. P. Behera and P. K. Ray, “Three-phase series-connected photovoltaic generator for harmonic and reactive power compensation with battery energy storage device,” *Trans. Inst. Meas. Control*, p. 142331216629199, 2016.
- [37] G. Delamare, “Convertisseurs DC/DC à base de HFETs GaN pour applications spatiales,” 2015.



## ملخص :

يستند العمل المقدم في هذه المذكرة على دمج الطاقة الكهروضوئية في شبكة للجهد المنخفض من خلال محول (مستمر-متناوب) ذو ثلاثة مستويات وطريقة لاستخراج الطاقة القصوى . النظام في هذه الدراسة يتكون من ألواح شمسية التي تعتبر مصدر للطاقة المتجددة و محول مستمر- مستمر بالإضافة إلى محول مستمر - متناوب ذو ثلاثة مستويات. يستعمل هذا الأخير لتحسين نوعية الطاقة الكهربائية بشرط أن تكون طريقة التحكم مختارة بعناية للحصول على توتر متوافق مع الشبكة بأقل نسبة شوائب.

## كلمات مفتاحية:

الكهروضوئية , نظام تعقب الإستطاعة , محول مستمر- مستمر, محول مستمر - متناوب, مراقبة الإستطاعة.

## Résumé :

Le travail présenté dans ce mémoire est basé sur l'intégration d'un système Photovoltaïque PV dans le réseau électrique à basse tension à travers un onduleur à trois niveaux et la méthode MPPT pour extraire le maximum de puissance . Le système considéré dans cette étude se compose de PV en tant que source d'énergie renouvelable et un onduleur à trois niveaux à structure NPC. L'utilisation de ce dernier permet d'améliorer la qualité d'énergie à condition qu'il soit doté d'une commande adéquate et judicieusement choisie afin d'avoir une tension compatible avec le réseau et avec le minimum d'harmonique.

**Mots clés :** *Photovoltaïque, MPPT, Convertisseur DC-DC, Convertisseur DC-AC*

Contrôle des puissances