

N° Ordre...../Faculté/UMBB/2016

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE  
**UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA-BOUMERDES**



**Faculté des Hydrocarbures et de la Chimie**

**Mémoire de Fin d'Etudes**  
**En vue de l'obtention du diplôme :**

**MASTER**

Présenté par

**TCHINA KARIMA**  
**RADJA SAMIA**

Filière : Hydrocarbures  
Option : Génie Électrique : Électricité Industrielle

**Thème**

**Insertion d'une source photovoltaïque au  
sein d'un réseau d'énergie**

**Devant le jury :**

TADJER SID AHMED	MAA	UMBB	Président
KHELIFI FATEH	MAA	UMBB	Examineur
SAHNOUNE FATIHA	MRB	USDB	Examineur
ABDRABBI BOUREZG	MAA	UMBB	Encadreur

Année Universitaire : 2015/2016

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE





## Dédicace

*Je dédie ce modeste travail :*

*A ma mère avec toute m'affection et a mon père avec toute ma reconnaissance, qui n'ont cessé de ma donner depuis ma naissance le courage et durant mon enfance et même a l'âge adulte.*

*A mon cher fiancé Zakaria merci pour votre soutien dans les moments difficiles, pour votre courage et patience.*

*A mon Frère : Ali, Mouloud, Billal, A.ellatif, A.elhakim.*

*A mes chères sœurs : Khadidja, Nacéra, F.zohra.*

*A mon beau frère : Mhamed, Rabah.*

*A ma niece: Karima.*

*A ma tante, ma cousine Halla, samer, ma cousine Zineb.*

*A Ma binôme Samia pour ça présence durant la préparation de ce travail.*

*A toute, mes amis et surtout : F.Zohra, Rym, Fatima, Radia.*

*A mes amis et collègues membre de groupe MAEI 2011.*

**Karima**

# LISTE DES TABLEAUX

---

## **Chapitre1**

**Tableau I.1** : les paramètres du module PV modélisé..... 28

---

## **Chapitre3**

**Tableau III.1** : tableau d'excitation des interrupteurs de l'onduleur NPC. .... 51

# LISTE DES FIGURES

## Chapitre 1

<b>Figure I.1</b> : présente l'enchaînement de ces étapes .....	6
<b>Figure I.2</b> : schéma de la structure basique d'une cellule PV. ....	8
<b>Figure I.3</b> : Le principe de fonctionnement d'une cellule solaire .....	9
<b>Figure I.4</b> : Les différentes zones de Caractéristique I(V) d'une cellule PV .....	10
<b>Figure I.5</b> : schéma présenter les caractéristiques électriques d'une cellule PV .....	11
<b>Figure I.6</b> : schéma présenter le montage pour obtenir la caractéristique courant-tension. ....	11
<b>Figure I.7</b> : Modèle idéal à trois paramètres d'une Cellule PV .....	14
<b>Figure I.8</b> : Modèle idéal à Cinque paramètre d'une Cellule PV .....	15
<b>Figure I.9</b> : Modèle à deux diodes à Cinque paramètres d'une Cellule PV .....	17
<b>Figure I.10</b> : Modèle à deux diodes à sept paramètres d'une Cellule PV .....	18
<b>Figure I.11</b> : Modèles à 1 et à deux diodes d'une cellule PV .....	19
<b>Figure I.12</b> : caractéristiques courant-tension en fonction de l'éclairement .....	19
<b>Figure I.13</b> : caractéristiques puissance-tension fonction de l'éclairement .....	20
<b>Figure I.14</b> : caractéristiques courant-tension en fonction de température .....	20
<b>Figure I.15</b> : caractéristiques puissance-tension en fonction de température .....	21
<b>Figure I.16</b> : Influence de la résistance série sur la caractéristique $I=f(V)$ de la cellule PV .....	21
<b>Figure I.17</b> : Influence de la conductance shunt sur la caractéristique $I=f(V)$ de la cellule PV .....	21
<b>Figure I.18</b> : Modèle électrique d'un générateur photovoltaïque .....	22
<b>Figure I.19</b> : La constitution d'un module photovoltaïque .....	23
<b>Figure I.20</b> : association de NS modules solaires en série. ....	24
<b>Figure I.21</b> : association de Np modules solaires en parallèle .....	24
<b>Figure I.22</b> : association mixte Nsx Np modules solaires. ....	25
<b>Figure I.23</b> : les diodes de protection du générateur PV .....	26
<b>Figure I.24</b> : modèle simulink représenter schéma de block PV.....	28
<b>Figure I.25</b> : modèle simulink du générateur photovoltaïque .....	28
<b>Figure I.26</b> : Caractéristiques électriques du module PV a température et éclairement constants .....	29
<b>Figure I.27</b> : Caractéristiques électriques du module PV pour différent éclairement et une température cts ( $T= 25\text{ C}^\circ$ ) .....	29
<b>Figure I.28</b> : Caractéristiques électriques du module PV pour différent température et un éclairement cts ( $E= 1000\text{ W/M}^2$ ).....	30

## Chapitre 2

<b>Figure II.1</b> : Schéma de principe d'un type d'alimentation à découpage .....	34
<b>Figure II.2</b> : Chronogrammes de courant et tension d'un hacheur boost.....	35

<b>Figure II.3</b> : présente les composants typiques d'un convertisseur vers le haut .....	36
<b>Figure II.4</b> : Schéma synoptique d'un système photovoltaïque avec MPPT .....	37
<b>Figure II.5</b> : Recherche et recouvrement du Point de Puissance Maximal .....	39
<b>Figure II.6</b> : Schéma de converge vers le PPM par P&O .....	40
<b>Figure II.7</b> : l'organigramme de l'algorithme de la méthode 'P&O' .....	41
<b>Figure II.8</b> : Convertisseur (DC/DC) survolteur de tension (type boost).....	42
<b>Figure II.9</b> : Signal commande DC/DC (gâchette- d'hacheur) .....	42
<b>Figure II.10</b> : Résultats de simulation de la tension d'entrée (jaune) et de la sortie (violet) du hacheur survolteur .....	42
<b>Figure II.11</b> : Résultats de simulation de la valeur du courant d'entrée (jaune) de sortie (violet) du hacheur survolteur .....	43
<b>Figure II.12</b> : Résultats de simulation de la puissance sortie (jaune) et d'entrée (violet) du hacheur survolteur .....	43
<b>Figure II.13</b> : Schéma block de la commande MPPT .....	43
<b>Figure II.14</b> : Schéma MATLAB SIMULINK d'un système photovoltaïque avec la commande MPPT (P&O). .....	44
<b>Figure II.15</b> : rapport cyclique $\alpha$ de MPPT .....	44
<b>Figure II.16</b> : Résultats de simulation de la tension d'entrée (jaune) et de la sortie (violet) du hacheur survolteur .....	45
<b>Figure II.17</b> : Résultats de simulation de la tension d'entrée (jaune) et de la sortie (violet) du hacheur survolteur pour un éclairage variable .....	45
<b>Figure II.18</b> : Résultats de simulation de la tension d'entrée (jaune) et de la sortie (violet) du hacheur survolteur pour une température variable .....	45
<b>Figure II.19</b> : Résultats de simulation de la valeur du courant d'entrée (jaune) de sortie (violet) du hacheur survolteur .....	46
<b>Figure II.20</b> : Résultats de simulation de la puissance sortie (jaune) et d'entrée (violet) du hacheur survolteur.....	46
<b>Figure II.21</b> : Résultats de simulation de la puissance sortie (jaune) et d'entrée (violet) du hacheur survolteur pour un éclairage variable (A) et pour une température variable (B). .....	46

### Chapitre 3

<b>Figure III. 1</b> : Schéma synoptique d'un système photovoltaïque avec des convertisseurs (DC/DC et DC/AC) et les commandes (MPPT et MLI).....	48
<b>Figure III.2</b> : convertisseur Clampé par le Neutre (NPC) .....	49
<b>Figure III.3</b> : onduleur de tension triphasé a trois niveaux à structure NPC.....	49

<b>Figure III.4</b> : Interrupteur bidirectionnel équivalent de la paire Transistor – diode .....	50
<b>Figure III. 5</b> : un bras (A) d'onduleur NPC de trois niveaux .....	50
<b>Figure III.6</b> : schéma présente le Séquences 1 d un bras (A) d'onduleur NPC de trois niveaux .....	50
<b>Figure III.7</b> : schéma présente le Séquences 2 d un bras (A) d'onduleur NPC de trois niveaux .....	51
<b>Figure III.8</b> : schéma présente le Séquences 3 d un bras (A) d'onduleur NPC de trois niveaux Les 3 états ou séquences de commutation possibles sont résumés au tableau (3-A). .....	51
<b>Figure III.9</b> : Séquences de fonctionnement d'un bras d'onduleur NPC à trois niveaux. ....	52
<b>Figure III.10</b> : Modèle de connaissance global de l'onduleur triphasé à trios niveaux .....	56
<b>Figure III.11</b> : Schéma de principe de la technique triangulo-sinusoïdale. ....	59
<b>Figure III. 12</b> : schéma de circuit monophasé d'un onduleur de tension.....	61
<b>Figure III.13</b> : schéma du signal de commande à MLI et la tension de sortie d'un onduleur monophasé .....	61
<b>Figure III.14</b> : contrôle de courant par hystérésis .....	62
<b>Figure III.15</b> : commande des interrupteurs par hystérésis .....	62
<b>Figure III.16</b> : Schéma block de l'onduleur à trois niveaux à structure NPC alimenté par une source continue et commandé par MLI .....	62
<b>Figure III.17</b> : Schéma MATLAB SIMULINK d'un système photovoltaïque avec un hacheur boost reliée au l'onduleur à trois niveaux à structure NPC commandé par MLI .....	63
<b>Figure III.18</b> : Schéma MATLAB SIMULINK de la commande MLI. ....	63
<b>Figure III.19</b> : Caractéristique des signaux de commande et le signal de sortie de MLI .....	63
<b>Figure III.20</b> : Résultats de simulation des tensions simple à la sortie du l'onduleur à trois niveaux à structure NPC .....	64
<b>Figure III.21</b> : Résultats de simulation des tensions composée à la sortie du l'onduleur à trois niveaux à structure NPC .....	64
<b>Figure III.22</b> : Résultats de simulation des courants de linge du la sortie de l'onduleur à trois niveaux à structure NPC .....	64

---

## Chapitre 4

<b>Figure IV.1</b> : Schéma générale de production, transport et distribution de l'énergie électrique .....	67
<b>Figure IV.2</b> : schéma représenter la liaison PV au réseau électrique .....	68
<b>Figure IV.3</b> : Schéma électrique de la liaison au réseau électrique. ....	69
<b>Figure IV.4</b> : Représentation macroscopique du modèle et de la commande de la liaison au réseau .....	71
<b>Figure IV.5</b> : schéma bloc du contrôle des courants dans le repère de Park. ....	72

<b>Figure IV.6</b> : Schéma de Blok du champ photovoltaïque .....	79
<b>Figure IV.7</b> : Schéma de simulation du champ photovoltaïque avec un hacheur boost commandé en MPPT de type P&O et une charge $R=30\Omega$ . .....	80
<b>Figure IV.8</b> : Résultats de simulation de du courant de champ PV d'entre (jaune) et de du courant de sortie (violet) du hacheur survolteur .....	80
<b>Figure IV.9</b> : Résultats de simulation de la tension de champ PV d'entre (violet) et de la tension de sortie (jaune) du hacheur survolteur .....	80
<b>Figure IV.10</b> : Résultats de simulation de la puissance de champ PV d'entre (jaune) et de la puissance de sortie (violet) du hacheur survolteur .....	81
<b>Figure IV.11</b> : Résultats de simulation de tension champ PV d'entre (violet) et de sortie (jaune) du hacheur survolteur pour un éclairage variable. ....	81
<b>Figure IV.12</b> : Résultats de simulation de la puissance de champ PV d'entre (jaune) et de sortie (violet) du hacheur survolteur pour un éclairage variable. ....	82
<b>Figure IV.13</b> : Schéma d'un champ photovoltaïque avec un hacheur boost reliée au bus continu d'un onduleur à trois niveaux à structure NPC commandé par MLI et une charge RL .....	82
<b>Figure IV.14</b> : Résultats de simulation du courant de charge. ....	83
<b>Figure IV.15</b> : Résultats de simulation des tensions compos de la charge. ....	83
<b>Figure IV.16</b> : Résultats de simulation des tensions simple de la charge. ....	83
<b>Figure IV.17</b> : Schéma d'un champ photovoltaïque avec un hacheur boost reliée au bus continu d'un onduleur à trois niveaux à structure NPC commandé par MLI et une charge $R = 100\Omega$ et $L = 0.1H$ avec filtre $L=0.02H$ et $C=16mf$ . ....	84
<b>Figure IV.18</b> : Schéma de simulation du filtre LC .....	84
<b>Figure IV.19</b> : Résultats de simulation de la tension PV (rouge), de la tension d'entre (Belau) et de sortie (violet) du l'onduleur son la charge RL. ....	84
<b>Figure IV.20</b> : Résultats de simulation des tensions composées, des tensions simple et des courants de charge à présence de filtre .....	85
<b>Figure IV.21</b> : Schéma de simulation du réseau BT (220/380) de fréquence $f=50$ HZ. ....	86
<b>Figure IV.22</b> : Schéma de simulation global PV raccordé au réseau .....	86
<b>Figure IV.23</b> : résultats de courant $I_{abc}$ a et de tension $V_{abc}$ (calculer en pu avec une tension efficaces de 230V et une référence de 400V) de réseau. ....	86
<b>Figure IV.24</b> : résultats des tensions composer a la sorte de filtre .....	87
<b>Figure IV .25</b> : Le courant injecté par l onduleur (violer) et la tension de réseaux (jan) .....	87
<b>Figure IV.26</b> : Résultats de simulation des courants de GPV injecté par l'onduleur, de réseau et de la charge courants de charge .....	87
<b>Figure IV.27</b> : résultats des tensions simples et les courants de la charge .....	88

## *Symboles et abréviations*

---

### Chapitre : 1

PV : Photovoltaïque

PM : Puissance maximal

GPV : Générateur photovoltaïque

Ns : Nombre en série

Np : Nombre en parallèle

---

### Chapitre : 2

O&P : Observation et perturbation

Cst : Constant

CA : Courant alternatif

CC : Courant continu

MLI : Modulations de la Largeur d'Impulsion

---

### Chapitre : 3

NPC : clampé par le neutre

Vs : La tension d'entrée

Ve : La tension de sortie

T : transistor

D : diode

K : interrupteur

Fk : fonction de commande (connexion) de l'interrupteur K

---

### Chapitre : 4

HT : Les réseaux de transport à Haute tension

MT : Les réseaux à Moyenne tension

BT : Les réseaux à bas tension

STC : Les conditions standards

IGBT : Le transistor bipolaire à grille isolée

Symbole	Unité	Définition
I	A	Le courant(Ampaire)
V	Volt	La tension (valte)
T	C°	La température ( degrie celcuce ou kalvan )
D	A/cm <sup>2</sup>	densité du courant (ampaire par centimetre carie)
V <sub>CO</sub>	Volt	La tension à vide
I <sub>CC</sub>	A	Le courant de court-circuite
P	W	La puissance
P <sub>MPP</sub>	W	point de puissance maximum
I <sub>MPP</sub>	A	Le courant de point de puissance maximum
V <sub>MPP</sub>	Volt	La tension de point de puissance maximum
FF		facteur de forme
$\eta$	%	Le rendement de conversion
E	W/m <sup>2</sup>	Éclairement
S	m <sup>2</sup>	Surface
$\Phi$	lm	flux lumineux
G		Le glissement
R <sub>s</sub>	$\Omega$	Résistance en série
R <sub>p</sub>	$\Omega$	Résistance en parallèle
T	mS	La période
F	HZ	La fréquence
T	S	Tempe
V <sub>com</sub>	Volt	La tension composée

Symbole	Unité	Définition
A		Amplitude
Vs	Volt	La tension simple

# SOMMAIRE

Introduction Générale .....	1
<b>Chapitre 1 : Modélisation du générateur photovoltaïque</b>	
I.1. Introduction .....	3
I.2. Cellules photovoltaïques .....	3
I.2.1. Historique .....	3
I.2.2. Définition .....	4
I.2.3. Types des cellules photovoltaïque .....	6
I.2.3.1. Cellules photovoltaïques inorganiques .....	6
I.2.3.2. Cellules photovoltaïques organiques .....	7
I.3. Structure d'une cellule photovoltaïque .....	8
I.4. Principe de fonctionnement .....	8
I.5. Caractéristiques électriques d'une cellule .....	10
I.6. Paramètre des cellules photovoltaïques .....	11
I.6.1. Le courant court-circuit $I_{CC}$ .....	12
I.6.2. La tension circuit ouvert $V_{C0}$ .....	12
I.6.3. Facteur de forme FF .....	12
I.6.4. Le rendement $\eta$ .....	12
I.6.5. Puissance maximale PM .....	13
I.7. Circuits Equivalents et Modèles Mathématiques d'une cellule photovoltaïque .....	13
I.7.1. Modèle a une diode (ou exponentielle simple) .....	14
I.7.1.1. Modèle d'une Cellule photovoltaïque idéal à trois paramètres.....	14
I.7.1.2. Modèle d'une Cellule photovoltaïque idéal à Cinque paramètre .....	15
I.7.2. Modèle à deux diodes .....	17
I.7.2.1. Modèle à deux diodes à Cinque paramètres .....	17
I.7.2.2. Modèle à deux diodes à sept paramètres.....	18
I.7.3. Comparaison entre les deux modèles .....	19
I.7.4. Influence des déférents paramètres .....	19
I.7.4.1. Influence de l'éclairement .....	19
I.7.4.2. Influence de la température .....	20
I.7.4.3. Influence de la résistance série .....	21

I.7.4.4. Influence de la conductance shunt (parallèle) .....	21
I.8. Modèle électrique d'un générateur photovoltaïque. ....	22
I.8.1. La constitution d'un module photovoltaïque .....	22
I.8.2. Module photovoltaïque associe en série .....	23
I.8.3. Module photovoltaïque associe en parallèle .....	24
I.8.4. Module photovoltaïque associe en série parallèle .....	25
I.8.5. Diodes de Protection .....	26
I.8.5.1. Protection par des diodes dans un groupement série .....	26
I.8.5.2. Protection par des diodes dans un groupement parallèle .....	26
I.9. Simulation d'un générateur photovoltaïque .....	27
I.9.1. Présentation du logiciel de travail .....	27
I.9.2. Les schémas blocs d'un panneau PV .....	28
I.9.3. Résultat de simulation .....	29
I.10. Avantages et inconvénients du photovoltaïque .....	30
I.10.1. Avantages .....	30
I.10.2. Inconvénients .....	31
I.11. Conclusion.....	31

## **Chapitre 2 : Poursuit de point de puissance maximale (MPPT)**

II.1. Introduction .....	32
II.2. Parti 01: le contrôle de la puissance électrique .....	32
II.2.1. Type de Convertisseur .....	32
II.2.1.1. Les redresseurs (AC-DC) .....	33
II.2.1.2. Les onduleurs (DC-AC) .....	33
II.2.1.3. Les gradateurs (AC-AC) .....	33
II.2.1.4. Les Hacheurs .....	34
II.3. Différents types d'hacheurs .....	35
II.3.1. Convertisseurs vers le haut (élevateur de tension) de type BOOST .....	35
II.4. Parti 02 : Principe de la recherche du point de puissance maximal .....	37
II.4.2. Méthodes du MPPT .....	38
II. 4.2.1. Les déférentes commandes MPPT .....	39
II.4.2.2. Commandes Perturbation et Observation (P&O) .....	39
II.4.2.3. Fonctionnement de l'algorithme Perturbation et Observation (P&O) .....	40
II.4.2.4. Algorithme Perturber et Observer (P&O) .....	40

II.5. Simulation de convertisseur de la tension (type boost) connecté à modèle PV commandé par la commande (MPPT) de type P&O .....	41
II.5.1 Simulation de hacheur survolteur .....	41
II.5.2 Simulation de la méthode MPPT .....	43
II.5.3 Simulation de convertisseur de la tension (type boost) connecté à modèle PV commandé par la commande (MPPT) de type P&O .....	44
II.6. conclusion .....	47
<b>Chapitre 3 : Modélisation et commande d'un onduleur a trois niveaux a structure NPC</b>	
III.1. Introduction .....	48
III.2. Le Convertisseur Clampé par le Neutre (NPC) .....	48
III.3. Modélisation de l'onduleur à trois niveaux .....	49
III.3.1. Structure générale de l'onduleur à trois niveaux triphasé .....	49
III.4. Modèle de commande de l'onduleur à trois niveaux .....	52
III.4.1. Commandabilité des convertisseurs statiques .....	52
III.4.2. Fonction de commande .....	52
III.4.3. Commande complémentaire .....	53
III.4.4. Fonction de connexion du demi- bras .....	53
III.4.5. Modélisation des valeurs instantanées .....	54
III.4.6. Fonction de conversion .....	54
III.4.6.1. Tensions de sorties .....	54
III.4.6.2. Tensions simples .....	55
III.4.6.3. Tensions composée .....	55
III.4.6.4. Courants d'entrée .....	55
III.5. Modèle de connaissance de l'onduleur à trois niveaux .....	56
III.5.1. La Partie Commande .....	56
III.5.2. La Partie Opérative .....	57
III.6. Stratégie de commande de l'onduleur à trois niveaux à structure NPC .....	58
III.6.1.1. La commande MLI sinusoïdale .....	58
III.6.1.2. Modulation sinusoïdale classique .....	59
III.6.1.3. Modulation sinusoïdale à triangles multiples .....	60
III.6.1.4. Modulation sinusoïdale modifiée .....	60
III.6.1.5. Principe de la commande MLI .....	61
III.6.2. Commande par hystérésis .....	61

III.7. Simulation sous Matlab/Simulink de l'onduleur de tension triphasé à trois niveaux à structure NPC commandé par MLI connecté à modèle PV .....	62
III.8. Conclusion .....	65
<b>Chapitre 4 : Connexion d'un GPV en utilisant un convertisseur NPC à trois niveaux</b>	
IV.1.1. Introduction .....	66
IV.1.2. Réseau électrique .....	66
IV.1.3. Types des installations PV connectées au réseau .....	67
IV.1.4. Problème de connexion des systèmes photovoltaïques au réseau .....	67
IV.2. Etude de la liaison au réseau électrique .....	68
IV.2.1. Modélisation de la liaison .....	68
IV.2.1.1. Modélisation du filtre d'entrée .....	68
IV.2.1.2. Modélisation de bus continu .....	70
IV.3. Contrôle des courants générés.....	70
IV.4. Contrôle des courants .....	71
IV.5. Contrôle des puissances envoyées au réseau .....	73
IV.6. Contrôle de la tension du bus continu .....	73
IV.7. Modélisation de réseau BT .....	74
IV.8. Le filtre LC .....	75
IV.9. Simulation .....	75
IV.9.1. Simulation global de PV raccordé au réseau .....	75
IV.9.2. Calcul des paramètres de système global .....	75
IV.9.2.1. Nombre de modules nécessaires .....	75
IV.9.2.2. La surface nécessaire .....	76
IV.9.2.3. Les composants du convertisseur (DC/DC) Boost .....	76
IV.9.2.4. Le convertisseur DC/AC .....	78
IV.9.3. Simulation global PV raccordé au réseau à éclairement maximale .....	86
IV.10. conclusion .....	89

# Chapitre I

## Modélisation du générateur photovoltaïque

### I.1. Introduction

L'énergie solaire est potentiellement une source d'énergie renouvelable indéfiniment et respectueuse de l'environnement en Algérie et à travers le monde. La conversion de cette énergie électromagnétique (rayonnement) en énergie électrique qui est la conversion photovoltaïque s'effectue par le biais d'une cellule PV basée sur un phénomène physique appelé effet PV qui consiste à produire une force électromotrice lorsque la surface de cette cellule est exposée à la lumière. Plusieurs cellules reliées entre elles forment un module photovoltaïque qui a une caractéristique courant-tension (I-V) non linéaire. Plusieurs modules regroupés forment une installation solaire. L'électricité est soit consommée ou stockée sur place, soit transportée par le réseau de distribution et le réseau de transport.

Nous nous intéressons dans ce chapitre à la conception et le Fonctionnement des principaux éléments du ce système. Dans le cadre de notre études on va modélisé, simuler et évaluer les résultats d'un panneau PV poly cristalline Blue solaire modèles SPP032502400 , cette étude permet de simuler non seulement notre modèle mais n'importe quelles modèles en introduisant ces paramètres essentielles, elle permet aussi d'avoir les variations de ses caractéristiques électriques en fonction des paramètres extérieurs, comme l'ensoleillement, en comparant les courbes obtenus expérimentalement à celle obtenus par notre simulation.

### I.2. Cellules photovoltaïques

#### I.2.1. Historique

Le mot « Photovoltaïque » est la combinaison de deux mots: « photo », mot d'origine grecque qui signifie lumière ; et « voltaïque », qui vient de « volt » et représente l'unité utilisée pour mesurer le potentiel électrique.

En 1887 « Heinrich Rudolph Hertz » présenta pour la première fois l'effet photoélectrique dans un article de la revue scientifique « Annalen der Physik ». On appelle effet photoélectrique l'émission des électrons par un matériau soumis à un éclairage ou à un rayonnement électromagnétique d'intensité propre aux matériaux.

En 1875 « Wener Von Siemens » expose devant l'Académie des sciences de Berlin un article sur l'effet photovoltaïque dans les semi conducteurs .Mais jusqu'à la seconde guerre mondiale le phénomène reste encore une découverte anecdotique.

En 1954 Les chercheurs américains "Gerald Pearson", "Darry chapin" et "Calvin Fuller" travaillent pour les laboratoires Bell mettent au point une cellule photovoltaïque en silicium.

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

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

En 1983 : La première voiture alimentée par énergie photovoltaïque parcourt une distance de 4 000 km en Australie.

En 2001, Shmidt-Mende réalisèrent une cellule solaire auto-assemblée à base de cristaux liquides de hexabenzocoronene et pérylène, et quelques années plus tard, les avancées scientifiques et technologiques sont telles qu'en 2008, l'entreprise Fujikura (fabriquant de composés électroniques) est parvenue à faire fonctionner une cellule photovoltaïque organique de type DSSC (Dye-Sensitized Solar Cell ou cellule Gratzel) en continu à une température de 85°C et à un taux d'humidité de 85% pendant 1000 heures [2].

### **I.2.2. Définition**

Une cellule photovoltaïque est l'unité de base d'un système photovoltaïque, elle a la capacité de convertir l'énergie solaire en courant électrique par un processus appelé effet photovoltaïque, Cette conversation est basée sur les trois mécanismes suivants :

- Absorption des photons (dont l'énergie est supérieure au gap) par le matériau constituant le dispositif.
- Conversion de l'énergie du photon en énergie électrique, ce qui correspond à la création des paires d'électrons/trous dans le matériau semi-conducteur.
- Collecte des particules générées dans le dispositif.

Les cellules photovoltaïques sont constituées de semi-conducteurs à base de silicium (Si), de germanium (Ge), de sélénium (Se), de sulfure de cadmium (CdS), de tellure de cadmium

(CdTe) ou d'arséniure de gallium (GaAs). La majorité des cellules photovoltaïques sont constituée de semi-conducteurs à base de silicium (Si) cristallin, car il possède la caractéristique d'être non toxique contrairement au cadmium ou au sélénium, en plus, il permet d'atteindre des efficacités de conversion remarquables, il constitue environ 28% de l'écorce terrestre sous forme de composés (silicates, silice), ce qui en fait une source quasi inépuisable. [3]

Le processus de fabrication de ces cellules photovoltaïques représenté dans les étapes suivantes:

- **Étape 1 :** Élaboration du silicium de grade solaire à partir du silicium métallurgique, lui-même obtenu à partir de quartz :

Le silicium est actuellement le matériau le plus utilisé pour fabriquer les cellules photovoltaïques disponibles à un niveau industriel. Le silicium est fabriqué à partir de sable quartzéux (dioxyde de silicium). Celui-ci est chauffé dans un four électrique à une température de 1700 °C. Divers traitements du sable permettent de purifier le silicium. Le produit obtenu est un silicium dit métallurgique ou MG-Si, pur de l'ordre de 98% à 99% seulement. Ce silicium est ensuite purifié chimiquement et aboutit au silicium de qualité électronique ou SoG-Si, d'une pureté de 99,9999% qui se présente sous forme liquide, On produit ensuite des barres de silicium, appelées « lingots » qui seront tranchés en plaques très fines (150 à 300 µm pour la filière traditionnelle, c'est l'étape la plus consommatrice en énergie. [4]

- **Étape 2 :** Cristallisation de ce silicium solaire pour former des plaques :

Ce sont les dernières étapes de transformation du silicium avant la fabrication de la cellule photovoltaïque proprement dite. Le silicium va être purifié encore une fois, dopé uniformément et découpé sous forme de fines plaquettes (wafers de 1µm en moyenne d'épaisseur) une fois refroidi. C'est dans la charge de silicium en fusion que sera ajouté l'élément dopant (P, As, Sb ou B) lors de l'étape de dopage, afin de pouvoir le transformer en semi-conducteur de type P ou N, le matériau présent au final un réseau cristallin, qui est un arrangement ordonné des atomes de silicium.

L'élimination des impuretés se fait par ségrégation. Plus solubles en phase liquide que solide, les impuretés vont migrer vers les zones se solidifiant en dernier. Dans le cas d'un refroidissement pas le bas, elles vont se concentrer sur le haut du lingot. [4]

- **Étape 3 :** Transformation de ce silicium cristallisé en composant actif pour devenir une cellule photovoltaïque : [4]

La particularité des cellules au silicium réside dans le fait que le substrat et l'élément actif sont un seul et même matériau, ceci grâce au coût raisonnable du silicium par rapport aux autres matériaux semi-conducteurs. Une fois les plaques découpées viennent la fabrication des cellules, qui va permettre d'exploiter les propriétés de semi-conducteur du silicium et de transformer l'énergie lumineuse captée en énergie électrique.



**Figure I.1 :** présente l'enchaînement de ces étapes.

### I.2.3. Types des cellules photovoltaïque

#### I.2.3.1. Cellules photovoltaïques inorganiques

À l'heure actuelle, les cellules photovoltaïques présentant les meilleurs rendements de photo conversion reposent sur l'utilisation de matériaux inorganiques. Il convient d'en distinguer plusieurs types :

➤ Les cellules à base de silicium On distingue au sein même de cette famille, plusieurs types de cellules utilisant des “ qualités ” de silicium différentes: les cellules à base de Silicium monocristallin (rendement de l'ordre de 25%, coût de fabrication élevé), les cellules à base de Si poly-cristallin (rendement de l'ordre de 20%, coût de fabrication moindre) et les cellules à base de Si amorphe (rendement et coût plus faibles que le mono ou le poly-cristallin).

- Les cellules à base d'arséniure de gallium. Il convient de distinguer deux types de cellules incorporant l'arséniure de gallium. D'un côté, les cellules de ce type dont le composant principal est l'arséniure de gallium (rendement de l'ordre de 18 à 25%). De l'autre côté, les cellules multi jonctions (de type GInP/GaAs/Ge) qui constituent les cellules les plus efficaces (rendement de l'ordre de 32%) mais présentent un coût de mise en forme très élevé.
- Les cellules CIS ou CIGS, les premières sont composées de diséléniure de cuivre et d'indium (CuInSe) alors que les deuxièmes font intervenir en plus, du gallium. Ce type de cellules présente un faible coût de fabrication.
- Les cellules à base de tellure de cadmium (CdTe) L'avantage de ces cellules réside dans la forte absorption du tellure de cadmium, cependant la toxicité du matériau freine le développement de cette technologie. Les rendements obtenus sont de l'ordre de 17%. [5]

### **I.2.3.2. Cellules photovoltaïques organiques**

Face à la technologie utilisant les matériaux inorganiques, les cellules solaires à base de composés organiques connaissent un développement considérable. Les cellules organiques peuvent être de plusieurs types:

- Les cellules de type Schottky Ce type de cellule utilise un semi-conducteur de type p (ou n) pris en sandwich entre deux électrodes de métal. La zone active pour la conversion photovoltaïque se situe entre une des électrodes métalliques et le semi-conducteur.
- Les cellules hétérojonction de type bicouche Deux semi-conducteurs, un de type p et l'autre de type n, sont en contact formant une jonction p-n. La zone active se trouve à l'interface entre les deux semi-conducteurs.
- Les cellules hétérojonction de type réseaux interpénétrés Dans ce type de cellule, des semi-conducteurs p et n sont mélangées intimement au sein d'une même couche. La surface de contact entre les semi-conducteurs p et n est multipliée par plusieurs ordres de grandeur par rapport aux cellules bicouches, ce qui permet d'augmenter le nombre d'excitons dissociés.
- Les cellules hybrides sensibilisées par un colorant Ils sont communément appelées DSSC (Dye-Sensitized Solar Cells) ou cellules Graetzel. Dans ces cellules, une couche de dioxyde de titane  $TiO_2$ , semi-conducteur de type n, recouverte d'un colorant organique qui absorbe la lumière, est mise en contact avec un électrolyte (solution aqueuse contenant un couple redox).

### I.3. Structure d'une cellule photovoltaïque

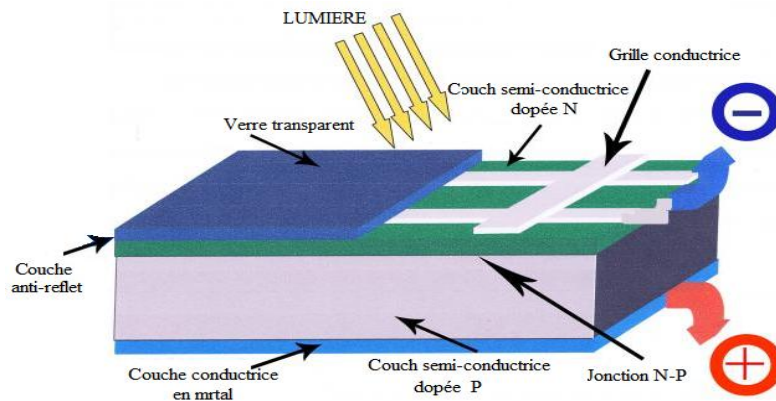


Figure I.2 : schéma de la structure basique d'une cellule PV.

Les cellules photovoltaïques ont une structure très perfectionnée pour permettre leur bon fonctionnement, elles sont constituées :

- Deux couches de semi-conductrices telles que le silicium, la couche supérieure est constituée de silicium et d'autres éléments possédant plus d'électrons qu'une couche de silicium pure. C'est un semi-conducteur de type N, la couche inférieure est constituée de silicium et d'autres éléments possédant moins d'électrons qu'une couche de silicium pure. C'est un semi-conducteur de type P.

- D'une couche antireflet permettant une pénétration maximale des rayons solaires.

D'une grille conductrice sur le dessus ou cathode et d'un métal conducteur sur le dessous ou anode.

Les plus récentes possèdent même une nouvelle combinaison de multicouches réfléchissants juste en dessous du semi-conducteur, permettant à la lumière de rebondir plus longtemps dans celui-ci pour améliorer le rendement.

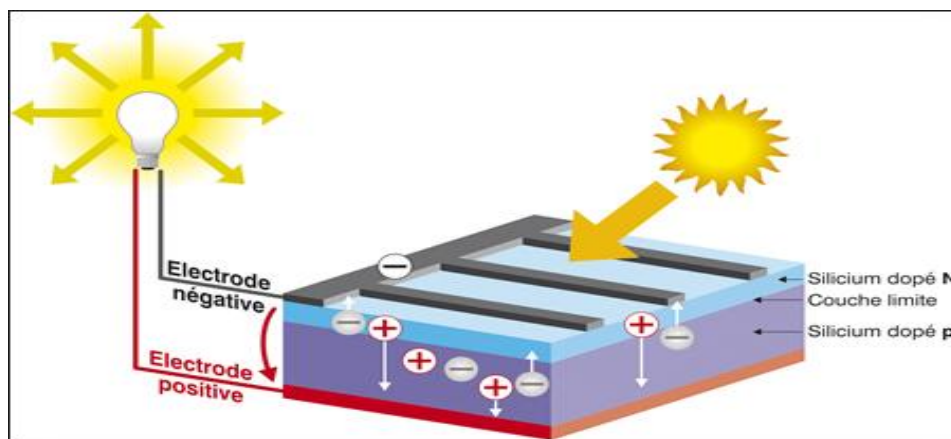
- Le verre est utilisé conventionnellement, les cellules sont recouvertes d'un matériau protecteur pour ne pas être exposées directement à la lumière, qui doit être résistant et plus transparent possible. [6]

- Une surface de contact conductrice en métal « collectrice des électrons » ayant une bonne conductivité ainsi qu'un bon accrochage sur le silicium.

### I.4. Principe de fonctionnement

Une cellule photovoltaïque est basée sur le phénomène physique appelé effet photovoltaïque qu'a été découvert par Edmond Becquerel en 1839, il permet de convertir directement l'énergie lumineuse des rayons solaires en électricité par le biais de la production et du transport dans un matériau semi conducteur de charges électriques positives et négatives

sous l'effet de la lumière. Ce matériau comporte deux parties, l'une présentant un excès d'électrons et l'autre un déficit en électrons, dites respectivement dopée de type N et dopée de type P. Lorsque la première est mise en contact avec la seconde, les électrons en excès dans le matériau N diffusent dans le matériau P. La zone initialement dopée N devient chargée positivement, et la zone initialement dopée P chargée négativement. Il se crée donc entre elles un champ électrique qui tend à repousser les électrons dans la zone N et les trous vers la zone P. Une jonction (dite P-N) a été formée. En ajoutant des contacts métalliques sur les zones N et P, une diode est obtenue. Lorsque la jonction est éclairée, les photons d'énergie égale ou supérieure à la largeur de la bande interdite communiquent leur énergie aux atomes, chacun fait passer un électron de la bande de valence dans la bande de conduction et laisse aussi un trou capable de se mouvoir, engendrant ainsi une paire électron-trou. Si une charge est placée aux bornes de la cellule, les électrons de la zone N rejoignent les trous de la zone P via la connexion extérieure, donnant naissance à une différence de potentiel. [7]



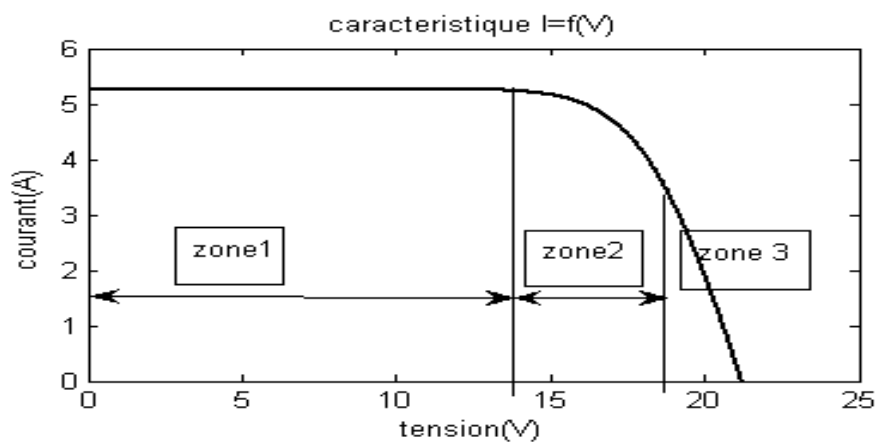
**Figure I.3:** Le principe de fonctionnement d'une cellule solaire.

L'effet repose donc à la base sur les propriétés semi-conductrices du matériau et son dopage afin d'en améliorer la conductivité. Le silicium employé aujourd'hui dans la plupart des cellules a été choisi pour la présence de quatre électrons de valence sur sa couche périphérique (colonne IV du tableau de Mendeleïev). Dans le silicium solide, chaque atome – dit tétravalent – est lié à quatre voisins, et tous les électrons de la couche périphérique participent aux liaisons. Si un atome de silicium est remplacé par un atome de la colonne V (phosphore par exemple), un de ses cinq électrons de valence ne participe pas aux liaisons; par agitation thermique, il va très vite passer dans la bande de conduction et ainsi devenir libre de se déplacer dans le cristal, laissant derrière lui un trou fixe lié à l'atome de dopant. Il y a conduction par un électron, et le semi-conducteur dit dopé de type N. Si au contraire un atome de silicium est remplacé par un atome de la colonne III (bore par exemple) à trois électrons de valence, il en manque un pour réaliser toutes les liaisons, et un électron peut

rapidement venir combler ce manque et occuper l'orbitale vacante par agitation thermique. Il en résulte un trou dans la bande de valence, qui va contribuer à la conduction, et le semi-conducteur est dit dopé de type P. Les atomes tels que le bore ou le phosphore sont donc des dopants du silicium. Les cellules photovoltaïques sont assemblées pour former des modules.

### I.5. Caractéristiques électriques d'une cellule

La variation du courant (A) (ou densité du courant (A/cm<sup>2</sup>) en fonction de la tension (V), à l'obscurité et en particulier sous éclairement, permet d'évaluer la performance de la cellule solaire; la figure I.4 montre deux exemples de caractéristiques  $I=f(V)$  de cellule solaire sans et avec éclairement. [8]

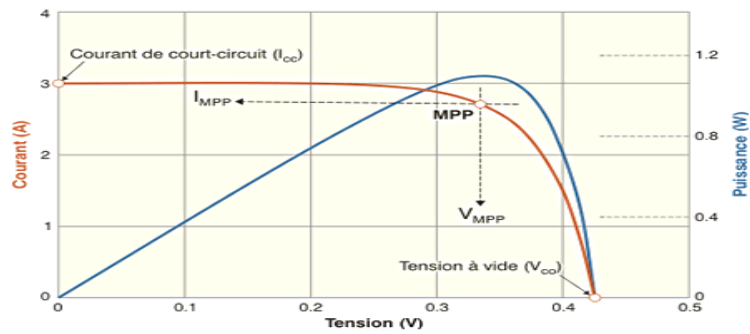


**Figure I.4**[8] : Les différentes zones de Caractéristique  $I(V)$  d'une cellule PV.

Cette caractéristique comporte trois parties :

- la zone (1) ou la cellule se comporte comme un générateur de tension  $V_{CO}$ .
- la zone (2) la cellule est équivalente à un générateur de courant  $I_{CC}$  proportionnel à l'éclairément.
- la zone (3) ou l'impédance interne varie rapidement.

La puissance fournie par la cellule est tout simplement le produit du courant et de la tension. A partir de la caractéristique courant-tension, il est intéressant de dessiner le graphe de la puissance ( $P = V \times I$ ) en fonction de la tension  $V$ , qu'on appelle aussi caractéristique puissance-tension (courbe bleus):

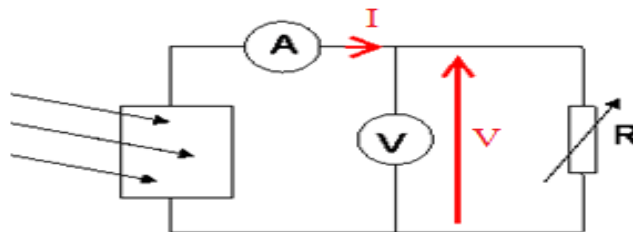


**Figure I.5** [8] : schéma présenter les caractéristiques électriques d'une cellule PV.

On retrouve bien les deux cas énoncés précédemment (cellule en court-circuit et cellule en circuit ouvert) pour lesquels la puissance fournie est nulle.

Par ailleurs, la caractéristique courant-tension d'une cellule photovoltaïque met en évidence un point de puissance maximum  $P_{MPP}$  (signifie en anglais Maximal Power Point, soit Point de Puissance Maximum). Ce point de puissance maximum est le produit d'un courant et d'une tension donnés. On appelle respectivement  $I_{MPP}$  et  $V_{MPP}$  le courant et la tension correspondant au point de puissance maximum, c'est-à-dire tel que  $I_{MPP} \times V_{MPP} = P_{MPP}$ .

Cet applet montre comment on peut relever expérimentalement la caractéristique courant-tension d'une cellule photovoltaïque sans avoir à définir tous les paramètres de l'équation  $I=f(V)$ . L'applet sera accompagné d'un schéma de montage présenter dans la figure 1.6 suivant:



**Figure I.6:** schéma présenter le montage pour obtenir la caractéristique courant-tension.

## I.6. Paramètre des cellules photovoltaïques

A partir des caractéristique  $I = f(v)$  d'une cellule photovoltaïque, on déduire les déférentes paramètres des cellules photovoltaïque :

- Le courant de court-circuit noté  $I_{cc}$ .
- La tension à vide notée  $V_{cc}$ .
- Le rendement de conversion.  $\eta$
- La puissance maximale  $P_M$ .
- Le facteur de forme  $FF$ .

### I.6.1. Le courant court-circuit $I_{CC}$

Le courant de court-circuit exprimé en milliampère, est le courant qui circule dans la cellule sous éclairage et sous application de tension. Il croît linéairement avec l'intensité d'illumination de la cellule et il dépend de la surface éclairée, de la longueur d'onde du rayonnement de la mobilité des porteurs de charges et de la température. [9]

### I.6.2. La tension circuit ouvert $V_{C0}$

La tension de circuit ouvert exprimé en millivolts, est mesurée lorsqu'aucun courant ne circule dans la cellule. Elle dépend de la différence des travaux de sortie des électrodes et de la résistance shunt. Elle décroît avec la température et varie avec l'intensité lumineuse. [9]

### I.6.3. Facteur de forme FF

Le facteur de forme FF (fil facteur), caractérise la forme de la caractéristique  $I=f(V)$  de la cellule entre  $I_{CC}$  et  $V_{C0}$ . Il est égal au rapport de la surface du rectangle  $P_{max}$  (obtenu en modifiant la valeur de la résistance externe, quand l'aire du rectangle défini par les axes  $Ox$ ,  $Oy$  et les droites  $x=I_{max}$  et  $y=V_{max}$  passe par un maximum) sur celle du rectangle dont les cotes mesurent  $V_{C0}$  et  $I_{CC}$ . Il est défini par la relation suivante : [9]

$$FF = \frac{P_{max}}{V_{C0} \times I_{CC}} = \frac{V_{max} \times I_{max}}{V_{C0} \times I_{CC}} \quad (I.1)$$

Si on obtient une formule plutôt carrée, le facteur de forme sera élevé. Si au contraire, on a plutôt une forme triangulaire, le facteur de forme sera petit et le rendement sera faible.

### I.6.4. Le rendement $\eta$

Le rendement de conversion (efficiency) exprimé en pourcentage, désigne le rendement de conversion en puissance. Il est défini comme étant le rapport entre la puissance maximale délivrée par la cellule et la puissance lumineuse incidente  $P_{inc}$ . [9]

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{inc}} = \frac{V_m \times I_m}{S \times E} \quad (I.2)$$

**Avec :**

**E :** Éclairement global incident sur la cellule photovoltaïque ( $W/m^2$ ).

**S** : Surface totale de la cellule photovoltaïque ( $m^2$ ).

Le rendement d'une cellule photovoltaïque serait d'environ 85% si chaque photon pouvait transférer toute son énergie à un électron. Cependant, ce n'est pas le cas vu que le transfert d'énergie propre à chaque semi-conducteur. Ainsi, les photons avec une énergie inférieure à cette valeur ne pourront pas participer à l'effet photovoltaïque et l'énergie sera convertie en chaleur.

### **I.6.5. Puissance maximale PM**

Le courant et la puissance électrique d'une cellule solaire dépendent directement de l'intensité du flux lumineux. L'énergie offerte par les cellules est à son maximum lorsque le ciel est dégagé et le temps est beau. En cas de lumière diffuse, le flux est plus faible, donc la puissance de la cellule est plus faible. La puissance crête d'une cellule est définie pour un flux lumineux de  $1000 \text{ w/m}^2$  à une température de cellule de  $25^\circ\text{C}$ . Elle est exprimée en  $\text{Wc}$  (watt-crête). La puissance maximale peut être plus grande que la puissance crête. Une cellule d'une surface de  $10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm} = 100 \text{ m}^2$  et d'un rendement de 15 % fournit dans ces conditions une puissance d'1.5 w. La puissance est directement proportionnelle à la taille de la cellule. Pour un même rendement, une cellule deux fois plus grande fournira deux fois plus de puissance.

### **I.7. Circuits équivalents et modèles mathématiques d'une cellule photovoltaïque**

La modélisation des cellules photovoltaïques passe nécessairement par un choix judicieux des circuits électriques équivalents.

Pour développer un circuit équivalent précis pour une cellule aussi bien que les caractéristiques électriques de chaque élément, en prenant plus ou moins de détails. Plusieurs modèles mathématiques sont développés pour représenter un comportement fortement non linéaire, résultant de celui des jonctions semi-conductrices qui sont à la base de leurs réalisations. Ces modèles se différencient entre eux par les procédures mathématiques et le nombre de paramètres intervenant dans le calcul de la tension et du courant du module photovoltaïque. On présentera deux modèles :

- modèle à une diode (ou exponentielle simple).
- modèle à deux diodes (ou double exponentielle).

### I.7.1. Modèle a une diode (ou exponentielle simple)

Afin de mieux comprendre et étudier le fonctionnement d'une cellule PV, on raisonne par analogie électrique. Le modèle à une exponentielle comporte une diode de moins par rapport au modèle à deux exponentielles.

#### I.7.1.1. Modèle d'une Cellule photovoltaïque idéal à trois paramètres

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

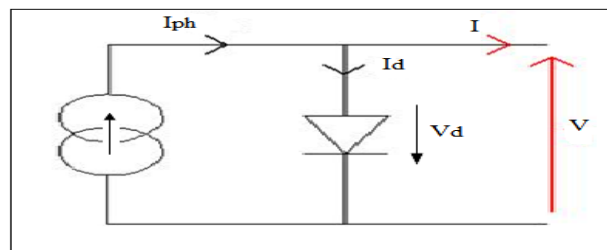


Figure I.7 : Modèle idéal à trois paramètres d'une Cellule PV.

D'après la loi de nœuds: 
$$I = I_{ph} - I_d \quad (I.3)$$

Tel que :  $I_d$  c'est le courant de diode.

Pour une cellule idéale, la tension aux bornes de la résistance est égale à celle aux bornes de la diode :  $V = V_d$

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

$$I_d = I_0 \left( e^{\frac{V_d}{V_t}} - 1 \right) \quad (I.4)$$

$$V_t = \frac{n.K.T}{q} \quad (I.5)$$

Avec:

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

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

$V_t$  : La Potentielle thermique.

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

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

n: Le facteur de qualité de diode.

T: La température de cellule en kelvin.

Donc la relation sera: 
$$I = I_{Ph} - I_0 \left( e^{\frac{V_d}{V_t}} - 1 \right) \quad (I.6)$$

Ce modèle reste théorique et ne rend pas compte du comportement d'une cellule photovoltaïque dans les conditions réelles. Toutefois, il reste valable sous certaines hypothèses (non pris en compte des pertes de tension, courant de fuite...).il existe d'autres modèles, certes théoriques, mais qui rendent plus fidèlement compte du comportement de la cellule photovoltaïque.

### I.7.1.2. Modèle d'une cellule photovoltaïque idéal à Cinq paramètres

Le modèle photovoltaïque précédent ne rendait pas compte de tous les phénomènes présents lors de la conversion d'énergie lumineuse. Par contre dans le cas d'une Cellule photovoltaïque idéal à Cinq paramètres, Il correspond à un générateur de courant  $I$  monté en parallèle avec une diode. Deux résistances parasites sont la résistance série ( $R_s$ ) est 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 sa valeur est déterminée par l'inverse de la pente de la caractéristique  $I=f(V)$  pour une tension égale à  $V_{c0}$  ce terme doit idéalement être le plus faible possible pour limiter son influence sur le courant de cellule et la résistance shunt ( $R_{sh}$ ) est due à un courant de fuite au niveau de la jonction a travers l'émetteur, causé par un défaut. Ceci est le cas lorsque la diffusion des contacts métalliques à haute température préce l'émetteur. Elle peut aussi être due à un court-circuit sur les bords de la cellule. Cette valeur devra être plus élevée possible.

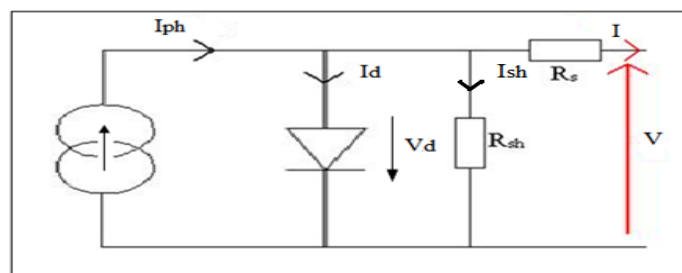


Figure I.8 : Modèle idéal à Cinq paramètres d'une Cellule PV.

D'après la loi de nœuds:

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

Tel que :

$$I_{sh} = \left( \frac{V+R_s I}{R_{sh}} \right) \text{ Et ; } I_d = I_0 \left( e^{\left( \frac{V+R_s I}{V_t} \right)} - 1 \right) \text{ Et d'après la loi de Kirchhoff on a :}$$

$$I = N_p I_{ph} - N_p I_0 \left[ \text{Exp} \left( \frac{q(V+I R_s)}{N_s A k T_{ref}} \right) - 1 - \frac{V+R_s I}{R_{sh}} \right] \quad (I.8)$$

Avec :

$I$  : Le courant fourni par la cellule.

$N_p$  : Le nombre de cellules en parallèle.

$N_s$  : Le nombre de cellules en série.

$I_{sh}$  : Le courant passe par la résistance shunt.

$R_{sh}$  : La résistance shunt caractérisant les courants de fuite de la jonction.

$R_s$  : La résistance série représentant les diverses résistances de contacts et de connexions.

$I_{ph}$  : Le courant photonique, il dépend de la température et de l'ensoleillement comme montré dans l'équation qui suit :

$$I_{ph} = [I_{cc} + C(T - T_{ref})] \frac{E}{1000} \quad (I.9)$$

$I_{ph}$  : Est en [A], calculé dans les conditions nominales (25° et 1000 w/m<sup>2</sup>)

$C$ : Est le rapport entre le courant de court-circuit et le coefficient de température (0.0017A/K).

$T_{ref}$ : Température de référence, égale à 25 C°.

$I_0$  : Le courant de saturation de la diode, exprimé par :

$$I_0 = I_{0i} \left( \frac{T}{T_{ref}} \right)^3 \text{Exp} \left[ \left( \frac{q E_g}{A T_{ref}} \right) + \left( \frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T} \right) \right] \quad (I.10)$$

$E_g$  : L'énergie de gap du semi-conducteur utilisé ( $E_g \approx 1.1$  eV pour le silicium poly cristallin à 25 C°).

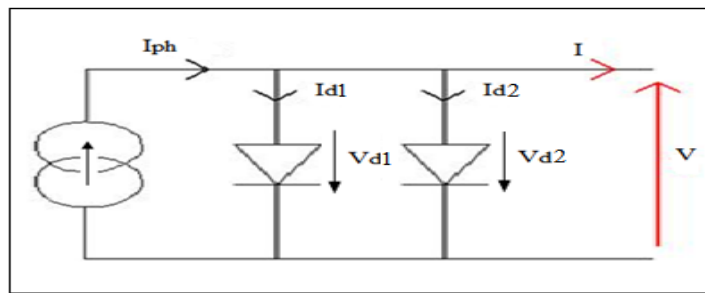
$I_{0i}$ : le courant de saturation inverse, il est donné par :

$$I_{0i} = \frac{I_{cc}}{\text{Exp}\left[\left(\frac{qV_{oc}}{AkT_{ref}}\right) - 1\right]} \quad (I.11)$$

## I.7.2. Modèle à deux diodes

### I.7.2.1. Modèle à deux diodes à Cinq paramètres

Le fonctionnement d'une cellule solaire peut être modélisé en considérant le schéma électrique équivalent ci-dessous, il consiste en la description mathématique d'un circuit réalisé par la connexion en parallèle de deux diodes : une diode ( $d_1$ ) pour modéliser la diffusion des porteurs dans la base et l'émetteur. Son influence sera d'autant plus grande que le matériau présentera une bonne longueur de diffusion. Et l'autre diode ( $d_2$ ) : modélise la génération recombinaison dans la zone de charge. Ayant les courants de saturation  $I_{01}$  et  $I_{02}$ , une source de courant produisant un photo-courant  $I_{Ph}$ , qui dépend de l'éclairement solaire.



**Figure I.9** : Modèle à deux diodes à Cinq paramètres d'une Cellule PV.

L'équation caractéristique est déduite d'une manière directe à partir de la loi de Kirchhoff :  $I = I_{Ph} - I_{d1} - I_{d2}$

Avec :

$$I_{d1} = I_{01} \left( e^{\frac{V_d}{V_{1t}}} - 1 \right) \quad (I.12)$$

Et ;

$$I_{d2} = I_{02} \left( e^{\frac{V_d}{V_{2t}}} - 1 \right) \quad (I.13)$$

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

$$I = I_{Ph} - I_{01} \left( e^{\frac{V_d}{V_{1t}}} - 1 \right) - I_{02} \left( e^{\frac{V_d}{V_{2t}}} - 1 \right) \quad (I.14)$$

$I_{Ph}$  : Courant photonique

$I_{d1}$  : Courant de diode 1

$I_{d2}$  : Courant de diode 2

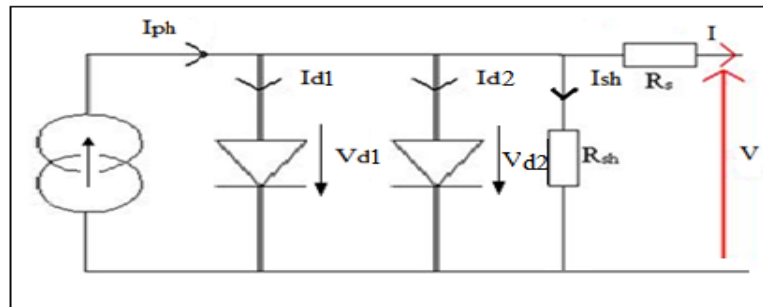
$V_{1t}$  : La Potentielle thermique de diode 1

$V_{2t}$  : La Potentielle thermique de diode 2

$V_d$ : La tension à la borne de diode d1 ou d2.

### I.7.2.2. Modèle à deux diodes à sept paramètres

Ce modèle réaliser par deux diodes d'une part en surface du matériau et d'autre part dans le volume du matériau et Deux résistances parasites sont la résistance série ( $R_S$ ) est la résistance interne de la cellule et la résistance shunt ( $R_{Sh}$ ). Le schéma devient dans le cas de la figure I.10.



**Figure I.10** : Modèle à deux diodes à sept paramètres d'une Cellule PV.

L'équation caractéristique est déduite est déduite d'une manière directe a partir de la loi de Kirchhoff :

$$I = I_{Ph} - I_{d1} - I_{d2} - I_{sh} \quad (I.15)$$

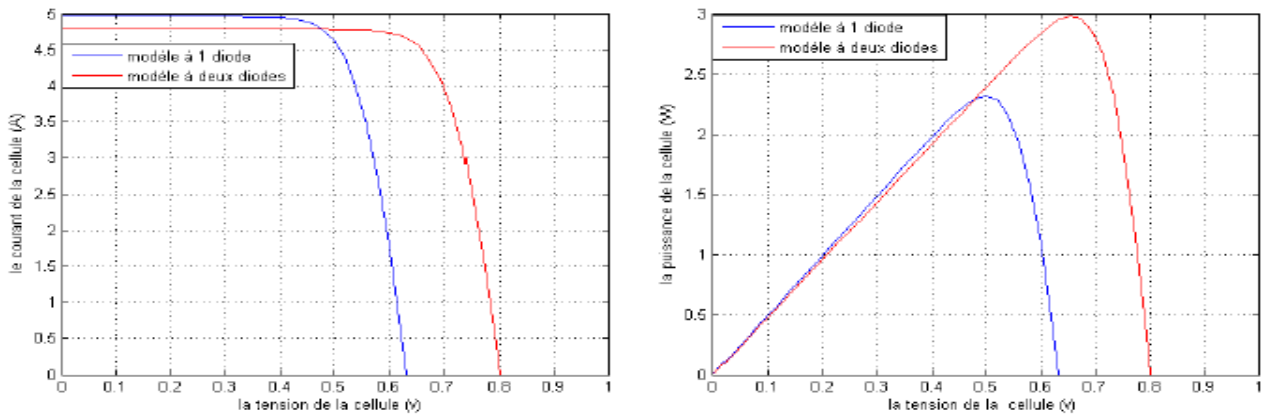
Avec :

$$I_{sh} = \left( \frac{V+R_S \cdot I}{R_{sh}} \right)$$

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

$$I = I_{Ph} - I_{01} \left( e^{\frac{V_d}{V_{1t}}} - 1 \right) - I_{02} \left( e^{\frac{V_d}{V_{2t}}} - 1 \right) - \left( \frac{V+R_S \cdot I}{R_{sh}} \right) \quad (I.16)$$

### I. 7.3. Comparaison entre les deux modèles



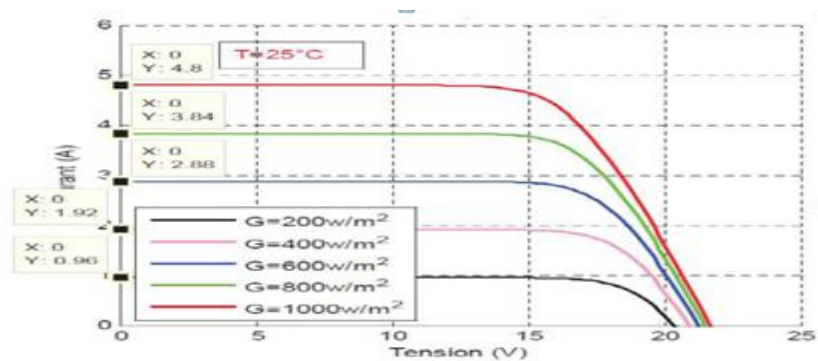
**Figure I. 11**[7] : Modèles à 1 et à deux diodes d’une cellule PV.

La figure I.11 montre que les résultats obtenus par le modèle à deux diodes fournissent une puissance et une tension de circuit ouvert supérieurs à celui du modèle à une diode. Le modèle à deux diodes a un léger avantage car il fait appel à une recombinaison des porteurs minoritaire dans le volume du matériau. [7]

### I.7.4. Influence des différents paramètres

#### I.7.4.1. Influence de l’éclairement

La figure I.12 présente les caractéristiques courant-tension d’une cellule photovoltaïque pour plusieurs intensités du rayonnement solaire pour une température donnée.



**Figure I.12**[7] : caractéristiques courant-tension en fonction de l’éclairement.

On remarque que le courant du court circuit  $I_{cc}$  est directement proportionnel à l’intensité lumineuse incidente; la variation de  $I_{cc}$  avec l’éclairement est donnée sous la forme suivante :

$$I_{cc} \approx I_{ph} = \alpha(T) \times E \times S \quad (I.17)$$

Où ;

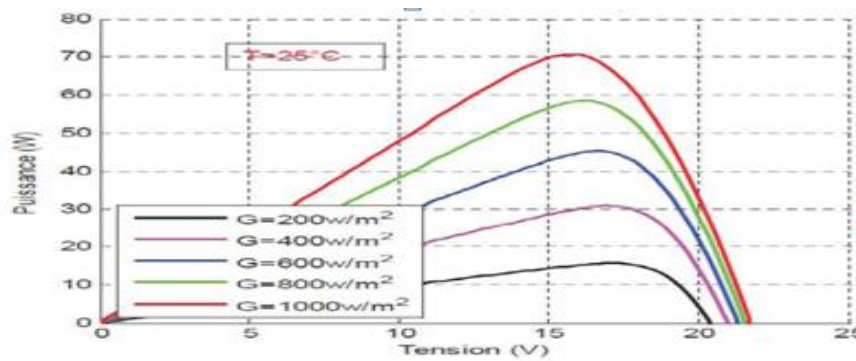
E : est l’éclairement en W/m<sup>2</sup>.

S : est la surface de la cellule en m<sup>2</sup>.

$\alpha(T)$  : Coefficient dépendant faiblement de la température, il est exprimé en A/W.

D'autre part, l'accroissement de l'éclairement provoque une légère augmentation de la tension de circuit ouvert  $V_{co}$ .

La puissance délivrée dépend de l'irradiation qu'il reçoit. L'augmentation du flux lumineux fait accroître le courant de court circuit ainsi que la tension à circuit ouvert, mais par contre la tension varie légèrement .comme le montre la figure I.13.

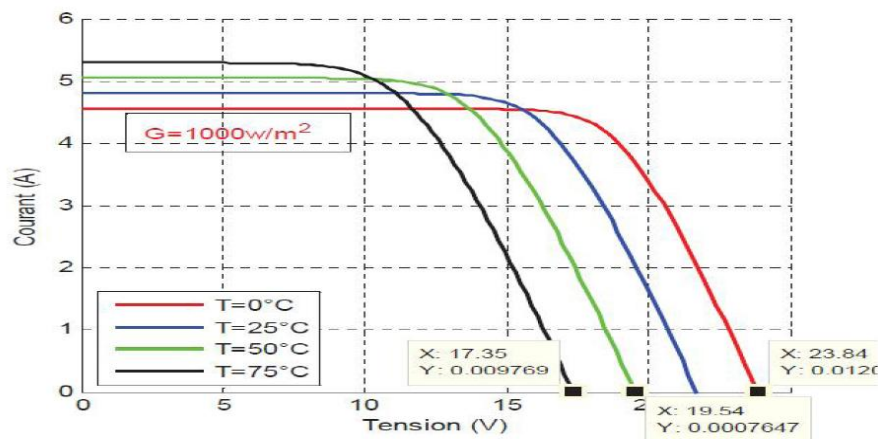


**Figure I.13**[7] : caractéristiques puissance-tension fonction de l'éclairement.

### I.7.4.2. Influence de la température

La température est un paramètre très important dans le comportement des cellules photovoltaïque puisqu'elles sont exposées au rayonnement solaire.

La figure I.14 montre l'influence de la température, sur la caractéristique  $I=f(V)$  d'une cellule photovoltaïque pour un niveau d'ensoleillement  $G$  donné et pour différentes température.



**Figure I.14** [7] : caractéristiques courant-tension en fonction de température.

On observe que l'augmentation de la température provoque une augmentation du courant du court circuit ( $I_{cc}$ ), en même temps on assiste à une diminution nette de la tension en circuit ouvert ( $V_{co}$ ). ). L'augmentation de la température entraîne une diminution de la tension ( $V_{max}$ ) et un léger accroissement du courant ( $I_{max}$ ) et par la suite une baisse relative de la puissance maximale ( $P_m$ ). Comme le montre la figure I.15.

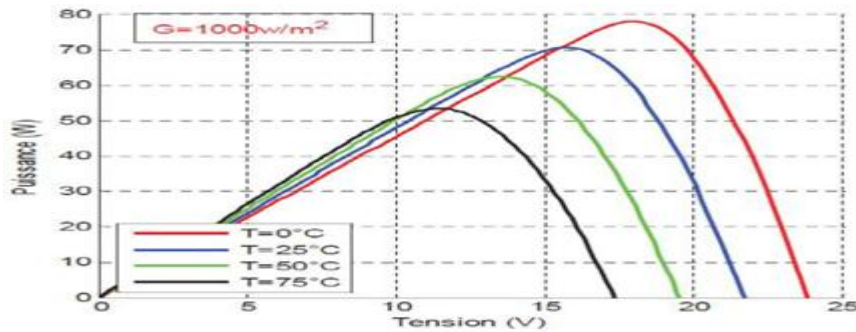


Figure I. 15[7] : caractéristiques puissance-tension en fonction de température.

### I.7.4.3. Influence de la résistance série

L'effet de la résistance série  $R_s$  sur la caractéristique  $I=f(V)$  de la cellule solaire sous éclairement est illustré sur la figure I.16 ci-dessous.

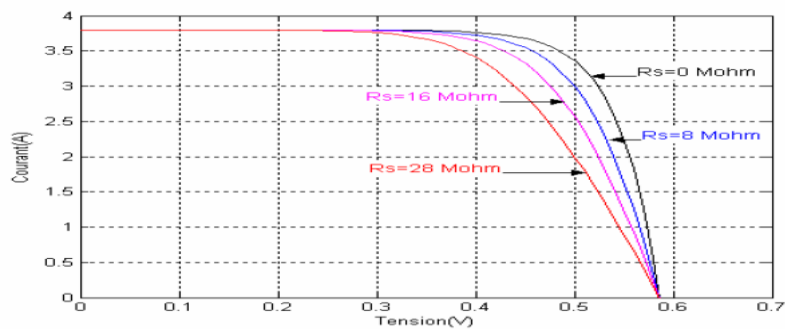


Figure I.16 [7] : Influence de la résistance série sur la caractéristique  $I=f(V)$  de la cellule PV.

On remarque que la tension de circuit ouvert ( $V_{co}$ ) et le courant du court circuit ( $I_{cc}$ ) ne sont pas modifiés; mais la caractéristique se déforme très rapidement, cette influence se traduit par une augmentation de la pente de la caractéristique  $I=f(v)$  de la cellule dans la zone correspondant à un fonctionnement comme une source de courant (basse tension).

### I.7.4.4. Influence de la conductance shunt (parallèle)

La figure I.17 ci-dessous illustre l'effet de la résistance shunt sur la caractéristique  $I=f(V)$  de la cellule solaire sous éclairement.

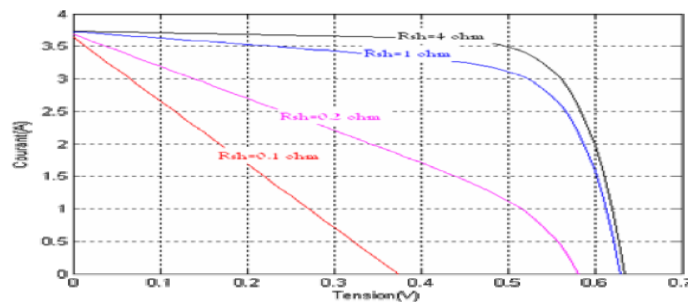


Figure I.17 [7] : Influence de la conductance shunt sur la caractéristique  $I=f(V)$  de la cellule PV.

On remarque que pour de très faibles valeurs de  $R_{sh}$ , la tension de circuit ouvert ( $V_{co}$ ) et le courant du court circuit ( $I_{cc}$ ) ne sont pas modifiés; mais la caractéristique se déforme très rapidement, cette influence se traduit par une diminution de la pente de la caractéristique  $I=f(V)$  de la cellule dans la zone correspondant à un fonctionnement comme une source de de tension.

## I.8. Modèle électrique d'un générateur photovoltaïque

La cellule photovoltaïque élémentaire constitue un générateur électrique de très faible puissance insuffisant pour la plupart des applications domestiques ou industrielles. Les générateurs photovoltaïques sont, de ce fait, réalisés par association, en série et/ou en parallèle d'un grand nombre de cellules élémentaires. Ces groupements de plusieurs cellules sont reliée entre elles forment un panneaux solaire ou module, plusieurs modules qui sont regroupée dans une centrale solaire appelé champ photovoltaïque. L'élément de base du générateur photovoltaïque est la cellule solaire seule et non pas le module ou le panneau.

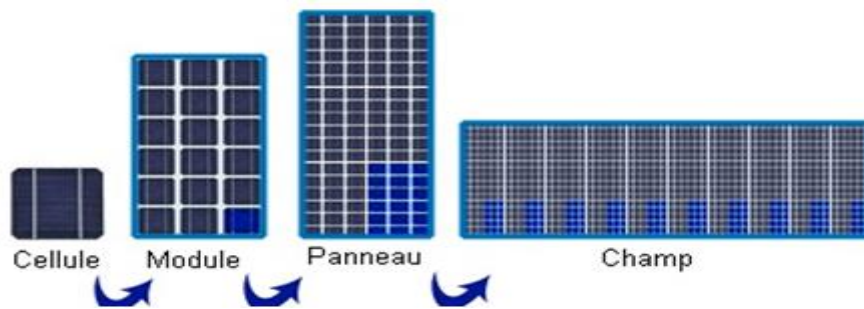
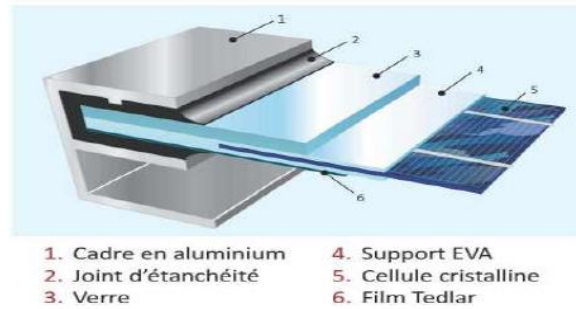


Figure I.18 : Modèle électrique d'un générateur photovoltaïque.

### I.8.1. La constitution d'un module photovoltaïque

Un module photovoltaïque est d'abord un convertisseur d'énergie lumineuse en électricité. Par définition c'est un ensemble de plusieurs cellules solaire reliées les unes à l'autre pour générer une puissance électrique suffisante lors de son exposition à la lumière. [3]

Un module photovoltaïque est composé de plusieurs cellules solaire reliées les unes à l'autre d'une protection contre les intempéries sous forme de vitre et de stratifié d'une protection contre les surtensions sous forme d'une ou plusieurs diodes by-pass et d'un dispositif de branchement. La plupart des modules disposent également d'un cadre et d'autres possèdent une vitre en face arrière.



**Figure I.19** : La constitution d'un module photovoltaïque.

Le nombre maximum de cellules est limité par les contraintes imposées par la manipulation d'un module : le poids et les dimensions extérieurs doivent permettre un montage sur le toit dans des conditions parfois difficiles et avec une main-d'œuvre restreinte.

Les cellules solaires sont recouvertes, sur la face avant, d'une vitre solaire trempée et sur la face arrière, d'une deuxième vitre ou d'une feuille de plastique en tedlar.

Pour résister aux intempéries et à l'humidité pendant au moins 25 ans, les cellules sont collées sur une couche d'éthylène-acétate de vinyle (EVA) et sont ainsi hermétiquement entourées par le stratifié.

En fonction des contraintes liées au montage et à la stabilité, les modules peuvent être construits ou sans cadre.

Une prise de courant avec des diodes by-pass est fixée sur l'arrière des modules ou sur les cadres. Des connecteurs blindés avec détrompeurs rendent le module particulièrement facile à câbler. Les modules utilisés actuellement ont une puissance comprise entre 80 et 300 w. [9]

### **I.8.2. Module photovoltaïque associé en série**

Une cellule seule ne génère qu'une tension faible : de 0.5 à 1.5V selon les technologies. Il est donc nécessaire d'associer plusieurs cellules en série pour pouvoir produire une tension exploitable, comme illustré sur la figure I.20 ci-dessous, le même courant traverse chaque cellule tandis que la tension globale sortie de générateur est la somme des tensions à travers toutes les cellules.

Ces ensembles des cellules doivent être encapsulés dans des modules étanches qui les préservent de l'humidité et des chocs. [10]

Dans un groupement de  $N_s$  cellules en série, toutes sont traversées par un même courant. La figure I.20 montre la caractéristique résultante ( $I_{sco}$ ,  $V_{sco}$ ) d'un tel groupement dans des

conditions idéales, obtenue pour  $N_s$  cellules identiques ( $I_{c0}$ ,  $V_{c0}$ ) en sommant les caractéristiques élémentaires à courant constant : [11] [12]

$$V_{SC0} = N_s \times V_{c0} \quad (I.18)$$

Avec ;  $V_{S0}$  : la tension du circuit ouvert à travers toutes les cellules.

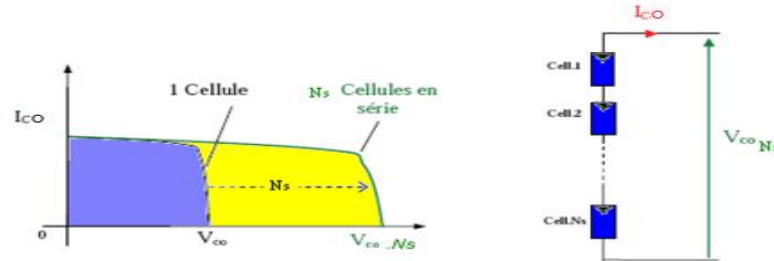


Figure I.20 : association de NS modules solaires en série.

### I.8.3. Module photovoltaïque associe en parallèle

La connexion parallèle est surtout utilisée dans le groupement des modules permet d'accroître le courant de sortie de générateur.

Si les modules en parallèles ne sont pas identiques ou si quelques cellules d'un module sont ombragées, le courant d'utilisation total des modules sera plus faible.

Une dissipation de puissance importante peut devenir dangereuse au niveau de la cellule la plus faible de ces modules. [11]

Dans' un groupement de  $N_p$  cellules en parallèle. Cette fois-ci, c'est la tension de chacun des éléments qui doit être identique, les courants s'ajoutant, la figure I.21 montre la caractéristique résultante ( $I_{sc0}$ ,  $V_{sc0}$ ) d'un tel groupement dans des conditions idéales, obtenue pour  $N_p$  cellules identiques ( $I_{c0}$ ,  $V_{c0}$ ) en sommant les caractéristiques élémentaires à une tension constante.

$$I_{SC0} = N_p \times I_{c0}$$

$I_{c0}$  : courant de court circuit.

L'impédance optimale du groupement sera  $N_p$  fois plus faible que celle de l'élément de base. Ce sont les inverses des résistances série qui s'ajoutent ainsi que les conductances shunt.

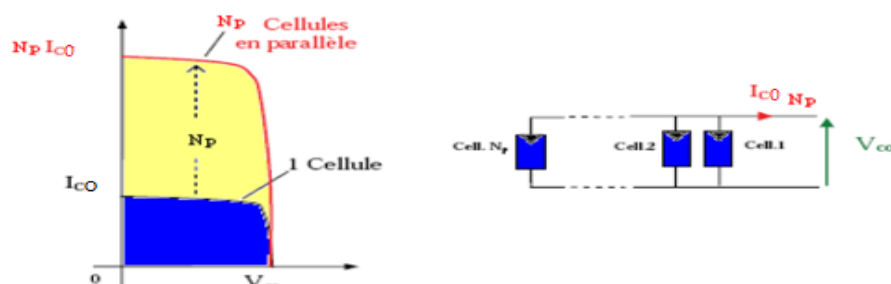


Figure I. 21: association de Np modules solaires en parallèle.

### I.8.4. Module photovoltaïque associe en série parallèle

Afin d'obtenir des puissances de quelques kW, sous une tension convenable, il est nécessaire d'associer les cellules élémentaires en série pour augmenter la tension, et en parallèle pour augmenter le courant moyennant quelques précautions et de monter les panneaux en rangées de panneaux série et parallèle pour former ce que l'on appelle un générateur photovoltaïque. Selon l'association en série et/ou parallèle de ces cellules, les valeurs du courant de court-circuit total et de la tension à vide totale sont données par les relations.

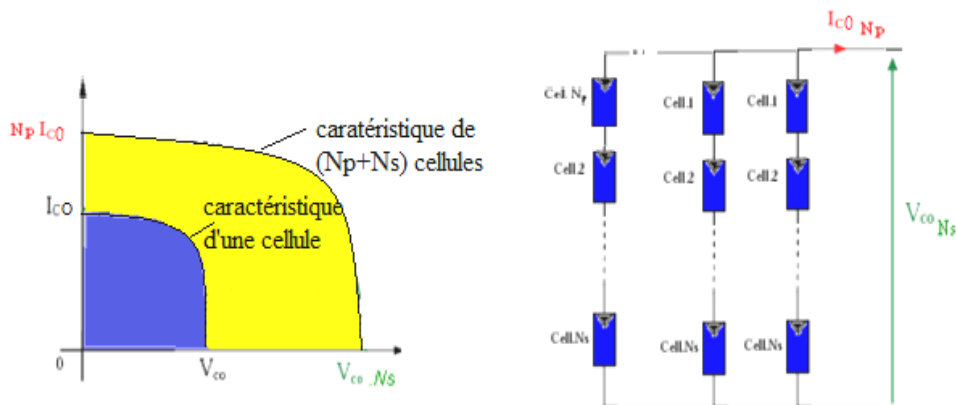
$$I_{SC0} = N_P \times I_{C0} \quad \text{Et} \quad V_{SC0} = N_S \times V_{C0}$$

Avec :

$N_P$  : nombre des cellules en parallèle,

$N_S$  : nombre des cellules en série.

La figure I.22 montre la caractéristique résultante obtenue en associant, en série  $N_S$  et en parallèle  $N_P$ , cellules identiques.



**Figure I. 22** : association mixte  $N_S \times N_P$  modules solaires.

Selon l'association en série et/ou parallèle de ces cellules, les valeurs du courant de court-circuit  $I_{cc}$  et de la tension à vide  $V_{oc}$  sont plus ou moins importantes.

La caractéristique d'un générateur PV constitué de plusieurs cellules a une allure générale assimilable à celle d'une cellule élémentaire, sous réserve qu'il n'y ait pas de déséquilibre entre les caractéristiques de chaque cellule (irradiation et température uniformes).

## I. 8.5. Diodes de Protection

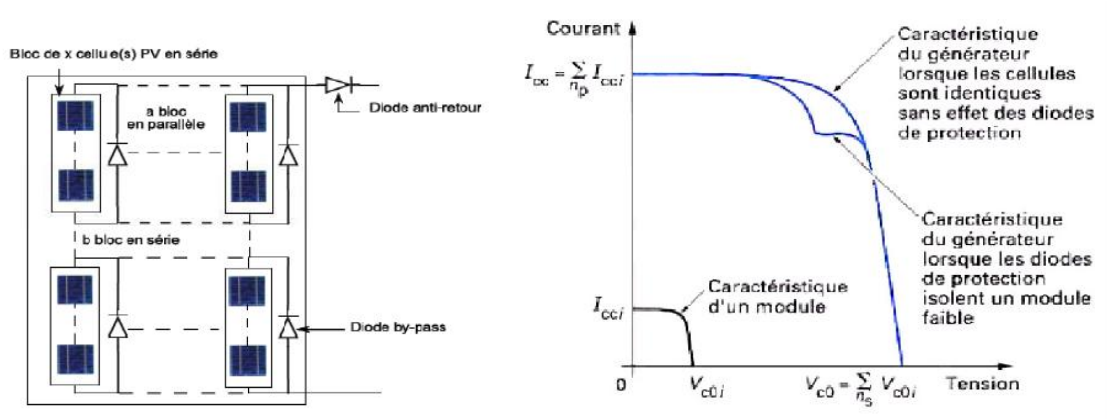


Figure I.23 : les diodes de protection du générateur PV.

La mise en conduction des diodes de protection effectué la caractéristique de sortie du générateur comme illustré sur la figure I.23 par la perte d'une partie de la protection d'énergie et par la présence de deux maximums de puissance. [12]

### I.8.5.1. Protection par des diodes dans un groupement série

Si les cellules des modules en série ne sont pas identiques ou si certaines cellules sont partiellement ombragées, les problèmes apparaissant sont de plus en plus fréquents, la tension d'utilisation des modules en série sera légèrement diminuée .Pour une impédance de charge faible, les cellules moins efficaces peuvent devenir réceptrices si le courant d'utilisation est inférieur au courant produit par ces cellules. Ainsi, pour une impédance nulle (court-circuit), une cellule ombragée sera soumise à ses bornes à une tension inverse égale à la somme des tensions délivrées par les autres cellules. [11]

Chaque série est alors protégée d'une diode by-pass ou anti parallèle est placée sur un groupement élémentaire de 30 à 40 cellules maximum. Quand une cellule est mal éclairée, la diode permet d'éviter que le fort échauffement résultant ne provoque une dégradation ou une panne ; elle permet également de limiter la baisse de performance qui découle de cet échauffement pour l'ensemble du module (et pour les autres modules en série à celui-ci). [11]

### I.8.5.2. Protection par des diodes dans un groupement parallèle

Si les modules en parallèles ne sont pas identiques ou si quelques cellules d'un module sont ombragées, le courant d'utilisation total des modules sera plus faible. Pour une impédance de charge élevée, les modules moins performants deviendront récepteurs si la tension d'utilisation est supérieure à la tension produite par ces modules.

Une dissipation de puissance importante peut devenir dangereuse au niveau de la cellule la plus faible de ces modules. [11]

De façon duale, une diode anti retour protège chaque groupement série, des branches en parallèles adjacentes.il empêchant un courant négatif dans les générateurs.

### ❖ Aide pour le choix des modules résumé

Pour le choix du module, il convient également de faire attention :

- à la qualité de la finition des produits.
- aux tests et aux certifications des contrôles indépendants réalisés sur les produits sont également utiles. [11]

## I.9. Simulation d'un générateur photovoltaïque

### I.9.1. Présentation du logiciel de travail

La simulation, bien connue de nos jours des machines électriques et des entraînements, permet d'analyser les résultats du système avec beaucoup de précision. Dans notre cas toutes les simulations sont effectuées par le logiciel MATLAB.

MATLAB est un logiciel destiné principalement au calcul scientifique, à la modélisation et à la simulation. Il permet de résoudre des équations différentielles pouvant comporter certains types de non linéarités. Il comporte des modules qui peuvent réaliser des fonctions comme la Somme, l'Intégration, des bibliothèques spécialisées sont disponibles (les "Toolboxes") pour la plupart des domaines scientifiques nécessitant des moyens de calcul importants : automatique, traitement de signal, mathématiques appliquées, télécommunications, etc.

Des modules temps réel, développés autour des produits dSPACE (Real Time Interface, TRACE, COCKPIT) sont également proposés et rendent l'environnement de travail particulièrement attractif : l'utilisateur dispose en effet de tous les outils nécessaires à l'élaboration d'une application sur procédé réel, de la simulation à la supervision.

Les simulations proposées sont réalisées sous **MATLAB version 7.10 (R2010a)**, le passage aux versions 7 nécessite quelques adaptations mineures.

### I.9.2. Les schémas blocs d'un panneau PV

Dans ce travail on a choisi le Modèle d'une Cellule PV idéal à Cinq paramètres du type poly cristalline Blue solaire modèles SPP032502400, à partir des équations (1.7),(1.8) ,(1.9),(1.10) et (1.11) de ce modèle, nous établissons le modèle simulink du module PV représenté par la figure I.24. Comportant quatre paramètres, deux variables d'entrées qui sont : l'ensoleillement dans le plan des panneaux  $E$  ( $W/m^2$ ), température de jonction des cellules  $T_0$  ( $C^\circ$ ) et deux variables de sortie : courant fourni par le GPV  $I$ (A), tension aux bornes du GPV  $V$ (V), les paramètres du module PV choisie a température et éclairement aux STC ( $E= 1000 W/M^2$ ,  $T= 25^\circ C$ ) avec  $N_s=36$  , $N_p=1$  et  $C=0.045A/C^\circ$  :

Article Number	Description	Net weight	Electrical data under STC (1)				
			Nominal Power	Max-Power Voltage	Max-Power Current	Open-Circuit	Short-Circuit Current
			$P_{MPP}$	$V_{MPP}$	$I_{MPP}$	$V_{oc}$	$I_{sc}$
		Kg	W	V	A	V	A
SPP031001200	100W-12V Poly 1000×670×35 mm series 3a	8.9	100	18	5.56	21.6	6.32
SPP031401200	140W-12V Poly 1480×673×35 mm series 3a	12	140	20	7.78	21.6	8.85
SPP032502400	250W-20V Poly 1650×992×40 mm series 3a	18	250	30	8.33	36.01	9.40

Tableau I.1 : les paramètres du module PV modélisé.

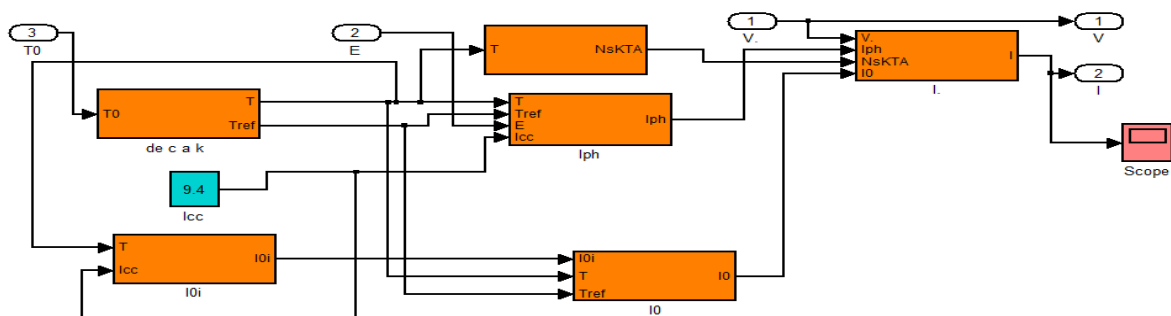


Figure I.24 : modèle simulink représentant schéma de block PV.

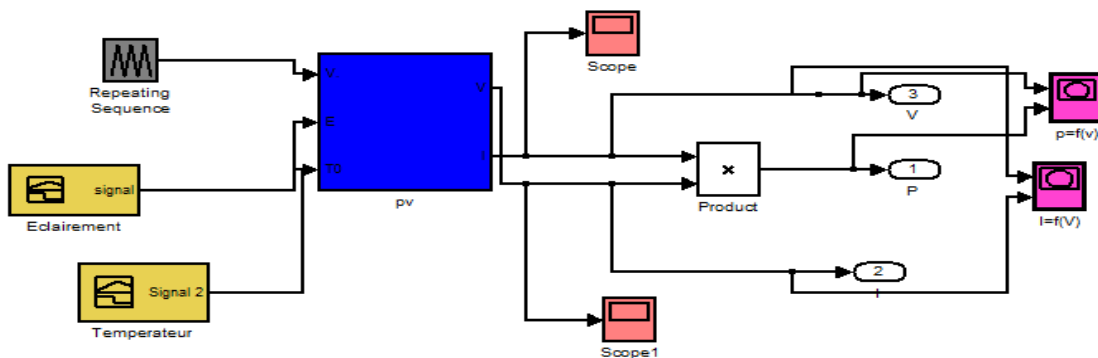
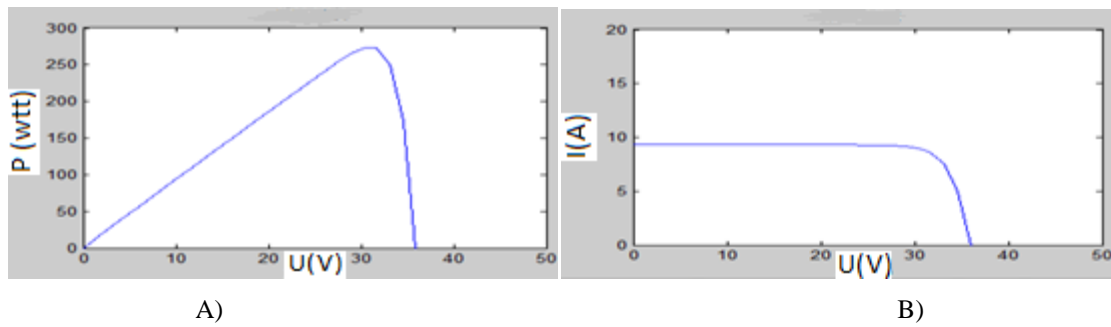


Figure I.25 : modèle simulink du générateur photovoltaïque.

### I.9.3. Résultat de simulation



**Figure I.26** : Caractéristiques électriques du module PV a température et éclairement cst.

D'après la figure I.26.D, Pour notre modèle de panneau photovoltaïque on a trouvé que le facteur de forme est comme suite :

$$FF = \frac{P_{\max}}{V_{Co} \times I_{CC}} = \frac{V_{\max} \times I_{\max}}{V_{Co} \times I_{CC}} = \frac{30 \times 8.33}{36.1 \times 9.4}$$

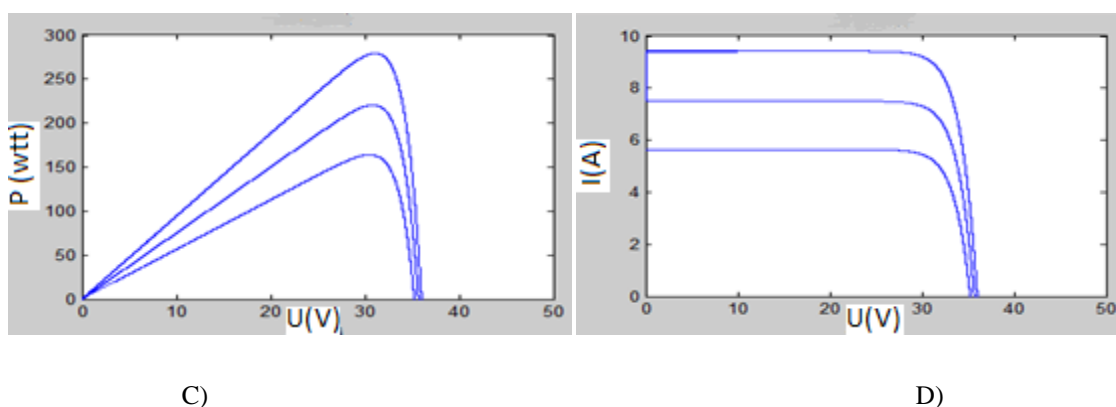
Donc :  $FF=0.738$ .

Et la valeur idéale de rendement de panneau photovoltaïque de notre modèle est :

$$\eta = \frac{P_{\max}}{S \times E} = \frac{249.9}{1.63 \times 1000} = 0.15$$

D'où :  $\eta = 15\%$ .

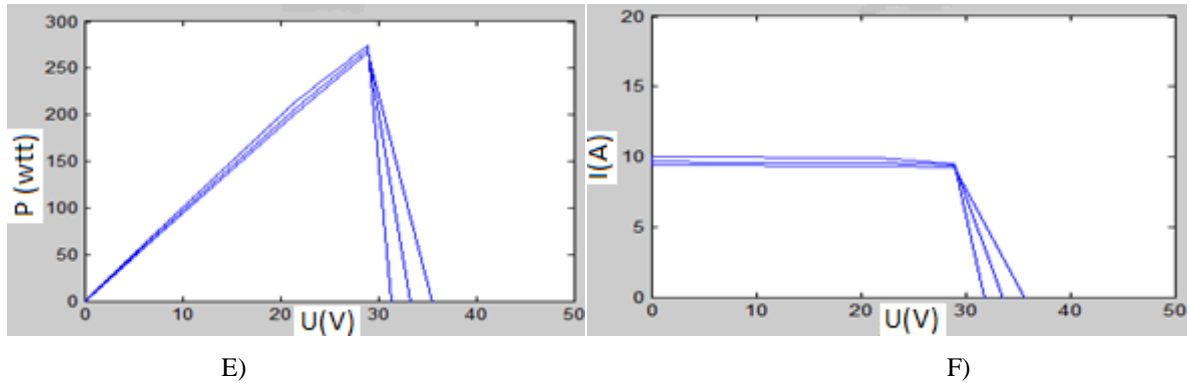
L'équation de rendement de panneau photovoltaïque de notre modèle est  $\eta = 15\%$  donc notre modelé est valide car il a un bon rendement.



**Figure I.27**: Caractéristiques électriques du module PV pour différent éclairement et une température cst ( $T= 25\text{ C}^\circ$ ).

D'après la figure I.27.D, on remarque une diminution du courant de court-circuit par rapport à l'éclairement et une faible diminution de la tension du circuit ouvert. C'est qui

prouve que le courant de court circuit de la cellule dépend au éclairement, par contre la tension de circuit ouvert subit une légère augmentation quand l'éclairement varie de 800 W/m<sup>2</sup> a 1000 W/m<sup>2</sup>.et aussi On remarque sur la figure I.27.C que, l'éclairement influe proportionnellement sur la puissance et la tension du circuit ouvert du GPV.



**Figure I.28:** Caractéristiques électriques du module PV pour différent température et un éclairement cts ( $E= 1000 \text{ W/M}^2$ ).

On constate d'après la figure I.28.F que l'effet de l'augmentation de la température fait diminuer la tension du circuit ouvert du GPV, contrairement au courant de court-circuit qui reste constant. D'après la figure I.28.E l'effet de l'augmentation de la température sur la caractéristique  $P_{pv} = f(V_{pv})$  fait diminuer la puissance et la tension du circuit ouvert du GPV. La modèle choisi a donné des résultats concordant avec ceux obtenus la littérature et reflète bien le comportement physique d'une cellule (PV) vis-à-vis des variations de la température et de l'éclairement, ce qui valide le modèle utilisé.

## I.10. Les avantages et Les inconvénients du photovoltaïque

### I.10.1. Les avantage

- L'investissement et le rendement sont prévisibles à long terme.
- Ce sont des systèmes simples et rapides à installer qui nécessitent très peu de maintenance (d'où des frais de maintenance relativement faibles).
- Le solaire photovoltaïque ne comporte aucune pièce en mouvement, la production électrique est réalisée sans combustion ; il n'existe donc ni d'usure due aux mouvements, ni d'usure thermique comme pour les chaudières.

- Cette technologie utilisée dans l'aérospatiale a prouvé sa stabilité et sa fiabilité durant des dizaines d'années. En général, les panneaux photovoltaïques sont garantis 25 ans (et peuvent fonctionner 40 ans quasiment sans diminuer leur rendement).
- Ce système produit de l'électricité sur place ; il peut donc être installé là où on en a besoin, sans être raccordé à un quelconque réseau.

### **I.10.2. Les inconvénients**

- Les panneaux solaires coûtent excessivement cher, du fait de la haute technicité qu'ils requièrent.
- Le rendement actuel des cellules photovoltaïques reste assez faible (environ 10% pour le grand public) et donc ne délivre qu'une faible puissance. De ce fait, pour couvrir un besoin familial, une grande surface de panneaux photovoltaïques est nécessaire.
- Pour cette même raison d'ensoleillement, les panneaux solaires ne peuvent pas s'installer n'importe où, ni n'importe comment, sous peine de voir le gain d'énergie divisé par deux par rapport aux valeurs théoriques.
- Le stockage de l'électricité est également très difficile avec les technologies actuelles (problème contourné en cas de raccord avec le réseau EDF).
- Le recyclage des cellules photovoltaïques en fin de vie pose des problèmes environnementaux. Les batteries utilisés par les panneaux photovoltaïques sont composées de plomb, de zinc, de cadmium, . . . et donc ont un impact sur l'environnement.

### **I.11. Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons cité les différents types des cellules PV et présenté leurs principes de fonctionnement ainsi leurs caractéristiques qui vont nous illustrer certains paramètres importants : le courant de court-circuit, la tension à vide, la puissance maximale, le facteur de forme et le rendement de conversion.

La modélisation du panneau solaire photovoltaïque, en commençant du modèle idéal jusqu'au modèle réel (avec résistances série et parallèle) qui tient compte des phénomènes dissipatifs qui modifient la puissance ainsi le rendement du module PV, et l'impact de l'ensoleillement et de la température ont été également vus dans ce chapitre.

## Chapitre II

# Poursuit de point de puissance maximale (MPPT)

### II.1. Introduction

Comme nous avons vu dans le chapitre précédent, les caractéristiques d'un module solaire montrent que la puissance maximale générée dépend fortement de l'intensité des radiations solaires ainsi que de la température.

Le but de ce chapitre est l'étude de la technique qui permet la recherche et la poursuite du point de puissance maximale, appelé « maximal power point tracking, (MPPT) ». Cette recherche est faite par l'association d'un convertisseur statique DC/DC entre le panneau solaire et la charge, nous nous intéressons plus spécifiquement au hacheur de type BOOST.

La deuxième partie de ce chapitre, est consacrée à la description des méthodes de MPPT, choisies pour la simulation. Ensuite, des résultats de simulations sont présentés, effectués avec le logiciel Matlab/Simulink, avec la méthode, Perturbe & Observe, 'P & O'.

### II.2. Parti 01: le contrôle de la puissance électrique

#### II.2.1. Type de Convertisseur

Les convertisseurs sont des appareils servant à transformer la tension continue fournie par les panneaux ou les batteries pour l'adapter à des récepteurs fonctionnant soit à une tension continue différente, à une tension alternative. [12] ils sont donc constitués « d'interrupteurs » et d'éléments de stockage d'énergie (bobines ou condensateurs idéaux qui n'absorbent aucune puissance moyenne, leur facteur de puissance étant nul), nous citons ci-dessous les principaux convertisseurs :

### II.2.1.1. Les redresseurs (AC-DC)

Les redresseurs réalisent la conversion CA/CC, ils sont souvent utilisés pour charger des batteries à partir d'une source à CA. Ce sont des appareils relativement simples, pas chers et à bon rendement. [13]

#### Domaine d'utilisation et d'application :

- Un redresseur-chargeur, alimenté par le réseau, constitué soit d'un pont à diodes suivi d'un hacheur, soit d'un pont commandé.
- Les chargeurs de batterie qui varient de 1 jusqu'à 24 v. (téléphone portable, batterie de véhicule).
- Pour alimenter les systèmes de commande des différents convertisseurs ou de machines tournantes. [13]

### II.2.1.2. Les onduleurs (DC-AC)

Est un convertisseur statique assurant la conversion CC en CA. Ils peuvent fonctionner en autonome pour alimenter des charges à CA ou en parallèle avec des sources à CA. Les onduleurs sont autonomes lorsqu'ils imposent leur propre fréquence à la charge. L'onduleur non autonome exige la présence d'une source à CA pour fonctionner.

Il y a aussi des onduleurs qui peuvent assurer les deux régimes de fonctionnement : autonome ou en parallèle avec une autre générateur. Ceux-ci sont les plus flexibles, mais aussi les plus chers. Par exemple, pour adapter la tension entre deux sources. [14]

#### Domaine d'utilisation :

En ce qui concerne les applications industrielles, nous rencontrerons l'onduleur en sortie des variateurs de fréquence pour alimenter les moteurs asynchrones.

- Production de tension sinusoïdale de fréquences moyennes (de quelques kHz à environ 10Khz): soudage, chauffage par induction.
- Alimentations alternatives de secours fonctionnant sur batteries d'accumulateurs.
- Alimentation des moteurs à courant alternatif à fréquence variable. [13]

### II.2.1.3. Les gradateurs (AC-AC)

Le gradateur est un montage qui permet de contrôler la puissance absorbée par un récepteur en régime alternatif sans changer la fréquence de l'onde alternative de la source.[14]

## Le domaine d'utilisation :

- Chauffage.
- Utilisés sur des systèmes présentant une inertie thermique importante.
- Les gradateurs sont utilisés pour réaliser des variateurs dans certains appareils fonctionnant sur le réseau (lampes halogènes, aspirateurs domestiques, outillage électroportatif, ...), pour la régulation de chauffage électrique, ainsi que dans de nombreux processus industriels, comme le démarrage des moteurs asynchrones. [14]

### II.2.1.4. Les Hacheurs

A nos jours, les convertisseurs DC-DC sont connus sous le nom « Hacheurs », ils sont réglés avec des MLI (Modulations de la Largeur d'Impulsion) permettant de convertir une énergie continue à un niveau donné de tension (ou de courant) en une énergie continue à un autre niveau de tension (ou de courant). Son utilisation s'avère nécessaire pour stocker l'énergie photovoltaïque dans des batteries, ou pour alimenter une charge continue. [15]

Le hacheur se compose de condensateurs, d'inductance et de commutateurs. Dans le cas idéal, tous ces dispositifs ne consomment aucune puissance active, c'est la raison pour laquelle on a de bons rendements dans les hacheurs. [16]

Les hacheurs sont des convertisseurs continu qui procèdent par découpage d'une grandeur d'entrée continue, tension ou courant et dont la grandeur de sortie est également continue ou à faible ondulation. [17]

La technique du découpage a apporté une solution au problème du mauvais rendement et de l'encombrement des alimentations séries.

Dans une alimentation à découpage Figure II.1, la tension d'entrée est "hachée" à une fréquence donnée par un transistor alternativement passant et bloqué.

Il en résulte une onde carrée de tension qu'il suffit de lisser pour obtenir finalement une tension continue. [18]

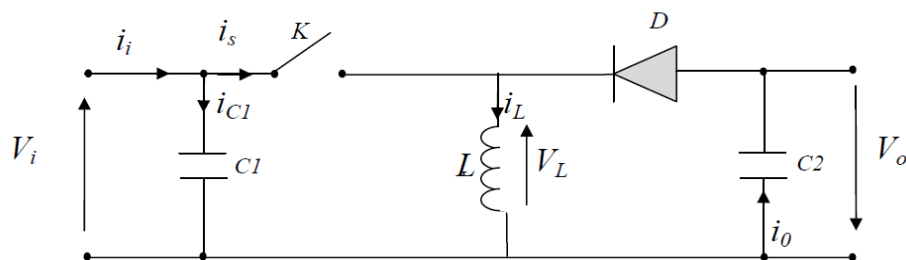
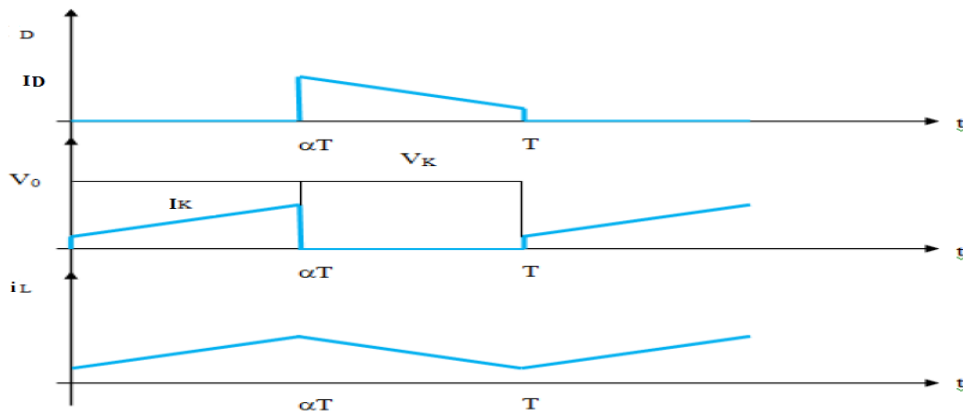


Figure II.1 : Schéma de principe d'un type d'alimentation à découpage.

La régulation de la tension de sortie à un niveau constant est réalisée par une action sur le "rapport cyclique", défini comme la fraction de la période de découpage où l'interrupteur est passant figure II.2. L'interrupteur est un dispositif semi-conducteur en mode tout-rien (bloqué – saturé), habituellement un transistor MOSFET. Si le dispositif semi-conducteur est bloqué, son courant est zéro et par conséquent sa dissipation de puissance est nulle. Si le dispositif est dans l'état saturé la chute de tension à ses bornes sera presque zéro et par conséquent la puissance perdue sera très petite. [18]

Pendant le fonctionnement du hacheur, le transistor sera commuté à une fréquence constante  $f_s$  avec un temps de fermeture  $=T_{ds}$  et un temps d'ouverture  $= (1-d) T_s$ . Où:

- $T_s$  est la période de commutation qui est égale à  $1/f_s$ .
- $d$  le rapport cyclique du commutateur ( $d \in [0, 1]$ ).



**Figure II.2 :** Chronogrammes de courant et tension d'un hacheur boost.

### II.3. Différents types d'hacheurs

Selon la position du commutateur et du hacheur, différents types de convertisseurs de tension peuvent être réalisés :

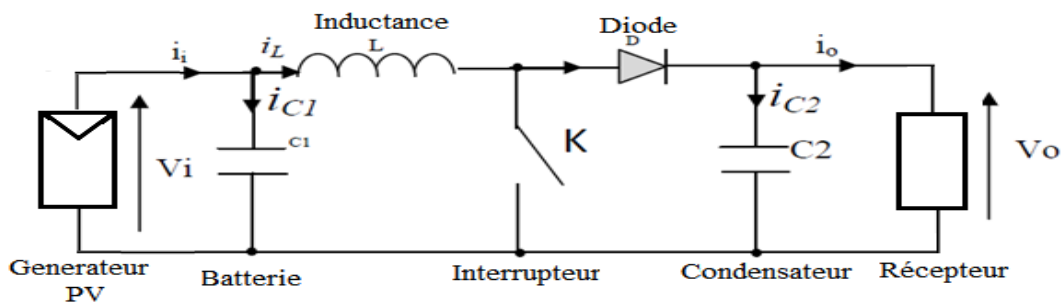
- ❖ abaisseur de tension « Buck ».
- ❖ élévateur de tension « Boost ».
- ❖ abaisseur élévateur de tension « Buck-Boost ».

#### II.3.1. Convertisseurs vers le haut (élévateur de tension) de type BOOST

C'est un convertisseur direct DC–DC. 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). [19]

Lorsque l'interrupteur est fermé, l'inductance stocke le courant provenant de la batterie ; lorsque l'interrupteur s'ouvre, l'interruption du courant dans l'inductance provoque une surtension qui est dérivée dans le condensateur et le récepteur ; la diode empêche tout retour de courant.

Le condensateur sert à lisser la tension de sortie et l'interrupteur est commandé par une électronique de contrôle qui mesure en permanence la tension et le courant de sortie pour ajuster la fréquence et la largeur de commande de l'interrupteur et limite le courant à une valeur sûre pour les composants. Le rendement typique dépasse en général 70% et peut atteindre 85 à 90% pour les meilleurs convertisseurs.



La figure II.3 : présente les composants typiques d'un convertisseur vers le haut.

Le schéma de la figure II.3, représente le circuit électrique du Boost. Au premier temps ( $\alpha T$ ), l'interrupteur (K) est fermé, le courant dans l'inductance (L) croît progressivement, et au fur et à mesure, elle emmagasine de l'énergie, jusqu'à la fin de la première période. Ensuite, Pendant le temps  $t \in [\alpha T, T]$  l'interrupteur (K) s'ouvre et l'inductance (L) s'opposant à la diminution de courant ( $i_L$ ), génère une tension qui s'ajoute à la tension de source, qui s'applique sur la charge (R) à travers la diode (D).

Afin de pouvoir synthétiser les fonctions du hacheur survolteur à l'état d'équilibre, il est nécessaire de présenter le circuit équivalent du boost lorsque K est fermé c-à-d entre  $[0, \alpha T]$ :

L'application des lois de Kirchhoff donne

$$i_{c1}(t) = C_1 \frac{dV_i(t)}{dt} = i_i(t) - i_L(t) \quad (II.1)$$

$$i_{c2}(t) = C_2 \frac{dV_o(t)}{dt} = -i_o(t) \quad (II.2)$$

$$V_L(t) = L \frac{di_L(t)}{dt} = V_i(t) \quad (II.3)$$

À l'état ouvert de l'interrupteur K :

$$i_{c1}(t) = C_1 \frac{dV_i(t)}{dt} = i_i(t) - iL \quad (\text{II.4})$$

$$i_{c2}(t) = C_2 \frac{dV_i(t)}{dt} = iL(t) - i_0(t) \quad (\text{II.5})$$

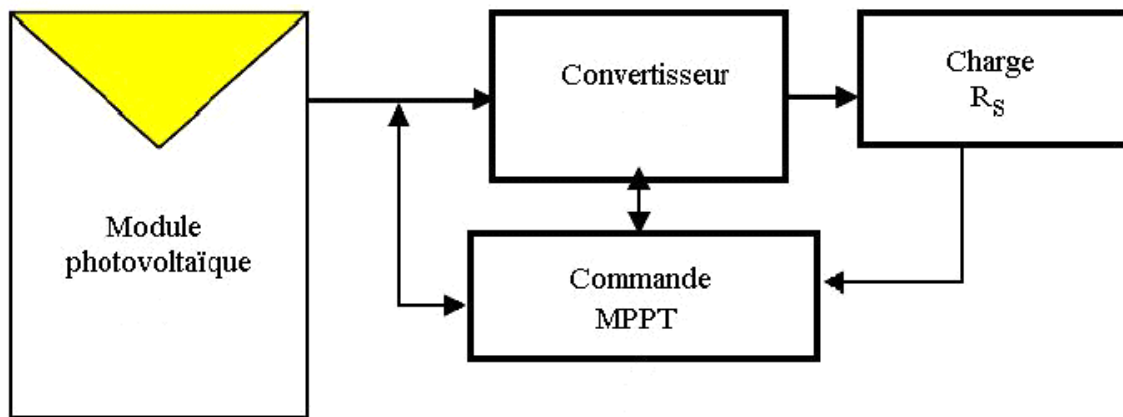
$$V_L(t) = L \frac{diL(t)}{dt} = V_i(t) - V_0(t) \quad (\text{II.6})$$

Les expressions de la valeur moyenne de la tension de sortie du hacheur ainsi que la valeur moyenne du courant d'entrée du hacheur sont données par :

$$V_{0moy} = V_i \frac{1}{1-D} \quad i_0 \quad (\text{II.7})$$

$$I_{0moy} = (1 - D)i_i \quad (\text{II.8})$$

#### II.4. Parti 02 : Principe de la recherche du point de puissance maximal



**Figure II.4** : Schéma synoptique d'un système photovoltaïque avec MPPT.

Cette figure II.4 comprenant les blocs suivants:

- 1-un module photovoltaïque, délivrant dans les conditions standard.
- 2-une charge en sortie.
- 3-un convertisseur (DC/DC) d'énergie qui est Un quadripôle d'adaptation pour des applications nécessitant des tensions supérieures à celle optimales.il comporte une commande appelée MPPT (de l'anglais Maximum Power Point Tracking) qui recherche automatiquement le point de puissance maximum (PPM) du générateur. Que ce soit une commande analogique ou digitale, le principe du convertisseur est basé sur la variation automatique du rapport cyclique (a ou D) du convertisseur pour s'approcher de la valeur optimum de manière à maximiser la puissance à la sortie du panneau PV. L'algorithme de recherche MPPT peut être

plus ou moins complexe en fonction du type d'implantation choisi et des performances recherchées mais dans tout les cas la variation du rapport cyclique du convertisseur de puissance associé fournit le degré de liberté nécessaire pour fixer le point de fonctionnement.

#### II.4.2. Méthodes du MPPT

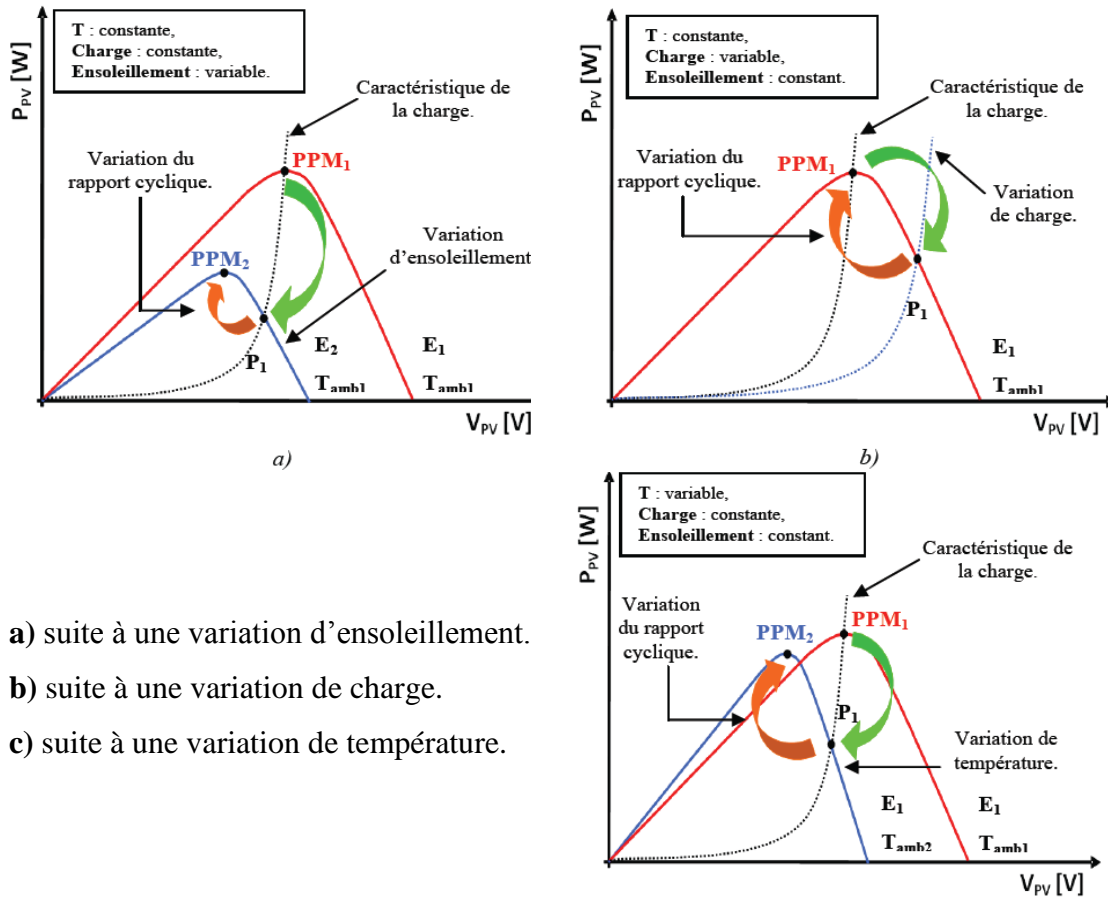
Les systèmes photovoltaïques (PV) offrent une solution très concurrentielle. Pour surmonter le problème de rendement des panneaux solaires et obtenir un rendement maximum, il est nécessaire d'optimiser la conception de toutes les parties du système PV. En outre, il est nécessaire d'optimiser les convertisseurs (DC/DC) employés comme interface entre le générateur PV et la charge afin d'extraire le maximum de puissance et ainsi faire fonctionner le générateur GPV à son point de puissance maximum (MPP) à l'aide d'un contrôleur MPPT (maximum power point tracking), par conséquent, obtenir un courant électrique maximum sous la variation de la charge et des conditions atmosphériques (luminosité et température). [20]

Le principe de ces méthodes est de déplacer le point de fonctionnement en augmentant  $V_{PV}$ , lorsque  $\frac{dPPV}{dV_{PV}}$  est positif ou en diminuant  $V_{PV}$ , lorsque  $\frac{dPPV}{dV_{PV}}$  est négatif.

Lors du régime transitoire ou permanent, ces commandes doivent estimer et comparer la puissance avec celle de l'instant précédent. Les performances de celles-ci sont liées à la rapidité avec laquelle le point MPP est atteint, à la manière d'osciller autour de ce même point mais aussi à la robustesse pour éviter une divergence lors de changements brutaux d'ensoleillement ou de charge.

La figure II.5 illustre trois cas de perturbations. Suivant le type de perturbation, le point de fonctionnement bascule du point de puissance maximal PPM1 vers un nouveau point P1 de fonctionnement plus ou moins éloigné de l'optimum. Pour une variation d'ensoleillement (cas a), il suffit de réajuster la valeur du rapport cyclique pour converger vers le nouveau point de puissance maximum PPM2. Pour une variation de charge (cas b), on peut également constater une modification du point de fonctionnement qui peut retrouver une nouvelle position optimale grâce à l'action d'une commande. Dans une moindre mesure, un dernier cas de variation de point de fonctionnement peut se produire lié aux variations de température de fonctionnement du GPV (cas c). Bien qu'il faille également agir au niveau de la commande, cette dernière n'a pas les mêmes contraintes temporelles que les deux cas précédents. En résumé, le suivi du PPM est réalisé au moyen d'une commande spécifique nommée MPPT

qui agit essentiellement sur le rapport cyclique du convertisseur statique (CS) pour rechercher et atteindre le PPM du GPV.



- a) suite à une variation d'ensoleillement.
- b) suite à une variation de charge.
- c) suite à une variation de température.

Figure II.5 : Recherche et recouvrement du Point de Puissance Maximal.

### II.4.2.1. Les différentes commandes MPPT

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

Parmi les techniques couramment utilisées : [21]

- ✚ Observation et perturbation (O&P).
- ✚ Incrémentation de la conductance (INC).
- ✚ Hill-Climbing.

### II.4.2.2. Commandes Perturbation et Observation (P&O)

La méthode perturbation et observation 'P&O', est la plus répandue dans le milieu industriel, car son algorithme est facile à implémenter. 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.

### II.4.2.3. Fonctionnement de l'algorithme Perturbation et Observation (P&O)

Le principe de cette commande est de générer des perturbations en réduisant ou en augmentant le rapport cyclique D et d'observer l'effet sur la puissance délivrée par le GPV  
Figure II.6. [22]

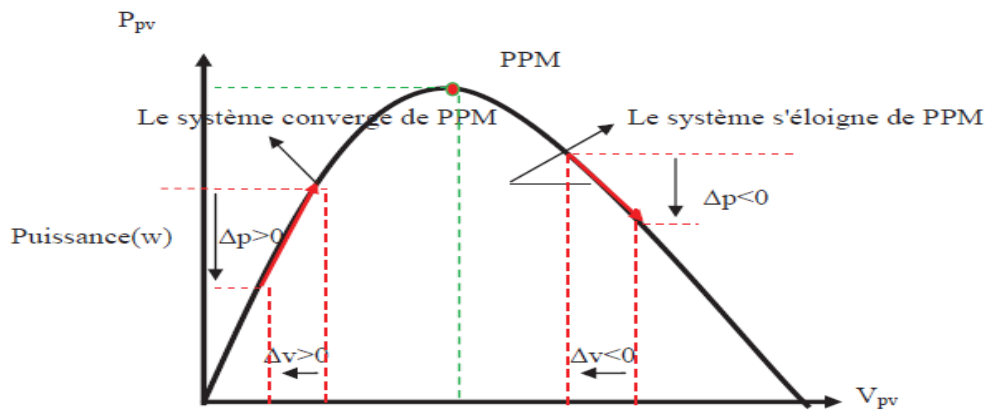


Figure II.6 : Schéma de convergence vers le PPM par P&O.

### II.4.2.4. Algorithme Perturber et Observer (P&O)

La figure II.7 montre l'organigramme de l'algorithme de la méthode 'P&O', tel qu'il doit être implémenté dans le microprocesseur de contrôle. D'après la figure II.7, la tension et le courant V et I. sont mesurés pour calculer la puissance de sortie courante P(k) de la rangée. 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.

Avec cet algorithme, la tension de fonctionnement V est perturbée à chaque cycle du MPPT. Dès que le MPP sera atteint, V oscillera autour de la tension idéale Vmp de fonctionnement. Ceci cause une perte de puissance qui dépend de la largeur du pas d'une perturbation simple Cp.

\* Si  $C_p$  est grande, l'algorithme du MPPT répondra rapidement aux changements soudains des conditions de fonctionnement, mais les pertes seront accrues dans les conditions stables ou légèrement changeantes.

\* Si  $C_p$  est très petite, les pertes dans les conditions stables ou lentement changeantes seront réduites, mais le système ne pourra plus suivre les changements rapides de la température ou de l'insolation. La valeur  $C_p$  idéale dépend du système. Elle doit être déterminée expérimentalement. [23]

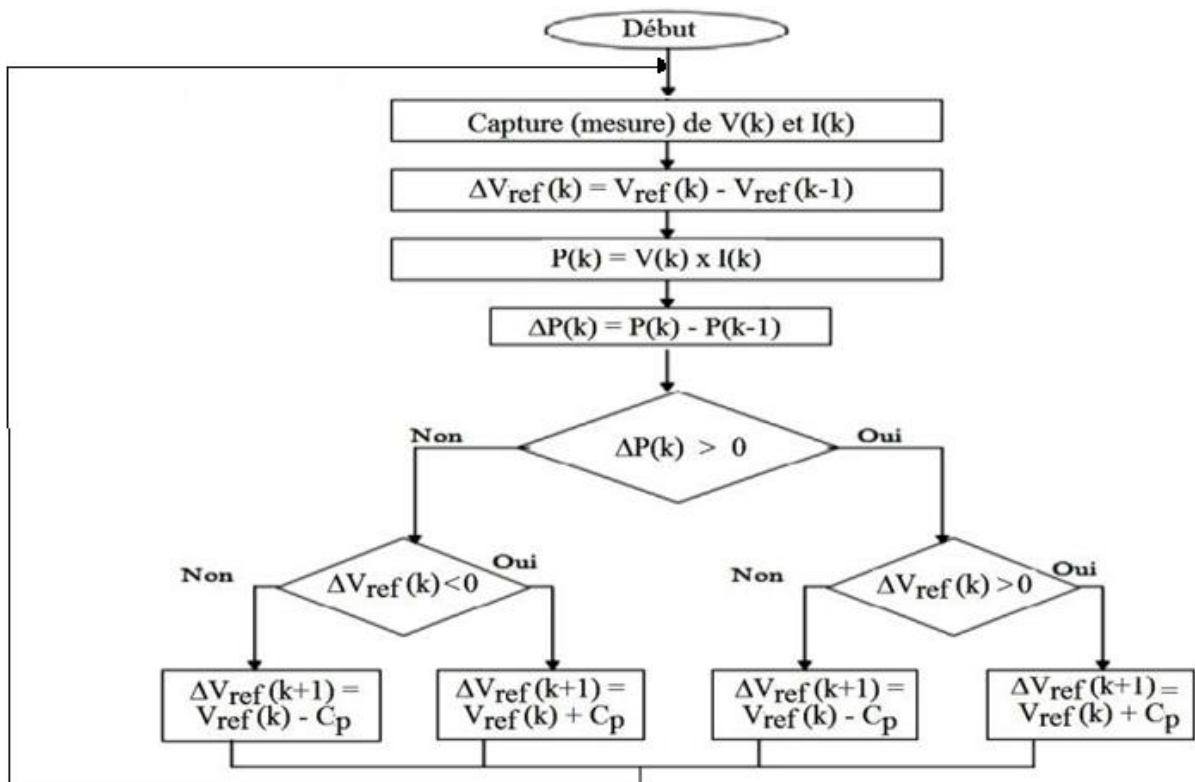
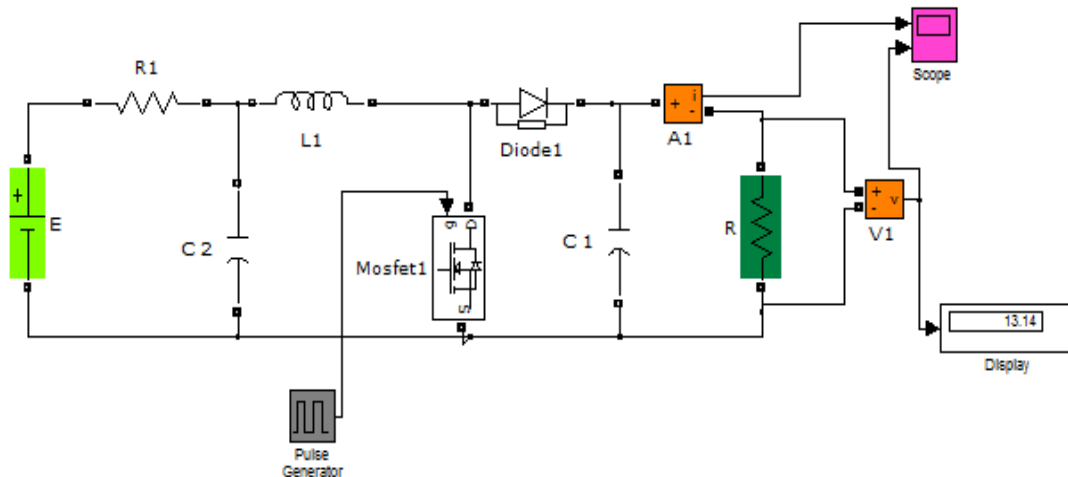


Figure II.7 : l'organigramme de l'algorithme de la méthode 'P&O'

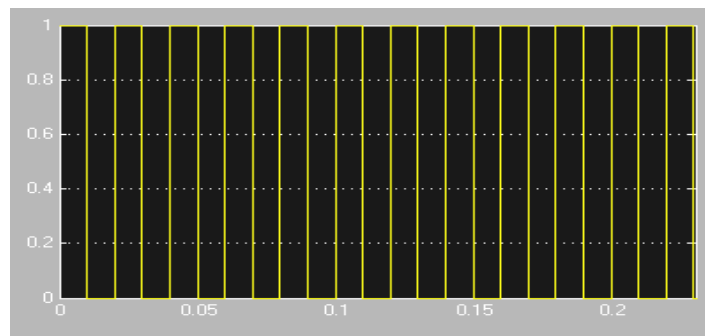
## II.5. Simulation de convertisseur de la tension (type boost) connecté à modèle PV commandé par la commande (MPPT) de type P&O

### II.5.1 Simulation de hacheur survolteur

Pour montrer le rôle des convertisseurs boost nous avons utilisé logiciel Matlab et pour la simulation et nous prenons ( $E=100V$ ,  $L= 10e-3 H$ ,  $R=20\Omega$ ,  $\alpha=0.02$ ).



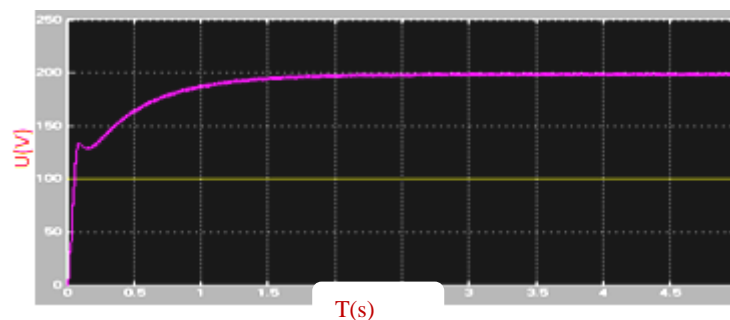
**Figure II.8 :** Convertisseur (DC/DC) survolteur de tension (type boost).



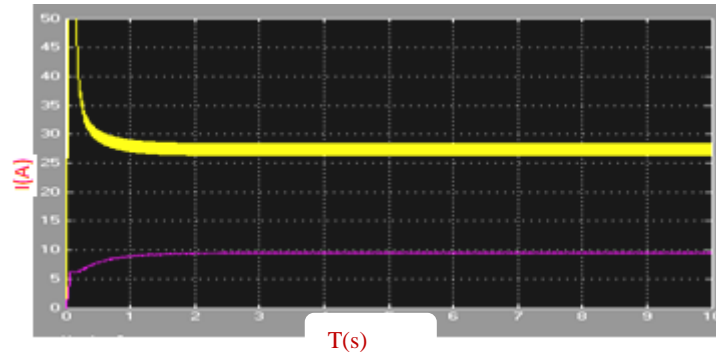
**Figure II.9 :** Signal commande DC/DC (gâchette- d’hacheur).

### Les résultats de simulation

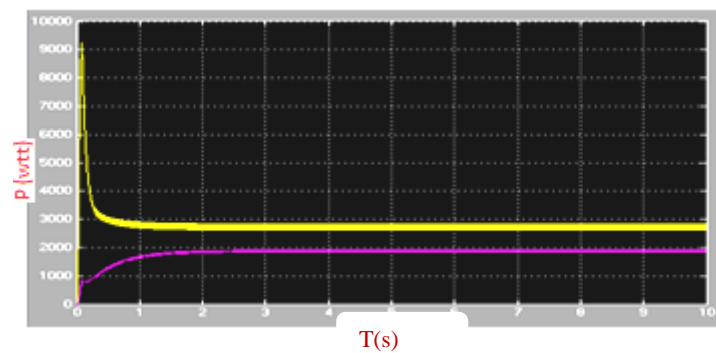
Ces figures représentent les tensions d’entrée et de sortie d’hacheur survolteur ainsi le courant et puissance de sortie d’hacheur. Ces résultats montrent que la tension de sortie d’hacheur survolteur est supérieure à celle d’entrée. Donc le hacheur survolteur effectue correctement son rôle.



**Figure II.10 :** Résultats de simulation de la tension d’entrée (jaune) et de la sortie (violet) du hacheur survolteur.



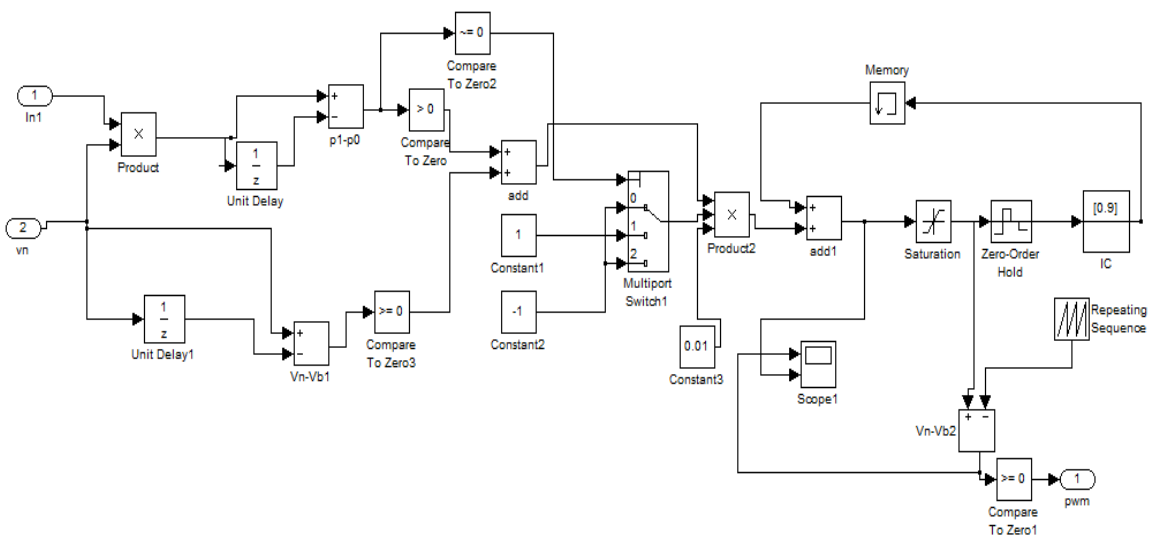
**Figure II. 11** : Résultats de simulation de la valeur du courant d'entrée (jaune) de sortie (violet) du hacheur survolteur.



**Figure II.12** : Résultats de simulation de la puissance sortie (jaune) et d'entrée (violet) du hacheur survolteur.

### II.5.2 Simulation de la méthode MPPT

La figure II.13 illustre le bloc schématique de SIMULINK de la commande de poursuite MPPT :



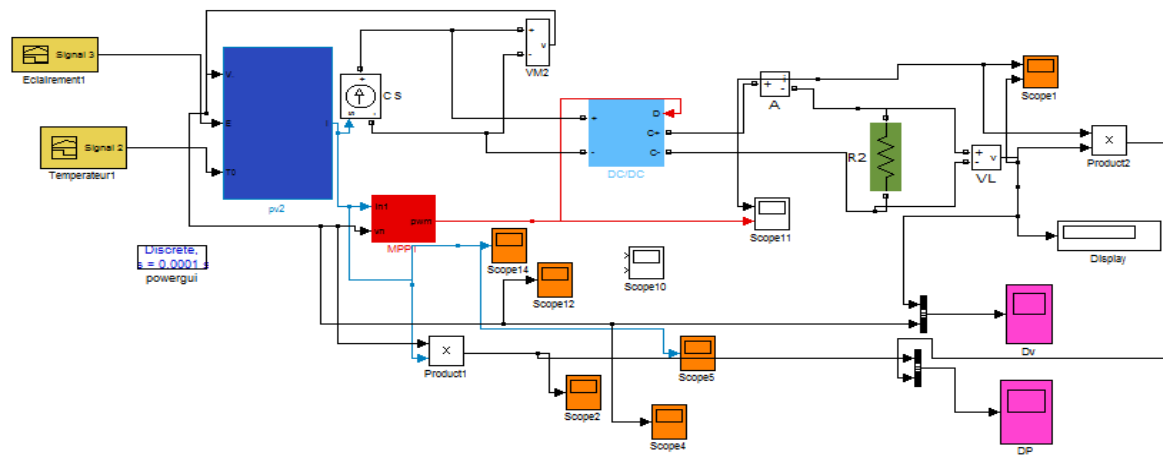
**Figure II.13** : Schéma block de la commande MPPT.

### II.5.3 Simulation de convertisseur de la tension (type boost) connecté à modèle PV commandé par la commande (MPPT) de type P&O

Dans cette simulation on a utilisé un générateur PV et un hacheur boost sn caractérisé pour  $E=1000W/m^2$  et  $T=25^{\circ}C$  par:

- ✚ Inductance d'entrée ( $L = 1mH$ )
- ✚ Capacité d'entrée ( $C1 = 10 mF$ )
- ✚ Capacité de sortie ( $C2 = 5 mF$ )

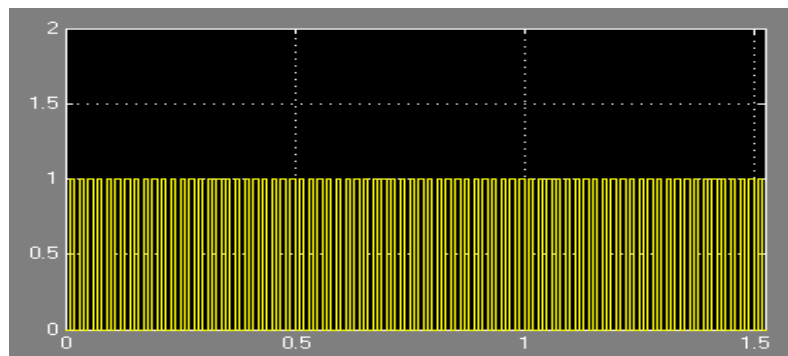
On a utilisé aussi une commande MPPT de type P&O avec une Charge **R** de ( $R = 30\Omega$ )



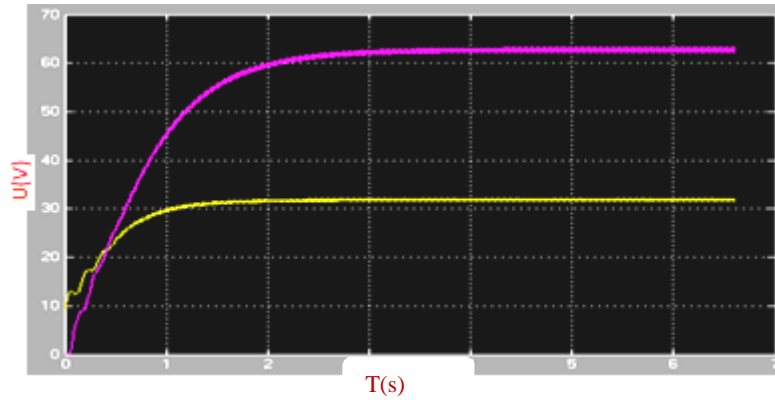
**Figure II.14** : Schéma MATLAB SIMULINK d'un système photovoltaïque avec la commande MPPT (P&O).

### Les résultats de simulation

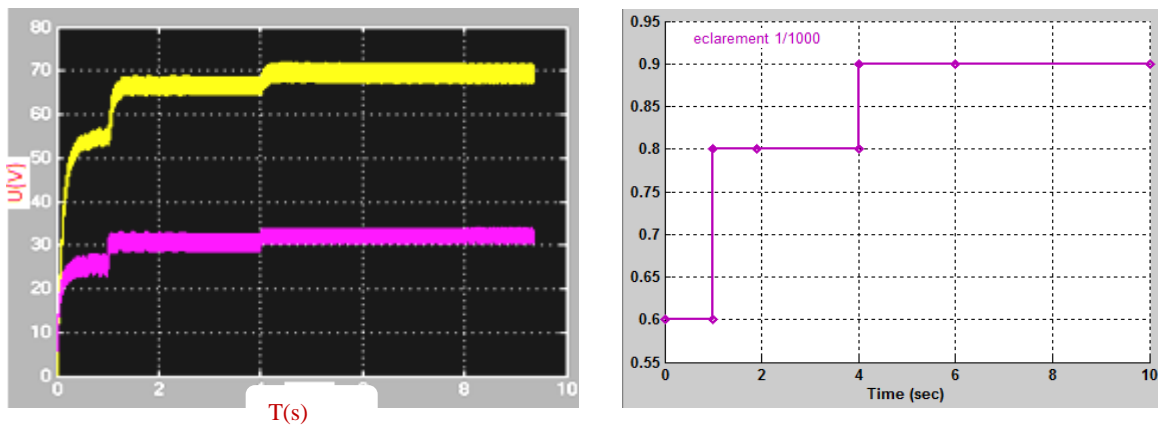
Les résultats de simulation du système photovoltaïque adapté par la commande MPPT « Perturbation et observation » représentent par les figures II.15 à II.21. Ces figures représentent la tension, le courant et la puissance générés par le générateur photovoltaïque. Ainsi, la tension, le courant et la puissance à la sortie du système photovoltaïque aux STC.



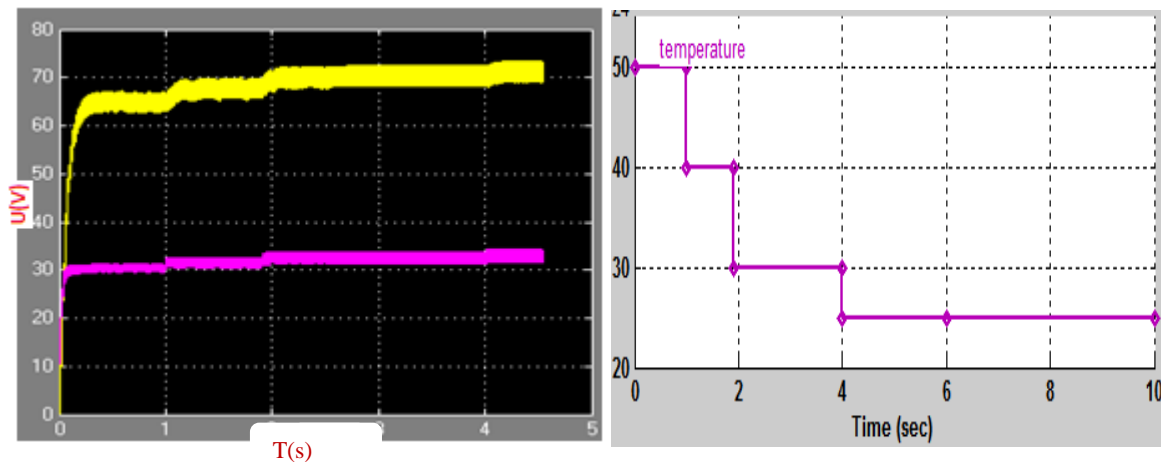
**Figure II.15** : rapport cyclique  $\alpha$  de MPPT.



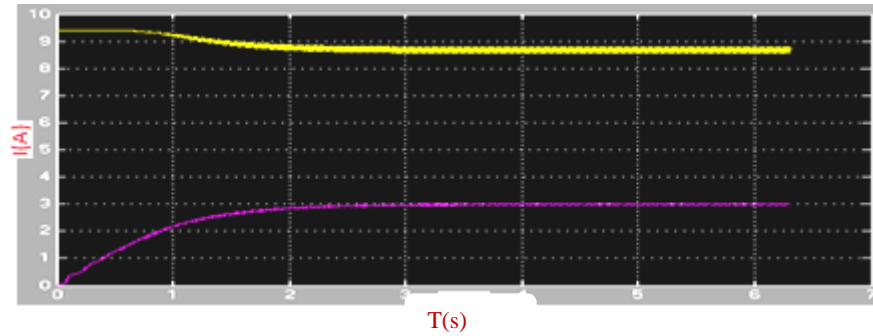
**Figure II.16** : Résultats de simulation de la tension d'entrée (jaune) et de la sortie (violet) du hacheur survolteur.



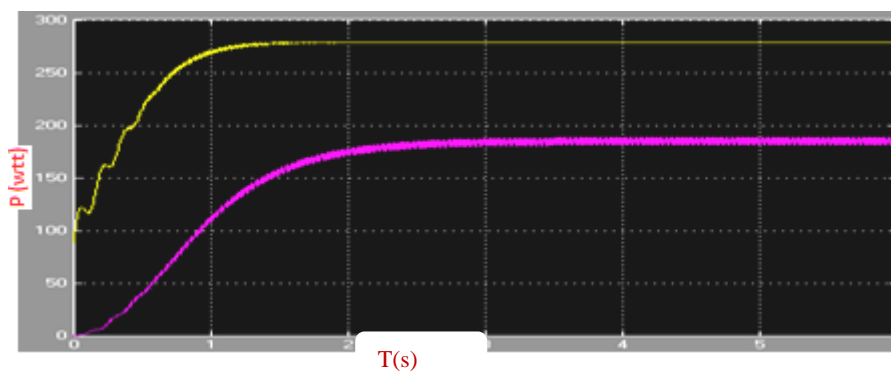
**Figure II.17**: Résultats de simulation de la tension d'entrée (jaune) et de la sortie (violet) du hacheur survolteur pour un éclairement variable.



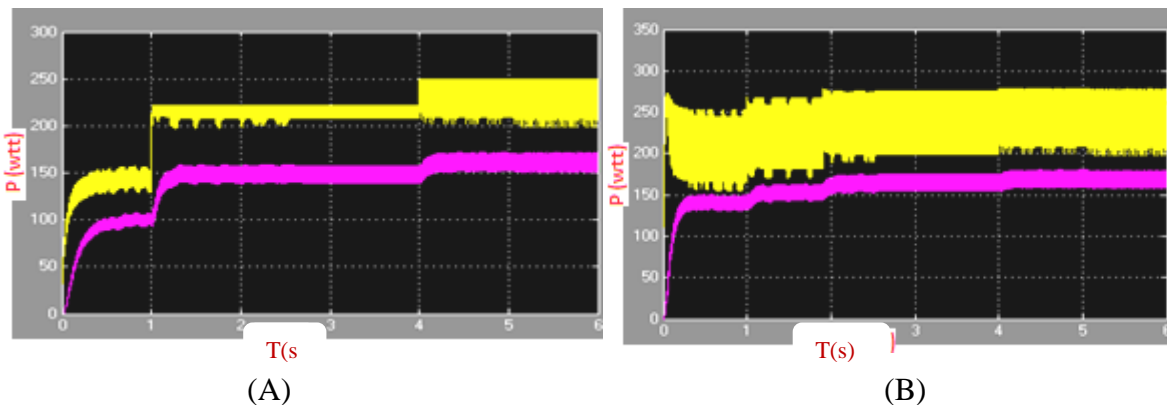
**Figure II.18** : Résultats de simulation de la tension d'entrée (jaune) et de la sortie (violet) du hacheur survolteur pour une température variable.



**Figure II.19** : Résultats de simulation de la valeur du courant d'entrée (jaune) de sortie (violet) du hacheur survolteur.



**Figure II.20** : Résultats de simulation de la puissance sortie (jaune) et d'entrée (violet) du hacheur survolteur.



**Figure II.21** : Résultats de simulation de la puissance sortie (jaune) et d'entrée (violet) du hacheur survolteur pour un éclairage variable (A) et pour une température variable (B).

D'après cette simulation on remarque que le hacheur survolteur fournit une tension à sa sortie supérieure à celle fournie par le générateur photovoltaïque. Et la commande MPPT adapte le générateur PV à la charge : transfère la tension d'entrée du générateur PV ( $V \approx 30V = V_{mppt}$ , figure II.19) et le courant d'entrée du générateur PV ( $I \approx 8.5A = I_{mppt}$ , figure II.20) de la puissance maximale ( $P_t \approx 250W = P_{mppt}$ , figure II.21) fournie par le générateur PV.

### ❖ **Avantage de convertisseur BOOST**

Malgré le rendement élevé du convertisseur buck dans les systèmes avec des sources de puissance conventionnelles, le convertisseur boost peut être plus approprié aux systèmes photovoltaïques avec le suiveur du point de puissance maximale (MPPT) puisque le convertisseur fonctionne au mode de courant continu extrayant autant de puissance que possible à partir des cellules solaires. Par conséquent le rendement énergétique du convertisseur boost peut être plus grand que le convertisseur buck. Le convertisseur boost est généralement employé pour obtenir une tension plus élevée de sortie, tandis que le convertisseur buck est employé pour abaisser la tension de sortie. [15]

## **II.6. Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons étudié et analysé, en modélisant et en simulant sous Matlab/Simulink, le fonctionnement d'un système photovoltaïque, dont la charge est adaptée par l'intermédiaire d'un hacheur de type BOOST. La régulation est assurée par la commande classique "Perturb and Observ".

Parmi tous les algorithmes, le 'P&O' est largement utilisé, et les résultats de ce simulation montrent que l'utilisation de MPPT permet d'améliorer de manière considérable et efficace le rendement des installations photovoltaïques.

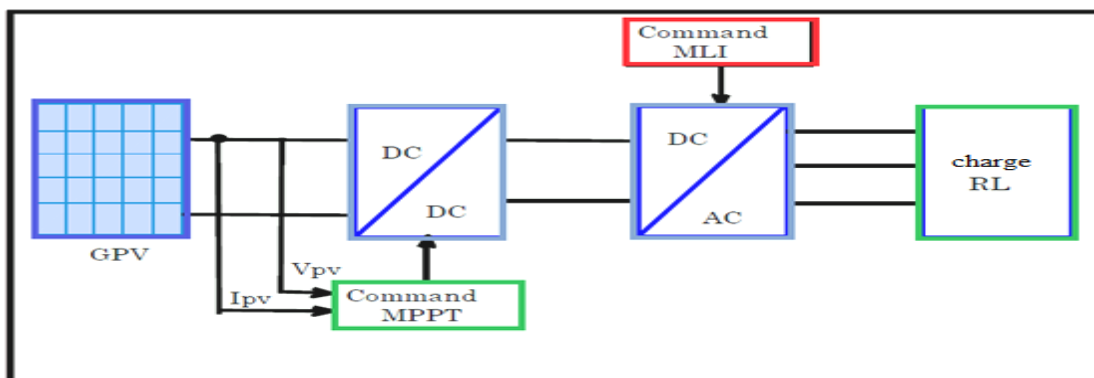
## Chapitre III

# Modélisation et commande d'un onduleur a trois niveaux a structure NPC

### III.1. Introduction

Nous avons présenté dans le chapitre précédent un système PV qui contient un générateur photovoltaïque, un convertisseur survolteur « Boost » et une commande MPPT « perturbation et observation », et dans ce chapitre nous décrivons une étude préliminaire de convertisseur alternatif continu (DC/AC) (l'onduleur à trois niveaux à structure NPC) et leurs fonctionnement, et leur commande pour pouvoir alimenter les charge à courant alternatif ou pour raccorder ce système au réseau.

Nous allons effectuer la simulation avec le logiciel Matlab/Simulink d'un système PV qui contient un générateur photovoltaïque, un convertisseur survolteur « boost », une commande MPPT « perturbation et observation », l'onduleur à trois niveaux à structure NPC (DC-AC) commandé par MLI, un filtre RL comme une charge non linéaire.



**Figure III. 1** : Schéma synoptique d'un système photovoltaïque avec des convertisseurs (DC/DC et DC/AC) et les commandes (MPPT et MLI).

### III.2. Le convertisseur clampé par le neutre (NPC)

La structure NPC connue aussi sous le nom de Diode-clamped converter, a été introduite par A. Nabae et H. Akagi en 1981. L'objectif était de réduire l'amplitude des harmoniques injectés par l'onduleur dans la charge par rapport au convertisseur existant à 2 niveaux, en

augmentant le nombre de paliers de tension générés sur la sortie en limitant les contraintes de tension appliquées sur le semi conducteur. Dans sa version la plus simple à 3 niveaux la figure III.2 .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 (point neutre N). Ces diodes de clamp permettent d'assurer une tension de blocage à  $E/2$  aux points A et B. [24]

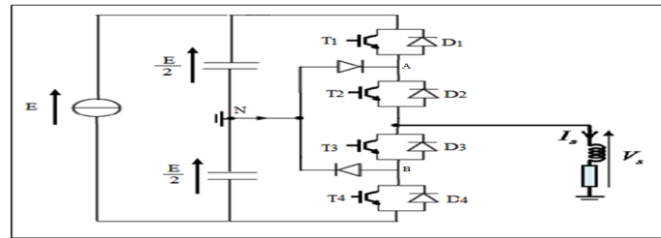


Figure III.2 : convertisseur Clampé par le Neutre (NPC).

### III. 3. Modélisation de l'onduleur à trois niveaux

#### III. 3.1. Structure générale de l'onduleur à trois niveaux triphasé

La structure choisie dans cette étude est celle de l'onduleur de tension triphasé a trois niveaux à structure NPC figure III.3, 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. 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. [25]

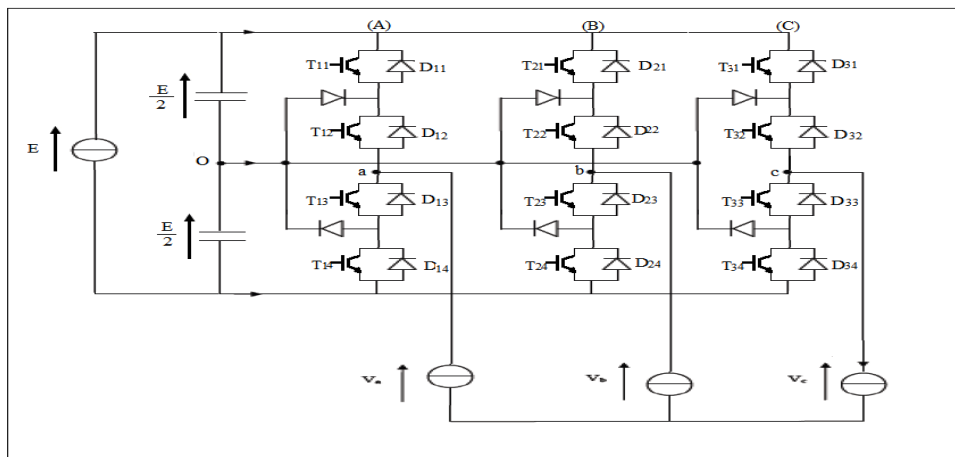
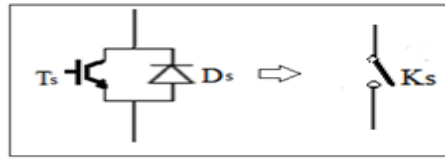


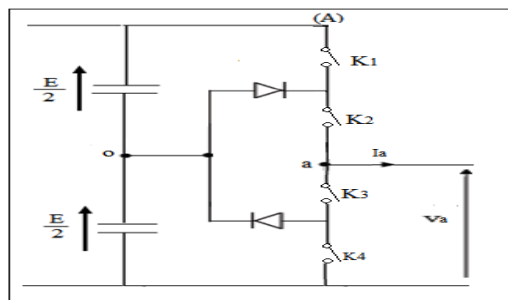
Figure III.3 : onduleur de tension triphasé a trois niveaux à structure NPC.

Afin d'élaborer un modèle du fonctionnement de ces onduleurs a trois niveaux sans a priori sur la commande, on représente chaque paire transistor (T) diode (D) par un seul interrupteur bidirectionnel (K).



**Figure III.4 :** Interrupteur bidirectionnel équivalent de la paire Transistor – diode.

L'onduleur a trois niveaux a une structure symétrique, Pour des raisons de simplicité la figure III.5 suivante est représentée un bras (A) d'onduleur NPC de trois niveaux, qui ne nécessite que deux diodes de roue libre complémentaires et réalise naturellement l'équilibrage des tensions tout en offrant un degré de liberté supplémentaire, l'objectif visé est de déterminer les valeurs que peut prendre la tension  $V_{ao}$  pour les différents états possibles des interrupteurs statiques, de montrer les séquences de conductions des interrupteurs.



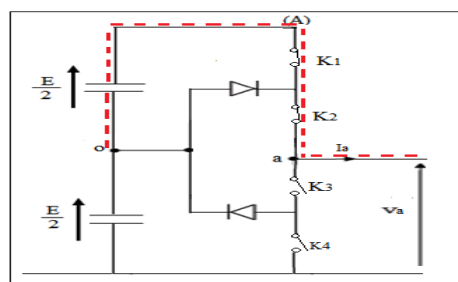
**Figure III. 5:** un bras (A) d'onduleur NPC de trois niveaux.

Pour un convertisseur NPC à N-niveaux de tensions, nous avons N séquences de fonctionnement possibles permettant de générer les N niveaux de tensions. Et en particulier pour le NPC à trois niveaux on a trois séquences de fonctionnement:

- **Séquences 1 : Génération du niveau maximum : [26]**

Dans ce cas, les interrupteurs  $K_1$ ,  $K_2$  sont passants et  $K_3$ ,  $K_4$  sont bloqués comme le montre la figure III.6. La tension de sortie  $V_{ao}$  est:  $V_{ao} = +\frac{E}{2}$ .

La tension inverse appliquée aux interrupteurs  $k_3$ ,  $k_4$  vaut:  $V_{K3} = V_{K4} + \frac{E}{2}$ .



**Figure III.6 :** schéma présente le Séquences 1 d un bras (A) d'onduleur NPC de trois niveaux.

• Séquences 2 : Génération du niveau intermédiaire [26]

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 III.7. La tension de sortie  $V_{ao}$  est donc nulle,  $V_{ao} = 0$ .

La tension inverse appliquée aux interrupteurs K1, K4 vaut:  $V_{K1} = V_{K4} = +\frac{E}{2}$ .

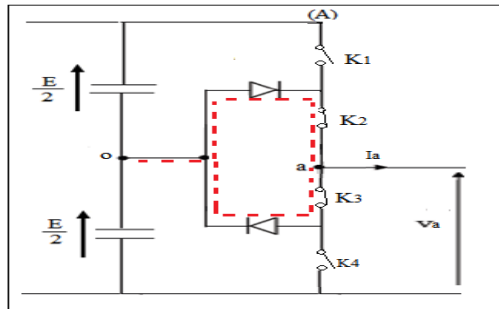


Figure III.7 : schéma présente le Séquences 2 d un bras (A) d'onduleur NPC de trois niveaux.

• Séquences 3 : Génération du niveau minimum : [26]

Dans ce cas, les interrupteurs K1, K2 sont bloqués et K3, K4 sont passants comme le montre la figure III.8. Et la tension de sortie  $V_{ao}$  est:  $V_{ao} = -\frac{E}{2}$

La tension inverse appliquée aux interrupteurs K1, K2 vaut:  $V_{K1} = V_{K2} = +\frac{E}{2}$

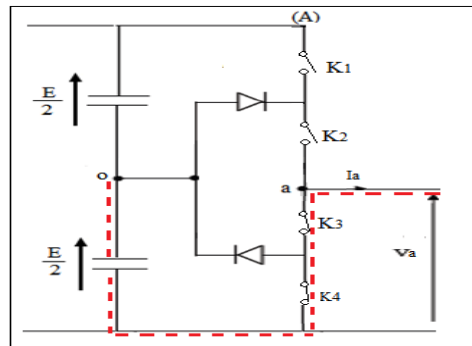


Figure III.8 : schéma présente le Séquences 3 d un bras (A) d'onduleur NPC de trois niveaux  
Les 3 états ou séquences de commutation possibles sont résumés au tableau III.1.

K1	K2	K3	K4	$V_{ao}$
1	1	0	0	$+\frac{E}{2}$
0	1	1	0	0
0	0	1	1	$-\frac{E}{2}$

Tableau III.1 : tableau d'excitation des interrupteurs de l'onduleur NPC.

Les séquences de fonctionnement, la forme d'onde de la tension de sortie et les états des interrupteurs sont représentés sur la figure III.9.

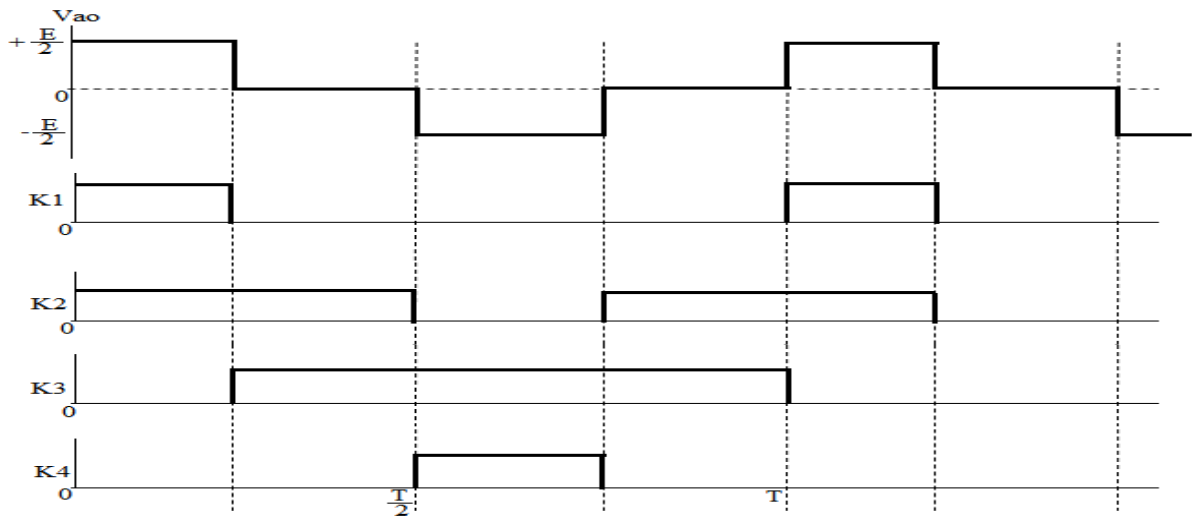


Figure III.9 : Séquences de fonctionnement d'un bras d'onduleur NPC à trois niveaux.

### III. 4. Modèle de commande de l'onduleur à trois niveaux

#### III.4.1. Commandabilité des convertisseurs statiques

Un convertisseur statique est dit en mode commandable si les transitions entre différentes configurations dépendent uniquement de la commande externe (commande des bases des semi-conducteurs) et non plus des commandes internes (grandeurs électriques), Nous supposons dans la suite que cette condition est toujours vérifiée [27].

On peut définir les notions de fonction de connexion et de commutation.

#### III.4.2. Fonction de commande

On définit la fonction de commande (connexion) de l'interrupteur K par \$F\_{ki}\$. Elle décrit son état fermé ou ouvert, Cette fonction vaut «1» si l'interrupteur est fermé et «0» dans le cas contraire :

$$F_{ki} = \begin{cases} 0 & \text{si K ouvert.} \\ 1 & \text{si K fermé.} \end{cases}$$

Avec \$i = 1,2..1,2\$ représenter l'interrupteur \$k\_1\$, \$k\_2\$

On définit la fonction de connexion \$F\_{ki}\$ d'un seul bras comme suit:

$$\text{Pour le bras (A) : } \begin{cases} V_{ao} = +E \\ V_{ao} = 0 \\ V_{ao} = -E \end{cases} \rightarrow \begin{cases} F_{ki} = (1, 1, 0, 0) : K1.K2 \text{ sont fermes et } K3.K4 \text{ sont ouvert} \\ F_{ki} = (0, 1, 1, 0) : K2.K3 \text{ sont fermes et } K1.K4 \text{ sont ouvert} \\ F_{ki} = (0, 0, 1, 1) : K3.K4 \text{ sont fermes et } K1.K2 \text{ sont ouvert} \end{cases}$$

### III.4.3. Commande complémentaire

L'ouverture et la fermeture des interrupteurs dépendent de la commande externe BKS (l'ordre d'amorçage ou de blocage du semi-conducteur Bidirectionnel TKS) ou une commande interne définie par les signes du courant du bras.

Pour éviter la conduction simultanée des quatre interrupteurs d'un seul bras qui peut engendrer leur destruction par croissance du courant lors du court-circuit ou par une surtension dans le cas de l'ouverture de tous les interrupteurs, on définit une commande complémentaire des différents semi conducteurs d'un bras, trois commandes complémentaires sont possibles pour un onduleur à trois niveaux. On définit les trois commandes complémentaires comme suit : [28] [39]

$$\begin{cases} B_{k1} = \overline{B_{k2}} \\ B_{k3} = \overline{B_{k4}} \end{cases} \quad \begin{cases} B_{k1} = \overline{B_{k3}} \\ B_{k2} = \overline{B_{k4}} \end{cases} \quad \begin{cases} B_{k1} = \overline{B_{k4}} \\ B_{k2} = \overline{B_{k3}} \end{cases} \quad (\text{III.1})$$

Avec  $B_{ki}$ , commande de base du transistor  $T_{ki}$  de ce bras  $K$ .

La commande  $N^{\circ}3$  est la seule qui permet d'exploiter les trois niveaux de tension de sortie possible pour un bras  $(E, 0, -E)$ . C'est cette commande qui va être adopté pour la modélisation de l'onduleur à trois niveaux. [26]

En mode commandable, les fonctions de connexion de l'onduleur sont liées par la relation (1).

$$\begin{cases} F_{k1} = 1 - F_{k4} \\ F_{k2} = 1 - F_{k3} \end{cases} \quad (\text{III.2})$$

Avec,  $k = 1, 2$  ou  $3$ , représente le numéro du bras.

### III.4.4. Fonction de connexion du demi- bras

On définit la fonction de connexion du demi-bras s'expriment au moyen des fonctions de connexion des interrupteurs qu'on notera  $F_{km}^b$  comme suit :

$$\begin{cases} F_{k1}^b = F_{k1}.F_{k2} \\ F_{k0}^b = F_{k4}.F_{k3} \end{cases} \quad (\text{III.3})$$

Avec k : numéro du bras, m= 1 pour le demi-bras du haut et m = 0 pour le demi-bras du bas.

La fonction  $F_{km}^b$  vaut 1 dans le cas où les quatre interrupteurs du demi-bras sont tous fermés, et nulle dans tous les autres cas. [30]

### III.4.5. Modélisation des valeurs instantanées

Cette modélisation sera effectuée en considérant l'association de l'onduleur de tension triphasé avec une charge triphasé équilibrée, on note : [30] [31]

- Tension simple aux bornes de chaque phase de la charge :  $V_a, V_b, V_c$ .
- Tension entre le point milieu « i » de chaque bras de l'onduleur et le point neutre « o » de l'alimentation continue de l'onduleur :  $V_{ao}, V_{bo}, V_{co}$ .
- Charge triphasée équilibrée couplée en étoile.

Les potentiels des nœuds A, B, C de l'onduleur triphasé à trois niveaux par rapport au point milieu O, s'expriment comme suit :

$$\begin{cases} V_{ao} = F_{11}.F_{12}.E - F_{13}.F_{14}.E = (F_{11}.F_{12} - F_{13}.F_{14}) \frac{E}{2} \\ V_{bo} = F_{21}.F_{22}.E - F_{23}.F_{24}.E = (F_{21}.F_{22} - F_{23}.F_{24}) \frac{E}{2} \\ V_{co} = F_{31}.F_{32}.E - F_{33}.F_{34}.E = (F_{31}.F_{32} - F_{33}.F_{34}) \frac{E}{2} \end{cases} \quad (III.4)$$

Pour l'onduleur triphasé à trois niveaux, les fonctions de connexions des demi-bras sont définies selon les relations suivantes :

$$\begin{cases} F_{11}^b = F_{11}.F_{12} \\ F_{10}^b = F_{13}.F_{14} \end{cases} \quad \begin{cases} F_{21}^b = F_{21}.F_{22} \\ F_{20}^b = F_{23}.F_{24} \end{cases} \quad \begin{cases} F_{31}^b = F_{31}.F_{32} \\ F_{30}^b = F_{33}.F_{34} \end{cases} \quad (III.5)$$

En traduisant ces fonctions de connexions des demi-bras dans le système :

$$\begin{cases} V_{ao} = F_{11}^b.E - F_{10}^b.E = (F_{11}^b - F_{10}^b) \frac{E}{2} \\ V_{bo} = F_{21}^b.E - F_{20}^b.E = (F_{21}^b - F_{20}^b) \frac{E}{2} \\ V_{co} = F_{31}^b.E - F_{30}^b.E = (F_{31}^b - F_{30}^b) \frac{E}{2} \end{cases} \quad (III.6)$$

### III.4.6. Fonction de conversion

#### III.4.6.1. Tensions de sorties [32][27]

Le système d'équation nous permet d'avoir les tensions de sortie de l'onduleur à trois niveaux qui s'expriment en fonction des deux tensions d'entrées E.

On peut considérer l'onduleur à trois niveaux comme étant l'association en série de deux onduleurs à deux niveaux et chaque bras de l'un de ces onduleurs sera un demi-bras de l'onduleur à trois niveaux.

Dans ces conditions, nous pourrons définir le modèle liant les fonctions des demi-bras et les tensions aux bornes de la charge  $V_a$ ,  $V_b$ ,  $V_c$ .

### III.4.6.2. Tensions simples

Les tensions simples de sorties de l'onduleur se déduisent en fonction des potentiels des nœuds par rapport au point milieu par la relation suivante :  $V_a + V_b + V_c = 0$

$$\begin{cases} V_a = (2V_{ao} - V_{bo} - V_{co}) \cdot \frac{1}{3} \\ V_b = (-V_{ao} + 2V_{bo} - V_{co}) \cdot \frac{1}{3} \\ V_c = (-V_{ao} - V_{bo} + 2V_{co}) \cdot \frac{1}{3} \end{cases} \quad (III.7)$$

Sous forme matricielle :

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_{11}^b & -F_{10}^b \\ F_{21}^b & -F_{20}^b \\ F_{31}^b & -F_{30}^b \end{bmatrix} \quad (III.8)$$

### III.4.6.3. Tensions composée

Les différentes tensions composées de l'onduleur triphasé à trois niveaux s'expriment à l'aide des fonctions de connexions des interrupteurs comme suit :

$$\begin{cases} V_{ab} = V_{ao} - V_{bo} = [(F_{11}.F_{12} - F_{21}.F_{22}) - (F_{13}.F_{14} - F_{23}.F_{24})] \frac{E}{2} \\ V_{bc} = V_{ao} - V_{bo} = [(F_{21}.F_{22} - F_{31}.F_{32}) - (F_{23}.F_{24} - F_{33}.F_{34})] \frac{E}{2} \\ V_{ca} = V_{ao} - V_{bo} = [(F_{31}.F_{32} - F_{11}.F_{12}) - (F_{33}.F_{34} - F_{13}.F_{14})] \frac{E}{2} \end{cases} \quad (III.9)$$

Les différentes tensions composées de l'onduleur triphasé à trois niveaux s'expriment à l'aide des fonctions des demi-bras sous forme matricielle comme suit :

$$\begin{bmatrix} V_{ab} \\ V_{bc} \\ V_{ca} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} 1 & -1 & -1 \\ 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_{11}^b & -F_{10}^b \\ F_{21}^b & -F_{20}^b \\ F_{31}^b & -F_{30}^b \end{bmatrix} \frac{E}{2} \quad (III.10)$$

### III.4.6.4. Courants d'entrée [30]

En utilisant les fonctions de connexion des interrupteurs pour trouver des courants d'entrée continus ( $I_{d1}$ ,  $I_{d2}$ ,  $I_{d0}$ ) de l'onduleur à trois niveaux en fonctions des courants alternatifs de la charge  $I_A$ ,  $I_B$ ,  $I_C$ , s'expriment comme suit :

$$\begin{cases} Id1 = F11. F12 Ia + F21. F22. Ib + F31. F32. Id \\ Id2 = F11. F12 Ia + F23. F24. Ib + F33. F34. Id \\ Id0 = F12. F13 Ia + F22. F23. Ib + F32. F33. Ic \end{cases} \quad (III.11)$$

Le système (III-11) devient en remplaçant les fonctions de connexion des interrupteurs par les fonctions de connexion de demi-bras :

$$\begin{cases} Id1 = F_{11}^b. Ia + F_{21}^b . Ib + F_{31}^b Ic \\ Id2 = F_{10}^b. Ia + F_{20}^b . Ib + F_{30}^b Ic \end{cases} \quad (III.12)$$

Le courant Id0 s'exprime en fonction des courants d'entrées (Id1, Id2) et des courants de charges IA, IB, IC par la relation :  $Id0 + Id1 + Id2 = Ia + Ib + Ic$

$$Id0 = (Ia + Ib + Ic) - (F_{11}^b. F_{10}^b)Ia - (F_{21}^b. F_{20}^b)Ib - (F_{31}^b. F_{30}^b)Ic \quad (III.13)$$

On obtient la forme matricielle suivante :

$$\begin{bmatrix} Id1 \\ Id2 \\ Id0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_{11}^b & F_{21}^b & F_{31}^b \\ F_{10}^b & F_{20}^b & F_{30}^b \\ 1 - F_{11}^b. F_{10}^b & 1 - F_{21}^b. F_{20}^b & 1 - F_{31}^b. F_{30}^b \end{bmatrix} \quad (III.14)$$

### III.5. Modèle de connaissance de l'onduleur à trois niveaux

Le modèle de connaissance global de l'onduleur à trois niveaux en mode commandable est associé à une charge triphasée et deux sources de tension continue.

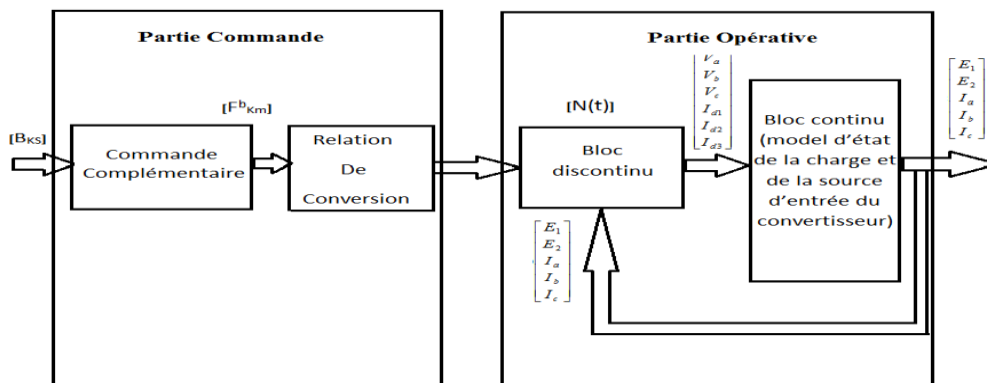


Figure III.10: Modèle de connaissance global de l'onduleur triphasé à trois niveaux.

A partir de cette figure III.10, on distingue deux parties :

#### III.5.1. La Partie Commande [30][31]

La partie de commande génère la matrice de conversion [N(t)].

#### Matrice de conversion simple [N(t)]

Si on choisi comme variables d'états pour l'ensemble, sources de tension continues, onduleur de tension à trois niveaux et charge triphasée à caractère inductive, le vecteur d'état suivant :  $X = [E1 \ E2 \ Ia \ Ib \ Ic]^t$

Et comme variables d'internes, le vecteur suivant :  $U_{sim} = [V_a \ V_b \ V_c \ Id1 \ Id2 \ Id0]^t$

On, obtient la matrice de conversion simple  $[N(t)]$ , définie par la relation :

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \\ I_{d1} \\ I_{d2} \\ I_{d3} \end{bmatrix} = N(t) \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad (III.15)$$

Avec l'introduction des expressions des tensions simples (III-8), on définit la matrice de conversion simple :

$$[N(t)] = \begin{bmatrix} \left( \frac{2F_{11}^b - F_{21}^b - F_{31}^b}{3} \right) - \left( \frac{2F_{10}^b - F_{20}^b - F_{30}^b}{3} \right) & 0 & 0 & 0 \\ \left( \frac{2F_{11}^b - F_{21}^b - F_{31}^b}{3} \right) - \left( \frac{2F_{10}^b - F_{20}^b - F_{30}^b}{3} \right) & 0 & 0 & 0 \\ \left( \frac{2F_{11}^b - F_{21}^b - F_{31}^b}{3} \right) - \left( \frac{2F_{10}^b - F_{20}^b - F_{30}^b}{3} \right) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & F_{11}^b & F_{21}^b & F_{31}^b \\ 0 & F_{10}^b & F_{20}^b & F_{30}^b \\ 0 & (1 - F_{11}^b - F_{10}^b)(1 - F_{21}^b - F_{20}^b)(1 - F_{31}^b - F_{30}^b) & & \end{bmatrix} \quad (III.16)$$

### III.5.2. La Partie Opérative [30]

La partie opérative est constituée d'un bloc discontinu délivrant les entrées internes générées par le convertisseur à partir de ses variables d'état et de la matrice de conversion  $[M(t)]$ , et d'un bloc continu qui représente le modèle d'état de la charge de l'onduleur et de sa source de tension d'entrée.

#### Matrice de conversion composée $[M(t)]$

Si on utilise les tensions composées, le vecteur d'entrée devient :

$$U_{com} = [V_{ab} \ V_{bc} \ V_{ca} \ Id1 \ Id2 \ Id0]^t$$

On obtient, la matrice de conversion composée  $[M(t)]$  :

$$\begin{bmatrix} V_{ab} \\ V_{bc} \\ V_{cd} \\ I_{d1} \\ I_{d2} \\ I_{d3} \end{bmatrix} = M(t) \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad (III.17)$$

Avec l'introduction des expressions des tensions composées (III-10), on définit la matrice de conversion composée :

$$[M(t)] = \begin{bmatrix} (F_{11}^b - F_{21}^b) - (F_{10}^b - F_{20}^b) & 0 & 0 & 0 \\ (F_{21}^b - F_{31}^b) - (F_{20}^b - F_{30}^b) & 0 & 0 & 0 \\ (F_{31}^b - F_{11}^b) - (F_{30}^b - F_{10}^b) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & F_{11}^b & F_{21}^b & F_{31}^b \\ 0 & 0 & F_{10}^b & F_{20}^b & F_{30}^b \\ 0 & 0 & (1 - F_{11}^b - F_{10}^b) & (1 - F_{21}^b - F_{20}^b) & (1 - F_{31}^b - F_{30}^b) \end{bmatrix} \quad (\text{III.18})$$

### III.6. Stratégie de commande de l'onduleur à trois niveaux à structure NPC

La conversion continue alternative est assurée par les commutations des interrupteurs de l'onduleur qui vont ainsi effectuer des connexions temporaires entre les bornes de la source d'alimentation continue et les lignes de la charge triphasée alternative.

Le transfert d'énergie est contrôlé par le rapport entre intervalles d'ouverture et fermeture (rapport cyclique) de chaque interrupteur donc, par la modulation des impulsions de contrôle de ces interrupteurs (MLI).

Deux méthodes de commande de peuvent êtres utilisés :

- Commande par hystérésis
- Commande par MLI (modulation de largeur d impulsions)

Les principaux objectifs de la M.L.I sont les suivants:

- Alimenter les moteurs électriques avec des courants proches de l'onde sinusoïdale, par le contrôle des rapports cycliques et grâce à une fréquence élevée des commutations des interrupteurs par rapport à la fréquence des tensions de sortie.

- Permettre un contrôle fin de l'amplitude du fondamental des tensions de sortie généralement sur une plus grande plage possible et pour une fréquence de sortie largement variable.

Parmi les stratégies de commande de l'onduleur (MLI) est :

#### III.6.1.1. La commande MLI sinusoïdale

Pour les onduleurs à trois niveaux, les signaux de commande des interrupteurs de l'onduleur sont obtenus à partir des intersections des trois signaux de référence sinusoïdaux

déphasés entre eux de  $120^\circ$ , de fréquence  $f_r$  et d'amplitude  $A_r$  avec un signal triangulaire (porteuse), d'amplitude  $A_p$  et de fréquence  $f_p$  très supérieur à  $f_r$ , la génération des signaux de commande de la modulation MLI se fait le plus souvent en temps réel. On détermine ainsi les instants d'ouverture et de fermeture des interrupteurs à l'aide d'une plaque électronique de commande analogique ou numérique ou éventuellement une combinaison des deux. [35]

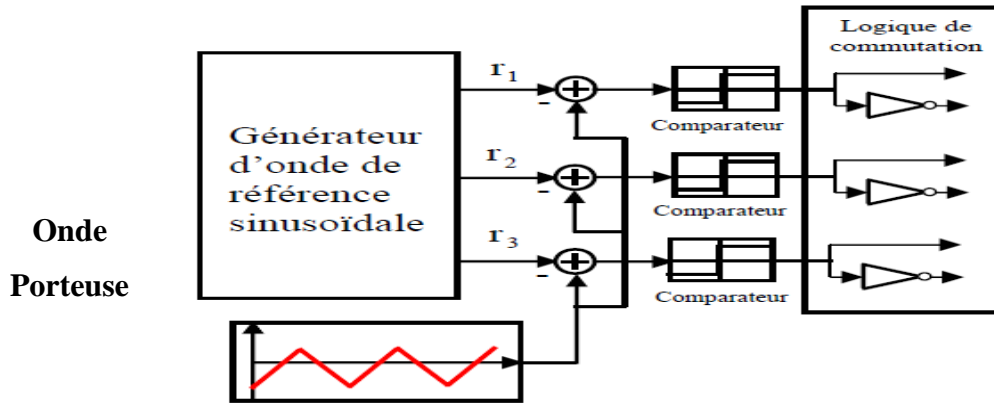


Figure III.11 : Schéma de principe de la technique triangulo-sinusoïdale.

Cette stratégie est caractérisée par deux paramètres: [32]

- L'indice de modulation  $m$  égal au rapport de la fréquence  $f_p$  de la porteuse à la fréquence  $f_r$  de la référence :  $m = f_p / f_r$  (III.19)
- Le coefficient de réglage en tension  $r$  égale au rapport de l'amplitude  $V_m$  de la référence à tension crête  $U_{pm}$  de la porteuse :  $r = V_m / U_{pm}$  (III.20)
- Le facteur d'évaluation des performances de la MLI, le facteur de distorsion totale des harmoniques de la tension de sortie THD, définit par le rapport de la somme quadratique des harmoniques de tension à la valeur de la somme quadratique du fondamental et des harmoniques de la tension.

La modulation sinusoïdale consiste à utiliser les intersections d'une onde de référence ou modulante, généralement sinusoïdale, avec une onde de modulation ou porteuse, généralement triangulaire, Cette stratégie présente deux avantages importants :

- Elle repousse vers des fréquences élevées les harmoniques de la tension de sortie, ce qui facilite leur filtrage.
- Elle permet de faire varier l'amplitude du fondamental de la tension de sortie.

Il existe trois types de modulation sinusoïdale :

### III.6.1.2. Modulation sinusoïdale classique

Les signaux de commande des interrupteurs de l'onduleur NPC sont obtenus à partir des intersections des trois signaux de référence sinusoïdaux déphasés entre eux de  $120^\circ$ , de fréquence  $f_m$  et d'amplitude  $A_m$ , avec un signal triangulaire d'amplitude  $A_c$  et de fréquence  $f_c$ , très supérieure  $f_m$ . [33]

### III.6.1.3. Modulation sinusoïdale à triangles multiples [33] [34]

Cette technique est basée, dans son principe, sur la modulation sinusoïdale classique. Pour un onduleur à trois niveaux, elle recommande l'utilisation de deux signaux triangulaires de même fréquence  $f_c$  et de même amplitude  $A_c$  (crête à crête). Ces signaux triangulaires sont comparés, pour chaque phase, avec un signal de référence d'amplitude  $A_m$  et de fréquence  $f_m$ , C'est la modulation sinusoïdale a double triangle. Pour les onduleurs avec un nombre de niveaux  $m$  supérieur à trois, la technique sinusoïdale classique avec son signal triangulaire unique, ne permet pas la génération de tous les signaux de commande requis. Alors, c'est la modulation sinusoïdale à triangles multiples qui le permet. Cette technique nécessite  $(m-1)$  signaux triangulaires de même fréquence  $f_c$  et de même amplitude  $A_c$ .

Le taux de modulation  $m_a$  et le rapport de fréquence  $m_f$  est donné par les relation suivants :

$$m_a = \frac{A_m}{(m-1) A_c} \quad (\text{III.21})$$

$$m_f = \frac{f_c}{f_m} \quad (\text{III.22})$$

### III.6.1.4. Modulation sinusoïdale modifiée

Dans le but d'éliminer la tension homopolaire générée par les techniques de modulation MLI, il est recommandé d'utiliser une nouvelle technique à MLI. C'est la modulation sinusoïdale modifié. Cette méthode utilise trois signaux de références, de forme sinusoïdale  $V_1$ ,  $V_2$  et  $V_3$  décalées entre eux de  $120^\circ$ , avec un seul signal triangulaire.

Le principe de cette technique à été présenté pour l'onduleur de tension à trois niveaux de type NPC. Elle utilise une seule porteuse (signal triangulaire) pour la génération des signaux de commande. Afin de généraliser celle technique aux onduleurs de niveaux supérieurs à trois. On doit être en mesure de déterminer le nombre de porteuses requise pour chaque ordre

d'onduleur. Selon le nombre de niveaux de l'onduleur  $m$ , de déterminer avec exactitude le nombre de porteuses nécessaires  $P$ . Cette relation est donnée par l'équation suivante :

$$P = \frac{(m-1)}{2} \quad (\text{III.23})$$

### III.6.1.5 Principe de la commande MLI [35]

La figure III.12 illustre le circuit d'un onduleur monophasé, et la figure III.13 donne le principe de largeur d'impulsion.

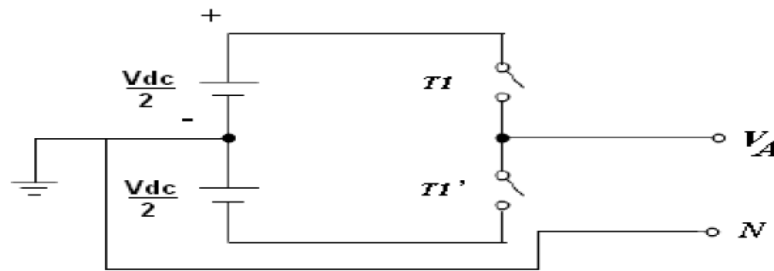


Figure III. 12 : schéma de circuit monophasé d'un onduleur de tension.

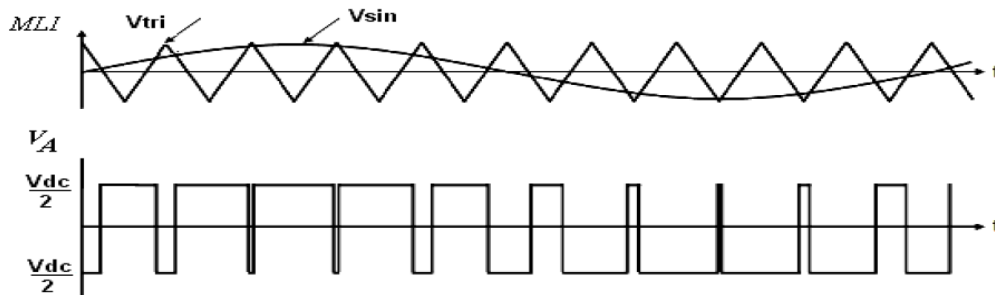


Figure III.13 : schéma du signal de commande à MLI et la tension de sortie d'un onduleur monophasé.

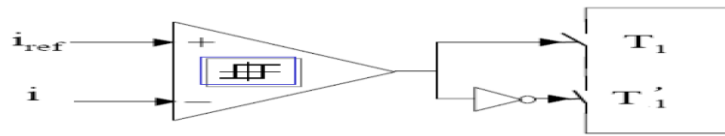
Comme représenté par la figure III.13, la tension délivrée par l'onduleur est déterminée dans ce qui suit :

- Lorsque  $V \sin > V_{tri}$ ,  $V_A = \frac{V_{dc}}{2}$
- Lorsque  $V \sin < V_{tri}$ ,  $V_A = -\frac{V_{dc}}{2}$

### III.6.2 Commande par hystérésis

Le principe de contrôle des courants par hystérésis consiste à maintenir chacun des courants générés dans une bande enveloppant les courants de référence. Chaque violation de cette bande donne un ordre de commutation.

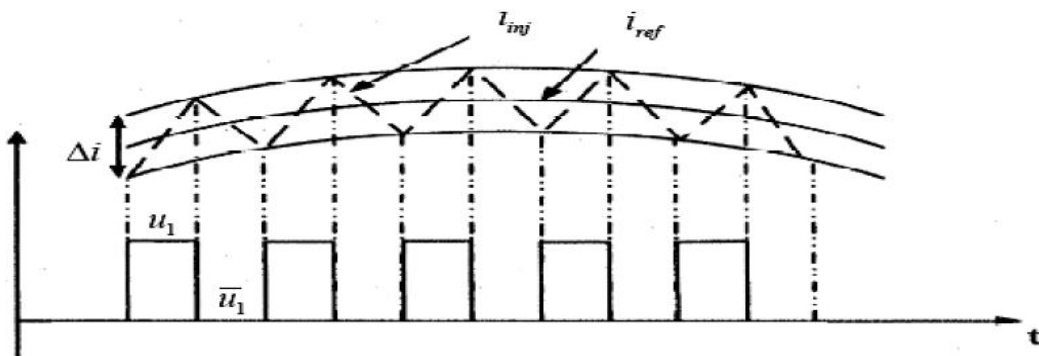
En pratique, c est la technique schématisée sur la figure III.14 que l'on utilise. la différence entre le courant de référence et celui mesure est appliquée à l'entre d'un comparateur à hystérésis dont la sortie fournit directement l'ordre de commande des interrupteur du bras correspondant de l'onduleur. [36]



**Figure III.14** : contrôle de courant par hystérésis.

La simplicité de la mise en œuvre de cette stratégie est son avantage, tandis que la fréquence de commutation variable peut être son inconvénient. Celui-ci peut être remédié par une autre version de contrôle par l'hystérésis avec une fréquence de commutation fixe.

Le seul paramètre d régulation dans cette commande est la largeur de la bande d'hystérésis qui détermine l'erreur sur les courants et la fréquence de commutation bien que Cette dernier reste inconnu. Le principe de la commande des interrupteurs est illustré par la figure (3.13) :



**Figure III.15** : commande des interrupteurs par hystérésis.

### III.7. Simulation sous Matlab/Simulink de l'onduleur de tension triphasé à trois niveaux à structure NPC commandé par MLI connecté à modèle PV

Dans cette simulation on a utilisé un générateur PV et un hacheur (boost) reliée au bus continu d'un onduleur à trois niveaux à structure NPC commandé par MLI alimentant un récepteur triphasé inductif ( $R=30\Omega$ ,  $L=1mH$ ) pour  $E=1000W/m^2$  et  $T=25^\circ C$  :

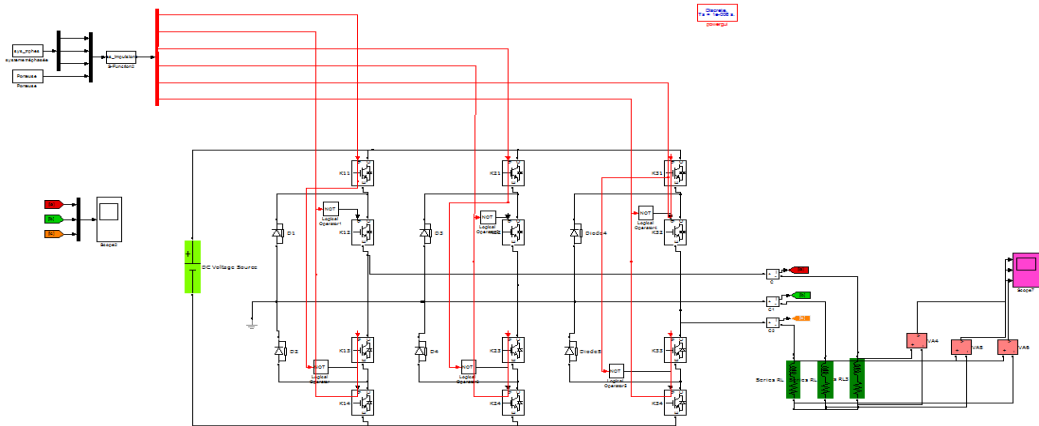


Figure III.16 : Schéma block de l'onduleur à trois niveaux à structure NPC alimenté par une source continue et commandé par MLI.

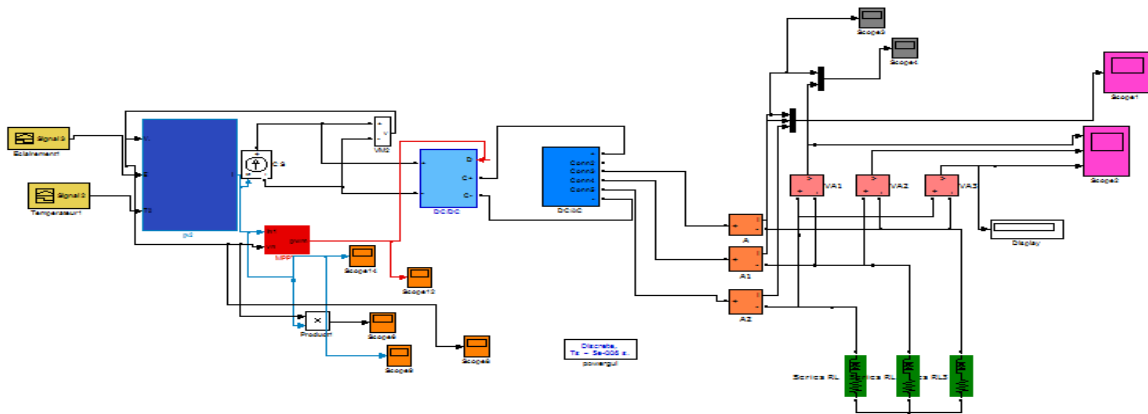


Figure III.17: Schéma de simulation d'un système photovoltaïque avec un hacheur. boost reliée au l'onduleur à trois niveaux à structure NPC commandé par MLI.

Signaux de commande et la tension de l'onduleur triphasé

La MLI intersectée sinus avec porteuse triangulaire, est connu par sa simplicité de mise en œuvre et de sa fiabilité.

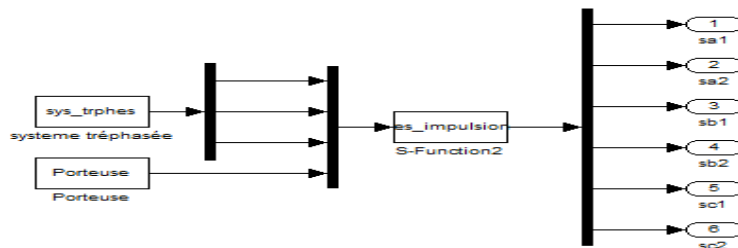
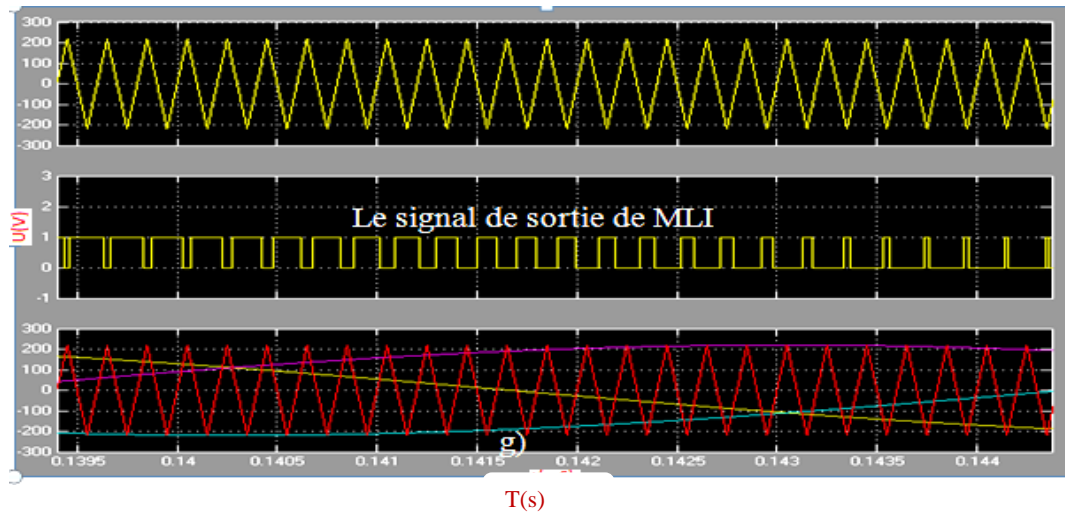


Figure III.18: Schéma MATLAB SIMULINK de la commande MLI.

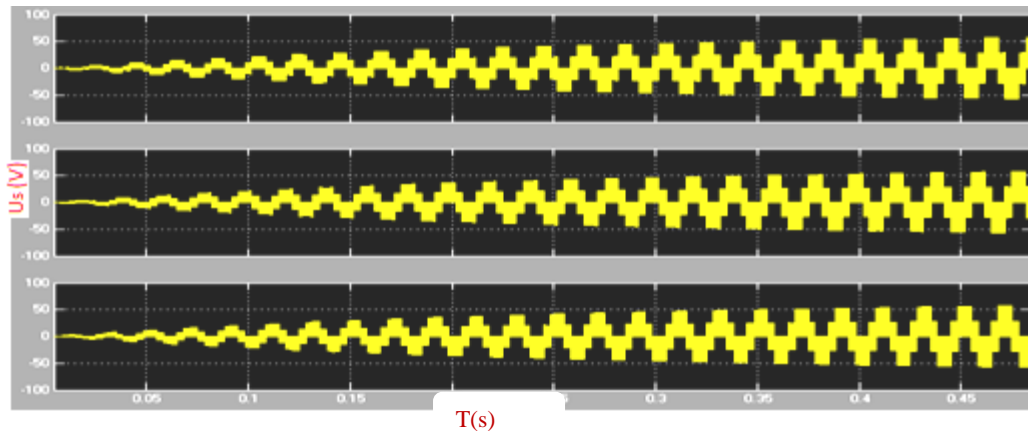
### Les résultats de simulation

- Caractéristique des signaux de commande et le signal de sortie de MLI :

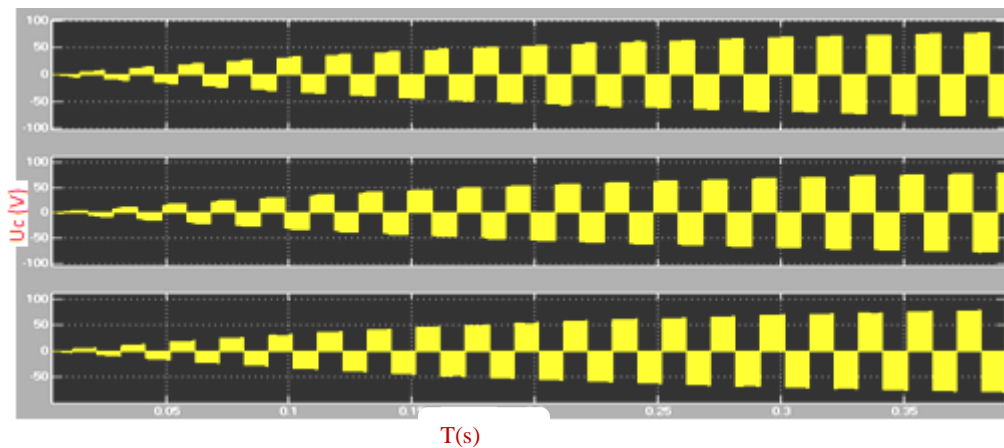


**Figure III.19** : Caractéristique des signaux de commande et le signal de sortie de MLI.

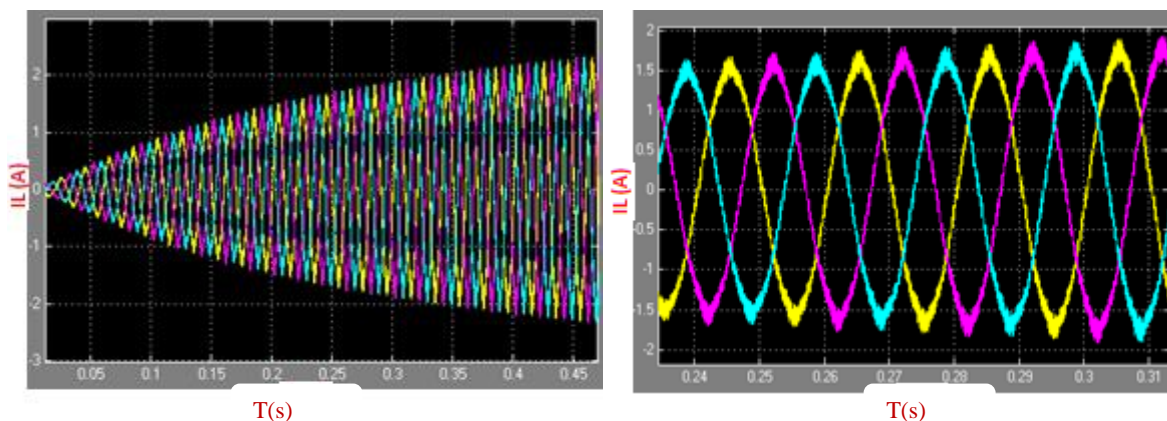
Les tensions, et les courants de la sortie de l'onduleur sont donnés par les figures suivant :



**Figure III.20** : Résultats de simulation des tensions simple à la sortie du l'onduleur à trois niveaux à structure NPC.



**Figure III.21**: Résultats de simulation des tensions composée à la sortie du l'onduleur à trois niveaux à structure NPC.



**Figure III.22:** Résultats de simulation des courants de ligne du la sortie de l'onduleur à trois niveaux à structure NPC.

D'après la figure III.21, on remarque que pour une tension contenue à l'entrée de l'onduleur, nous obtenons un signal rectangulaire incompatible à l'utilisation. Un filtre (RL) est branché à la sortie de chaque phase de l'onduleur.

D'après la figure III.22, on remarque que le courant de sortie de l'onduleur prend la forme sinusoïdale à cause de la charge inductive, mais ce courant et la tension ne sont pas en phase ce qui explique l'injection de puissance réactive sur le réseau. Cela est dû à la boucle de régulation pour le contrôle des puissances active et réactive, que nous n'avons pas réalisé ici.

### III.8. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté le modèle de l'onduleur de tension à trois niveaux à structure NPC et leur principe de fonctionnement ainsi que leur commande pour obtenir l'allure sinusoïdale pour bute d'alimenter les charges alternatives.

Nous avons présenté aussi la simulation d'un système PV qui contient un générateur photovoltaïque, un convertisseur survolteur « boost », une commande MPPT « perturbation et observation » et l'onduleur à trois niveaux à structure NPC (DC-AC) commandé par MLI, les résultats de cette simulation ont montré l'efficacité de l'ajout d'un filtre à la sortie de l'onduleur pour améliorer la qualité de la tension et du courant à fin de satisfaire les besoin les charge à courant alternatif.

## Chapitre IV

# Connexion d'un GPV en utilisant un convertisseur NPC à trois niveaux

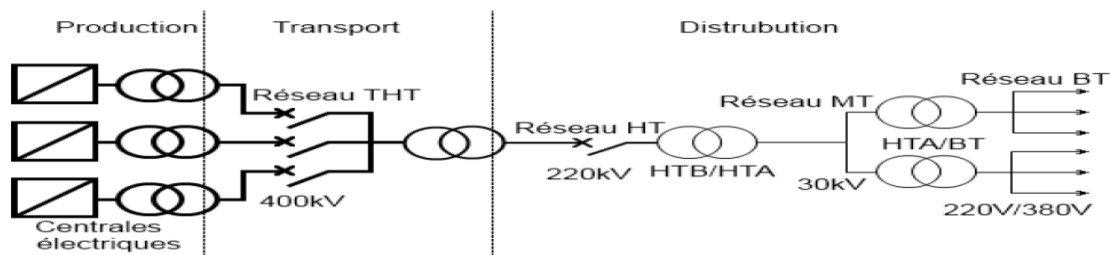
### IV.1.1 Introduction

Les systèmes connectés au réseau sont aujourd'hui prisent sérieusement pour compléter la génération conventionnelle d'énergie dans plusieurs pays industrialisés. Il y a certainement plusieurs projets de démonstrations connectés aux réseaux qui étudient cette possibilité. Bien qu'ils sont devenus viables dans le développement économique, la participation des Photovoltaïques dans la génération d'énergie de grande échelle est augmentée à cause des effets environnementaux défavorables des sources conventionnelles d'énergie.

Dans cette partie, une étude descriptive générale des systèmes photovoltaïques reliés au réseau électrique est présentée. Cette étude comprend :

### IV.1.2. Réseau électrique

En général, on appelle réseau un ensemble de lignes reliées directement entre elles et fonctionnant à la même tension. La tension de référence de ce réseau est la tension nominale, c'est-à-dire la moyenne théorique de toutes les tensions susceptibles d'être mesurées à un instant quelconque et en un point quelconque du réseau, dans les conditions d'exploitation. Il est fractionné en trois principales subdivisions à savoir le réseau de transport, de répartition et de distribution. Une notion de frontière peut être définie entre les niveaux de tension du réseau électrique, ces frontières étant définies par les postes sources et les transformateurs voir Figure IV.1. [37]



**Figure IV.1** : Schéma générale de production, transport et distribution de l'énergie électrique

Les réseaux de transport à Haute tension B (HTB) (De 500 à 1500 MVA). C'est à ce niveau de tension que sont assurées les interconnexions entre régions au niveau national et les échanges (importation /exportation) d'énergie électrique au niveau international.

Les réseaux de répartition à Haute tension B (HTB) (De 100 à 150 MVA) assurent, à l'échelle régionale, assurant le transport de l'électricité vers les zones de consommations et à quelques gros clients industriels directement connectés à celui-ci.

Les réseaux de distribution sont les réseaux d'alimentation de l'ensemble de la clientèle. On distingue deux sous niveaux : les réseaux à Moyenne tension(HTA) (Entre 10 et 15 MVA) et les réseaux à basse tension (Environ 250 KVA). Les réseaux de distribution moyenne tension transportent l'énergie vers les réseaux à basse. Les réseaux basse tension sont destinés à alimenter des clients à faible demande d'énergie. [38]

### IV.1.3. Types des installations PV connectées au réseau

Le photovoltaïque est la seule filière qui peut être installée n'importe où. Il est transformé la totalité de l'électricité produite en courant alternatif de 220 V ou 380V.

On distingue deux types d'installations connectées au réseau :

- Installation centralisée : génération de la puissance Photovoltaïque à grand – échelle centralisée dans les stations de puissance Photovoltaïque.
- Installation décentralisée : forme alternative de génération de puissance distribuée dans les unités situées directement dans le lieu du consommateur.

### IV.1.4. Problème de connexion des systèmes photovoltaïques au réseau

Les problèmes concernant l'interconnexion du système photovoltaïque au réseau sont : [39]

- Le débrogage de système photovoltaïque si le réseau présente une défaillance (le problème d'islanding).
- La protection contre la foudre.

- La qualité de puissance fournie au réseau.
- Les effets des systèmes multiples sur une partie du réseau, en particulier monophasé non équilibré.
- Le dosage fiable des flux de puissance.
- Risques techniques et financiers.

## IV.2. Etude de la liaison au réseau électrique

L'étude de la connexion de générateur PV au réseau électrique se résume à un hacheur DC/DC de type boost qui fournit une tension continue. Ce convertisseur élévateur de tension ce qui permet à ce système de s'adapter aux changements météorologiques et pour extraire le maximum de puissance disponible et un onduleur DC/AC de type NPC à trois niveaux commandé par la MLI (sinus triangle) qui converti la tension continu à une tension alternative filtrée par des filtres LRC.

Les convertisseurs de puissance hacheur et onduleur sont implantés pour ces raisons :

- Forcer le générateur photovoltaïque à fonctionner au point de puissance maximale.
- Produire le courant de sortie sinusoïdale et en phase avec la tension du réseau.
- Conversion de puissance avec un rendement  $\eta$  plus proche de 100%.

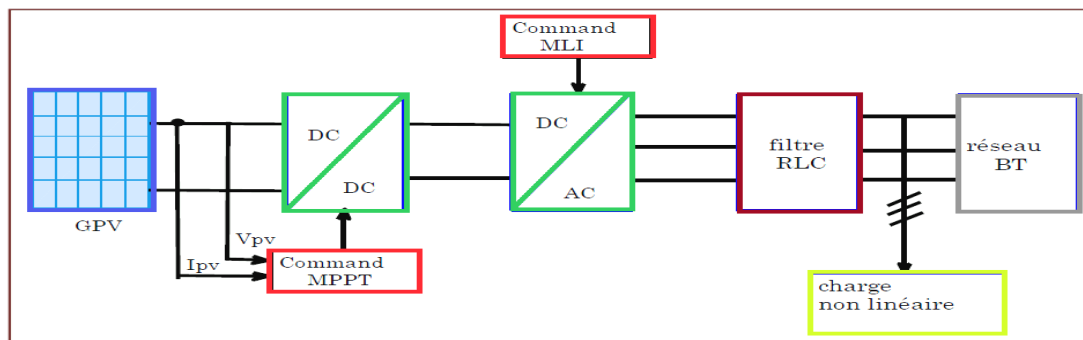


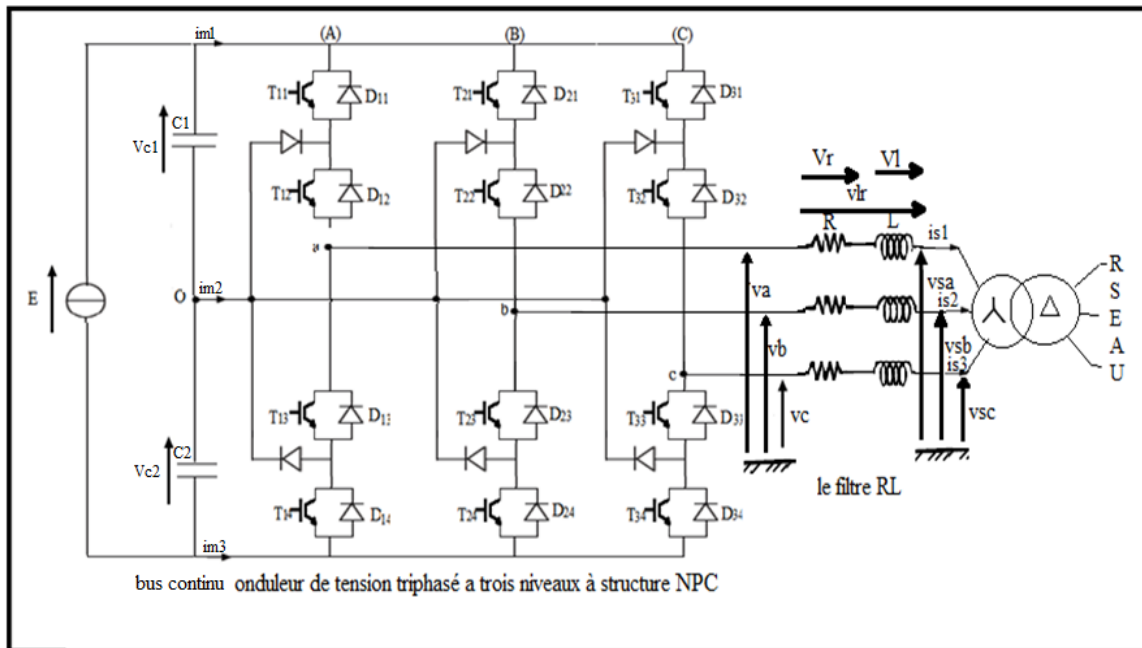
Figure IV.2 : schéma représenter la liaison PV au réseau électrique.

### IV.2.1. Modélisation de la liaison

#### IV.2.1.1. Modélisation du filtre d'entrée

La liaison au réseau électrique est réalisée via un filtre RL Figure IV.2, La fonction de ce filtre permet d'une part de convertir le compensateur en un dipôle de courant du point de vue du réseau, et d'autre part de réduire la dynamique du courant de façon à le rendre plus facile à

contrôler. Le filtre de type (L) permet de diminuer les harmoniques autour de la fréquence de commutation du convertisseur électronique.



**Figure IV.3** : Schéma électrique de la liaison au réseau électrique.

Les courants transités entre le convertisseur et le réseau sont imposés par les bobines et obtenus par intégration des tensions aux bornes de celles-ci : [40]

$$is1(t) = \frac{1}{L} \int_{t_0}^{t_0+\Delta t} v_l dt + is1(t_0) \quad (IV.1)$$

$$is2(t) = \frac{1}{L} \int_{t_0}^{t_0+\Delta t} v_l dt + is2(t_0) \quad (IV.2)$$

Le troisième courant peut être obtenu, si nécessaire, à partir de la connaissance des deux autres :

$$is3 = -(is1 + is2) \quad (IV.3)$$

Les tensions aux bornes des résistances valent :  $V_{sa} = R \cdot is1$  Et  $V_{sb} = R \cdot is2$

La tension aux bornes de la bobine dépend alors de la tension aux bornes de la résistance et du filtre RL selon :

$$V_{la} = V_{r1a} - V_{ra} \text{ Et } V_{lb} = V_{r1b} - V_{rb}$$

L'application de la loi des mailles permet de déterminer les tensions apparaissant aux bornes du filtre RL :

$$V_{r1a} = V_{sa} - V_a \text{ Et } V_{r1b} = V_{sb} - V_b$$

L'ensemble de ces équations modélise le filtre d'entrée qui peut être vu comme un système ayant un vecteur regroupant les courants des bobines  $I_s$  et deux vecteurs regroupant les tensions, imposées par le réseau électrique  $V_s$  :

$$I_s = \begin{bmatrix} i_{s1} \\ i_{s2} \end{bmatrix}, V_s = \begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \end{bmatrix}$$

Et imposées par le convertisseur de puissance  $V_o$  :  $V_o = \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \end{bmatrix}$

En utilisant les notations vectorielles, nous pouvons donc écrire :  $V_s - V_o = R \cdot i_s + L \frac{di_s}{dt}$

#### IV.2.1.2 Modélisation de bus continu [40]

Les tensions aux bornes des deux condensateurs sont obtenues à partir de l'intégration de leurs courants respectifs, selon :

$$V_{c1}(t) = \frac{1}{\Delta T} \int_{t_0}^{t_0+\Delta t} \frac{1}{C} i_{c1} dt + V_{c1}(t_0) \quad (IV.4)$$

$$V_{c2}(t) = \frac{1}{\Delta T} \int_{t_0}^{t_0+\Delta t} \frac{1}{C} i_{c2} dt + V_{c2}(t_0) \quad (IV.5)$$

Le courant du premier condensateur est issu du premier nœud où circulent deux courants modulés par chaque condensateur :  $i_{c1} = i_m + i_{m1}$

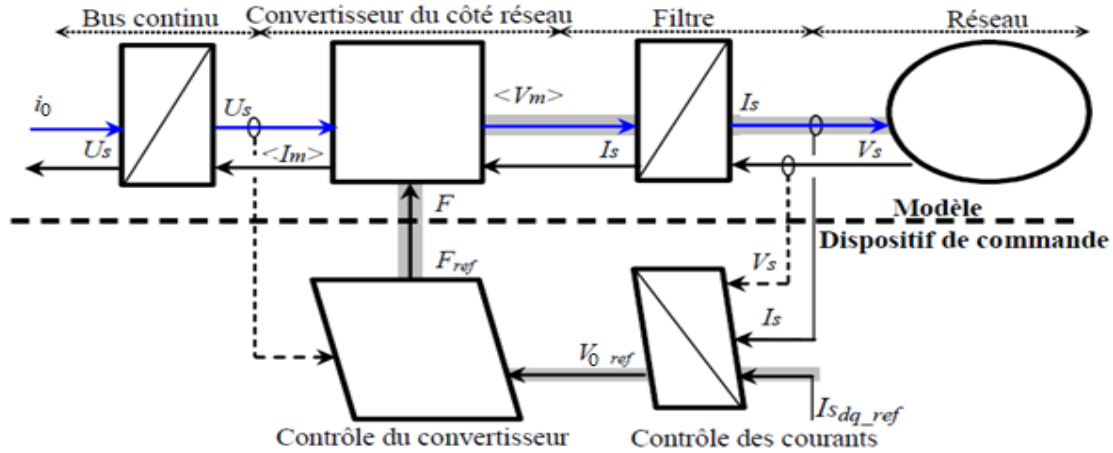
Le courant du deuxième condensateur est donné par :  $i_{c2} = i_{c1} + i_{m2}$

L'ensemble de ces équations modélise le bus continu pouvant être vu tel un système ayant un vecteur de tension de sortie  $U_s$  et deux courants d'entrée coté source d'énergie  $I_{m1}$  et coté réseau  $I_{m2}$  avec :  $I_m = \begin{bmatrix} i_{m1} \\ i_{m2} \end{bmatrix}$

### IV.3. Contrôle des courants générés [40]

Les courants générés ( $I_s$ ) sont influençables par les tensions modulées ( $V_m$ ), elles mêmes dépendantes des fonctions de connexion ( $F$ ). La commande du convertisseur permet d'imposer des références moyennes ( $V_{mref}$ ) pour les tensions simples modulées ( $V_m$ ) ; supposées rendues égales à leurs références :  $V_m = V_{mref}$

Dès lors les courants transités par le filtre sont rendus variables par réglage des références des tensions simples modulées. C'est pourquoi une seconde fonction consiste à contrôler les courants générés  $I_s$  à leurs références  $I_{sref}$ .



**Figure IV.4:** Représentation macroscopique du modèle et de la commande de la liaison au réseau.

#### IV.4. Contrôle des courants [40]

Un contrôle vectoriel dans le repère de Park des courants a été réalisé en utilisant un repère synchronisé avec les tensions du réseau. L'application de la loi des mailles sur le filtre connecté au réseau électrique donne les équations suivantes :

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = -R \cdot \begin{bmatrix} i_{s1} \\ i_{s2} \\ i_{s3} \end{bmatrix} - L \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{s1} \\ i_{s2} \\ i_{s3} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix} \quad (IV.6)$$

Où  $R$  et  $L$  sont respectivement la résistance et l'inductance de la bobine.

En appliquant la transformation de Park, l'équation précédente devient :

$$V_{od} = -R \cdot i_{sd} - L \frac{di_{sd}}{dt} + L \cdot \omega \cdot i_q + V_{sd} \quad (IV.7)$$

$$V_{oq} = -R \cdot i_{sq} - L \frac{di_{sq}}{dt} + L \cdot \omega \cdot i_d + V_{sq} \quad (IV.8)$$

En considérant les tensions de couplage suivantes :

$$V_{rld} = V_{sd} - V_{od} + L \cdot \omega \cdot i_{sd} \quad (IV.9)$$

$$V_{rlq} = V_{sq} - V_{oq} + L \cdot \omega \cdot i_{sq} \quad (IV.10)$$

Les équations différentielles (IV.9) et (IV.10) peuvent être simplifiées :

$$V_{rld} = R \cdot i_{sd} + L \frac{di_{sd}}{dt} \quad (IV.11)$$

$$V_{rlq} = R \cdot i_{sq} + L \frac{di_{sq}}{dt} \quad (IV.12)$$

Les courants sont déterminés par :

$$i_{sd}(t) = \frac{1}{\Delta T} \int_{t_0}^{t_0+\Delta t} \frac{1}{L} (V_{rld} - R \cdot i_{sd}(t)) dt + i_{sd}(t_0) \quad (IV.13)$$

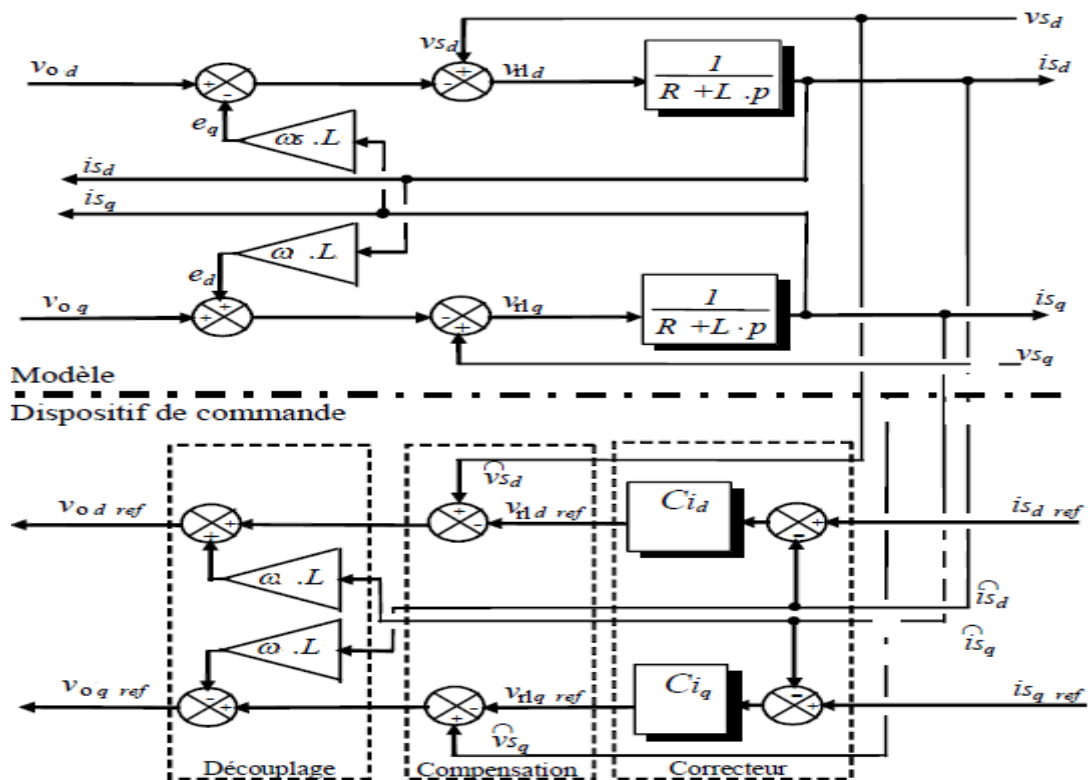
$$i_{sq}(t) = \frac{1}{\Delta T} \int_{t_0}^{t_0+\Delta t} \frac{1}{L} (V_{rlq} - R \cdot i_{sq}(t)) dt + i_{sq}(t_0) \quad (IV.14)$$

Le En appliquant la transformée de Laplace aux équations (IV.13) et (IV.14) ; deux fonctions de transfert identiques apparaissent :

$$F(p) = \frac{i_{sd}(p)}{V_{rld}(p)} = \frac{1}{R+L \cdot p} \quad (IV.15)$$

$$F(p) = \frac{i_{sq}(p)}{V_{rlq}(p)} = \frac{1}{R+L \cdot p} \quad (IV.16)$$

La figure IV.4 présente un schéma sous forme de bloc des lois de commande obtenues par inversion du modèle de filtre dans le repère de Park.



**Figure IV.5** : schéma bloc du contrôle des courants dans le repère de Park.

Ce dispositif comprend trois actions spécifiques:

- ✚ une action de découplage des courants :

$$V_{dref} = V_{sd} + e_d - V_{rldref} \quad (IV.17)$$

$$V_{oqref} = V_{sq} + e_q - V_{rlqref} \quad (IV.18)$$

✚ une compensation de la tension:

$$e_d = L \cdot \omega \cdot \hat{i}_{sd} \quad (IV.19)$$

$$e_q = L \cdot \omega \cdot \hat{i}_{sq} \quad (IV.20)$$

✚ un contrôle en boucle fermée des courants:

$$V_{dref} = C_{id}(i_{sdref} - \hat{i}_{sd}) \quad (IV.21)$$

$$V_{oqref} = C_{iq}(i_{sqref} - \hat{i}_{sq}) \quad (IV.22)$$

#### IV.5. Contrôle des puissances envoyées au réseau [40]

Le dispositif de commande précédemment expliqué permet d'égaliser les courants transités à leurs références. Les puissances active et réactive transitées peuvent être exprimées en utilisant les composantes des grandeurs électriques (tensions, courants) dans le repère de Park

$$Pg = V_{sd} \cdot i_{sd} + V_{sq} \cdot i_{sq} \quad (IV.23)$$

$$Qg = V_{sd} \cdot i_{sq} - V_{sq} \cdot i_{sd} \quad (IV.24)$$

Par inversion de ces relations, il est possible alors d'imposer des références pour la puissance active  $P_{gref}$  et la puissance réactive  $Q_{gref}$  en imposant les courants de référence suivants :

$$i_{sdref} = \frac{P_{gref} \cdot V_{sd} + Q_{gref} \cdot V_{sq}}{V_{sd}^2 + V_{sq}^2} \quad (IV.25)$$

$$i_{sqref} = \frac{P_{gref} \cdot V_{sq} - Q_{gref} \cdot V_{sd}}{V_{sd}^2 + V_{sq}^2} \quad (IV.26)$$

Une puissance réactive nulle peut alors être prélevée ( $Q_{gref} = 0$ ). On peut également générer de la puissance réactive ( $Q_{gref} < 0$ ).

#### IV.6. Contrôle de la tension du bus continu [41]

Les deux condensateurs ( $C1 = C2 = C$ ) en série sont équivalents à un condensateur ( $C/2$ ) traversé par un courant virtuel  $i_c$  ; la tension aux bornes du condensateur équivalent est obtenue par l'intégration de ce courant :

$$U_{sa}(t) = \frac{2}{C} \int_{t_0}^{t_0 + \Delta t} i_c \cdot dt + u_{s1}(t_0) \quad (IV.27)$$

Le réglage du bus continu est alors composé d'une boucle de régulation Figure IV.3, permettant de maintenir une tension constante du bus continu, avec un correcteur

proportionnel intégral (noté  $C_{ic}$ ) et générant la référence du courant à injecter dans le condensateur ( $i_{c_{ref}}$ ).

$$i_{c_{ref}} = C_{ic} (u_{s1_{ref}} - u_{s1}) \quad (IV.28)$$

#### IV.7. Modélisation de réseau BT

L'énergie électrique est fournie sous forme de tension constituant un système sinusoïdal triphasé dont les paramètres caractéristiques sont les suivants [39]:

➤ La fréquence Dans le cas idéal, les trois tensions sont alternatives et sinusoïdales d'une fréquence constante de 50 ou 60 Hz selon le pays [42].

➤ L'amplitude des trois tensions : L'amplitude de la tension est un facteur crucial pour la qualité de l'électricité. il doit être maintenu dans un intervalle de  $\pm 10\%$  autour de la valeur nominale, Dans le cas idéal, les trois tensions ont la même amplitude, qui est une constante.

➤ La forme d'onde des trois tensions formant un système triphasé doit être la plus proche possible d'une sinusoïde.

➤ Symétrie : La symétrie du système triphasé (égalité des modules des trois tensions, leur déphasage et l'ordre de succession des phases).

Le réseau triphasé trois grandeurs sinusoïdales de même fréquence, déphasées entre elles de  $\frac{2\pi}{3}$  et ayant même valeur efficace, forment un système triphasé équilibré. [43]

Réseau de distribution électrique. Il est basé sur un système triphasé de tensions. On peut généralement considérer que  $(V_a, V_b, V_c)$  est un système de tensions triphasé équilibré direct. Il en est de même pour  $(V_{ab}, V_{bc}, V_{ca})$ .

$$\begin{cases} V_a = V_m \sin(\omega t) \\ V_b = V_m \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) \\ V_c = V_m \sin\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right) \end{cases} \quad (IV.29)$$

$$\begin{cases} U_{ab} = V_a - V_b \\ U_{bc} = V_b - V_c \\ U_{ca} = V_c - V_a \end{cases} \quad (IV.30)$$

Avec  $\omega=2\pi f$  et  $f$  est la fréquence.

$$\text{Relations pour un système triphasé équilibré : } \begin{cases} V_m = \sqrt{2}V_{eff} \\ U_m = \sqrt{3}V_m \\ U_{eff} = \sqrt{3}V_{eff} \end{cases} \quad (IV.31)$$

$V_{eff}$ ,  $U_m$  : la valeur efficace de la tension simple et de la tension composée  $V_m, U_m$  : la valeur maximum de la tension simple et de la tension composé.

## IV.8. Le filtre LC

Le filtre **LC** élimine les harmoniques de découpage presque parfaitement et son comportement est quasiment idéal lorsqu'on travaille à vide (courant de sortie nul) et avec des signaux de fréquences voisines de la fréquence fondamentale.

Pour pouvoir connecter l'onduleur de tension en parallèle avec le réseau et le faire travailler comme une source de courant. Il est nécessaire d'utiliser un filtre de raccordement de nature inductive (**L** ou **LCL**). [38]

La fonction de ce filtre permet d'une part de convertir le compensateur en dipôle de courant du point de vue du réseau. Et d'autre part de réduire la dynamique du courant. De façon à le rendre plus facile à contrôler. Le filtre de type (**L**) permet de diminuer les harmoniques autour de la fréquence de commutation. Pour obtenir cela, la valeur de cette inductance doit être relativement élevée.

Cependant cette augmentation peut mettre en risque la capacité de compensation du système. Le filtre (**LCL**) est l'autre alternative de raccordement. [44]

## IV.9. Simulation

### IV.9.1. Simulation global de PV raccordé au réseau

Le système développé Dans cette simulation est une centrale photovoltaïque de 3.6KW, un hacheur boost commandé en MPPT de type P&O, un onduleur DC/AC de type NPC à trois niveaux commandé par la MLI (sinus triangle) et une charge RL et un filtre LC.

On veut déterminer la taille du générateur c'est-à-dire le nombre des module en série et en parallèle pouvant générer cette puissance.

### IV.9.2 Calcule des paramètres de système global

#### IV.9.2.1 Nombre de modules nécessaires [45]

Pour déterminer le nombre de modules, il faut tout d'abord connaître la puissance maximale des modules ( $W_c$ ) à utiliser.

Le nombre total de modules  $N_T$  de G PV est calculé par la formule suivante :  $N_{tot} = \frac{P_g}{P_c}$

Avec :

$P_g$  : La puissance crête du générateur.

$P_c$  : La puissance crête du module PV.

Nous voulons installer des générateurs photovoltaïques de 3.6 KWc dont l'élément constitutif de ce générateur est le module SPP032502400 250W. C'est un type de modules fabriqué en Algérie. Il est constitué de 36 cellules au silicium polycristallin.

A partir de tableau (I.1 ; chapitre 1) et des caractéristiques électriques du ce module on calcule le nombre total de modules pour cette puissance :

$$N_{tot} = \frac{P_g}{P_c} = \frac{3600}{250} = 14.4$$

$$N_{tot} = 14 \text{ Modules.}$$

#### IV.9.2.2 La surface nécessaire [45]

Pour évaluer la surface nécessaire d'installation photovoltaïque il faut tout d'abord considérer les caractéristiques suivantes :

- ❖ Les dimensions du module (longueur  $\times$  largeur) qui dépendent de la technologie et le type des modules.
- ❖ Les distances entre les modules pour une bonne aération et l'empêchement de l'ombre entre modules.

La surface effective de notre générateur est :

$$S_g = N_{tot} \times S_M = 1.65 \times 0.99 \times 14 = 22.92 \text{ m}^2$$

En tenant compte de la distance entre modules et entre les rangés des modules, la surface peut être majorée à 23m<sup>2</sup>.

#### IV.9.2.3 Les composants du convertisseur (DC/DC) Boost [46]

- **La bobine**

$$L = \frac{\alpha_0 \times V_{pv}}{I_{smin} \times f} \quad (\text{IV.32})$$

$$L = \frac{0.43 \times 230}{10.5 \times 1000} = 10 \text{ mH}$$

Avec :  $\alpha_0$  : Le rapport cyclique et f: Fréquence de commutation.

Le rapport cyclique que l'on peut prévoir dans les conditions nominales  $V_e=230V$  et  $V_s=400V$  se déduit de

$$\frac{V_e}{V_s} = \frac{1}{1-\alpha} \quad (IV.33)$$

- **Condensateur d'entrée**

Le critère de conception pour les condensateurs d'entrée est que la tension d'ondulation à travers eux devrait être plus moins de 1%.

$$C_e = \frac{I_{opt} \times \alpha}{\Delta V_e f} \quad (IV.34)$$

$$C_e = \frac{14.5 \times 0.43}{10 \times 1000} = 0.4mF$$

- **Condensateur de sortie**

$$\frac{\Delta V_0}{V_0} = \frac{1-\alpha}{8LC_s f^2} \quad (IV.35)$$

Avec :

$$\frac{\Delta V_0}{V_0} = 1\%$$

$$C_s = \frac{1 - 0.43}{8 \times 0.01 \times 1000^2 \times 0.01} = 0.7mF$$

- **La tension de bus continu**

Elle représente la tension d'entrée de l'onduleur. Il est nécessaire que la tension du bus continu ( $V_{dc}$ ) soit supérieure ou égale au double de la valeur crête des tensions simples apparaissant du côté du filtre installé après de cet onduleur (car  $V_1=rVDC2$  ). Ou  $r$  représenter l'indice de modulation et  $V_1$  représenter le fondamentale d'harmonique.

$$V_a = \frac{U}{\sqrt{3}} = \frac{400}{\sqrt{3}} = 231v \quad (IV.36)$$

Donc :

$$V_{dc} = 2V_a \approx 461 V$$

- **Le choix des interrupteurs statiques [46]**

Le MOSFET est très bien adapté pour les convertisseurs basse-tension et à fréquence élevée (inférieure à 100V et supérieure à 50kHz) alors que l'IGBT est utilisé pour les tensions supérieures à 300V et des fréquences rarement supérieures à 20kHz. Les GTO et thyristors sont dédiés aux applications haute tension (>1kV) fort courant (>1kA). La figure 1.2 résume cette classification de composants de puissance en fonction de la fréquence de commutation et du produit U.I des composants.

Le choix des interrupteurs statiques dépend du courant et de la tension qu'ils peuvent supporté Dans notre cas on a choisi le type IGBT.

Donc, nous avons besoin d'un seul convertisseur où la tension que peut supporter est de 470V.

#### IV.9.2.4 Le convertisseur DC/AC [46]

Les interrupteurs choisis doivent supporter seulement la valeur de 1/2 de la tension  $V_{dc}$ .

$$V_{in} = \frac{V_{dc}}{2} = \frac{461}{2} = 230.5v \quad (IV.37)$$

Donc le choix est basé sur 2 interrupteurs de 235 V.

- **Le nombre des modules en série de chaque générateur partiel [46]**

La mise en série de plusieurs modules PV permet d'assurer la tension convenable à l'alimentation d'une charge donnée. Le nombre de ces modules est calculé par l'expression

suivante :

$$N_{si} = \frac{V_{ch}}{V_m}$$

Avec :

$V_{ch}$  : La tension nominale de la charge (l'onduleur).

$V_m$  : La tension nominale du module.

Comme le hacheur utilisé est un élévateur de tension (on prend un rapport d'élévation de 1.6), la valeur de tension de ce module est de 230V.

$$N_{si} = \frac{230}{31.5} = 7.3$$

Donc,  $N_{si} = 7$  modules en séries.

- **Nombre de modules en parallèle**

La mise en parallèle de modules donne l'intensité nécessaire à la charge. Le nombre de branches est calculé par l'équation suivante :

$$N_p = \frac{N_t}{N_s} \quad (IV.38)$$

$$N_p = \frac{14}{7} = 2$$

Soit :  $N_p = 2$  modules en parallèles Le nombre de modules totale est  $2 \times 7 = 14$  modules.

- **Correction de la puissance crête**

Dans la plus part des cas, le nombre de modules (en séries et/ou en parallèles) calculés ne sont pas des entiers ; il faut donc les arrondir pour trouver la nouvelle puissance corrigée.

La nouvelle puissance corrigée :

$$P_{cor} = N_s \cdot N_p \cdot P_m \quad (IV.39)$$

$$P_{cor} = 250 \times 2 \times 7 = 3.5 \text{KWc.}$$

• **Le filtre LC**

Pour améliorer la qualité d'énergie injectée au réseau, un filtre bas s'avère nécessaire pour éliminer les harmoniques de découpage.

Pour calculer les paramètres du filtre on adopte la méthodologie présenté [46] par où la Fréquence de résonance du filtre est fixée au dixième de celle de découpage.

Ainsi on a: La fonction de transfert de filtre RL est donnée par:

$$\frac{V_{ch}}{V_{ond}} = \frac{\frac{1}{LC}}{p^2 + \frac{1}{RL}P + \frac{1}{LC}} \tag{IV.40}$$

Cette équation est de la forme :

$$\frac{V_{ch}}{V_{ond}} = \frac{\omega^2}{p^2 + 2\varepsilon\omega P + \omega^2}$$

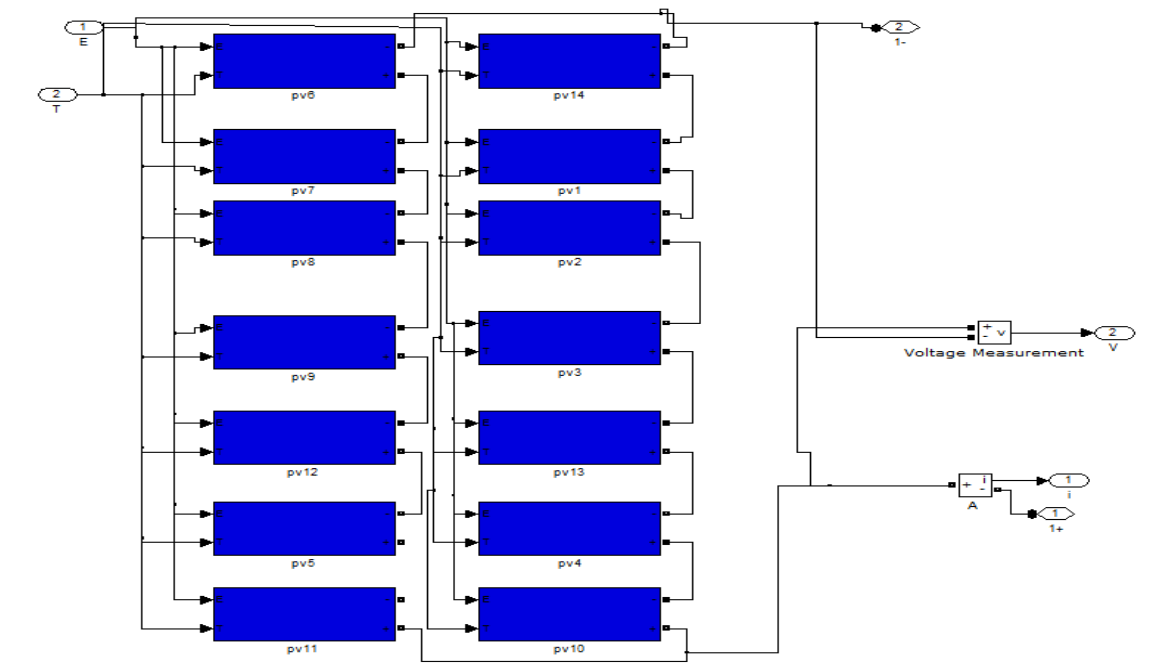
Ainsi on a:  $1 = LC\omega^2$  Et  $\omega^2 = 2\pi f_c^2$

Avec :  $f_c$  la fréquence de résonance.  $LC = \frac{1}{4\pi^2 f_c^2}$  (IV.41)

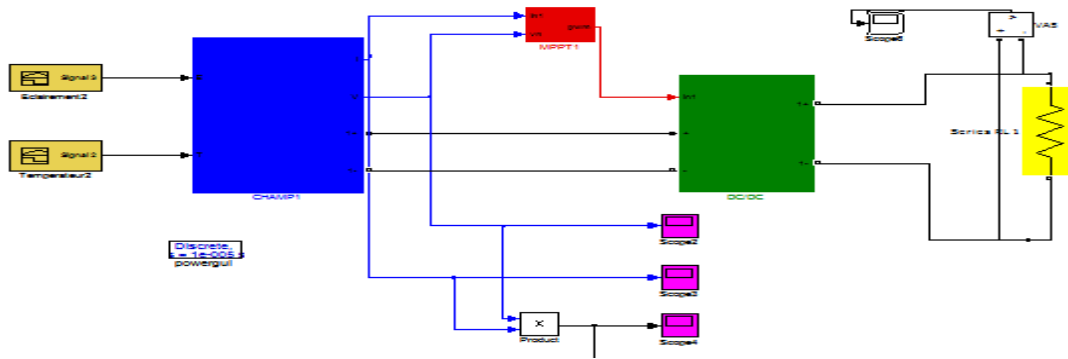
$$f_c = \frac{f_d}{10} \tag{IV.42}$$

$f_d$  : fréquence de découpage.

Donc : on trouve :  $L = 0.1 \text{ H}$  Et  $C = 25.2\mu\text{F}$ .



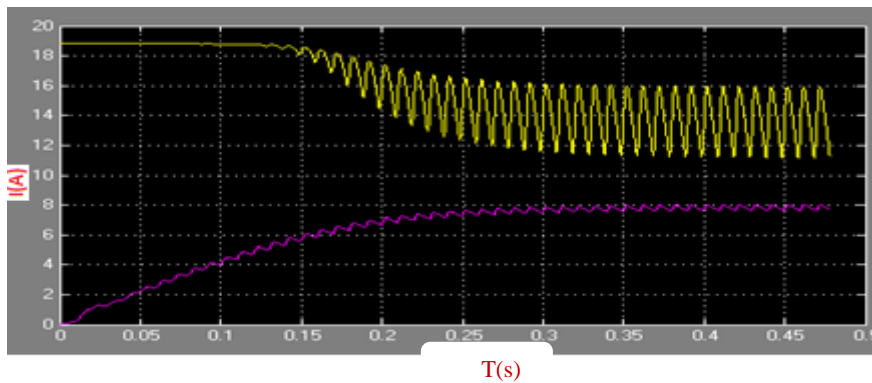
**Figure IV.6** : Schéma de block du générateur photovoltaïque



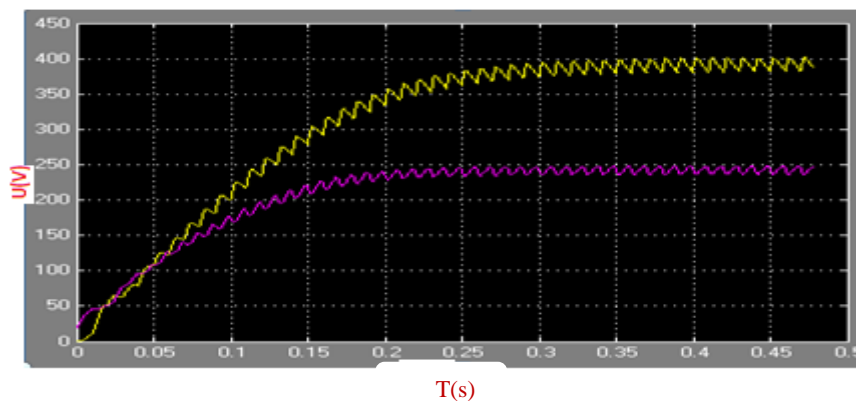
**Figure IV.7:** Schéma de simulation du générateur photovoltaïque avec un hacheur boost commandé en MPPT de type P&O et une charge  $R=30\Omega$ .

### Résultats de simulation

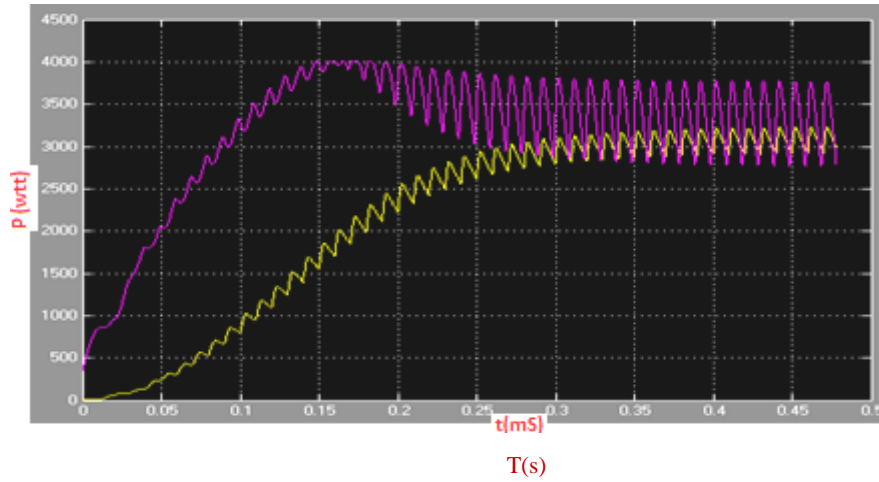
Courant tension et puissance de champs PV a température et éclairement aux STC ( $E=1000 \text{ W/M}^2$ ,  $T=25^\circ\text{C}$ ):



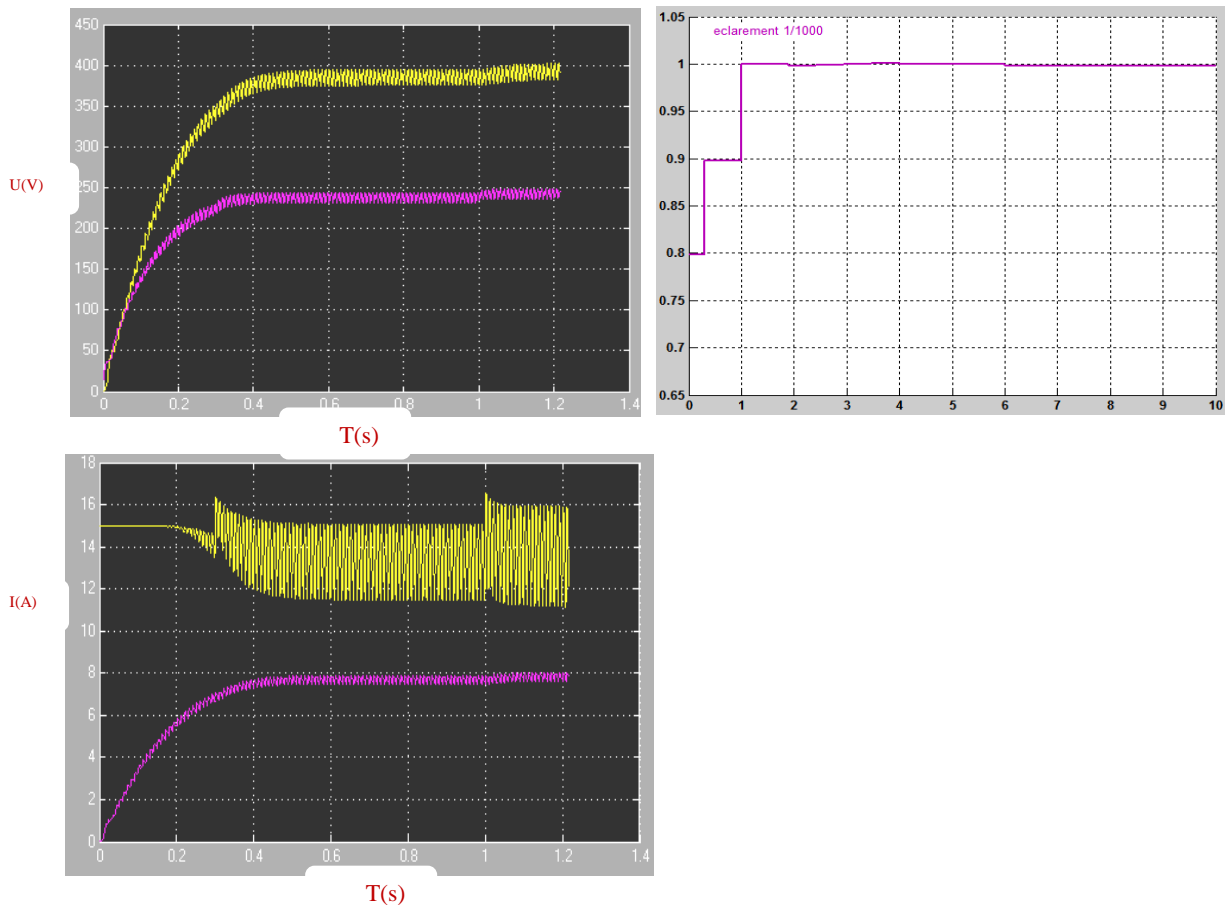
**Figure IV.8 :** Résultats de simulation du courant de champ PV d'entre (jaune) et de du courant de sortie (violet) du hacheur survolteur.



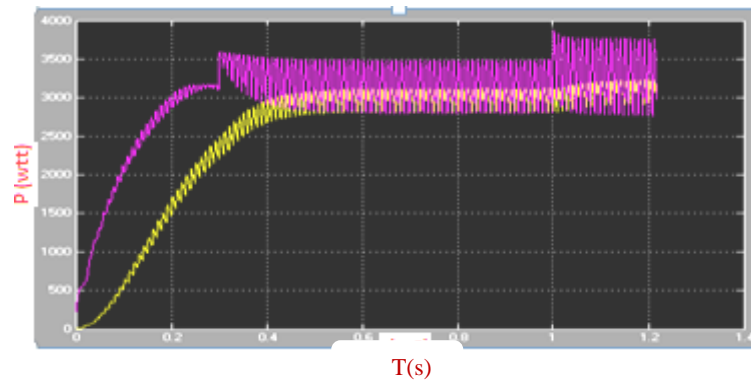
**Figure IV.9 :** Résultats de simulation de la tension de champ PV d'entre (violet) et de la tension de sortie (jaune) du hacheur survolteur.



**Figure IV.10** : Résultats de simulation de la puissance de champ PV d'entre (jaune) et de la puissance de sortie (violet) du hacheur survolteur.



**Figure IV.11** : Résultats de simulation de tension champ PV d'entre (violet) et de sortie (jaune) du hacheur survolteur pour un éclairement variable.

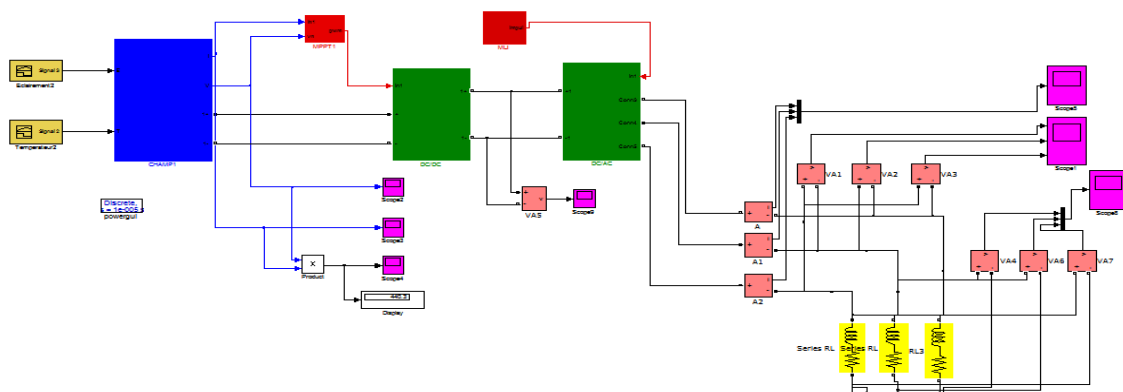


**Figure IV.12** : Résultats de simulation de la puissance de champ PV d'entre (jaune) et de sortie (violet) du hacheur survolteur pour un éclairement variable.

D'après les figures (IV.8, IV.9 et IV.10), on remarque que les valeurs de tension, courant et puissance de sortie d' l' hacheur sont supérieure à celles de GPV PV donc l' hacheur fonction en mode survolteur à son rapport cyclique qui est inferieur a 0.5.

Pour la figure (IV.8) on remarque que pour l'éclairement  $E=1000 \text{ w/m}^2$  le courant ce stabilisé a  $I_{sc}=14\text{A}$  proche de  $I_{MPPT}$  ces résultats montrent que l' hacheur survolteur et la commanda MPPT «perturbation et observation» effectuent leurs rôles et Pour les figures (IV.11, IV.12) pour un éclairement inferieure a  $1000\text{w/m}^2$  le courant  $I=13.60\text{A}$  on peut voir que le courant subit une variation importante, lorsque l'éclairement est augmente le courant de court-circuit est augmente, mais par contre la tension augmente légèrement .Ce qui se traduit par une augmentation de la puissance.

Simulation d'un champ photovoltaïque avec un hacheur boost reliée au bus continu d'un onduleur à trois niveaux à structure NPC commandé par MLI et une charge  $R = 100\Omega$  et  $L = 0.1\text{H}$  son filtre de Fréquence de commutation de la commande PWM (porteuse)  $10\text{KHZ}$  .



**Figure IV.13** : Schéma d'un champ photovoltaïque avec un hacheur boost reliée au bus continu d'un onduleur à trois niveaux à structure NPC commandé par MLI et une charge RL.

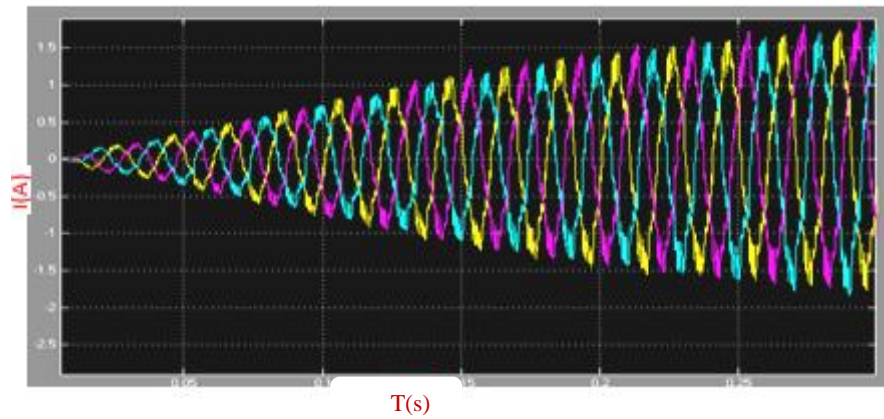


Figure IV.14 : Résultats de simulation du courant de la charge.

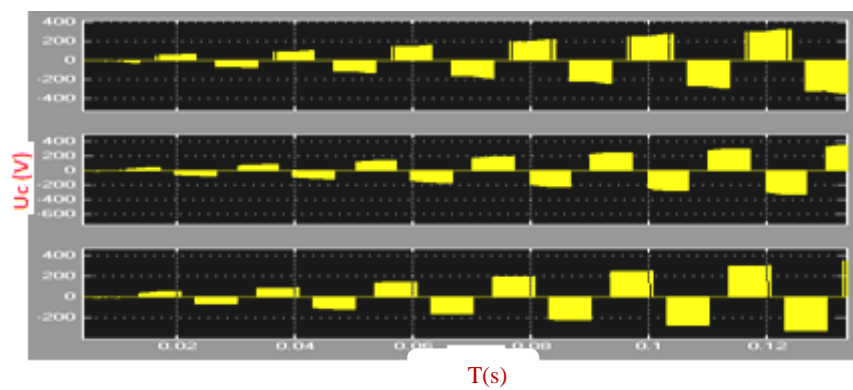


Figure IV.15 : Résultats de simulation des tensions compos de la charge.

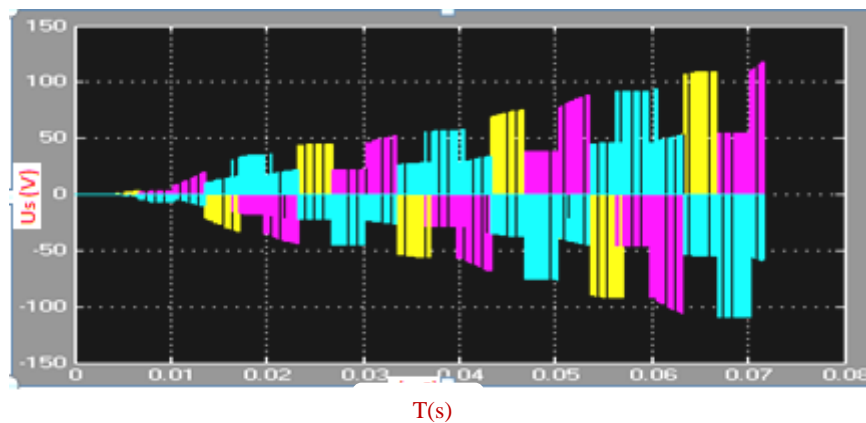
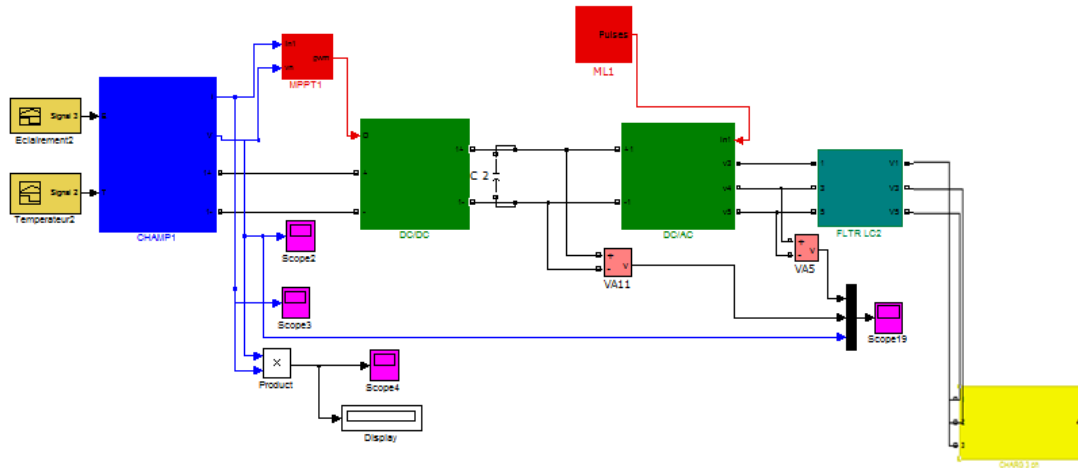


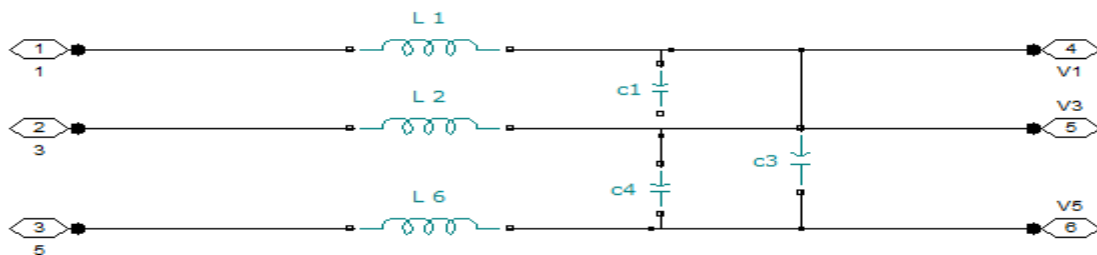
Figure IV.16 : Résultats de simulation des tensions simple de la charge.

D'après la figure (IV.14) on remarque que le courant de sortie de l'onduleur prend presque la forme sinusoïdale à cause de la charge inductive

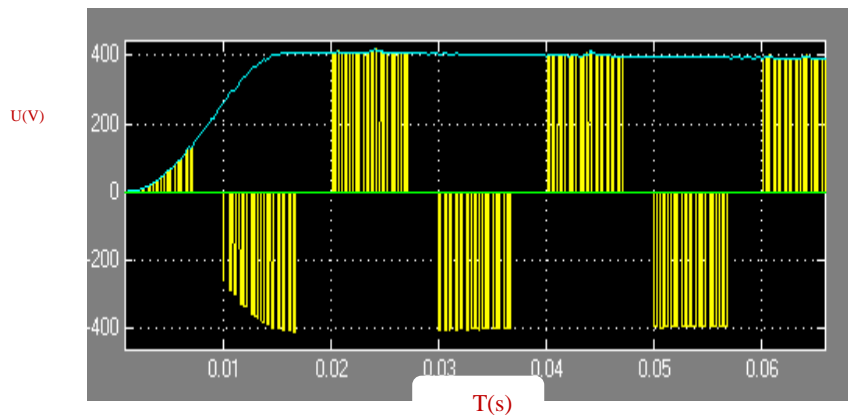
D'après les figures (IV.15, IV.16), on remarque que la valeur max de la tension composé est égale à celle de la tension continu de l'entrée (ou de sortie de l'hacheur) ainsi que la forme de la tension simple et la tension composé est découpé.



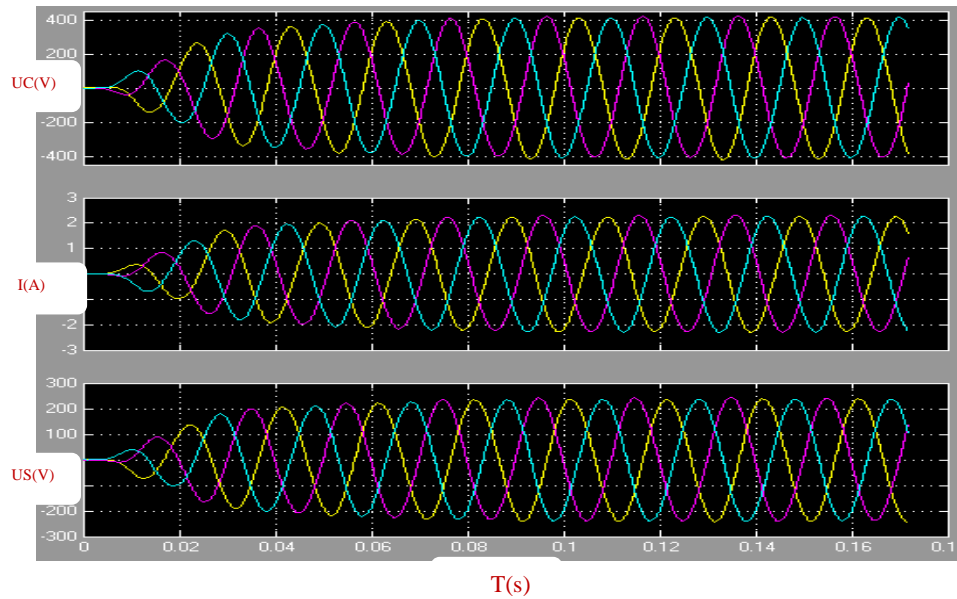
**Figure IV.17 :** Schéma d'un champ photovoltaïque avec un hacheur boost relié au bus continu d'un onduleur à trois niveaux à structure NPC commandé par MLI et une charge  $R = 100\Omega$  et  $L = 0.1H$  avec filtre  $L=0.02H$  et  $C=25.2\mu f$ .



**Figure IV.18 :** Schéma de simulation du filtre LC.



**Figure IV.19 :** Résultats de simulation de la tension d'entre (Bleu) et de sortie (jaune) du l'onduleur son la charge RL.



**Figure IV.20** : Résultats de simulation des tensions composées, des tensions simple et des courants de la charge à présence de filtre.

Ce groupe des résultats pour les figure (IV.14, IV.15, IV.16, IV.17 et IV.18) de simulation sous Simulink/Matlab représente les tensions (simples et composées) et les courants à la sortie de l'onduleur de tension NPC avant et après l'opération de filtrage par le filtre LC qui a comme rôle de minimiser les harmoniques.

Les tensions (simples et composées) et les courants après filtrage sont devenues sinusoïdales ce qui permet de raccorder la source photovoltaïque au réseau électrique de distribution toute en assurant la même fréquence, la même valeur efficace de tension et même le déphasage.

En avérer a ça par La technique de commande par MLI : la commande par modulation de largeur d'impulsion résout le problème de la maîtrise de la fréquence de commutation en fonctionnant avec une fréquence fixe facile à filtrer en aval de l'onduleur.

La plus simple et la plus connue des modulations de largeur d'impulsion est sans doute la MLI à échantillonnage naturel, dite MLI intersective. Cette technique de commande met en œuvre d'abord un régulateur qui détermine la tension de référence de l'onduleur (modulatrice) à partir de l'écart entre le courant mesuré et sa référence. Cette dernière est ensuite comparée avec un signal triangulaire (porteuse à fréquence élevée fixant la fréquence de commutation). La sortie du comparateur fournit l'ordre de commande des interrupteurs.

### IV .9.3. Simulation global de GPV raccordé au réseau à éclairage maximale

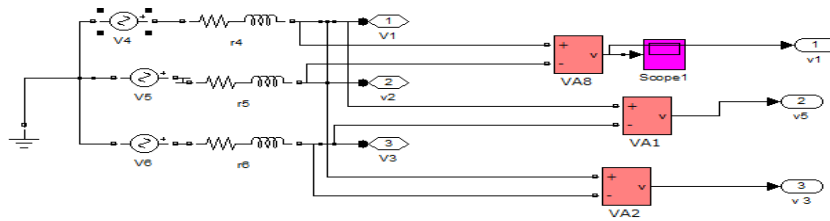


Figure IV.21 : Schéma de simulation du réseau BT (220/400) de fréquence  $f=50$  HZ.

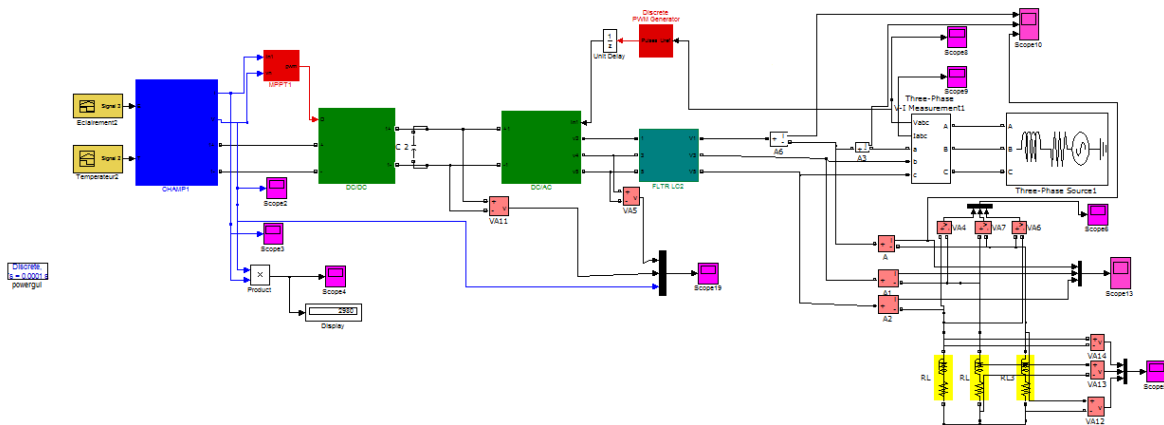
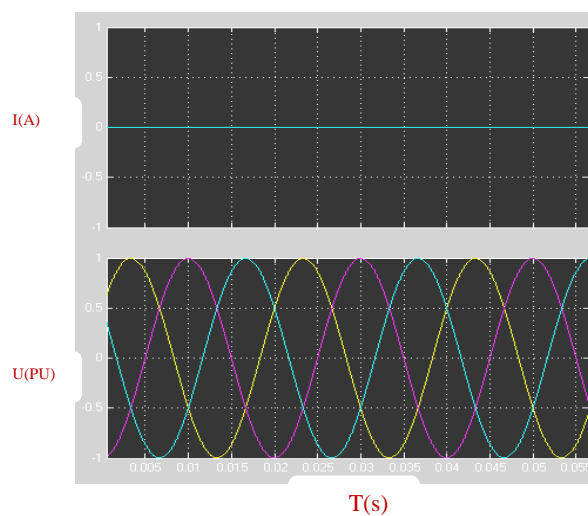


Figure IV.22 : Schéma de simulation global de GPV raccordé au réseau.

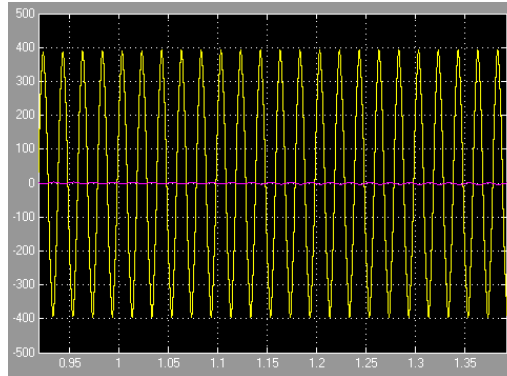
### Résultats de simulation

- Réseau :



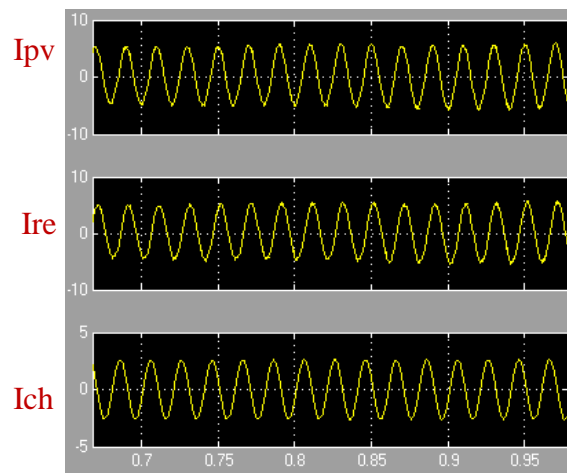
**Figure IV .23** : résultats de courant  $I_{abc}$  a et de tension  $V_{abc}$  (calculer en pu avec une tension de 400V et une référence de 400V) de réseau.

- le système PV :



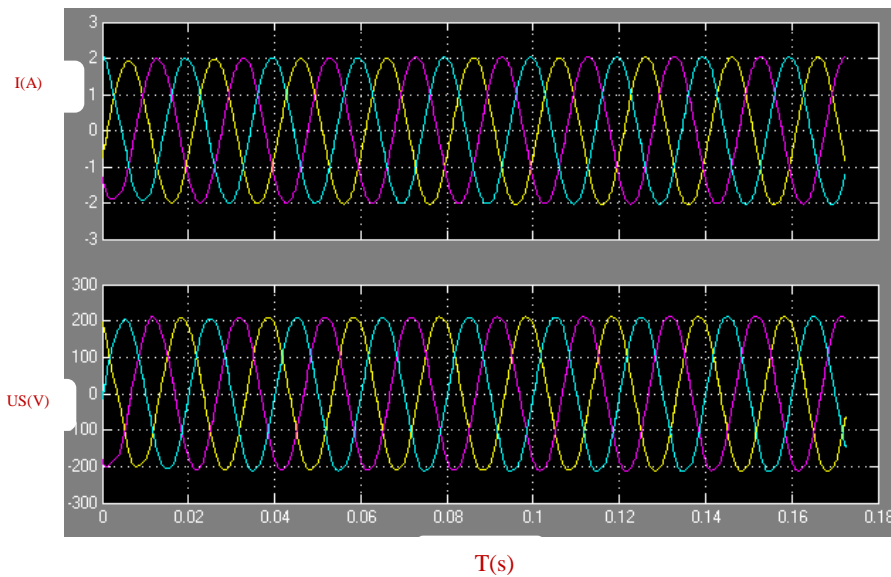
T(s)

**Figure IV.24** Le courant injecté par l'onduleur (violet) et la tension de réseaux (jaune).



T(s)

**Figure IV.25** Résultats de simulation des courants de GPV injecté par l'onduleur, de réseau et de la charge courants de charge.



**Figure IV.26 :** résultats des tensions simples et les courants de la charge.

La figure IV.24 montre que le filtre LC est mis en service, en produisant des courants qui arrivent, après un transitoire de quelque milliseconde, rendant les courants de source injecter par l'onduleur sinusoïdaux et déphase par rapport à la tension correspondante de réseau par un longue proche de  $180^\circ$ .

La figure IV.25 montre que la somme de courant du réseau plus le courant de la charge est égale à elle de la charge.

Ce qui implique que la puissance active de ce système est négative Figure IV.24 alors l'injection de cette puissance est unique du GPV vers le réseau passant par la charge RL.

## IV.10 conclusion

Dans ce chapitre, nous avons modélisé et simulé les différents composants du système photovoltaïque connectés au réseau, tel que le générateur photovoltaïque, le hacheur, l'onduleur NPC, le filtre et la charge en application le logiciel MATLAB/SIMULINK.

Les résultats de simulation ont montré l'efficacité de l'ajout d'un filtre à la sortie de l'onduleur pour améliorer la qualité de la tension et du courant injectés au réseau.

L'énorme avantage de ce système est l'absence de batterie. On ne stocke plus l'énergie, on l'injecte directement dans le réseau local ou national. Et ceci sans limite quantitative, donc toute l'énergie est récupérée.

---

# *Conclusion générale*

---

## Bibliographie

- [1] Mechalikh.Med ; Nadjib.Hamada ; Charaf.Eddine « Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque en fonctionnement autonome et connecté au réseau » Mémoire MASTER ACADEMIQUE Domaine : sciences et technologies. Filière : Génie électrique. Spécialité: Machine électrique et électronique de puissance. OUARGLA .2013. (Mémoire)
- [2] Production d'énergie électrique : énergie solaire photovoltaïque, catalogue <http://www.iufmrese.cict.fr/catalogue/2006/Toulouse/pv>, PDF (Site)
- [3] Z. Souade, « Réalisation d'un régulateur solaire à base de microcontrôleur pour le contrôle de l'état de charge et la protection des accumulateurs », Magister en Électrotechnique, Oum El Bougui, 2008. (Mémoire)
- [4] Cécile Miquel, « Systèmes photovoltaïques : fabrication et impact environnement » Synthèse réalisée par sous la direction de Bruno Gaiddon, Juillet, 2009. (Synthèse)
- [5] article de cellule solaire photovoltaïque organique <http://fr.questmachine.org> Cellules solaires photovolta %C3% AFques\_organiques. 25/04/2016 (Article)
- [6] H. Fatiha, R. aicha « Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque » Magister en Électrotechnique, Ouargla, 2014. (Mémoire)
- [7] I.Bendjamaa « Modélisation et commande d'un système de stockage photovoltaïque » Magister Université Abou-Baker Blkaid-Tlemcen 2011/2012. (Mémoire)
- [8] S. M. Sze, K. N. Kwok, « Physics of Semiconductor Devices », 3rd edition, Wiley Interscience, New Jersey, 2006. (Ouvrage, livre)
- [9] A.Khedidja ; « Modélisation et simulation d'un générateur PV couplé à un réseau électrique » ; Mémoire de magister en électrotechnique ; 2014 ; (Mémoire)
- [10] L.Baxerres ; A .Michallet ; C.Ramet ; « Projet d'initiative personnelle » Thèse de doctorat en électronique et énergétique ; 2006. (Thèse)
- [11] P.L.Jett ; J.L.Miller. « Analysis of effects of shodwed and open solar cell on orbital workshop solar cell array performance» ; pp; 889-900. 1971. (Thèse)
- [12] Anne Labouret, Michel Viloz, Energie solaire photovoltaïque, Edition LE Moniteur. (Ouvrage, livre)
- [13] Michel Pinard « Convertisseurs et électronique de puissance : commande, description et mise en œuvre », Edition Dunod, Paris, 2007. (Ouvrage, livre)
- [14] Philippe « gradateur », cours d'Electronique de Puissance. [http://pedagogie.ac-toulouse.fr/BTS électrotechnique-Tarbes/download/e/gradateur](http://pedagogie.ac-toulouse.fr/BTS%20%C3%A9lectrotechnique-Tarbes/download/e/gradateur), PDF. (Site)

- [15] CH.Maher « Gestion Energétique des Panneaux photovoltaïque », Mémoire Master Université Sfax, 2007-2008. (Mémoire)
- [16] K.Sobaihi « étude et réalisation d'un hacheur de Tracking du point de puissance Maximale (MPPT) a contre réaction », Mémoire de Magister Ecole Nationale polytechnique 10, Avenue Hassen Badi El –Harrach, Alger. (Mémoire)
- [17] Alain Bilbao Ibarreta « Réalisation de commandes MPPT Numériques », rapport de stage Projet Fin d'Etudes, Universtat Rovira Virgili ,2006. (Mémoire)
- [18] N. Abouchabana « Etude d'une nouvelle topologie buck-boost appliquée à un MPPT », Mémoire de Magistère, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, Algérie, 2009. (Mémoire)
- [19] Z. Zeddine « Etude expérimentale d'un convertisseur DC/DC contrôler par une commande robuste », Mémoire de Magister en Electrotechnique Option: Commande électrique, de Batna, Algérie. (Mémoire)
- [20] Z. Ayache, A. Bendaoud, H. Slimani, B. Benazza, H. Miloudi, A. Bentaallah « Commande MPPT et Contrôle d'un Système Photovoltaïque par la Logique Floue », Laboratoire IRECOM, Sidi Bel Abbés, Algérie. (Thèse)
- [21] « Etude comparative des techniques MPPT Perturbation and Observation (P&O), Incrémental Conductance (Inc.CoN) et Hill climbing (H.C) », Mémoire de Magister Université El hadj Lakhdar, Batna, Algérie, 2007. (Mémoire)
- [22] Thanh Phu Nguyen, « solar panel maximum power point tracker », Undergraduate Thesis the University of Queensland Department of Computer Science & Electrical Engin. (Mémoire)
- [23] N.Aouchiche, M.S. Aït Cheikh et A. Malek « Poursuite du point de puissance maximale d'un système photovoltaïque par les méthodes de l'incrémentation de conductance et la perturbation & observation », Division Energie Solaire Photovoltaïque Centre de Développement des Energies Renouvelables, CDER, Bouzaréah, Département d'Electronique, Ecole Nationale Polytechnique Avenue Hassen Badi, El Harrach, Algeria 2013. (Mémoire)
- [24] A.Leredde, « Commande et Mise en Oeuvre de Nouvelles Structures Multi niveaux » doctorat d'Institut National Polytechnique de Toulouse département Génie Electrique, mardi 8 novembre 2011. (Thèse)
- [25] B.KHALIFA, « Réalisation d'un banc d'essai pour la Commande et l'Observation des Convertisseur Multicellulaires Série », Grade de docteur Université de cergy-pontoise, 2009. (Mémoire)
- [26] M. Baldé, «compensateur statique pour éoliennes a vitesse fixe a base de génératrice asynchrone a cage », Mémoire a l'université du Québec a Trois-Rivières comme exigence partielle de la maitrise en génie électrique, décembre, 2010. (Mémoire)

- [27] Melle. Ben Zemamouche Houria, « Application de la MLI Vectorielle aux Onduleurs Multi niveaux à base de GTO et d'IGBT », Mémoire de Magister en électromécanique Année 2010. (Mémoire)
- [28] A. Boualem, E. M. Berkouk, G. Manesse, « Commande de la Machine Asynchrone Autopilotée Alimentée par un Onduleur NPC à Cinq Niveaux », Institut d'Electrotechnique, Université-Badji Mokhtar-Annaba. SNAPSEA, 1998. (Mémoire)
- [29] R. Ameer, C. Larouci, e. M. Berkouk, G. Manesse, « Commande de Position par la Méthode du Flux Orienté de la Machine à Induction de Forte Puissance Alimentée par un Onduleur à Sept Niveaux », Institut d'Electrotechnique, Université-Badji Mokhtar-Annaba. SNAPSEA, 1998. (Mémoire)
- [30] Mr Talha Abdelaziz, « Etude de différentes cascades de l'onduleur à sept niveaux à structure NPC. Application à la conduite d'une machine synchrone à aimants permanents », Thèse doctorat en génie électrique, 02/12/2004. (Thèse)
- [31] 1-Said Bentouba, 2-Aek.Slimani, 3-Med.Seghir.Boucherit, « Stratégies de Commande et Modélisation de l Onduleur à Cinq Niveaux », article Novembre 2010, Université de Bechar, Algérie, 1-Université Ahmed draya, Adrar,Algérie, 2-Université Bechar, Bechar, 3-Ecole National Polytechnique EL-Harrach, Alger. (Article)
- [32] 1-T. Abdelkrim, K. Benamrane, 2-E.M. Berkouk, 3-K. Aliouane et 4-T. Benslimane, « Etude et réalisation d'un onduleur à trois niveaux commandé par MLI vectorielle », article à Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables, 1-Gaara Taam, Ghardaïa, Algérie, 2-Laboratoire de Commande des Processus, El Harrach, Alger, 3-Laboratoire d'Electronique de Puissance, Bordj El Bahri, Alger, 4- Université de M'Sila, 25/06/ 2011. (Article)
- [33] Nacer Abcellah et Lahlali Abdenour, « Commande d'un moteur entraînant une pompe d'exploitation par un onduleur tension à trois niveaux », diplôme d'ingénieur d'état en Électromécanique, Annaba, juin 2009. (Mémoire)
- [34] S.Bentouba, « contribution à l'étude et à la modélisation d'un onduleur multi niveaux (deux, trois et à cinq niveaux) application à la conduite d'une machine synchrone par mode glissant » thèse de magister CUB, 2003. (Thèse)
- [35] S.Abdeslem, « Filtrage actif et contrôle de puissances : application aux systèmes photovoltaïques interconnectés au réseau », Diplôme de MAGISTER en Electronique, Option : Contrôle, faculté de Technologie Ferhat Abbas –Setif, Algerie. (Mémoire)
- [36] T. ABDELAZIZ « par Etude de différentes cascades de l'onduleur a sept niveaux a structure NPC.application a la conduit d'une machine synchrone a aimants permanents » Thèse DOCTORAT en Electrotechnique Ecole Nationale Polytechnique 10 Avenue. Alger, 02 /12/ 2004. (Thèse)

- [37] Thi Minh Chau « Couplage Onduleurs Photovoltaïques et Réseau, aspects contrôle/commande et rejet de perturbations », thèse de Doctorat, Université de Grenoble, 25/01/2012. (Thèse)
- [38] SONELGAZ Spa, "Notice d'information", fiche technique, 2006 (fiche technique)
- [39] M. Seddik Bacha « les systèmes de l'électronique de puissance dédiée à la distribution électrique – application à la qualité de l'énergie », thèse de Doctorat, l'laboratoire d'électrotechnique de Grenoble 2003. (Thèse)
- [40] O. Bouhali « Contribution des convertisseurs multi niveaux au raccordement de la production d'origine éolienne sur un réseau électrique », 19 Avril 2007. (Mémoire)
- [41] A. Bendre, Giri Venkataramanan, Don Rosene and Vijay Srinivasan, «Modeling and Design of a Neutral-Point Voltage Regulator for a Three-Level Diode-Clamped Inverter Using Multiple-Carrier Modulation » , IEEE Transactions on Industrial Electronics, , June 2006, (Mémoire)
- [42] P. Bornard, M. Pavard, « Réseaux d'interconnexion et de transport: réglage et Fonctionnement, Techniques de l'ingénieur », mars 1993. (Mémoire)
- [43] MEDDOUR Youcef YAZI Zoubir Etude de raccordement d'un système photovoltaïque au réseau électrique Mémoire master académique. Spécialité : Electrotechnique Industrielle. 2015 (Mémoire)
- [44] G. Haizea, « Etude de structure d'intégration des systèmes de génération décentralisés : application aux micros réseaux ». Thèse de doctorat dans le cadre de l'école doctorale de Grenoble. 2006. (Thèse)
- [45] Aboub Hania ; « Commande d'un onduleur neuf niveaux, destiné aux fortes puissances PV » ; Mémoire de MAGISTER en électrotechnique ; Université El-Oued ; 2014. (Mémoire)
- [46] F.Antony, C.Durschner , K.Remmers ; «Le photovoltaïque pour tous , conception et réalisation d'installations », Institut National de l'énergie solaire , Berlin, 2006. (Mémoire)