

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République Algérienne Démocratique et Populaire  
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي  
Ministère de l'enseignement Supérieur et de la Recherche scientifique



Université Akli Mohand Oulhadj Bouira  
Faculté des Sciences et des Sciences Appliquées  
Département de Génie Electrique  
Filière : Électrotechnique  
Spécialité : Réseaux électriques

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

**MASTER**

***Thème***

Etude d'une source d'énergie renouvelable couplée  
au réseau

**Présenté par :**

Rahal Nouredine

Bouizri Ramdane

**Devant le jury composé de :**

Mr Berrag Amine

Mr Ameziane Sadek

Mr Griche Issam

Président

Encadreur

Examineur

**Année universitaire : 2019 / 2020**

# *Remerciements*

*On remercie DIEU pour nous avoir donné la santé et le courage pour inspirer la connaissance et le savoir.*

*Au terme de la réalisation de ce mémoire, nous tenons à présenter nos remerciements les plus sincères à notre Promoteur Mr Ameziane, pour ces encouragements et ses conseils Ainsi que les membres de jury d'avoir accepté de juger notre travail, enfin nous témoignons notre gratitude à*

*Toutes les personnes ayant contribué de près ou de loin à la réalisation de cet humble mémoire.*

# *Dédicaces*

*Je dédie ce modeste travail à :*

*A mes chers parents que dieu les protège, qui m'ont  
soutenu le long de mon cursus scolaire et  
universitaire, et qui ont mis à ma disposition tout les  
moyens de ma réussite*

*A ma chère sœur et mon cher frère*

*A mes grands parents que dieu les bénissent et leurs  
accorde une longue vie*

*A tout les membres de ma famille sans exception*

*A tout ce qui me connaît de près et de loin*

*Rahal Nouredine*

# *Dédicaces*

*Je dédie ce modeste travail :*

*A ma chère mère que je la souhaite une longue vie*

*A ma petite famille notamment ma femme et mes  
enfants à qui je souhaite une merveilleuse vie pleine  
de réussite*

*A tous mes amis qui ont m'aider le long de mon cursus*

*Bouizri Ramdane*

# Sommaire

## Liste des figures

## Liste des tableaux

## Liste des symboles

## Introduction générale..... 1

### Chapitre I : Généralités sur les systèmes photovoltaïques

#### I.1. Introduction..... 3

#### I.2. Irradiation solaire ..... 4

##### I.2.1. Différents types de rayonnement solaire ..... 5

###### I.2.1.1. Rayonnement direct..... 5

###### I.2.1.2. Rayonnement diffus ..... 5

###### I.2.1.3. Rayonnement solaire réfléchi ..... 5

###### I.2.1.4. Rayonnement global..... 5

#### I.3. Conversion photovoltaïque ..... 6

##### I.3.1. Généralités sur les semi-conducteurs..... 6

###### I.3.1.1. Les semi-conducteurs intrinsèques..... 6

###### I.3.1.2. Les semi-conducteurs extrinsèques ..... 7

##### I.3.2. Dopage et jonction ..... 7

###### I.3.2.1. Dopage de type N..... 7

###### I.3.2.2. Dopage de type P..... 8

###### I.3.2.3. Formation de la jonction PN ..... 8

##### I.3.3. Caractéristique I-V du semi-conducteur ..... 9

#### I.4. cellule photovoltaïque ..... 10

##### I.4.1. Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque ..... 10

##### I.4.2. Modèle d'une cellule photovoltaïque ..... 11

###### I.4.2.1. Modèle à deux diodes..... 11

###### I.4.2.2. Modèle à une diode ..... 12

###### I.4.2.3. Modèle avec pertes ohmiques ..... 13

###### I.4.2.3.1. Modèle en courant..... 13

###### I.4.2.3.2. Modèle en tension ..... 13

##### I.4.3. Les différentes technologies des cellules PV..... 13

###### I.4.3.1. Cellules cristallines ..... 14

I.4.3.1.1. Les cellules monocristallines .....	14
I.4.3.1.2. Les cellules poly-cristallines .....	14
I.4.3.2. Cellules à couches minces (amorphes).....	14
I.4.4. Caractéristiques d'une cellule photovoltaïque .....	15
I.4.4.1. Courant de court-circuit $I_{cc}$ .....	16
I.4.4.2. Tension en circuit ouvert $V_{co}$ .....	16
I.4.4.3. Caractéristique Puissance-Tension.....	16
I.4.4.4. Facteur de forme.....	17
I.4.4.5. Rendement.....	17
I.4.5. Influence des résistances série et parallèle, éclairement et température sur la cellule PV .....	18
I.4.5.1. Influence des résistances .....	18
I.4.5.2. Influence de l'éclairement .....	19
I.4.5.3. Influence de la température .....	20
I.4.5.4. Influence simultanée de l'éclairement et de la température .....	21
I.5. Module photovoltaïque .....	21
I.5.1. Regroupement des cellules en série .....	22
I.5.2. Regroupement des cellules en parallèle.....	22
I.5.3. Regroupement mixte (série et parallèle).....	23
I.6. Générateur photovoltaïque GPV .....	24
I.6.1. Conception et caractéristiques du GPV .....	24
I.6.2. Protection des GPV .....	26
I.7. Différents types de systèmes photovoltaïques .....	27
I.7.1. Les systèmes autonomes.....	27
I.7.2. Les systèmes hybrides .....	27
I.7.3. Les systèmes connectés au réseau .....	28
I.8. Secteurs d'application des systèmes photovoltaïques.....	28
I.9. Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque.....	28
I.10. Conclusion .....	29

## Chapitre II : Etat de l'art des réseaux électriques

II.1. Introduction .....	30
II.2. Définition d'un réseau électrique .....	30
II.3. Les niveaux de tension des réseaux électriques.....	31
II.4. Description des réseaux électriques.....	31
II.4.1. Le réseau de transport.....	31
II.4.2. Le réseau de répartition .....	32
II.4.3. Le réseau de distribution .....	32
II.4.4. Le réseau de livraison.....	32
II.5. Topologie des réseaux électriques.....	33
II.5.1. Réseau maillé .....	33
II.5.2. Réseau bouclé.....	33
II.5.3. Réseau radial .....	33
II.5.4. Réseau arborescent.....	34
II.6. Postes électriques.....	34
II.6.1. Appareillage d'un poste électrique.....	34
II.6.1.1. Transformateurs de puissance.....	35
II.6.1.2. Transformateurs de mesure (courant et tension).....	35
II.6.1.3. Disjoncteurs .....	36
II.6.1.4. Sectionneurs .....	36
II.6.1.5. Jeux de barres.....	37
II.6.1.6. Isolateurs .....	37
II.6.1.7. Parafoudres .....	38
II.6.1.8. Supports .....	38
II.6.1.9. Lignes aériennes.....	39
II.6.1.10. Câble de garde.....	40
II.6.2. Types des postes électriques .....	40
II.6.2.1. Le poste HT/HTA .....	40
II.6.2.2. Le poste HTA/HTA (ou MT/MT).....	41
II.6.2.3. Le poste HTA/BT .....	41
II.6.2.4. Les postes de livraison HTA/ BT.....	42
II.7. Les anomalies dans un réseau électrique.....	43

II.7.1. Les courts-circuits .....	43
II.7.2. Les surtensions .....	44
II.7.3. Les surcharges .....	44
II.7.4. Les oscillations .....	44
II.7.5. Les déséquilibres .....	44
II.8. Protection des réseaux électriques .....	45
II.8.1. Les fonctions de protection .....	45
II.8.2. Les qualités principales d'un système de protection .....	45
II.8.2.1. Rapidité .....	45
II.8.2.2. Sélectivité.....	45
II.8.2.3. Sensibilité.....	46
II.8.2.4. Fiabilité .....	46
II.8.3. Moyens de protection .....	46
II.8.3.1. Protection par disjoncteur .....	46
II.8.3.2. Protection par sectionneur.....	47
II.8.3.3. Protection par interrupteur .....	47
II.8.3.4. Protection par fusible .....	47
II.8.3.5. Protection par relais .....	48
II.9. Conclusion .....	48

### **Chapitre III : Modélisation et simulation d'un système PV connecté au réseau**

III.1. Introduction .....	49
III.2. Modélisation et simulation d'un panneau PV .....	49
III.2.1. Simulation du Panneau PV à éclairement et température constante.....	51
III.2.2. Simulation du Panneau PV à éclairement et température variables.....	52
III.2.2.1. Influence de l'éclairement $G$ sur les caractéristiques $I_{pv}=f(V_{pv})$ et $P_{pv}=f(V_{pv})$ ...	53
III.2.2.2. Influence de la température $T$ sur les caractéristiques $I_{pv}=f(V_{pv})$ et $P_{pv}=f(V_{pv})$ .	54
III.3. Modélisation des convertisseurs statiques DC-DC .....	55
III.3.1. Modèle mathématique du convertisseur Boost .....	55
III.3.2. Modèle mathématique du convertisseur Buck-Boost .....	56
III.3.3. Modèle mathématique du convertisseur Buck-Boost non inverseur .....	57
III.3.4. Asservissement des convertisseurs DC-DC.....	58



III.3.5. Résultats de simulations.....	59
III.4. Commande MPPT.....	63
III.4.1. Algorithme perturbation et observation (P&O) .....	64
III.5. Modélisation de l'onduleur triphasé.....	65
III.5.1. Stratégie de commande de l'onduleur.....	66
III.5.2. Commande par MLI.....	66
III.6. Modélisation du réseau triphasé BT.....	67
III.7. Simulation globale d'un système PV raccordé au réseau .....	68
III.7.1. Résultats des simulations .....	69
III.7.2. Interprétation Résultats .....	70
III.8. Conclusion.....	73
<b>Conclusion générale</b> .....	74
<b>Références bibliographiques</b> .....	75
<b>Résumés</b> .....	78

## Liste des figures

Figure I.1 : Le rayonnement solaire .....	4
Figure I.2 : Spectre solaire AM 1,5 normalisé. ....	5
Figure I.3 : forme quatre liaisons covalentes avec un atome voisin .....	6
Figure I.4 : diagramme de bande.....	6
Figure I.5 : Dopage P-N .....	7
Figure I.6 : Dopage de type N .....	8
Figure I.7 : Dopage de type P.....	8
Figure I.8 : Génération de la paire électron-trou .....	9
Figure I.9 : La jonction PN.....	9
Figure I.10 : Schéma d'une cellule élémentaire .....	10
Figure I.11 : Schéma électrique équivalent du module photovoltaïque à deux diodes.....	11
Figure I.12 : Schéma électrique équivalent du modèle à une diode.....	12
Figure I.13 : Schéma électrique équivalent du modèle avec pertes ohmiques.....	13
Figure I.14 : cellule monocristalline .....	14
Figure I.15 : cellules poly-cristallines .....	14
Figure I.16 : Cellule en couche mince (amorphe).....	15
Figure I.17 : Caractéristique courant-tension d'une cellule photovoltaïque .....	15
Figure I.18 : Caractéristiques : courant-tension $I(V)$ et puissance-tension $P(V)$ d'une cellule PV .....	17
Figure I.19 : Influence de la résistance série sur les caractéristiques PV.....	18
Figure I.20 : Influence de la résistance shunt sur les caractéristiques PV .....	19
Figure I.21 : Dépendance des caractéristiques de la cellule PV de l'éclairement.....	19
Figure I.22 : Dépendance des caractéristiques de la cellule PV de la température.....	20
Figure I.23 : Influence simultanée de G et T sur les caractéristiques de la cellule PV .....	21
Figure I.24 : Module photovoltaïque.....	21
Figure I.25 : Caractéristique résultante d'une connexion de ns cellules en série.....	22
Figure I.26 : Caractéristique résultante d'un groupement de np cellules en parallèle .....	23
Figure I.27 : Association mixte des cellules .....	23
Figure I.28 : Caractéristique résultante d'un groupement mixte de (np+ ns) cellules identiques .....	24
Figure I.29 : Constitution d'un générateur photovoltaïque .....	25

Figure I.30 : Caractéristiques I-V pour différentes assemblage de modules PV .....	25
Figure I.31 : Caractéristiques I-V pour $N_s.N_p$ modules .....	26
Figure I.32 : Caractéristiques P-V pour $N_s.N_p$ modules.....	26
Figure I.33 : Les différents types de systèmes photovoltaïques autonomes .....	27
Figure II.1 : Structure globale du réseau électrique. ....	30
Figure II.2 : Exemple d'une partie d'un réseau de transport.....	32
Figure II.3 : Schéma de description des réseaux électriques.....	33
Figure II.4 : Différentes topologies des réseaux électriques : (a) Réseau maillé, (b) Réseau bouclé, (c) Réseau radial, (d) Réseau arborescent.....	34
Figure II.5 : Appareils électriques dans un poste (A : côté primaire, B : côté secondaire).....	35
Figure II.6 : Transformateurs de puissance .....	35
Figure II.7 : Transformateurs de mesure .....	36
Figure II.8 : Disjoncteurs .....	36
Figure II.9 : Sectionneurs .....	37
Figure II.10 : Jeux de barres.....	37
Figure II.11 : Isolateurs .....	38
Figure II.12 : Parafoudres.....	38
Figure II.13 : Quelques structures de pylônes.....	39
Figure II.14 : Conducteur d'une ligne aérienne .....	39
Figure II.15 : Câble de garde.....	40
Figure II.16 : Poste HT/HTA .....	41
Figure II.17 : Poste HTA/HTA .....	41
Figure II.18 : Poste HTA/BT.....	42
Figure II.19 : Exemple de raccordement d'un poste sur poteau.....	42
Figure II.20 : Exemple d'un poste ouvert .....	43
Figure II.21 : Fiabilité d'une protection .....	46
Figure II.22 : Fusible HTA.....	47
Figure II.23 : Relais.....	48
Figure III.1 : Schéma équivalent d'une cellule solaire photovoltaïque.....	50
Figure III.2 : Modèle de simulation du panneau PV sous MALAB/SIMULINK.....	51
Figure III.3 : Caractéristique (Courant-Tension) et (Puissance-Tension) du Panneau PV .....	52
Figure III.4 : Influence de l'éclairement G sur les caractéristiques $I_{pv}=f(V_{pv})$ et $P_{pv}=f(V_{pv})$ . 53	
Figure III.5 : Influence de la température T sur les caractéristiques $I_{pv}=f(V_{pv})$ et $P_{pv}=f(V_{pv})$ 55	

Figure III.6 : Schéma de principe de l'hacheur parallèle .....	56
Figure III.7 : Réalisation SIMULINK du modèle mathématique de convertisseur Boost .....	56
Figure III.8 : Schéma de principe du convertisseur Buck-Boost .....	57
Figure III.9 : Schéma de principe du convertisseur non inverseur Buck-Boost .....	57
Figure III.10 : Schéma SIMULINK du convertisseur Buck/Boost .....	58
Figure III.11 : Schéma de principe de l'asservissement des convertisseurs .....	59
Figure III.12 : Courbes de tensions sans asservissement .....	60
Figure III.13 : Courbes de courants sans asservissement.....	61
Figure III.14 : Courbes de tensions avec asservissement.....	62
Figure III.15 : Courbes de Courants avec asservissement.....	63
Figure III.16 : Organigramme de l'algorithme P&O .....	64
Figure III.17 : Schéma de simulation de la commande MPPT (P&O).....	65
Figure III.18 : Schéma équivalent d'un onduleur avec filtre L.....	65
Figure III.19 : Commande des interrupteurs et contrôle de courant par MLI.....	66
Figure III.20 : Schéma SIMULINK de la Commande MLI.....	67
Figure III.21 : Schéma SIMULINK de l'onduleur triphasé commandé par une MLI .....	67
Figure III.22 : Schéma de simulation du réseau BT.....	68
Figure III.23 : Schéma de simulation globale du système PV raccordé au réseau.....	68
Figure III.24 : Courbes de Tensions d'entrée et de sortie du convertisseur Buck-Boost.....	69
Figure III.25 : Tension de sortie de l'onduleur de la phase a.....	69
Figure III.26 : Courant du réseau de la phase a.....	70
Figure III.27 : Courbe de tensions d'entrée et de sortie du convertisseur Buck-Boost avec des changements d'éclairement .....	71
Figure III.28 : Tension de sortie $V_a$ de l'onduleur avec des changements d'éclairement sans régulation de la tension d'entrée de l'onduleur .....	71
Figure III.29 : Tensions d'entrée et de référence de l'onduleur avec des changements d'éclairement.....	72
Figure III.30 : Tension de sortie $V_a$ de l'onduleur avec des changements d'éclairement et la régulation de la tension d'entrée de l'onduleur.....	72

## **Liste des tableaux**

Tableau II.1 : Les niveaux de tension selon CEI.....	31
Tableau II.2 : Les niveaux de tension selon C18-510 .....	31
Tableau III.1 : Spécifications du module solaire AEG PQ10/40/01-02.....	50

## Liste des symboles

$I_{pv}$ : Courant généré par la cellule ou le panneau PV [A].

$I_{ph}$ : Photo-courant de la cellule PV [A].

$I_d, I_{d1}, I_{d2}$ : Courants circulant dans les diodes [A].

$I_{sh}, I_p$ : Le courant shunt de la cellule PV [A].

$V_{pv}$ : Tension générée par la cellule ou le panneau PV [V].

$R_s$ : Résistance série d'une cellule PV [ $\Omega$ ].

$R_{sh}, R_p$ : Résistance parallèle d'une cellule PV [ $\Omega$ ].

$G$ : Éclairement solaire dans les conditions de fonctionnement [ $W/m^2$ ].

$G_{ref}$ : Éclairement solaire sous les conditions STC [ $1000 W/m^2$ ].

$T$ : Température dans les conditions de fonctionnement [ $^{\circ}C$ ].

$T_{ref}$ : Température sous les conditions STC [ $25^{\circ}C$ ].

$I_0, I_{01}, I_{02}$ : Les courants de saturation dans les diodes.

$A$ : Facteur d'idéalité de la jonction.

$K$ : Constante de Boltzmann ( $1.381 \times 10^{-23} J/K$ ).

$q$ : La charge d'électron ( $q = -1.6 \times 10^{-19} C$ ).

$E_g$ : Energie de gap [eV].

$P_m, P_{max}$ : Puissance maximale de la cellule PV [W].

$V_{co}$ : Tension de circuit ouvert de la cellule PV [V].

$I_{cc}, I_{sc}$ : Courant de court-circuit de la cellule [A].

$P_{pv}$ : Puissance photovoltaïque de la cellule [W].

$P_I$ : Puissance maximale idéale [W].

$V_m$ : Tension de la cellule au point de puissance maximale [V].

$I_m$ : Courant de la cellule au point de puissance maximale [A].

$FF$ : Facteur de forme.

$P_o$ : Puissance incidente du rayonnement solaire [W].

$\eta_m$ : Rendement maximale de la cellule PV.

$S$ : Surface de la cellule [ $m^2$ ].

$\alpha$ : Coefficient de la température du courant de court-circuit [ $A/^\circ C$ ].

$\beta$ : Coefficient de la température de tension de circuit ouvert [ $V/^\circ C$ ].

$I_{ccref}$ : Courant de court-circuit de référence [A].

$V_{coref}$ : Tension de circuit ouvert de référence [V].

$n_s$ : Nombre de cellule en série.

$n_p$ : Nombre de cellule en parallèle.

$\omega$ : Pulsation électrique [rad/s].

$E$ : Tension d'entrée du convertisseur DC-DC [V].

$V_{dc}$ : Tension de sortie du convertisseur DC-DC [V].

$I_L$ : Courant dans la bobine du convertisseur DC-DC [A].

$u_s$ : Rapport cyclique du convertisseur DC-DC.

$C$ : Capacité de sortie du convertisseur DC-DC [F].

$L$ : Inductance du convertisseur DC-DC [H].

$V_a, V_b, V_c$ : Tensions simples du réseau [V].

$U_{ab}, U_{bc}, U_{ca}$ : Tensions entre phases du réseau [V].

## **Introduction générale**

Le besoin en énergie électrique n'a pas cessé de croître depuis plusieurs années consécutives exigeant en conséquence une consommation importante des énergies fossiles telles que le charbon, le gaz naturel, le pétrole, l'uranium...etc. Cependant, la consommation accrue de ce type de sources fossiles pour la production de l'électricité accentue l'émission de gaz à effet de serre et augmente la pollution. Alors, produire de l'électricité à base d'énergies renouvelables est une solution prometteuse pour affronter le problème du réchauffement climatique de notre planète auxquels le monde est confronté [1].

Ces énergies renouvelables offrent plusieurs avantages ; elles sont inépuisables et leurs impacts sur l'environnement sont beaucoup plus faibles que les sources d'énergie traditionnelles. La dépendance de notre société sur le charbon, le gaz naturel et le pétrole sera sensiblement réduite par le déploiement plus large des énergies renouvelables et l'utilisation plus efficace de l'énergie disponible. Ainsi, le développement durable des sources non polluantes à base d'énergie renouvelable est de plus en plus sollicité à la fois par les producteurs d'énergie et les pouvoirs publics [2].

Il se trouve que L'énergie solaire est l'une des alternatives intéressantes à l'énergie des combustibles fossiles. La conversion directe du rayonnement solaire en électricité est connue sous le nom d'effet photovoltaïque. L'énergie PV se développe très rapidement. Elle est durable, propre et sans pollution de l'environnement. Elle est de nature multidisciplinaire, impliquant la mécanique, l'électronique de puissance, théorie de contrôle, et d'autres filières [3].

La situation géographique de l'Algérie offre l'avantage de disposer d'un des gisements solaires des plus importants au monde avec un ensoleillement annuel de plus de 3 500 heures. Par ailleurs, le potentiel de l'Algérie en énergies renouvelables étant fortement dominé par le solaire, le gouvernement algérien considère cette énergie comme une opportunité et un levier de développement économique et social, notamment à travers l'implantation d'industries créatrices de richesse et d'emplois. En effet, le programme en énergies renouvelable, pour les besoins d'électricité du marché national, permettra la création de plusieurs milliers d'emplois directs et indirects. C'est pourquoi, le programme adopté par le gouvernement algérien, en 2011 et qui a été révisé en 2015, sur les énergies renouvelables, notamment les photovoltaïques, l'éoliennes et ...etc. [1]



Cependant, avec les incitations réglementaires en faveur des énergies renouvelables conjuguées, notamment l'énergie solaire à l'ouverture du marché de l'électricité ont eu un premier impact direct sur le réseau de distribution. Ceci va avoir des conséquences très importantes dans la mesure où les réseaux de distribution n'ont pas été conçus pour recevoir de la production. Avec ces dernières, le réseau de distribution devient un ensemble de circuits électriques actifs dans lesquels les flux de puissance et les tensions seront gouvernés non seulement par les charges, mais aussi par les sources. Les flux de puissance pourront fort bien, dans certaines conditions, remonter des basses tensions vers le réseau de transport [4].

Pour cela, le raccordement des systèmes PV au réseau de distribution peut avoir quelques impacts sur les réseaux électriques : impacts sur le changement des flux de puissance (bidirectionnel), sur le plan de tension, sur le plan de protection, sur la qualité de l'énergie ou sur la planification du réseau... D'un autre côté, les caractéristiques, le fonctionnement et les perturbations sur les réseaux de distribution peuvent influencer le fonctionnement des systèmes [5].

L'objectif principal de ce mémoire est de bâtir une plateforme de connaissance autour du raccordement d'une énergie renouvelable au réseau électrique. Pour cette énergie on a préféré de choisir l'énergie solaire PV qui est l'une des plus traités en ces dernières années. Pour réaliser cet objectif, ce travail est conçu d'être structuré de la manière suivante :

Un premier chapitre qui va aborder des généralités sur les systèmes photovoltaïques et toutes ses notions de base en citant le principe de conversion de l'énergie solaire en énergie électrique, les différentes technologies des cellules PV, leurs modèles mathématiques et les influences des conditions externes sur leurs performances. Ainsi ce chapitre contient les différents systèmes PV existants avec leurs domaines d'application et leurs avantages et inconvénients et l'en termine par une conclusion.

Dans le deuxième chapitre on va exposer l'état de l'art des réseaux électriques avec une description générale en citant ses différents composants notamment les postes électriques, ses différents défauts et leurs protections, pour enfin mettre une conclusion.

Le dernier chapitre sera consacré pour une simulation globale d'un système PV connecté au réseau sous le logiciel MATLAB/SIMULINK. Dans ce chapitre nous aurons la possibilité de modéliser un panneau PV sous MATLAB/SIMULINK et ses différentes caractéristiques. Nous accéderons aussi à la modélisation des convertisseurs DC-DC et la commande MPPT et la modélisation des convertisseurs DC-AC et leur commande MLI pour pouvoir finalement les rassembler en un système globale et ainsi de conclure sur le travail de ce dernier chapitre.

*Chapitre I : Généralités  
sur les systèmes  
photovoltaïques*

## **I.1. Introduction**

L'énergie solaire photovoltaïque (PV) provient de la conversion directe de l'énergie provenant de photons, comprise dans le rayonnement solaire, en énergie électrique, par l'intermédiaire de capteurs fabriqués avec des matériaux sensibles aux longueurs d'ondes du visible (nommés cellules PV) [6].

Ce phénomène fut découvert au 19<sup>ème</sup> siècle par le physicien Alexandre Edmond Becquerel met en développement La première cellule photovoltaïque au début de 1954 pour l'alimentation en énergie des satellites. Depuis 1958, les cellules photovoltaïques alimentent seulement le système énergétique des satellites jusqu'à ses premières applications terrestres au début des années 70 [7].

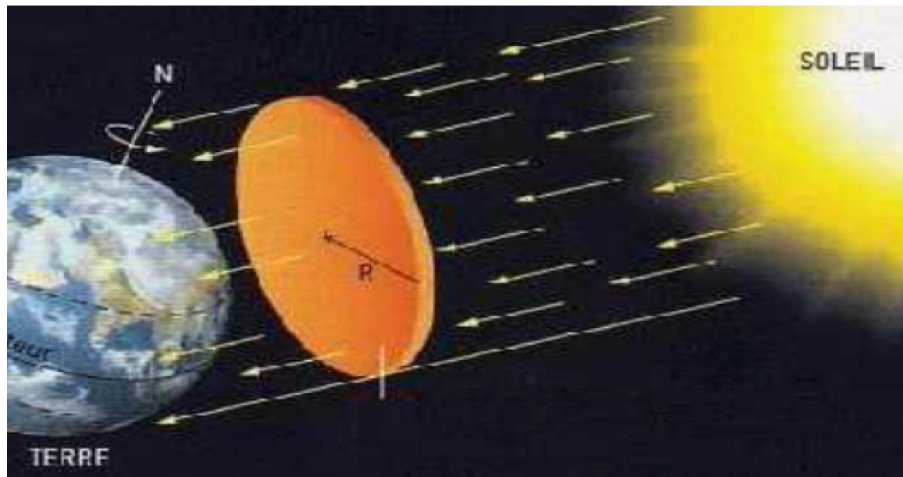
Cependant, au cours des années 80, la technologie photovoltaïque terrestre a progressé régulièrement par la mise en place de plusieurs centrales de quelques mégawatts, et même est devenue familière aux consommateurs à travers de nombreux produits de faible puissance y faisant appel : montres, calculatrices, balises radio et météorologiques, pompes et réfrigérateurs solaires [8].

Cette énergie captée à l'aide de panneaux photovoltaïques représente une ressource énergétique viable pour la production d'électricité car cette dernière est une source renouvelable, d'une part elle est propre, illimitée et d'autre part elle possède un niveau de risque très réduit. Son potentiel est très important à l'échelle du besoin de l'activité humaine, il est aussi très largement réparti sur l'ensemble du globe ce qui lui attribue un intérêt partagé par tous. Avec la diminution du prix des modules photovoltaïques (PV) et l'augmentation du prix des énergies fossiles, l'exploitation de cette ressource avec des systèmes de génération PV devient viable et rentable [9].

Ce chapitre sera consacré aux principes généraux de la conversion photovoltaïque, les cellules photovoltaïques, les modules et les générateurs photovoltaïques. Nous traiterons l'ensemble des caractéristiques d'une cellule PV avec notamment l'influence des conditions météorologiques, le principe de fonctionnement, les différentes technologies récentes des cellules, sans proscrire ses modèles mathématiques, ainsi il est primordial de citer tout les systèmes PV existants afin de clôturer ce chapitre par les secteurs d'application et les différents avantages et inconvénients de ces systèmes PV.

## I.2. Irradiation solaire

Le soleil décharge continuellement une énorme quantité d'énergie radiante dans le Système solaire, la terre intercepte une toute petite partie de l'énergie solaire rayonnée dans l'espace. Une moyenne de 1367 watts atteint chaque mètre carré du bord externe de l'atmosphère terrestre (pour une distance moyenne Terre-soleil de 150 Millions de km), c'est ce que l'on appelle la constante solaire égale à  $1367 \text{ W/m}^2$  [10].



**Figure I.1:** Le rayonnement solaire [10]

Le Soleil émet un rayonnement de type électromagnétique. La lumière blanche nous parvient en très peu de temps (elle met en moyenne environ 8 minutes et 19 secondes à nous parvenir) car il se déplace à la vitesse de la lumière, soit  $299\,792\,458 \text{ m/s}$ .

Ce rayonnement constitue un spectre continu allant des ultra-violet à l'infrarouge en passant par le visible où il émet avec le maximum d'intensité. Cependant, en traversant la chromosphère du Soleil et l'atmosphère de la Terre, les atomes qui les composent absorbent certains photons. Le spectre alors observable depuis la surface de la Terre est donc un spectre de raies d'absorptions. Ainsi, à la surface de la Terre le rayonnement solaire comprend : 5% d'ultra-violet, 40% de lumière visible et 55% d'infrarouge, les IR étant porteurs de l'essentiel de l'énergie thermique [11].

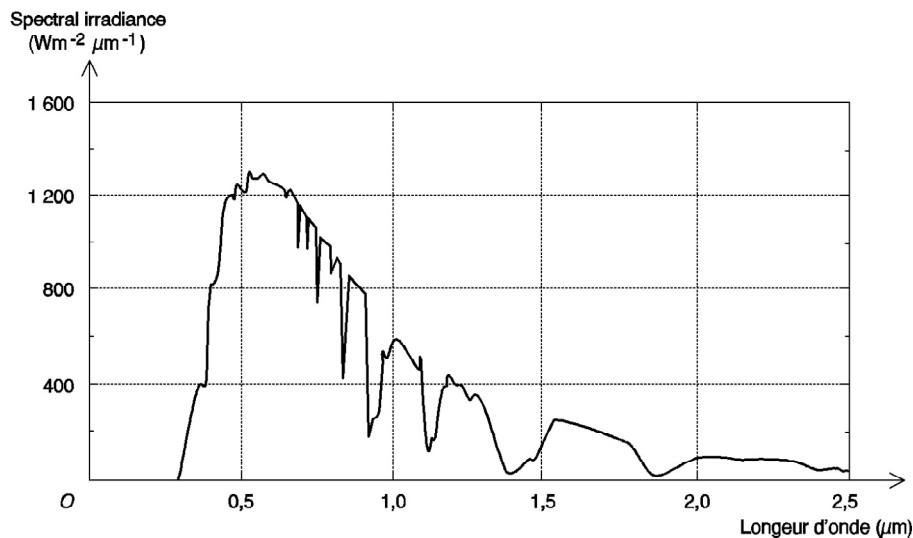


Figure I.2 : Spectre solaire AM 1,5 normalisé.

### I.2.1. Différents types de rayonnement solaire

On trouve quatre types de rayonnement [12] :

#### I.2.1.1. Rayonnement direct

Rayonnement reçu directement du soleil. Il peut être mesuré par un pyrhéliomètre.

#### I.2.1.2. Rayonnement diffus

Rayonnement provenant de toute la voûte céleste. Ce rayonnement est dû à l'absorption et à la diffusion d'une partie du rayonnement solaire par l'atmosphère et à sa réflexion par les nuages. Il peut être mesuré par un pyranomètre avec écran masquant le soleil.

#### I.2.1.3. Rayonnement solaire réfléchi

Ou l'albédo du sol : le rayonnement qui est réfléchi par le sol ou par des objets se trouvant à sa surface. Cet albédo peut être important lorsque le sol est particulièrement réfléchissant (eau, neige).

#### I.2.1.4. Rayonnement global

La somme de tous les rayonnements reçus, y compris le rayonnement réfléchi par le sol et les objets qui se trouvent à sa surface. Il est mesuré par un pyranomètre ou un solarimètre sans écran. À noter que certains capteurs solaires concentrent le rayonnement solaire afin d'augmenter le rendement du capteur par rapport à une surface donnée. Ces capteurs à concentration ne peuvent utiliser que le rayonnement direct provenant du soleil [12].

### I.3. Conversion photovoltaïque

#### I.3.1. Généralités sur les semi-conducteurs

Les matériaux semi-conducteurs sont des corps dont la résistivité est intermédiaire entre celle des conducteurs et celle des isolants. Les quatre électrons de valence du silicium permettent de former quatre liaisons covalentes avec un atome voisin. Dans ce cas, tous les électrons sont utilisés et aucun n'est disponible pour créer un courant électrique [13] [14].

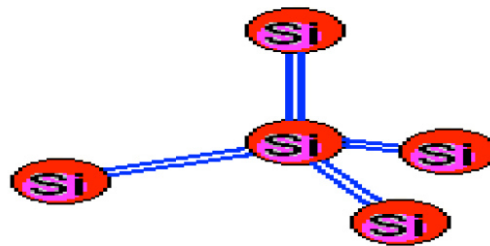


Figure I.3 : forme quatre liaisons covalentes avec un atome voisin [13]

##### I.3.1.1. Les semi-conducteurs intrinsèques

Les électrons situés sur la couche la plus éloignée du noyau, qui participent aux liaisons covalentes peuvent, sous l'effet de l'agitation thermique, devenir porteur de charge.

Le diagramme énergétique est constitué de deux bandes (conduction et valence) séparé par une bande interdite. Pour franchir cette bande l'électron doit acquérir de l'énergie (thermique, photon, ...) Mais le nombre d'électrons libres dans un semi-conducteur intrinsèque reste très faible. Ici le nombre de trou et d'électron est égal.

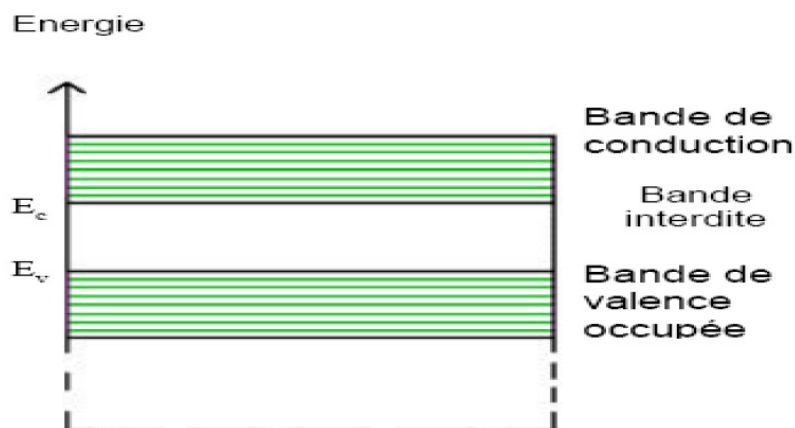


Figure I.4 : diagramme de bande [13]

### I.3.1.2. Les semi-conducteurs extrinsèques

Pour les semi-conducteurs extrinsèques, la densité de dopant est toujours très supérieure à la densité de porteurs intrinsèques. Dans le cas d'un type P, la densité de trous est donc proche de celle du dopant accepteur  $N_A$ . La relation étant toujours vérifiée, nous obtenons pour les densités de porteurs.

### I.3.2. Dopage et jonction

Dans un semi-conducteur pur le nombre de porteurs étant faible à température ordinaire, la conductivité est médiocre. Le silicium a été choisi pour réaliser les cellules solaires photovoltaïques pour ses propriétés électroniques, il est caractérisé par la présence de quatre électrons sur sa couche périphérique. Dans le silicium solide, chaque atome 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 ayant 5 électrons périphériques (phosphore par exemple), un électron ne participe pas aux liaisons, il peut donc se déplacer dans le réseau. Il y a conduction par un électron, et le semi conducteur est dit dopé N. Si au contraire un atome de silicium est remplacé par un atome ayant 3 électrons périphériques (bore par exemple), il manque un électron pour réaliser toutes les liaisons, et un électron peut venir combler ce manque. On dit alors qu'il y a conduction par un trou et le semi- conducteur est dit dopé de type P.

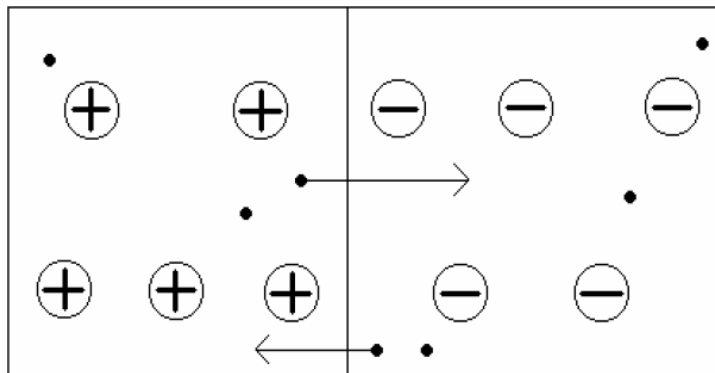


Figure I.5 : Dopage P-N [13]

#### I.3.2.1. Dopage de type N

On remplace un atome de silicium par un atome pentavalent. Quatre d'entre eux assurent les liaisons avec les atomes voisins de silicium et le cinquième resté disponible va être excité vers la bande de conduction très facilement par l'agitation thermique. D'où le

nombre d'électron libre qui va fortement augmenter : dans ce cas le nombre de trou est très inférieur au nombre d'électron libre .On obtient ainsi un cristal dopé N (négatif).

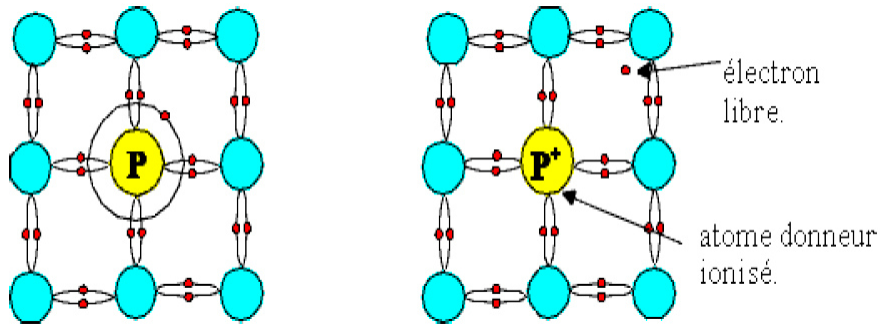


Figure I.6 : Dopage de type N [13]

### I.3.2.2. Dopage de type P

De la même façon on introduit des atomes trivalents, ses trois électrons vont assurer les liaisons covalentes avec trois atomes voisins mais laisser un trou au quatrième. Ce trou se déplace de proche en proche dans le cristal pour créer un courant. Ici le nombre de trous est très supérieur au nombre d'électrons libres du cristal intrinsèque, on obtient donc un cristal dopé P (positif), les impuretés utilisées sont souvent du Bore [13] [14].

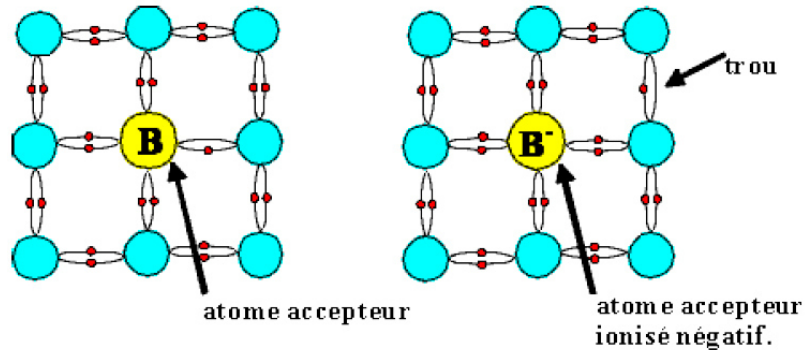


Figure I.7 : Dopage de type P [13]

### I.3.2.3. Formation de la jonction PN

Le silicium, comme tous les semi-conducteurs, a une bande de valence pleine et une bande de conduction vide. Mais grâce à un apport énergétique suffisant, il est possible de faire passer des électrons de la bande de valence (BV) à la bande de conduction (BC), d'où la génération d'électrons libres (figure I.8).



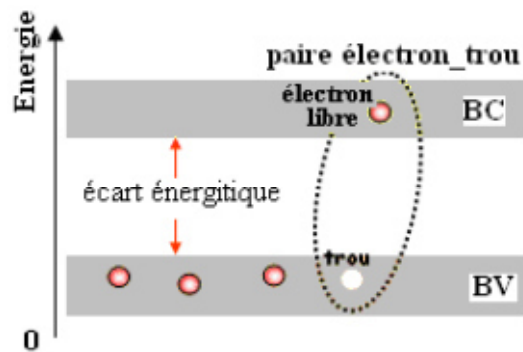


Figure I.8 : Génération de la paire électron-trou [15]

La présence d'électrons libres dans la bande de conduction d'un matériau n'est pas suffisante pour générer un courant : il est nécessaire de créer une différence de potentiel aux bornes du photo-générateur afin d'entraîner les charges positives d'un côté et les charges négatives de l'autre. Cette opération est possible par dopage du Silicium. Une jonction PN est créée par l'assemblage de deux barreaux de Silicium de type N et P. Le composant ainsi créé est appelé diode [15].

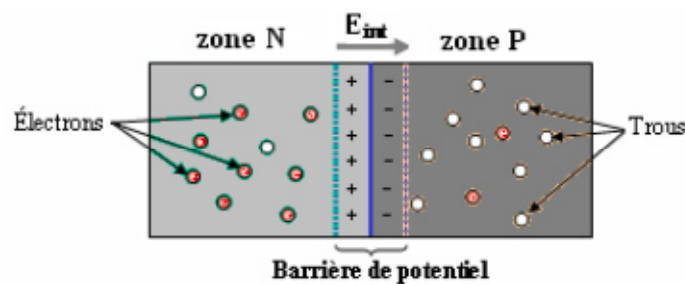


Figure I.9 : La jonction PN [15]

### I.3.3. Caractéristique I-V du semi-conducteur

Les électrons mobiles dans le semi-conducteur peuvent provenir soit de la région N (porteurs majoritaires), soit de la région P (porteurs minoritaires). On peut mettre en évidence le comportement de ces deux types de porteurs en appliquant une tension continue variable aux bornes de la diode (à l'obscurité) et en fermant le circuit sur une résistance [8].

Si cette tension supplémentaire est positive, la différence de potentiel entre les zones N et P est diminuée et les porteurs de charge majoritaires pourront plus facilement traverser la zone de charge d'espace donnant donc lieu à un courant  $I_d$  dirigé de la région P à la région N, intense car dû aux majoritaires. Ce courant  $I_d$  augmente avec la température de la jonction et avec la tension appliquée  $V$ .

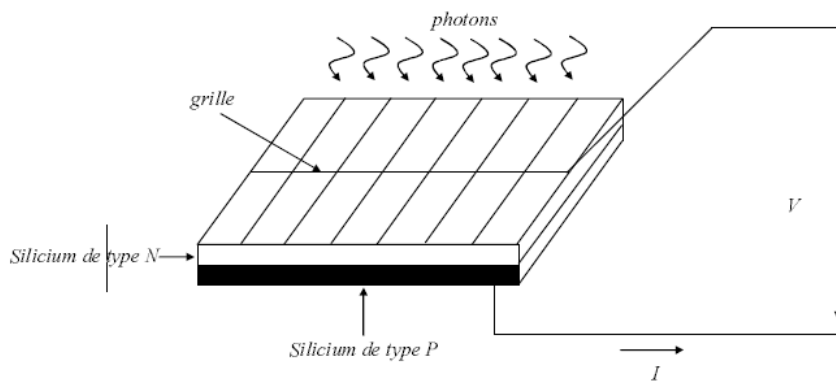
Si cette tension supplémentaire  $V$  est négative, la différence de potentiel entre les zones N et P est augmentée et seuls les porteurs de charge minoritaires pourront traverser la

zone de charge d'espace donnant lieu à un courant  $I_0$  dirigé de la région N à la région P, faible car dû aux minoritaires. Ce courant  $I_0$  augmente avec la température de la jonction [8].

#### I.4. cellule photovoltaïque

##### I.4.1. Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

Une cellule photovoltaïque est assimilable à une diode photosensible, son fonctionnement est basé sur les propriétés des matériaux semi-conducteurs. La cellule photovoltaïque permet la conversion directe de l'énergie lumineuse en énergie électrique. Son principe de fonctionnement repose sur l'effet photovoltaïque. Une cellule est constituée de deux couches minces d'un semi-conducteur. Ces deux couches sont dopées différemment. Pour la couche N c'est un apport d'électrons périphériques et pour la couche P c'est un déficit d'électrons. Les deux couches présentent ainsi une différence de potentiel. L'énergie des photons lumineux captés par les électrons périphériques (couche N), leur permet de franchir la barrière de potentiel et d'engendrer un courant électrique continu. Pour effectuer la collecte de ce courant, des électrodes sont déposées par sérigraphie sur les deux couches de semi-conducteur (figure I.10). L'électrode supérieure est une grille permettant le passage des rayons lumineux. Une couche anti reflet est ensuite déposée sur cette électrode afin d'accroître la quantité de lumière absorbée [16].



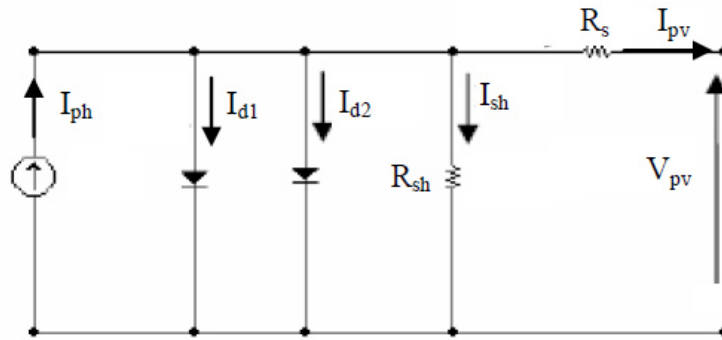
**Figure I.10** : Schéma d'une cellule élémentaire [16]

## I.4.2. Modèle d'une cellule photovoltaïque

De nombreux modèles mathématiques de cellules photovoltaïques, ont été développés, dont le but est l'obtention de la caractéristique courant -tension pour l'analyse et l'évaluation des performances des systèmes photovoltaïques. Ces modèles diffèrent entre eux par le nombre de paramètres pris en compte [17].

### I.4.2.1. Modèle à deux diodes

La cellule photovoltaïque est représentée par son schéma électrique équivalent (Figure I.11) qui se compose d'une source de courant pour modéliser la conversion du flux lumineux en énergie électrique avec deux diodes pour représenter les phénomènes de polarisation de la jonction PN. Ces diodes symbolisent la recombinaison des porteurs minoritaires, d'une part en surface du matériau et d'autre part dans le volume du matériau. Une résistance shunt  $R_{sh}$  est une conséquence de l'état de la longueur de la périphérie de la surface de la cellule, une résistance série  $R_s$  représentant les diverses résistances de contact et de connexion [17].



**Figure I.11** : Schéma électrique équivalent du module photovoltaïque à deux diodes [17]

Le courant généré par la cellule est donné par la loi de Kirchhoff [17]:

$$I_{pv} = I_{ph} - (I_{d1} + I_{d2}) - I_{sh} \quad (I.1)$$

Avec:

$$I_{ph} = P_1 G \cdot [1 + P_2 (G - G_{ref}) + P_3 (T - T_{ref})] \quad (I.2)$$

$$I_{d1} = I_{01} \left[ \exp\left(\frac{q(V_{pv} + I_{pv} R_s)}{A.K.T}\right) - 1 \right] \quad (I.3)$$

$$I_{d2} = I_{02} \left[ \exp\left(\frac{q(V_{pv} + I_{pv} R_s)}{2.A.K.T}\right) - 1 \right] \quad (I.4)$$

Où :  $I_{01}$ ,  $I_{02}$  : les courants de saturation des diodes, ils sont donnés par ces deux équations [17]:

$$I_{01} = P_4 \cdot T^3 \cdot \exp\left(-\frac{E_g}{K \cdot T}\right) \quad (I.5)$$

$$I_{02} = P_5 \cdot T^3 \cdot \exp\left(-\frac{E_g}{2K \cdot T}\right) \quad (I.6)$$

$$I_{sh} = \frac{V_{pv} + R_s \cdot I_{pv}}{R_{sh}} \quad (I.7)$$

Avec :

$G_{ref}, T_{ref}$  : l'éclairement et la température de jonction sous conditions STC.

$G, T$  : l'éclairement et la température de jonction dans les conditions de fonctionnement.

$P_1, P_2, P_3, P_4$  et  $P_5$  : paramètres constants.

$A$  : Facteur d'idéalité de la jonction.

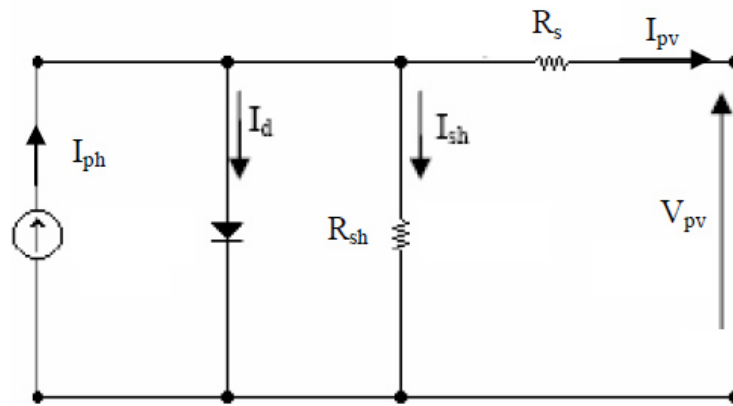
$K$  : Constante de Boltzmann ( $K = 1.381 \times 10^{-23}$  J/K).

$q$  : La charge d'électron ( $q = -1.6 \times 10^{-19}$  C).

$E_g$  : Energie de gap, pour le silicium cristalline 1.12 ev.

#### I.4.2.2. Modèle à une diode

La cellule photovoltaïque est caractérisée par son schéma électrique équivalent (Figure I.12), dans ce modèle on a combiné les deux diodes d1 et d2 dans une diode équivalente d.



**Figure I.12** : Schéma électrique équivalent du modèle à une diode [17]

Le courant généré par le module est donné par la loi de Kirchhoff [17]:

$$I_{pv} = I_{ph} - I_d - I_{sh} \quad (I.8)$$

Avec :

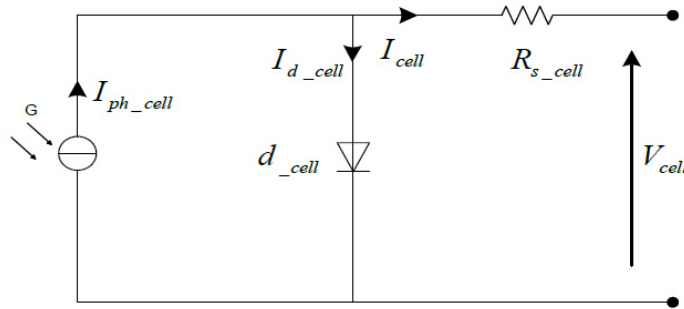
$$I_d = I_0 \left[ \exp \left( \frac{q(V_{pv} + I_{pv} R_s)}{A.K.T} \right) - 1 \right] \quad (I.9)$$

$$I_0 = P_4 \cdot T^3 \cdot \exp \left( -\frac{E_g}{K.T} \right) \quad (I.10)$$

### I.4.2.3. Modèle avec pertes ohmiques

#### I.4.2.3.1. Modèle en courant

Si l'on suppose que la résistance parallèle est infinie on obtient le modèle avec pertes ohmiques de la figure. Ce modèle est généralement le plus utilisé car il est le plus simplifié dans la conception mais en cas où une précision très élevée est exigée le modèle à deux diodes en parallèle est souvent utilisé [8].



**Figure I.13** : Schéma électrique équivalent du modèle avec pertes ohmiques [8]

Dans ce cas le courant de la cellule est donné par l'équation suivante :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_d \quad (I.11)$$

#### I.4.2.3.2. Modèle en tension

On peut déduire le modèle en tension de la cellule représenté dans la figure I.13 à partir de l'équation, ce qui en résulte [8]:

$$V_{pv} = \left( A.K.\frac{T}{q} \right) \cdot \ln \left( \frac{I_{ph} - I_{pv} + I_0}{I_0} \right) - R_s \cdot I_{pv} \quad (I.12)$$

### I.4.3. Les différentes technologies des cellules PV

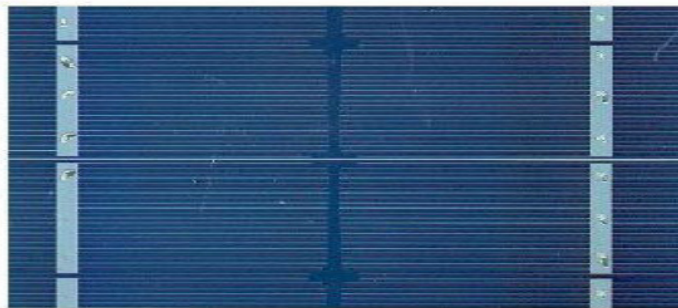
Les technologies des cellules solaires se sont développées de manière très diverses. On distingue les deux catégories principales qui se disputent le marché (les cellules cristallines et les cellules à couches minces). Ils ont des caractéristiques, des durées de vie, et des sensibilités différentes [18].

### **I.4.3.1. Cellules cristallines**

Les cellules en silicium cristalline (mono et multi) représente la majorité de la production mondiale d'énergie solaire. On reconnaît deux types des cellules :

#### **I.4.3.1.1. Les cellules monocristallines**

Sont constitué d'un seul cristal offrant à la cellule un arrangement parfait des atomes. Le rendement de la cellule monocristalline est le plus élevé, il est compris entre 15 et 20%.



**Figure I.14** : cellule monocristalline [18]

#### **I.4.3.1.2. Les cellules poly-cristallines**

Sont constitués de multiples petits cristaux de tailles. Son rendement est légèrement inférieur à la cellule monocristalline (environ 15 %) selon les fabricants.



**Figure I.15** : cellules poly-cristallines [18]

### **I.4.3.2. Cellules à couches minces (amorphes)**

Sont déposés en couche mince sur une plaque de verre ou un autre support souple. Les cellules amorphes sont utilisées partout où une solution économique est recherchée ou lorsque très peu d'électricité est nécessaire, par exemple pour l'alimentation des montres, des calculatrices, ou des luminaires de secours. Elles se caractérisent par un fort coefficient

d'absorption, ce qui autorise de très faibles épaisseurs, de l'ordre du micron. Par contre son rendement de conversion est faible (de 7 à 10 %) [18].

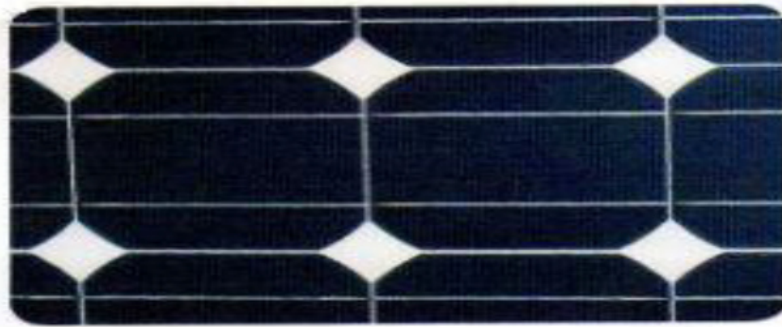


Figure I.16 : Cellule en couche mince (amorphe) [18]

#### I.4.4. Caractéristiques d'une cellule photovoltaïque

La caractéristique principale de la cellule solaire est la caractéristique I-V qui montre comment une cellule photovoltaïque répondra à toutes les charges possibles sous un ensemble particulier des conditions d'ensoleillement et de température comme le montre la figure I.17 [8].

Il y a trois points importants dans cette courbe:

- Le point de fonctionnement optimal auquel la cellule fournit sa puissance maximale  $P_m$ .
- Le point où la tension est égale à zéro et le courant est en maximum (courant de circuit-court  $I_{cc}$ ).
- Le point où le courant est égal à zéro et la tension est en maximum (tension de circuit ouvert  $V_{co}$ ).

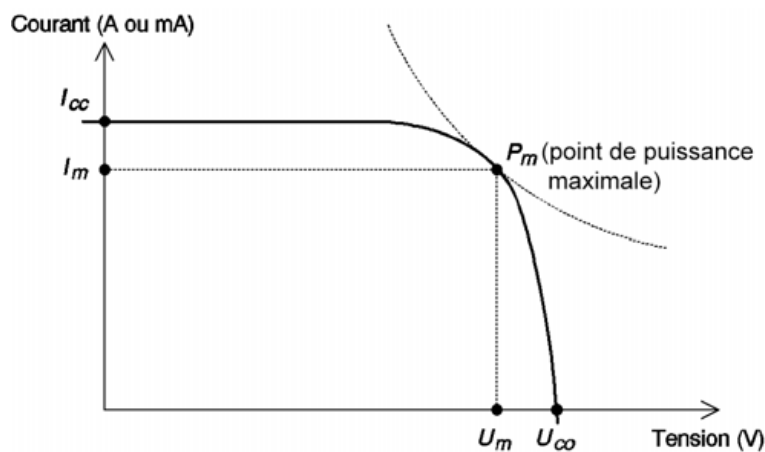


Figure I.17 : Caractéristique courant-tension d'une cellule photovoltaïque

#### I.4.4.1. Courant de court-circuit $I_{cc}$

Si les deux électrodes sont en court-circuit à travers un ampèremètre, les électrons drainés par un champ interne de la jonction vont donner naissance à un courant de court-circuit  $I_{cc}$  qui correspond au photo-courant  $I_{ph}$  généré par le rayonnement ( $I_{cc}=I_{ph}$ ).

#### I.4.4.2. Tension en circuit ouvert $V_{co}$

Si la cellule est laissée en circuit ouvert, les porteurs générés par le rayonnement et séparés par le champ interne vont s'accumuler de part et d'autre de la jonction, induisant une auto-polarisation de la jonction dans le sens passant. Cette auto-polarisation induit un courant de diode dans le sens direct égal et opposé au photo-courant. La tension alors mesurée aux bornes des électrodes est appelée tension de circuit ouvert  $V_{co}$ . C'est la tension qu'il faudrait appliquer à la diode dans le sens passant pour générer un courant égal au photo-courant, elle est donnée par la relation [19] [20]:

$$V_{co} = \left(\frac{KT}{q}\right) \cdot \ln \left[ \left(\frac{I_{cc}}{I_0}\right) + 1 \right] \quad (I.13)$$

#### I.4.4.3. Caractéristique Puissance-Tension

Dans des conditions ambiantes de fonctionnement fixes (éclairage, température, vitesse de circulation de l'air ambiant, etc..), la puissance électrique  $P_{pv}$  disponible aux bornes d'une cellule photovoltaïque (figure I.18) est égale au produit du courant continu fourni  $I_{pv}$  par une tension continue donnée  $V_{pv}$  [19] [20]:

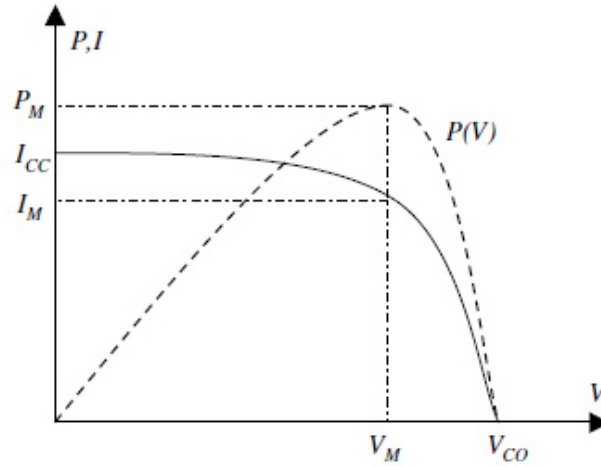
$$P_{pv} = V_{pv} \cdot I_{pv} \quad (I.14)$$

$P_{pv}$  : Puissance mesurée aux bornes de la cellule PV.

$V_{pv}$  : Tension mesurée aux bornes de la cellule PV.

$I_{pv}$  : Intensité mesurée aux bornes de la cellule PV.





**Figure I.18** : Caractéristiques : courant-tension I(V) et puissance-tension P(V) d'une cellule PV

Pour une cellule solaire idéale, la puissance maximum idéale  $P_I$  correspondrait donc à la tension de circuit ouvert  $V_{co}$  multipliée par le courant de court-circuit  $I_{cc}$  [19] [20]:

$$P_I = P_{max\ idéal} = V_{co} \cdot I_{cc} \quad (I.15)$$

En pratique, la courbe caractéristique d'une cellule PV est plus "arrondie", et la tension au point de puissance maximum  $V(P_{max})$  est inférieure à la tension de circuit ouvert  $V_{co}$ , de même que le courant fourni  $I(P_{max})$  est inférieur, pour cette même tension, au courant de court-circuit  $I_{cc}$  [19] [20].

$$P_{max} = V_m \cdot I_m \quad (I.16)$$

#### I.4.4.4. Facteur de forme

Le facteur de forme représente l'efficacité de la cellule ou encore, il peut nous renseigner sur le vieillissement de la cellule. C'est le rapport entre la puissance maximale débitée  $P_{max}$  et la puissance idéale  $P_I$ . Le facteur de forme FF (en angl. File Factor) correspond au rapport [19] [20] :

$$FF = \frac{P_m}{P_I} = \frac{V_m \cdot I_m}{V_{co} \cdot I_{cc}} \quad (I.17)$$

#### I.4.4.5. Rendement

Le rendement de conversion d'énergie est le rapport de la puissance générée et de la puissance du rayonnement solaire incident  $P_o$  qui est normalisée à  $1000 \text{ W/m}^2$  pour un spectre

de AM<sub>1.5</sub> et pour une température de 25°C. On appelle rendement maximal, le rapport entre la puissance maximale et la puissance P<sub>o</sub> [21].

$$\eta_m = \frac{V_m \cdot I_m}{P_o} = FF \frac{V_{co} \cdot I_{cc}}{P_o} = \frac{V_m \cdot I_m}{G \cdot S} \quad (I.18)$$

Avec :

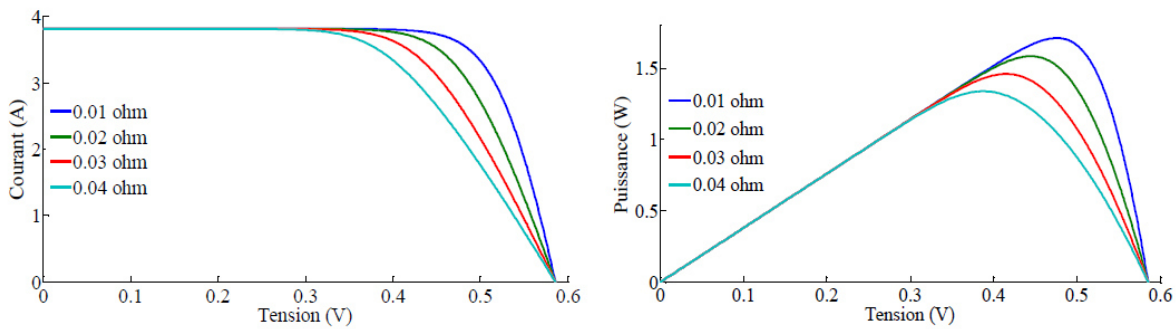
P<sub>o</sub> : Puissance incidente du rayonnement solaire.

S : Surface de la cellule PV.

### I.4.5. Influence des résistances série et parallèle, éclairement et température sur la cellule PV

#### I.4.5.1. Influence des résistances

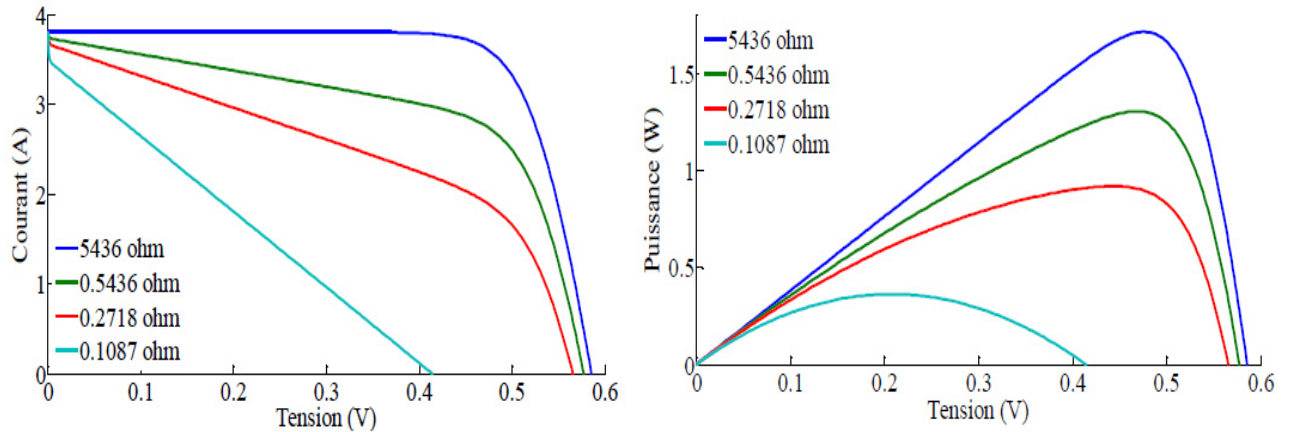
A partir du circuit équivalent d'une cellule réelle, on constate que d'autant la résistance série est faible et la résistance shunt est grande, on collecte un maximum de courant ce qui implique un maximum de puissance. La figure I.19 (a, b) illustre respectivement les caractéristiques I-V et P-V pour différentes résistances série. La figure I.20 (a, b) montre respectivement les caractéristiques I-V et P-V pour différentes résistances shunt. En augmentant R<sub>s</sub> ou en diminuant R<sub>p</sub>, on s'éloigne du rectangle V<sub>co</sub>.I<sub>cc</sub> idéal de la caractéristique I/V qui correspond au FF=1 et de même la puissance diminue [3].



(a) Caractéristiques courant-tension

(b) Caractéristiques puissance-tension

**Figure I.19** : Influence de la résistance série sur les caractéristiques PV [3]



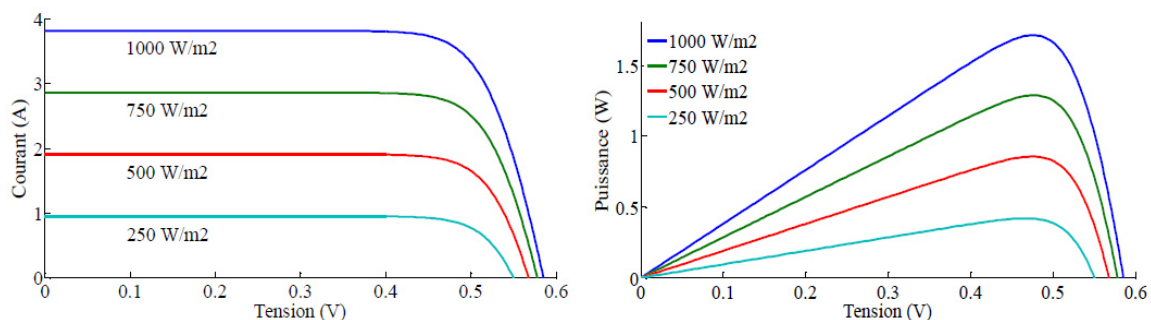
a) Caractéristiques courant-tension

b) Caractéristiques puissance-tension

**Figure I.20** : Influence de la résistance shunt sur les caractéristiques PV [3]

#### I.4.5.2. Influence de l'éclairement

L'éclairement est le paramètre le plus influant sur la cellule PV. En effet, le photo-courant est proportionnel à l'éclairement, par contre le courant à travers la diode qui n'est que le photo-courant à l'obscurité, reste inchangé aux variations de ce dernier. La figure I.21 (a, b) présente respectivement les caractéristiques I-V et P-V de la cellule simulée sous une température de référence de 25°C et sous divers niveaux d'éclairements. On remarque que la tension du circuit ouvert  $V_{co}$  reste très peu changée en faisant varier l'éclairement  $G$ , par contre le courant du court-circuit  $I_{cc}$  varie beaucoup en augmentant l'éclairement ce qui engendre une augmentation de la puissance photovoltaïque [3].



a) Caractéristiques courant-tension

b) Caractéristiques puissance-tension

**Figure I.21** : Dépendance des caractéristiques de la cellule PV de l'éclairement [3]

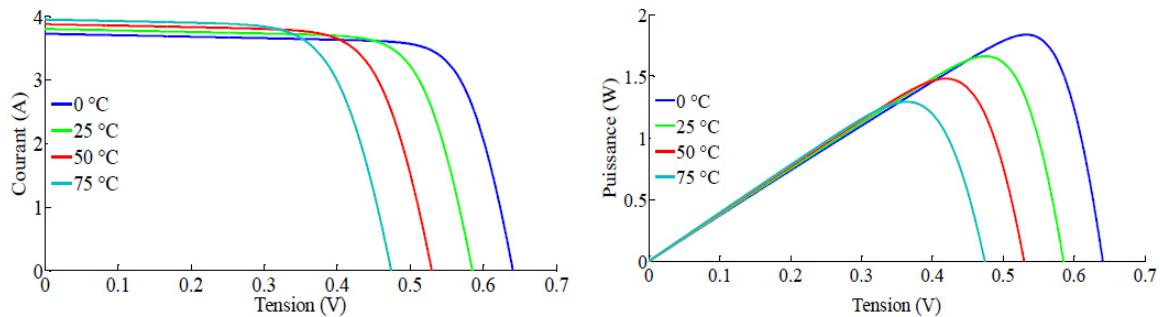
La dépendance du courant  $I_{cc}$  de l'éclairement  $G$  peut être formulée par [3] :

$$I_{cc} = I_{ccref} \cdot \frac{G}{G_{ref}} + \alpha \left( \frac{G}{G_{ref}} \right) (T - T_{ref}) \quad (I.19)$$

Avec  $I_{ccref}$  est le courant de court-circuit dans les conditions STC ( $G_{ref} = 1000 \text{ W/m}^2$ ,  $T_{ref} = 25^\circ\text{C}$ ), et  $\alpha$  est un coefficient de température du courant de court-circuit (généralement donné par le fabricant).

### I.4.5.3. Influence de la température

La température est le second paramètre le plus important dans le comportement de la cellule. La figure I.22 (a, b) illustre respectivement les caractéristiques I-V et P-V de la cellule simulée sous un éclairement de  $1000 \text{ W/m}^2$  et différentes températures. On remarque que le courant du court-circuit  $I_{cc}$  reste très peu sensible à la variation de la température mais la tension du circuit ouvert  $V_{co}$  diminue en augmentant la température ce qui cause une diminution de la puissance à la sortie de la cellule.



a) Caractéristiques courant-tension

b) Caractéristiques puissance-tension

**Figure I.22** : Dépendance des caractéristiques de la cellule PV de la température [3]

La tension du circuit ouvert en fonction de la température est donnée par [3]:

$$V_{co} = V_{coref} + \beta(T - T_{ref}) - (I_{cc} - I_{ccref})R_s \quad (I.20)$$

Avec  $V_{coref}$  est la tension du circuit ouvert dans les conditions STC et  $\beta$  est un coefficient obtenu empiriquement ( $\text{V}/^\circ\text{C}$ ).

#### I.4.5.4. Influence simultanée de l'éclairement et de la température

Le changement d'un paramètre atmosphérique, éclairement ou température, en fixant l'autre est peu probable dans la réalité. Généralement, le changement de ces deux paramètres qui se fait aléatoirement est dans la plupart des temps simultané et dans la même direction. La figure I.23 montre l'impact de variation parallèle des conditions climatiques sur la cellule PV.

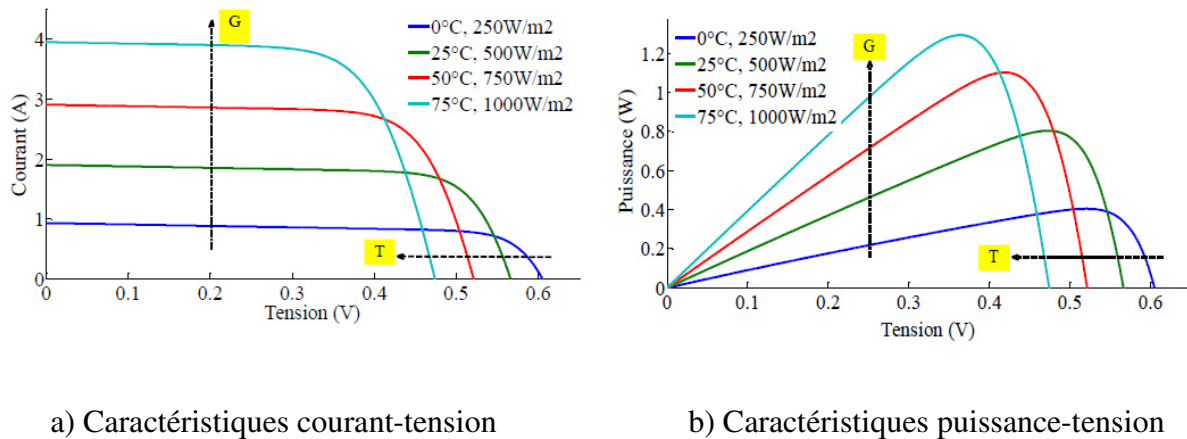


Figure I.23 : Influence simultanée de G et T sur les caractéristiques de la cellule PV [3]

#### I.5. Module photovoltaïque

Un module représenté par la figure I.24 est constitué d'un ensemble de cellules photovoltaïques élémentaires montées en série et/ou en parallèle afin d'obtenir des caractéristiques électriques désirées tels que la puissance, le courant de court-circuit ou la tension en circuit ouvert [8].

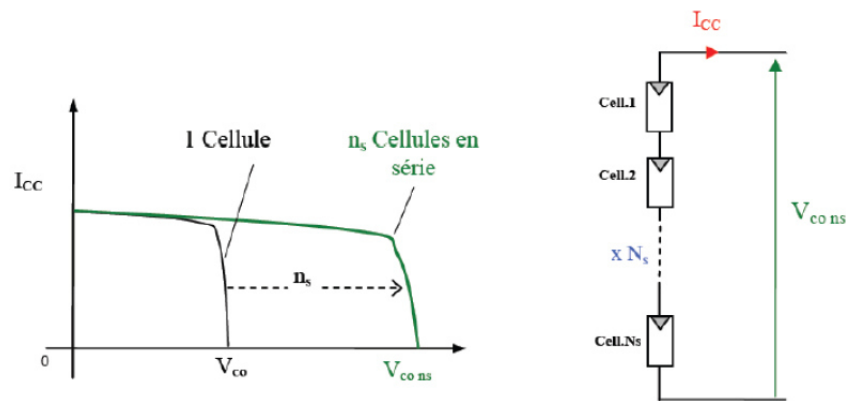


Figure I.24 : Module photovoltaïque [8]

### I.5.1. Regroupement des cellules en série

Une cellule PV, c'est l'unité de base d'un système photovoltaïque ne produit qu'une très faible puissance électrique, typiquement de **2.5 W** sous une tension de moins d'un volt. Pour produire plus de puissance, les cellules sont assemblées en série ou/et en parallèle avec grand nombre pour former un générateur ou un panneau. L'association en série des cellules délivre une tension égale à la somme des tensions individuelles et un courant égal à celui d'une seule cellule [18].

La caractéristique d'un groupement de  $n_s$  cellules PV identiques est présentée sur la figure (I.25).

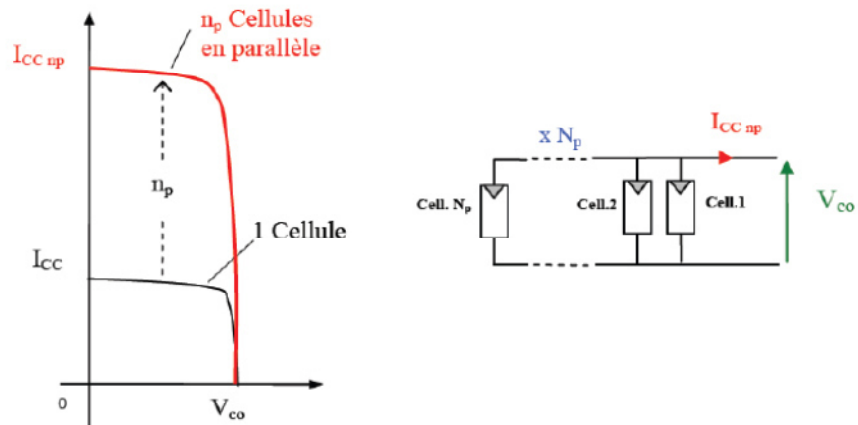


**Figure I.25** : Caractéristique résultante d'une connexion de  $n_s$  cellules en série [1]

Dans un groupement de  $n_s$  cellules en série, la caractéristique résultante du groupement est obtenue par addition des tensions élémentaires de chaque cellule, alors que le courant traversant les cellules reste le même, avec  $I_{cc}=I_{ccns}$  et  $V_{cons}=n_s \times V_{co}$  [1].

### I.5.2. Regroupement des cellules en parallèle

Dans un groupement de cellules connectées en parallèle, les cellules sont soumises à la même tension et un courant égal à la somme des courants individuels [18]. La caractéristique d'un groupement de  $n_p$  cellules PV identiques est présentée sur la figure I.26.

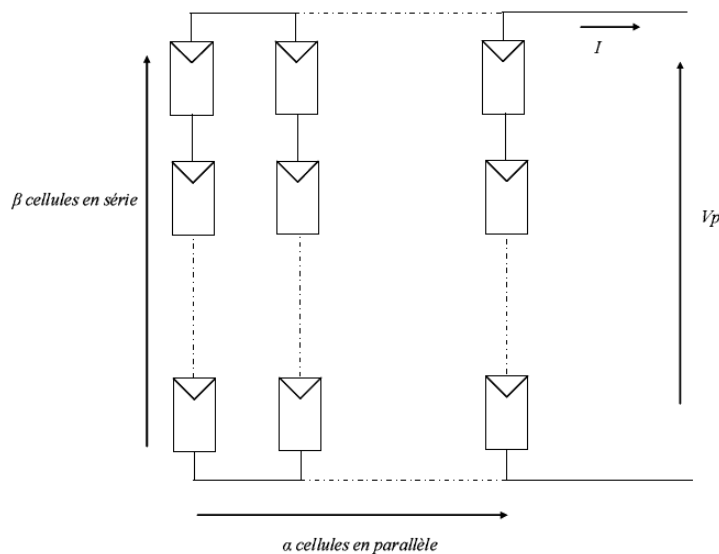


**Figure I.26 :** Caractéristique résultante d'un groupement de  $n_p$  cellules en parallèle [1]

Dans le cas d'un groupement de  $n_p$  cellules en parallèle la caractéristique résultante du groupement est obtenue par l'addition des courants avec  $I_{ccnp} = n_p \times I_{cc}$  et  $V_{co} = V_{conp}$ .

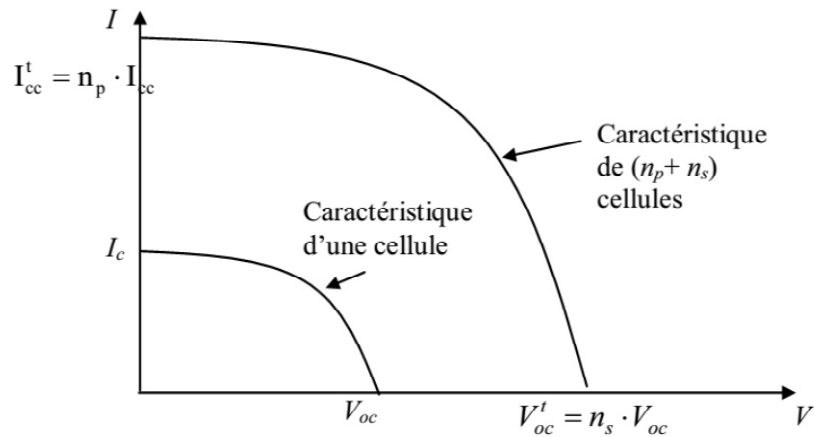
### I.5.3. Regroupement mixte (série et parallèle)

Pour avoir une satisfaction en courant et en tension, on est obligé d'utiliser un groupement mixte, c'est à dire Série-Parallèle (figure I.27) [18].



**Figure I.27 :** Association mixte des cellules [16]

La figure I.28 montre la caractéristique résultante obtenue en associant, en série  $n_s$  et en parallèle  $n_p$ , cellules identiques.



**Figure I.28** : Caractéristique résultante d'un groupement mixte de  $(n_p + n_s)$  cellules identiques

## I.6. Générateur photovoltaïque GPV

### I.6.1. Conception et caractéristiques du GPV

La cellule PV fait à peu près  $150 \text{ cm}^2$ , produit 2,3 Watt-crête (Wc) sous approximativement 0,5 Volt. Cette faible puissance est généralement insuffisante pour la majorité des applications PV domestiques ou industrielles. Afin de fournir au récepteur extérieur une tension et une puissance adéquates, plusieurs cellules PV doivent être connectées entre elles en série, pour former ce qu'on appelle : « un module ». Les modules peuvent être assemblés en série et/ou en parallèle pour former des panneaux (Figure I.29), eux-mêmes interconnectés pour former un champ PV [3].

On utilise généralement des modules PV de 12 V, composé normalement de 28 à 40 cellules. Un mètre carré de panneaux solaires peut produire jusqu'à 150 W, sans entretien pendant une trentaine d'années. La puissance que peut fournir un module est fonction de sa surface, de sa température et de l'ensoleillement incident. Elle s'exprime en Watt-crête et représente la puissance maximale du module pour les conditions normalisées de l'ensoleillement maximal de référence ( $1000 \text{ W/m}^2$ ) et de température de référence ( $25^\circ\text{C}$ ). La tension délivrée par un module dépend du nombre de cellules connectées en séries. Pour les modules de petite puissance ( $< 75 \text{ Wc}$ ), la tension d'usage est généralement comprise entre 12 et 15 V. Des modules de puissance plus importante sont obtenus par une augmentation du nombre de cellules en série (augmentation de la tension) et augmentation du nombre de branches de cellules en parallèle (augmentation de la valeur du courant). La tension d'usage peut alors être de 24 V ou plus selon la configuration du système à alimenter. La surface des modules est variable selon les fabricants et est généralement comprise entre  $0,5$  et  $1 \text{ m}^2$ . Elle peut atteindre  $3 \text{ m}^2$  pour des fabrications spéciales et si l'importance de la commande le



permet. L'assemblage des modules en série et/ou en parallèle permettra de fixer différentes tensions et puissances [3].

La caractéristique I-V d'un générateur PV ressemble à celle d'une cellule (avec un rapport près) lorsque les diodes de protections n'interviennent pas et que toutes les cellules sont identiques et reçoivent le même éclairement. De même, la caractéristique d'un générateur formé de modules sera identique à celle d'un seul module (Figure I.30, Figure I.31, Figure I.32).

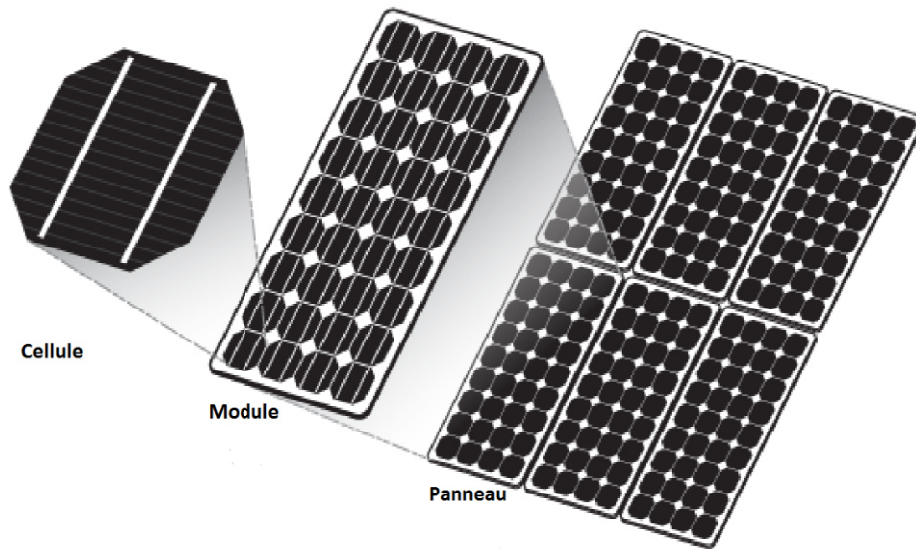


Figure I.29 : Constitution d'un générateur photovoltaïque [3]

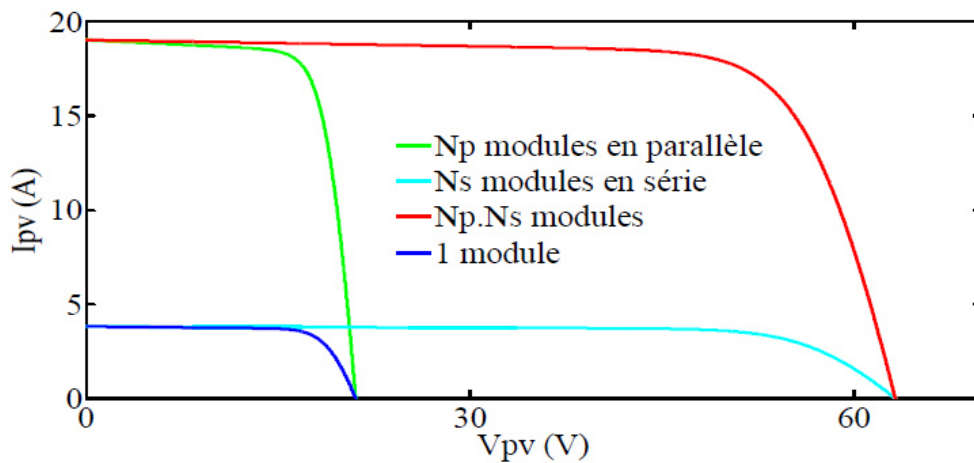


Figure I.30 : Caractéristiques I-V pour différents assemblage de modules PV [3]

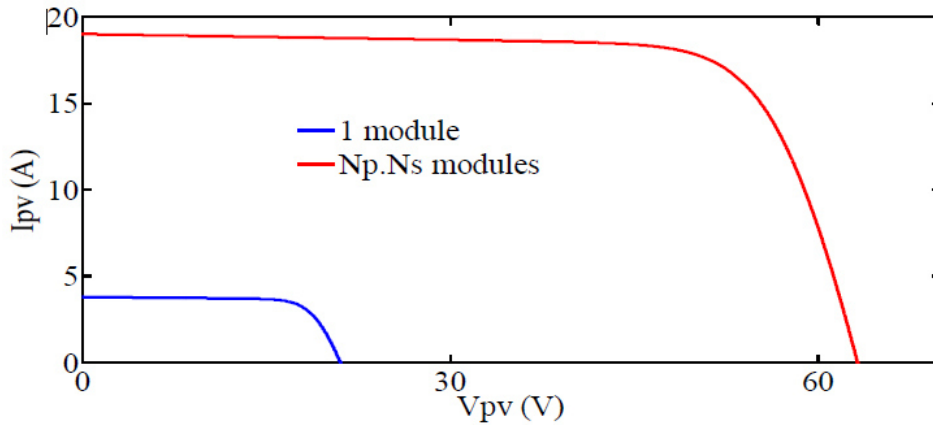


Figure I.31 : Caractéristiques I-V pour  $N_s \cdot N_p$  modules [3]

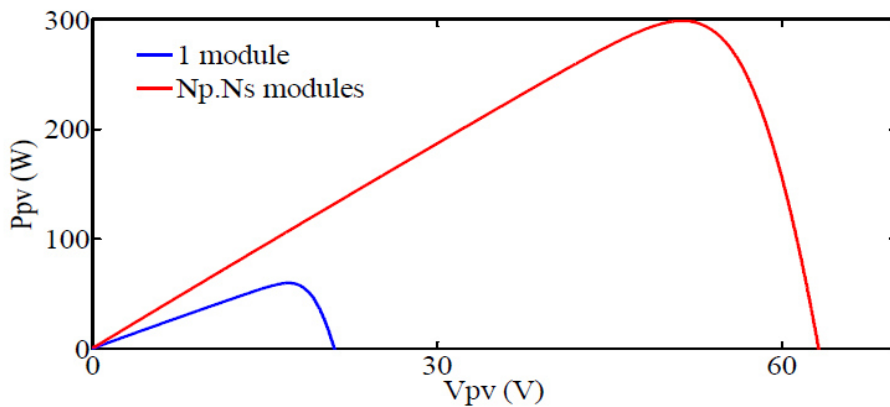


Figure I.32 : Caractéristiques P-V pour  $N_s \cdot N_p$  modules [3]

### I.6.2. Protection des GPV

Lorsque nous concevons une installation photovoltaïque, nous devons assurer la protection électrique de cette installation afin d'augmenter sa durée de vie en évitant notamment des pannes destructrices liées à l'association des cellules et de leur fonctionnement en cas d'ombrage. Pour cela, deux types de protections sont classiquement utilisés dans les installations actuelles [15] :

- la protection en cas de connexion en parallèle de modules PV pour éviter les courants négatifs dans les GPV (diode anti-retour).
- la protection lors de la mise en série de modules PV permettant de ne pas perdre la totalité de la chaîne (diode by-pass) et éviter les points chauds.

## I.7. Différents types de systèmes photovoltaïques

On rencontre généralement trois types de systèmes photovoltaïques, les systèmes **autonomes**, les systèmes **hybrides** et les systèmes **connectés à un réseau** [22]. Les deux premiers sont indépendants du système de distribution d'électricité, en les retrouvant souvent dans les régions éloignées [23] [24].

### I.7.1. Les systèmes autonomes

Ces systèmes photovoltaïques sont installés pour assurer un fonctionnement autonome sans recours à d'autres sources d'énergie. Généralement, ces systèmes sont utilisés dans les régions isolées et éloignées du réseau. Les différents types de systèmes photovoltaïques autonomes sont décrits sur la figure I.33 qui traduit les différentes possibilités offertes : couplage direct à une charge adaptée ou couplage avec adaptateur d'impédance MPPT (Maximum Power Point Tracking), fonctionnement au fil du soleil ou avec stockage d'énergie électrique.

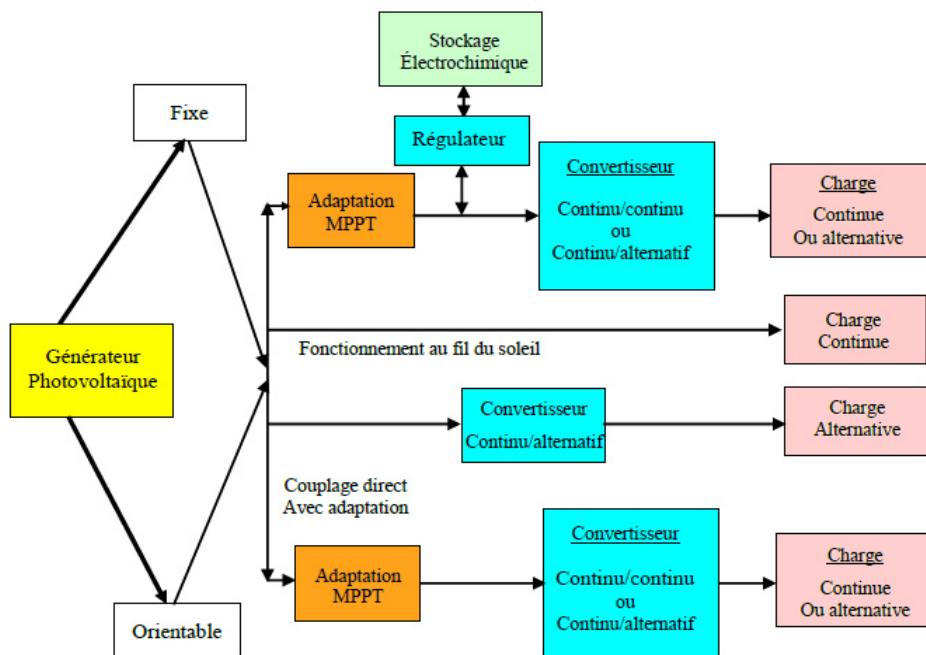


Figure I.33 : Les différents types de systèmes photovoltaïques autonomes [23]

### I.7.2. Les systèmes hybrides

Les systèmes d'énergie hybride associent au moins deux sources d'énergie renouvelable aussi une ou plusieurs sources d'énergie classiques. Les sources d'énergie renouvelable, comme le photovoltaïque et l'éolienne ne délivrent pas une puissance constante,

mais vu leurs complémentarités, leur association permet d'obtenir une production électrique continue. Les systèmes d'énergie hybrides sont généralement autonomes par rapport aux grands réseaux interconnectés et sont souvent utilisés dans les régions isolées.

Les différentes sources dans un système hybride peuvent être connectées en deux configurations, architecture à bus continu et architecture à bus alternatif [23] [24].

### **I.7.3. Les systèmes connectés au réseau**

Les systèmes de production d'énergie photovoltaïque connectés à un réseau sont une résultante de la tendance à la décentralisation du réseau électrique. L'énergie est produite plus près des lieux de consommation. Les systèmes connectés à un réseau réduisent la nécessité d'augmenter la capacité des lignes de transmission et de distribution. Il produit sa propre électricité et achemine son excédent d'énergie vers le réseau, auprès duquel il s'approvisionne au besoin, ces transferts éliminent le besoin d'acheter et d'entretenir une batterie. Il est toujours possible d'utiliser ces systèmes pour servir d'alimentation d'appoint lorsque survient une panne de réseau [23] [24].

### **I.8. Secteurs d'application des systèmes photovoltaïques**

- **Domaine spatial** : c'est de loin le secteur le plus ancien puisque les premières utilisations de cellules solaires pour des engins spatiaux (satellites, navettes,...) remontent aux années soixante.
- **Télécommunications** : Téléphonie rurale, radiotéléphonie,...etc.
- **Sites isolés** : Parcs nationaux, service des eaux et forêts, régions isolées, pays en voie de développement. Pompage de l'eau, irrigation, domiciles, villages ...etc.
- **Acquisition de données** : L'énergie photovoltaïque joue un rôle très important pour les stations isolées d'acquisition de données, vu la haute fiabilité de fonctionnement, l'autonomie, la moindre sensibilité à la foudre, la résistance extrême aux conditions naturelles, la maintenance légère et la longévité des équipements (25 ans).
- **Domaine du transport** : Lampadaires, panneaux à messages variables, éclairage de panneaux, signalisation lumineuse routière et ferroviaire [15].

### **I.9. Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque**

Les principaux avantages de l'énergie PV sont [3] :

- L'énergie PV est renouvelable et fiable car l'installation ne comporte pas de pièces mobiles.
- Le caractère modulaire des panneaux PV permet un montage simple et adaptable à des besoins énergétiques divers. Les systèmes peuvent être dimensionnés pour des applications de puissances allant du milliwatt aux centaines de mégawatts.
- Le coût de fonctionnement est très faible vu les entretiens réduits et il ne nécessite ni combustible, ni son transport, ni personnel hautement spécialisé.
- La technologie PV présente des qualités sur le plan écologique car le produit fini est non polluant et n'entraîne aucune perturbation du milieu.
- Longue durée de vie des panneaux solaires et pas de risques électriques pour les usagers.

Les inconvénients de l'énergie PV sont [3]:

- La fabrication du module PV relève de la haute technologie et requiert des investissements d'un coût élevé.
- Le rendement réel de conversion d'un module est faible, de l'ordre de 10-15 % avec une limite théorique pour une cellule de 28%. Les générateurs PV ne sont compétitifs par rapport aux générateurs diesel que pour des faibles demandes d'énergie en régions isolées.
- Lorsque le stockage de l'énergie électrique sous forme chimique (batterie) est nécessaire, le coût du générateur est accru.
- Le stockage de l'énergie électrique pose encore de nombreux problèmes.
- Occupation d'un espace important pour les installations de grandes dimensions.

## **I.10. Conclusion**

Ce premier chapitre paraît d'une grande importance et représente la clé de ce mémoire, car il nous a permis de bien saisir un élément essentiel de ce thème qui représente bien le système photovoltaïque, ainsi répond à plusieurs problématiques mise en vigueur.

Tout en commençant par l'irradiation solaire, puis la conversion PV qui décrit essentiellement la constitution d'une cellule, nous avons aussi par la suite fait une description générale sur la cellule (principe de fonctionnement, caractéristiques, types...) sans oublier les différents regroupements série-parallèle. Enfin nous avons mentionné les différents systèmes PV, leurs domaines d'applications pour bien terminer par leurs avantages et inconvénients.

*Chapitre II : Etat de l'art  
des réseaux électriques*

## II.1. Introduction

Les réseaux électriques sont des éléments clés pour assurer une alimentation fiable et de qualité en énergie électrique, qui est un vecteur indispensable aux activités humaines et un facteur essentiel de développement pour les pays.

Dans ce mémoire, le réseau électrique est un élément fondamental, c'est pourquoi nous consacrerons ce deuxième chapitre à introduire les différents aspects du réseau électrique, ces différents constituants avec leur description, ainsi que les différents défauts liés à la distribution et l'interconnexion des réseaux ce qui nous mène à citer leurs différentes protections, pour terminer enfin par une conclusion.

## II.2. Définition d'un réseau électrique

Un réseau électrique est l'ensemble des composantes requises pour produire, transporter, et distribuer l'énergie électrique de la source (générateur) à la charge (consommateur). Cet Ensemble comprend des transformateurs, des lignes de transmission, des réactances, des condensateurs, des moyens de mesure et de contrôle, des protections contre la foudre ... ; autrement dit, un réseau électrique est l'ensemble des infrastructures permettant d'acheminer l'énergie électrique des centres de production (centrales électriques), vers les consommateurs d'électricité (Figure II.1).

Un réseau électrique doit aussi assurer la gestion dynamique de l'ensemble production-transport-consommation, mettant en œuvre des réglages ayant pour but d'assurer la stabilité de l'ensemble [25].

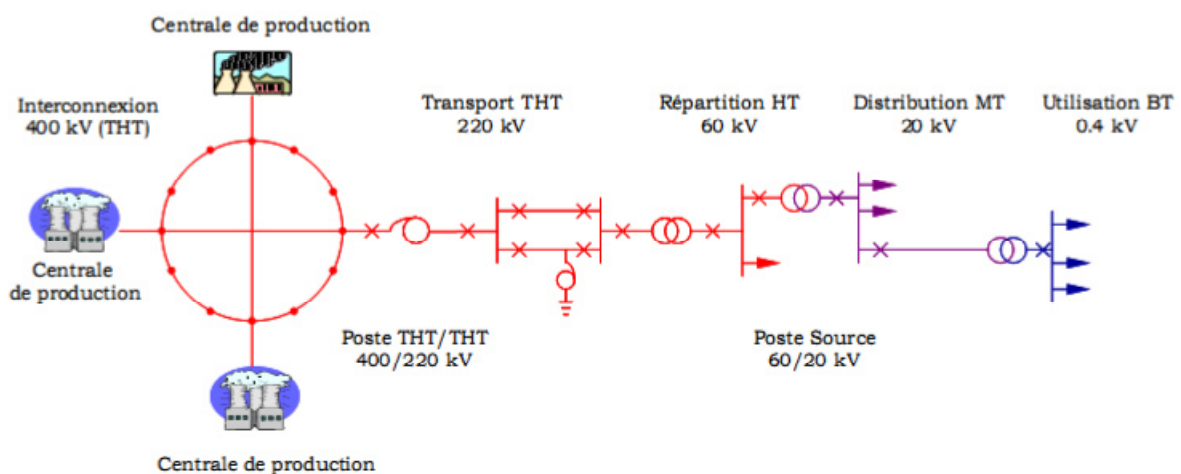


Figure II.1 : Structure globale du réseau électrique [26].

### II.3. Les niveaux de tension des réseaux électriques

Les réseaux électriques sont hiérarchisés. La plupart des pays mettent en œuvre la norme CEI (Commission Électrotechnique Internationale) résumée dans le tableau II.1 :

Domaine de tension	Tension	Valeurs usuelles
Basse tension BT	$100 < U \leq 1000 \text{ V}$	400 – 690 – 1000 V
Moyenne Tension MT	$1 < U \leq 35 \text{ kV}$	3.3 – 6.6 – 11 – 22 – 33 kV
Haute tension HT	$35 < U \leq 230 \text{ kV}$	45 – 66 – 110 – 132 – 150 – 220 kV

**Tableau II.1** : Les niveaux de tension selon CEI [27]

La nouvelle norme en vigueur en France UTE C18-510 notamment en Algérie (SONELGAZ) définit les niveaux de tension comme suit :

Domaine de tension		Valeur de la tension composée nominale (V)	
		Tension alternative	Tension continue
Très Basse Tension (TBT)		$U_n \leq 50$	$U_n \leq 120$
Basse Tension (BT)	BTA	$50 < U_n \leq 500$	$120 < U_n \leq 750$
	BTB	$500 < U_n \leq 1000$	$750 < U_n \leq 1500$
Haute Tension (HT)	HTA	$1000 < U_n \leq 50000$	$1500 < U_n \leq 75000$
	HTB	$U_n \geq 50000$	$U_n \geq 75000$

**Tableau II.2** : Les niveaux de tension selon C18-510 [27]

### II.4. Description des réseaux électriques

L'énergie électrique produite est directement injectée sur le réseau de transport maillé à très haute tension pour être transportée sur de grandes distances avec un minimum de pertes. Elle "descend" ensuite sur les réseaux de répartition, puis ceux de distribution d'où elle est distribuée aux gros consommateurs et aux réseaux de distribution à basse tension.

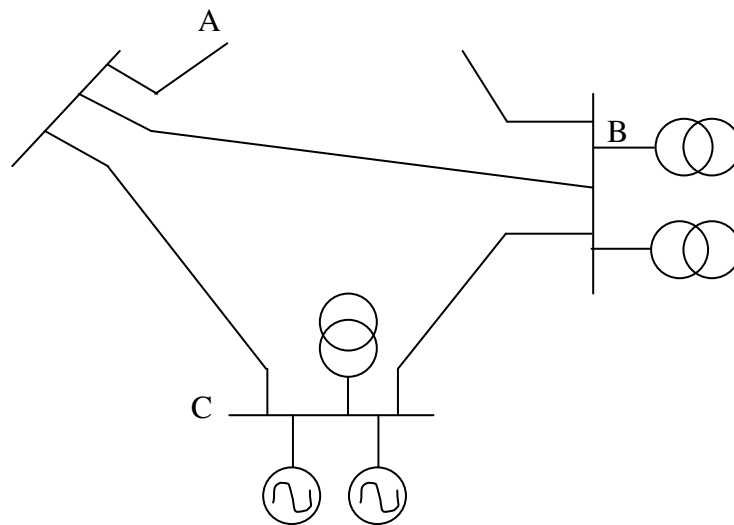
#### II.4.1. Le réseau de transport

Généralement le réseau qui permet le transport de l'énergie depuis les centres éloignés de production vers les centres de consommation. C'est sur le réseau HTB que sont en principe branchées les centrales de grandes puissances (> 300 MW).

Les réseaux de transport constituent une vaste grille couvrant le territoire, à laquelle sont raccordées les sources et les utilisations (groupes, transformateurs). Chaque nœud A, B et C (Figure II.2) constitue un « poste d'interconnexion ». Ce poste est en général constitué par



un collecteur principal appelé « jeu de barres » sur lequel se raccordent les lignes, au moyen d'appareils [27].



**Figure II.2** : Exemple d'une partie d'un réseau de transport [27]

#### II.4.2. Le réseau de répartition

La finalité de ce réseau est avant tout d'acheminer l'électricité du réseau de transport vers les grands centres de consommation qui sont :

- Soit du domaine public avec l'accès au réseau de distribution HTA,
- Soit du domaine privé avec l'accès aux abonnés à grande consommation (supérieure à 10 MVA) livrés directement en HTB. Il s'agit essentiellement d'industriels tels la sidérurgie, la cimenterie, la chimie, le transport ferroviaire...etc.

La structure de ces réseaux est généralement de type aérien (parfois souterrain à proximité de sites urbains). Les protections sont de même nature que celles utilisées sur les réseaux de transport, les centres de conduite étant régionaux [27].

#### II.4.3. Le réseau de distribution

Les lignes de distribution à moyenne tension (HTA) partent des postes de répartition et alimentent des postes de transformation répartis en différents endroits de la zone à desservir; Ces postes de transformation abaissent la tension à une valeur convenable pour alimenter le réseau de distribution publique auquel les abonnés sont raccordés par des branchements [27].

#### II.4.4. Le réseau de livraison

C'est le réseau qui nous est en principe familier puisqu'il s'agit de la tension 400/230 V (380/220 en Algérie). Nous le rencontrons dans nos maisons via la chaîne : compteur, disjoncteur, fusibles (micro disjoncteurs).

La finalité de ce réseau est d'acheminer l'électricité du réseau de distribution HTA aux points de faible consommation dans le domaine public avec l'accès aux abonnés BTB. Il représente le dernier niveau dans une structure électrique [27].

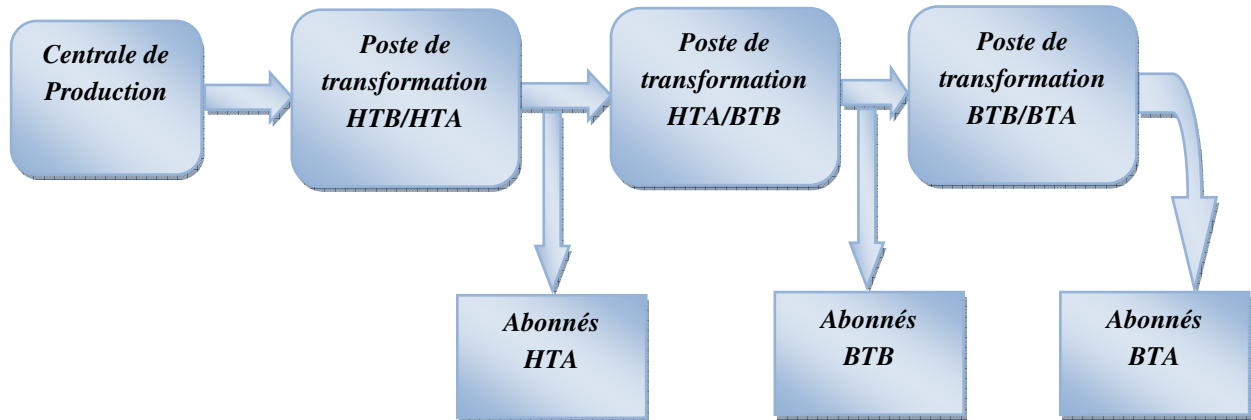


Figure II.3 : Schéma de description des réseaux électriques.

## II.5. Topologie des réseaux électriques

Les topologies diffèrent d'un type de réseau à un autre. Cette topologie est dictée par : le niveau fiabilité recherché, la flexibilité et la maintenance, ainsi que les coûts d'investissement et d'exploitation [4] [28]. Les différentes topologies qu'on trouve usuellement sont illustrées sur la Figure II.4.

### II.5.1. Réseau maillé

Cette topologie est presque la norme pour les réseaux de transport. Tous les centres de production sont liés entre eux par des lignes THT au niveau des postes d'interconnexion, ce qui forme un maillage. Cette structure permet une meilleure fiabilité mais nécessite une surveillance à l'échelle nationale.

### II.5.2. Réseau bouclé

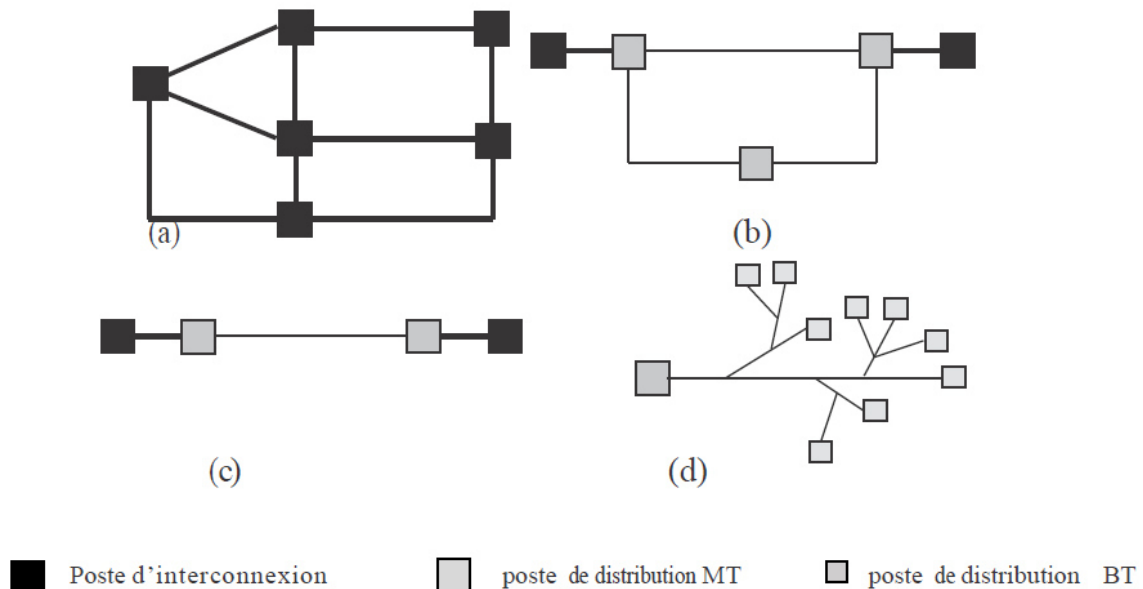
Cette topologie est surtout utilisée dans les réseaux de répartition et distribution MT. Les postes de répartition HT ou MT alimentés à partir du réseau THT sont reliés entre eux pour former des boucles, ceci dans le but d'augmenter la disponibilité. Cependant, il faut noter que les réseaux MT ne sont pas forcément bouclés [4] [28].

### II.5.3. Réseau radial

C'est une topologie simple qu'on trouve usuellement dans la distribution MT et BT. Elle est composée d'une ligne alimentée par des postes de distribution MT ou BT alimentés au départ par un poste source HT ou MT. En moyenne tension cette structure est souvent alimentée des deux côtés afin d'assurer la disponibilité.

### II.5.4. Réseau arborescent

Cette structure est très utilisée en milieu rural et quelque fois en milieu urbain où la charge n'est pas très sensible aux interruptions. Elle est constituée d'un poste de répartition qui alimente plusieurs postes de distribution (BT) grâce à des piquages à différents niveaux des lignes alimentant les postes MT/BT [4] [28].



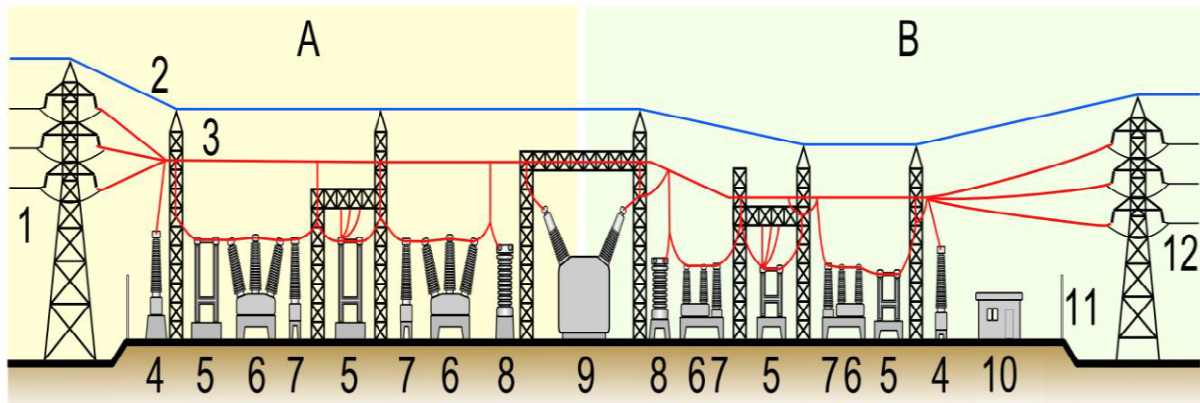
**Figure II.4** : Différentes topologies des réseaux électriques : (a) Réseau maillé, (b) Réseau bouclé, (c) Réseau radial, (d) Réseau arborescent [28]

### II.6. Postes électriques

Dans une analyse globale d'un réseau électrique un poste est considéré comme une barre ou tout simplement un nœud où transitent des flux de puissances. Pour le désigne et la planification du réseau, ce poste constitue une pièce majeure dans le système de répartition ou de distribution, dans la mesure où c'est à ce niveau qui est organisée la configuration de la topologie du réseau, et c'est aussi un point de surveillance de contrôle et de protection [4].

#### II.6.1. Appareillage d'un poste électrique

Les postes contiennent un certain nombre d'appareils électriques qui participent au bon fonctionnement du réseau (Figure II.5) [29] : 1. Ligne électrique primaire ; 2. Câble de garde ; 3. Ligne électrique ; 4. Transformateur de tension ; 5. Sectionneur ; 6. Disjoncteur ; 7. Transformateur de courant ; 8. Parafoudre ; 9. Transformateur de puissance ; 10. Bâtiment secondaire ; 11. Clôture ; 12. Ligne électrique secondaire.



**Figure II.5** : Appareils électriques dans un poste (A : côté primaire, B : côté secondaire) [29]

### II.6.1.1. Transformateurs de puissance

Ils modifient la tension électrique à la hausse (par exemple de 20 kV à 400 kV en sortie de centrales) ou à la baisse (par exemple de 63 kV à 20 kV pour livrer l'énergie aux réseaux de distribution) (figure II.6).



**Figure II.6** : Transformateurs de puissance [33]

### II.6.1.2. Transformateurs de mesure (courant et tension)

Ils sont utilisés pour permettre la mesure de la tension ou du courant quand ceux-ci ont une valeur trop élevée pour être mesurée directement. Ils doivent transformer la tension ou le courant de manière proportionnelle et sans déphasage. Ils sont destinés à alimenter des appareils de mesure, des compteurs, des relais et autres appareils analogues (figure II.7).



(a) Transformateur de courant

(b) Transformateur de tension

**Figure II.7** : Transformateurs de mesure [29]

### II.6.1.3. Disjoncteurs

Appareils mécaniques de connexion capables d'établir, de supporter et d'interrompre des courants dans les conditions anormales spécifiées du circuit telles qu'un court-circuit (Figure II.8).



**Figure II.8** : Disjoncteurs [29]

### II.6.1.4. Sectionneurs

Ils assurent la coupure visible d'un circuit électrique et aiguillent le courant dans le poste (figure II.9).





**Figure II.9 :** Sectionneurs [29]

#### II.6.1.5. Jeux de barres

Dans la distribution électrique un jeu de barres désigne un conducteur de cuivre ou d'aluminium qui conduit de l'électricité dans un tableau électrique, à l'intérieur de l'appareillage électrique ou dans un poste électrique. Les jeux de barres sont typiquement soit des barres plates, soit des tubes (figure I.10). Ils sont considérés comme des conducteurs de faible impédance auquel peuvent être reliés plusieurs circuits électriques en des points séparés.



**Figure II.10 :** Jeux de barres [29]

#### II.6.1.6. Isolateurs

Les isolateurs assurent l'isolement électrique entre les câbles conducteurs et les supports. Ils sont utilisés en chaîne, dont la longueur augmente avec le niveau de tension : il faut compter environ 6 isolateurs en 63 kV, 9 en 90 kV, 12 en 225 kV et 19 en très haute tension de 400 kV. La chaîne d'isolateurs joue également un rôle mécanique, elle doit être capable de résister aux efforts dus aux conducteurs, qui subissent les effets du vent, de la neige ou du givre (figure II.11).



**Figure II.11** : Isolateurs [29]

#### II.6.1.7. Parafoudres

Les parafoudres sont des appareils destinés à limiter les surtensions imposées aux transformateurs, instruments et machines électriques par la foudre et par les manœuvres de commutation. La partie supérieure du parafoudre est reliée à un des fils de la ligne à protéger et la partie inférieure est connectée au sol par une mise à la terre de faible résistance, généralement de moins d'un Ohm (figure II.12).

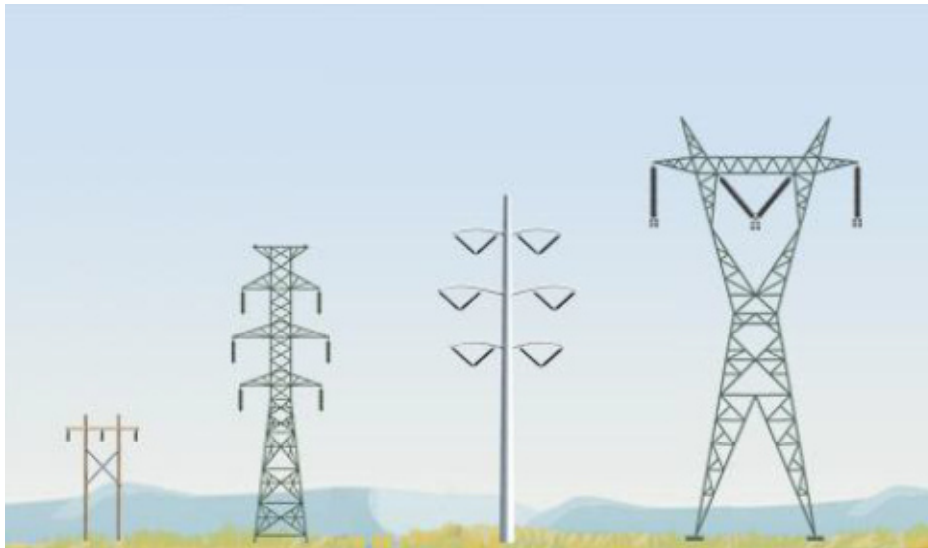


**Figure II.12** : Parafoudres [29]

#### II.6.1.8. Supports

Le rôle des supports (pylônes) est de maintenir les câbles à une distance minimale de sécurité du sol et des obstacles environnants, afin d'assurer la sécurité des personnes et des installations situées au voisinage des lignes. Le choix des pylônes se fait en fonction des lignes à réaliser, de leur environnement et des contraintes mécaniques liées au terrain et aux conditions climatiques de la zone. Leur silhouette est caractérisée par la disposition des câbles

conducteurs. On a recours à des pylônes composés d'un treillis en acier. Plus la tension est élevée, plus l'envergure est grande et plus les poteaux sont élevés (figure II.13).



**Figure II.13** : Quelques structures de pylônes [29]

#### **II.6.1.9. Lignes aériennes**

Pour transporter le courant, on utilise des câbles conducteurs qui sont portés par les pylônes. Le courant utilisé étant triphasé, il y a trois câbles (ou faisceaux de câbles) conducteurs par circuit. Les lignes sont soit simples (un circuit), soit doubles (deux circuits par file de pylônes). Chacune des phases peut utiliser 1, 2, 3 ou 4 câbles conducteurs, appelés faisceaux. Les câbles conducteurs sont « nus » c'est-à-dire que leur isolation électrique est assurée par l'air. La distance des conducteurs entre eux et avec le sol garantit la bonne tenue de l'isolement. Cette distance augmente avec le niveau de tension.

Les conducteurs en cuivre sont de moins en moins utilisés. On utilise en général des conducteurs en aluminium, ou en alliage aluminium-acier ; on trouve aussi des conducteurs composés d'une âme centrale en acier sur laquelle sont tressés des brins d'aluminium (figure II.14).



**Figure II.14** : Conducteur d'une ligne aérienne [29]



### II.6.1.10. Câble de garde

Les câbles de garde ne conduisent pas le courant. Ils sont situés au-dessus des conducteurs de lignes aériennes à haute tension. Ils jouent un rôle de paratonnerre au-dessus de la ligne, en attirant les coups de foudre, et en évitant le foudroiement des conducteurs. Ils sont en général réalisés en acier (figure II.15).

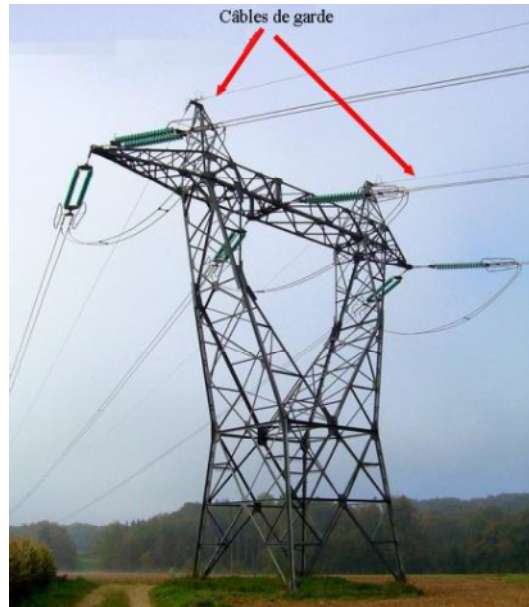


Figure II.15 : Câble de garde [29]

## II.6.2. Types des postes électriques

### II.6.2.1. Le poste HT/HTA

Ces postes de transformations comprennent les parties suivantes [30] :

- **Etage HT**

Se trouvant à l'extérieur, il comprend des arrivées HT ; Jeux de barres ; Transformateurs et Protections (parafoudre, sectionneurs.....).

- **Etage HTA**

- Cellules arrivées : Elles assurent la liaison entre le transformateur de puissance HT/HTA qui se trouve à l'extérieur et le jeu de barres HTA 30kV, qui se trouve à l'intérieur du bâtiment « moyenne tension », la liaison se fait en souterrain.
- Cellules départs : Elles assurent la liaison entre le jeu de barres HTA et le réseau de distribution aérien ou souterrain.

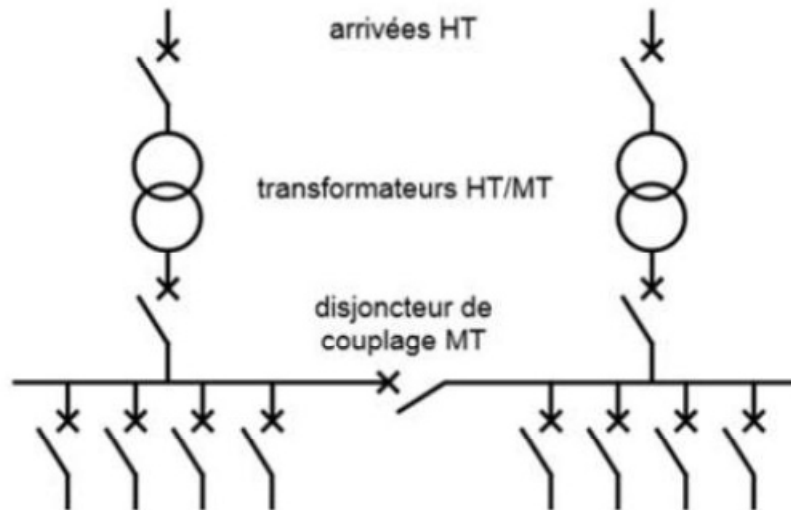


Figure II.16 : Poste HT/HTA [30]

### II.6.2.2. Le poste HTA/HTA (ou MT/MT)

Cet ouvrage peut réaliser deux fonctions :

- Assurer la démultiplication des départs HTA en aval des postes HT/HTA. Dans ce cas, le poste ne comporte aucun transformateur. Il est constitué de deux arrivées HTA et de 8 à 12 départs HTA.
- Assurer le passage entre deux niveaux HTA. De tels postes HTA/HTA intègrent des transformateurs. Ils sont nécessaires dans certains pays qui utilisent deux niveaux successifs de tension sur leur réseau HTA [30].

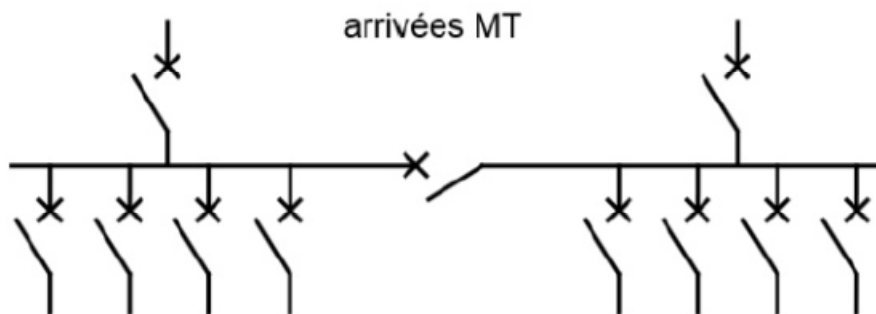


Figure II.17 : Poste HTA/HTA [30]

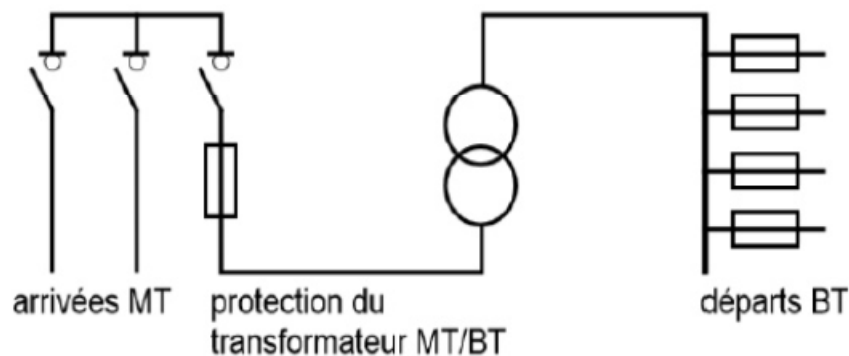
### II.6.2.3. Le poste HTA/BT

Le poste HTA/BT en distribution publique est localisé entre le réseau de distribution HTA et le réseau de distribution BT, cet ouvrage est pour assurer le passage de la HTA à la BT.

Le schéma type de ce poste est évidemment beaucoup plus simple (Figure II.18). Comparativement au poste HTA/HTA, en particulier, l'appareil de base HTA utilisé est l'interrupteur et non plus le disjoncteur.

Ces postes sont constitués de quatre parties :

- L'équipement HTA pour le raccordement au réseau amont ;
- Le transformateur de distribution HTA/BT ;
- Le tableau des départs BT comme points de raccordement du réseau aval de distribution (en BT) ;
- Et de plus en plus souvent une enveloppe extérieure préfabriquée (métallique ou de plus en plus souvent en béton) qui contient les éléments précédents.



**Figure II.18** : Poste HTA/BT [30]

#### II.6.2.4. Les postes de livraison HTA/ BT

On peut classer les postes HTA/BT en deux catégories [30] :

##### a) Les postes d'extérieur (sur poteau)

Poste économiques, de faible puissance ( $\leq 160$  kVA), comprend un transformateur, un disjoncteur, éclateurs ou parafoudre et sectionneur. Ils sont raccordés en groupe et en aval. Ces postes peuvent être de type distribution publique, de livraison mais rarement mixte.



**Figure II.19** : Exemple de raccordement d'un poste sur poteau [30]

### b) Les postes d'intérieur

L'installation de ce type de poste se justifie lorsqu'on doit protéger l'appareillage HT et BT du poste contre les fortes variations de température, ou dans le cas de puissances importantes. On distingue les postes dont l'appareillage HT est sous enveloppe métallique et les postes équipés d'appareillage HT sans enveloppe.

Le matériel, dans ce dernier cas, est dit « ouvert ». Ces postes maçonnés sont de plus en plus remplacés par des cellules préfabriquées. Les postes avec cellules préfabriquées métalliques ont pratiquement remplacé tous les postes maçonnés avec appareillage ouvert. Ils présentent l'avantage d'offrir une meilleure sécurité et une mise en place plus rapide (Figure II.20).



**Figure II.20** : Exemple d'un poste ouvert [30]

## II.7. Les anomalies dans un réseau électrique

Les réseaux basse tension sont très pollués et soumis à de multiples agressions, surtout les appareils électroniques qui sont de plus en plus nombreux et traitent des signaux de plus en plus bas, doivent résister à un environnement électromagnétique sévère. Et dans le même temps les exigences de disponibilité que ce soit pour la production, la gestion ou le commerce, sont de plus en plus fortes [32].

### II.7.1. Les courts-circuits

Les courts-circuits sont des phénomènes transitoires, ils apparaissent lorsque l'isolement entre deux conducteurs de tension différente ou entre un conducteur sous tension et la terre est rompu.

Ils engendrent des courants très importants dans les éléments constituant le réseau. Le courant de court-circuit (triphase) est une donnée essentielle pour le dimensionnement des équipements électrique [32].

Les courts-circuits peuvent être :

- monophasés à la terre.
- Biphases à la terre ou isolés.
- Triphasés à la terre ou isolés.

### **II.7.2. Les surtensions**

Ce sont des perturbations qui se superposent à la tension nominale d'un circuit, elle peuvent apparaître entre phases, entre circuit, ou entre les conducteurs actifs et la terre.

Elles sont dues aux élévations accidentelles de tension ou aux manœuvres sur le réseau, et dus aussi à l'affectation directe de foudre sur le réseau.

### **II.7.3. Les surcharges**

La surcharge d'un appareil est caractérisée par un courant supérieur au courant admissible, les origines de surcharges sont :

- Le court-circuit.
- Les pointes de consommation.
- L'enclenchement des grandes charges.

Les surcharges provoquent des chutes de tension importantes sur le réseau et accélère le vieillissement des équipements de réseau.

### **II.7.4. Les oscillations**

Les oscillations de la tension et du courant sont dues aux variations plus ou moins rapides de la charge qui agit directement sur la vitesse de rotation (fréquence) des machines de production de l'énergie électrique. Elles sont liées directement à la mécanique des machines électriques, c'est la raison pour laquelle on les appelle phénomènes transitoires électromécaniques [32].

### **II.7.5. Les déséquilibres**

Les déséquilibres sont généralement dus à la mauvaise répartition des charges sur les trois phases. Ils apparaissent surtout dans les réseaux de distribution, ils donnent naissance à la composante inverse du courant, cette composante provoque :

- Des chutes de tension supplémentaires.
- Des pertes de puissance.

- Des échauffements.

Contre toutes les anomalies précédemment citées, il a lieu d'élaborer une Philosophie de protection de tout le système électrique.

## **II.8. Protection des réseaux électriques**

Les dispositifs de protection surveillent en permanence l'état électrique des éléments d'un réseau et provoquent leur mise hors tension (par exemple l'ouverture d'un disjoncteur), lorsque ces éléments sont le siège d'une perturbation indésirable: court-circuit, défaut d'isolement, surtension,...etc. Le choix d'un dispositif de protection n'est pas le fruit d'une réflexion isolée, mais une des étapes les plus importantes de la conception d'un réseau électrique [33].

### **II.8.1. Les fonctions de protection**

Les fonctions de protection sont réalisées par des relais ou des appareils multifonctions. A l'origine, les relais de protection étaient de type analogique et effectuaient généralement une seule fonction. Actuellement, la technologie numérique est la plus employée. Elle permet de concevoir des fonctions de plus en plus évoluées et un même appareil réalise généralement plusieurs fonctions. C'est pourquoi, on parle plutôt d'appareils multifonctions [33].

### **II.8.2. Les qualités principales d'un système de protection**

#### **II.8.2.1. Rapidité**

Les courts-circuits sont des incidents qu'il faut éliminer le plus vite possible, c'est le rôle des protections dont la rapidité de fonctionnement et des performances prioritaires.

Le temps d'élimination des courts-circuits comprend deux composantes principales :

- Le temps de fonctionnement des protections (quelques dizaines de millisecondes),
- Le temps d'ouverture des disjoncteurs, avec les disjoncteurs modernes (SF6 ou à vide), ces derniers sont compris entre 1 et 3 périodes [34] [35].

#### **II.8.2.2. Sélectivité**

La sélectivité est une capacité d'un ensemble de protections à faire la distinction entre les conditions pour lesquelles une protection doit fonctionner de celles où elle ne doit pas fonctionner.

Les différents moyens qui peuvent être mis en œuvre pour assurer une bonne sélectivité dans la protection d'un réseau électrique, les plus importants sont les trois types suivants:

- Sélectivité ampère-métrique par les courants,

- Sélectivité chronométrique par le temps,
- Sélectivité par échange d'informations, dite sélectivité logique.

### II.8.2.3. Sensibilité

La protection doit fonctionner dans un domaine très étendu de courants de courts-circuits entre :

- Le courant maximal qui est fixé par le dimensionnement des installations et est donc parfaitement connu,
- Un courant minimal dont la valeur est très difficile à apprécier et qui correspond à un Court-circuit se produisant dans des conditions souvent exceptionnelles.

La notion de sensibilité d'une protection est fréquemment utilisée en référence au courant de court-circuit le plus faible pour lequel la protection est capable de fonctionner.

### II.8.2.4. Fiabilité

La fiabilité d'une protection, qui est la probabilité de ne pas avoir de fonctionnement incorrect (éviter les déclenchements intempestifs), est la combinaison de [34] [35] :

- La sûreté : qui est la probabilité de ne pas avoir de défaut de fonctionnement.
- La sécurité : qui est la probabilité de ne pas avoir de fonctionnement intempestif.

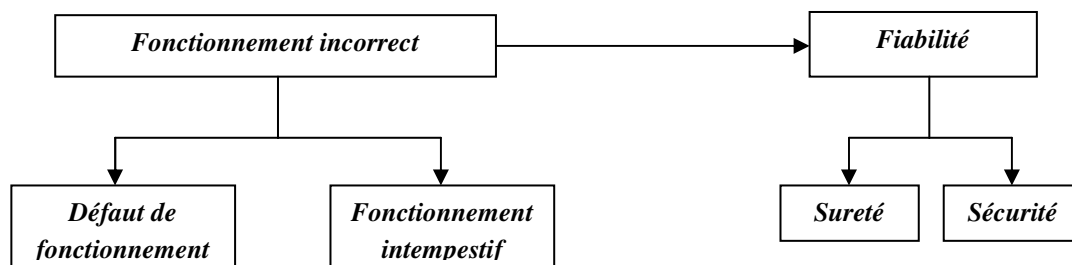


Figure II.21 : Fiabilité d'une protection [33]

## II.8.3. Moyens de protection

### II.8.3.1. Protection par disjoncteur

Le disjoncteur est un appareil dont la fonction est d'établir ou d'interrompre tout courant pouvant apparaître dans un circuit à vide, en charge, en surcharge ou en défaut, c'est-à-dire en court-circuit. Il est essentiel dans la protection des réseaux électriques HTA, car il est le seul capable d'interrompre un courant de court-circuit et donc éviter que le matériel soit endommagé.

Suivant le moyen utilisé pour éteindre l'arc électrique lors de l'ouverture ou de la fermeture du circuit, les disjoncteurs MT et HT peuvent être [30] :

- Disjoncteur à l'huile,
- Disjoncteurs à air comprimé,
- Disjoncteur à vide,
- Disjoncteur SF6.

#### II.8.3.2. Protection par sectionneur

Le sectionneur est un appareil mécanique de connexion destiné à ouvrir ou à fermer un circuit électrique lorsque le courant est nul ou pratiquement nul, afin d'isoler la partie de l'installation en aval du sectionneur.

La coupure doit être visible soit directement par observation de la séparation des contacts, soit par un indicateur de position si les contacts ne sont pas visibles.

#### II.8.3.3. Protection par interrupteur

Les interrupteurs sont des appareils destinés à ouvrir ou à fermer un circuit électrique, plus perfectionnés que les sectionneurs. Ils possèdent un certain pouvoir de coupure; en général, ils peuvent couper sous la tension nominale un courant d'une intensité égale à l'intensité nominale.

#### II.8.3.4. Protection par fusible

Les fusibles (Figure 28) offrent une protection des dispositifs de distribution moyenne tension (de 3 à 36 kV) contre des effets dynamiques et thermiques causés par les courts-circuits plus élevés que le courant minimal de coupure du fusible. Etant donné leur faible coût d'acquisition et ne nécessitant aucune maintenance, les fusibles sont une excellente solution pour la protection de différents types de dispositifs de distribution [30].



Figure II.22 : Fusible HTA [30]



### II.8.3.5. Protection par relais

Les relais sont des dispositifs de surveillance des grandeurs électriques du réseau (courant, tension, puissance, fréquence, température, ...etc.). Ils sont destinés à donner des ordres de coupure ou de mise hors tension du circuit lorsque les grandeurs qui l'alimentent franchissent un seuil prédéterminé [30].

Les relais de protection électrique sont classés en 4 types :

- Relais électromagnétique,
- Relais statique,
- Relais thermique,
- Relais numérique.



a) Relais statique



b) Relais thermique

**Figure II.23** : Relais [30]

## II.9. Conclusion

Les réseaux électriques deviennent de plus en plus un sujet très délicat dans le domaine de génie électrique. Pour cela son étude évolue d'une façon très remarquable au cours des dernières années, et notamment attire l'attention des spécialistes à en faire développer cet élément et le rendre un facteur essentiel dans le milieu pratique.

Ce deuxième chapitre nous l'avons consacré pour présenter une généralité sur le réseau électrique, en englobant tout les éléments fondamentaux qu'ils le caractérisent.

A partir d'une brève définition, nous avons par la suite cité les domaines de tensions, et passant aux différents types des réseaux ainsi ses structures topologiques. Les postes électriques sont aussi mentionnés dans ce chapitre en indiquant ces différents composants et les types existants. Après cela, on a précisé les différentes anomalies survenant dans le réseau, pour décrire enfin ses différentes protections.

*Chapitre III :*  
*Modélisation et*  
*simulation d'un système*  
*PV connecté au réseau*

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

Dans ce dernier chapitre nous allons effectuer la simulation d'un générateur PV raccordé au réseau BT. Ce système englobe dans sa totalité un ensemble de composants qu'on doit rassembler en premier lieu avant de réaliser les simulations et les modélisations sous le logiciel MATLAB/SIMULINK.

Nous réaliserons dans le début de ce chapitre sous MATLAB/SIMULINK les différentes simulations, en commençant par le générateur PV seul avec les différentes influences des conditions externes (éclairage et température), ensuite nous citerons les convertisseurs DC-DC utilisées en raccordement et leurs simulations, ainsi sera définie la commande MPPT utilisée pour la commande du convertisseur DC-DC, ensuite la modélisation de l'onduleur triphasé avec sa commande MLI et la modélisation du réseau BT, avant d'entamer en dernier lieu la simulation globale du système PV connecté au réseau BT qui représente l'objectif principal de ce mémoire.

Le but de toutes ces simulations des composants de la centrale PV grâce au logiciel MATLAB est d'aider à comprendre les critères de conception et de dimensionnement des systèmes PV connectés au réseau. Ces critères permettent de déduire et d'estimer l'énergie électrique injectée au réseau.

### **III.2. Modélisation et simulation d'un panneau PV**

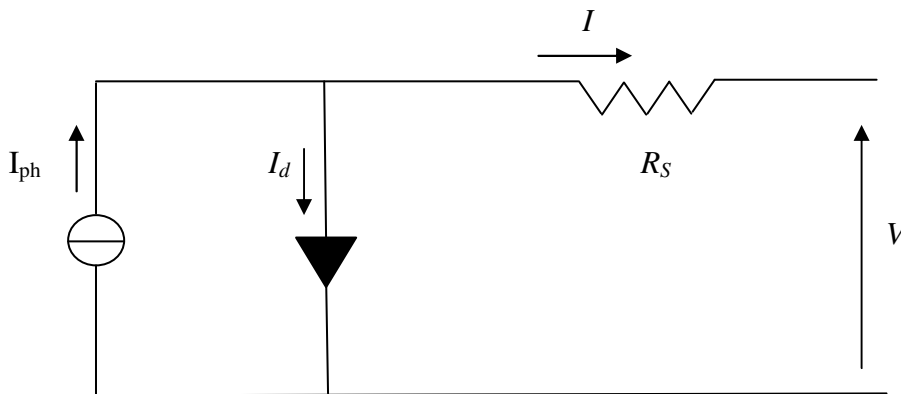
Après que nous avons détaillé et traité l'ensemble des caractéristiques des panneaux PV dans le premier chapitre théoriquement, nous allons procéder dans cette partie sous MATLAB/SIMULINK à étudier un modèle pratique d'un panneau PV afin de démontrer les résultats obtenus précédemment.

Pour notre présente étude, on a choisi le module photovoltaïque du type **AEGPQ-40** dont les caractéristiques électriques sont données dans le tableau III.1.

Ainsi le modèle choisi d'une cellule sera celui d'une seule diode avec une résistance série et une résistance shunt supposée infinie et un courant parallèle négligeable, le schéma sera celui montré dans la figure III.1.

Température ( $T_{ref}$ )	25 °C
Eclairement ( $G_{ref}$ )	1000 W/m <sup>2</sup>
Tension du circuit ouvert ( $V_{co}$ )	22.4 V
Courant du court circuit ( $I_{cc}$ )	2.41 A
Tension du point de puissance maximale ( $V_m$ )	17.45 V
Courant du point de puissance maximale ( $I_m$ )	2.2 A
Puissance maximale ( $P_m$ )	38 W
Coefficient de température du $I_{sc}$ ( $\alpha$ )	0.0006 A/°C
Coefficient de température du $V_{co}$ ( $\beta$ )	0.004 V/°C

**Tableau III.1** : Spécifications du module solaire AEG PQ10/40/01-02



**Figure III.1** : Schéma équivalent d'une cellule solaire photovoltaïque

L'équation équivalente de ce circuit sera :

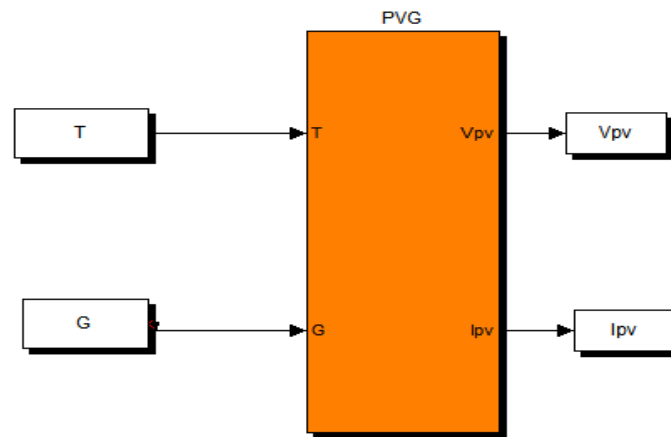
$$I_{PV} = I_{ph} - I_d \quad (III.1)$$

$$I_{PV} = I_{ph} - I_s \left[ \exp \left( \frac{q \cdot (V + R_s I_{pv})}{K \cdot T_c \cdot A} \right) - 1 \right] \quad (III.2)$$

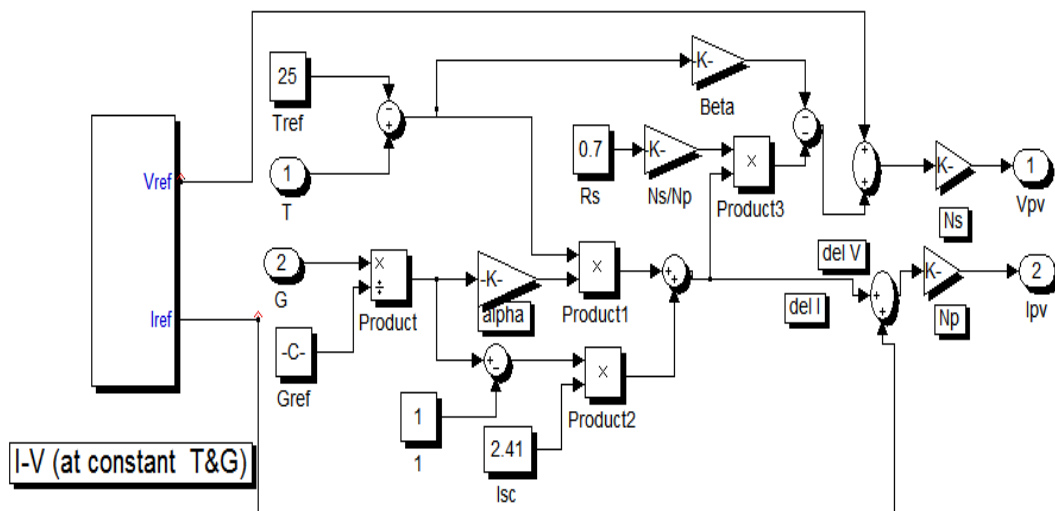
Le photo-courant dépend principalement de l'ensoleillement et de la température de fonctionnement de la cellule, qui est décrite par l'équation suivante :

$$I_{ph} = [I_{sc} + \alpha \cdot (T_c - T_{ref})] \cdot \frac{G}{G_{ref}} \quad (III.3)$$

Le schéma bloc sous l'espace SIMULINK du panneau PV étudié est représenté dans les figures suivantes :



a) Schéma bloc du panneau PV

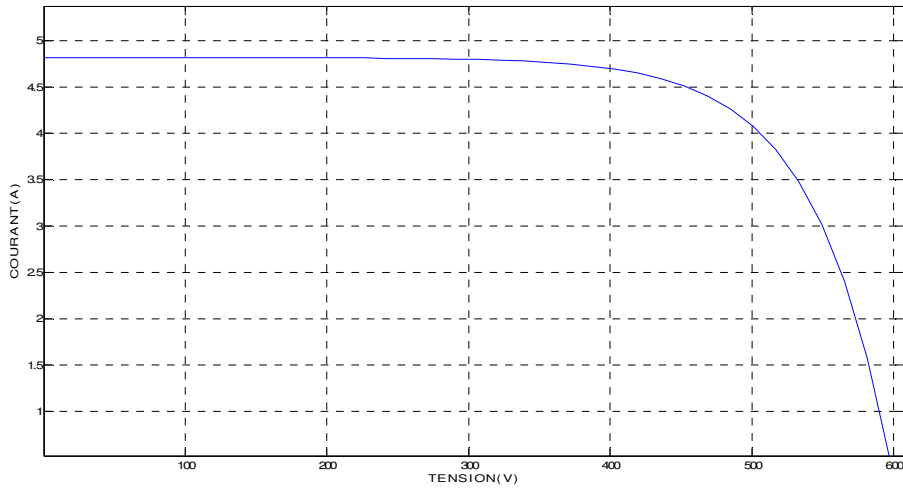


b) Modélisation mathématique du panneau PV

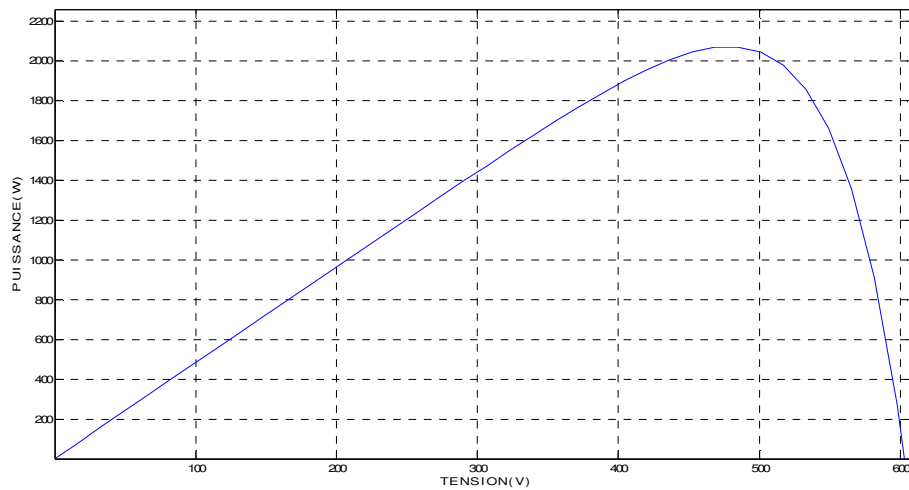
Figure III.2 : Modèle de simulation du panneau PV sous MALAB/SIMULINK

### III.2.1. Simulation du Panneau PV à éclairage et température constante

A température et éclairage constants, et particulièrement aux conditions standards ( $G=1000 \text{ W/m}^2$ ,  $T=25^\circ\text{C}$ ) et par la mise en série de 27 modules et 2 en parallèles. La caractéristique ( $I_{PV}=f(V_{PV})$ ) et ( $P_{PV}=f(V_{PV})$ ) du panneau sont successivement représentées par la figure III.3.



a) Caractéristique I-V



b) Caractéristique P-V

**Figure III.3 :** Caractéristique (Courant-Tension) et (Puissance-Tension) du Panneau PV

### III.2.2. Simulation du Panneau PV à éclairement et température variables

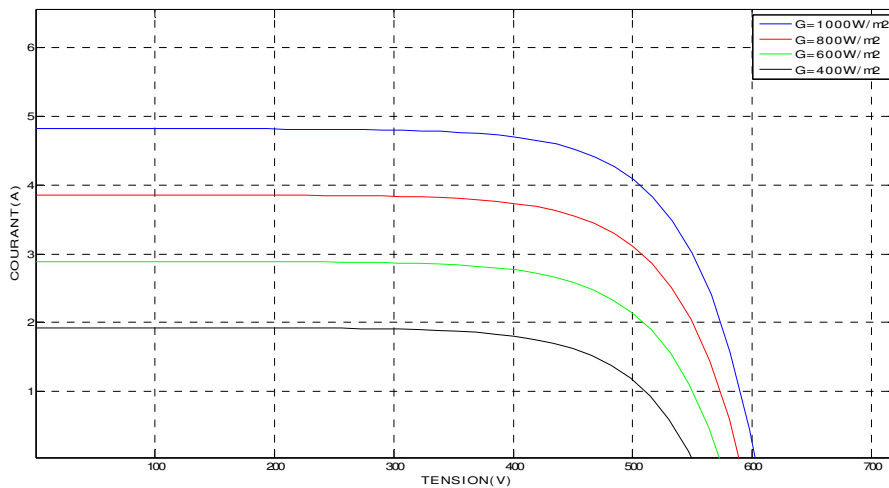
Afin d'observer l'influence des conditions externes, de l'éclairement et de la température ( $G$ ,  $T$ ) sur les caractéristiques  $I_{pv}=f(V_{pv})$  et  $P_{pv}=f(V_{pv})$ , toujours en gardant 27 modules en série et 2 en parallèle, nous avons adopté la méthode suivante :

- Pour visualiser l'influence de l'éclairement, on fixe la température ambiante ( $25^{\circ}\text{C}$ ) et on fait varier l'éclairement dans une gamme suffisante.

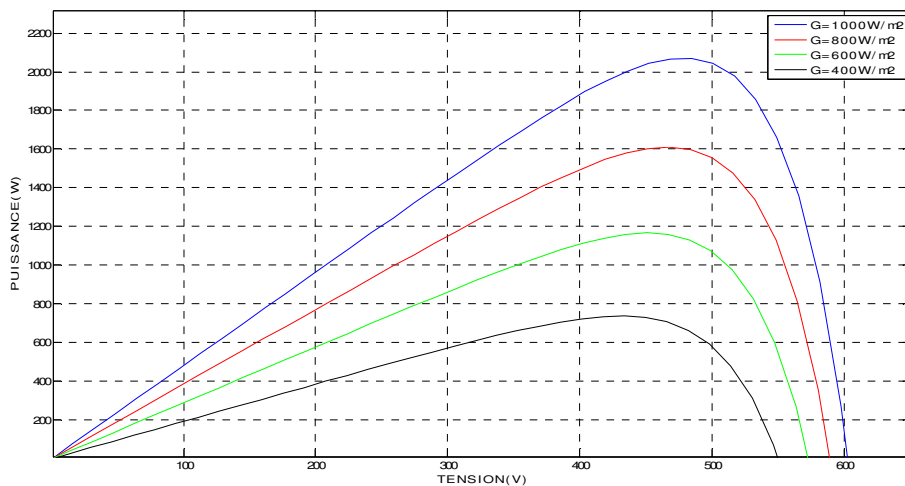
- Pour un éclairement constant ( $G=1000 \text{ W/m}^2$ ) nous ferons varier la température afin de voir l'influence de celle-ci sur les caractéristiques du Panneau PV.

### III.2.2.1. Influence de l'éclairement $G$ sur les caractéristiques $I_{pv}=f(V_{pv})$ et $P_{pv}=f(V_{pv})$

Dans cette partie, en faisant varier l'éclairement  $G$  pour des valeurs entre  $G=400 \text{ W/m}^2$  et  $G=1000 \text{ W/m}^2$  avec un pas de  $200 \text{ W/m}^2$  et en gardant la température à sa valeur standard ( $T=25^\circ\text{C}$ ), nous obtenons les caractéristiques (I-V et P-V) représentées dans la figure III.4.



a) Caractéristique I-V



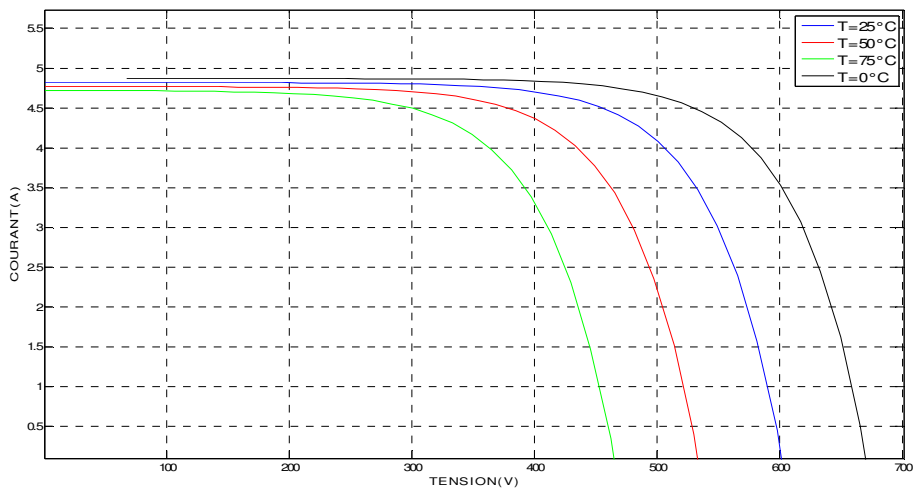
b) Caractéristique P-V

**Figure III.4 :** Influence de l'éclairement  $G$  sur les caractéristiques  $I_{pv}=f(V_{pv})$  et  $P_{pv}=f(V_{pv})$

La figure III.4 montre qu'à une température constante ( $T=25^{\circ}\text{C}$ ), le courant subit une variation importante, mais par contre la tension varie légèrement. Cela implique que le courant de court circuit est une fonction linéaire proportionnelle de l'éclairement alors que la tension de circuit ouvert est une fonction logarithmique. Par conséquent la caractéristique  $P(V)$  subit naturellement une influence car c'est le produit du courant et de la tension et on remarque que le point de puissance maximale change.

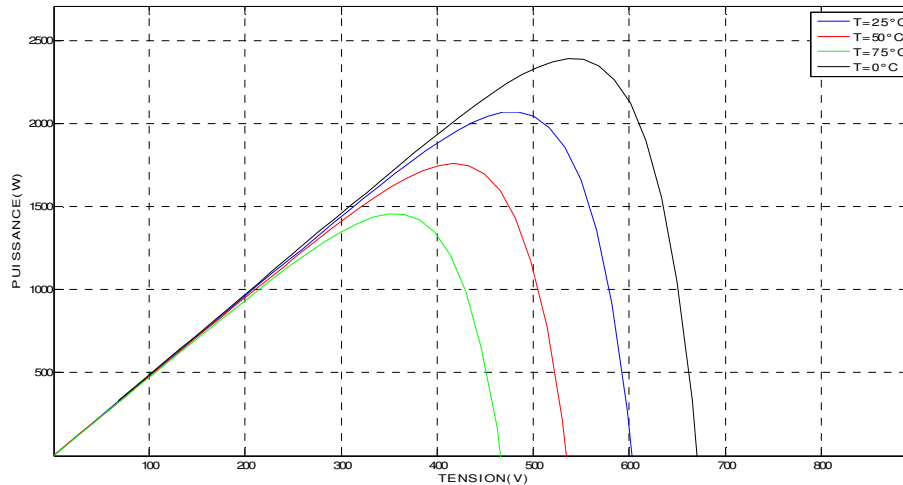
### III.2.2.2. Influence de la température $T$ sur les caractéristiques $I_{pv}=f(V_{pv})$ et $P_{pv}=f(V_{pv})$

Pour qu'on puisse visualiser clairement l'influence de la température sur les caractéristiques du panneau, il est nécessaire d'insérer plusieurs modules en série pour augmenter la tension délivrée, ensuite en maintenant l'éclairement  $G$  à une valeur fixe ( $G=1000 \text{ W/m}^2$ ) et en variant la température entre une plage de  $0^{\circ}\text{C}$  à  $75^{\circ}\text{C}$  avec un pas de  $25^{\circ}\text{C}$ , les caractéristiques sont représentées dans la figure III.5.



a) Caractéristique I-V





b) Caractéristique P-V

**Figure III.5 :** Influence de la température  $T$  sur les caractéristiques  $I_{pv}=f(V_{pv})$  et  $P_{pv}=f(V_{pv})$

On constate d'après la figure III.5 que la tension à vide  $V_{co}$  diminue avec l'augmentation de la température. Le courant de court-circuit, par contre, augmente légèrement avec la température du panneau PV. Tout de même on peut remarquer que l'augmentation de la température se traduit par une diminution de la puissance PV délivrée et un changement du point de puissance maximale.

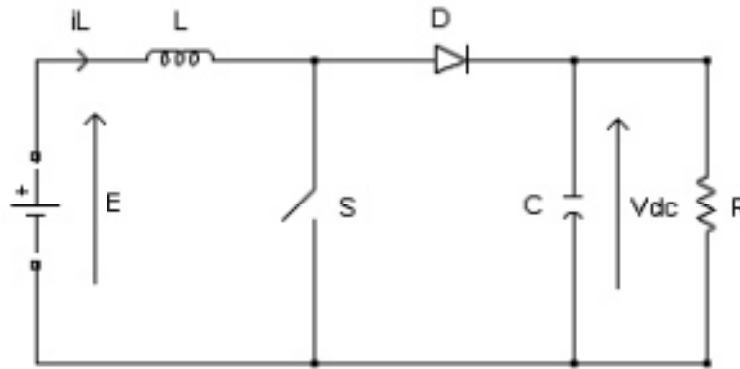
### III.3. Modélisation des convertisseurs statiques DC-DC

Les convertisseurs DC-DC constituent une partie assez importante de la chaîne de conversion. Ils sont utilisés largement dans les connexions à des batteries d'accumulateurs, les systèmes photovoltaïques, les éoliennes, les systèmes hybrides. Ces convertisseurs servent à adapter la tension d'entrée d'un système par rapport à la tension de sortie désirée.

Pour de diverses simulations dans les systèmes des énergies renouvelables, des modèles précis et exacts de hacheur parallèle et de hacheur Buck-Boost sont requis [37].

#### III.3.1. Modèle mathématique du convertisseur Boost

On obtient le modèle mathématique de l'hacheur parallèle par l'application des lois de Kirchhoff sur le schéma de base de celui-ci, représenté dans la figure III.6 et par rapport au régime de fonctionnement et la condition de l'interrupteur S.



**Figure III.6** : Schéma de principe de l'hacheur parallèle [37]

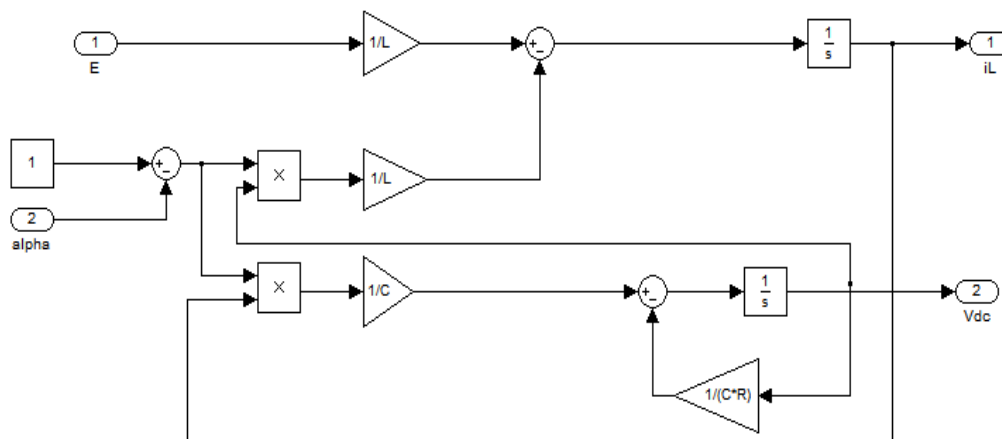
Les équations dynamiques du hacheur Boost seront données comme suit [37] :

$$L \frac{di_L}{dt} = E - V_{dc}(1 - u) \quad (III.4)$$

$$C \frac{dV_{dc}}{dt} = i_L(1 - u) - \frac{V_{dc}}{R} \quad (III.5)$$

Où  $i_L$  est le courant dans la bobine  $L$ ,  $E$  est la tension d'entrée,  $V_{dc}$  est la tension de sortie et  $u$  est la commande. Ainsi les paramètres du système sont : l'inductance de la bobine  $L$  en [H], la capacité du condensateur  $C$  en [F] et la résistance de la charge  $R$  en [ $\Omega$ ]. Les variables d'état sont le courant dans la bobine et la tension aux bornes du condensateur. Le signal de contrôle  $u$  est compris dans le domaine discret de  $\{0;1\}$  et il indique l'état de l'interrupteur  $S$  : ouvert pour 0 et fermé pour 1 [37].

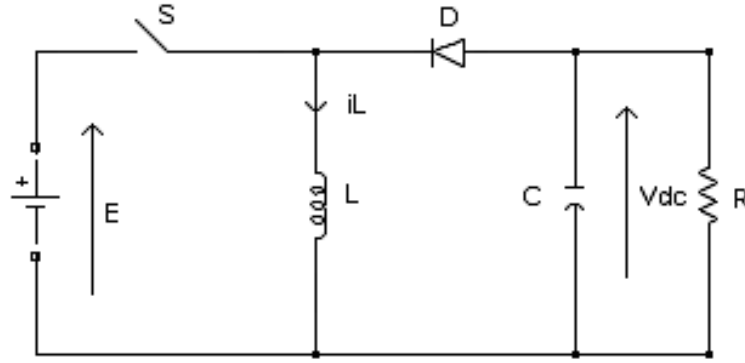
La figure III.7 représente la réalisation SIMULINK du convertisseur Boost :



**Figure III.7** : Réalisation SIMULINK du modèle mathématique de convertisseur Boost

### III.3.2. Modèle mathématique du convertisseur Buck-Boost

Comme l'hacheur Boost, la présentation mathématique de l'hacheur série-parallèle sera également par des équations en prenant compte de l'état de l'interrupteur  $S$ , ainsi comme il est démontré dans la figure III.8 [37] :



**Figure III.8** : Schéma de principe du convertisseur Buck-Boost [37]

$$L \frac{di_L}{dt} = uE + V_{dc}(1 - u) \quad (III.6)$$

$$C \frac{dV_{dc}}{dt} = -i_L(1 - u) - \frac{V_{dc}}{R} \quad (III.7)$$

En régime interrupteur passant, S est égal à 1, la diode est bloquée et les équations dans ce cas sont :

$$L \frac{di_L}{dt} = uE \quad (III.8)$$

$$C \frac{dV_{dc}}{dt} = -\frac{V_{dc}}{R} \quad (III.9)$$

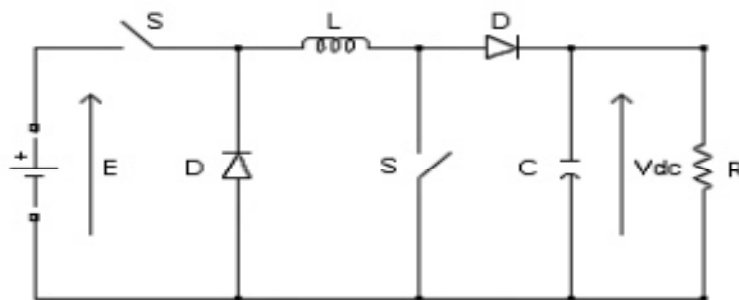
Lorsque l'interrupteur est bloqué, S est égal à 0 et la diode conduit. Les équations sont [36]:

$$L \frac{di_L}{dt} = V_{dc} \quad (III.10)$$

$$C \frac{dV_{dc}}{dt} = -i_L - \frac{V_{dc}}{R} \quad (III.11)$$

### III.3.3. Modèle mathématique du convertisseur Buck-Boost non inverseur

Si l'application exige que la tension de sortie ne soit pas inversée, une configuration en cascade du convertisseur Buck et du convertisseur Boost, avec un interrupteur complémentaire peut être effectuée comme est affiché dans la figure III.9 [37].



**Figure III.9** : Schéma de principe du convertisseur non inverseur Buck-Boost [37]

Le modèle de ce convertisseur peut être obtenu directement en appliquant la même procédure pour le convertisseur Buck-Boost, ne modifiant que le rapport des tensions entrée-sortie à  $V_{dc}/E=-u/(1-u)$ . Ainsi les équations pour ce modèle seront [37] :

$$L \frac{di_L}{dt} = uE - V_{dc}(1 - u) \quad (III.12)$$

$$C \frac{dV_{dc}}{dt} = i_L(1 - u) - \frac{V_{dc}}{R} \quad (III.13)$$

La réalisation SIMULINK du convertisseur Buck-Boost inverseur et non inverseur, est présentée dans la figure III.9 :

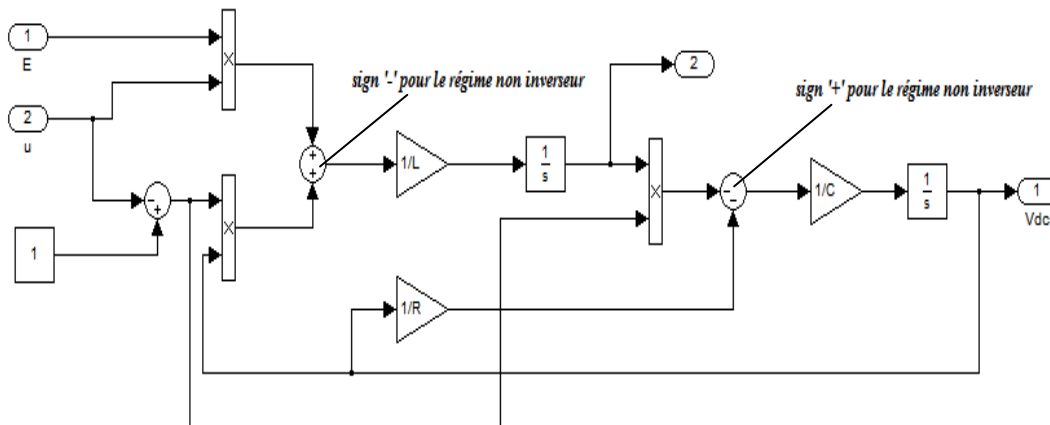
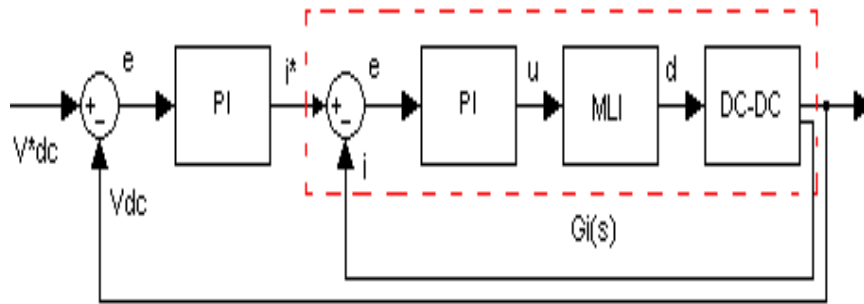


Figure III.10 : Schéma SIMULINK du convertisseur Buck/Boost

### III.3.4. Asservissement des convertisseurs DC-DC

La stratégie de commande est choisit afin d'assurer une tension constante à la sortie des convertisseurs. Un contrôleur linéaire à cause de sa simplicité est envisagé. Deux correcteurs PI en cascade sont utilisés et alors deux boucles de commande sont réalisées. La boucle externe de tension compare la valeur de référence de la tension et la valeur mesurée et impose une référence du courant. La boucle interne de courant fait une comparaison entre la référence et la valeur réelle du courant et l'erreur est corrigée pour donner le rapport cyclique. Un modulateur MLI transforme le rapport en une commande par impulsions 0 ou 1 du convertisseur [37].

Le schéma de principe de cet asservissement est représenté dans la figure suivante :



**Figure III.11** : Schéma de principe de l'asservissement des convertisseurs [37]

Soit  $G(s)$  la fonction de transfert en boucle ouverte, elle peut être exprimée par :

$$G(s) = G_I(s)G_{PI}(s) \quad (III. 14)$$

Les fonctions de transfert  $G_{PI}(s)$  et  $G_I(s)$  sont données [37]:

$$G_{PI}(s) = K_P + \frac{1}{sT_i} \quad (III. 15)$$

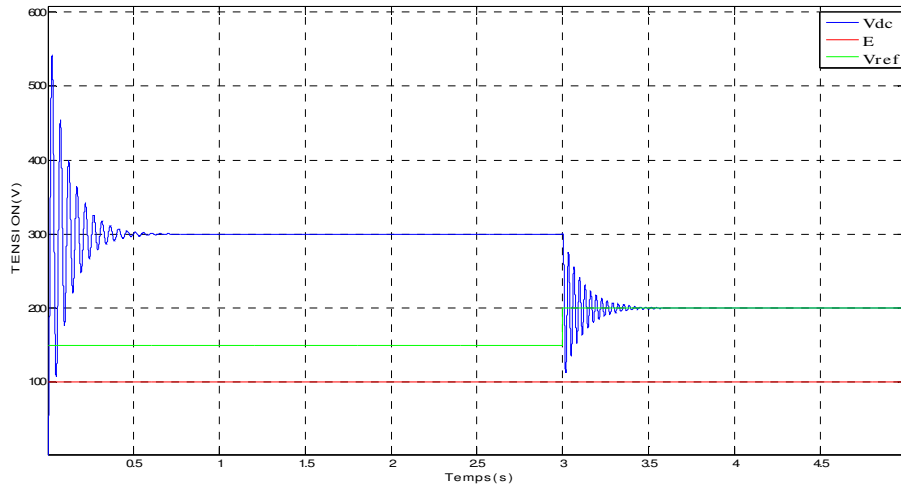
$$G_I(s) = \frac{1}{1 + sT} \quad (III. 16)$$

### III.3.5. Résultats de simulations

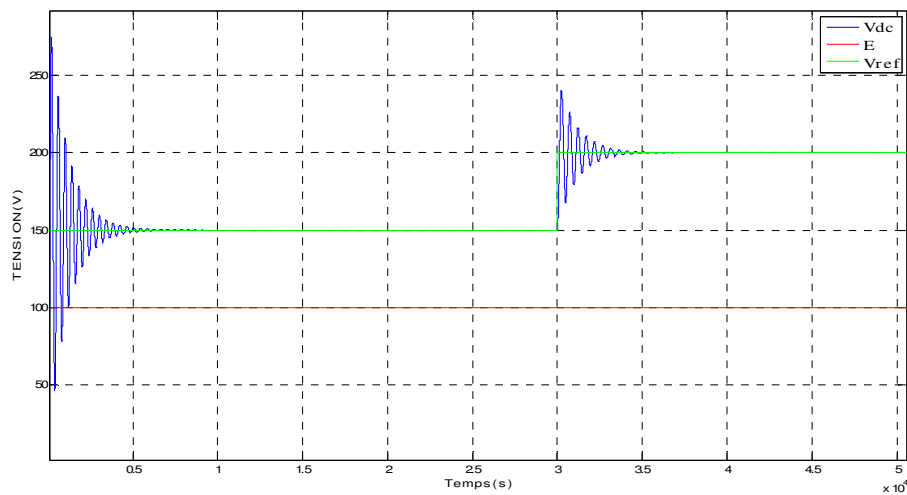
Les modèles des convertisseurs Boost et Buck-Boost non inverseur, réalisés en SIMULINK sont simulés avec une tension d'entrée constante  $E=100$  V, et une tension de référence qui représente la tension désirée, qui varie de 150V à 200V pendant 3s. Dans un premier temps on effectue les simulations sans asservissement de tension et courant, ainsi le rapport cyclique  $\alpha$  sera :  $\alpha=(1-E/V_{ref})$  pour l'hacheur Boost et  $\alpha=(V_{ref}/(E+V_{ref}))$  pour l'hacheur Buck-Boost. Les convertisseurs sont aussi caractérisés par :

- Inductance d'entrée ( $L=6$  mH).
- Capacité de sortie ( $C=1100$   $\mu$ F).
- Charge résistive ( $R=50$   $\Omega$ ).

Les formes des courbes de tension et du courant sans asservissement soit pour le convertisseur Boost ou Buck-Boost non inverseur, sont représentées dans les figures ci-dessous :



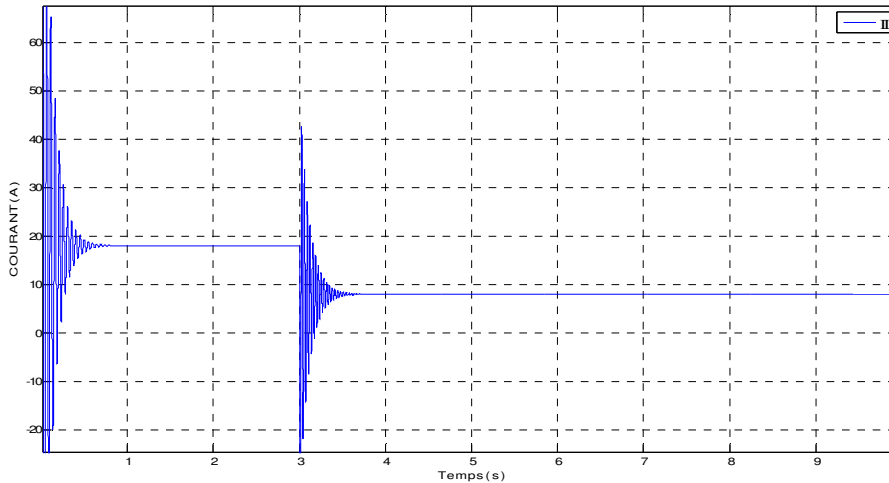
a) Convertisseur Boost



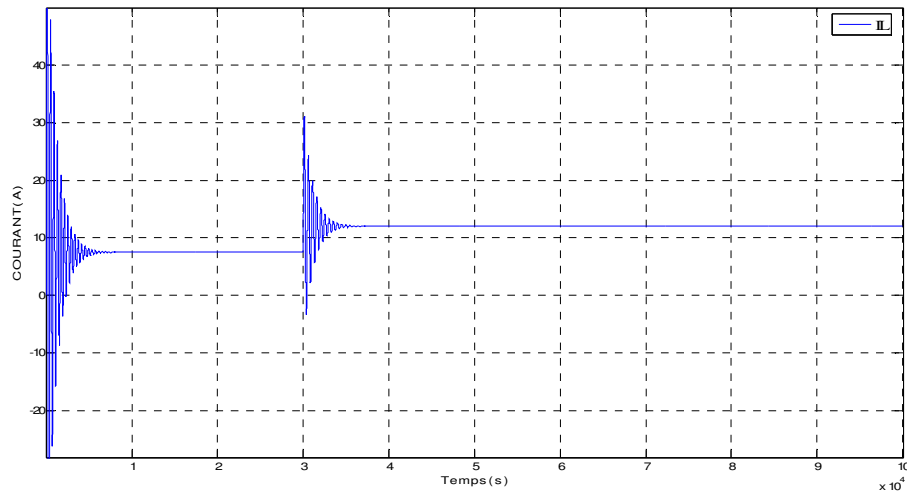
b) Convertisseur Buck-Boost non inverseur

**Figure III.12** : Courbes de tensions sans asservissement

Sans asservissement, on remarque que les courbes des tensions de sortie pour les deux convertisseurs, passent au début de la simulation par un régime transitoire dans une courte durée d'environ 0.5 s avant de se stabiliser à une valeur fixe. La même chose à l'instant 3s lors du changement de  $V_{ref}$ , un nouveau régime transitoire apparaît mais moins important que le premier, ainsi c'est le comportement des convertisseurs sans asservissement.



a) Convertisseur Boost

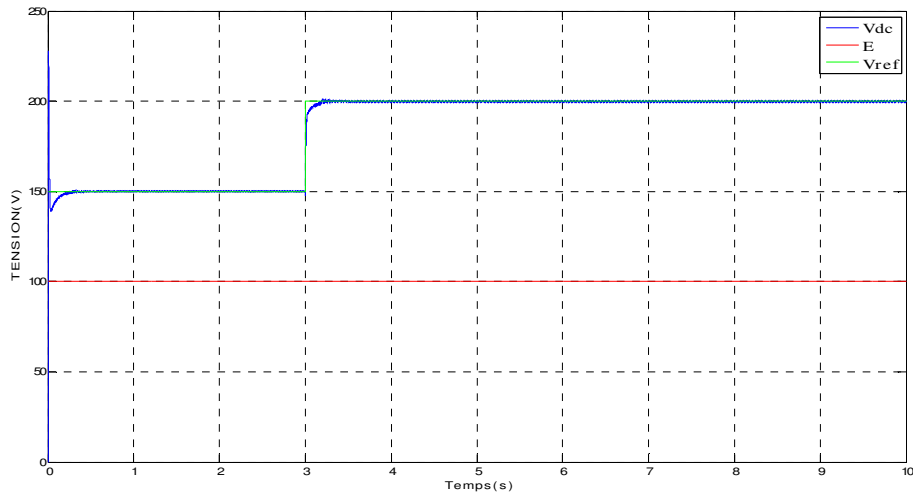


b) Convertisseur Buck-Boost non inverseur

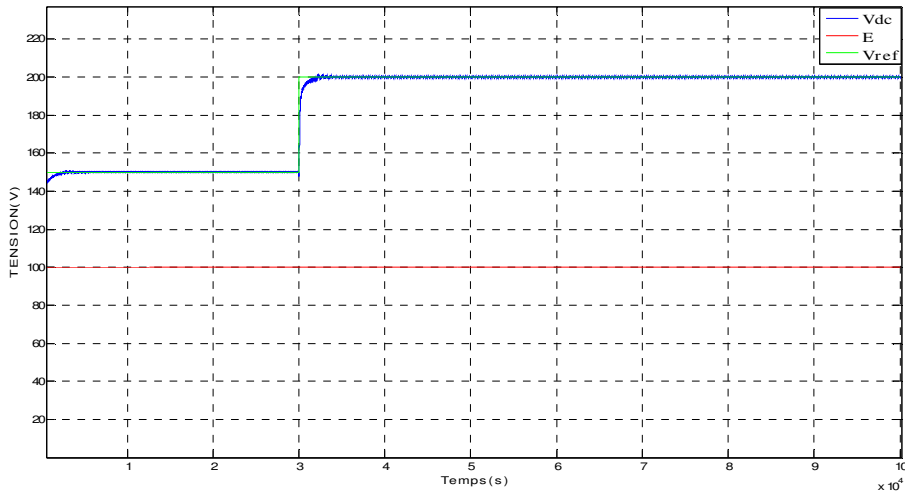
**Figure III.13 :** Courbes de courants sans asservissement

La figure III.13 ci-dessus, nous donne la même remarque que celle des tensions, et nous donne une idée sur les performances des modèles dynamiques des convertisseurs sans contrôleur pour différents changements de la tension de la consigne.

On réalise dans les simulations suivantes les mêmes modèles des convertisseurs avec les mêmes valeurs de  $E$  et  $V_{ref}$ , sauf dans celles-ci on va procéder à un asservissement des courants et des tensions par l'utilisation d'un correcteur PI ayant les caractéristiques : ( $K_p=0.25$  et  $T_i=0.25$ ), ainsi une commande MLI qui va mettre le rapport cyclique  $\alpha$  des convertisseurs sous forme d'impulsions.



a) Convertisseur Boost

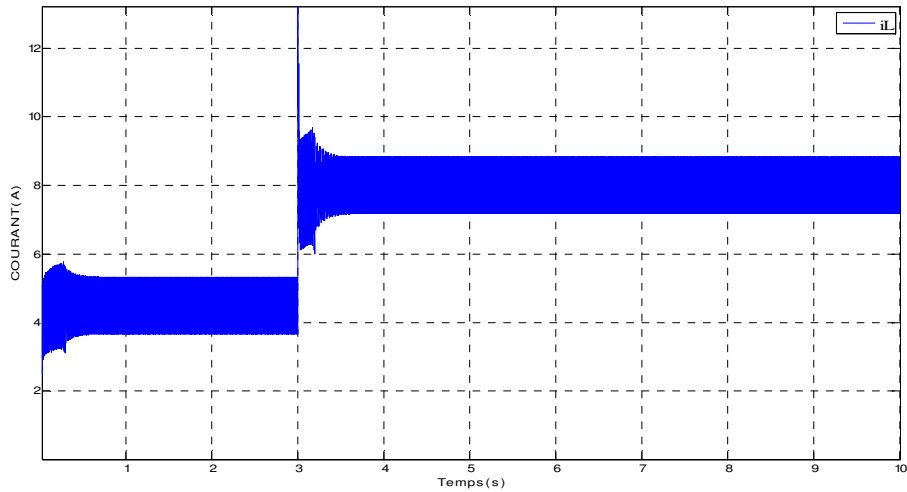


b) Convertisseur Buck-Boost non inverseur

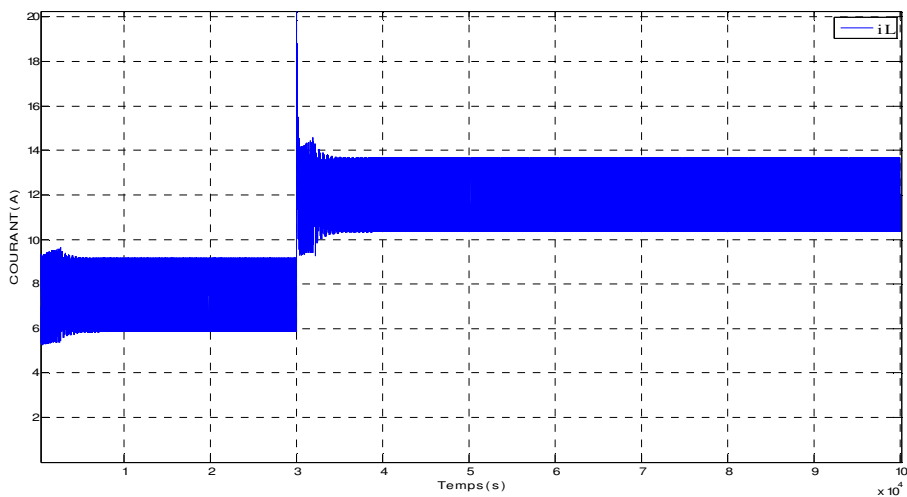
**Figure III.14 :** Courbes de tensions avec asservissement

D'après la figure ci-dessus, on peut constater que les allures des tensions de sortie des convertisseurs sont bien réglées, et par rapport aux résultats précédents, on observe aussi l'absence du régime transitoire, soit au début de la simulation ou lors du changement de la tension de référence avec un temps de réponse d'environ 0.4s ce qui prouve l'efficacité du correcteur PI.





a) Convertisseur Boost



b) Convertisseur Buck-Boost non inverseur

**Figure III.15** : Courbes de Courants avec asservissement

#### III.4. Commande MPPT

La commande MPPT (Maximum Power Point Tracking) est une commande essentielle pour un fonctionnement optimal du système photovoltaïque. Le principe de cette commande est basé sur la variation automatique du rapport cyclique  $\alpha$  de l'hacheur en l'amenant à la valeur optimale de manière à maximiser la puissance délivrée par le panneau PV [38].

De nombreux algorithmes existent dans la pratique selon les critères des systèmes PV utilisés. Pour notre simulation par la suite, on a choisit de présenter et d'étudier l'algorithme perturber et observer (P&O) qui est le plus commode pour cette simulation.

### III.4.1. Algorithme perturbation et observation (P&O)

Le principe de cet algorithme est d'effectuer une perturbation sur la tension du panneau PV tout en agissant sur le rapport cyclique  $\alpha$ . En effet, suite à cette perturbation, on calcule la puissance fournie par le panneau PV à l'instant  $k$ , puis on la compare à la précédente de l'instant  $(k-1)$ . Si la puissance augmente, on s'approche du point à maximum de puissance (PMP) et la variation du rapport cyclique est maintenue dans le même sens. Au contraire, si la puissance diminue, on s'éloigne du PMP. Alors, on doit inverser le sens de la variation du rapport cyclique [38].

L'algorithme P&O est un algorithme classique et simple. En générale, cet algorithme dépend fortement des conditions initiales et il présente des oscillations autour de la valeur optimale. L'inconvénient majeur de cet algorithme est son mauvais comportement suite à un changement brusque de l'éclairement.

Les figures ci-dessous représentent à la suite, l'organigramme de l'algorithme P&O et le schéma de sa simulation sur MATLAB/SIMULINK.

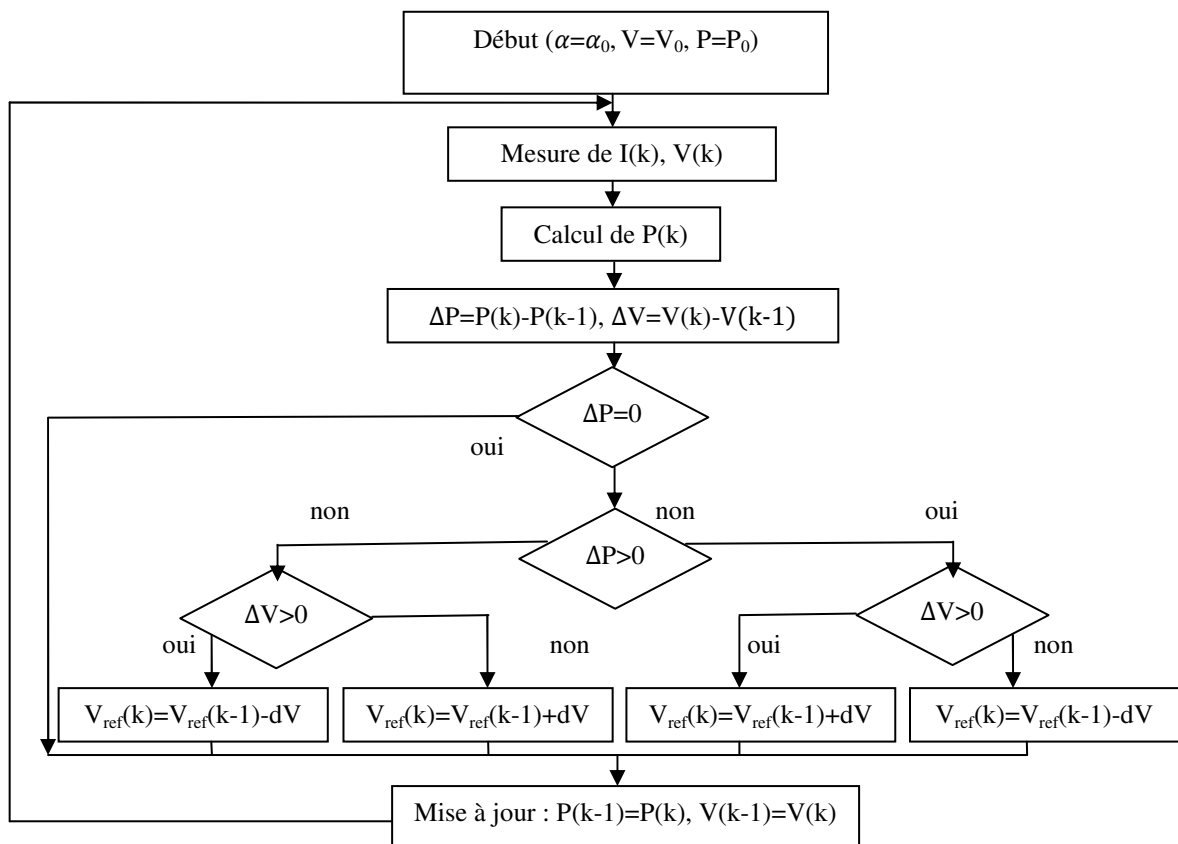


Figure III.16 : Organigramme de l'algorithme P&O

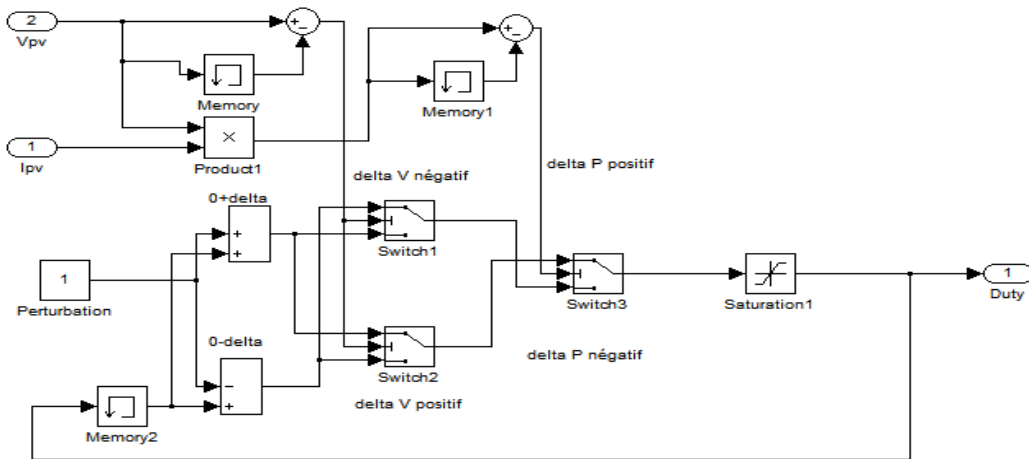


Figure III.17 : Schéma de simulation de la commande MPPT (P&O)

### III.5. Modélisation de l'onduleur triphasé

Un convertisseur DC/AC (onduleur de tension) est essentiellement utilisé pour fournir une tension ou un courant alternatif afin d'assurer l'alimentation en énergie des charges critiques (micro-ordinateur, station de télécommunication...) pendant la coupure du réseau électrique ou une alimentation permanente pour les systèmes autonomes (centrales photovoltaïques, engins aérospatiaux,...) [39].

Les trois principaux éléments qui constituent un onduleur sont les suivants:

- Source de tension continue (par exemple: batterie) ;
- Convertisseur DC/AC ;
- Filtre LC ou L.

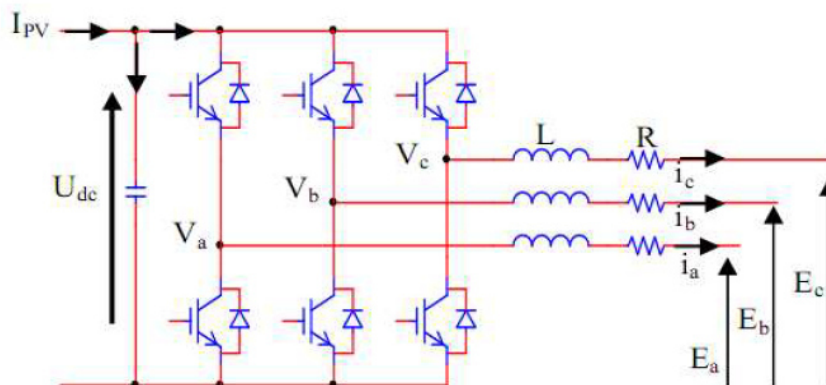


Figure III.18 : Schéma équivalent d'un onduleur avec filtre L [39]

### III.5.1. Stratégie de Commande de l'onduleur

La structure du système de commande de l'onduleur peut être séparée en deux sous-systèmes ayant des dynamiques différentes : le système rapide lié aux courants et le système lent qui est associé à la tension continue. De ce fait, une synthèse de deux régulateurs pour la boucle des courants, et pour la boucle externe de la tension continue peut se faire. La performance de la boucle des courants joue un rôle essentiel dans la performance globale du système ; c'est pourquoi une commande ayant une réponse rapide et un bon comportement en état stationnaire s'avère nécessaire. Pour le réglage de la tension continue, l'utilisation de commandes classiques, en particulier du type proportionnel intégral, semble être suffisante pour obtenir des performances acceptables.

Le but de la commande est de gérer l'ordre d'ouverture et de fermeture des interrupteurs de sorte que la tension créée par l'onduleur soit la plus proche de la tension de référence [39].

### III.5.2. Commande par MLI

Ce type de modulation est souvent utilisé pour générer une tension triphasée à fréquence et amplitude variables. Le principe de commande de l'onduleur réside dans l'utilisation d'un comparateur de tensions. Ce comparateur superpose à trois tensions sinusoïdales de référence une tension de forme triangulaire (porteuse). La fréquence des trois sinusoïdes de référence correspond à celle des tensions souhaitées à la sortie de l'onduleur. Les intersections entre les sinusoïdes et l'onde triangulaire détermine l'allumage ou l'extinction des thyristors (ou des transistors de puissance) selon le cas [39].

La méthode basée sur la MLI met en œuvre d'abord un régulateur qui, à partir de l'écart entre le courant et sa référence, détermine la tension de référence de l'onduleur (modulatrice). Cette dernière est ensuite comparée avec un signal en dent de scie à fréquence élevée (porteuse). La sortie du comparateur fournit l'ordre de commande des interrupteurs.

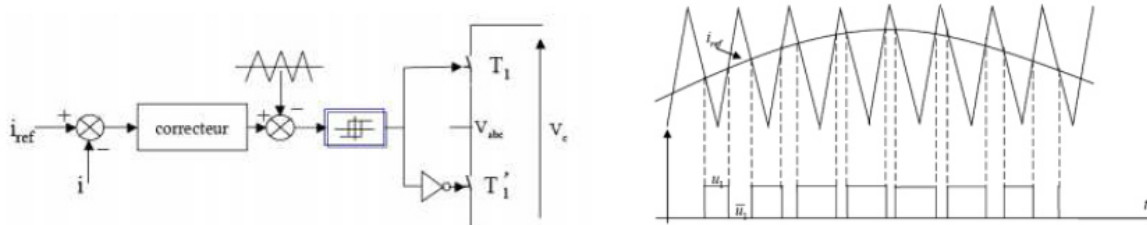


Figure III.19 : Commande des interrupteurs et contrôle de courant par MLI [39]

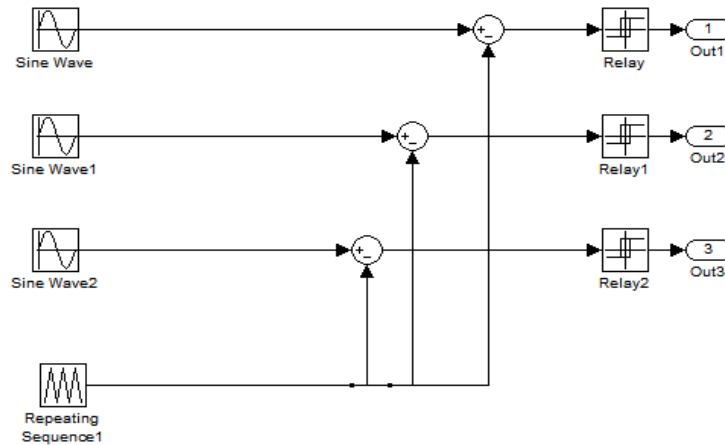


Figure III.20 : Schéma SIMULINK de la Commande MLI

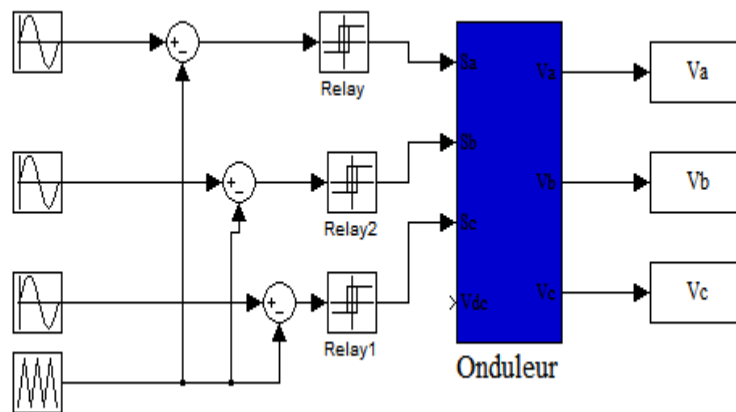


Figure III.21 : Schéma SIMULINK de l'onduleur triphasé commandé par une MLI

### III.6. Modélisation du réseau triphasé BT

Le réseau triphasé à trois grandeurs sinusoïdales de même fréquence, déphasées entre elles de  $2\pi/3$  et ayant la même valeur efficace, forment ainsi un système triphasé équilibré.

Le réseau de distribution électrique, 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  $(U_{ab} \ U_{bc} \ U_{ca})$  [18].

$$\begin{cases} V_a = V_m \sin(\omega t) \\ V_b = V_m \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) \\ V_c = V_m \sin\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right) \end{cases} \quad (III.17)$$

$$\begin{cases} U_{ab} = V_a - V_b \\ U_{bc} = V_b - V_c \\ U_{ca} = V_c - V_a \end{cases} \quad (III.18)$$

Pour la simulation, on va utiliser un réseau BT (220V/380V) avec une fréquence de 50 Hz et une résistance et inductance de ligne de :  $R=1\Omega$  et  $L=10mH$ .



Figure III.22 : Schéma de simulation du réseau BT [18]

### III.7. Simulation globale d'un système PV raccordé au réseau

Dans cette simulation, on a utilisé un champ photovoltaïque constituant 27 panneaux en série et 2 en parallèle permettant d'avoir une tension de réseau de 220V efficace raccordé à un hacheur Buck-Boost caractérisé par : ( $L=6mH$ ,  $C=1100\mu F$ ) et commandé en MPPT de type P&O et un onduleur triphasé commandé en MLI.

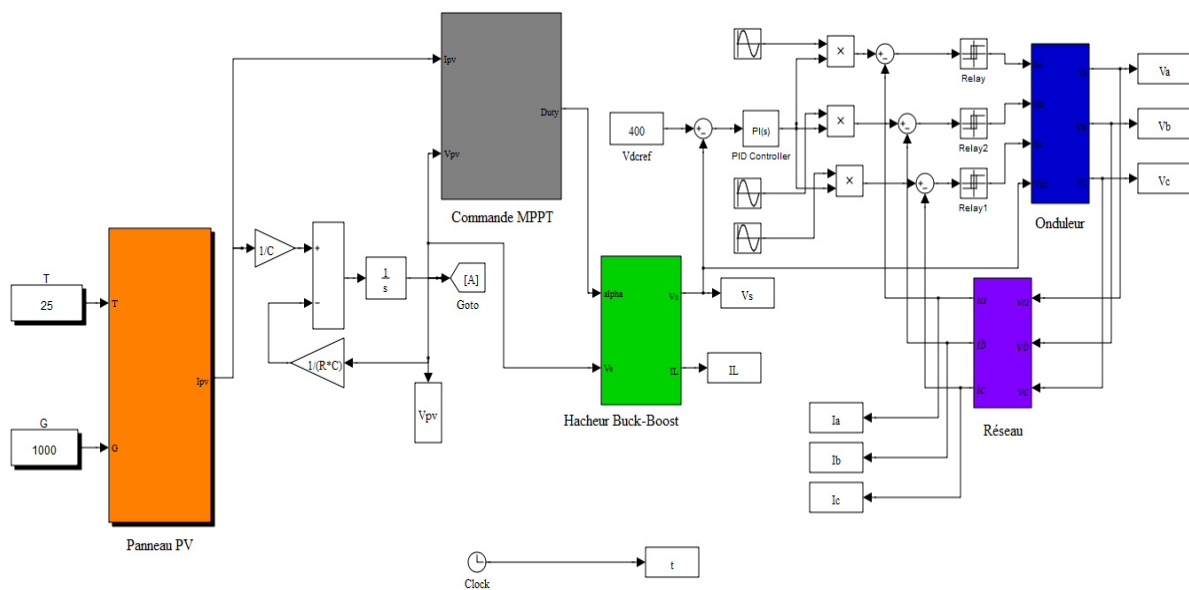


Figure III.23 : Schéma de simulation globale du système PV raccordé au réseau

### III.7.1. Résultats des simulations

Dans le début de cette simulation, on maintient les conditions externes sur les valeurs STC tel que : ( $G=1000 \text{ W/m}^2$ ,  $T=25 \text{ °C}$ ), et on visualise les courbes des tensions du bus continu du convertisseur DC-DC, et celle de sortie de l'onduleur ainsi la courbe du courant du réseau.

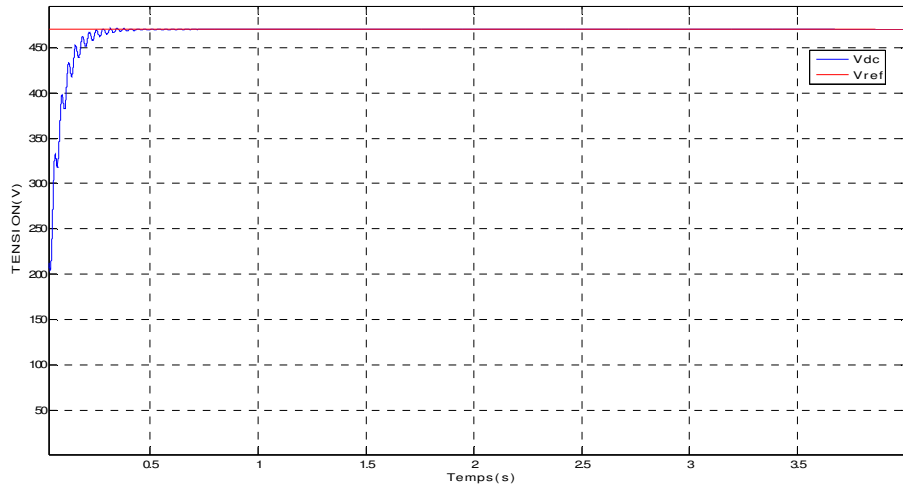


Figure III.24 : Courbes de Tensions d'entrée et de sortie du convertisseur Buck-Boost

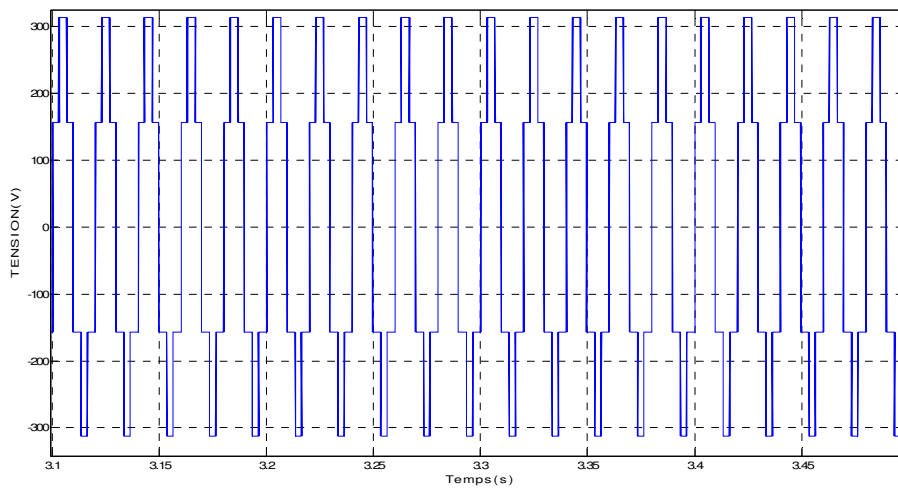
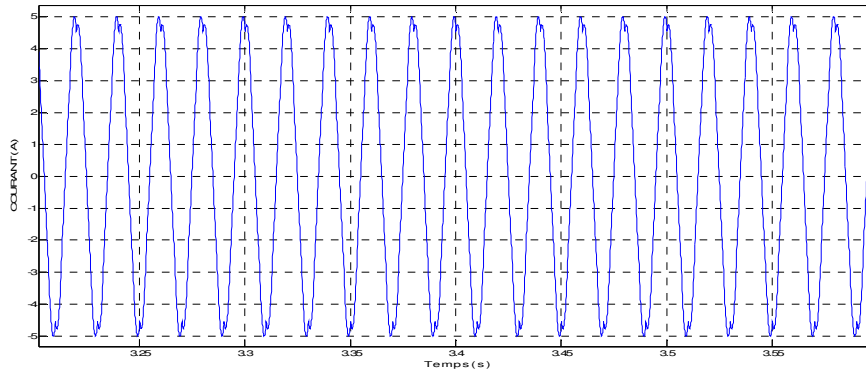


Figure III.25 : Tension de sortie de l'onduleur de la phase a



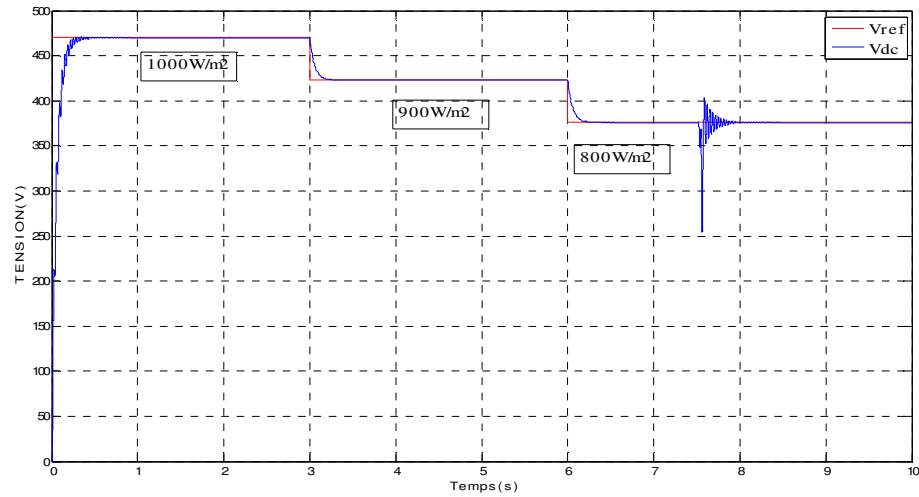
**Figure III.26 :** Courant du réseau de la phase a

### III.7.2. Interprétation Résultats

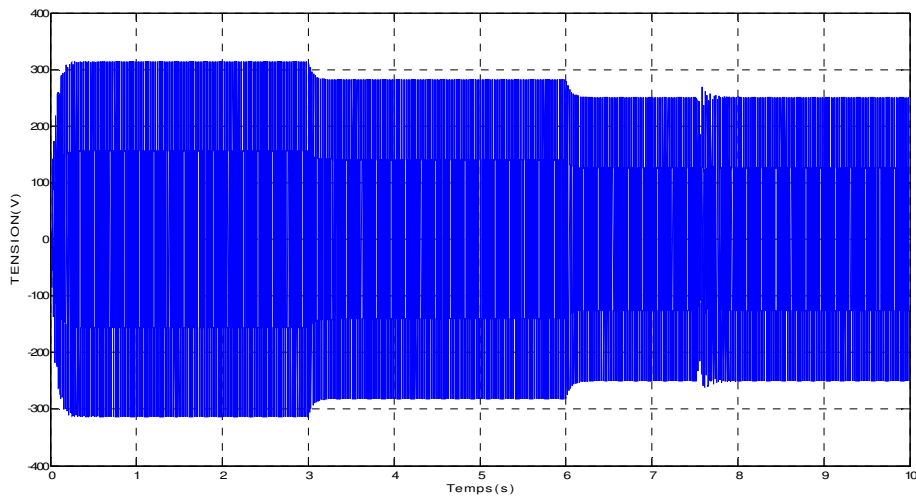
- **Figure III.24 :** D'après les résultats de simulation obtenus, on remarque que la poursuite du point de puissance maximale basée sur l'algorithme de P&O, est performante soit du côté poursuite du point de puissance maximale du système photovoltaïque, soit du côté de régler la tension désirée de sortie de l'hacheur ; car après un régime transitoire causé par l'accumulation d'énergie dans la bobine, la tension de sortie du convertisseur DC-DC se stabilise sur la valeur de tension d'entrée issue du système PV.
- **Figure III.25 :** Dans cette figure, on observe que l'onduleur commandé par une commande MLI impose à sa sortie un système de tensions sous forme de créneaux modulés en largeur d'impulsions. Des tensions qui sont incompatibles avec les tensions sinusoïdales du réseau.
- **Figure III.26 :** Malgré que les tensions injectées au réseau aient la forme représentée dans la figure III.25, cela n'a pas empêché de fournir au réseau des courants quasi-sinusoïdaux comme il est montré dans la figure III.26, cela revient à l'inductance placée entre chaque sortie de l'onduleur et une phase du réseau qui joue un rôle de filtre des harmoniques.

Dans la simulation suivante, on va procéder au profil de variation de l'éclairement, par un changement brusque de ses valeurs tel que : de  $1000 \text{ W/m}^2$  à  $900 \text{ W/m}^2$  à l'instant  $t=3\text{s}$  ensuite de  $900 \text{ W/m}^2$  à  $800 \text{ W/m}^2$  à l'instant  $t=6\text{s}$ , et on visualise l'influence sur les courbes des tensions du bus continu et la tension de sortie de l'onduleur.

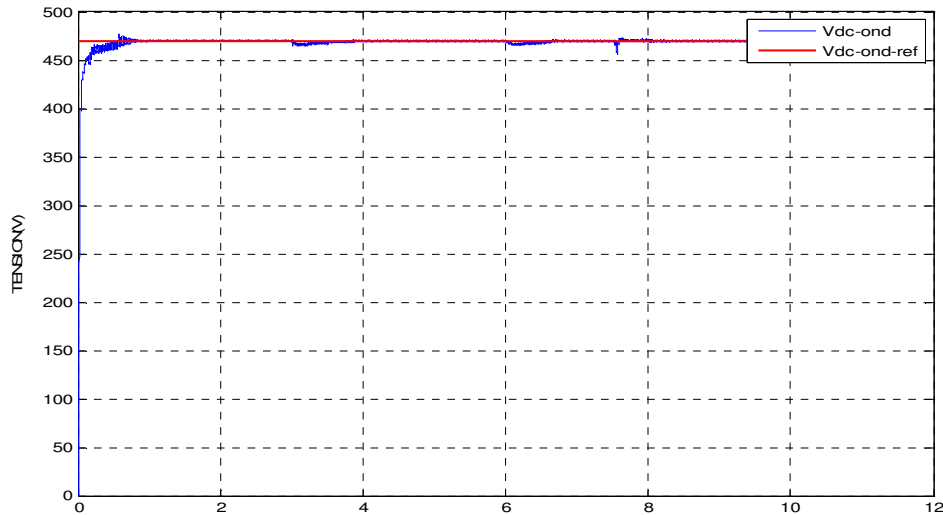




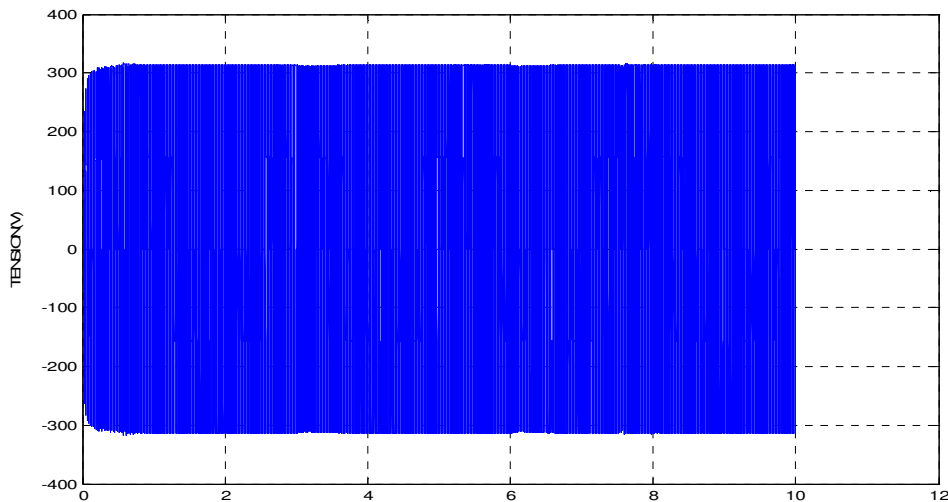
**Figure III.27 :** Courbe de tensions d'entrée et de sortie du convertisseur Buck-Boost avec des changements d'éclairement



**Figure III.28 :** Tension de sortie  $V_a$  de l'onduleur avec des changements d'éclairement sans régulation de la tension d'entrée de l'onduleur



**Figure III.29 :** Tensions d'entrée et de référence de l'onduleur avec des changements d'éclairement.



**Figure III.30 :** Tension de sortie  $V_a$  de l'onduleur avec des changements d'éclairement et la régulation de la tension d'entrée de l'onduleur.

D'après les figures ci-dessus, on peut remarquer que le profil de changement d'éclairement nous montre bien la dynamique de recherche du PPM et la performance de commande utilisée pour l'injection de la puissance extraite du GPV dans le réseau électrique.

La tension du panneau PV ainsi que celle de l'hacheur subissent des diminutions à chaque instant que l'éclairement baisse. C'est tout de même le cas pour la tension de sortie de l'onduleur injectée au réseau, cela va déstabiliser sa tension et provoquer un déséquilibre.

Après la régulation de la tension d'entrée de l'onduleur, de sorte que celle-ci reste invariable avec les changements d'éclairements, nous avons obtenu des tensions d'onduleur de valeur efficace fixe, ce qui permet de les injecter au réseau sans qu'il soit déstabilisé.

### **III.8. Conclusion**

Dans ce dernier chapitre, la simulation globale du système PV raccordé au réseau est mise en application dans l'environnement du logiciel MATLAB/SIMULINK. Tout d'abord, on a étudié un panneau PV de notre choix en caractérisant ses paramètres et son comportement dynamique. Par la suite, on a modélisé les convertisseurs DC-DC et leurs différents types, Ainsi la commande MPPT servant à contrôler la tension des convertisseurs. On a aussi défini la modélisation de l'onduleur triphasé utilisé avec sa commande MLI et la modélisation du réseau BT, pour terminer par la simulation globale du système en le suivant par les résultats obtenus sous formes graphiques et leurs interprétations.

Avec cette étude et ces résultats obtenus, on pourrait envisager l'utilisation de l'ensemble d'un système PV raccordé au réseau dans la pratique sans difficulté, ainsi elle nous aide à dimensionner les différents paramètres constituant l'ensemble du système.

## **Conclusion générale**

L'augmentation des besoins énergétiques mondiaux, et dans un souci du respect de l'environnement, pousse le monde de plus en plus à s'intéresser aux énergies renouvelables. L'intérêt porté aux énergies renouvelables, nous a amené à nous intéresser aux systèmes photovoltaïques connectés au réseau électrique. Ces systèmes utilisent des convertisseurs pour se connecter au réseau électrique et la puissance injectée est fortement variable puisqu'elle est dépendante de l'éclairement et de la température.

Le travail présenté dans ce mémoire concerne la modélisation et simulation de chaque élément constituant le système photovoltaïque raccordé au réseau électrique.

Nous avons débuté par une étude générale sur les systèmes photovoltaïques où nous avons établi les équations régissant le GPV pour chaque modèle électrique équivalent, et nous avons pu observer l'influence des conditions externes sur le fonctionnement électrique de ces GPV et leurs performances.

On a étudié, dans un deuxième chapitre une généralité sur les réseaux électriques, qui seront conçus de recevoir l'énergie injectée par les systèmes photovoltaïques. Ce chapitre qui traite successivement : une description des réseaux électriques, topologie des réseaux, les postes électriques et ses différents types et composants, les anomalies dans les réseaux électriques et enfin leurs différentes protections.

Pour le dernier chapitre, afin de concrétiser notre travail, nous avons procédé à la simulation globale d'un système PV raccordé au réseau, tout en modélisant sous MATLAB/SIMULINK tout les éléments constituant le système, notamment Le GPV, les convertisseurs DC-DC et sa commande MPPT qui représente l'algorithme P&O, les convertisseurs DC-AC et leur commande MLI et aussi on a modélisé le réseau BT utilisé dans cette simulation. Avec le rassemblement de tous ces éléments, on a pu réaliser la totalité d'un système apte à nous donner une vision générale sur le raccordement d'une énergie renouvelable au réseau électrique dans le plan pratique.

Cette étude nous a permis de connaître les problèmes et difficultés des systèmes photovoltaïques connectés au réseau et d'avoir la prise en main du logiciel MATLAB/SIMULINK tant important pour la modélisation.

## Références bibliographiques

- [1] Lakhdara Amira, « Etude de la commande de la puissance et stockage d'un système photovoltaïque », Mémoire de Master, Université Badji Mokhtar-Annaba, 2019.
- [2] Kaddour Fouad, « Systèmes des énergies renouvelables et leurs intégrations dans les réseaux électriques », Thèse de doctorat, Université sciences et technologies-ORAN, 2017.
- [3] Belkaid Abdelhakim, « Conception et implémentation d'une commande MPPT de haute performance pour une chaîne de conversion photovoltaïque autonome », Thèse de Doctorat, Université Ferhat Abbas - Setif 1, 19/10/2015.
- [4] Olivier Richardot, « Réglage Coordonné de Tension dans les Réseaux de Distribution à l'aide de la Production Décentralisée », Thèse de doctorat INPG, 2000.
- [5] Bellouti.A, « Modélisation et commande d'un système photovoltaïque connecté au réseau électrique », Mémoire de Master, Université de M'SILA, Juin 2016.
- [6] Thomas Mambrini, « Caractérisation de panneaux solaires photovoltaïques en conditions réelles d'implantation et en fonction des différentes technologies », Thèse de Doctorat, Université PARIS-SUD, France, 16/12/2014.
- [7] BOUALEM, DENDIB, « Technique conventionnelles et avancée de poursuite MPPT pour des applications photovoltaïques : étude comparative », Mémoire de Magister, Université Ferhat Abbas-Sétif, 2007.
- [8] Abdelmalik ZORIG, « Modélisation et commande d'un système de production d'énergie photovoltaïque couplé au réseau triphasé », Mémoire de Master, Université de M'sila, 2011.
- [9] AYAT Yahia, « Système photovoltaïque alimentant un filtre actif de puissance connecté au réseau », Mémoire de Master, Université Ferhat Abbas-Setif, 18/06/2015.
- [10] Energie solaire photovoltaïque.doc / B. Flèche - D. Delagnes / juin 07.
- [11] <https://sites.google.com/site/tpesoleil2012/fayolle/composition-des-rayons>.
- [12] Garah Yaakoub, « Etude d'une chaîne de conversion d'énergie Photovoltaïque raccordée au Réseau électrique », Mémoire de Master, Université Larbi Ben M'Hidi - Oum El Bouaghi, Juin 2015.
- [13] H. Mathieu, "Physique des semi-conducteurs et des composants électroniques", 2<sup>ème</sup> Edition, Masson, 1990.
- [14] S. M. Sze, Physics of semiconductor Devices, second edition, Copyright. C.1981 by John, Wiley and Son, Inc.

- [15] SLAMA Fateh, « Modélisation d'un système multi générateurs photovoltaïques interconnectés au réseau électrique », Mémoire de Magister, Université Ferhat Abbas-Setif, 01/04/2011.
- [16] Yann Pankow, « Etude de l'intégration de la production décentralisée dans un réseau basse tension. Application au générateur photovoltaïque », Thèse de Doctorat de l'Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, Paris, 2004.
- [17] O.Gergaud, « Modélisation énergétique et optimisation économique d'un système de production éolienne et photovoltaïque couplé au réseau et associé à un accumulateur », Thèse de doctorat de l'école normale supérieur de cachant, France, 2002.
- [18] HAMDANI Abderrahmane et KACEM Brahim, « Etude et Simulation de Connexion d'une Centrale Photovoltaïque au Réseau Electrique Triphasé », Mémoire de Master, Université Ahmed Draïa Adrar, 05/06/2018.
- [19] K.G. Deepa, R. Jayakrishnan, K.P. Vi-Jayakumar, C.S. Kartha, V. Ganesan, Sol. Energy 83, 964-968 (2009).
- [20] K.R. Murali, C. Vinothini, K. Srinivasan, Mater. Sci. Semic. Proc. 15, 194-198 (2012).
- [21] A. Antony, "Preparation and characterisation of certain II-VI, I-III-VI semi-conductor thinfilms and transparent conducting oxides", Thèse Doct., Cochin Univ. of Science and Technology, India p. 17 (2004).
- [22] A.Labouret, M.Villoz, Energie solaire photovoltaïque (Le manuel du professionnel), édition DUNOD, Paris(France), aout 2003.
- [23] Abou El-Maaty Metwally Metwally Aly Abd El-Aal, "Modelling and simulation of a photovoltaic fuel cell hybrid system", Thèse de doctorat, Université Kassel, Germany, 2005.
- [24] I. Vechiu, « Modélisation et analyse de l'intégration des énergies renouvelables dans un réseau autonome », Thèse de doctorat de l'université du Havre, 2005.
- [25] Laib Kamel, « Gestion d'énergie dans un réseau intégrant des systèmes à source renouvelable », Mémoire de Master, Université Mohamed Boudiaf - M'sila, 2016.
- [26] LAMINE Miloud, « Etude et modélisation des courants de court-circuit dans les réseaux MT/BT », Mémoire de Master, Université Mohamed Boudiaf – M'sila, 2016.

- [27] H. Benchikh El Hocine, « Les étages Moyenne Tension », Institut de Formation en Electricité et Gaz (IFEG), Centre Ain M'lila, Groupe SONELGAZ, Avril 2004.
- [28] Guillaume RAMI « contrôle de tension auto adaptatif pour des productions décentralisées d'énergies connectées au réseau électrique de distribution», Thèse de doctorat INPG, 2006.
- [29] Lahaçani Narimen, « RÉSEAUX ÉLECTRIQUES », Polycopié de cours UEF 3111, Université A.MIRA-BEJAIA.
- [30] Messad SAIDANI et Nouara HAMMOUCHE, « Paramétrage et réglage d'un relais de protection MICOM P142 du départ 30 kV HTA « SN SEMPAC » issu du poste source THT «OUED-AISSI» », Mémoire de Master, Université Mouloud Mammeri Tizi-Ouzou, 28/09/2015.
- [31] Athmane BOUZIDI, « Modélisation et simulation des réseaux électriques », Cours 1<sup>ière</sup> Année Master Electrotechnique, Université A/Mira-Bejaia.
- [32] Nouioua Mabrouk et Adoui Merwan, « Protection des réseaux électriques HTB en utilisant de relais de distance », Mémoire de Master, Université Mohamed Boudiaf-M'sila, 2017.
- [33] Benmechta.M et Hamlat.A, « Protection des postes HTB/HTA », Centre Universitaire d'Ain Témouchent, Mémoire de MASTER, 2014.
- [34] M. LAMI, « Protection et Surveillance des Réseaux de Transport d'Énergie Électrique », Volume 2, Electricité de France (EDF), février 2003.
- [35] C. PRÉVÉ, « Protection des Réseaux Electriques », Edition HERMES, Paris 1998.
- [36] M'HAMMEDI Hamid, « Amélioration de la stabilité du réseau électrique par l'utilisation des systèmes FACTS », UNIVERSITE d'ADRAR, Mémoire de Master, 2017.
- [37] SPIROV Dimitar, LAZAROV Vladimir, ROYE Daniel, ZARKOV Zahari, MANSOURI Omar, « Modélisation des convertisseurs statiques DC-DC pour des applications dans les énergies renouvelables en utilisant MATLAB/SIMULINK », Université Technique de Sofia, Conférence EF 2009.
- [38] Hanen Abbes, Hafedh Abid, Kais Loukil, Ahmad Toumi, Mohamed Abid, « Etude comparative de cinq algorithmes de commande MPPT pour un système photovoltaïque », National School of Engineering of Sfax, Conférence Internationale des Energies Renouvelables (CIER'13), 2013.
- [39] Bemana ngueouele Yannick, « Modélisation des injections de puissance d'un système PV sur un réseau public », Mémoire de Master, Institut international d'ingénierie de l'eau et de l'environnement, 26/07/2012.

## Résumé

Ce mémoire traite comme objectif de faire une étude sur une énergie renouvelable couplée au réseau électrique. Cette étude fait appel à l'énergie solaire photovoltaïque. Ainsi, dans ce mémoire nous avons modélisé un système photovoltaïque connecté au réseau électrique à travers une chaîne de production composée d'un convertisseur DC-DC de type Buck-Boost utilisant la commande MPPT de type P&O et d'un onduleur triphasé commandé par une MLI de tension. Nous avons réalisé la modélisation globale à l'aide du logiciel Matlab/Simulink, comme nous avons mentionné la tâche de poursuite de la puissance maximale lors des conditions variables d'éclairement.

**Mots clés :** système photovoltaïque, réseau électrique, convertisseur DC-DC, commande MPPT, onduleur triphasé, Modélisation.

## Abstract

This work deals with the objective of carrying out a study on renewable energy coupled to the electricity grid. This study uses solar photovoltaic energy. Thus, in this work we have modeled a photovoltaic system connected to the electrical network through a production chain composed of a DC-DC converter of Buck-Boost type using the MPPT control of the P&O type and of a three-phase inverter DC-AC controlled by a Voltage PWM. We performed the global modeling using Matlab/Simulink software, as we mentioned the task of tracking maximum power under varying lighting conditions.

**Keywords:** photovoltaic system, electrical network, DC-DC converter, MPPT control, three-phase inverter, Modeling.

## الملخص

تتناول هذه المذكرة كهدف رئيسي إجراء دراسة حول الطاقة المتجددة المقترنة بالشبكة الكهربائية. هذه الطاقة المتمثلة في الطاقة الشمسية الكهروضوئية. حيث في هذه الأطروحة، قمنا بنمذجة نظام كهروضوئي متصل بالشبكة الكهربائية من خلال سلسلة إنتاج مكونة من محول DC-DC من نوع Buck-Boost باستخدام نظام التحكم MPPT لنوع P&O وعاكس ثلاثي الطور يتم التحكم فيه بواسطة تقنية PWM. أجرينا النمذجة الكلية باستخدام برنامج Matlab/Simulink، حيث ذكرنا مهمة تتبع الطاقة القصوى في ظل ظروف تغيرات الإضاءة.

**كلمات مفتاحية :** نظام كهروضوئي، الشبكة الكهربائية، محول DC-DC، نظام التحكم MPPT، عاكس ثلاثي الطور، النمذجة.