

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République algérienne démocratique et populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

جامعة عين تموشنت بلحاج بوشعيب

Université -Ain-Temouchent- Belhadj Bouchaib

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département d'Electrotechnique



Projet de fin d'études

Pour l'obtention du diplôme de Master en :

Domaine : SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE

Filière : Electromécanique

Spécialité : Electromécanique

Thème

Modélisation et Contrôle d'un système photovoltaïque connecté au réseau électrique

Présenté Par :

- I. 1) Melle. BARKA Houaria.
- 2) Melle. MEKKAOUI Bouchra.
- 3) Melle. RAHMANI Asmaa.

Devant le jury composé de :

Mr. AYACHE Zouaoui	MAA	UAT.B.B (Ain Temouchent)	Président
Dr. LAKHDARI Lahcen	MAB	UAT.B.B (Ain Temouchent)	Examineur
Dr. ATTOU Amine	MCB	UAT.B.B (Ain Temouchent)	Encadrant

Année universitaire 2021/2022

REMERCIEMENTS

Nous remercions Allah, le tout puissant, le miséricordieux, de nous avoir appris ce que nous ignorons, de nous avoir donné la santé et tout dont nous avons besoin pour l'accomplissement de cette thèse.

Avant de vous présenter ce mémoire permettez-nous tout d'abord de remercier, l'ensemble des membres du jury pour avoir accepté d'examiner ce modeste travail tout en espérons que votre jugement confirmera le notre

Nous exprimons nos vifs remerciements au Dr : ATTOU Amine d'avoir accepté d'être le rapporteur de ce travail, mais également pour son aide, ces précieux conseils et ces encouragements incessants tout au long de la réalisation de ce travail.

Enfin, un grand remerciement à nos très chers parents et nos frères et nos sœurs qui nous ont motivés durant notre cursus universitaire.

Dédicace

*Au nom d'Allah tout puissant pour tous les bienfaits qu'il ne cesse
D'accomplir dans nos vies*

*Que la paix et le salut soient son messager la famille et ses
compagnons.*

Ce travail modeste est dédié :

A ma chère mère et mon père

*Qui m'ont soutenu durant toute mon existence, qu'Allah leur procure
bonne santé et long vie.*

Mes frères et mes sœurs

A ma grande famille

Tous mes amis et collègues

Tous ceux qui se reconnaîtront à travers ces quelques lignes.

Table des matières

Liste des figures	
Liste des tableaux	
Notation	
Symbole	
Introduction générale.....	1

Chapitre I: L'énergie solaire et le système Photovoltaïque

I.1 Introduction.....	3
I.2 Potentiel solaire en Algérie	3
I.3 Caractéristique de Rayonnement solaire	5
I.3.1 Définition	5
I.3.2 La composition de rayonnement solaire	6
I.4 Les installations photovoltaïques.....	7
I.5 Les différents types des systèmes photovoltaïques.....	8
I.5.1 Système photovoltaïque autonome.....	8
I.5.2 Système photovoltaïque raccordé au réseau.	9
I.6 Les avantage des systèmes photovoltaïques.....	10
I.7Conclusion.....	10

Chapitre II: Générateur photovoltaïque

II.1 Introduction.....	11
II.2 La conversion photovoltaïque.....	11
II.2.1 L'effet photovoltaïque.....	11
II.2.2 La conversion photon-électron.....	12
II.3 Les cellules Photovoltaïque.....	13
II.3.1 Définition.....	13
II.3.2 Type des cellules.....	13
II.3.3 Principe des cellules photovoltaïques.....	14
II.4 Montage des cellules photovoltaïques.....	15

II.4.1 Câblage séries des cellules.....	15
II.4.2 Câblage parallèle.....	16
II.5 Le modèle d'une cellule photovoltaïque.....	17
II.6 Les caractéristiques des cellules photovoltaïques.....	19
II.6.1 Tension de circuit ouvert.....	19
II.6.2 Courant de court-circuit.....	19
II.6.3 La Puissance maximale P_{max}	19
II.6.4 Le facteur de forme FF.....	19
II.6.5 Le rendement.....	20
II.7 Caractéristiques I-V et P-V d'un panneau solaire	20
II.8 Effet des variations climatique sur la cellule photovoltaïque.....	21
II.8.1 Variation de l'éclairement.....	21
II.8.2 Variation de la température.....	22
II.9 Impact de l'ombre sur la courbe I-V.....	24
II.10 Conclusion.....	26

Chapitre III: Convertisseur DC-DC

III.1 Introduction.....	27
III.2 Les différentes chaines de conversion photovoltaïque.....	27
III.2.1 La connexion directe GPV-charge comme mode de transfert de Puissance	27
III.2.2 Connexion via une charge d'adaptation DC-DC.....	28
III.3 Les convertisseurs DC-DC (hacheurs).....	29
III.3.1 Hacheur abaisseur-élevateur (Buck-Boost).....	30
III.3.2 Les hacheurs dévolteurs (série, Buck).....	30
III.3.1 Les convertisseurs boost (parallèle).....	31
III.4 Principe de la commande PWM (MLI).....	34
III.5 Conclusion.....	34

Chapitre IV: La commande MPPT des convertisseurs DC-DC.

IV.1 Introduction.....	36
IV.2 Un régulateur MPPT.....	36

IV.3 Principe de la recherche du point de puissance maximal	36
IV.4 Classification Des Commandes MPPT	37
IV.4 .1 Classification Des Commandes MPPT Selon le type de recherche	37
IV.4.1.1 MPPT indirect	37
IV.4.1.2 MPPT direct	37
IV.4.2 Classification des commandes selon les paramètres d'entrée et de sortie	37
IV.4.2.1 Commande MPPT fonctionnant a partir des paramètres d'entre	37
IV.4.2.2 commande MPPT fonctionnant a partir des paramètres de sortie	38
IV.5 Les algorithmes MPPT	38
IV.5.1 Méthode a contre réaction de tension	38
IV.5.2 Méthode avec contre réaction de courant	38
IV.5.3 Méthode a contre réaction de puissance	39
IV.5.4 Algorithme d'incrémentation de la conductance	39
IV.5.5 Algorithme perturbation et observation	41
IV.5.6 Avantage de commande P&O	42
IV.6 Résultat de simulation	43
IV.6 Conclusion	46

Chapitre V: les installations photovoltaïques connecter au réseau électrique

V.1 Introduction.....	47
V.2 Niveaux de tension.....	47
V.2.1 Architecture et topologie des réseaux électriques.....	48
V.2.2 Réseau de transport et d'interconnexion.....	48
V.2.3 Réseaux de distribution.....	48
V.3 Transporte d'électricité en haute tension.....	48
V.4 Grandeurs électriques importants.....	48
V.5 Les systèmes PV connectent au réseau.....	49
V.5.1 Système PV connecté directement au réseau.....	49
V.5.2 Système PV a bus continue intermédiaire.....	50
V.6 Topologie des onduleurs connectés au réseau.....	51

V.7 La qualité d'énergie.....	53
V.8 Conclusion.....	56
<u>Chapitre VI: Convertisseur DC-AC pour les systèmes PV.</u>	
VI.1 Introduction	57
VI.2 Les convertisseurs DC-AC (onduleur)	57
VI.2.1 Définition	57
VI.2.2 Onduleur autonome	58
VI.2.3 Onduleur non autonome	58
VI.3. Les commandes des onduleurs	59
VI.3.1. Commande par hystérésis	59
VI.3.2. Modulation de largeur impulsion (MLI).....	50
VI.4. Structure des chaines photovoltaïque connectées au réseau	61
VI.5. Etude de différentes parties de circuit de puissance connecté au réseau	62
VI.6. Contrôle des puissances active et réactive (P, Q)	64
VI.7 Etude de la synchronisation du convertisseur sur le réseau	65
VI.7.1 La boucle de verrouillage de phase PLL.....	65
VI.7. Résultat de simulation	66
VI.7.1. La tension et le courant de phase dans des conditions climatique stable ...	66
VI.7.2. La tension et le courant de phase dans des conditions atmosphériques variable	68
VI.7.3. Interprétation de résultat	69
VI.8. Conclusion	70
Conclusion générale	71

Annex

Références bibliographie

Résume

Liste des figures :

Chapitre I :

Figure I.1: Irradiation globale journalière reçue sur un plan horizontal au mois de juillet	4
Figure I.2: Irradiation globale journalière reçue sur un plan horizontal au mois de décembre	4
Figure I.3: Meilleures valeurs du rayonnement solaire global du territoire national	5
Figure I.4: Analyse spectrale du rayonnement solaire	6
Figure I.5: Composantes du rayonnement solaire au sol	7
Figure I.6: Représentation des différents composants d'une installation PV	8
Figure I.7: Structure d'un système PV autonome	9
Figure I.8: Injection partielle	9
Figure I.9: Injection totale	9

Chapitre II :

Figure II.1: Cellule, Panneau, Champ photovoltaïque	11
Figure II.2: Schéma de principe de la conversion photoélectrique	11
Figure II.3: Structure basique d'une cellule solaire	13
Figure II.4: Principe de fonctionnement des cellules	15

Figure II.5: Associations en série des cellules PV	16
Figure II.6: Association parallèle des cellules	16
Figure II.7: Schéma de circuit électrique d'une modèle idéale	17
Figure II.8: Modèle réel de cellule PV	18
Figure II.9: Caractéristique $I=f(V)$ de panneau solaire	20
Figure II.10: Caractéristique $P=f(V)$ de panneau solaire	21
Figure II.11 : Schéma bloc d'un panneau solaire	21
Figure II.12 : Schéma bloc détaillé de panneau solaire	22
Figure II.13: Influence de l'éclairement sur les caractéristiques $I_{pv}=f(V_{pv})$	22
Figure II.14: Influence de l'éclairement sur les caractéristiques $P_{pv}=f(V_{pv})$	23
Figure II.15: L'influence de la température sur la caractéristique $I=f(V)$	23
Figure II.16: L'influence de la température sur la caractéristique $p=f(V)$	24
Figure II.17: Schématisation d'un GPV élémentaire avec diodes by-pass et diode anti retour	25
Figure II.18: Fonctionnement des diodes by-pass	25

Chapitre III :

Figure III.1: Connexion directe GPV-Charge par le biais d'une diode anti-retour	27
Figure III.2: Point de fonctionnement d'un GPV en connexion direct avec la charge	28
Figure III.3: Principe d'adaptation d'impédance par MPPT	29
Figure III.4: Convertisseur DC-DC	29
Figure III.5: Schéma de circuit électrique de convertisseur buck-boost	30

Figure III.6: Schéma de circuit électrique de convertisseur Buck (abaisseur)	31
Figure III.7: Schéma de circuit électrique de convertisseur boost (élevateur)	31
Figure III.8: Convertisseur boost durant l'état ON	32
Figure III.9: Convertisseur boost durant l'état OFF	33
Figure III.10: Forme typique d'onde de convertisseur boost	33
Figure III.11: Principe de PWM pour un convertisseur DC-DC	34

Chapitre IV :

Figure IV.1: Schéma de principe de régulateur MPPT	36
Figure IV.2: Caractéristiques de fonctionnement de l'algorithme incrémentale conductance	40
Figure IV.3: Schéma de principe de la commande P&O	41
Figure IV.4: Organigramme de l'algorithme P&O	42
Figure IV.5 : Schéma bloc de système PV avec la commande MPPT	43
Figure IV.6 : Les variations des conditions atmosphériques	44
Figure IV.7 : La tension d'entrée (V1) et de sortie (V2) après la MPPT	44
Figure IV.8 : Le courant d'entrée (I1) et de sortie (I2) après la MPPT	45
Figure IV.9 : La puissance d'entrée (P1) et de sortie (P2) après la MPPT	45

Chapitre V :

Figure V.1: Schéma d'un réseau électrique	47
Figure V.2: Système photovoltaïque connecte directement au réseau	50
Figure V.3: schème de système PV a bus continue intermédiaire	50
Figure V.4: Système PV connecté via un bus DC-DC	50
Figure V.5: Topologie d'onduleur centralisé	51

Figure V.6: Topologie d'onduleur string	52
Figure V.7: Topologie de l'onduleur modulaire	52

Chapitre VI :

Figure VI.1: Schéma de convertisseur DC-AC monophasé et triphasé	57
Figure VI.2: Onduleur triphasé composé de trois onduleurs monophasés	58
Figure VI.3: Schéma de principe d'onduleur triphasé en pont	58
Figure VI.4: Contrôle de courant par hystérésis classique	59
Figure VI.5: Contrôle de courant par hystérésis modulée	60
Figure VI.6: Principe de la commande MLI d'onduleur	60
Figure VI.7: Commande des interrupteurs par MLI	61
Figure VI.8: Circuit de puissance d'onduleur de tension connecté au réseau	62
Figure VI.9: Schéma synoptique de la connexion de l'onduleur au réseau électrique	63
Figure VI.10: Principe de la PLL dans le domaine de Park	65
Figure VI.11 : Schéma bloc de système PV raccordé au réseau électrique	66
Figure VI.12: La tension triphasé cotée réseau	67
Figure VI.13 : Le courant des trois phases cotée réseau	67
Figure VI.14 : Tension et courant de la même phase cotée réseau	68
Figure VI.15 : Les conditions atmosphériques variables.....	68
Figure VI.16 : La fluctuation de tension et e courant des trois phases.....	69

Liste des tableaux :

Tableau II.1: Description des types des cellules photovoltaïques	14
--	----

Tableau V.1: Les niveaux de tension 47

Tableau V.2: Avantage et inconvénient des trois topologies 53

Nomenclatures

E: Ensoleillement (W/m^2).

T: Température ($^{\circ}\text{C}$).

E_{ph} : L'effet photovoltaïque (eV).

H: Constante de Planck.

C: La vitesse de la lumière ($3 \times 10^8 \text{m/s}$).

λ : La longueur d'onde (m).

V_{cos} : La tension de circuit ouvert de (N_s) cellules (V).

I_{ccs} : Le courant de court-circuit de (N_s) cellules (A).

I_{ccp} : Courants de court circuit de (N_p) cellule en parallèle.

V_{cop} : La tension du circuit ouvert de (N_p) cellules en parallèle.

I_{cc} : Le courant de court-circuit (A).

V_{oc} : Tension de circuit ouverte (V).

I_{ph} : Photo courant (A).

I_d : Courant à travers la diode (A).

I_{cell} : Courant fournie par la cellule (A).

I_{ch} : Courant à travers la charge.

I_s : Courant de saturation.

V_{ch} : Tension aux bornes de la charge (V).

I_0 : Le courant de saturation inverse de la diode (A).

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

K: Constant de Boltzmann ($K=1,3806503 \times 10^{-23} \text{J/K}$).

η : Facteur d'idéalité de la diode (1,6).

T: La température de la cellule (K).

V_{cell} : La tension aux bornes de la cellule (V).

K_i : Coefficient de température de court-circuit.

T_{op} : Température de fonctionnement de cellule (K).

T_{ref} : Température de référence.

G : Irradiation de la surface de la cellule ($1000\text{W}/\text{m}^2$).

E_g : L'éclairage de référence.

V_d : Tension aux bornes de la diode [V].

V_{th} : Tension thermique.

P_{max} : Puissance maximale (watt)

FF: Le facteur de forme (%).

η : Le rendement (%)

R_{ch} : Résistance de charge en (Ω).

S: Surface de cellule solaire.

E: Flux incidente.

α : Rapport cyclique.

V_{DC} : La tension en dent de scie.

P_j : Perte joule (watt).

P: Puissance (watt).

S: Section decâble (m^2).

C_{dc} : Capacité de condensateur (F).

I_{dc} : Courant de sortie de hacheur (A).

I_{ond} : Courant de l'entrée de l'onduleur.

Introduction générale :

Depuis plusieurs années l'humanité fait face à une demande en énergie croissante due à l'augmentation de la population et à la qualité de vie exigeante en matière de consommation d'énergie. Actuellement, la production d'énergie dans le monde est basée presque totalement sur les sources fossiles, sources qui présentent l'inconvénient d'être limitées et qui constituent un grand danger écologique à cause des émissions de gaz à effet de serre.

Dans le but de minimiser le danger que représentent les énergies fossiles, des recherches scientifiques ont été menées pour trouver une solution économique et peu polluante pour la production d'énergie est devenu primordial, à ce sujet, les énergies renouvelables (énergie solaire, géothermique, biomasse, éolienne, hydraulique, etc...) qui sont des énergies illimitées contrairement aux énergies fossiles. Les énergies renouvelables regroupent un certain nombre de filières technologiques selon la source d'énergie valorisée et l'énergie utile obtenue.

Le soleil est une source quasiment inépuisable d'énergie qui envoie à la surface de la terre un rayonnement qui représente chaque année environ 8400 fois la consommation énergétique de l'humanité. Cela correspond à une puissance instantanée reçue de 1 kilowatt crête par mètre carré (kWc/m^2) répartie sur tout le spectre, de l'ultraviolet à l'infrarouge. Les déserts de notre planète reçoivent en 6 heures plus d'énergie du soleil que n'en consomme l'humanité en une année [33].

L'énergie photovoltaïque, ou électricité produite à partir de la lumière, est une énergie renouvelable qui se développe à pas de géants, le recours à cette énergie propre et durable nombre est un progrès avéré, en terme d'impacts tant sur l'homme que sur notre planète [1].

Le principe de cette énergie est basé sur la transformation directe de la lumière du soleil en énergie électrique aux moyens des cellules généralement à base de silicium cristallin qui reste la filière la plus avancées sur le plan technologiques et industriel. Leur association en série/parallèle donne lieu à un module ou panneau photovoltaïque.

Notre recherche est basée sur l'étude des systèmes photovoltaïques et consiste essentiellement à la modélisation et le contrôle de ce système connecté à un réseau électrique. À cet effet notre mémoire est organisée en six chapitres et une conclusion générale comme suit :

Nous avons alors présenté dans le premier chapitre de ce travail, un aperçu général sur le rayonnement solaire et ses caractérisations, le gisement solaire en Algérie, aussi le composant d'une installation photovoltaïque, à la fin nous allons exposer les avantages de cette énergie.

Le second chapitre sera basé sur les générateurs photovoltaïques, le principe de la conversion photovoltaïque, et nous rappellerons les différents types des cellules et leur principe, Nous terminons ce chapitre par la présentation du modèle d'une cellule PV et ses caractéristiques I-V et P-V.

Dans le troisième chapitre, pour que le GPV fonctionne à sa puissance maximale, un étage d'adaptation doit être inséré entre la source et la charge. Pour cela, on présente les différents types de convertisseurs CC-CC ainsi qu'une analyse de fonctionnement du convertisseur élévateur (Boost). On termine le chapitre par le principe de la commande pulse width modulation « PWM ».

Le chapitre quatre présentera les différentes méthodes de poursuite du point de puissance maximale (MPPT), cependant on se basera sur la méthode 'Perturbation et Observation' (P&O), ainsi que du contrôle du système photovoltaïque connecté au réseau. La commande MPPT assure le point de fonctionnement de panneau solaire pour fournir une puissance maximale à la sortie, à la fin nous avons présenté les résultats de simulation de la méthode MPPT « P&O » pour les caractéristiques P-V et I-V.

Les systèmes PV connectés au réseau « grid connecté » qui font l'objet de notre étude. Ces genres de systèmes sont branchés en parallèle au réseau et dont l'énergie produite par les modules PV est injectée au réseau électrique. Pour cela le cinquième chapitre aborde la description des architectures de réseau électrique, du convertisseur de puissance DC-AC de trois bras et les différentes méthodes de commande (MLI, hystérésis), ensuite nous avons présenté les structures générales d'un système PV raccordé au réseau, à la fin nous avons décrit les différentes topologies de l'onduleur connecté au réseau.

Le sixième chapitre est consacré à la simulation de l'onduleur triphasé intégré dans un système photovoltaïque. Les résultats de simulation sont présentés ainsi que l'analyse spectrale pour les différentes topologies utilisées. L'étude par simulation est effectuée sous l'environnement Matlab/Simulink.

Finalement, nous terminons notre travail par une conclusion générale qui résume notre étude dans sa partie théorique et de simulation.

Chapitre I :

L'énergie solaire et le système

Photovoltaïque

I.1. Introduction :

L'énergie solaire est une importante source d'énergie renouvelable qui pourrait être une alternative aux autres sources classiques afin de satisfaire les larges besoins d'énergie dans le futur. Cette énergie trouve tout son avantage dans des applications de petite et moyenne consommation dans des régions isolées et loin des lignes de distribution électrique [5], car le soleil est une source énergétique quasiment illimitée, il pourrait couvrir plusieurs milliers de fois notre consommation globale d'énergie.

En 2021, l'électricité photovoltaïque a couvert à peine 2.7% des besoins en électricité du pays selon le gestionnaire du réseau RTE.

I.2. Potentiel solaire en Algérie :

L'Algérie dispose d'un des gisements solaires les plus importants du monde. La durée d'insolation sur la quasi-totalité du territoire national dépasse les 2000 heures annuellement et peut même atteindre les 3900 heures notamment dans les hauts plateaux et Sahara.

Le pays disposait d'un important potentiel de ressources renouvelable, notamment solaire avec un rayonnement allant de 3KWh/m²/an au nord et 5.5KWh/m²/an au sud, avec une durée d'ensoleillement de 2000 à 4000heures/an [45].

Une évaluation par satellite, effectuée par l'agence spatiale allemande, a montré que l'Algérie possède le potentiel solaire le plus important de tout le bassin méditerranéen. Il est de 169,440 (TWh/an) pour le solaire thermique et de 713,9 TWh/an pour le photovoltaïque [8].

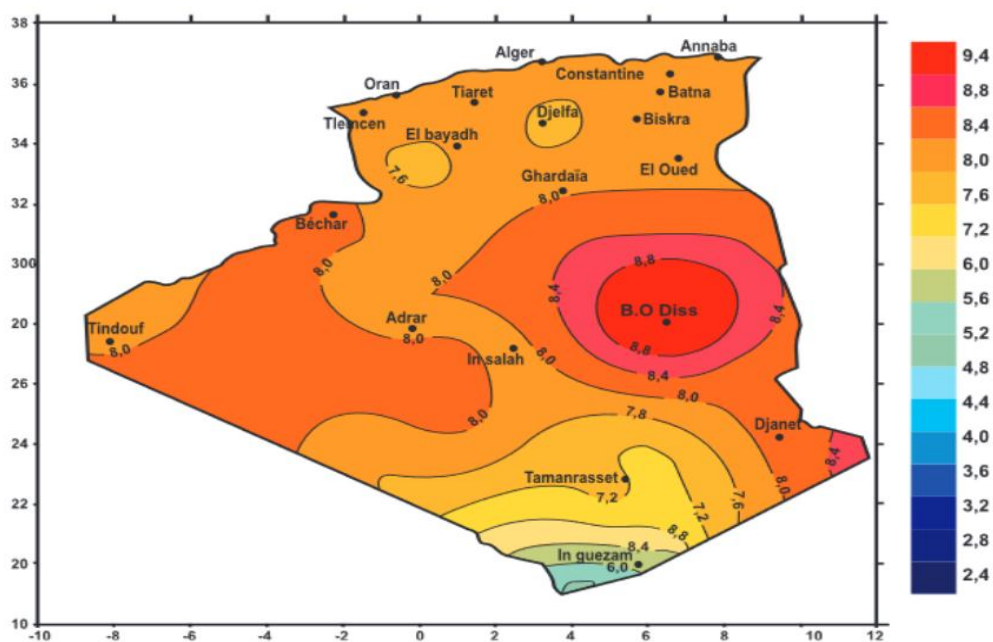


Figure I.1: Irradiation globale journalière reçue sur un plan horizontal au mois de juillet.

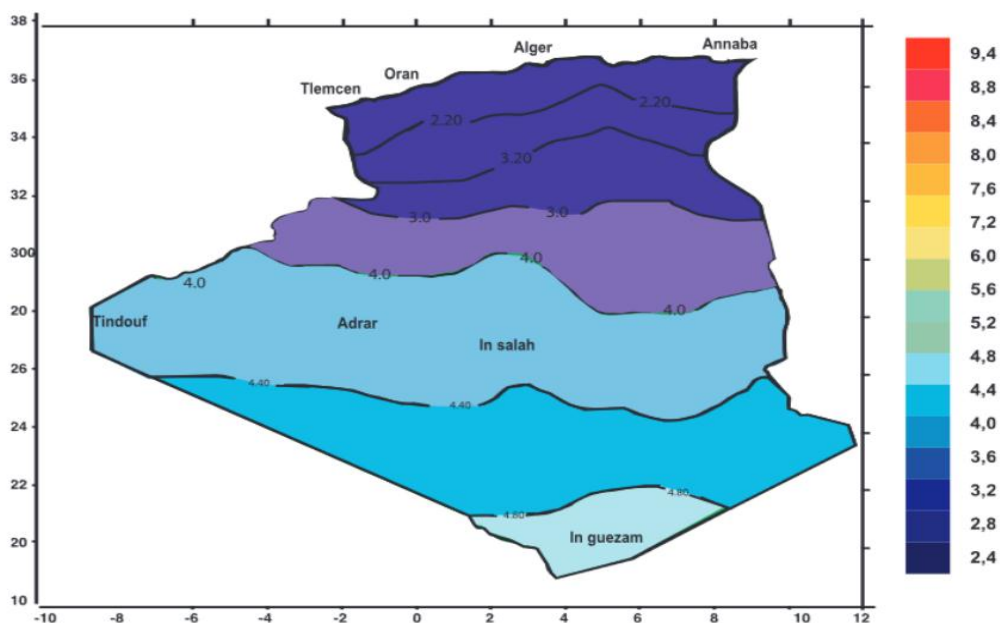


Figure I.2: Irradiation globale journalière reçue sur un plan horizontal au mois de décembre.

La valeur maximale de l'irradiation Solaire globale de territoire nationale estimée est obtenue aux mois de Juin et Juillet pour les différents sites comme c'est indiqué sur la figure I.3 [9].

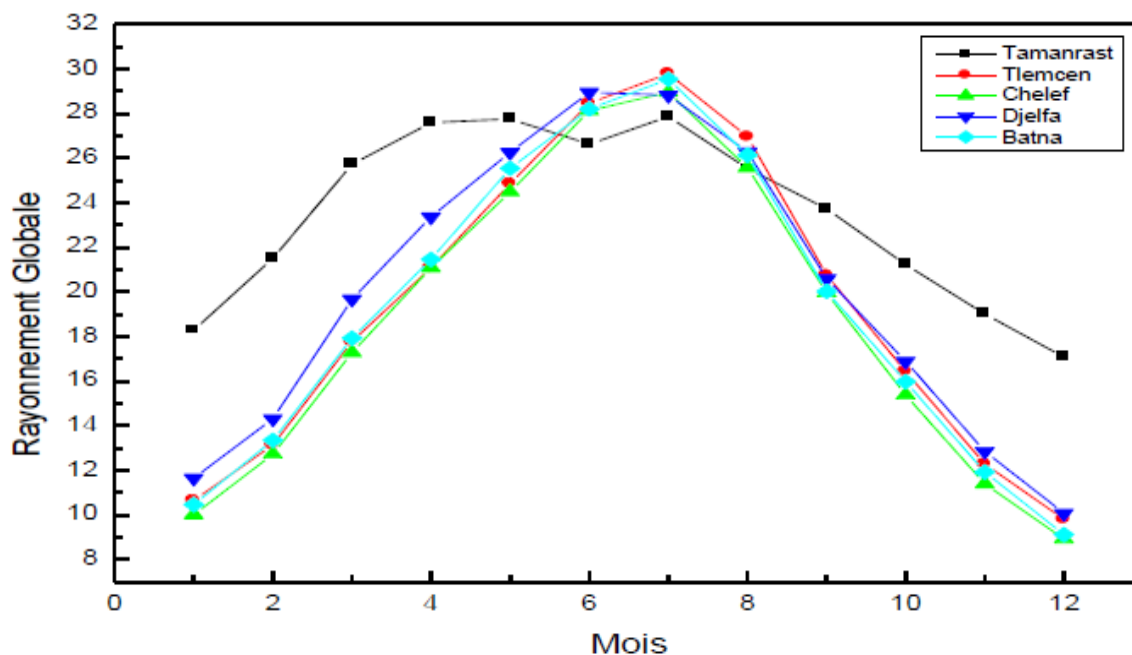


Figure I.3: Meilleures valeurs du rayonnement solaire global du territoire national [9].

Après cette comparaison il est clair que le site de Tlemcen et Djelfa a la plus grande valeur respectivement.

I.3. Caractéristiques de rayonnement solaire :

I.3.1. Définition :

Le rayonnement solaire est l'ensemble des ondes électromagnétiques émises par le soleil [7], il est constitué de photons dont la longueur d'onde s'étend de l'ultraviolet ($0,2\mu\text{m}$) à l'infrarouge lointain ($2,5\mu\text{m}$) [4] :

9% dans la bande des Ultraviolets ($< 0,4 \mu\text{m}$).

47% dans la bande visible ($0,4 \text{ à } 0,8 \mu\text{m}$).

44% dans la bande des infrarouges ($> 0,8 \mu\text{m}$).

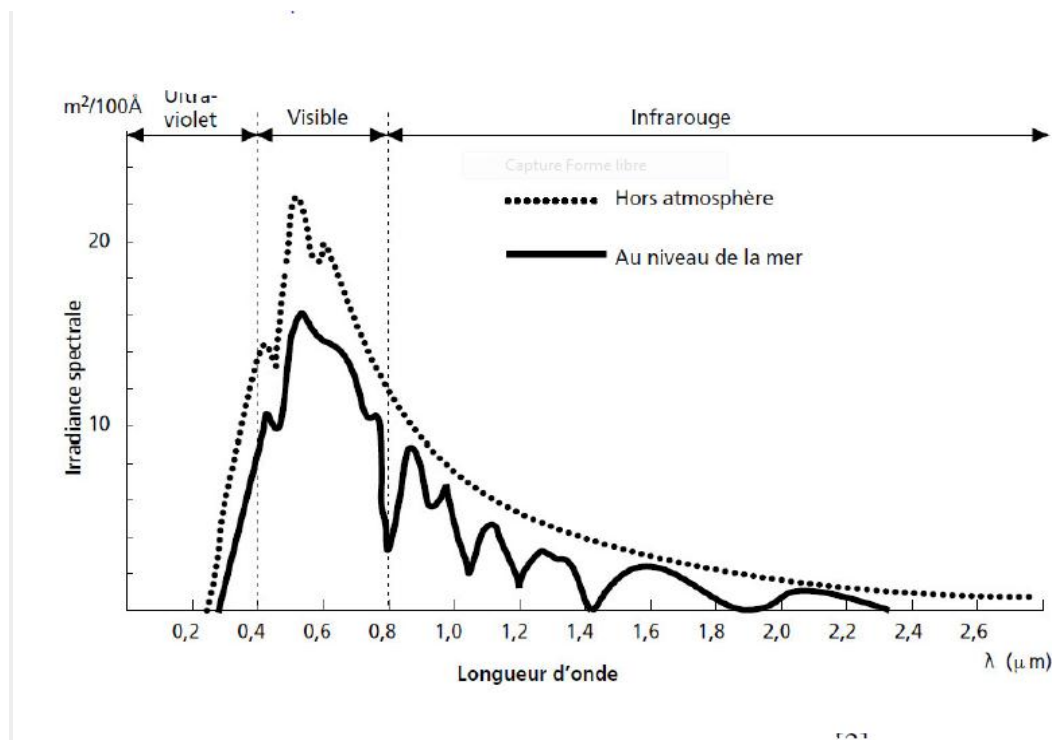


Figure I.4: Analyse spectrale du rayonnement solaire [1].

I.3.2. La composition de rayonnement solaire :

Suite à l'atténuation du rayonnement solaire par les différents phénomènes atmosphérique, le rayonnement solaire sur une surface au sol est composé comme suit:

- 1- Le rayonnement direct : Rayonnement provenant du soleil en ligne droite du seul disque solaire, il est nul lorsque le soleil est complètement couvert par les nuages.
- 2- Le rayonnement diffus : Radiation solaire arrivant sur la surface de la terre après déviation de la lumière par les nuages et les molécules diverses, elle est donc nulle que la nuit.
- 3- Le rayonnement réfléchi (albédo): Radiation solaire incidente réfléchi par une Surface. [1]
- 4- Le rayonnement global : est donc la somme des 3 rayonnements directs, diffus, et réfléchi comme illustrer dans la figure si dessous :

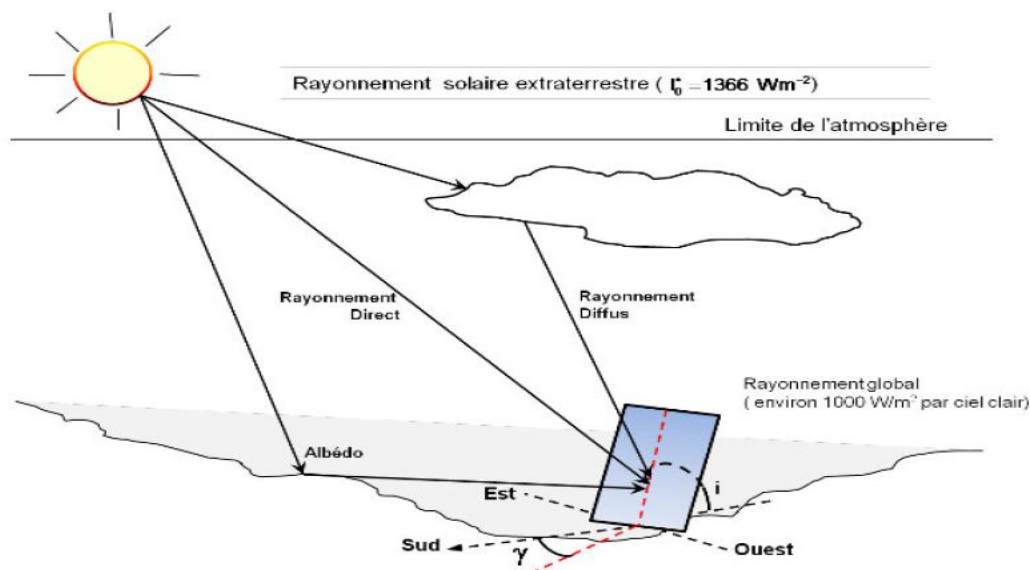


Figure I.5: Composantes du rayonnement solaire au sol [1].

I.4. Les installations photovoltaïques

I.4.1. Définition :

Un système photovoltaïque se compose d'un champ de modules et d'un ensemble de composants qui adapte l'électricité produite par les modules aux spécifications des récepteurs. Cet ensemble, appelé aussi « balance of system » ou BOS.

Les systèmes PV apparaissent comme une solution privilégiée pour la production d'électricité de faible ou moyenne puissance en site isolé et particulièrement pour les habitations, ils se composent de plusieurs éléments sont :

- Les modules PV qui représentent le champ de captage des rayons solaires.
- Les batteries qui constituent le champ de stockage c'est là où nous stockons de l'énergie produite par les modules.
- Le régulateur qui protège la batterie contre la surcharge ainsi il règle la valeur de la tension nominale
- L'onduleur qui assure la conversion du courant continu en courant alternatif dont les utilisateurs ont besoin. (un convertisseur statique (DC/AC).
- Le hacheur booste son rôle est élever la tension produite par le panneau a la tension de réseau (un convertisseur statique (DC/DC) [5].

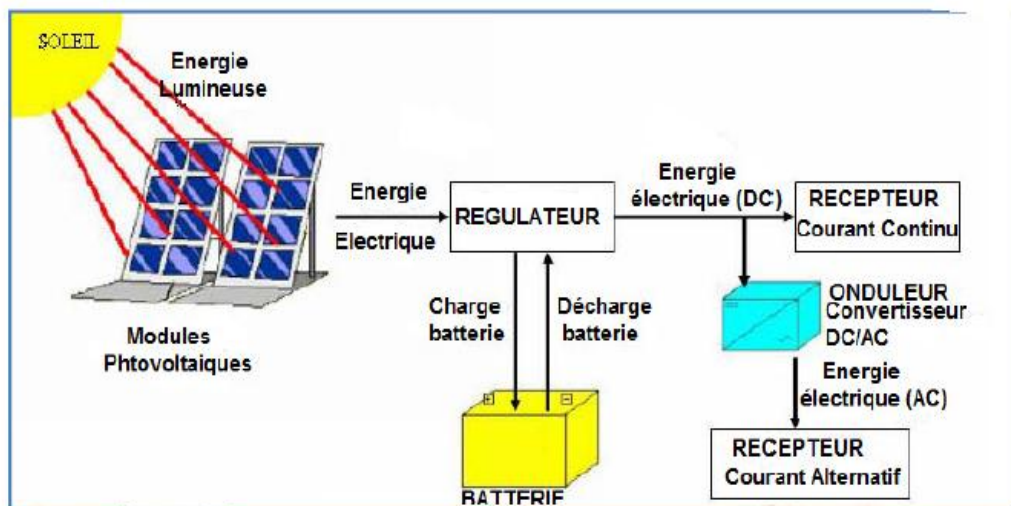


Figure I.6 : Représentation des différents composants d'une installation photovoltaïque [5].

I.5. Classification des systèmes PV :

On distingue deux types de systèmes PV, les systèmes autonomes (non connecter au réseau) et les systèmes injecter au réseau.

I.5.1. Système photovoltaïque autonome :

C'est un système complètement indépendant d'autre source d'énergie, qui alimente l'utilisateur en électricité sans être connecté au réseau électrique. Ils servent habituellement à alimenter les maisons en site isolé, sur des îles, en montagne ainsi qu'à des applications comme la surveillance à distance et le pompage de l'eau. La présence des batteries de stockage d'énergie est obligatoire pour assurer la fourniture à l'usager continuellement et même en cas d'absence potentielle de la production d'électricité. [6]

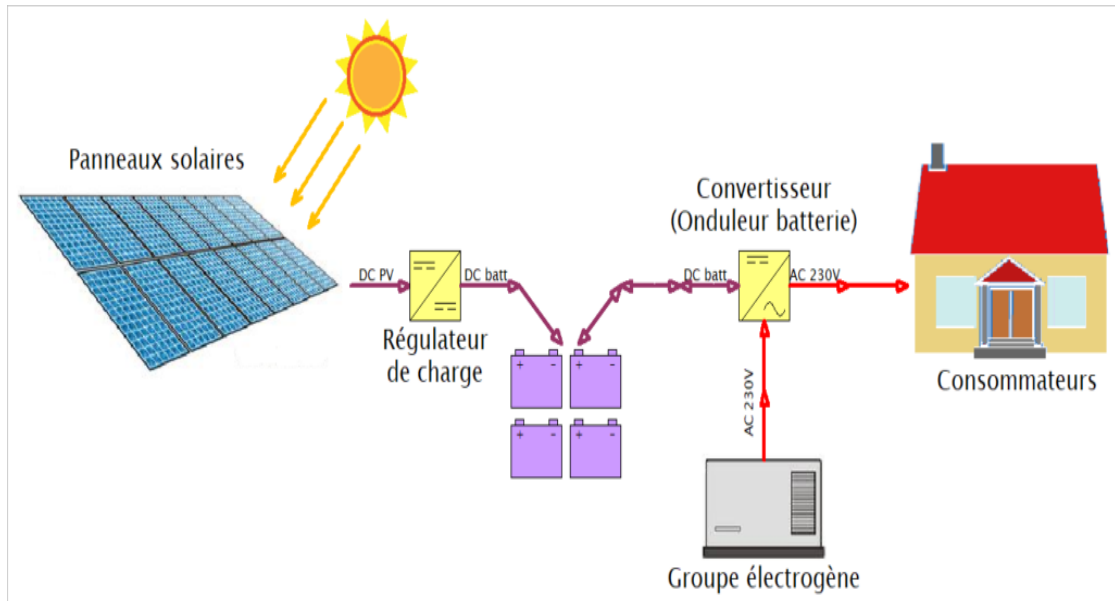


Figure I.7: Structure d'un système PV autonome. [16]

I.5.2. Système PV raccordé au réseau :

Un système PV raccordé au réseau est un système dont la charge est partiellement ou totalement est le réseau électrique, c'est à dire le générateur PV injecte sa puissance à travers un onduleur dans le réseau électrique [6].

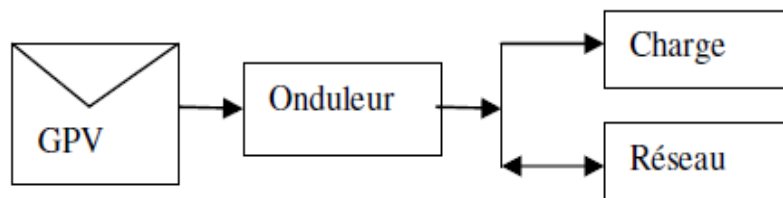


Figure I.8: Injection partielle.

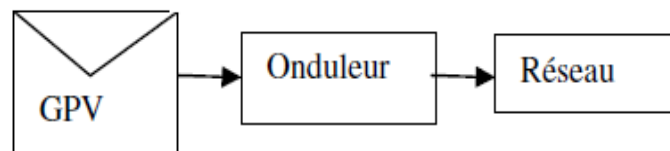


Figure I.9 : Injection totale.

I.6. Les avantages de l'énergie solaire :

- C'est une énergie renouvelable qui ne dégage pas de gaz à effet de serre et ne produit pas de déchets (dite non polluante).
- Les installations sont de haute fiabilité et demandent peu d'entretien
- Le montage des installations est simple, sa maintenance est facile.
- Elle peut offrir de l'électricité à des populations qui n'ont pas accès au réseau électrique.
- C'est une énergie inépuisable et totalement silencieuse.
- Le coût de fonctionnement est très faible vu les entretiens réduits et il ne nécessite ni combustible, ni son transport, ni personnel hautement spécialisé.
- L'énergie photovoltaïque peut être installée partout, même en ville.

I.7. Conclusion :

Nous avons présenté dans ce chapitre les différentes notions qui entrent dans l'énergie solaire et la constitution d'un système photovoltaïque, et nous avons aussi donné la constitution de rayonnement qui est le premier permittif de système photovoltaïque, et aussi présente les technologies utilisées ainsi que les différents systèmes de connexion photovoltaïques et principalement les systèmes connectés au réseau qui fera l'objet de notre travail.

Chapitre II :
GENRATEUR
PHOTOVOLTAIQUE

II.1. Introduction :

L'énergie solaire photovoltaïque désigne l'électricité produite par transformation d'une partie du rayonnement solaire avec une cellule photovoltaïque. Plusieurs cellules sont reliées entre elles et forment un panneau solaire (ou module photovoltaïque), plusieurs modules qui sont regroupés dans une centrale solaire photovoltaïque sont appelés champ photovoltaïque. Le terme photovoltaïque peut désigner soit le phénomène physique l'effet photovoltaïque ou la technologie associée.



Figure II.1 : Cellule, Panneau, Champ photovoltaïque

II.2. La conversion photovoltaïque :

II.2.1. L'effet photovoltaïque :

Le mot photovoltaïque vient du Grec, « photos » signifie lumière, et « Volta » le nom physicien italien Alessandro volta qui découvrit la pile électrique en 1800. « Photovoltaïque » désigne le processus physique qui consiste à transformer l'énergie lumineuse en énergie électrique par le transfert de l'énergie des photons aux électrons d'un matériau.

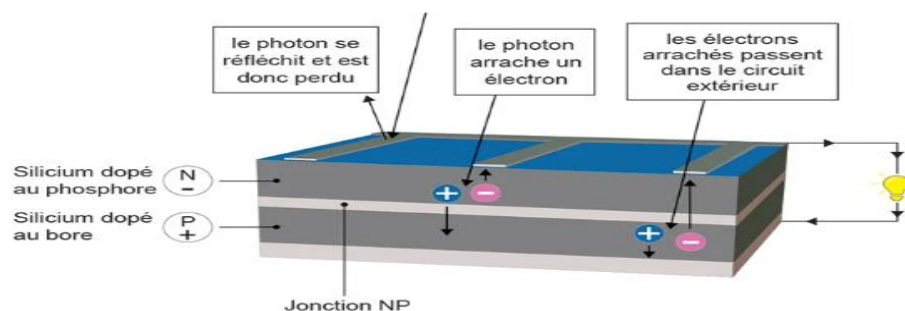


Figure II.2 : Schéma de principe de la conversion photo électrique

Lorsqu'un matériau semi-conducteur est exposé à la lumière du soleil, les atomes exposés au rayonnement sont "bombardés" par les photons constituant la lumière sous l'action de ce bombardement, les électrons des couches électroniques supérieures (appelés électrons des couches de valence) ont tendance à être "arrachés", si l'électron revient à son état initial, l'agitation de l'électron se traduit par un échauffement du matériau.

L'énergie cinétique du photon est transformée en énergie thermique. Par contre, dans les cellules photovoltaïques, une partie des électrons ne revient pas à son état initial. Les électrons "arrachés" créent une tension électrique continue faible, une partie de l'énergie cinétique des photons est ainsi directement transformée en énergie électrique : c'est l'effet photovoltaïque [10].

II.2.2. Conversion photon-électron :

Albert Einstein a découvert, en travaillant sur l'effet photoélectrique, que le rayonnement solaire se compose de photons transportant l'énergie E_{ph} qui est donnée par l'équation suivante [11] :

$$E = \frac{h \times c}{\lambda} \quad (II.1)$$

Où h est la constante de Planck, c la vitesse de la lumière, λ sa longueur d'onde.

Les physiciens du solide expriment généralement l'énergie E_{ph} des photons en électronvolts (eV) et l'observation dans l'espace en conditions AM0 ont permis d'établir une relation directe entre l'énergie d'un photon exprimée en électronvolts et sa longueur d'onde exprimée en micromètres(11)

$$E = \frac{1.24}{\lambda(\mu m)} \quad (II.2)$$

L'effet photovoltaïque constitue la conversion directe de l'énergie du rayonnement solaire en énergie électrique au moyen de cellules généralement à base de silicium. Pour obtenir une puissance suffisante, les cellules sont reliées entre elles et constituent le module solaire (11).

La conversion photovoltaïque est l'opération que subissent certains matériaux quand ils sont soumis au rayonnement solaire pour produire de l'électricité.

Dans la conversion photovoltaïque trois phénomènes physiques sont mis en jeu :

- L'Absorption de la lumière dans le matériau.
- Le Transfert d'énergie des photons aux charges électriques.

- La collecte des charges.

Le matériau doit avoir des propriétés optique et électrique spécifique pour permettre la conversion photovoltaïque. [11].

II.3. Les cellules Photovoltaïque :

II.3.1. Définition :

La cellule PV ou encore photopile, est le plus petit élément d'une installation photovoltaïque, sont les éléments de base de l'unité qui collectent la lumière du soleil pour produisent un courant électrique a partie de l'énergie lumineux. Les cellules photovoltaïques composées de matériaux semi-conducteurs de type P-N, généralement réaliser à base de silicium (SI), c'est à dire ayant des propriétés intermédiaires entre les conducteurs et les isolants.

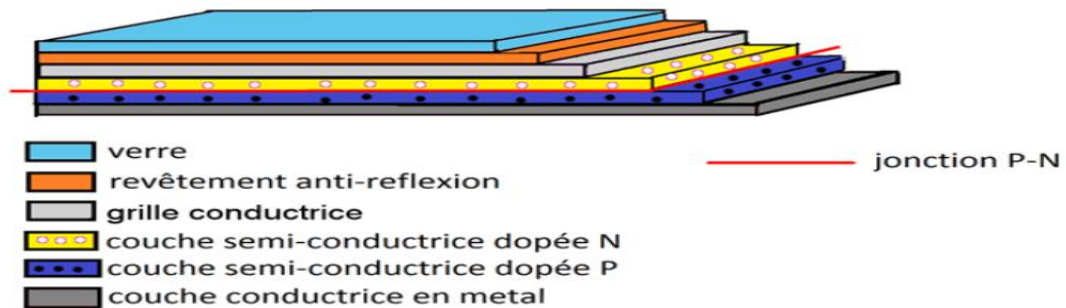


Figure II.3 : Structure basique d'une cellule solaire.

La cellule PV, ne produit qu'une très faible puissance électrique, typiquement de 1 à 3 W avec une tension de 0.5V. Pour produire plus de puissance, les cellules sont assemblées pour former un module (ou panneau). Les connections en série de plusieurs cellules augmentent la tension pour un même courant, tandis que la mise en parallèle accroît le courant en conservant la tension. La plupart des modules commercialisés sont composés de 36 cellules en silicium cristallin, connectées en série pour des applications en 12 V. Le courant de sortie, et donc la puissance, sera proportionnelle à la surface du module. [1].

II.3.2. Type des cellules photovoltaïques :

Il existe trois types des cellules solaires : monocristallin, poly-cristallin, amorphe. Chaque type de ces cellules à un rendement et un cout qui lui est propre, qui son présenter dans le tableau II.1. Le type le plus utiliser dans la production des cellules photovoltaïques c'est le monocristallin grâce à son rendement plus élevée que d'autres types, environ 25%.



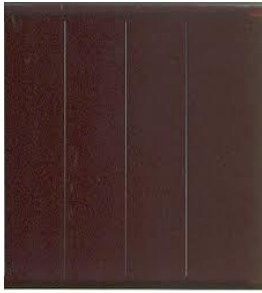
Types			
	Silicium monocristallin	Silicium poly-cristallin	Silicium amorphe
Description	Ce type est l'une des plus répandues, elle permet de composer des panneaux solaires qui vont produire de l'électricité servant à alimenter une habitation ou le réseau public. (30 ans)	Facilement reconnaissable grâce à ses cristaux bleus, cette cellule se compose d'une seule tranche de silicium. On la trouve souvent dans les installations domestiques, agricoles ou industrielles. (35 ans)	Est composée d'une couche fine de silicium, bien plus mince que les monocristallines ou les poly-cristallines. On la trouve essentiellement pour alimenter les appareils de faible puissance. (10 ans)
Rendement :	25%	15%	7%
L'énergie produites ans/m ²	90 -95KWh/m ²	90 -95 KWh/m ²	55 -60KWh/m ²
Avantage	Bon rendement en soleil direct	Bon rendement en soleil directe. Peut être utilisée en temps nuageux grâce à sa flexibilité d'irradiation.	Prix moins élevée. Peut intègre sur tout type de support, flexible ou rigide.
Inconvénient	Mauvaise rendement en soleil diffus, prix élevée	Moins de rendement avec un Prix élevée	Faible rendement

Tableau II.1 : Descriptions des types des cellules photovoltaïques.

II.3.3. Principe des cellules photovoltaïques :

Le fonctionnement de la cellule photovoltaïque est fondé sur les propriétés de semi-conducteurs qui percutés par les photons, mettent en mouvement un flux d'électrons. Les photons sont des particules élémentaires qui transportent l'énergie solaire à 300 000 km/s et qu'Albert Einstein appelait dans les années 1920 les « grains de lumière », lorsqu'ils frappent un élément semi-conducteur comme le silicium, ils arrachent des électrons à ses atomes, ces électrons se mettent en mouvement de façon désordonnée, à la recherche d'autres « trous » où se repositionner. [12]

Mais pour qu'il y ait un courant électrique, il faut que ces mouvements d'électrons aillent tous dans le même sens. Donc il est nécessaire que les électrons circulent, car pour cela les panneaux sont constitués de deux couches de silicium, dans la couche supérieure on va placer les atomes de phosphore (P^5), ce sont des atomes qui possèdent un surplus d'électrons portent une charge électrique négative (-). Dans la couche de dessous on ajoute les atomes de bore (B^3) ce sont des atomes qui possèdent un déficit d'électrons positive (+).

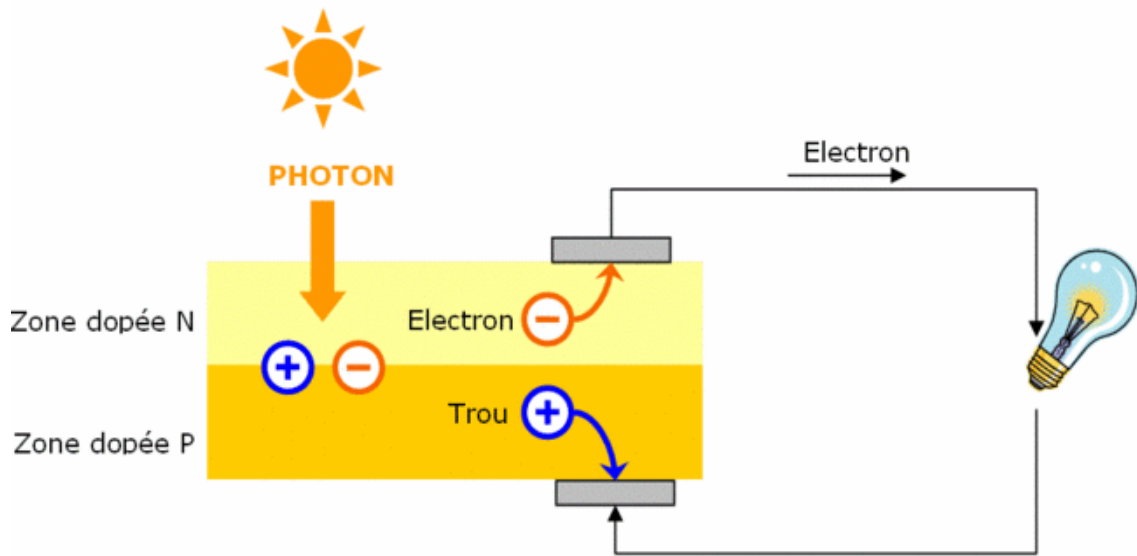


Figure II.4 : Principe de fonctionnement des cellules [12].

Le côté très chargé en électrons devient la borne négative (N), le côté avec moins d'électrons devient la borne positive (P). Lorsque on relie les deux bornes en mettant une charge électrique, telle que la lumière de soleil arrive les électrons vont s'agiter et se mettre à circuler de moins vers le plus et alimenter la charge.

II.4. Montage des cellules photovoltaïques :

II.4.1. Câblage séries des cellules :

Pour augmenter la tension du générateur PV, on dispose d'un nombre (N_s) des cellules en série, dans cette connexion le courant reste identique. C'est pourquoi il faut toujours des cellules de même courant pour les mettre en série (l'appariement) [15].

L'équation suivante résume les caractéristiques électriques d'une association série de (N_s) cellules [5] :

$$V_{cos} = N_s * V_{co} \quad (II.3)$$

$$I_{ccs} = I_{cc} \quad (II.4)$$

Avec :

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

I_{ccs} : L'ourant de court-circuit de N_s cellules en série.

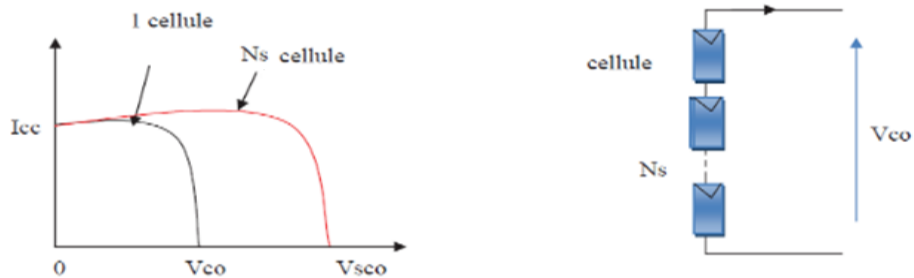


Figure II.5: Associations en série des cellules PV [5].

II.4.2. Câblage parallèles des cellules

Lorsque les cellules sont connectées en parallèles, ce sont les courants qui s'ajoutent et la tension qui restera constante. Il faudra donc appairer les tensions et non les courants.

L'équation suivante résume les caractéristiques électriques d'une association parallèle de (N_p) cellules [5] :

$$I_{ccp} = N_p * I_{cc} \tag{II.5}$$

$$V_{co} = V_{cop} \tag{II.6}$$

Avec :

I_{ccp} : La somme des courants de cout circuit de (N_p) cellule en parallèle

V_{cop} : La tension du circuit ouvert de (N_p) cellules en parallèle.

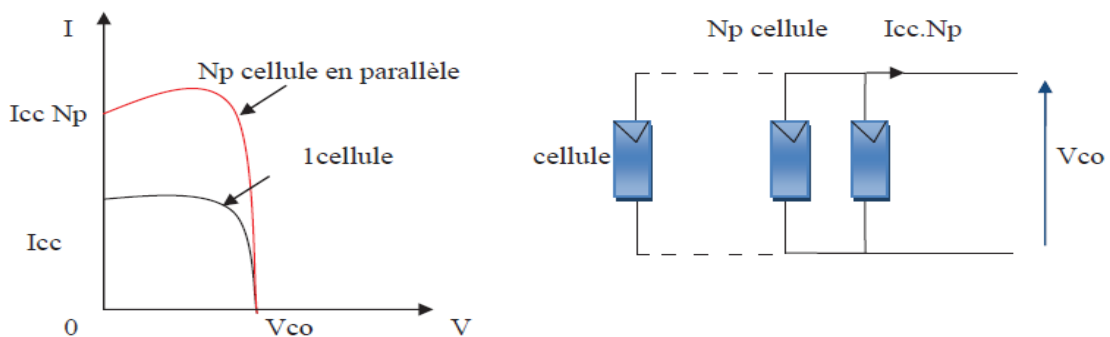


Figure II.6 : Association parallèle des cellules [5].

II.5. Le modèle d'une cellule photovoltaïque :

Le circuit équivalent II.7 présente une cellule photovoltaïque qui peut être décrite de manière simple comme une source idéale de courant qui produit un courant photonique I_{ph} proportionnel à la puissance lumineuse incidente, en parallèle avec une diode qui présente la jonction P-N.

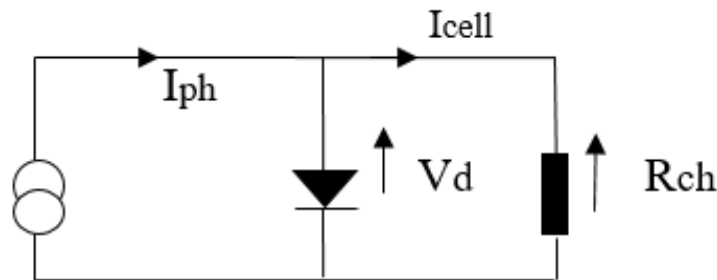


Figure II.7 : Schéma de circuit électrique d'une modèle idéale.

Avec :

I_{ph} : Photo courant [A].

I_d : Courant à travers la diode [A].

I_{cell} : Courant fournie par la cellule [A].

I_{ch} : Courant à travers la charge [A].

V_{ch} : Tension aux bornes de la charge [V].

Le modèle mathématique d'une cellule PV idéale donne par la relation suivante :

On appliquant la loi de Kirchoff dans le circuit :

$$I_{ph} = I_d + I_{cell} \quad (II.7)$$

$$I_{cell} = I_{ph} - I_d \quad (II.8)$$

$$I_{cell} = I_{ph} - I_0 \left(\exp \frac{q(V_{cell} + R_{ch} \times I_{cell})}{\eta \times K \times T} - 1 \right) \quad (II.9)$$

Avec :

I_0 : Le courant de saturation inverse de la diode [A]

q : La charge d'électron [$q=1.6 \cdot 10^{-19}$ C].

K : Constant de Boltzmann [$K=1,3806503 \times 10^{-23}$ J/K].

η : Facteur d'idéalité de la diode [1,6].

T : La température de la cellule [K].

V_{cell} : La tension aux bornes de la cellule [V].

Ce modèle reste théorique et ne rend pas compte du comportement d'une cellule PV dans des conditions réelles. Toutefois il reste valable toute certain hypothèse (non perte de tension, non courant de fuite,...).

En ce qui concerne le comportement d'une cellule solaire réel ; on observe une perte de tension en sortie ainsi que des courant de fuite. On modélise donc cette perte de tension avec une résistance en série R_s , et le courant de fuite par une résistance en parallèle R_p illustré dans la figure II.8:

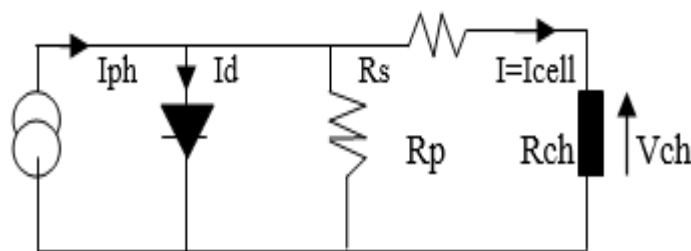


Figure II.8 : Modèle réel de cellule PV.

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

$$I = I_{ph} - I_d - I_{ch} \quad (II.10)$$

- Le photo-courant I_{ph} : est proportionnelle à l'éclairement et dépend aussi à la température son expression est :

$$I_{ph} = \left[I_{cc} + K_i \times (T_{op} - T_{ref}) \times \frac{G}{G_{ref}} \right] \quad (II.11)$$

Le courant de saturation I_s dépend de la température, son expression donne par :

$$I_s = I_{cc} \times \left(\frac{T_{op}}{T_{ref}} \right)^3 \times e^{\left[\frac{q \cdot E_g}{\eta \cdot K} \times \left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T_{op}} \right) \right]} \quad (II.12)$$

- Le courant de la jonction I_d est donne par la relation suivant :

$$I_d = I_s \times \left(e^{\frac{V_d}{V_{th}}} - 1 \right) \quad (II.13)$$

- Courant de charge I_{ch} vaut :

$$I_{ch} = \frac{V_d + R_s \cdot I}{R_{ch}} \quad (II.14)$$

Donc si en remplace I_{ph} et I_d et I_{ch} avec ces expressions dans la relation (II.10) on obtient :

$$I = [I_{cc} + K_i \times (T_{op} - T_{ref}) \cdot \frac{G}{G_{ref}}] - [I_s \times (e^{\frac{V_d}{V_{th}}} - 1)] - \frac{V_d + R_s \cdot I}{R_{ch}} \quad (\text{II.15})$$

Avec :

I_{cc} : Courant de court-circuit [A].

K_i : Coefficient de température de court-circuit.

T_{op} : Température de fonctionnement de cellule [K].

T_{ref} : Température de référence [$T_{ref}=298\text{K}$].

G_{ref} : Irradiation de la surface de la cellule (1000W/m^2).

E_g : Eclairage de référence.

V_d : Tension aux bornes de la diode [V].

V_{th} : Tension thermique donnée par [$V_{th} = \frac{\eta \cdot K \cdot T_{op}}{q}$].

II.6. Les caractéristiques des cellules photovoltaïques :

II.6.1. Tension de circuit ouvert :

Si on place un panneau sous une source lumineuse constante sans aucune circulation de courant, on obtient à ses bornes une tension continue, dite tension à circuit ouvert V_{co} donnée par :

$$V_{co} = V_t \times \log \left(\frac{I_{ph}}{I_s} + 1 \right) \quad (\text{II.16})$$

II.6.2. Courant de court-circuit :

Lorsqu'on place la photo génératrice en court-circuit, il débite son courant maximal à tension nulle [15]. On appelle ce courant de court-circuit I_{cc} vaut :

$$I_c = I_{ph} - I_d \left(\exp \frac{q(V_c + R_{sc} \times I_c)}{K \times T} - 1 \right) - \frac{V_c + R_{sc} \times I_c}{R_{shc}} \quad (\text{II.17})$$

II.6.3. La Puissance maximale P_{max} :

Pour une cellule solaire idéale, la puissance maximale P_{max} , correspond à la tension et le courant, qui présentent par la relation :

$$P_{max} = V_{max} * I_{max} \quad (\text{II.18})$$

II.6.4. Le facteur de forme FF :

C'est le rapport entre la puissance maximale que peut fournir une cellule et la puissance qu'il est théoriquement possible d'obtenir (puissance optimale) [5] donne par :

$$FF = \frac{P_{max}}{V_{co} \cdot I_{cc}} \quad (II.19)$$

II.6.5. Le rendement η :

Le rendement de la cellule qui correspond au rapport entre la puissance électrique maximale fournie par la cellule et la puissance solaire incidente [5].

$$\eta = \frac{P_m}{P_{in}} \quad (II.20)$$

$$\eta = \frac{FF \cdot I_{cc} \cdot V_{co}}{E \times S} \quad (II.21)$$

Avec

S : Surface de cellule solaire.

E: Flux incidente.

II.7 Caractéristique I(V) et P(V) dans des conditions STC (25°C, 1000 W/m²)

Les figure II.9 et II.10 nous donnent sous (MATLAB/Simulink) montre les caractéristique (I-V) et (P-V) d'un panneau photovoltaïque a une température de 25°C et un éclairement de 1000 W/m², ces condition sont considéré les meilleur pour le GPV fournie une puissance maximale (voire annex).

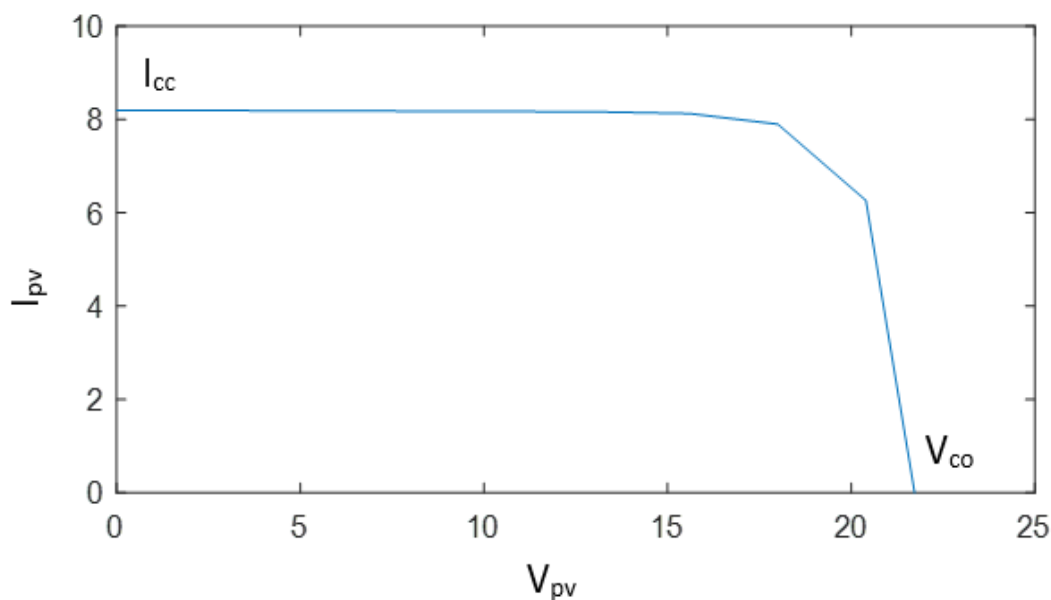


Figure II.9 : Caractéristique $I=f(V)$ de panneau solaire.

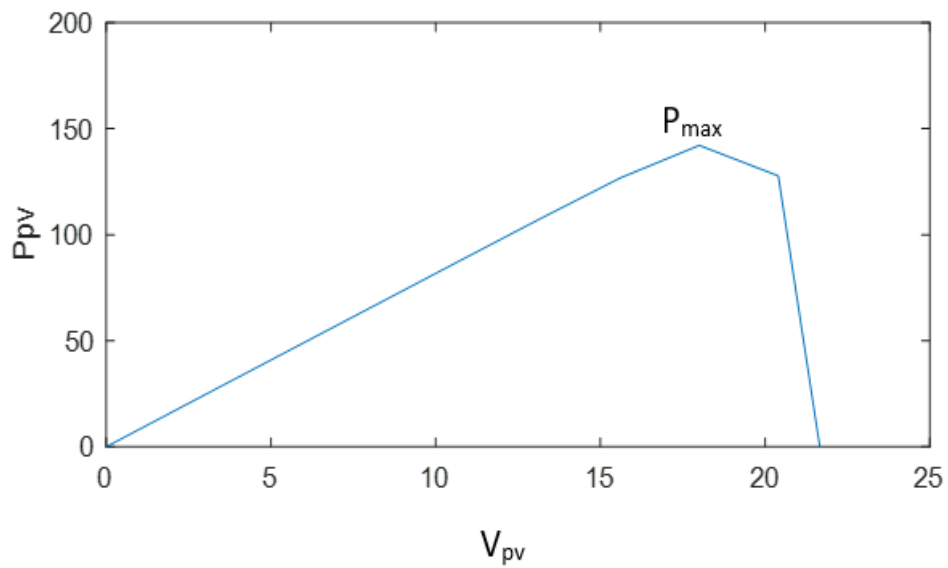


Figure II.10 : Caractéristique $P=f(V)$ de panneau solaire.

II.8. Effet des variations climatiques sur la cellule photovoltaïques :

Basent sur ce schéma bloc illustre dans la figure II.11, modéliser dans le logiciel MATLAB/Simulink on obtient les résultats suivant :

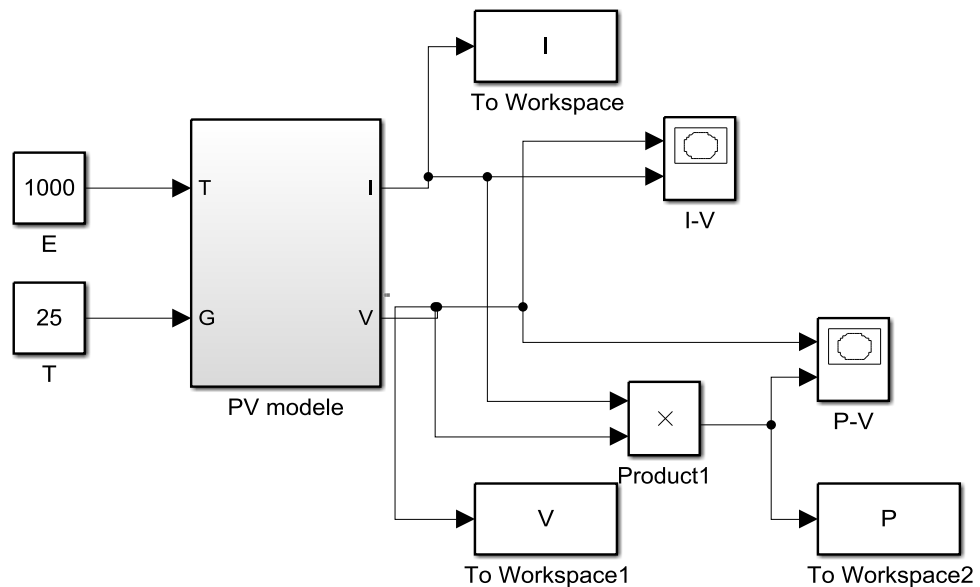


Figure II.11 : Schéma bloc de panneau photovoltaïque sous MATLAB/simulink.

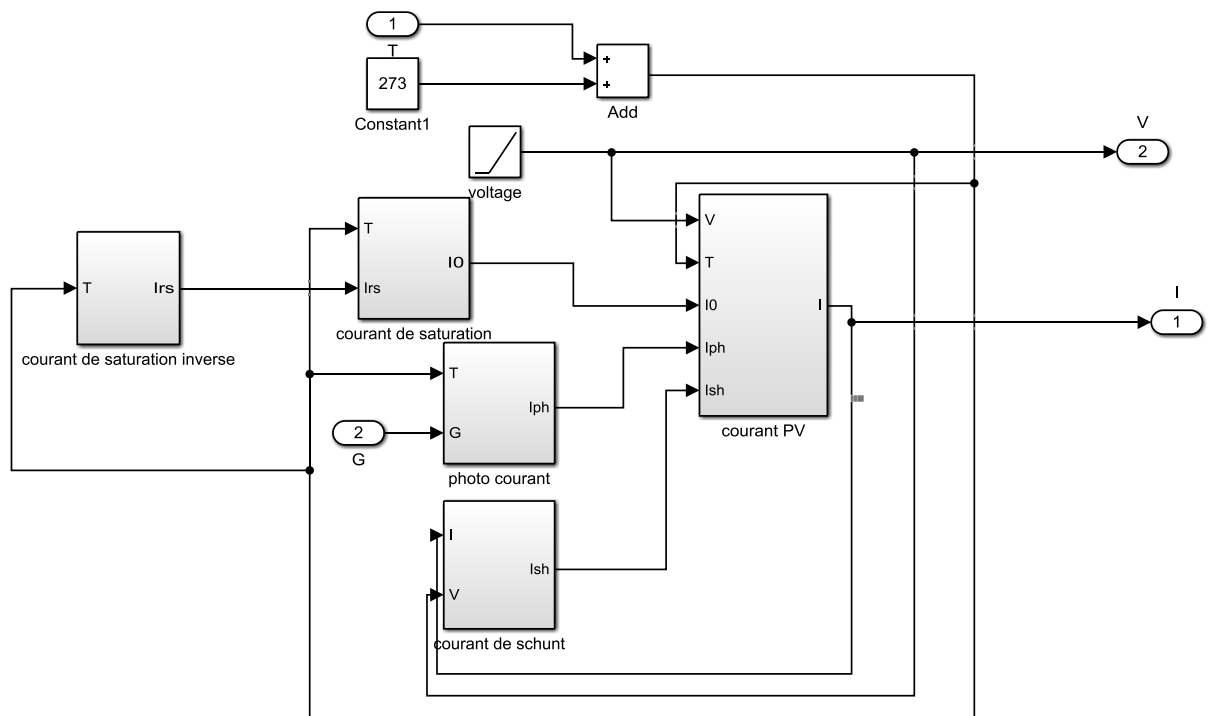


Figure II.12 : Schéma bloc détaillé de panneau.

II.8.1. Variation de l'éclairement :

L'éclairement est un paramètre très important parce qu'il a un effet spécial sur le rendement électrique, les figures II.13 et II.14 montre l'influence de l'éclairement sur les caractéristiques $I=f(V)$, $P=f(V)$ a une température constante :

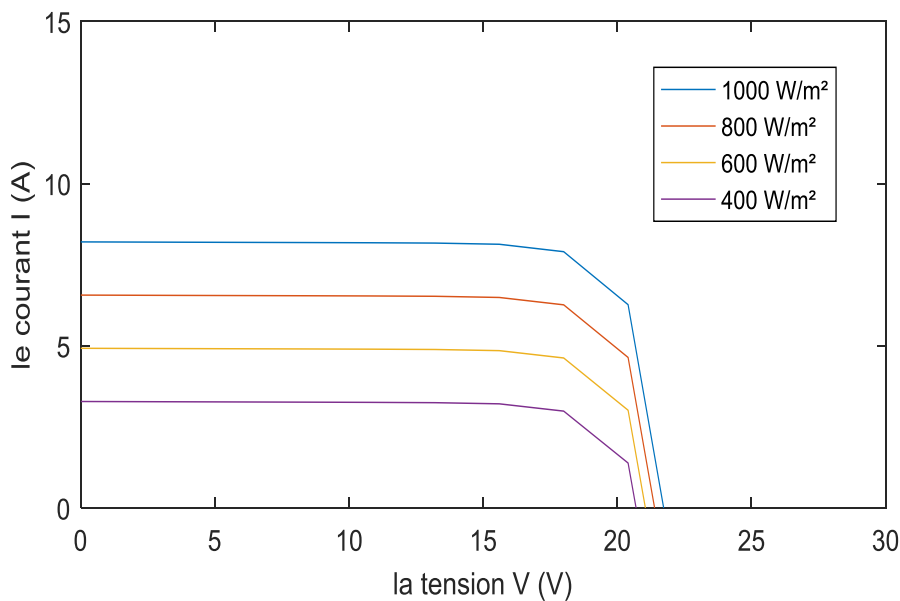


Figure II.13: Influence de l'éclairement sur les caractéristique $I=f(V)$.

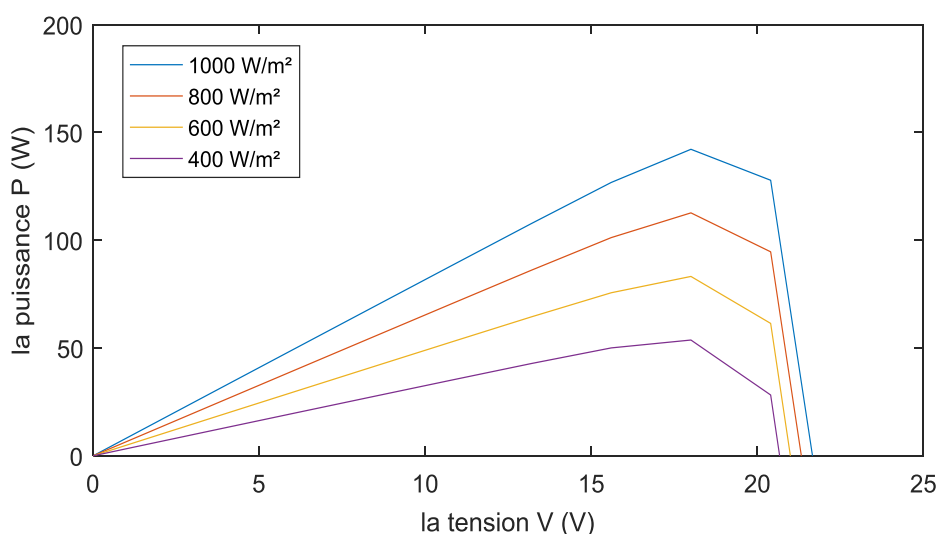


Figure II.14 : Influence de l'éclairement sur $P=f(V)$.

- **Interprétation des résultats :**

D'après la figure II.13, on observe que le courant subit une variation importante, mais par contre la tension varie légèrement dans une plage très petite.

D'après la figure II.14, on remarque que, quand la courbe se translate vers le haut et vers le droit la puissance varie proportionnellement à l'éclairement, mais la tension se varie légèrement.

II.8.2. Variation de la température :

La température est un paramètre très important dans le comportement des cellules solaires puisqu'elles sont exposées au rayonnement solaire. La figure II.15 et II.16 montre l'influence de la température, sur les caractéristiques $I=f(V)$ et $P=f(V)$:

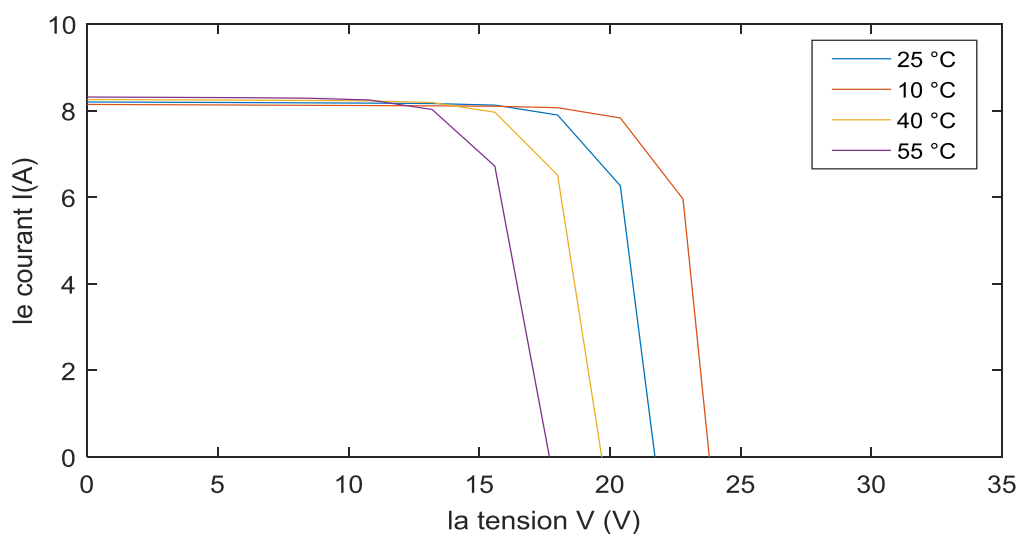


Figure II.15: L'influence de la température sur la caractéristique $I=f(V)$

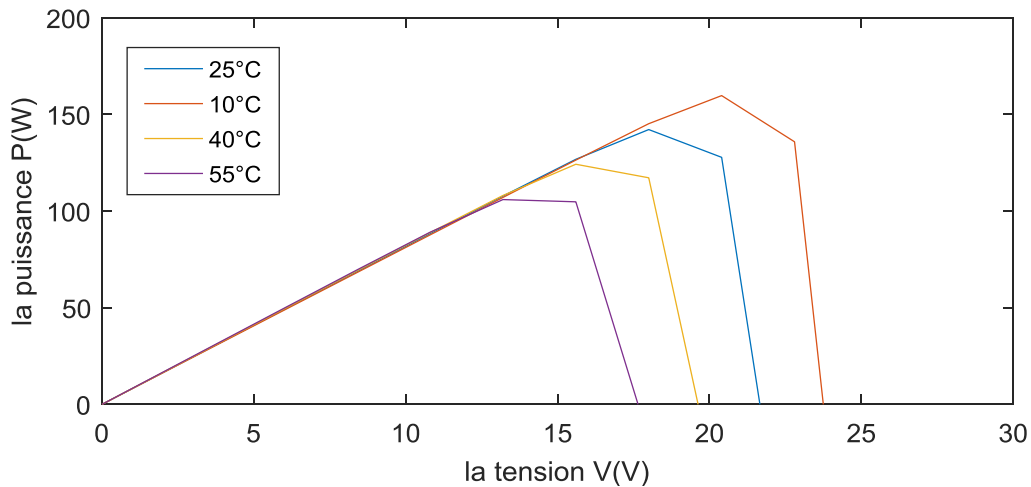


Figure II.16 : L'influence de la température sur la caractéristique $P=f(V)$

- **Interprétation des résultats :**

D'après les figures II.15, on observe que l'augmentation de la température provoque une augmentation de la tension de circuit ouverte (V_{co}), on constate que la température influe négativement sur la tension de circuit ouvert. Quand la température augmente la tension de circuit ouvert diminue, par conséquent la puissance maximale du générateur subit une diminution lorsque la température augmente comme montre la figure II.16.

II.9. Impact de l'ombre sur la courbe I-V :

Les variables de sortie d'un panneau photovoltaïque peuvent être réduites considérablement quand une petite portion du panneau est touchée par l'ombre. Des solutions particulières seront donc nécessaires pour compenser ce problème de l'ombrage. Pour se protéger de ce risque deux type de protection sont mis en place dans les installations photovoltaïques : la diode by-pass et la diode anti-retour.

- **La diode anti-retour :**

Diode anti- retour afin d'établir une protection en cas de connexion de module PV en parallèle pour éviter les courants négatifs. Ou bien quand une charge en connexion [16]. Comme représente la figure II.17:

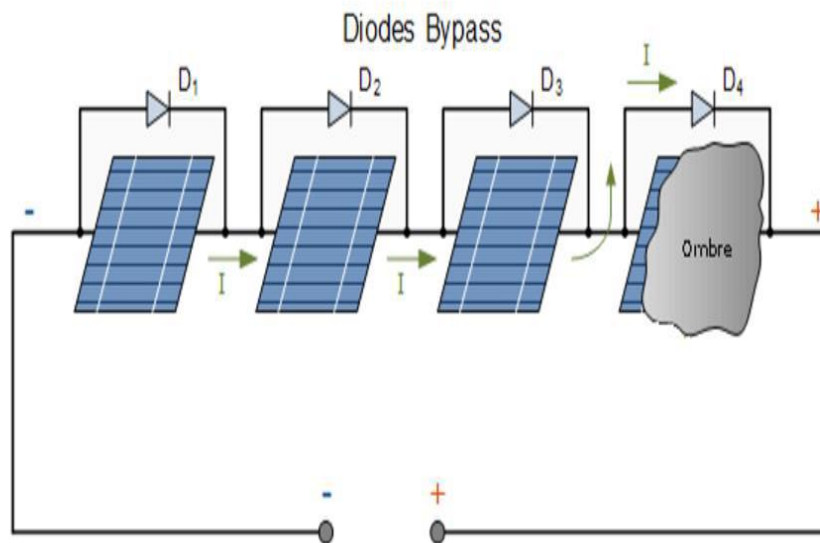


Figure II.17: Schématisation d'un GPV élémentaire avec diodes by-pass et diode anti retour.

• **Les diodes by-pass :**

Peuvent isoler un sous-réseau de cellules lorsque l'éclairement n'est pas homogène évitant ainsi l'apparition de points chauds et la destruction des cellules mal éclairées. La protection lors de la mise en série des modules PV par les diodes by-pass permettant ainsi de ne pas perdre la totalité de la chaîne et éviter les points chauds [16].

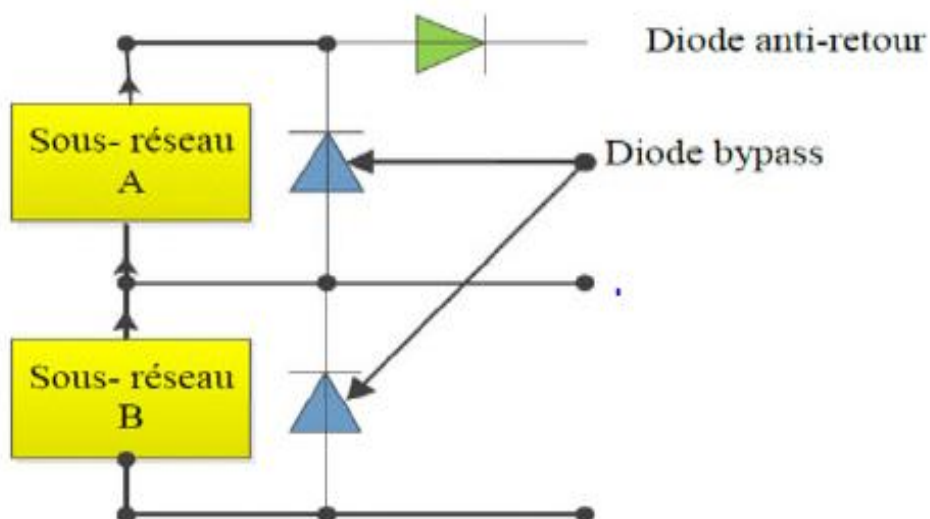


Figure II.18: Fonctionnement des diodes by-pass.

II.10. Conclusion :

La conversion photovoltaïque rencontre depuis quelques années une évolution profonde associée à l'intérêt croissant pour l'énergie photovoltaïque. Dans ce chapitre nous avons exploré le principe de la conversion photovoltaïque avec une description de la cellule PV son principe de fonctionnement et son modèle mathématique, précisément le modèle à une diode anti retour et diode by-pass pour la protection des PV. La seconde partie du chapitre est consacrée au générateur PV et l'influence de température et l'éclairement sur les caractéristiques $I=f(V)$ et $P=f(V)$.

Dans les prochains chapitres nous présenterons, la modélisation des différentes parties constituant notre système, l'optimisation par un algorithme MPPT pour le fonctionnement au point de puissance maximale et en dernier le contrôle du système côté réseau.

Chapitre III :

Convertisseur DC-DC

III.1. Introduction

Comme on a vu dans le chapitre précédent, la puissance délivrée par un GPV (générateur photovoltaïque), dépend frottement de niveau d'éclairement 'E' et la température 'T'. Les caractéristiques d'un module solaire montrent bien que la puissance maximale générée le PV présente un point de puissance maximale PPM qui n'est jamais constante, à cause de changement climatique.

Pour que le module fournisse sa puissance maximale disponible il faut une adaptation permanente de la charge avec le générateur photovoltaïque. Cette adaptation pourra être réalisée par l'insertion d'un convertisseur DC-DC (hacheur) contrôlé par un mécanisme de poursuite «Maximum Power Point Tracking» (MPPT). [11]

La conception d'un étage d'adaptation permet aujourd'hui de relier aisément un générateur photovoltaïque (GPV) à une charge de type continue (DC), avec un rendement de conversion très élevé. En fait, un convertisseur à découpage continu-continu (DC/DC) [17].

III.2. Les différentes chaines de la conversion photovoltaïque :

III.2.1. La connexion directe GPV-charge comme mode de transfert de puissance :

La connexion directe du panneau solaire photovoltaïque à une charge est le principe de fonctionnement le plus simple, fiable, et à faible cout, mais elle ne garantit pas un transfert optimal de l'énergie du GPV vers la charge. Le point de fonctionnement résulte de l'intersection entre la caractéristique I-V du GPV et la caractéristique I-V de la charge, même si la puissance du GPV est choisie judicieusement par rapport à la charge, ce type de connexion souffre souvent d'une mauvaise adaptation électrique et présente des pertes importantes de production d'énergie [17]. Pour éviter la circulation d'un courant de retour vers le GPV, une diode anti-retour doit être placée comme le montre la figure III.1:

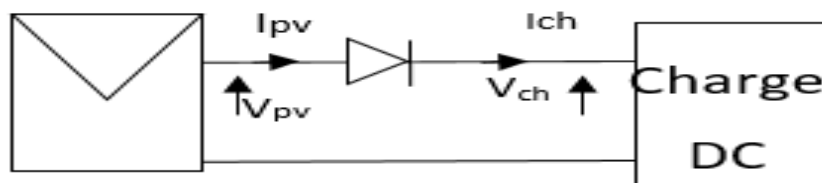


Figure III.1 : Connexion directe GPV-Charge par le biais d'une diode anti-retour [19]

Généralement dans la connexion direct de GPV le point de fonctionnement montre que le générateur est mal exploitée est ne fournit pas sa puissance maximal, comme montre la figure III.2:

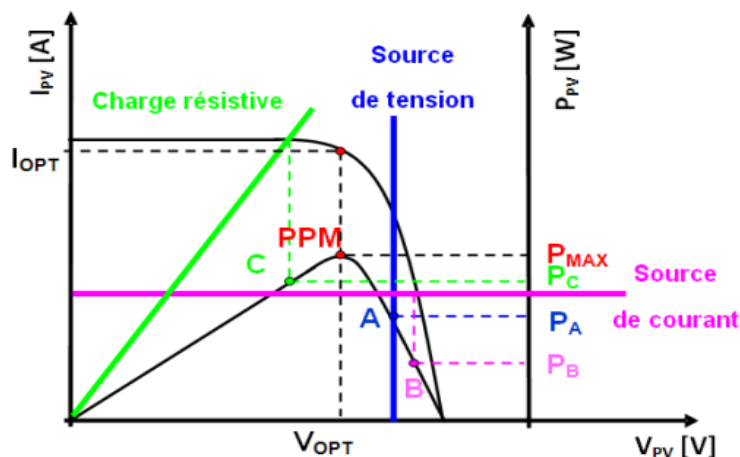


Figure III.2 : Point de fonctionnement d'un GPV en connexion direct avec la charge.

On peut conclure que le point de fonctionnement lors de la connexion direct entre la charge et le GPV, ne synchronise pas avec le MPP. Pour faire face à ce problème, un étage d'adaptation entre la charge et la source est nécessaire.

III.2.2. La connexion GPV-charge via un étage d'adaptation DC-DC :

L'utilisation de la connexion directe est limitée, vu les pertes de production qu'elle entraîne et les limites de ses applications à des récepteur fonctionnant en courant continu. L'une des préoccupations majeures de la conception d'un système PV, est de trouver l'adaptation optimale entre les caractéristiques électriques des modules solaires et la charge électrique. La puissance maximale produite par les modules PV varie en fonction des fluctuations du rayonnement solaire. Par conséquent, la charge devra être reliée aux modules PV par le biais d'un convertisseur MPPT qui puisse suivre les PPM. [18]

On peut trouver deux types d'étages d'adaptation électroniques distincts commercialisés. Le premier type permet de connecter le GPV à une charge continue telle qu'une batterie. Il fait appel à des convertisseurs DC-DC. Ce type d'architecture est la plupart du temps utilisé pour un fonctionnement en site isolé (hors réseau, off-grid). Dans certains cas, il n'y a pas le choix car les caractéristiques de la charge ne sont pas compatibles avec la forme d'électricité produite par un GPV. [17]

Ce type de convertisseur est destiné à adapter à chaque instant l'impédance apparente de la charge à l'impédance du champ PV correspondant au point de puissance maximal.

Ce système d'adaptation est couramment appelé MPPT (Maximum Power Point Tracking). [11].

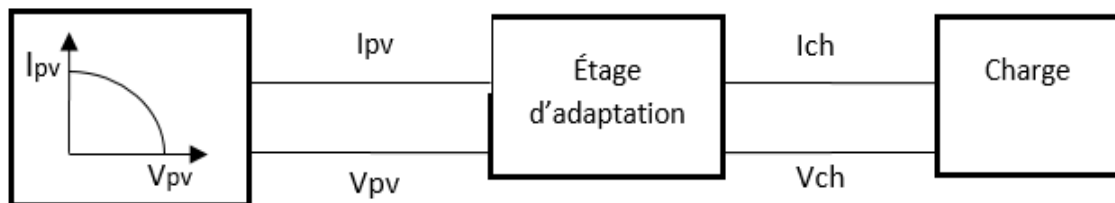


Figure III.3: Principe d'adaptation d'impédance par MPPT.

L'étage d'adaptation entre le GPV et la charge peut être constitué d'un ou plusieurs convertisseurs statiques et permet d'assurer les fonctions suivantes :

- Adapter les niveaux de tensions entre la source et la charge dans de grandes proportions si nécessaire (convertisseur Buck, Boost...) [37].
- Connecter une charge avec des besoins d'alimentation de type alternative (onduleur).
- Assurer le transfert d'énergie dans des conditions de fonctionnement optimale.
- Extraction de la puissance optimale de GPV, et assurer le fonctionnement de GPV dans sa PPM. [36].

III.3. Les convertisseurs DC-DC (hacheurs) :

Les convertisseurs DC-DC présentent une partie essentielle dans le dispositif de commande d'un champ photovoltaïque. Ces convertisseurs permettent d'obtenir une tension continue unidirectionnelle de valeur réglable par l'utilisateur, à partir d'une source de tension continue. Il est constitué d'un interrupteur qui peut être un transistor [Mos, bipolaire, IGBT] pour des faibles puissances, ou un thyristor (GTO) pour grande puissance.

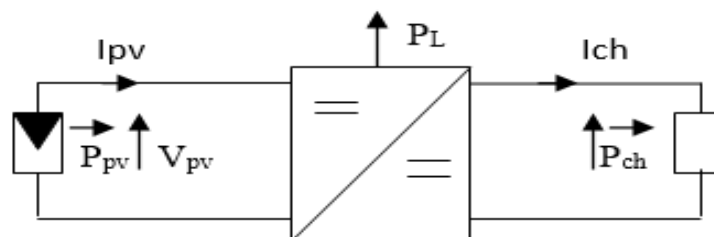


Figure III.4: convertisseur DC-DC.

Un hacheur se compose de quatre éléments essentiels : l'inductance L , la capacitance C , l'intercepteur qui prend deux états (état fermé 1, état ouvert 0), une diode D .

L'interrupteur de convertisseur est commandé par un signal PWM ou MLI (modulation de largeur d'impulsion) avec une fréquence fixe et un rapport cyclique α variable.

Trois types de convertisseurs DC/DC sont possibles :

- Les hacheurs « buck-boost ».
- Les hacheurs « dévolteur, Buck ou série » pour abaisser la tension.
- Les hacheurs « survolteur, boost, parallèle » pour augmenter la tension.

III.3.1. Hacheur abaisseur-élevateur (Buck-Boost) :

Le convertisseur buck-boost est un convertisseur DC-DC très basique, où la tension de sortie peut être supérieure ou inférieure à la tension d'entrée, la tension de sortie obtenue est de polarité inverse.

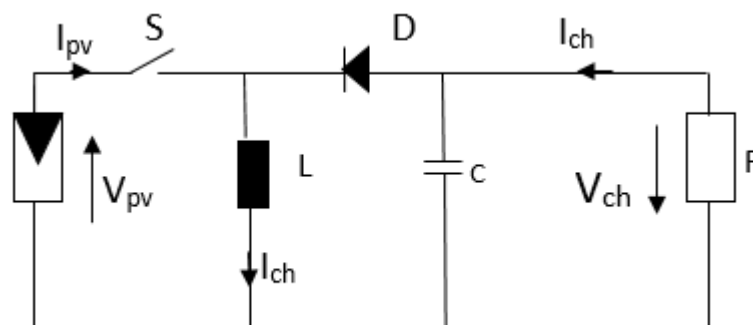


Figure III.5: Schéma de circuit électrique de convertisseur buck-boost.

III.3.2. Les hacheurs dévolteurs (série, Buck) :

Un hacheur série ou un convertisseur Buck, est une alimentation à découpage qui convertit une tension continue en une autre tension continue de plus faible valeur. Le branchement série est le plus simple et le plus utilisé.

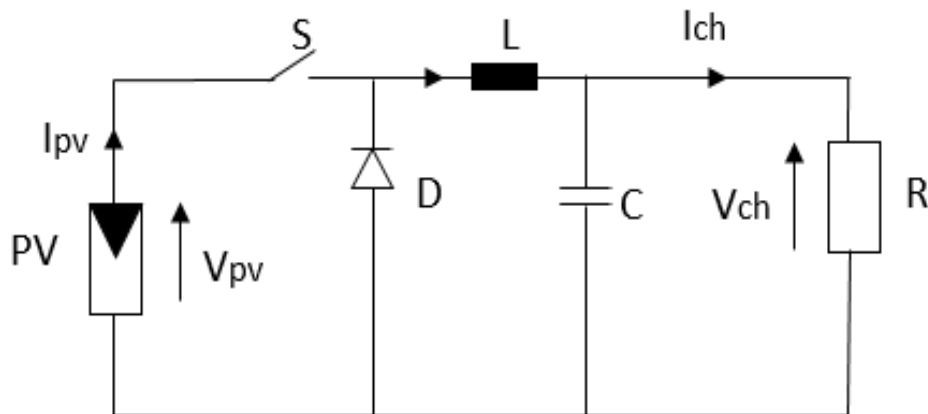


Figure III.6: Schéma de circuit électrique de convertisseur Buck (abaisseur).

III.3.1. Les convertisseurs survolteur (parallèle, Boost) :

Un convertisseur boost ou (parallèle) ou élévateur de tension, est une alimentation à découpage qui nous permettons d'obtenir une tension continue de sortie supérieure à la tension d'entrée. Ce types de convertisseur est utiliser dans les systèmes solaire photovoltaïque pour améliorer la qualité de l'énergie est augmenter les performances du GPV.

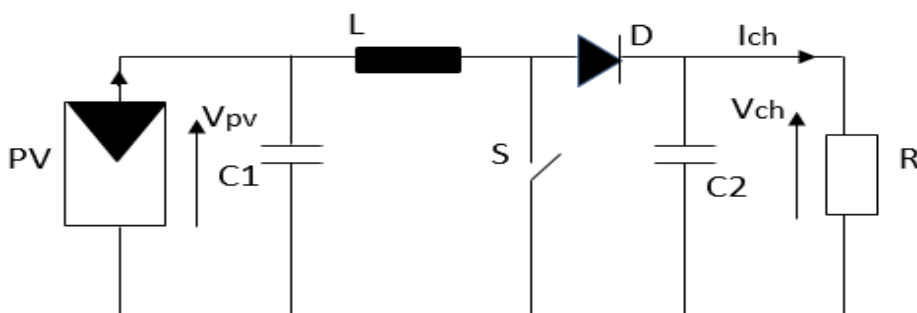


Figure III.7: Schéma de circuit électrique de convertisseur Boost.

Fonctionnement de convertisseur :

Pour un rapport cyclique « α » donné, et en régime de conduction continu, la tension moyenne et le courant à la sortie sont donnés par [11] :

$$\alpha = \frac{T_{on}}{T} : \text{Le rapport cyclique } (0 < \alpha < 1). \quad (\text{III.1})$$

$$V_{ch} = \frac{1}{1-\alpha} V_p \quad (\text{III.2})$$

$$I_{ch} = (1 - \alpha) I_{pv} \quad (\text{III.3})$$

Durant la période $0 < t < \alpha T$, état ON :

L'interrupteur S est activé, le courant dans l'inductance croît progressivement, pendant ce temps l'inductance commence à stocker l'énergie jusqu'à l'ouverture de commutateur comme indiqué dans la figure III.10 :

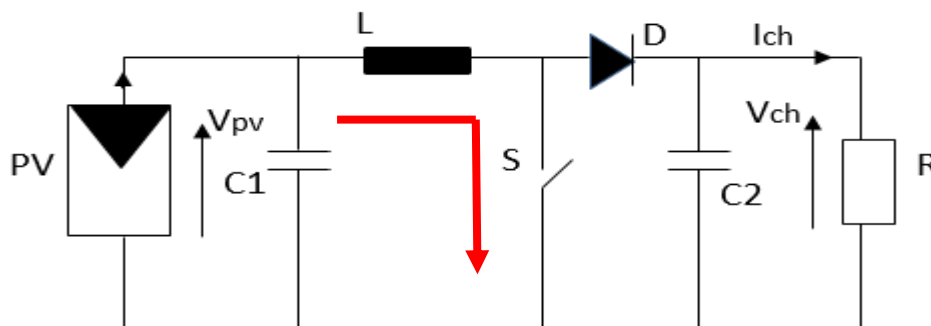


Figure III.8: Convertisseur Boost durant l'état ON

Par l'application de loi de Kirchhoff nous obtenons [33]:

$$\begin{cases} I_{C2} = C2 \times \frac{dV_{ch}}{dt} = -I_{ch} & \text{(III.4)} \\ V_L = L \cdot \frac{dI_L}{dt} = V_{pv} - R_L \cdot I_L & \text{(III.5)} \end{cases}$$

La tension d'entrée dans la première période est donnée par :

$$V_{pv} = L \cdot \frac{dI_L}{dt} \quad \text{(III.6)}$$

Le courant de l'inductance vaut :

$$I_L(t) = \frac{V_{pv}}{L}(t) + I_{Lmin} \quad \text{(III.7)}$$

Où I_{Lmin} est le courant à l'instant initial.

Durant la période $\alpha T < t < T$, état off :

Lorsque S1 est désactivé (S1 ouvert), l'inductance se trouve en série avec le générateur et sa f.e.m s'ajoute à celle du générateur (effet survolteur). Le courant I_L traversant l'inductance, traverse ensuite la diode D, C et la charge, la bobine génère une tension qui s'ajoute à la tension de source. Il en résulte un transfert de l'énergie accumulée. Le courant décroît ensuite progressivement, car $V_{ch} > V_{PV}$.

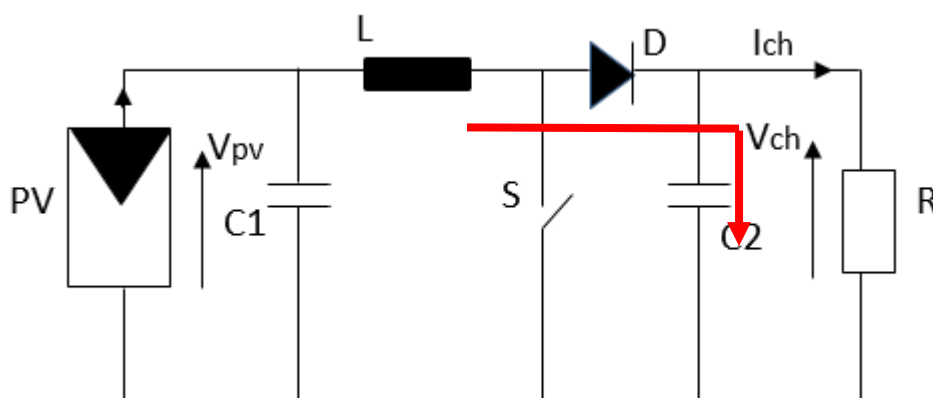


Figure III.9: Convertisseur Boost durant l'état OFF.

L'application de loi de Kirchhoff donne [33] :

$$\left\{ \begin{array}{l} I_{C2} = C_2 \cdot \frac{dV_{ch}}{dt} = I_L - I_o \\ V_L = L \cdot \frac{dI_L}{dt} = V_{pv} - V_{ch} - R_L \cdot I_L \end{array} \right. \quad (III.8)$$

$$(III.9)$$

La tension d'entrée vaut :

$$V_{pv} = L \cdot \frac{dI_L}{dt} + V_{ch} \quad (III.10)$$

Le courant donne par :

$$I_L(t) = \frac{V_{pv} - V_{ch}}{L}(t) + I_{Lmin} \quad (III.11)$$

- **Chronogrammes :**

Les différents signaux des grandeurs de convertisseur Boost sont illustrés dans la figure III.12:

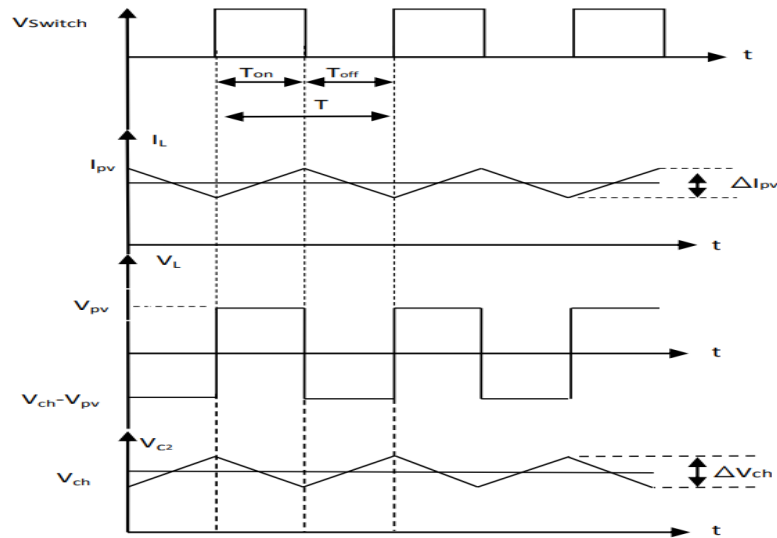


Figure III.10: Forme typique d'onde de convertisseur Boost. [33]

Dans le cas où la puissance générée du générateur photovoltaïque est plus forte il faut intéresser à ce type d'hacheur pour augmenter la tension d'entrée de l'onduleur.

III.4. Principe de la commande PWM (MLI) :

La qualité de tension de convertisseur DC-DC dépend largement de la technique de commande utiliser. Une méthode a été utiliser pour réguler la tension de sortie $V_0(t)$ afin d'obtenir une tension de moyenne $V_{0\text{-moy}}$ fixe et être constamment égale à la tension de référence, cette méthode dénommée la modulation de largeur impulsion(MLI), (pulse with modulation PWM), la technique utilisée est basée sur le découpage de l'onde rectangulaire.

Le principe de cette commande est de comparer le rapport cyclique α avec la tension en dent de scie V_{DC} comme suite :

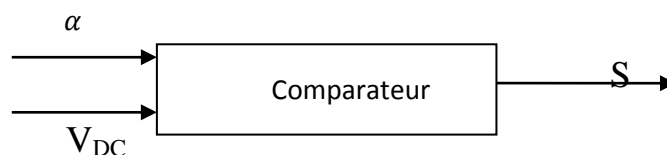


Figure III.11: Principe de PWM pour un convertisseur DC-DC

- Lorsque $\alpha > V_{DC}$, l'interrupteur S est fermé ($S=1$).
- Lorsque $\alpha < V_{DC}$, l'interrupteur S est ouvert ($S=0$) [33]

La commande MLI sert à remédier ces problèmes et elle a comme avantages :

- Elimination de certaines harmoniques de tension.

- Elle repousse les harmoniques à des fréquences plus élevés.

III.5 Conclusion :

Dans ce chapitre on a exposé brièvement les différentes connexions entre la charge et le GPV, et on a basé sur la connexion via un étage d'adaptation qui est un convertisseur DC-DC. Ensuite on a présenté les trois types de hacheur : Buck –Boost – Buck-Boost, basent sur le convertisseur élévateur qui est notre sujet de recherche, à la fin nous avons testé par simulation la méthode de poursuite du point de puissance maximale afin de visualiser le comportement de cette dernière sur un système photovoltaïque connecté au réseau. Les résultats de simulation ont prouvé que la méthode de perturbation et d'observation est robuste par rapport aux variations des conditions météorologiques (ensoleillement et température).

CHAPITRE IV :
La commande MPPT des
convertisseurs DC-DC

IV.1. Introduction :

La puissance fournie par un panneau solaire dépend essentiellement de l'éclairement journalier et la température, mais les variations climatiques entraînent la fluctuation du point de la puissance maximale de GPV. À cause de cette fluctuation on intercale souvent entre le générateur et le récepteur, un ou plusieurs convertisseurs statiques commandés permettant de poursuivre le point de puissance maximale. Ces commandes sont connues sous le nom de MPPT "Maximum Power Point Tracking" associée au hacheur, lequel assure le couplage entre le générateur PV et le récepteur en forçant le premier à fonctionner avec la tension la plus optimale et délivrer sa puissance maximale.

Dans ce chapitre nous aborderons le régulateur MPPT ainsi que le principe de la recherche de point de puissance maximale et une classification des commandes aussi que les algorithmes utiliser pour commander ce régulateur.

IV.2. Un régulateur MPPT :

Un régulateur MPPT est un convertisseur électronique DC/DC, qui permet la conversion de puissance muni d'un algorithme contrôlé approprié permettant d'extraire le maximum de puissance que le GPV peut fournir.

La première loi de commande MPPT adaptée a une source d'énergie renouvelable de type PV, été publier en 1968.

IV.3. Principe de la recherche du point de puissance maximal

La figure IV.1 représente le schéma de principe d'un régulateur MPPT, cette commande permet de varier en permanence le rapport cyclique de la commande PWM envoyée au convertisseur boost jusqu'à ce que le système se stabilise dans son point de fonctionnement optimal.

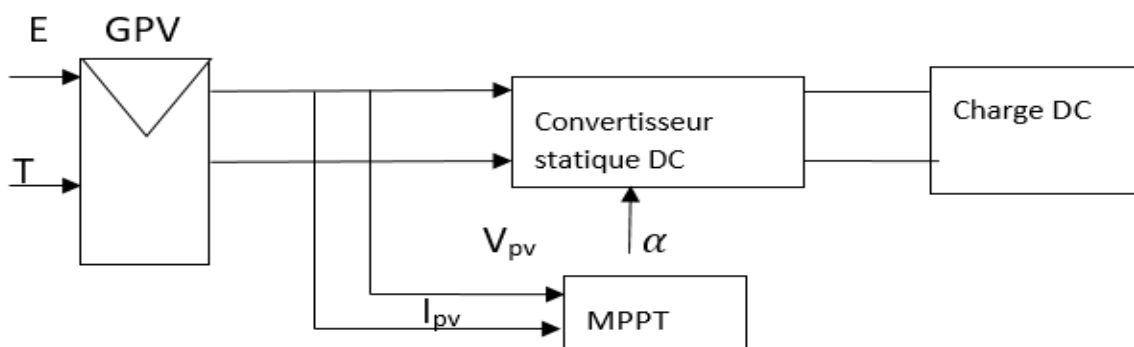


Figure IV.1 : Schéma de principe de régulateur MPPT[33]

Le rapport cyclique α de convertisseur varie en fonction des courants et des tensions, comme ces dernière peut fluctuent considérablement avec la variation des conditions atmosphérique telle que l'éclairement et la température. Ces pourquoi les implémentations MPPT utilisent des algorithmes qui échantillonnent fréquemment la tension et les courants du panneau, puis ajustent le rapport cyclique selon les besoin.

Nous présentons quelque de ces algorithmes plus loin de chapitre.

IV.4. Classification Des Commandes MPPT :

Nous pouvons classifier d'une manière générale les commandes MPPT selon le type d'implémentation électronique : analogique, numérique ou mixte. Il est cependant plus intéressant de les classifier selon le type de recherche qu'elles effectuent : direct et indirect et selon les paramètres d'entrée ou de sortie de la commande MPPT, comme il est plus intéressant de les classifier selon les paramètres a réglée. [28].

IV.4.1. Classification Des Commandes MPPT Selon le type de recherche :

IV.4.1.1. MPPT indirect :

Ce type de commandes MPPT utilise le lien existant entre les variables mesurées (I_{cc}) ou (V_{co}), qui peuvent être facilement déterminées, et la position approximative du MPP. Il compte aussi les commandes se basant sur une estimation du point de fonctionnement du GPV réalisée à partir d'un modèle paramétrique défini au préalable. Il existe aussi des commandes qui établissent une poursuite de la tension optimale en prenant en compte uniquement les variations de la température des cellules donnée par un capteur. Ces commandes ont l'avantage d'être simples à réaliser, elles sont plutôt destinées à des systèmes peu coûteux et peu précis devant fonctionner dans des zones géographiques où il y a peu de changements climatiques [29].

IV.4.1.2. MPPT direct :

Ce type de commande MPPT détermine le point de fonctionnement optimal MPP à partir des courants, tensions ou puissances mesurés dans le système. Il peut donc réagir à des changements imprévisibles du fonctionnement du GPV. L'avantage de ce type de commandes est leurs précisions et leur rapidité de réaction. [29]

IV.4.2. Classification des commandes selon les paramètres d'entrée et de sortie :

IV.4.2.1. Commandes MPPT fonctionnant à partir des paramètres d'entrée convertisseur :

Ce type de commandes MPPT effectue une recherche du MPP selon l'évolution de la puissance fournie par le GPV, comme la méthode de Perturb&Observe, les algorithmes d'incrément de conductance qui utilisent la valeur de la puissance fournie par le GPV pour l'application d'une action de contrôle adéquate pour le suivi du PPM. La commande nécessite alors la mesure du courant et de la tension en entrée du convertisseur.

IV.4.2.2. Commandes MPPT fonctionnant à partir des paramètres de sortie du convertisseur :

Dans la littérature, il existe également des algorithmes basés sur les paramètres de sortie des convertisseurs. Par exemple les commandes MPPT basées sur la maximisation du courant de sortie qui sont principalement utilisées quand la charge est une batterie.

IV.5. Les algorithmes MPPT :

Les commandes MPPT employée dans les systèmes de régulation, utilisent certain algorithme afin de varier le point de fonctionnement du GPV. Le long de la caractéristique $P(V)$ jusqu'à atteindre le MPP. Par ailleurs parmi ces algorithmes nous pouvons distinguer les méthodes basées sur la perturbation et l'observation (P&O), ainsi que la méthode de l'incrément de la conductance.

IV.5.1 Méthode a contre réaction de tension :

Cette méthode repose sur le contrôle de la tension de fonctionnement des PV par comparaison de cette tension avec une tension de référence. Cela génère une tension d'erreur qui fait varier le rapport cyclique de la MLI de la commande afin d'annuler cette erreur.[35]

Selon la nature de cette tension de référence (fixe ou variable, interne ou externe), on distingue trois types de méthodes :

- Méthode a tension de référence fixe
- Méthode à tension de référence en fonction de (circuit ouvert ; open circuit voltage).
- Tension de référence extrême (Cellule pilote).

IV.5.2. Méthode avec contre réaction de courant :

Ce mécanisme utilise seulement une mesure de courant pour obtenir l'information sur le point opérationnel et actuel du système [35]. Permet de savoir la valeur du courant optimal dans lequel doit fonctionner le panneau pour extraire le maximum de puissance :

- Méthode à courant de référence en fonction du courant de court-circuit.
- Méthode de maximisation du courant de sortie.

IV.5.3. méthode a contre réaction de puissance :

Ces méthodes sont basées sur des algorithmes de recherche itérative qui se charge de trouver le point de fonctionnement du panneau pour que la puissance générée soit maximale sans interruption de fonctionnement du système. Elles ne sont pas basées sur des valeurs de références prédéfinies ou à partir des paramètres opérationnels, mais sur la maximisation permanente de la puissance générée par les panneaux solaires. Ainsi pour un point donne on fait la recherche dans un certain sens, si on a une augmentation de la puissance du panneau alors on maintien cette direction de recherche, sinon on cherche dans le sens opposé :

- Méthode de perturbation et observation (P&O).
- Méthode de conductance incrémentale (InC).
- Méthode de Hill Climbing.

IV.5.4. Algorithme d'incrémental de la conductance :

La commande essaye de faire monter le point de fonctionnement PF du GPV le long de la caractéristique P-V jusqu'à atteindre le PPM. Cet algorithme est base sur la variation de puissance. Le courant et la tension de sortie de GPV sont utiliser pour calculer la conductance(G) et incrémentale conductance (ΔG), ces deux dernier sont donnée par :

$$G = \frac{I}{V} \quad (IV.1)$$

$$\Delta G = \frac{\Delta I}{\Delta V} \quad (IV.2)$$

Son principe est de comparer la conductance et la conductance incrémentale, et décider quand augmenter ou diminuer la tension PV pour atteindre le PPM ou la dérivée de la puissance et égale à zéro : $\frac{dP}{dV}$.

La puissance de panneau solaire est donnée par :

$$P=I.V \quad (IV.3)$$

La dérive partielle $\frac{dP}{dV}$ est donnée par :

$$\frac{dP}{dV} = I + V. \frac{dI}{dV} \quad (IV.4)$$

Quand on élime le V on va obtiens :

$$\frac{1}{V} \cdot \frac{dP}{dV} = \frac{I}{V} + \frac{dI}{dV} \quad (\text{IV.5})$$

La conductance et la conductance incrémentale sont définies respectivement par:

$$G = \frac{I}{V} \quad (\text{IV.6})$$

$$\Delta G = -\frac{dI}{dV} \quad (\text{IV.7})$$

Donc on obtient :

$$\frac{1}{V} \cdot \frac{dP}{dV} = G - \Delta G \quad (\text{IV.8})$$

En comparant la conductance et l'incrément de la conductance, trois positions du PF peuvent être distinguées :

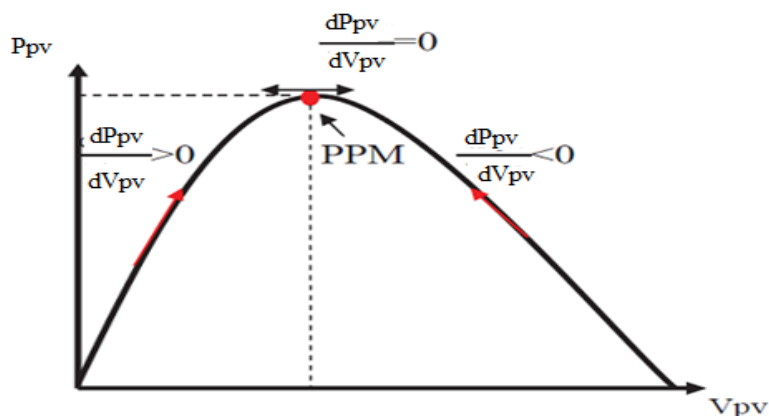


Figure IV.2: Caractéristique de fonctionnement de la méthode Inc Cond.

$$\text{Si } \frac{dP}{dV} = 0 \Rightarrow \frac{I}{V} = -\frac{dI}{dV} \quad G = -\Delta G \quad (\text{IV.9})$$

Le point de fonctionnement est sur le PPM.

$$\text{Si } \frac{dP}{dV} > 0 \Rightarrow \frac{I}{V} > -\frac{dI}{dV} \quad G > -\Delta G \quad (\text{IV.10})$$

Le PF est à gauche du PPM, On diminue α .

$$\text{Si } \frac{dP}{dV} < 0 \Rightarrow \frac{I}{V} < -\frac{dI}{dV} \quad G < -\Delta G \quad (\text{IV.11})$$

Le PF est à droite du PPM, on augmente α .

Les équations (IV.10) et (IV.11) sont utilisées pour déterminer la direction dans laquelle une perturbation doit se produire pour déplacer le point de fonctionnement vers le MPP, et la perturbation est répétée jusqu'à ce que l'équation (IV.9) soit satisfaite. Une fois le MPP atteint, le MPPT continue à fonctionner à ce moment

jusqu'à ce qu'un changement de courant soit mesuré qui sera corrélé à un changement de l'irradiation sur le réseau. [31].

IV.5.5. Algorithme perturbation et observation :

L'algorithme précédent (conductance incrémentale) représente des difficultés de calcul, ce qui augmente la période de control de système. C'est pourquoi il a été placé par une autre méthode sous le nom de perturbation et observation.

Le principe de cette commande est de générer des perturbations en réduisant ou en augmentant la tension de référence V_{ref} , ou en agissant directement sur le rapport cyclique du convertisseur DC-DC et observer l'effet sur la puissance délivrée par le GPV. Suite à cette perturbation, on calcule la puissance fournie par le GPV à l'instant « K », puis on la compare à la précédente de l'instant « K-1 ».

La puissance délivrée par le panneau PV est calculée à partir des mesures de courant I et de tension V de panneau (relation IV.3).

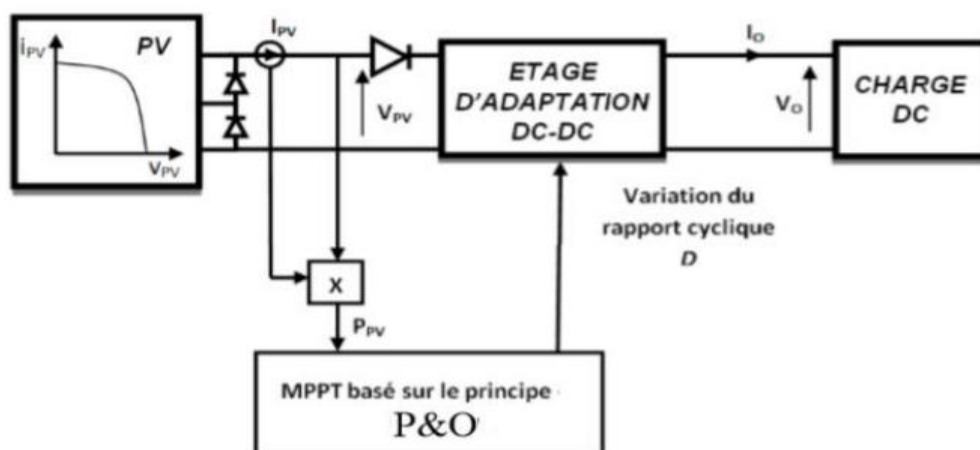


Figure IV.3: Schéma de principe de la commande P&O.

Si la puissance augmente, on s'approche de point de puissance maximale PPM, et la variation de rapport cyclique est maintenue dans le même sens. Au contraire, si la puissance diminue, on s'éloigne de PPM. Alors, on doit inverser le sens de la variation du rapport cyclique.

L'algorithme peut être représenté mathématiquement par l'expression [33] :

$$V(k) = V(k - 1) + \Delta \cdot \text{sign}\left(\frac{dP}{dV}\right)_{V=V_{k-1}} \quad (\text{IV.12})$$

La figure IV.4 représente l'organigramme de l'algorithme perturbation et observation :

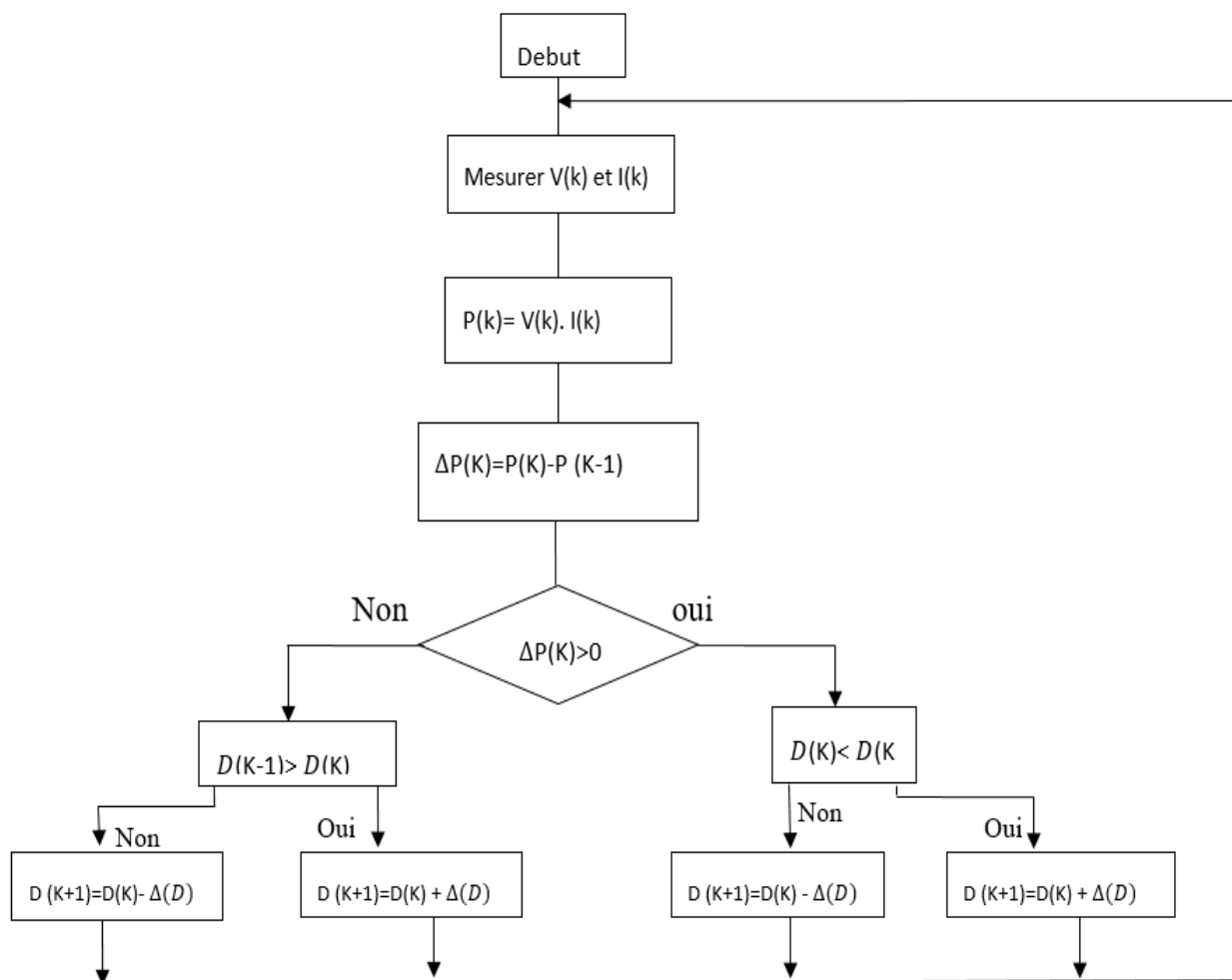


Figure IV.4 : Organigramme de l'algorithme P&O.

D'abord la tension V et le courant I sont mesurés pour calculer la puissance (k). Cette valeur $P(k)$ est comparée à la valeur de la puissance obtenue durant la dernière mesure ($k-1$).

1. Si la différence entre la puissance calculer $P(k)$ et la puissance obtenue durant la dernière mesure $P(k-1)$ est égale à zéro, donc nous sommes dans le PPM.
2. Si la puissance fournie par le panneau a augmenté depuis la dernière mesure, l'incrémement ou des incréments du rapport cyclique α continuera. [11].

Avec cet algorithme la tension de fonctionnement V est perturbée avec chaque cycle. Dès que le MPP sera atteint, V oscillera autour de la tension idéale de fonctionnement. Ceci cause une perte de puissance. [33]

IV.5.6. Avantage de commande P&O :

- Structure de régulation simple.
- Nombre des paramètres mesures réduit.

IV.6. Résultat de simulation :

Le but de cette partie est d'étudier les performances du système PV en fonctionnement a puissance maximale on utilise la commande MPPT, pour cela nous avons simulé le fonctionnement d'un ensemble (GPV-BOOST-MPPT et une charge) sous des conditions atmosphériques variable qui sont donnees sur la figure III.14, et voire son impact sur l'évolution de la puissance, la tension et le courant à l'entrée et à la sortie du système comme montre les figures suivantes :

Les résultats de la tension et le courant et la puissance sont obtenue pour ($N_s=1$ et $N_p=1$) :

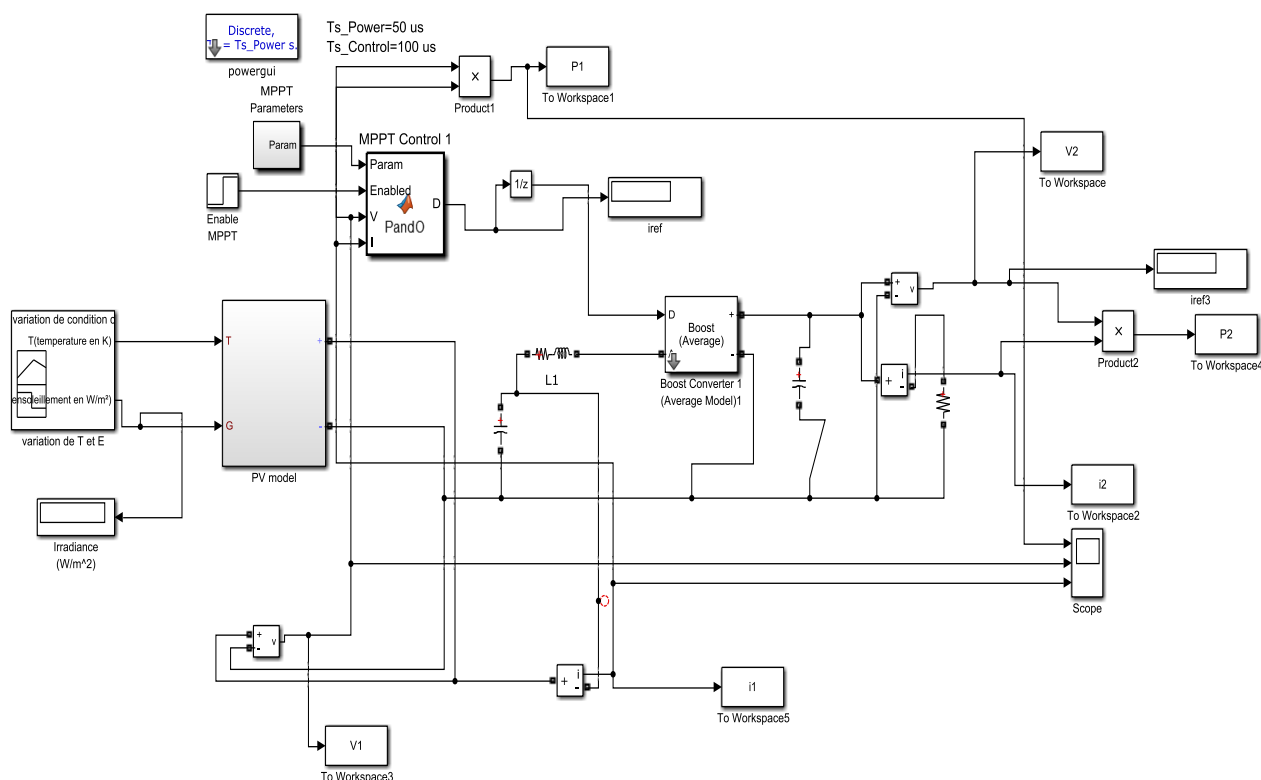


Figure IV.5 : Schéma bloc de système (GPV+boost+charge) sous logiciel MATLAB/Simulink.

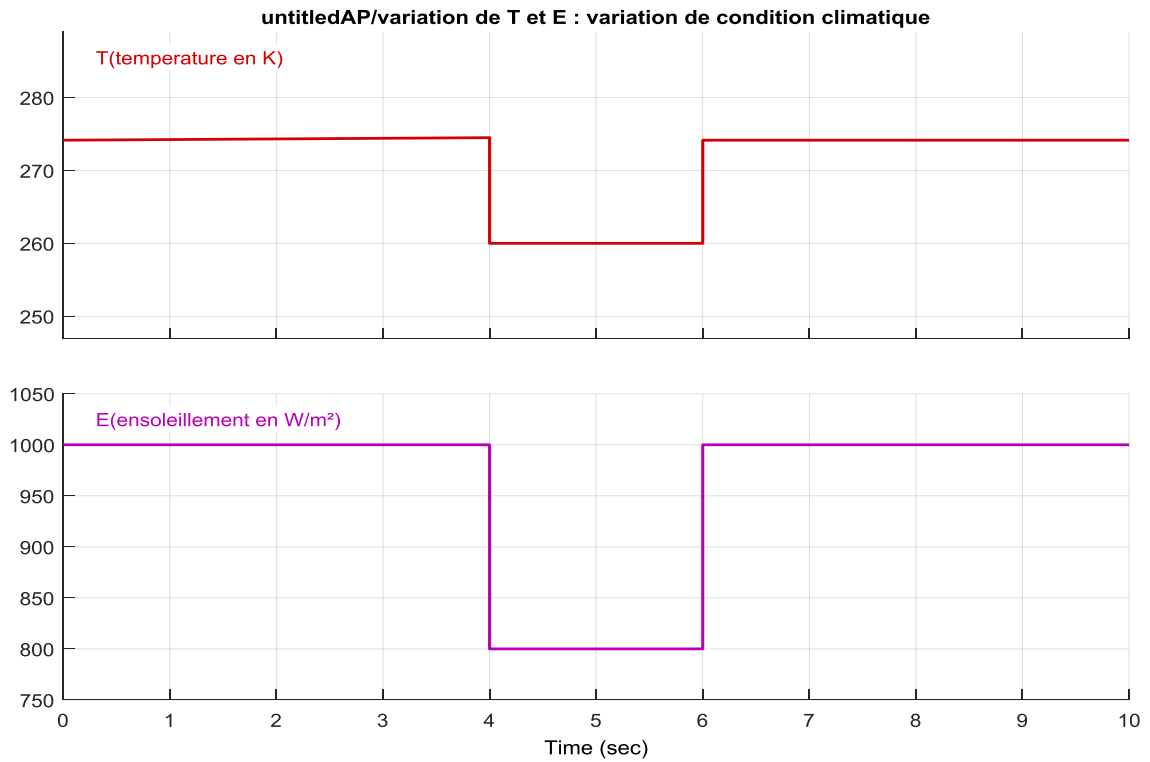


Figure IV.6: Les variations des conditions atmosphériques utiliser dans la simulation.

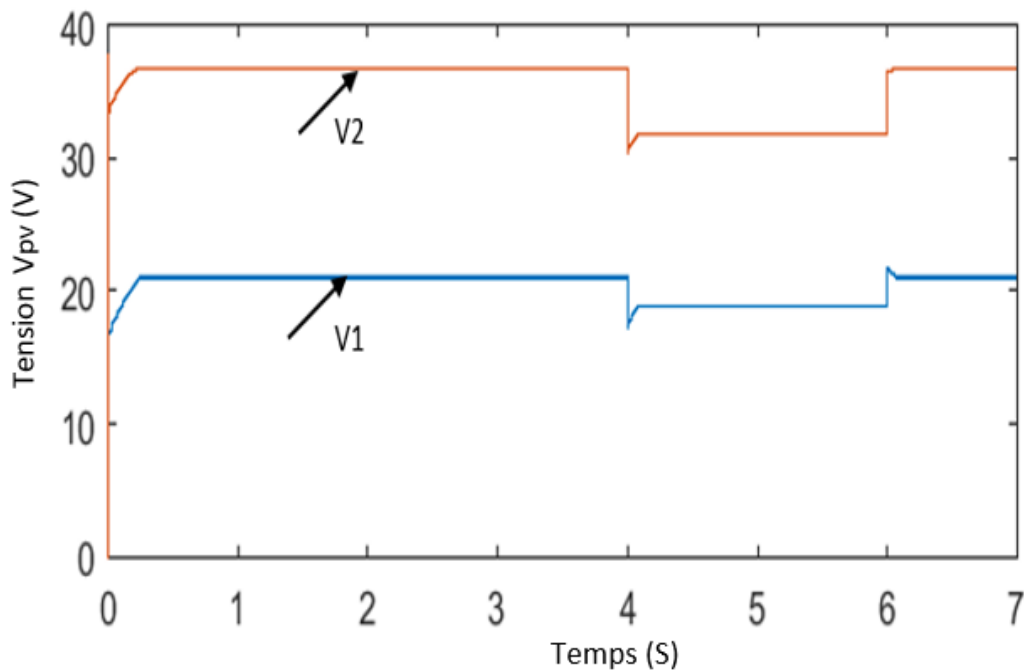


Figure IV.7 : La tension d’entrée (V1) et la tension de sortie (V2) après la commande MPPT.

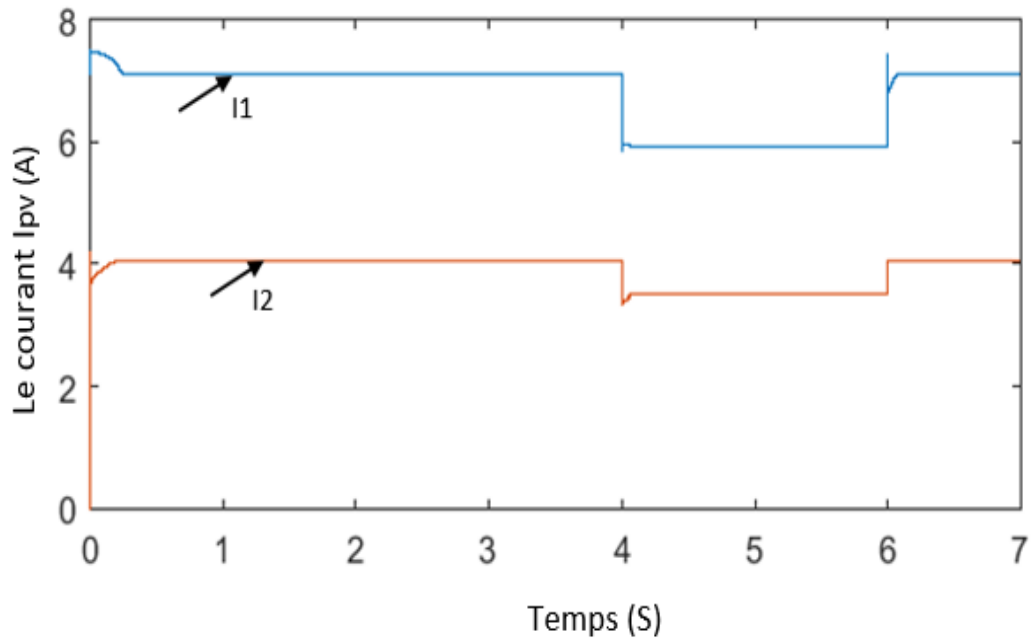


Figure IV.8: Le courant d'entrée (I1) et de sortie (I2) après la commande MPPT.

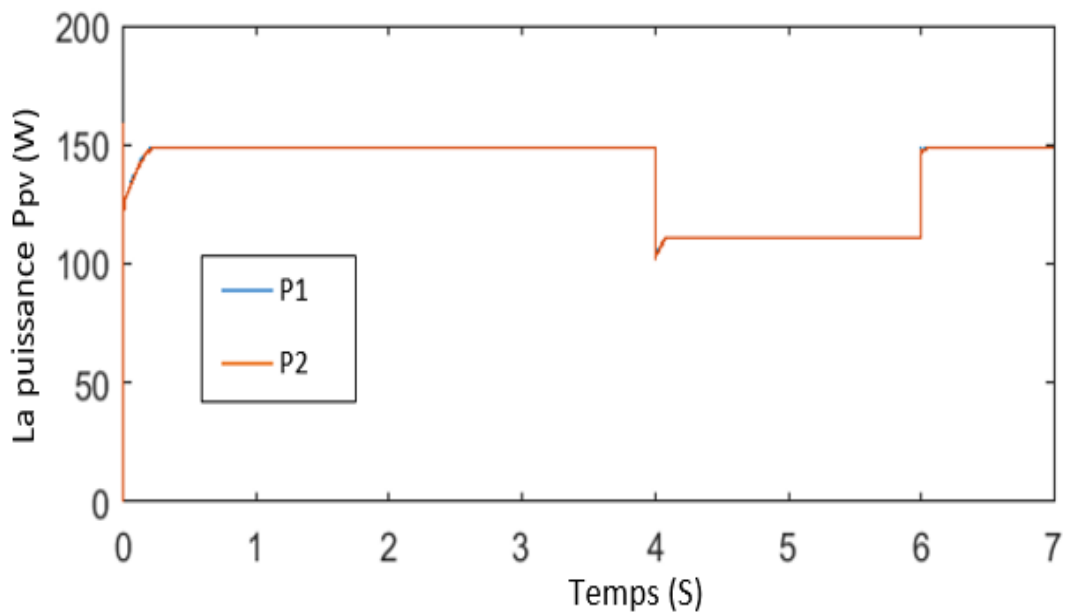


Figure IV.9 : la puissance entre (P1) et de sortie (P2) après la commande MPPT.

IV.7. Conclusion :

Le chapitre deux montre que le point de fonctionnement de GPV dépend des variations de l'éclairement et de la température. Donc dans ce chapitre on a présenté la commande MPPT « maximum power point tracking » qui va assurer le PPM de système PV, on a décrit son principe de fonctionnement, aussi les différents algorithmes utilisés. Dans notre travail, on va baser sur la méthode de perturbation et observation, grâce à sa simplicité et sa facilité de réalisation.

Chapitre V :

**Les installations photovoltaïques
Connectées au réseau électrique**

V.1. Introduction :

Un réseau électrique est un ensemble d'infrastructures énergétiques plus ou moins disponibles permettant d'acheminer l'énergie électrique des centres de production vers les consommateurs d'électricité. Il est constitué de lignes électriques exploitées à différents niveaux de tension, connectées entre elles dans des postes électriques.

Les réseaux électriques ont pour fonction d'interconnecter les centres de production tels que les centrales hydrauliques, thermiques..., avec les centres de consommation (villes, usines...).

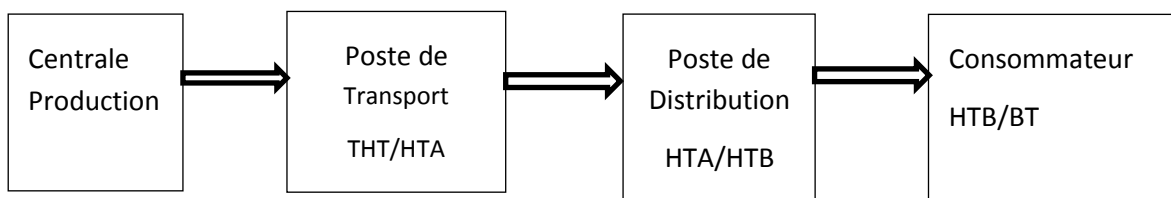


Figure V.1: Schéma d'un réseau électrique.

V.2. Niveaux de tension :

Les différents niveaux de tension sont définies de manière précise par la commission électrotechnique internationale (C.E.I), les niveaux sont les suivants et ils varient d'un pays à l'autre selon des réseaux de fonctionnement à 50Hz ou à 60Hz :

Valeur de la tension en (V)	Domaine de tension	
$U_n < 50V$	Très basse tension	TBT
$50V < U_n < 500V$	Basse tension classe A	BTA
$500V < U_n < 1KV$	Basse tension classe B	BTB
$1KV < U_n < 50KV$	Haute tension classe A	HTA
$50KV < U_n$	Haute tension classe B	HTB

Tableau V.1: Les niveaux de tension.

Ces niveaux de tension sont utilisés systématiquement dans les différents réseaux comme suite :

- Un réseau de transport : HTA 220, 150, 400 KV.
- Un réseau de distribution: HTA, HTB 60, 30, 10 KV.
- Un réseau de livraison de l'abonné : BTA 400/230 V.

V.2.1. Architecture et topologie des réseaux électriques :

V.2.2. Réseau de transport et d'interconnexion :

Les réseaux de transport sont à haute tension (HTB) ($50\text{KV} < U < 400\text{KV}$) ont pour but de transporter l'énergie des grandes centres de production vers les régions consommatrices d'électricité.

V.2.3. Réseaux de distribution :

Les réseaux de distribution ont pour but d'alimenter l'ensemble des consommateurs. Il existe deux sous-niveaux des tensions les réseaux à moyenne tension (de 10 à 60KV). les réseaux de basse tension (de 110 à 600 V) ; sur lesquels sont raccordés les utilisateurs domestiques.

V.3. Transporte d'électricité en haute tension :

L'électricité produite est transportée, répartie et distribuée en haute tension (HTA ou HTB) avec un réseau aérien ou souterrain. L'utilisation de cette haute tension est obligatoire pour :

- Minimiser les pertes joules en ligne en (watt):

$$P_j = R \cdot I^2 \quad (\text{V.1})$$

- Abaisser le courant de ligne en (watt) :

$$P = U \cdot I \quad (\text{V.2})$$

- Diminuer la section de conducteur (fil) en (m^2) :

$$S = \frac{\rho \cdot 2L \cdot I}{\Delta U} \quad (\text{V.3})$$

V.4. Grandeurs électriques importants :

Les grands réseaux électriques nécessitent la surveillance constante de certains paramètres afin de maintenir le réseau, ainsi que les installations de production et de consommation qui y sont raccordées. Les principales grandeurs à surveiller sont la fréquence, la tension, l'intensité dans les ouvrages, et la puissance de court-circuit.

a. Surveillance de la tension :

Un grand réseau électrique possède de multiples niveaux de tension, chaque niveau est conçu pour une plage d'utilisation bien spécifique. Des tensions légèrement trop élevées conduisent à une usure prématurée du matériel, puis si elles sont franchement trop élevées à un claquage de l'isolant.

Au contraire, les tensions trop basses conduisent à un mauvais fonctionnement de beaucoup d'installations, que ce soit chez les consommateurs (par exemple les moteurs), ou sur le réseau en lui-même mauvais fonctionnement de protection. En plus les tensions basses peuvent causer de grands incidents qui ont été responsables de la coupure de plusieurs millions de foyer (blackout).

b. Problématique de l'intensité (courant):

L'intensité est un paramètre particulièrement important à surveiller car elle peut entraîner la destruction de matériel coûteux (les transformateurs et les câbles), ou bien mettre en danger la sécurité des biens et des personnes (cas des lignes aériennes).

Le problème créé par une intensité trop élevée (c'est-à-dire une puissance transmise élevée) est un échauffement par effet Joule important [42].

c. Intensité de court-circuit :

L'intensité de court-circuit (I_{cc}) est une grandeur théorique qui correspond au courant que l'on pourrait mesurer en un point du réseau si ce point était relié directement à la terre. I_{cc} est fournie principalement par les groupes de production. Elle est élevée dans les nœuds du réseau que sont les postes électriques et il devient de plus en plus faible au fur et à mesure que les niveaux de tension décroissent et que l'on s'éloigne des postes électriques.

Les courts-circuits sont des événements aléatoires ; ils peuvent résulter de phénomènes atmosphériques (foudres, givre, tempête, etc...), de défaillances d'appareils ou d'accidents. Ils apparaissent également lors de fonctionnement d'appareils à charge fluctuante ou de la mise en service d'appareils appelant un courant élevé au démarrage (moteur, transformateurs, etc.)[39]

V.5. Structure générale d'un système PV connecté au réseau :**V.5.1. Système PV connecté directement au réseau :**

Cette installation est constituée d'un générateur photovoltaïque connecté directement, à l'aide d'un onduleur au réseau électrique. Parmi les objectifs de l'onduleur utilisé est le contrôle du courant issu du champ des modules

photovoltaïques et de la puissance injectée au réseau suivant les normes en vigueur. [38]

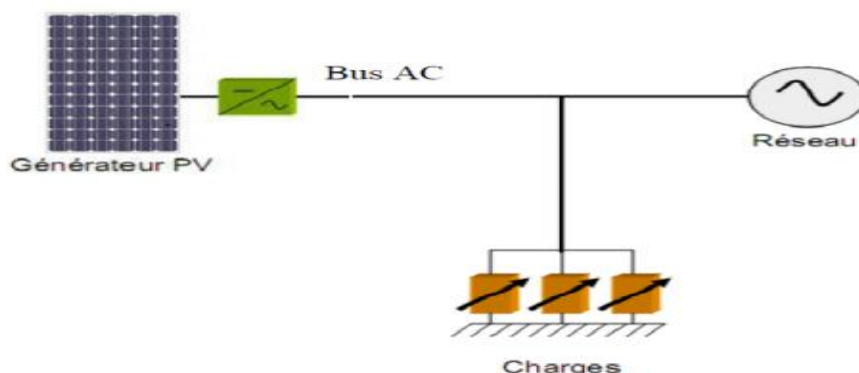


Figure V.2 : Système photovoltaïque connecte directement au réseau [35]

V.5.2. Système PV a bus continue intermédiaire :

Un système d'énergie solaire utilisant le bus comme circuit intermédiaire peut être architecturé comme suite :

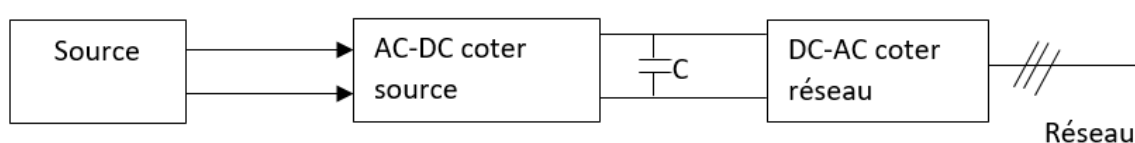


Figure V.3: Schème de système PV a bus continue intermédiaire.

Dans cette topologie le convertisseur de tension cote source (hacheur), délivrer une tension continue à l'entrée de l'onduleur. A l'intermédiaire du convertisseur et l'onduleur se trouve le bus à tension continue, puisqu'il faut imposer une tension continue constante a l'entrée de l'onduleur. Le condensateur est le principal élément constitutif de ce circuit intermédiaire, pour prendre en charge les variations rapides du courant d'entrée d'onduleur, et permet aussi de lisser la tension continue pour que l'onduleur reçoive une tension bien filtré.

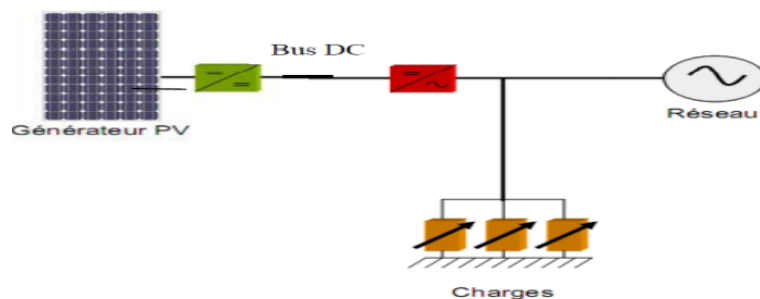


Figure V.4: Système PV connecté via un bus DC-DC [35].

V.6. Topologie des onduleurs connectés au réseau :

Les systèmes photovoltaïques connectés au réseau ont les différentes topologies selon la connexion du générateur PV avec le réseau électrique. Généralement, il existe trois architectures d'onduleurs donnant de bonne solution technique : Onduleur central, Onduleur string, Onduleur modulaire.

Dans notre cas, nous allons utiliser la topologie d'onduleur centrale car il est facile à maintenir et pour minimiser le coût.

1. Topologie d'onduleur central (Centralized inverter) :

La topologie la plus répandue consiste à utiliser un seul onduleur pour interfacer le générateur PV et le réseau électrique comme la montre en figure V.6. Dans le cas d'onduleur central, les divers panneaux solaires pour une grande installation (>10KW) sont divisés en une chaîne [38], générant chacune une tension suffisamment élevée pour éviter une amplification supplémentaire. Ces montages en série sont ensuite montés en parallèle avec des diodes anti-retours pour parvenir à des niveaux de puissance élevés.

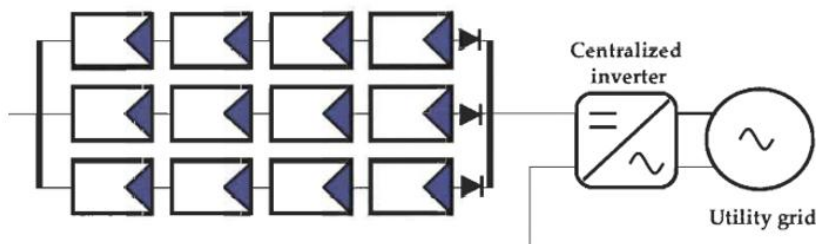


Figure V.5 : Topologie d'onduleur centralisé.

2. Topologie d'onduleur string (String inverter) :

Cette architecture consiste à utiliser un onduleur au bout de chaque chaîne de modules PV. Les onduleurs sont ensuite connectés en parallèle au réseau électrique comme indiqué sur la Figure V.6, la configuration permet un MPPT individuel pour chaque chaîne, d'où la fiabilité du système est améliorée en raison du fait que le système ne dépend plus d'un seul onduleur par rapport à la topologie onduleur central. Si un onduleur string est en panne, les autres onduleurs string peuvent continuer à alimenter le réseau, Cette technologie réduit considérablement le risque de problèmes d'adaptation ainsi que les pertes dues aux effets d'ombrage. De plus, lorsque la production d'énergie PV est faible, les onduleurs string sont moins efficaces.

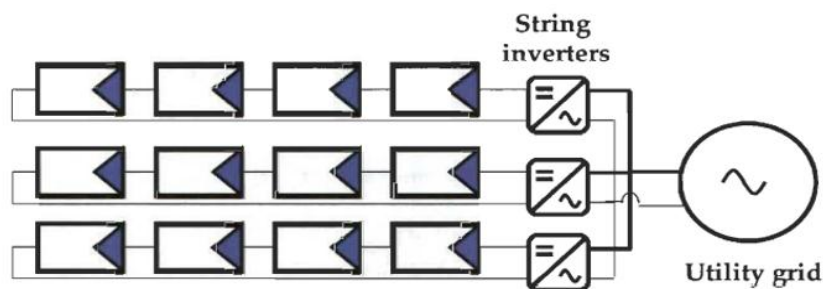


Figure V.6: Topologie d'onduleur string.

3. Topologie d'onduleur modulaire (Module inverter) :

Cependant, cette topologie ne convient qu'aux applications de faible puissance jusqu'à 500 W. Dans cette topologie chaque module solaire dispose d'un onduleur individuel, Pour les installations importantes, tous les onduleurs sont connectés en parallèle côté courant alternatif comme illustré en figure V.8. Chaque panneau dispose ici de son propre onduleur ce qui permet théoriquement d'éviter toutes pertes liées à la différence de puissance entre chaque module quelle que soit l'origine du défaut, Un meilleur rendement est obtenu car un MPPT est mis en œuvre pour chaque module.

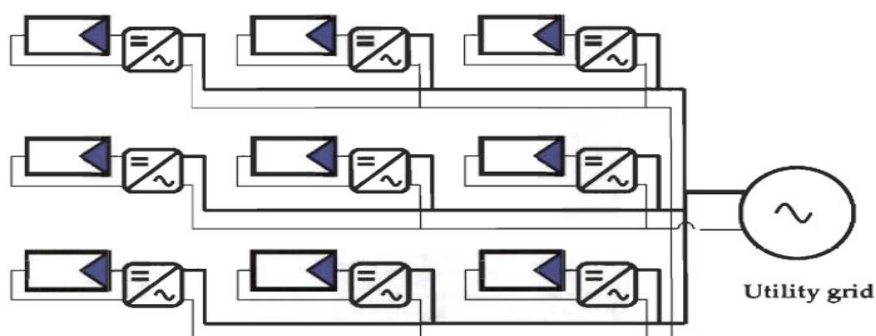


Figure V.7: Topologie de l'onduleur modulaire.

Le tableau V.2 suivant récapitule les avantages et inconvénients de chaque technologie :

Topologie	Avantage	Inconvénient	Puissance
Central	<ul style="list-style-type: none"> -facile à surveiller. -facile à maintenir. -faible cout en raison de l'onduleur central. 	<ul style="list-style-type: none"> -pertes CC dans les câbles de haute tension. -pertes de puissance due à la centralisation MPPT et le décalage dans les modules PV. -faible fiabilité. -configuration pas flexible. 	Jusqu'à plusieurs mégawatts
String	<ul style="list-style-type: none"> -réduction des pertes d'énergie qui en résultant de l'ombrage partiel. -les pertes dans les diodes de string sont éliminées. -bonne fiabilité. -configuration flexible. 	<ul style="list-style-type: none"> -cout plus élevé par rapport au central. -utiliser pour les faibles puissances. 	3 à 5KW
modulaire	<ul style="list-style-type: none"> -aucune perte due à l'ombrage partiel. -aucune perte de décalage entre les modules. -facile à détecter le défaut des modules. 	<ul style="list-style-type: none"> -cout élevé. -remplacement de l'onduleur en cas de défaut pas facile. 	Jusqu'à 500 W

Tableau V.2: Avantage et inconvénient des trois topologies.

V.7. La qualité d'énergie :

La qualité d'énergie électrique est étroitement liée à la qualité de la tension et la qualité de courant ($S=U \times I$), elle est le concept d'efficacité de classer les équipements sensibles d'une manière qui convient à l'opération de l'équipement.

1. Qualité de la tension :

La tension électrique distribuer possède quatre caractéristiques principale sont :

1.1. La fréquence :

Les fluctuations de fréquence peuvent être provoquées par des pertes importantes de production, de l'ilotage d'un groupe sur ses auxiliaires ou son passage en réseau séparé ou d'un défaut dans la chute de tension résultent entraîne une réduction de la charge. Dans des conditions normales d'exploitation, la valeur moyenne de la fréquence fondamentale doit être comprise dans l'intervalle $50 \text{ Hz} \pm 1\%$.

1.2. L'amplitude :

L'amplitude de la tension est un facteur décisif pour la qualité d'électricité, habituellement l'amplitude de la tension doit être maintenue dans un intervalle de $\pm 10\%$ autour de la valeur nominale [43]. Cependant Plusieurs phénomènes perturbateurs peuvent affecter l'amplitude de tension.

1.3. La forme d'onde :

Le réseau électrique algérien étant en tension alternatif, l'onde de tension délivre par le système électrique prend idéalement la forme d'une sinusoïde de fréquence constant 50Hz et d'amplitude constante de 220 V(en monophasé) ou 380 V (en triphasé). Linde de tension n'est jamais parfaitement sinusoïdale, la fréquence et l'amplitude de cette onde varier en permanence, et peuvent parfois s'écarter significativement de leur valeur de référence [43].

1.4. La symétrie :

Elle est caractérisée par légalité des modules des trois tensions et celle de leurs déphasages relatifs. Un système triphasé est déséquilibré lorsque les trois tensions ne sont pas égales en amplitude et/ou ne sont pas déphasées les unes des autres de 120° .

2. Qualité de courant :

La qualité de courant est relative à une dériver des courants de leur forme idéale, est ce caractérise de la même manière que pour les tensions par quatre paramètres. Le terme « qualité de courant » est rarement utiliser car il est étroitement lié à la qualité de tension et à la nature des charges. Pour cette raison, « la qualité de l'énergie électrique » est souvent réduite à « la qualité de tension ».[43]

3. Phénomène lie à la qualité d'énergie :

La variation des grandeurs mentionne ci-dessus peuvent dégrader la qualité de la tension injecter au réseau, et susceptibles d'altérer le bon fonctionnement des équipements. Parmi ces perturbations on peut citer les suivants :

- **Les creux de tension :**

C'est une baisse brutale de la tension en un point d'un réseau d'énergie électrique, à une valeur comprise entre 10 % et 90 % de la tension nominale, pour une durée de 10 ms jusqu'à quelques secondes.

- **Les coupures de tension :**

C'est une perte brusque de la tension (<1% de la tension contractuelle) pour une durée supérieure ou égale à 1 seconde et n'excèdent pas 3 minutes. [43]

- **Les surtensions transitoires :**

Les surtensions transitoires sont des phénomènes brefs, dans leur durée et aléatoires dans leur apparition. Elles sont considérées comme étant une augmentation de la tension au-dessus de la tension fondamentale pour une durée de 0.5 cycle à 60 s.

- **Les chutes de tension :**

Lorsque le transit dans une ligne électrique est assez important, la circulation du courant dans la ligne provoque une chute de la tension. La tension est alors plus basse en bout de ligne qu'en son origine, et plus la ligne est chargée en transit de puissance, plus la chute de tension sera importante.

- **Les fluctuations de tension (flicker) :**

Des variations rapides de tension, répétitives ou aléatoires, ces variations individuelles ne dépassent pas quelques dixièmes de pour-cent ($\pm 10\%$) de la tension admissible, le taux de présence varie de 25 seconde a 1 minute [43].

- **Déséquilibre :**

Le déséquilibre du système triphasé s'observe lorsque les trois tensions ne sont pas égales en amplitude et/ou déphasées de 120° les unes par rapport aux autres. L'insertion des systèmes PV peut génère un déséquilibre entre phases en cas d'utilisation d'onduleurs monophasés. Si la puissance produite n'est pas correctement répartie entre les 3 phases d'un même système PV triphasé, alors ce système va contribuer à déséquilibrer le réseau BT [42].

- **les Harmoniques :**

Ce sont des signaux de fréquence multiples de la fréquence de réseau (100Hz, 150Hz...) qui se superposent à l'onde fondamentale et déforment le signal fourni. Ils sont générés le plus souvent par des charges non linéaires. [43]

On caractérise la pollution d'un réseau de manière générale par le taux de distorsion harmonique en tension ou en courant :

$$THD\% = 100 \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} \frac{f_h^2}{f_1^2}} \quad (V.4)$$

Avec :

f_h : représente la composante harmonique de rang h.

f_1 : représente la composante fondamentale. [44]

V.8. Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons décrit l'architecture générale de réseau électrique et nous avons cité et expliqué brièvement les différentes topologies des onduleurs connectés au réseau, en basant dans notre étude sur la topologie centralisée pour un minimum des coûts. Finalement nous avons montré quelque perturbation qui peut dégrader la qualité de la tension injectée au réseau.

Chapitre VI :

Les convertisseurs DC-AC pour les
systèmes PV.

VI.1. Introduction :

L'étude du convertisseur statique est intéressante dans la mesure où il est utilisé dans la plupart des nouveaux types de sources de production d'énergie dispersée connectée au réseau (éolienne, photovoltaïque, hydraulique...etc.). Parmi c'est convertisseurs on cite l'onduleur [35].

Les onduleurs triphasés MLI à injection de courants sinusoïdaux et en phase avec le réseau électrique sont des convertisseurs couramment employés. Dans la première partie de ce chapitre on étudiera les convertisseurs, et ses principes de fonction. Dans la deuxième partie On présentera les stratégies de commande de l'onduleur. [11], est finalement on va étudier et modéliser la connexion de ces convertisseur avec le réseau électrique avec ces principaux conditions de raccordement.

Les onduleurs pour la connexion au réseau ont une puissance nominale d'environ 100 W à plusieurs centaines de kW. Jusqu'à 5 kW, ils fonctionnent en général en 230 V monophasé, alors qu'au-dessus, ils doivent être triphasés (basse ou moyenne tension). [35]

VI.2. Les convertisseurs DC-AC (onduleur) :

VI.2.1. Définition :

Un onduleur est un convertisseur statique permettant de transformer l'énergie d'une source de tension continue en une tension alternative réglable en fréquence et en valeur efficace. En fait, cette conversion d'énergie est assurée à l'aide d'un dispositif de commande (semi-conducteur). La tension de sortie a une forme d'onde périodique qui est proche à la forme d'onde sinusoïdale.

Son symbole est illustré dans la figure VI.1 :

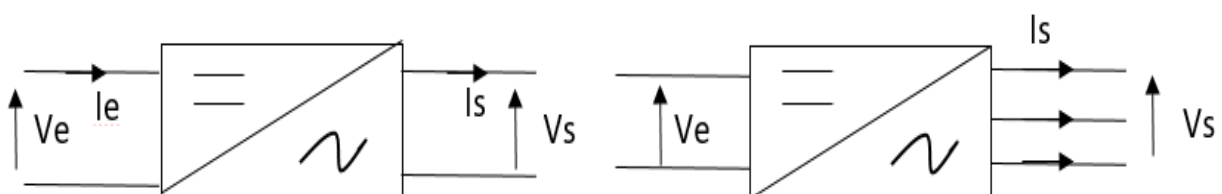


Figure VI.1 : Schéma monphasé et triphasé de convertisseur DC-AC.

Les onduleurs sont basés sur une structure en pont en H, constituée le plus souvent d'interrupteurs électroniques tels que les IGBT, transistors de puissance ou

thyristors. Ces derniers sont commandés par des commandes (symétrique, décalée, MLI), généralement on utilise la MLI (modulation de largeur d'impulsion).

Les onduleurs sont classés selon :

VI.2.2. Les onduleurs non autonomes :

Dans ce cas, les composants utilisés peuvent être de simples thyristors commandés uniquement à la fermeture et la commutation est naturelle, dont la fréquence et la tension alternative sont imposées par le réseau qu'ils alimentent.

VI.2.3. Les onduleurs autonomes

Les composants de ce type nécessitent une commande à la fermeture et à l'ouverture. Ce système génère leur propre fréquence et leur propre tension alternative. Dans ces onduleurs la commutation est forcée.

Dans notre cas on choisit l'onduleur triphasé, Ce type d'onduleur est généralement recommandé pour des applications de grande puissance. On peut réaliser un onduleur triphasé par l'association en parallèle de trois onduleurs monophasés (en demi-pont, ou en pont) et commandés les interrupteurs de chacune pour obtenir à la sortie trois tensions déphasées de 120° .

- **Onduleur triphasé composé de trois onduleurs monophasés :**

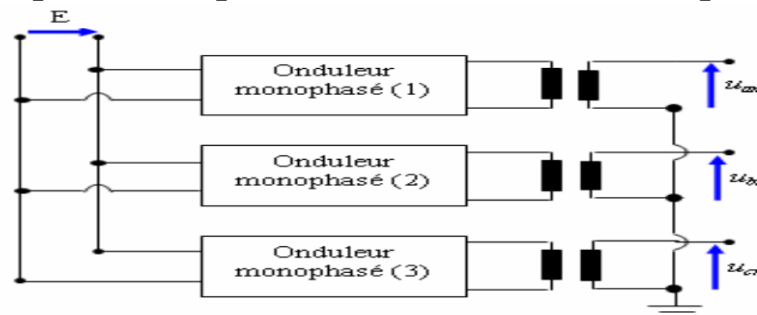


Figure VI.2: Onduleur triphasé composé de trois onduleurs monophasés.

- **Onduleur triphasé en pont :**

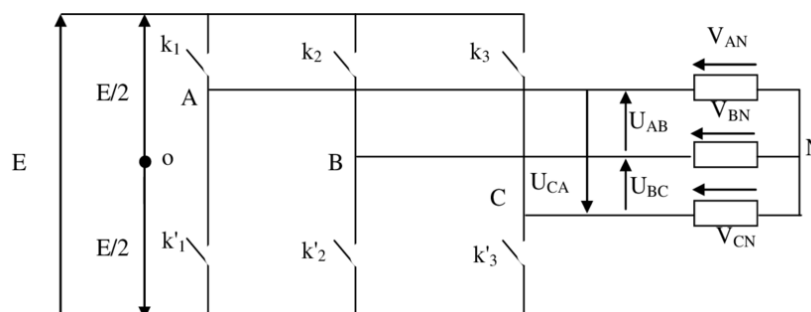


Figure VI.3: Schéma de principe d'un onduleur triphasé en pont.

Les onduleurs triphasés sont constitués de trois bras chaque bras se compose de deux interrupteurs. Les interrupteurs choisis, constituent bien une cellule de commutation. Leur fonctionnement doit être complémentaire afin de ne jamais court-circuiter la source continue. Donc les interrupteurs doivent être bidirectionnels en courant, et se compose soit d'un thyristor et une diode en antiparallèle ou bien un transistor avec une diode en antiparallèle [36].

VI.3. Les commandes des onduleurs :

La structure du système de commande de l'onduleur peut être séparée en deux sous système : l'une dite rapide qui est liée au courant (hystérésis), et une autre dite lente qui est associée à la tension continue (MLI).

VI.3.1 commande par hystérésis :

Cette stratégie simple et originale permet de contrôler un convertisseur en maîtrisant indirectement sa fréquence moyenne de commutation. Cette commande est basée sur la connaissance de l'état de convertisseur et la mise en place de règle de choix de commutation simple à mettre en œuvre. On peut distinguer de type de commande par hystérésis :

- **Contrôle des courants par hystérésis classique :**

La différence entre le courant de référence et celui mesuré est appliquée à l'entrée d'un comparateur à hystérésis dont la sortie fournit directement l'ordre de commande des interrupteurs du bras correspondant de l'onduleur. La figure ci-dessous présente le schéma de contrôle. [39]

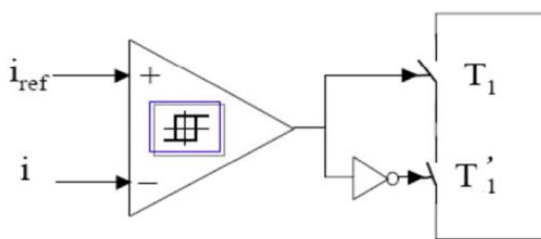


Figure VI.4 : Contrôle de courant par hystérésis classique [39].

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

- **Contrôle des courants par hystérésis modulée :**

La commande par hystérésis modulée a pour objectif de résoudre l'inconvénient majeur de la commande par hystérésis conventionnelle (classique) en fixant la fréquence de commutation des semi-conducteurs. Cette commande consiste à ajouter aux signaux (i_a^* , i_b^* , i_c^*) un signal triangulaire i_{tr} , de fréquence f_{tr} et d'amplitude A_{tr} . La fréquence f_{tr} doit être choisie égale à la fréquence de commutation que l'on souhaite imposer aux composants de puissance. Le signal ainsi obtenu attaque alors l'entrée d'un régulateur à hystérésis de largeur de bande $2B_h$ dont la sortie permet de commander les interrupteurs de puissance. Le schéma de cette commande est décrit à la figure VI.5 suivante [16] :

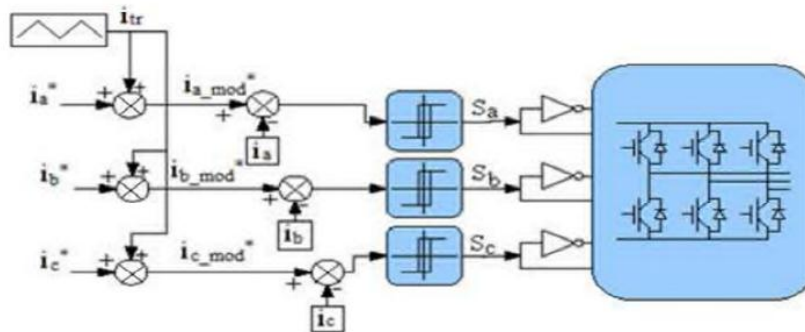


Figure VI.5 : Contrôle de courant par hystérésis modulée [16].

VI.3.2 Modulation de largeur impulsion (MLI) :

Les tensions obtenues aux bornes de récepteur pour les onduleurs triphasés présentent plusieurs harmoniques il est donc nécessaire de chercher à se rapprocher d'une forme d'onde sinusoïdale pour cela on utilise la technique de modulation de largeur d'impulsion (MLI). Cette commande est obtenue par comparaison d'un signal en dent de scie à fréquence élevée porteuse (triangulaire) avec un signal de référence (sinusoïdale), comme montre la figure VI.6. La commande des interrupteurs de l'onduleur s'effectue comme suivant :



Figure VI.6 : Principe de la commande MLI d'onduleur.

Si le signal de référence est supérieur à la porteuse, donc les interrupteurs sont fermés. Si le signal de référence est inférieur à la porteuse, donc les interrupteurs sont ouverts.

Le schéma de principe de la commande est donné par la Figure VI.7 suivante :

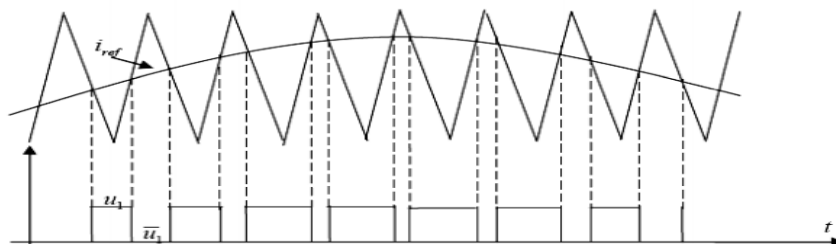


Figure VI.7: Commande des interrupteurs par MLI.

- **Paramètre de MLI :**

Cette commande est caractérisée par deux paramètres qui sont l'indice de modulation « m » qui représente le rapport de la fréquence de la porteuse à la fréquence de référence :

$$m = \frac{f_p}{f_m} \quad (\text{VI.1})$$

Et « r » le coefficient de réglage en tension (ou le taux de modulation) qui représente le rapport de l'amplitude de l'onde de référence à la valeur de crête de la porteuse [33]:

$$r = \frac{U_m}{U_p} \quad (\text{VI.2})$$

VI.4 Structure des chaînes photovoltaïques connectées au réseau :

Le raccordement d'un système photovoltaïque à un réseau se fait à travers un étage d'adaptation DC-AC (onduleur) qui servira à délivrer un courant alternatif qui sera injecté au réseau électrique comme le montre la figure suivante :

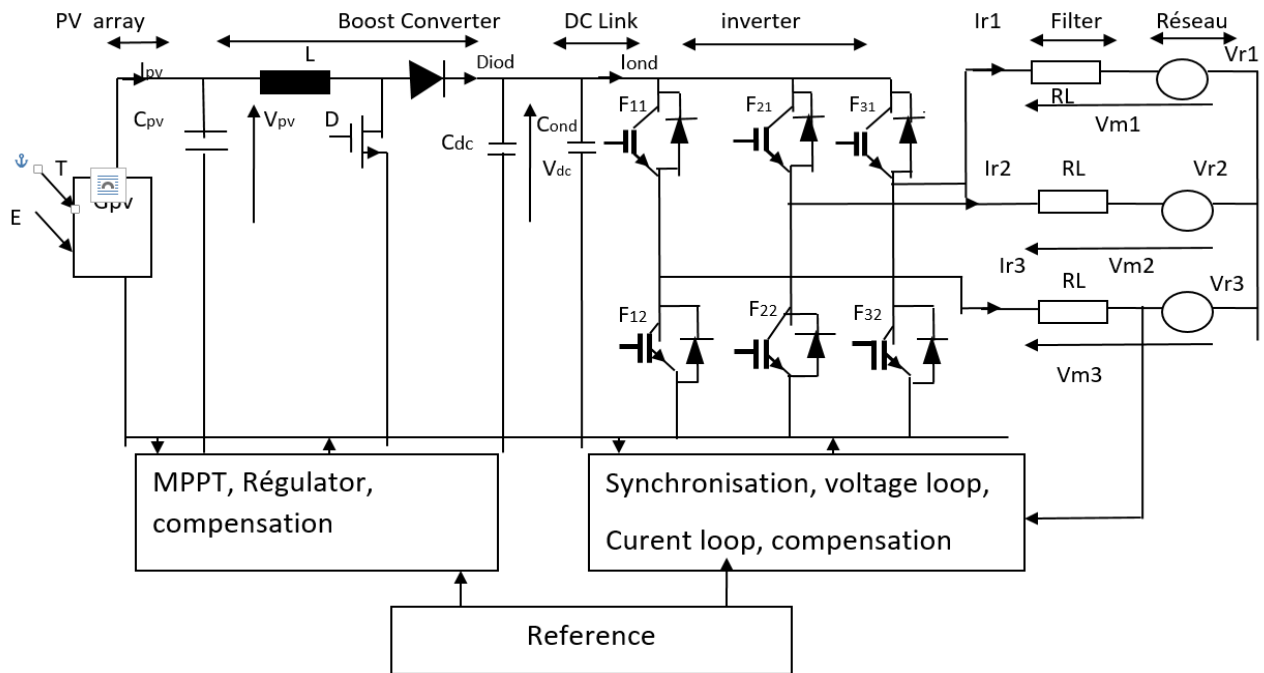


Figure VI.8 : Circuit de puissance d'onduleur de tension connecté au réseau.

VI.5. Etude de différentes parties de circuit de puissance connecté au réseau :

- **Le convertisseur DC-DC :**

Leur tâche majeure est d'augmenter la tension injectée au onduleur et d'assurer que le module PV fonctionne au point de puissance maximale. Les résultats de simulation de hacheur avec sa commande bien adaptée au fonctionnement du GPV sont montrés dans le troisième chapitre.

- **La liaison entre le DC et AC :**

On utilise un condensateur C comme un filtre capacitif pour éliminer les variations de la tension due à la fluctuation des conditions climatiques (température, l'irradiance), est assurée que la tension dans l'entrée de l'étage d'adaptation AC est filtrée. Il est donné par

$$\frac{dV_{dc}}{dt} = \frac{1}{C_{dc}} (I_{dc} - I_{ond}) \quad (VI.3)$$

Avec :

C_{dc} : Capacité de condensateur [F].

I_{dc} : Courant de sortie de hacheur [A].

I_{ond} : Courant de l'entrée de l'onduleur.

Il est mis à l'entrée de l'onduleur pour jouer le rôle d'une source de tension et atténuer les ondulations de la tension de sortie de boost.

- **Onduleur :**

Le montage représenté sur la figure au-dessus montre que l'étage d'adaptation DC-AC, est composé de 6 interrupteur entièrement commandable de type IGBT shunte en antiparallèle par une diode de roue libre dont le rôle consiste à renvoyer le courant négatif vers le condensateur. Le condensateur est un élément de stockage de l'énergie continue délivrée par le hacheur.

Afin de connecter l'onduleur en parallèle avec le réseau, il est nécessaire de disposer entre les deux un filtre de raccordement (RL) de nature inductive. Il permet de filtrer la tension de sortie de l'onduleur.

Le schéma synoptique de la connexion de l'onduleur au réseau électrique présenté dans la figure VI.9 :

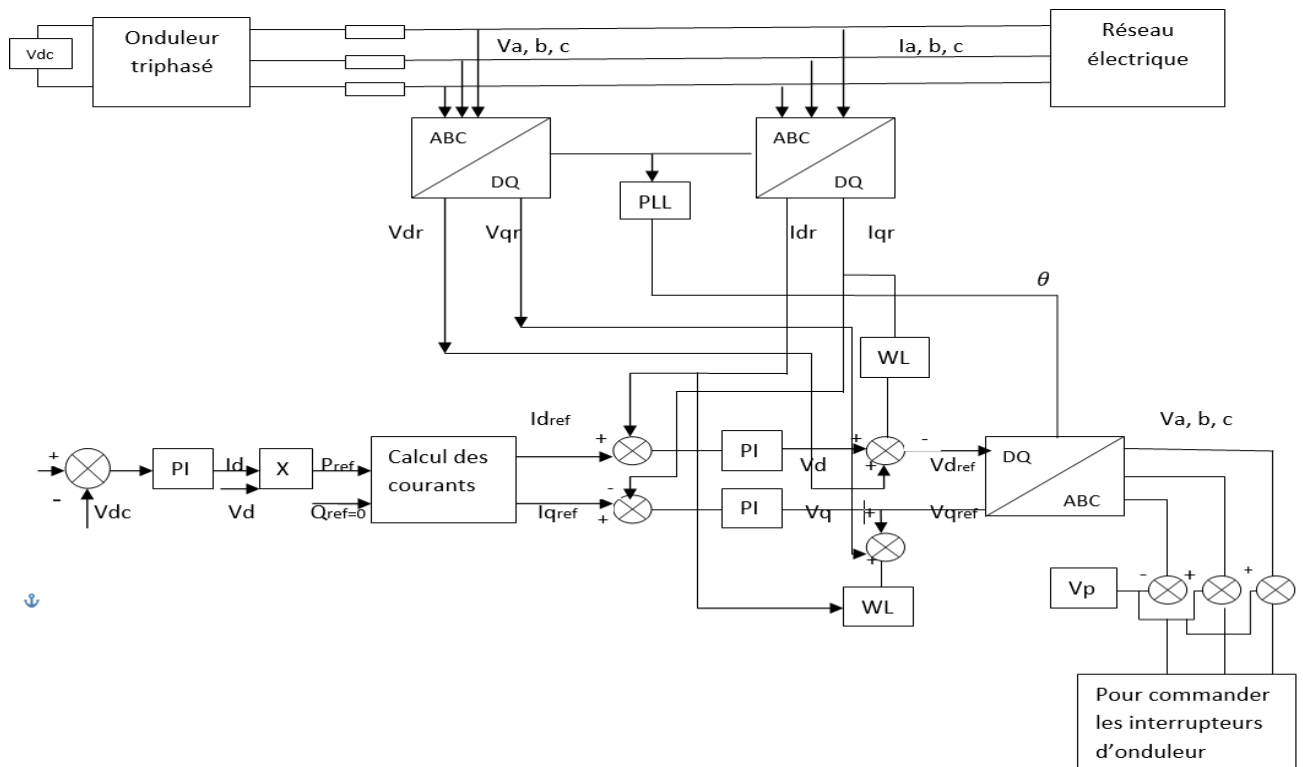


Figure VI.9 : Schéma synoptique de la connexion de l'onduleur au réseau électrique.

Ce schéma de commande d'onduleur connecter au réseau est composé de :

VI.6. Contrôle des puissances active et réactive (P, Q):

Pour minimiser les pertes et pour injecter au réseau électrique une puissance totale fournie par le GPV, on va commander les courants d'onduleur en utilisant la stratégie de commande des puissances. Cette commande basée sur la puissance active et réactive, on considère que la puissance active de référence est égale à la puissance délivré par le GPV ($P_{ref}=P$), et $Q_{ref}=0$ car ($V_q=0$) pour avoir une bonne qualité d'énergie transmise.[16]

$$P_{ref} = (V_d \times I_d + V_q \times I_q) \quad (VI.4)$$

$$Q_{ref} = (V_q \times I_d - V_d \times I_q) \quad (VI.5)$$

Ou :

-P et Q sont les puissances de référence du système PV.

- V_d et V_q sont les composantes directe et en quadrature de la tension, mesurée au point de connexion du système PV, dans le référentiel de Park.

- I_{dref} et I_{qref} sont les composantes directe et en quadrature du courant produit de référence par le système PV sur le réseau auquel il est connecté. Ces courants dépendent donc des puissances demandées ainsi que de la tension mesurée au point de connexion de la production. Son relation donne par:

$$I_{dref} = \frac{(P \times V_d + Q \times V_q)}{(V_d^2 \times V_q^2)} \quad (VI.6)$$

$$I_{qref} = \frac{(P \times V_q - Q \times V_d)}{(V_d^2 \times V_q^2)} \quad (VI.7)$$

Une fois que le calcule et effecteur, en va comparer les courant injecter avec les courant de réseau, ensuite en utilise un régulateur PI pour avoir des tensions de référence V_{dref} et V_{qref} , une transformation de Park inverse de ces deux tension permet d'avoir trois tension pour la commande de l'onduleur, ces dernier tension on va les comparer avec un signal de porteuse (principe de la commande MLI) pur obtient trois signale pour commander les interrupteur de l'onduleur.

- **Contrôle en boucle ferme des courants :**

$$V_d = (I_{dref} - I_d).PI \quad (VI.8)$$

$$V_q = (I_{qref} - I_q).PI \quad (VI.9)$$

- **Une compensation des tensions :**

$$V_d = \omega \cdot L \cdot I_d \quad (VI.10)$$

$$V_q = \omega \cdot L \cdot I_q \quad (VI.11)$$

• **Une action de découplage des tensions :**

$$V_{dref} = Vd + Vdr - (\omega \cdot L \cdot Iq) \quad (VI.12)$$

$$V_{qref} = Vq + Vqr - (\omega \cdot L \cdot Id) \quad (VI.13)$$

On peut conclure que le raccordement des installations de production aux réseaux publics est encadré par plusieurs réglementations. Cette partie présente le développement du contrôle de l'étage CC-AC de l'onduleur PV pour régler la tension à injecter, laquelle comporte :

- Une boucle à verrouillage de phase (PLL : phase locked loop) pour la synchronisation avec la tension de réseau.
- La commande des courants d'onduleur avec la stratégie de commande (P-Q).
- Contrôle en boucle fermée de courant.
- Une action de découplage des tensions.
- Une boucle de poursuite de courant réseau désiré.

VI.6. Etude de la synchronisation du convertisseur sur le réseau :

IV.6.1. La boucle à verrouillage de phase(PLL):

IV.6.1.1. Le principe de fonctionnement :

La boucle à verrouillage de phase ou (phase Locke loop), est un système de contrôle verrouillé qui permet d'obtenir la même phase d'entrée et de sortie de signale. La PLL synchronise le signale de sortie avec le signale d'entrée en phase comme en fréquence.

IV.6.1.2. PLL triphasé dans le domaine de Park :

Une boucle à verrouillage de phase ou PLL (Phase Locke Loop) est utilisée pour synchroniser la transformation de Park sur la pulsation de la tension mesurée sur le réseau.

Le principe de la PLL dans le domaine de Park est illustré sur la figure VI.10 [39]:

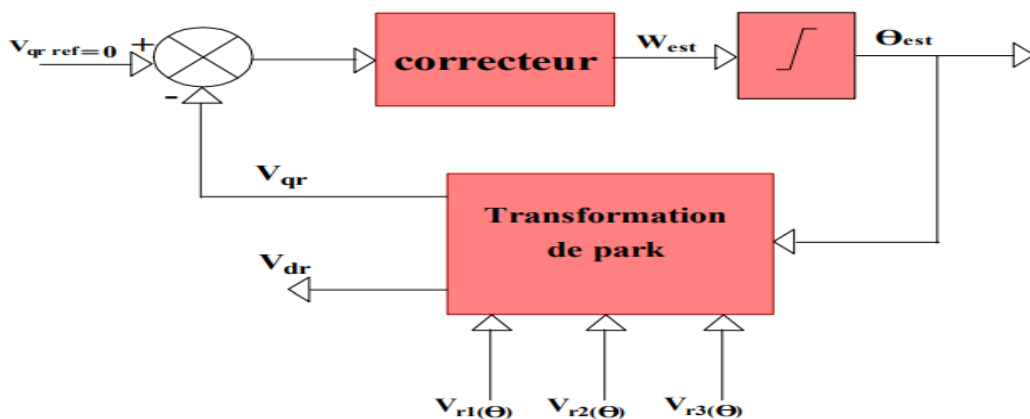


Figure VI.10 : Principe de la PLL dans le domaine de Park. [16]

La composante d'axe q générée par cette transformation est asservie à zéro par action sur l'angle du repère de Park(θ). En régime établi l'angle (θ) est égal à l'angle (θ_r) du réseau.

La fréquence instantanée et l'amplitude de vecteur de tension sont également déterminées. Lorsque la différence entre angle de phase du réseau θ_r et l'angle de phase de l'onduleur θ_{ond} est réduite à zéro ($\Delta\theta = 0$).

VI.7. Résultat de simulation :

Nous avons simulé notre système PV avec 450 panneaux en utilisant MATLAB\Simulink. Le générateur photovoltaïque est constitué de ($N_s=30$) panneaux en série et ($N_p=15$) panneaux en parallèle, ce qui correspond à une puissance au point de puissance maximum $P_{mpp}= 95.8KW$.

La simulation de système photovoltaïque connecter au réseau électrique incluant le globale des partie étudié dans les chapitres précédent (GPV+ convertisseur boost+ MPPT+onduleur+ réseau+PLL), cette modélisation à été réalisé avec les paramètres suivants :

Réseau de tension : 380V/50Hz.

Impédance de filtre et du réseau : $R=0.01 \times 10^{-3}$ (ohm)et $L=500 \times 10^{-6}$ (H).

Convertisseur élévateur (boost) : $C_1=100 \times 10^{-6}$ (F) et $C_2=3.8 \times 10^{-6}$ (F) et $R=0.01$ (ohm) et $L=5.44 \times 10^{-4}$ (H)

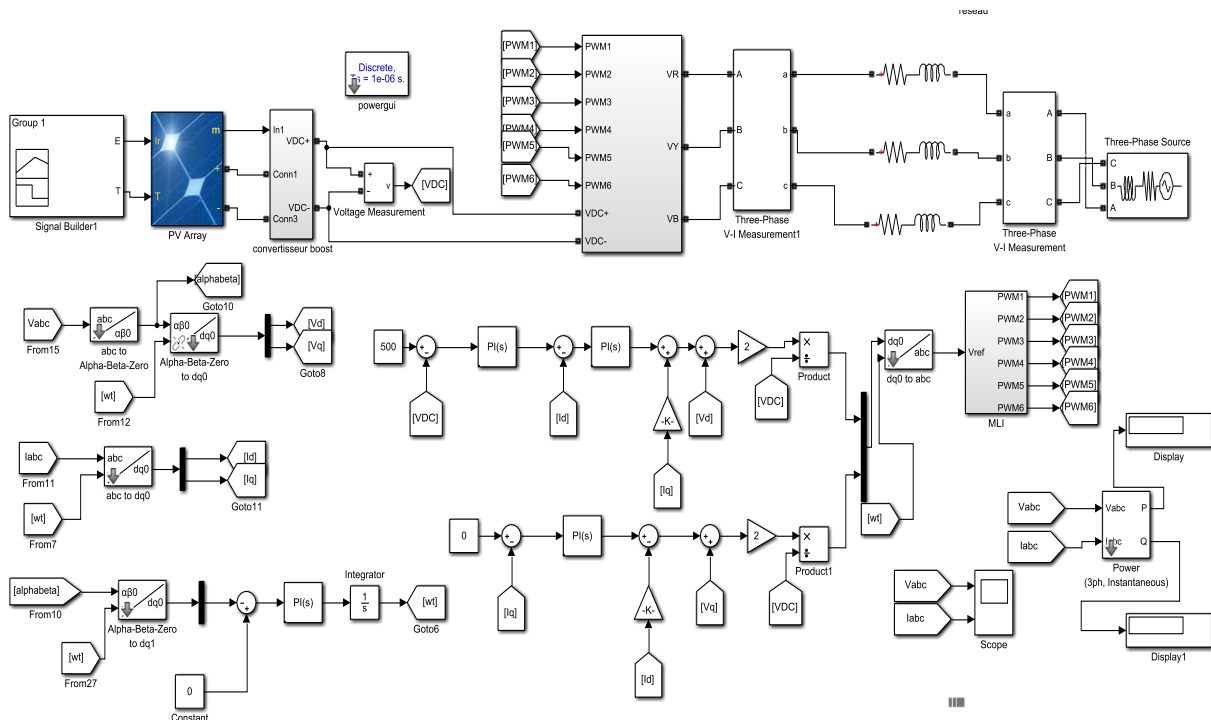


Figure VI.11 : Schéma bloc de système PV connecté au réseau électrique.

VI.7.1. La tension et le courant de phase dans des conditions climatiques stables :
Les résultats obtenus dans les conditions standards de fonctionnement ($E=1000\text{W/m}^2$, $T=25^\circ\text{C}$).

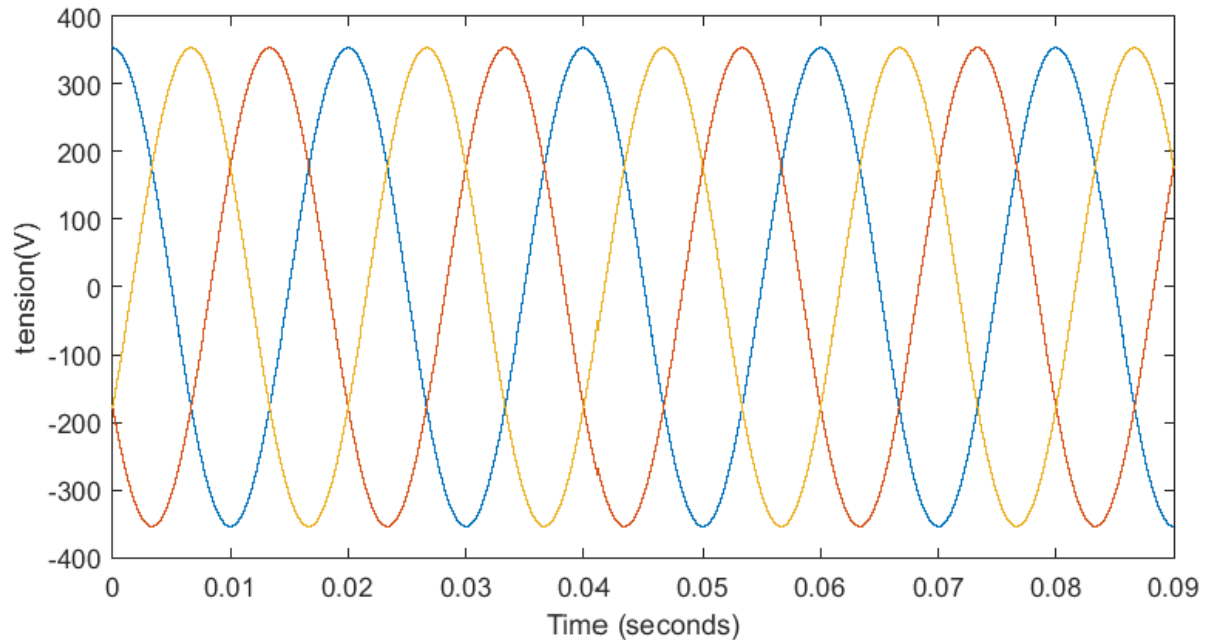


Figure VI.12 : La tension triphasée cotée réseau.

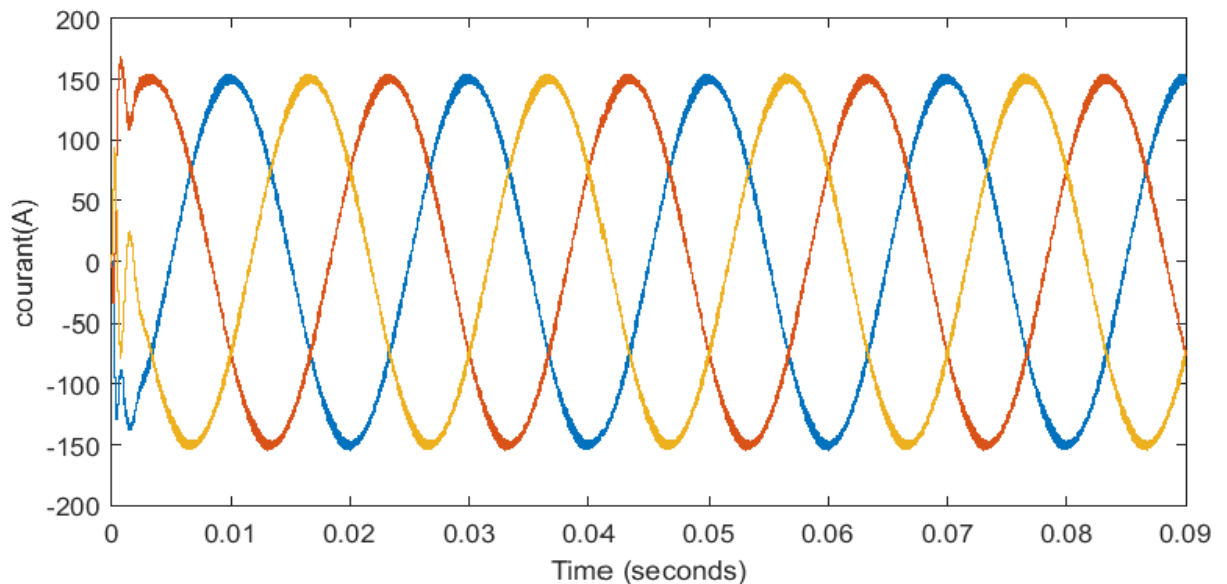


Figure VI.13 : Courant des trois phases cotées réseau.

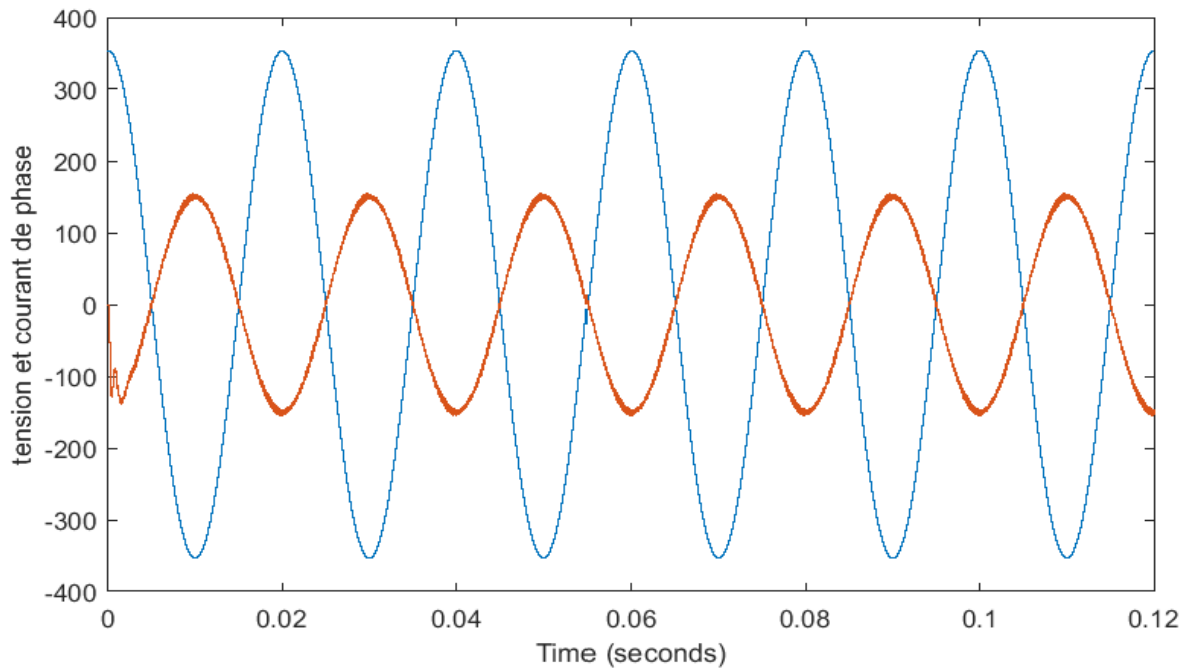


Figure VI.14 : Courant et tension de la première phase cote réseau.

VI.7.2. La tension et le courant de phase dans des conditions atmosphériques variable :

Dans le but d'étudier les performances du système, en fonctionnement à puissance maximale avec la méthode P&O, on a appliqué un ensoleillement et une température variable comme montre la figure VI.15 :

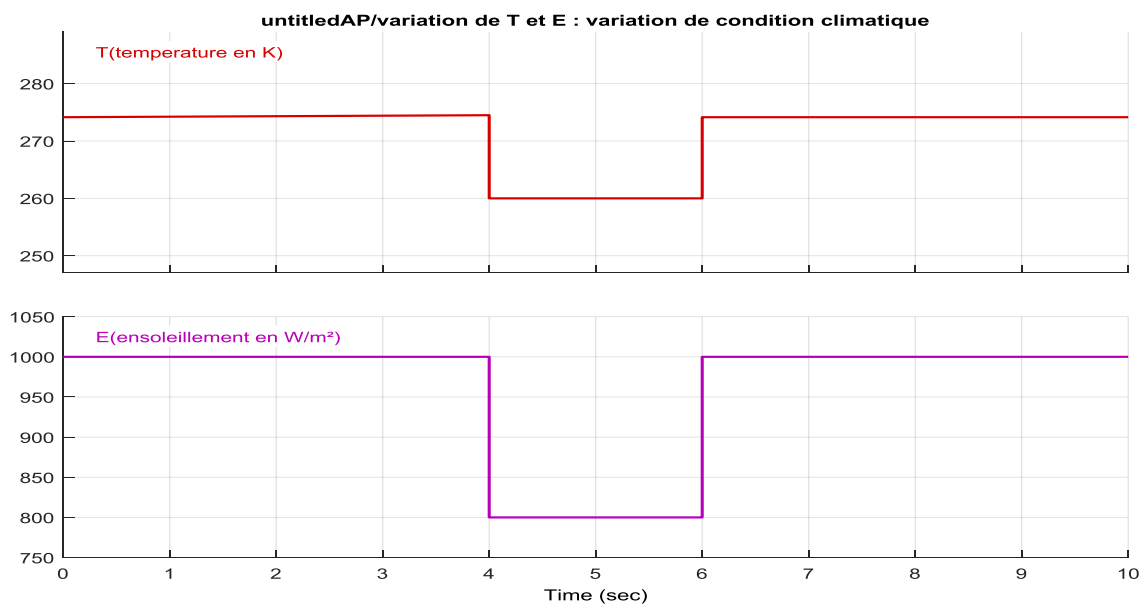


Figure VI.15 : Les conditions atmosphériques variables.

L'allure de la tension et le courant de cotée réseau est montre dans la figure VI.16 :

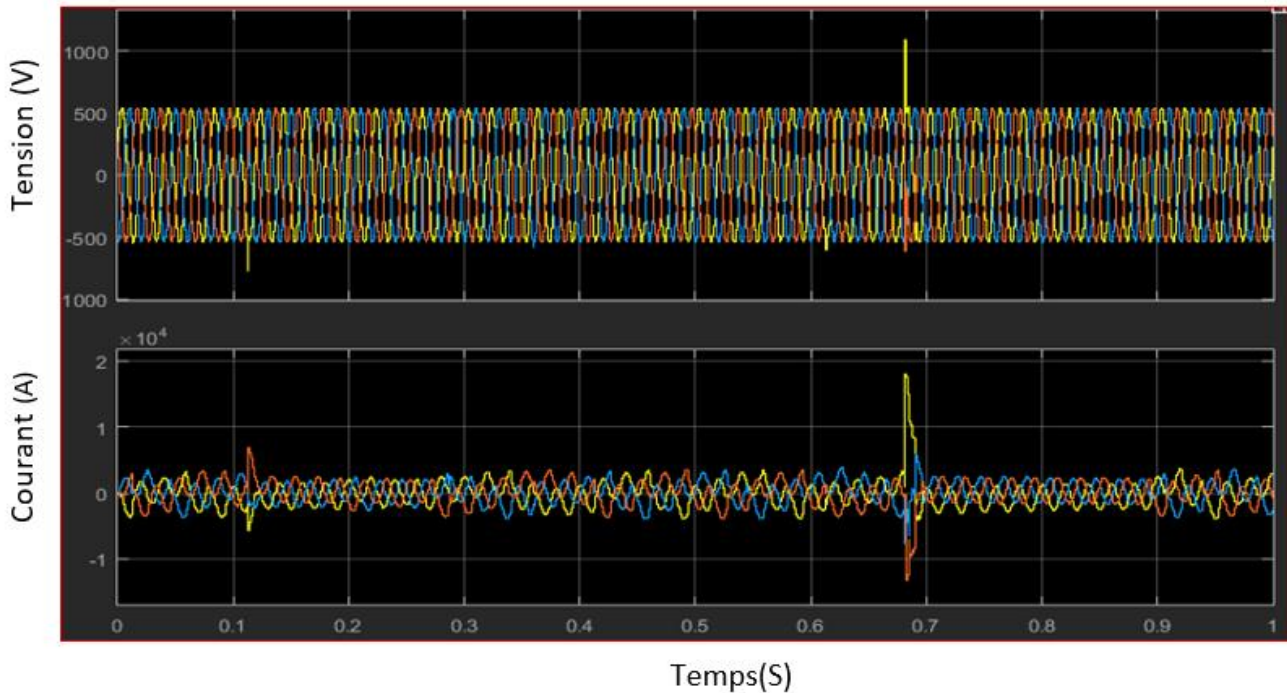


Figure VI.16: La fluctuation de tension et de courant des trois phases.

VI.7.3. Interprétation de résultat :

D'après la figure VI.15 suivant, on remarque que le courant subit une variation important qui est due à la variation des paramètres E et T, la tension se varie légèrement.

Les paramètres obtenus d'après la simulation sont :

Le courant de panneau $I_{pv}=116.5A$.

La tension de panneau $V_{pv}=1083V$.

La puissance électrique de système vaut $P_e=95.8KW$.

La puissance active cotée réseau vaut $P_r=10KW$.

Les pertes extrait de cette essai $P_{pert}=P_e - P_r=85.5KW$.

Le rendement de système est calculer par la relation (II.20) illustre dans le chapitre deux :

$$\eta = \frac{P_m}{P_{in}} \quad \longrightarrow \quad P_{lumineux} = E \times S \times 1000 \times (1,489 \times 0,676) = 1,00656 \text{KW}$$

$$\text{Donc } \eta = \frac{95,8}{1,00656} \quad \longrightarrow \quad \eta = 95\%$$

VI.8. Conclusion :

La modélisation des différentes parties de notre système photovoltaïque globale étant faite dans les précédents chapitres, nous nous intéressons dans ce chapitre à étudier le comportement de la chaîne PV complète connectée au réseau. Nous montrerons Les résultats de simulation de l'onduleur avec sa commande associée, dans la dernière partie nous exposerons les résultats de la chaîne PV globale raccordée au réseau. On s'est chargé aussi du contrôle de notre système PV connecté au réseau, ce qui nous permet ainsi d'avoir un bon contrôle de la puissance injectée au réseau.

Conclusion générale

Conclusion générale :

La situation géographique de l'Algérie favorise le développement et la réalisation de l'utilisation de l'énergie solaire. En effet vu l'importance de l'intensité du rayonnement reçu ainsi que la durée de l'ensoleillement qui dépasse les dix heures par jour pendant plusieurs mois, notre pays peut couvrir certains de ses besoins en énergie solaire. Ces avantages pourraient être profitables dans les régions les plus reculées.

L'objectif de notre mémoire consistait à étudier la modélisation et le contrôle d'un système photovoltaïque connecté au réseau électrique. Dans le cadre de ce travail, nous avons présenté :

- Quelques notions sur l'énergie solaire ainsi que le potentiel solaire en Algérie.
- Le fonctionnement d'une cellule photovoltaïque en expliquant brièvement le phénomène photovoltaïque.
- L'influence des différents paramètres extérieurs sur cette caractéristique. Le courant de court-circuit évolue principalement avec l'éclairement, et la tension à vide avec la température.
- La description des différentes installations photovoltaïques ou nous nous sommes intéressés

à un système photovoltaïque raccordé au réseau ainsi qu'à la mise en évidence des principales composantes de cette installation, notamment l'étude des onduleurs et des convertisseurs qui ont des rôles majeur dans ce système.

Afin d'optimiser en permanence la puissance produite et amélioré le fonctionnement de notre générateur on a insérer un étage d'adaptation (hacheur boost) avec une commande MPPT entre le GPV et le réseau comme montre le troisième chapitre. Les résultats de la simulation ont démontré l'intérêt d'un dispositif de recherche de la puissance maximale. La méthode P&O (perturbation and observation) a été choisie pour implanter un algorithme de poursuite du point de fonctionnement à puissance maximale du panneau PV (MPPT).

Un contrôle de puissances active et réactive a été effectué lors de notre travail. Le but de ce type de commande est d'imposer les valeurs de puissance active et réactive injectées au réseau. L'étude de la synchronisation des courants de références a permis de mettre en évidence l'importance du choix du système qui réalise cette fonction. Habituellement, la synchronisation est faites par l'intermédiaire de la PLL plus au moins évolué, et nous avons utilisé celle-ci dans notre travail.

Le système photovoltaïque global raccordé au réseau a été simulé dans le dernier chapitre afin de voir le comportement de la puissance en utilisant la méthode de « Perturbation Observation » et on est arrivé à conclure que cette méthode donne des résultats plutôt similaires aux calculs théoriques.

Dans le dernier chapitre nous avons essayé d'effectuer une simulation sous le logiciel (Matlab/Simulink) d'une centrale photovoltaïque raccordé au réseau électrique. Nous avons présenté les différentes transformations qui se passent dans la chaîne depuis le générateur photovoltaïque qui produit la tension continue, passant au convertisseur continu (hacheur boost) qui a pour but d'élever le niveau de tension vu la faiblesse de l'énergie fournie par le générateur PV par rapport à la charge, avec l'intégration de la technique MPPT qui consiste à la poursuite du point de puissance maximale. Puis le convertisseur alternatif continu (l'onduleur) qui est commandé par MLI et qui a pour fonction de transformer l'énergie de forme continue à la forme alternative pour pouvoir injecter au réseau.

Les résultats de simulation des courbes de la tension et du courant et de puissance injectés au réseau sont obtenus sous des conditions atmosphériques variables pour voir son influence sur les performances de GPV.

Résumé :

Ce travail présente une étude sur les systèmes photovoltaïques raccordés au réseau électrique. Le but de cette manœuvre est d'obtenir une tension de 30KV et de fréquence de 50Hz pour l'injecter au réseau. On effectue l'étude de fonctionnement de générateur photovoltaïque à sa puissance maximale en prenant compte des différentes contraintes (conditions météorologique, stabilité du système). On a utilisé un hacheur survolteur (boost) commandé par la technique MPPT P&O dans le but d'améliorer le rendement de puissance de système et améliorer les performances de GPV, puis on l'a connecté avec un générateur triphasé commandé par un MLI afin d'obtenir une tension et une fréquence compatible à celle du réseau. Plusieurs simulations ont été effectuées et interprétées par la suite qui montrent la validité et la robustesse de cette commande.

Mots clé : **générateur photovoltaïque convertisseur boost commande MPPT PLL**

ملخص:

يقدم هذا العمل دراسة حول الأنظمة الكهروضوئية المتصلة بالشبكة الكهربائية. الغرض من هذه المناورة هو الحصول على جهد 30 كيلو فولت وتردد 50 هرتز لحقنه في الشبكة. نقوم بدراسة تشغيل المولد الكهروضوئي بأقصى طاقته، مع مراعاة القيود المختلفة (الظروف الجوية، استقرار النظام). استخدمنا أداة تقوية معززة (دفع) يتم التحكم فيها بواسطة تقنية O&MPPT P من أجل تحسين كفاءة طاقة النظام وتحسين أداء GPV، ثم قمنا بتوصيلها بمولد ثلاثي الأطوار يتم التحكم فيه بواسطة PWM من أجل الحصول على جهد و تردد متوافق مع الشبكة. تم إجراء العديد من عمليات المحاكاة وتفسيرها بعد ذلك والتي تظهر صحة ومتانة هذا الأمر.

الكلمات المفتاحية: **مولد الطاقة الكهروضوئية المحول بوستدفعه التحكم**

Abstract:

This work presents a study on photovoltaic systems connected to the electrical network. The purpose of this maneuver is to obtain a voltage of 30KV and a frequency of 50Hz to inject it into the network. We carry out the photovoltaic generator operating study at its maximum power taking into account the various constraints (weather conditions, system stability). We used a booster chopper (boost) controlled by the MPPT P&O technique in order to improve the system power efficiency and improve the performance of GPV, then we connected it with a three-phase generator controlled by a PWM in order to Obtain a voltage and frequency compatible with that of the network. Several simulations were carried out and interpreted thereafter which show the validity and robustness of this command.

Keywords: **photovoltaic generator boost converter MPPT control PLL boucle**

Annexe :

Les paramètres du module photovoltaïques (I_{cc} , V_{co} , I_{mpp} , V_{mpp}) sous des conditions atmosphérique standards de fonctionnement (un ensoleillement de 1000 W/m^2 , et une température de 25°C). Le tableau ci-dessous montre les caractéristiques de panneau de type DTP-135/12b qui est utilisé pour la simulation des différents parties de notre travail:

Modèle	STP-135/12b
Eclairement	1000 W/m^2
Temperature	25°C
Puissance optimal P_{opt}	135W
Courant I_{mpp}	7.3A
Tension V_{mpp}	17.5V
Courant de court circuit I_{cc}	8.2A
Tension de circuit ouverte V_{co}	22.2V
Nombre des cellules en series	36
Dimensionnement	$1482 \times 676 \text{ mm}$

Paramètre de convertisseur boost proposée :

$$Dd = [0.38 \ 1]$$

$$L = 5,2841 \text{E-}06 \text{ H}$$

$$C1 = 100 \text{ E-}06 \text{ F}$$

$$C2 = 2842,1 \text{ e-}6 \text{ F}$$

$$R = 10.69 \text{ ohm}$$

$$f_s = 200 \text{ E-}6 \text{ Hz}$$

$$[I_{min} \ I_{max}] = [0 \ 3]$$

$$[V_{min} \ V_{max}] = [0 \ 2.2]$$

$$\text{Boltzmann constant } K = 1.38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$$

$$V_0 = 38 \text{ V}$$

Référence et bibliographie

- [1] : H. Hanane, « modélisation radiatif dans les strates supérieure d'un module photovoltaïque », mémoire fin d'étude, université m'Hamed bougera, Boumerdes, 2016/2017.
- [2]: Adem, CEA, Ines, fiche pédagogique, « connaissance des énergies solaires photovoltaïque », aout 2019.
- [3] : DANIEL lincote, « la conversion photovoltaïque de l'énergie solaire », l'actualité chimique février-mars 2012.
- [4] : J. Royer, D. Thomas, «Le pompage photovoltaïque », Eric Schiller, BocarSadasy, IEPF, université d'Ottawa, EIER, CREPA.
- [5] : M. Hanine, H. Lynda, « Contribution à l'étude d'un système photovoltaïque », Mémoire de Master, Université Colonel Akli Mohand-OulhadjBouira, 2017-2018.
- [6]: Azoui, « les systèmes photovoltaïques », note de cour, énergie renouvelable, 2019-2020.
- [7]: Wikipédia, « rayonnement solaire », fevrier 2022.
- [8] : M. Salmi, «Contribution à La Quantification De L'irradiation Solaire Globale En Algérie Et Applications Aux Générateurs Photovoltaïques», Thèse de doctorat en Sciences, Université Ferhat Abbas de Sétif, 2012.
- [9]: B.afafe, «évaluation de rayonnement solaire en Algérie pour des applications photovoltaïque », mémoire de master, université Mohamed Boudiaf, M'sila, 2017-2018.
- [10]: B. Flèche, D. Delagnes, « Energie solaire photovoltaïque », STI ELT, juin 2007.
- [11] : Z. Abdelkrim, G. Naji, « Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque connecté au réseau électrique », mémoire de master, université MOHAMED BOUDIAF, M'SILA, 2019.
- [12]: Planète énergies, « la cellule solaire comment ça marche ? », avril 2019.
- [13] : B. Déodat, D. Lucien, D. Adrien, G Simon, «études d'une cellule PV », travaux pratiques, Lycée Jean Monnet-ANNEMASSE, 2012.
- [14] : Saad Motahhir Abdelaziz El Ghzizal, Aziz Derouich, « modélisation et commande d'un panneau photovoltaïque dans l'environnement PSIM », laboratoire de productique, des énergies et de développement durable 'fès', 2022.
- [15] : Sofiane ABADA, « étude et optimisation d'un générateur photovoltaïque pour la recharge d'un batterie avec un convertisseur sepic », faculté des sciences et de génie, université LAVAL, QUEBEC 2011.
- [16] : O. Katia, M. Houria, « modélisation et simulation d'un système PV connecte à un réseau » mémoire master2, université ABDERHMAN Mira, BEJAIA, 2014.
- [17]: Chapitre3, "commande de la puissance gènère via la commande MPPT", note de cour, université Biskra.
- [18]: B.Yassine, E.Abdrahmane, "étude de convertisseur de puissance d'un système de pompage au fil de soleil", mémoire de fin d'étude, ESSA, 2019-2020.

- [19]: B.Abdelhakim, “conception et implantation de commande MPPT de haute performance pour une chaîne de conversion PV autonome”, université FERHAT ABBAS, SETIF1, these de doctorat, 2015.
- [20]: Benoît Issartel, « Conception d’un convertisseur DC/DC de type boost », Projet P10AB04, Polytech Clermont-Ferrand.
- [21]: K.Kassmi, M.Hamdaoui, F.Olivié, «conception des systèmes photovoltaïques adaptés par la commande MPPT analogique », Université Mohamed Premier, Faculté des Sciences, Département de Physique, LEPAS, Oujda, Maroc 2 Laboratoire d’Analyse et d’Architecture des Systèmes, ‘LAAS/CNRS’ 7 Avenue du Colonel Roche, 31 077, Toulouse, France (reçu le 15 Octobre 2007 – accepté le 30 Décembre 2007).
- [22] : H.Imed, « les convertisseurs DC-DC et DC-AC », support de cours de électronique de puissance, Institut supérieur des études technologiques de Nabeul.
- [23] : Mongo sukulu, « les hacheurs », cours électronique de puissance, 2019.
- [24] : BEN. Mohamed Samir, A. Salah Eddine, « étude d’un convertisseur boost pour un système photovoltaïque », école supérieure de science appliquée. Mémoire fin d’étude, 2020.
- [25] : M. D. S. e. L. S. KHEMLICHE, «Diagnostic de défauts dans le système photovoltaïque par les réseaux de neurones artificiels». Revue des Énergies Renouvelables SIENR’12 Ghardaïa, pp. 331- 343, 2012.
- [26]: Hanen Abbes, Hafedh Abid, Kais Loukil, Ahmad Toumi, Mohamed Abid, « Etude comparative de cinq algorithmes de commande MPPT pour un système photovoltaïque », fiche pédagogique, * Laboratory of Sciences and Techniques of Automatic control & computer engineering (Lab-STA) National School of Engineering of Sfax, University of Sfax, 2013.
- [27]: OULD BAHAMOU Abed-el-Kader, « la synchronisation d’un système photovoltaïque connecté à un réseau électrique », université AHMED DRAIA ADRAR 2017.
- [28] : B. Faiza, « Etude Et Simulation D’une Commande MPPT Pour Système PV », UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M[°]SILA.
- [29] : B. Hacem, « conception et réalisation d’un générateur photovoltaïque muni d’un convertisseur MPPT pour une meilleure gestion énergétique », thèse de magister, 2010, université Abo bakrbelgaid Tlemcen,
- [30] : T. Tariq, H. Nouh, « commande d’une MPPT avec un convertisseur DC/DC pour un système photovoltaïque ». Mémoire université Msila.
- [31] : H. Abbes. « Etude comparative de cinq algorithmes de commande MPPT pour un Système photovoltaïque », Revue des Energies Renouvelables Vol. 17, N[°]3, p.435 – 445, 2014.
- [32]: R. Jamila, Ernest Matagne. «Optimization of Photovoltaic Power System: Modelization, Simulation and Control ». 2^{ème} édition. London, England. Springer, 2012.
- [33] : A. Amine, « commande de la machine asynchrone dédiée à l’énergie photovoltaïque » ; thèse de doctorat, université Djilali Liabes, Sidi-Bel-Abbès,

- 2017.
- [34] : M. Hatti, « Contrôleur Flou pour la Poursuite du Point de Puissance Maximum d'un Système Photovoltaïque », JCGE'08, Lyon, 2008.
- [35] : A. Ilyes, « étude de la connexion au réseau électrique d'une centrale photovoltaïque », FGEI, université MOULOUD Mammeri, TIZI OUZOU.
- [36] : K. Merabet, « commande MU d'un onduleur triphasé basée la dispersion de la tension triphasée », Mémoire de Magister en Génie Electrique, Université du Québec ,2011.
- [37] : CH. Kamilia, « Etude d'une loi de commande En Courant par hystérésis à bande Adaptative pour un onduleur de tension », Université Mohamed Khider de Biskra, 2019.
- [38] : S. Begag, N. Belhaouchet, L. Rahmani, « Fonctionnement à fréquence de commutation constante d'un onduleur de tension triphasé par une nouvelle technique de commande en courant par hystérésis », Laboratoire d'Automatique, Département D'électrotechnique, Université Ferhat Abbas- Sétif, Algérie4th International Conférence on Computer IntegratedManufacturing CIP'2007.
- [39] : L. ABBASEEN « Etude de la connexion au réseau électrique d'une centrale photovoltaïque », Mémoire de Magister en Electrotechnique, Université Mouloud Mammeri TiziOuzou 2011.
- [40] : PACER. Centrale photovoltaïque, Guide pour le dimensionnement et la réalisation de projets, 1996.
- [41] : M. Boudjdaimi «Commande d'un onduleur par des approches basées sur des réseaux de neurones artificiels». Mémoire de magister, UMMTO, 27/09/2009.
- [42] : F. soufiane, M. siham « ETUDE D'UN SYSTEME PHOTOVOLTAIQUE CONNECTE AU RESEAU », mémoire de master, UMMTO, 15/07/2015.
- [43] : K. Tarek « la qualité d'énergie (les harmonique) », mémoire de licence, université USTHB, 2016 /2017.
- [44] : T. Mohamed el mabrouk, Z. hossem, mémoire de master « amélioration de la qualité d'énergisée électrique issu d'un système PV utilisant la méthode de courant de source maximale(Ismax) », université Mohamed Boudiaf M'SILA, 2016/2017.
- [45] : Algérie presse service, « transition énergétique : le potentiel de l'Algérie dans les ENR présenté a Alger », 23 mars 2022.