

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

UNIVERSITE BADJI MOKHTAR - ANNABA
BADJI MOKHTAR – ANNABA UNIVERSITY



جامعة باجي مختار – عنابة

Faculté : de TECHNOLOGIE

Département : Electronique

Domaine : Sciences et Techniques

Filière : Electronique

Spécialité : Instrumentation

Mémoire

Présenté en vue de l'obtention du Diplôme de Master

Thème:

Contribution à la modélisation d'une cellule solaire

Présenté par : *Guerid ala eddine*

Boumaali abdel mouneam

Encadrant : *MANSORI KHALED*

Grade : *Pr*

Université

Jury de Soutenance :

MESSADEG DJEMIL	Prof	Université -Annaba	Président
MASOURI Khaled	Prof	Université -Annaba	Encadrant
REDJATI Abdelghani	M.C.B	Université -Annaba	Examineur

Année Universitaire : 2021/2022

Remerciements

Nous Remercions tout d'abord ALLAH le tout puissant pour la volonté, la santé et la patience, qu'il nous a donné durant toutes ces longues années.

N tenons de remercier Dr K.MANSORI, pour avoir encadré notre travail de fin d'étude.

A travers ce mémoire, nous adressons nos reconnaissances aux enseignants qui ont contribué à la formation de notre connaissance depuis la première classe du primaire jusqu'à aujourd'hui.

Nous remercions tous les membres du jury qui ont accepté de juger notre travail et pour l'intérêt qu'il porte à ce dernier

Nous tenons à remercions vivement toutes les personnes qui nous ont aidé à élaborer et réaliser ce mémoire.

Enfin nous tenons à remercions également tous nos collègues de la promotion 20212022 pour leur aide inestimable.

Dédicace

Avant tous, je remercie **ALLAH** le tout puissant de m'avoir donné le courage et la patience pour Réaliser ce travail malgré toutes les difficultés rencontrées.

Je dédie exclusivement ce modeste travail:

A mes très chers parents, que dieu les garde et les protège pour leurs soutiens moral et financier, pour leurs encouragements et les sacrifices qu'ils ont endurés. A mon encadreur **Pr.Mansori khaled**

A ma grand-mère et grand-père et ma grande famille.

A mes frères et mes sœurs.

A tous mes amis.

A tous ceux qui m'aiment et que j'aime.

A vous.

Ala eddine

Dédicace

Avant tous, je remercie **ALLAH** le tout puissant de m'avoir donné le courage et la patience pour Réaliser ce travail malgré toutes les difficultés rencontrées.

Je dédie exclusivement ce modeste travail:

A mes très chers parents, que dieu les garde et les protège pour leurs soutien moral et financier, pour leurs encouragements et les sacrifices qu'ils ont endurés. A mon encadreur **Pr.Mansori khaled**

A ma grand-mère et grand-père et ma grande famille.

A mes frères et mes sœurs.

A tous mes amis.

A tous ceux qui m'aiment et que j'aime.

A vous.

Abdel mouneam

Liste de figure

Chapitre 1

Figure (I.1): Mouvement de la terre autour du soleil.....	05
Figure (I.2) : les composantes de rayonnement solaire.....	06
Figure (I.3): Carte du monde de l'ensoleillement moyen annuel.....	08
Figure (I. 4) : Classification des systèmes photovoltaïques.....	09
Figure (I.5): Système photovoltaïque connecté au réseau.....	11
Figure[1. 6] Système de pompage hybride éolien-photovoltaïque.....	11
Figure (I.7) : Composants d'un champ du module photovoltaïque [13].....	12
Figure (I.8) : Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque	13
Figure (I.9) : Courbe courant-tension d'un module photovoltaïque [19].....	15
Figure() : Association en parallèle des panneaux.....	16
Figure() : Association en série des panneaux	16
Figure () : Association mixte des panneaux.....	16
Figure(I.10): Groupement de modules en série et en parallèle [19].....	16
Figure (I.10) : Groupement des panneaux [14].....	17
Figure (I.11) : Influence de l'ensoleillement sur la courbe I(V) [22].	17
Figure (I.12) : Influence de la température sur la courbe I(V) [22].....	18
Figure (I.13) : Effet d'ombrage sur les cellules	19
Figure () : Défaut des points chauds.....	19

Chapitre 2

Figure (II.1) : Symbole d'un convertisseur DC-DC.....	24
Figure (II. 2): Schéma électrique d'un hacheur buck	26
Figure(II.3) : Chronogrammes de courant et tension d'un hacheur buck	22
Figure (II. 4) : Schéma électrique d'un hacheur boost	23
Figure(II. 5) : Chronogrammes de courant et tension d'un hacheur boost	24
Figure(II.6) : Schéma électrique d'un hacheur buck- boost	24
Figure(II.7) : Chronogrammes de courant et de tension d'un hacheur buck-boost ...	25
Figure (II.8) : Ondulation du courant de l'inductance Si on	27
Figure(II.9) : Ondulation sur la tension de condensateur	29

Chapitre 3

Figure III.1 Onduleur monophasé avec Transformateur de sortie à point milieu ...	35
Figure III.2 Onduleur monophasé avec diviseur capacitif.....	35
Figure III.3 Onduleur monophasé en pont.....	36
Figure III.4 Onduleur de tension triphasé.....	36
Figure III.5 Principe de la modulation.....	41
Figure III.6 Schéma synoptique de la commande en MLI (triphase).....	41
Figure (III.7) : Système photovoltaïque avec une commande MPPT.....	43
Figure (III.8) : Recherche et recouvrement du Point de Puissance Maximale a) suite à une variation d'éclairement, b) suite à une variation de charge, c) suite à une variation de température.....	44

Sommaire

Chapitre I

I.1 Introduction	05
I.2 L'énergie solaire	05
I.2.2 Différentes composantes du rayonnement solaire.....	06
II.3 Gisement solaire en Algérie.....	08
II.2.1.Système autonome (off grid).....	10
II.2.1.1. Système autonome avec stockage.....	10
II.2.1.2. Système autonome sans stockage.....	10
II.2.2. Système photovoltaïque raccordé aux réseaux (on grid).....	10
II.2.3. Système hybride.....	11
II.4.1. Le générateur photovoltaïque.....	12
II.4.1.1. La cellule.....	12
II.4.1.1.1. Principe de fonctionnement.....	12
II.4.1.1.2. Technologies des cellules photovoltaïques.....	13
II.4.1.2. Le module photovoltaïque.....	14
II.4.1.2.1. Les caractéristiques d'un module photovoltaïque.....	14
II.4.1.3. Le panneau solaire photovoltaïque.....	15
II.4.1.4. Le champ photovoltaïque	15
Conclusion	20

Chapitre II

II.1 Généralités sur le hacheur.....	22
II.1.1 Exigences de l'utilisateur.....	22
II.1.2 Les types d'hacheur.....	24
II.1.2.1 Hacheur Buck.....	24
II.1.2.2 Hacheur boost.....	23
II.1.2.3 Hacheur Buck-Boost.....	24
II.2 Choix du convertisseur DC-DC.....	26
II.3 Détermination des paramètres du hacheur Boost.....	26
II.3 Détermination des paramètres du hacheur Boost.....	26
II.4 La puissance maximale du générateur photovoltaïque (MPPT) :	
II.1 Suivi de MPPT.....	31
II.1.1 Principe de M.....	32
II.5 Conclusion.....	33

Chapitre III

III.1 Introduction.....	34
III.2 Classification des onduleurs.....	34
III.2.1 Onduleurs non autonome.....	34
III.2.2 Onduleur autonome.....	34

III.2.2.1 Les Onduleurs (autonomes) de tension :.....	34
III.2.2.2 Les onduleurs (autonomes) de courants :.....	35
<i>III.2.3</i> Les onduleurs à résonance :.....	35
III.3 Types d'onduleurs autonomes de tension.....	35
<i>III.3.1</i> Les onduleurs monophasés	35
<i>III.3.2</i> Les onduleurs triphasés.....	36
<i>III.4</i> Les onduleurs multi niveaux.....	36
<i>III.5</i> Principe de fonctionnement de l'onduleur triphasé.....	37
III.5.1 Les relations générales de tension.....	37
III.5.2 Les relations générales de courants	38
III.5.3 Type de commandes,,,,,	39
III.6 Onduleur de tension triphasé à MLI	40
<i>III.6.1</i> Principe de fonctionnement.....	41
<i>III.6.2</i> Modulation de largeur d'impulsion.....	40
<i>III 6.2.1</i> Principe de la modulation de largeur d'impulsion.....	40
III.7 Les avantages et les inconvénients de l'onduleur de tension.....	41
III.15 Conclusion.....	44

Chapitre 4

IV.1 Panneau photovoltaïque.....	45
IV.2 Simulation du panneau photovoltaïque.....	46
IV.3 Simulation du système (panneau+hacheur).....	47
IV.4 Simulations onduleurs SYSTEME PHOTOVOLTAIQUE COMPLET	48

Résumé

Dans le contexte actuel de la dégradation perpétuelle des énergies fossiles dans le monde notamment en Algérie due essentiellement à leurs surconsommations où le secteur du bâtiment est considéré le plus énergivore. De nouveau label sont apparus en vue de satisfaire les besoins énergétiques en faisant appel à l'exploitation des énergies renouvelables comme l'habitat à énergie positive ou les bâtiments à basse consommation énergétique. L'objectif étant de concevoir une solution technique efficace pouvant diminuer la consommation d'énergies fossiles, notre recherche vise

.....

Abstract

Currently, the world in general and Algeria specifically witness a perpetual degradation of fossil energies due mainly to their over-consumption by the building sector. As a remedy, new solutions have appeared in order to meet the energy needs such as the use of renewable energies in building. The aim of this study is to design an efficient technical solution that leads to reduce the consumption of fossil energies.

ملخص

خاصة طلبا متزايدا على المحروقات نظرا للإفراط في والجزائر يشهد العالم بصفة عامة ،ياحال الاستهلاك في شتى. مشروعنا هذا و للطاقة،لذى وجب التوجه إلى الطاقات المتجددة كمصدر القطاعات هو دراسة للطاقة الشمسية التي تعد حلا من الحلول لمعالجة النقص هذا . المشكل

Introduction générale

Introduction générale

La production d'énergie est un défi de grande importance pour les années à venir. En effet, les besoins énergétiques des sociétés industrialisées ne cessent d'augmenter. Par ailleurs, les pays en voie de développement auront besoin de plus en plus d'énergie pour mener à bien leur développement. De nos jours, une grande partie de la production mondiale d'énergie est assurée à partir de sources fossiles. La consommation de ces sources donne lieu à des émissions de gaz à effet de serre et donc une augmentation de la pollution. Le danger supplémentaire est qu'une consommation excessive du stock de ressources naturelles réduit les réserves de ce type d'énergie de façon dangereuse pour les générations futures.

L'Algérie amorce une dynamique d'énergie verte en lançant un programme ambitieux de développement des énergies renouvelables (EnR) et d'efficacité énergétique. Cette vision du gouvernement algérien s'appuie sur une stratégie axée sur la mise en valeur des ressources inépuisables comme le solaire et leur utilisation pour diversifier les sources d'énergie et préparer l'Algérie de demain. Grâce à la combinaison des initiatives et des intelligences, l'Algérie s'engage dans une nouvelle énergétique durable.

Le programme des énergies renouvelables actualisé consiste à installer une puissance d'origine renouvelable de l'ordre de 22 000 MW à l'horizon 2030 pour le marché national

Le programme d'efficacité énergétique actualisé vise à réaliser des économies d'énergies à l'horizon 2030 de l'ordre de **63 millions de TEP**, pour l'ensemble des secteurs (bâtiment et éclairage public, transport, industrie) et ce, en introduisant l'éclairage performant, l'isolation thermique et les chauffe-eaux solaires, les carburants propres (GPLc et GNc), et les équipements industriels performants.

Le programme de l'efficacité énergétique permettra de réduire les émissions de CO₂ de 193 millions de tonnes [1].

L'Algérie est l'une des régions les plus favorisées qui représente des caractéristiques géographiques exceptionnelles, notamment un ensoleillement intense, et l'existence des terres plates, inutilisées (les hauts plateaux et Le sud Algérien). Ces facteurs géographiques

favorables vont permettre de réaliser un rendement en Gigawatt Installé très intéressant et meilleur que d'autres pays.

Par énergie renouvelable, on entend des énergies issues du soleil, du vent, de la chaleur de la terre, de l'eau ou encore de la biomasse. A la différence des énergies fossiles, les énergies renouvelables sont des énergies à ressource illimitée. Les énergies renouvelables regroupent un certain nombre de filières technologiques selon la source d'énergie valorisée et l'énergie utile obtenue. La filière étudiée dans cette thèse est l'énergie solaire photovoltaïque.

L'énergie solaire photovoltaïque provient de la transformation d'une partie du rayonnement solaire en énergie électrique. Cette conversion d'énergie s'effectue par le biais d'une cellule dite photovoltaïque (PV) [2] basée sur un phénomène physique appelé effet photovoltaïque qui consiste à produire une force électromotrice lorsque la surface de cette cellule est exposée à la lumière. La tension générée peut varier en fonction du matériau utilisé pour la fabrication de la cellule. L'association de plusieurs cellules PV en série/parallèle donnent lieu à un générateur photovoltaïque (GPV) qui a une caractéristique courant-tension (I-V) non linéaire présentant un point de puissance maximale.

La caractéristique I-V du GPV dépend du niveau d'éclairement et de la température de la cellule ainsi que du vieillissement de l'ensemble. De plus, son point de fonctionnement du GPV dépend directement de la charge qu'il alimente. Afin d'extraire en chaque instant le maximum de puissance disponible aux bornes du GPV, nous introduisons un étage d'adaptation entre le générateur et la charge pour coupler les deux éléments le plus parfaitement possible.

L'objectif de ce travail nous rappelons le contexte et la problématique de l'énergie solaire photovoltaïque ainsi que les principales caractéristiques d'un GPV. Nous décrivons les principaux types d'algorithmes de recherche de **point de puissance maximale (MPPT) en anglais maximum power point tracker**.

Plan de thèse

Le premier chapitre, donne un rappel et une description générale des systèmes photovoltaïques et le gisement solaire en Algérie.

Dans le deuxième chapitre, nous présenterons un convertisseur DC-DC (hacheur) les modèles mathématiques associés aux circuits équivalents ..

Le troisième chapitre consiste à une étude une présentation d'un convertisseur DC-AC (Onduleur MLI)

Enfin, nous terminerons ce mémoire par la simulation des résultats module photovoltaïque, module photovoltaïque + Hacheur + Charge DC, simulation de toute l'ensemble du système PV (module + Hacheur + onduleur MLI + Charge AC) conclusion générale qui résume notre étude dans sa partie théorique et simulation des résultats.

Chapitre 1 :

GÉNÉRALITÉS SUR LES

**SYSTEMES
PHOTOVOLAIQUES**

I.1 Introduction

Dans ce chapitre nous allons décrire des notions essentielles sur l'énergie solaire, les composantes du rayonnement solaire, absorption et diffusion du rayonnement solaire. Nous allons aussi intéresser à la prestation de gisement solaire dans le monde et en Algérie. **I.2**

L'énergie solaire :

L'énergie solaire est la fraction de l'énergie électromagnétique provenant du soleil et traversant l'atmosphère qui absorbe une partie de l'énergie, et parvenant à la surface de la Terre.

L'énergie solaire vient de la fusion nucléaire qui se produit au centre du Soleil. Elle se propage dans le système solaire et dans l'univers essentiellement sous la forme d'un rayonnement électromagnétique de photons et de rayonnement infrarouge.

La part d'énergie reçue sur la surface de la terre dépend de l'épaisseur de l'atmosphère à traverser. Celle-ci est caractérisée par le nombre de masse d'air AM, le rayonnement qui atteint le niveau de la mer à midi dans un ciel clair est de 1000W/m^2 il décrit en tant que rayonnement de la masse d'air "1" (ou AM1). Lorsque le soleil se déplace plus bas dans le ciel, la lumière traverse une plus grande épaisseur d'air, perdant plus d'énergie. Puisque le soleil n'est au zénith que durant peu de temps, la masse d'air est donc plus grande en permanence et l'énergie disponible est donc inférieure à 1000 W/m^2 .

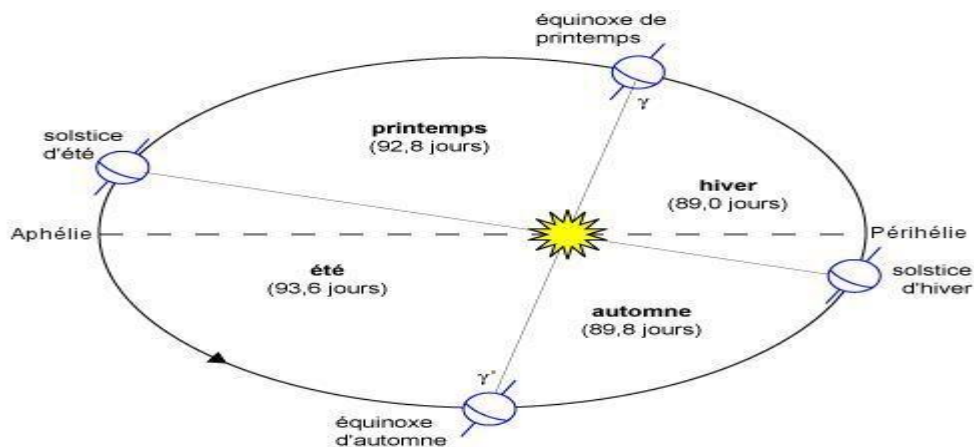


Figure (I.1): Mouvement de la terre autour du soleil

I.2.2 Différentes composantes du rayonnement solaire :

Le rayonnement solaire appelé également rayonnement électromagnétique émis par le soleil est grandement perturbé par l'atmosphère. Ce qui ne permet que la réception au sol des composants les plus importants et les plus actifs du rayonnement solaire total qui sont le rayonnement direct et le rayonnement diffus. L'albédo ou la partie réfléchiée par le sol du rayonnement solaire global comme représentés dans la figure suivante.

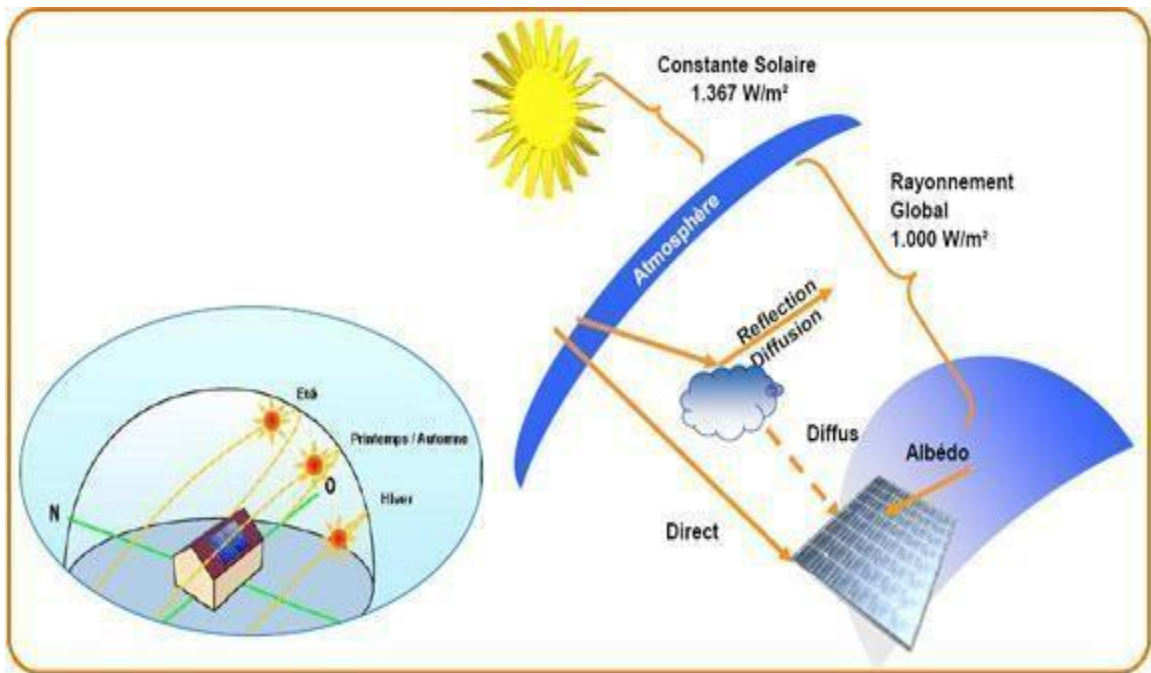


Figure (I.2) : les composantes de rayonnement solaire

Rayonnement direct : Le rayonnement direct est reçu directement du soleil c'est un flux uniforme de rayons parallèles entre eux et de puissance incidente I (W/m^2). C'est le flux des photons qui n'ont pas interagi avec les constituants de l'atmosphère et ont conservé une direction commune et leurs énergies propres.

Rayonnement diffuse : Parmi les photons qui ont interagi avec la couche d'atmosphère, certains ont été absorbés et d'autres ont subi un simple changement de direction (diffusion). Il s'agit donc de la répartition d'un faisceau parallèle en une multitude de faisceaux partant dans toutes les directions. Pour un élément plan considéré la composante diffuse D (W/m^2) provenant de toutes les directions est la plus difficile des composantes à calculer.

La figure I.3 représente un graphe des données expérimentale pour le mesure des trois composantes du rayonnement globale GHI, direct DNI et diffus DHI pour le 1 janvier 2019 enregistré à URERMS à Adrar.

le rayonnement solaire (global, direct et diffus) augmente avec la croissance du temps jusqu'à atteindre une valeur maximale aux puis commence à diminuer jusqu'à atteindre zéro (couche de soleil), dans le lever et le couché de soleil atteint une valeur minimal.

L'albédo : Parvenant au sol, le rayonnement solaire n'est qu'en partie absorbé. On appelle albédo la fraction de rayonnement réfléchi par le sol, il dépend directement de la nature du sol (prairie, terre, désert). Le rayonnement réfléchi par le sol n'est évidemment à prendre en considération que pour les surfaces inclinées [4].

Rayonnement Global : Le rayonnement global est simplement la somme des composantes directe et diffuse.

On distingue deux types de données d'ensoleillement :

- Rayonnement instantané : on considère les courbes de l'intensité du rayonnement en fonction de l'heure de la journée.
- Rayonnement cumulé : le cumul du rayonnement global par jour. Ce sont toutes les valeurs cumulées d'année en année et l'on en réalise avec des moyennes pour chaque mois de l'année. **Irradiation :** Plutôt que d'exprimer le rayonnement solaire en puissance, on préfère souvent raisonner en énergie reçue pendant un intervalle de temps : l'heure, la journée ; on emploie alors le terme d'irradiation horaire ou quotidienne[4].

II.3 Gisement solaire en Algérie

Le gisement solaire est un ensemble de données décrivant l'évolution du rayonnement solaire disponible au cours d'une période donnée. Il est utilisé pour simuler le fonctionnement d'un système énergétique solaire et faire un dimensionnement le plus exact possible compte tenu de la demande à satisfaire.

Il est utilisé dans des domaines aussi variés que l'agriculture, la météorologie, les applications énergétiques et la sécurité publique [5].

De par sa situation géographique, l'Algérie dispose d'un des gisements solaire les plus élevés au monde comme le montre la figure I.3.

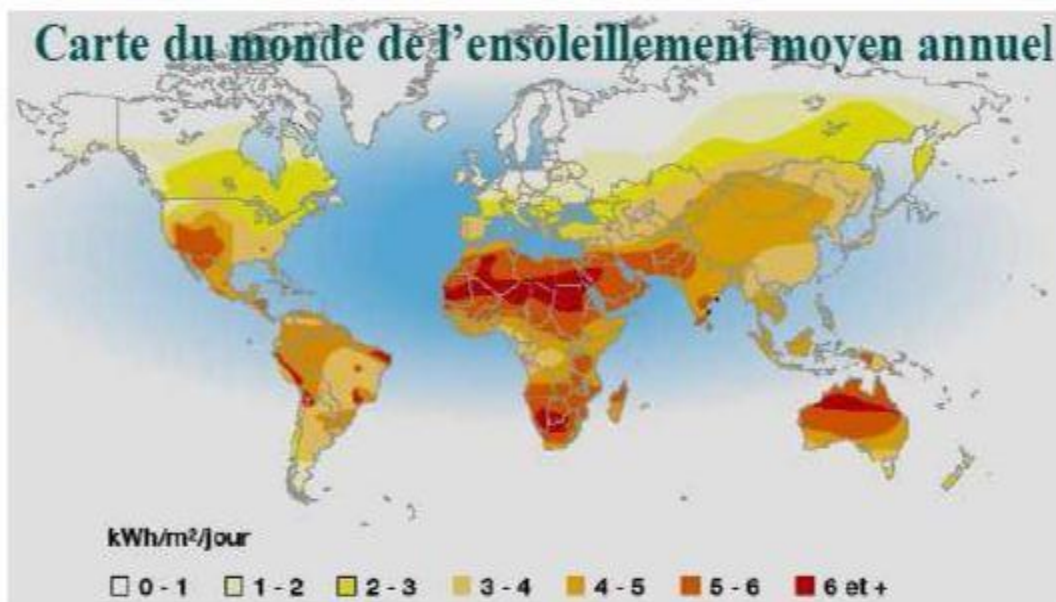


Figure (I.3): Carte du monde de l'ensoleillement moyen annuel

La durée d'insolation sur la quasi-totalité du territoire national dépasse les 2000 heures annuellement et peut atteindre les 3900 heures (hauts plateaux et Sahara). L'énergie reçue quotidiennement sur une surface horizontale de 1 m^2 est de l'ordre de 5 KWh sur la majeure partie du territoire national, soit près de $1700 \text{ KWh/m}^2/\text{an}$ au Nord et $2263 \text{ kwh/m}^2/\text{an}$ au Sud du pays, Ce gisement solaire dépasse les 5 milliards de GWh[6].

Différents types de système photovoltaïque :

Il existe trois types des systèmes photovoltaïques : les systèmes autonomes, les systèmes hybrides et les systèmes connectés au réseau :

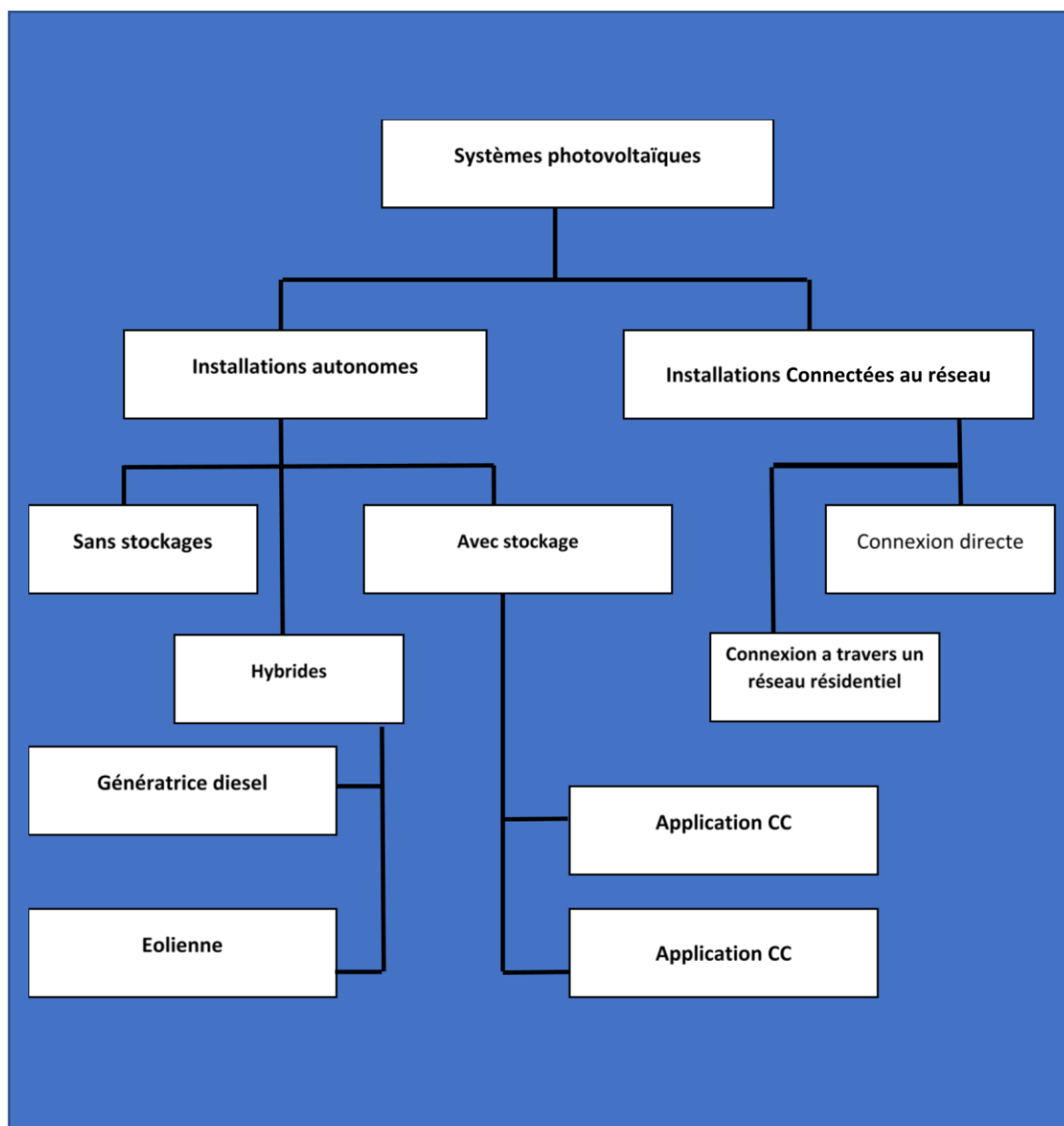


Figure (I. 4) : Classification des systèmes photovoltaïques.

II.2.1.Système autonome (off grid)

Ces systèmes photovoltaïques sont installés pour assurer un fonctionnement autonome sans recours à d'autres sources d'énergie. Généralement, ces systèmes sont utilisés dans les régions isolées et éloignées du réseau [8].

Les deux types de système photovoltaïques autonomes sont :

II.2.1.1. Système autonome avec stockage

Système autonome avec stockage c'est le système le plus répandu. Le composant de stockage permet d'emmagasiner de l'énergie et de la restituer à la charge lorsque le rayonnement solaire est faible ou absent (pendant la nuit). Il existe divers composants de stockage, dont les plus répandus, les batteries électrochimiques [8].

II .2.1.2. Système autonome sans stockage

Dans ce cas, l'appareil alimenté ne fonctionnera qu'en présence d'un éclairage solaire suffisant pour le démarrage. C'est intéressant pour toutes les applications qui n'ont pas besoin de fonctionner dans l'obscurité et pour lesquelles le besoin en énergie coïncide avec la présence de rayonnement solaire. Le pompage photovoltaïque est un exemple de cette catégorie de système autonome ou le stockage de l'eau dans réservoir est généralement le plus adopté par rapport au stockage électrochimique [8].

II.2.2. Système photovoltaïque raccordé au réseaux (on grid)

Ces systèmes permettent de réduire la consommation d'électricité provenant du service public et dans certains cas, de lui renvoyer l'énergie excédentaire. Dans ce type de système les accumulateurs ne sont pas nécessaires parce que l'énergie est emmagasinée dans le réseau même. Les systèmes raccordés au réseau sont rarement économiques car le coût actuel de la technologie photovoltaïque est beaucoup plus élevé que celui de l'énergie traditionnelle



Figure (I.5): Système photovoltaïque connecté au réseau

II.2.3. Système hybride

Les systèmes hybrides sont également indépendants des réseaux de distribution d'électricité. Ils sont composés d'un générateur photovoltaïque combiné à une éolienne ou à un groupe électrogène à combustible, ou aux deux à la fois. Un tel système s'avère un bon choix pour les applications qui nécessitent une alimentation continue d'une puissance assez élevée, dans le cas de l'absence de l'éclairage solaire ou pour diminuer l'investissement dans les champs de modules photovoltaïques et les batteries d'accumulateurs.

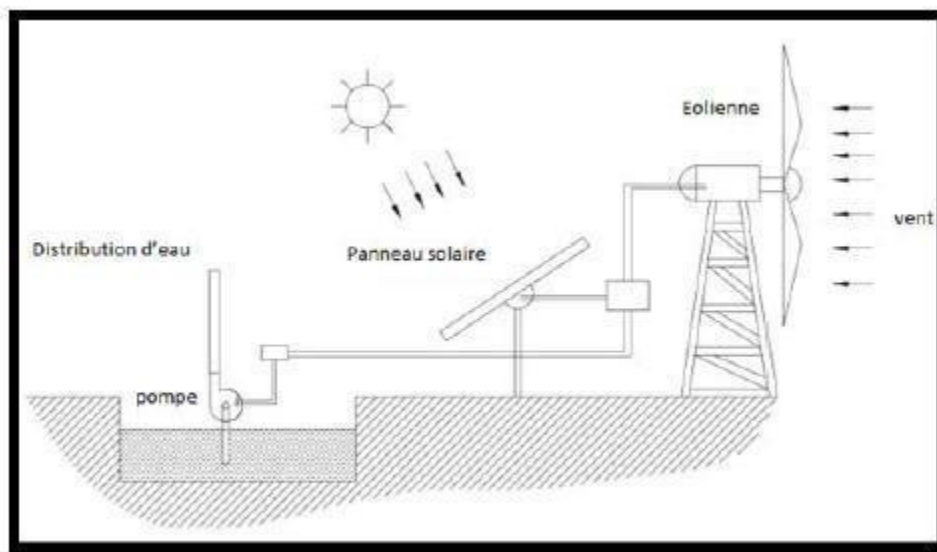


Figure 1.6: Système de pompage hybride éolien-photovoltaïque.

II.4.1. Le générateur photovoltaïque

Le générateur photovoltaïque (GPV) est une combinaison de :

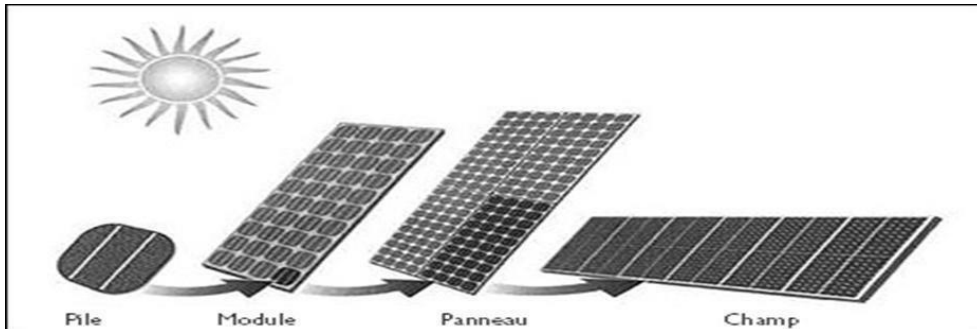


Figure (I.7) : Composants d'un champ du module photovoltaïque [13].

II.4.1.1. La cellule

Les cellules photovoltaïques sont des composants optoélectroniques qui convertissent les irradiations provenant du soleil en électricité à courant continu. Elles sont réalisées à l'aide des matériaux semi-conducteurs [4].

II.4.1.1.1. Principe de fonctionnement

L'effet photovoltaïque utilisé dans les cellules solaires permet de convertir directement l'énergie lumineuse des rayons solaires en électricité par le biais de la production et du transport dans un matériau semi-conducteur de charges électriques positives et négatives sous l'effet de la lumière. Ce matériau comporte deux parties, l'une présentant un excès d'électrons et l'autre un déficit en électrons, dites respectivement dopée de type n et dopée de type p. Lorsque la première est mise en contact avec la seconde, les électrons en excès dans le matériau n diffusent dans le matériau p.

La zone initialement dopée n devient chargée positivement, et la zone initialement dopée p chargée négativement. Il se crée donc entre elles un champ électrique qui tend à repousser les électrons dans la zone n et les trous vers la zone p. Une jonction (dite p-n) a été formée. En ajoutant des contacts métalliques sur les zones n et p, une diode est obtenue. Lorsque la jonction est éclairée, les photons d'énergie égale ou supérieure à la largeur de la bande interdite communiquent leur énergie aux atomes, chacun fait passer un électron de la bande de valence dans la bande de conduction et laisse aussi un trou capable de se mouvoir, engendrant ainsi une paire électron-trou. Si une charge est placée aux bornes de la cellule, les électrons de la zone n rejoignent les trous de la zone p via la connexion extérieure, donnant naissance à une différence de potentiel le courant électrique circule .

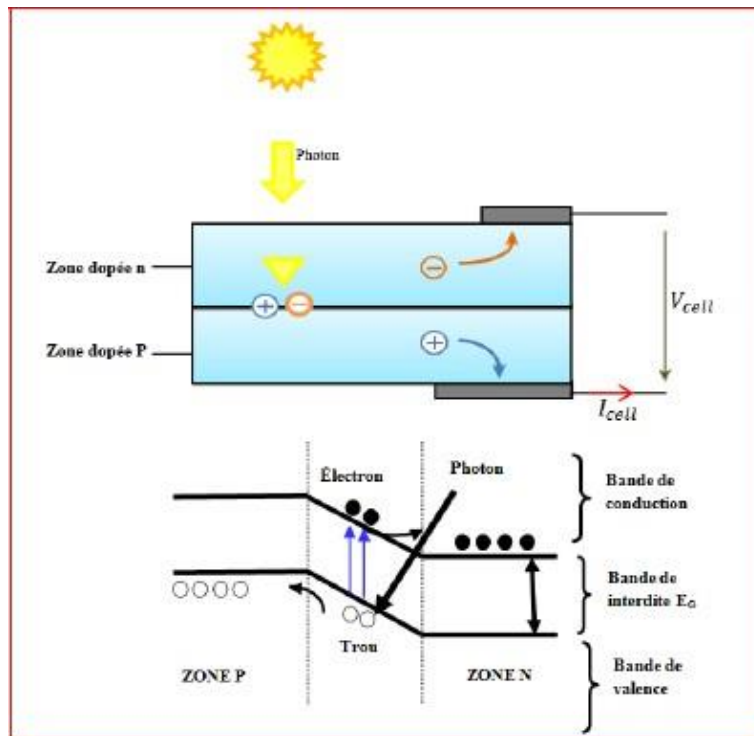


Figure (I.8) : Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque .

II.4.1.1.2. Technologies des cellules photovoltaïques

Il existe différents types de cellules photovoltaïques. Chaque type de cellule est caractérisé par un rendement et un coût qui lui sont propres. Cependant, quel que soit le type, le rendement reste assez faible : entre 8% et 23 % de l'énergie que les cellules reçoivent [16].

Comparaison des différentes technologies de fabrications est représentée dans le tableau ci-après :

Technologie	Monocristallin	Polycristallin	Amorphe
Avantages	- Bon rendement à fort et moyen ensoleillement	- Bon rapport qualité/prix	- Adapté aux grandes surfaces et à une faible luminosité - Souple - Demande peu de matière et d'énergie grise - Puissance plus stable selon la température
Inconvénients	- Prix au m ² élevé - Forte « énergie grise »	- Intégration architecturale difficile	- Rendement faible
Couleur	Noir uni	Mosaïque bleue	Noir, gris ou rouge uni
Rendement module	13 à 17 %	12 à 14 %	5 à 8 %
Surface moyenne pour 1 kWc	7 m ²	8 m ²	15 m ²

source IDEMU

II.4.1.2. Le module photovoltaïque

Un module photovoltaïque est d'abord un convertisseur d'énergie lumineuse en électricité. Par définition c'est un ensemble de photopiles assemblés pour générer une puissance électrique suffisante lors de son exposition à la lumière. Il est, en lui-même un système complexe composé de cellules photovoltaïques, d'intercalaires, de diodes by-pass, de connecteurs, d'une boîte de jonction, de câbles, d'un verre de protection sur la face avant du module et d'un verre ou d'un film en fluorure polyvinyle sur la face arrière du module [18].

II.4.1.2.1. Les caractéristiques d'un module photovoltaïque

- **La puissance crête P_c** : C'est la puissance maximale produite par un module photovoltaïque dans les conditions standard : ensoleillement de 1000W/m^2 à l'horizontale, température ambiante 25°C , masse d'air optique (AM) égale à 1.5
- **La caractéristique (I-V)** : Courbe représentant le courant I débité par le module en fonction de la tension.
- **La tension à circuit ouvert** : Tension aux bornes du module en absence de tout courant, pour un éclairage 'plein soleil'
- **Le courant de court-circuit**: Courant débité par le module en court-circuit pour un éclairage 'plein soleil'
- **Le point de fonctionnement optimum** : Point où la puissance est maximale ;
- **Le rendement maximal** : Rapport entre la puissance électrique optimale à la puissance de radiation incidente.
- **Le facteur de forme FF.**

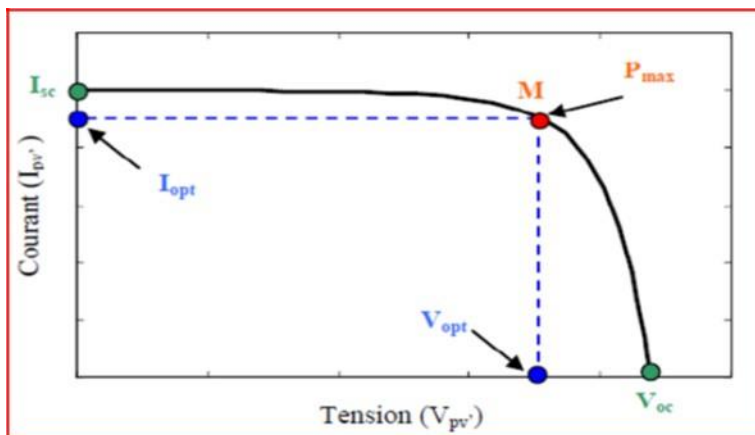


Figure (I.9) : Courbe courant-tension d'un module photovoltaïque [19].

II.4.1.3. Le panneau solaire photovoltaïque

Le panneau photovoltaïque se compose de modules photovoltaïques interconnectés en série et/ou en parallèle afin de produire la puissance requise. Ces modules sont montés sur une armature métallique qui permet de supporter le champ solaire avec une orientation et un angle d'inclinaison spécifique [20].

II.4.1.4. Le champ photovoltaïque : est l'ensemble des panneaux montés en série et en parallèle pour atteindre une tension et un courant plus grands [20].

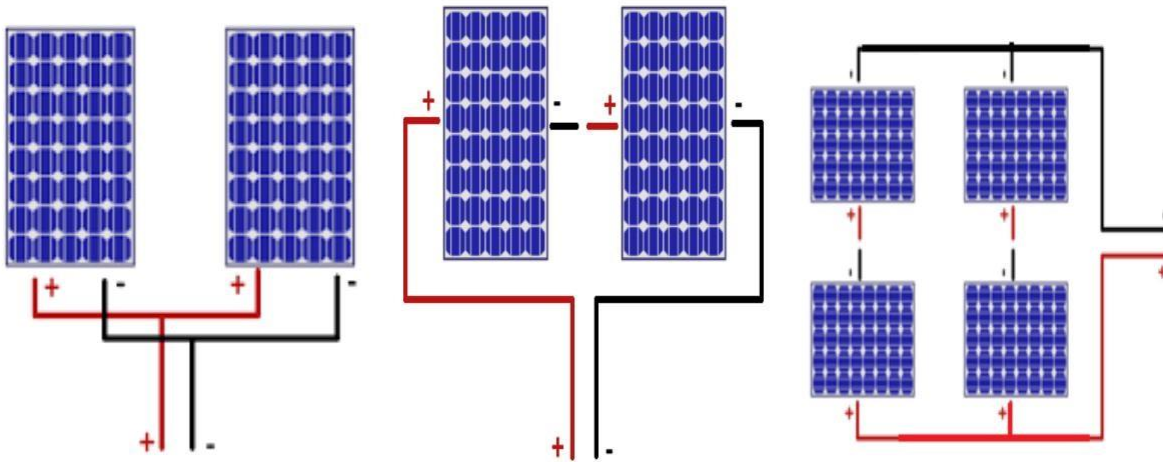
Association

en parallèle, série et mixte

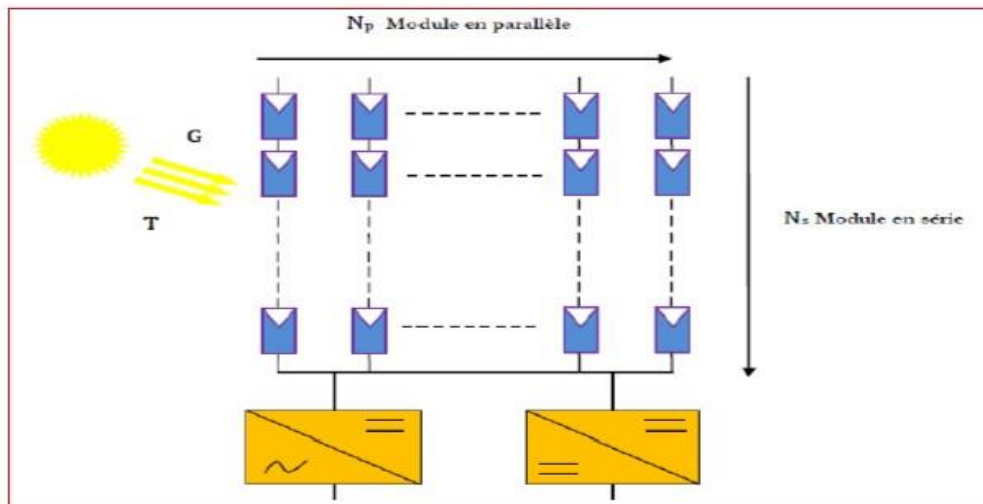
Un module des cellules connecté en parallèle est suffisant pour augmenter le courant du générateur, en associe modules en parallèle.

Pour obtenir une augmentation de la tension du générateur, en associe modules en série.

Afin d'obtenir des puissances de quelques KW à quelque MW, sous une tension convenable, il est nécessaire d'associer les modules en panneaux et de les monter en rangées de panneaux série et parallèle pour former ce que l'on appelle un générateur photovoltaïque [14].



Figure(A) : Association parallèle des panneaux **Figure(B) :** Association en série des panneaux. **Figure (C):** Association en mixte des panneaux.



Figure(I.10): Groupement de modules en série et en parallèle [19].

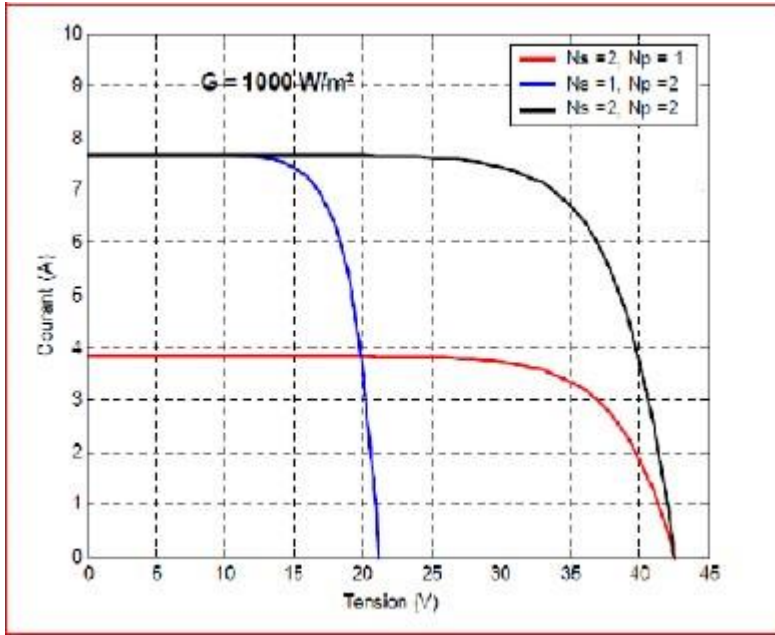


Figure (I.10) : Groupement des panneaux [14].

Facteur de limitation du rendement

Effet de l'ensoleillement

L'augmentation de l'éclairement se traduit par un déplacement de la caractéristique $I=F(V)$ suivant l'axe des courants pour une température constante [21].

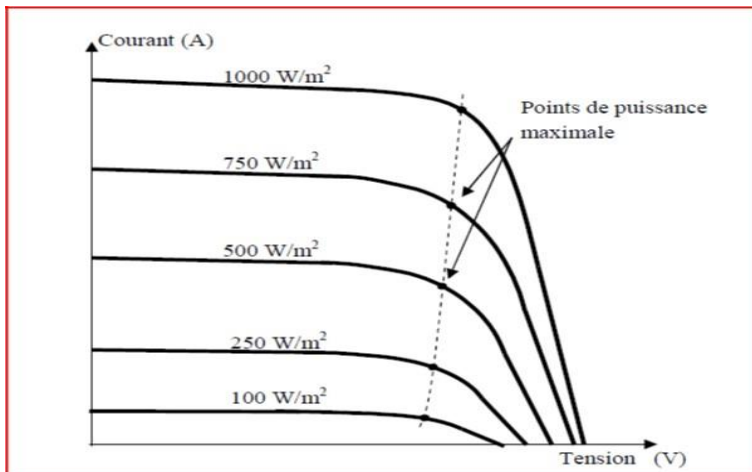


Figure (I.11) : Influence de l'ensoleillement sur la courbe $I(V)$ [22].

On remarque que la valeur du courant de court-circuit est directement proportionnelle à l'éclairement. Par contre, la tension à circuit ouvert varie très peu en fonction de l'éclairement [21].

Effet de la température

La température est un paramètre très important dans le fonctionnement des cellules photovoltaïques parce que les propriétés électriques d'un semi-conducteur sont très sensibles à la température.

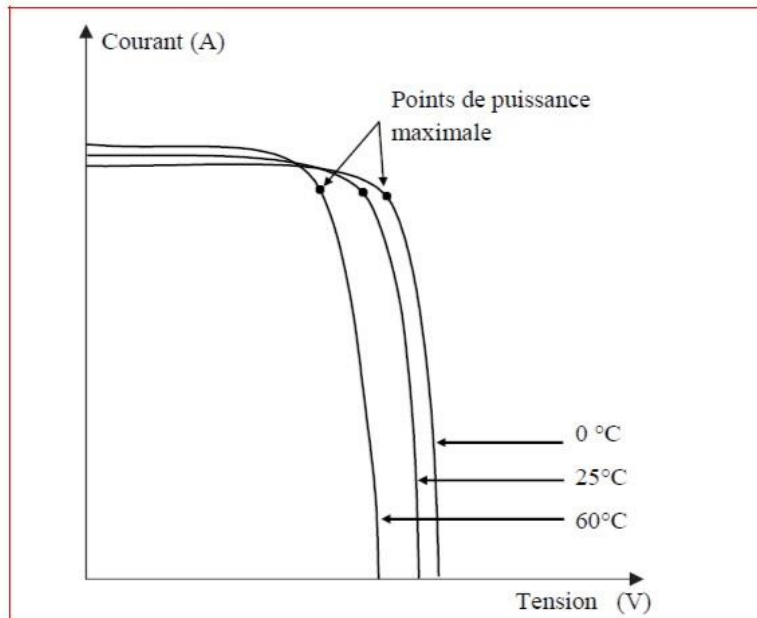


Figure (I.12) : Influence de la température sur la courbe I(V) [22].

On remarque que la température a une influence négligeable sur la valeur du courant de court-circuit. Par contre, la tension à circuit ouvert baisse assez fortement lorsque la température augmente, par conséquent la puissance extractible diminue [21].

Effet d'ombrage sur les modules

Le problème majeur de mise en série est l'ombrage partiel, lorsque l'un des panneaux se retrouve

à l'ombre, cette partie sous-irradiée du module peut se trouver polarisée en inverse et devenir. Cet échauffement local peut donner lieu à des « points chauds » (hot spot en anglais) elle va s'échauffer ceci provoque l'augmentation de la tension avec un blocage de la circulation du courant produit par les autres modules et risque de se détruire. Pour éviter ce problème et protéger les cellules, on place des diodes en série appelé diode « by-pass » de façon à court-circuiter les cellules ombrées.

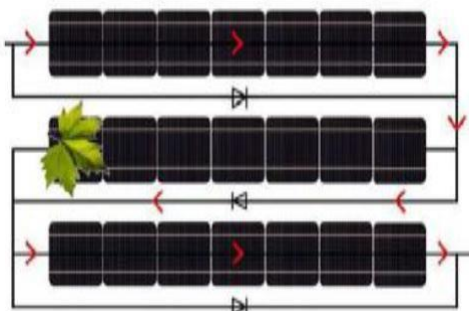


Figure (I.13A) : Effet d'ombrage sur
points

les cellules

Figure (I.13B) : Défaut des

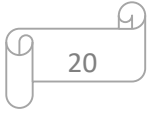
chauds .

Effet d'ombrage sur l'énergie totale d'un champ photovoltaïque

Dans la conception des projets de panneaux photovoltaïques pour produire l'électricité, l'ombre est le plus grand ennemi. Si un coin du panneau solaire est ombragé, ce problème peut perdre de l'énergie, et peut même diminuer cette énergie à la moitié. Donc, il faut calculer la distance entre les panneaux avec soin afin de s'assurer que dans les pires conditions les panneaux ne seront pas couverts les uns des autres. [24]

Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons défini les notions essentielles sur l'énergie solaire, les composantes du rayonnement solaire, la diffusion du rayonnement solaire. On a présenté aussi intéresser le gisement solaire dans le monde et en Algérie. Dans ce chapitre nous avons défini les différents types de systèmes photovoltaïques.



Chapitre II :

Convertisseur DC-DC (HACHEUR)

II.1 Généralités sur le hacheur

L'hacheur est un convertisseur continu\continu permettant de convertir une énergie à un niveau donné de tension (ou de courant) en une énergie continue à un autre niveau de tension (ou de courant). Son utilisation s'avère nécessaire pour stocker l'énergie photovoltaïque dans des batteries, ou pour alimenter une charge continue. [19]

Ils sont souvent utilisés comme une interface d'adaptation qui assure la poursuite du point de puissance maximale selon des stratégies de contrôle spécifiques. [9]

Les panneaux solaires et la charge peuvent être soit de nature capacitive (source de tension), soit de nature inductive (source de courant). La charge peut être de nature résistive aussi. [9]

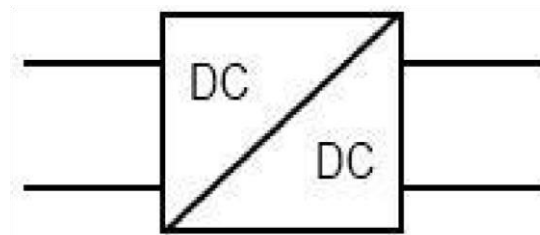


Figure (II.1) : Symbole d'un convertisseur DC-DC

II.1.1 Exigences de l'utilisateur

La fonction essentielle d'un convertisseur de puissance est double : d'une part adapter la forme de l'énergie aux besoins d'une charge (typiquement en transformant une tension en une tension continue et/ou en modifiant le niveau de la tension) et d'autre part stabiliser ce flux d'énergie en filtrant autant que possible les fluctuations de la source.

Dans le principe, assurer ces deux fonctions n'est pas excessivement complexe : fabriquer une alimentation élémentaire demande un nombre de composants relativement réduit.

Mais l'utilisateur privé ou professionnel a beaucoup d'autres exigences. Idéalement, un convertisseur doit en effet [20] :

1. Délivrer une ou souvent plusieurs tensions parfaitement continues, éventuellement ajustables et stables quel que soit le courant demandé ;
2. posséder un rendement élevé ;
3. Présenter un niveau de sécurité élevé, notamment en répondant aux normes d'isolation entre l'utilisateur et le réseau ;
4. Posséder une fiabilité élevée relativement à la durée de vie de l'application, en ce compris la résistance aux contraintes de l'environnement (vibrations, température, humidité, etc.) ;
5. Ne pas être une source de perturbations pour le réseau électrique amont ou les équipements environnants ni être trop sensible aux perturbations émanant de ceux-ci (compatibilité électromagnétique) ;
6. Être la plus petite et la plus légère possible ;
7. Et bien entendu être de préférence peu coûteuse ...

II.1.2 Les types d'hacheur

Nous traitons dans cette partie des convertisseurs unidirectionnels en courant et en tension. Cela implique que la fluence d'énergie ne peut se faire, au sein du convertisseur, que dans un seul sens. Cela revient également à considérer [21]:

- des sources de tension non réversibles, unidirectionnelles en courant. □
- des sources de courant non réversibles, unidirectionnelles en tension.

Cela conduit à l'étude des convertisseurs DC-DC les plus simples qui puissent être. Dans ce cadre, on distingue trois familles de convertisseurs statiques (ou hacheurs).

- hacheur abaisseur (ou buck),
- hacheur élévateur (ou boost), □ hacheur abaisseur-élévateur (buck-boost).

II .1.2.1 Hacheur Buck

C'est un convertisseur direct DC-DC. La source d'entrée est de type tension continue et la charge de sortie continue de type source de courant. L'interrupteur K figure (II.2) peut être remplacé par un transistor puisque le courant est toujours positif et que les commutations doivent être commandées (au blocage et à l'amorçage). [22]

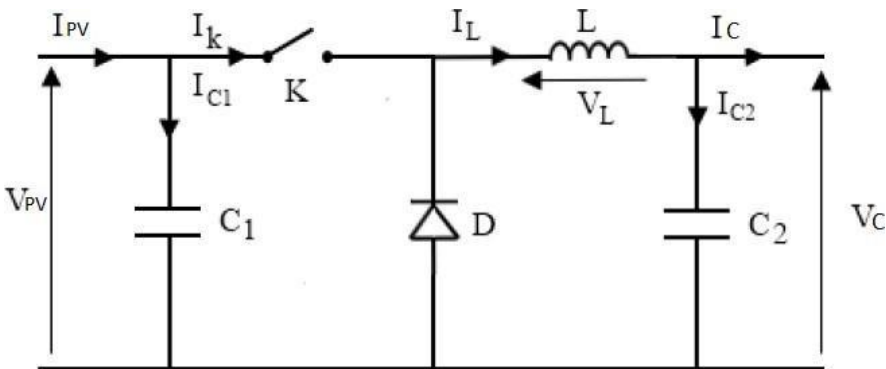


Figure (II. 2): Schéma électrique d'un hacheur buck

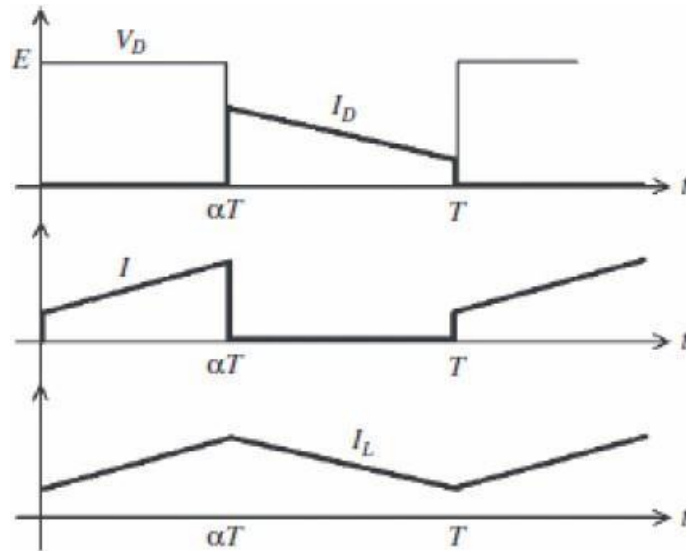
Fonctionnement :

Quand l'interrupteur est fermé pendant la durée αT , la tension appliquée aux bornes de la diode est E . l'interrupteur est commandé à la fréquence de découpage $f = 1/T$.

La source V_{pv} fournit de l'énergie à la charge et à l'inductance. Pendant le temps t l'interrupteur s'ouvre et l'énergie emmagasinée dans l'inductance commande la circulation du courant dans la diode de roue libre D. La tension à ses bornes est donc nulle. [23]

Les chronogrammes (tracés dans le cas idéal) de la figure(II.13) sont tracés dans le cas d'une conduction continue, c'est-à-dire que le courant ne repasse jamais par zéro. Pour calculer la relation entre la tension d'entrée et celle de sortie, on exprime que la tension moyenne aux bornes de l'inductance est nulle. [23]

$$V_c = \alpha \cdot V_{pv} \quad [II.10]$$



Figure(II.3) : Chronogrammes de courant et tension d'un hacheur buck

II.1.2.2 Hacheur boost

C'est un convertisseur direct DC-DC. La source d'entrée est de type courant continu (inductance en série avec une source de tension) et la charge de sortie est de type tension continue (condensateur en parallèle avec la charge résistive). L'interrupteur K figure(II.4) peut être remplacé par un transistor puisque le courant est toujours positif et que les commutations doivent être commandées (au blocage et à l'amorçage). [22]

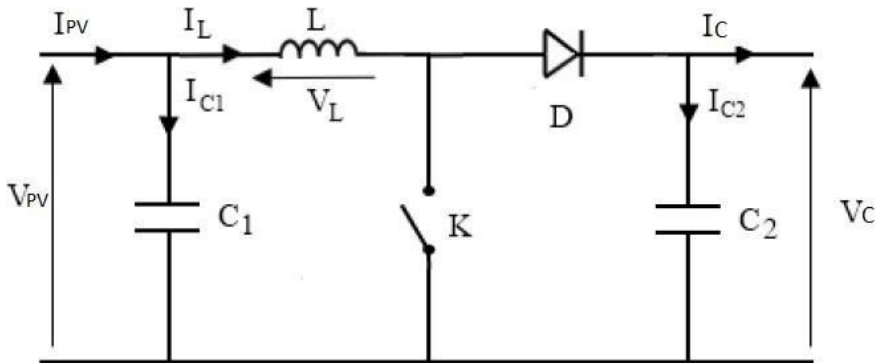


Figure (II. 4) : Schéma électrique d'un hacheur boost

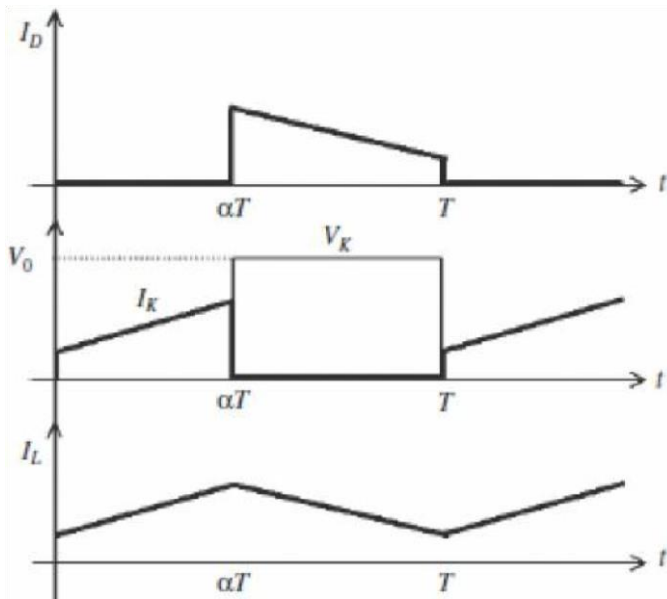
Fonctionnement :

Quand l'interrupteur est fermé pendant la durée αT , le courant dans l'inductance croît linéairement. La tension aux bornes de K est nulle. Pendant le temps t , l'interrupteur s'ouvre et l'énergie emmagasinée dans l'inductance commande la circulation du courant dans la diode de roue libre D.

On a alors $V_k = V_c$. En écrivant que la tension aux bornes de l'inductance est nulle, on arrive à [23]

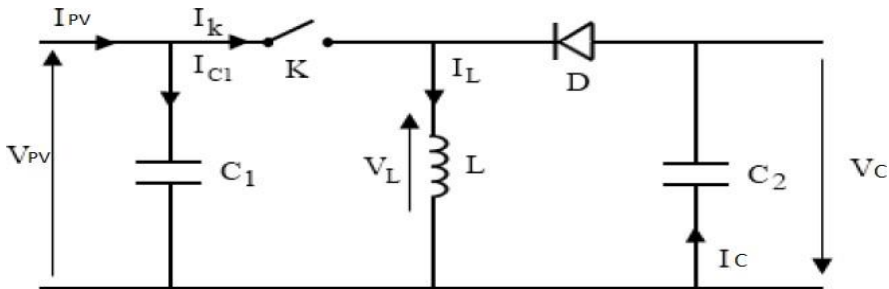
:

$V_c(1 - \alpha) = V_{pv}$ [II.11]



Figure(II. 5) : Chronogrammes de courant et tension d’un hacheur boost
II.1.2.3 Hacheur Buck-Boost

Le hacheur buck-boost est un convertisseur indirect DC-DC à stockage inductif. La source d'entrée est de type tension continue (filtrage capacitif en parallèle avec une source de tension) et la charge de sortie continue de type source de tension (condensateur en parallèle avec la charge résistive). L'interrupteur K figure(II. 6) peut être remplacé par un transistor puisque le courant est toujours positif et que les commutations doivent être commandées (au blocage et à l'amorçage). [22]



Figure(II.6) : Schéma électrique d’un hacheur buck- boost

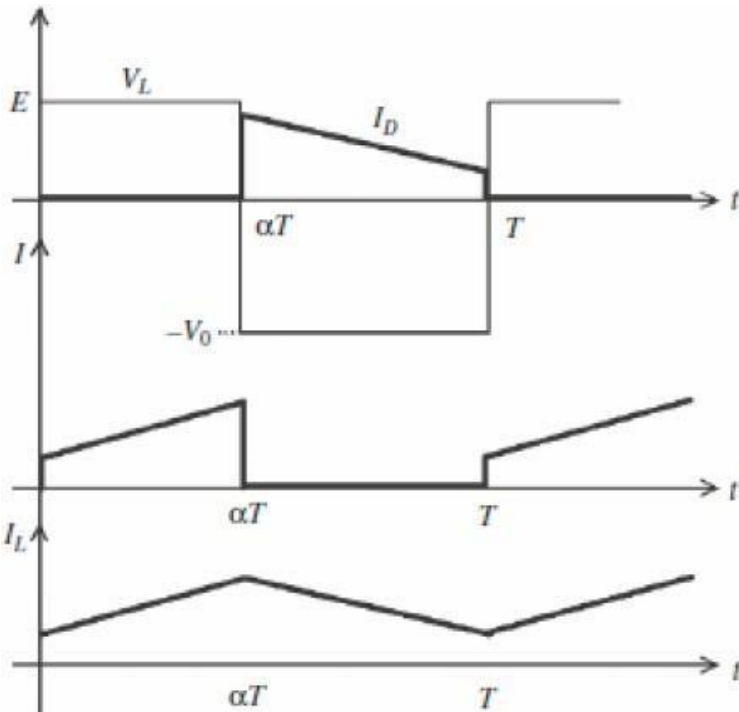
Fonctionnement :

Cette structure de convertisseur permet d’obtenir des tensions négatives à partir de tension positive. Le schéma de principe est présenté figure(II.7) Quand l’interrupteur est fermé pendant la durée , le courant augmente linéairement. La tension est égale à .

À l’ouverture de K, la diode prend le relais et la tension est égale à Par définition la tension moyenne aux bornes de l’inductance est nulle, Il en résulte que [23] :

$$V_{pv} \cdot \alpha \cdot T = V_c \cdot (1 - \alpha) T \quad [II. 12]$$

Quand le rapport cyclique $\alpha \dots 0.5$ le hacheur buck-boost fonction comme un hacheur boost et si le rapport cyclique $\alpha \dots 0.5$ le hacheur buck-boost fonction comme un hacheur buck.



Figure(II.7) : Chronogrammes de courant et de tension d’un hacheur buck-boost

II.2 Choix du convertisseur DC-DC

Le générateur PV fournit une tension faible que nous devant adapter à la tension nominale de la charge, ce qui sera réalisé par l’hacheur élévateur. Ceci est la condition sur le choix du convertisseur. En plus, il est essentiel que le rendement soit maintenu élevé pour éviter la dissipation de la puissance et pour éviter les échauffements excessifs dans les composants électroniques. Pour cette raison toute la conversion de puissance échangée doit être réalisée autour des composants de stockage d’énergie (inductance et condensateurs) et les commutateurs. Les commutateurs de puissance utilisés dépendent du niveau de la puissance à convertir ou à commander

Le convertisseur Boost est le plus adapter pour ce type de conversion, car il a une structure simple, et un gain en tension plus élevé que les autres pour un rapport cyclique donné. Pour cette raison nous allons utiliser dans notre système un hacheur élévateur(Boost).

II.3 Détermination des paramètres du hacheur Boost

Les calculs des paramètres du hacheur Boost se font à l'aide des formules ci-dessous : □ Le rapport cyclique (α) :

[II.13]
$$V_{pv} = V_c \frac{1}{1-\alpha} \rightarrow \alpha = 1 - \frac{V_{pv}}{V_c}$$

- Résistance (R) :

$$P_c = \frac{V_c^2}{R} \rightarrow R = \frac{V_c^2}{P_c} \quad [II.14]$$

- L'inductance (L) :

Sachant que le courant aux bornes de l'inductance est représenté par la figure suivante :

Nous aurons ainsi

[II.1]
$$\Delta i_L = \frac{1}{2} (i_L(\alpha T_s) - i_L(0))$$

Ainsi l'inductance (L) peut être calculée comme suit : -

$$V_L = L \frac{di_L}{dt} \rightarrow V_{pv} = L \frac{di_L}{dt} \quad [II.16]$$

En utilisant () = dans le premier sous-intervalle. Le courant à la fin de la première période est donné par :

$$i_L(\alpha T_s) = i_L(0) + \frac{V_{pv}}{L} (\alpha T_s) \quad [II.17]$$

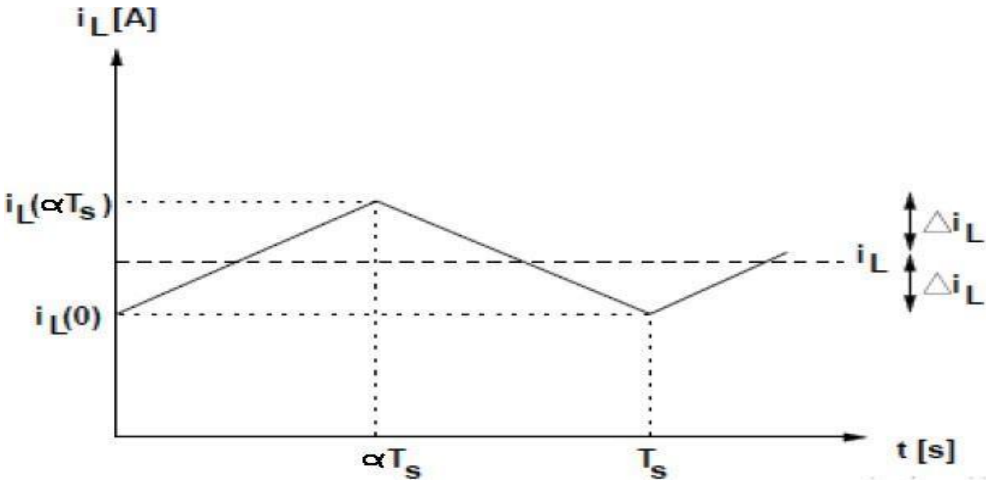


Figure (II.8) : Ondulation du courant de l'inductance Si on remplace ce dernier dans la première équation on obtient :

$$\Delta i_L = \frac{1}{2} \frac{V_{pv}}{L} (\alpha T_s) \tag{II. 18}$$

Et on en déduit la formule utilisée pour calculer la valeur de l'inductance L :

$$L = \frac{V_{pv}}{2\Delta i_L F_s} \alpha \quad [II.19]$$

Avec

$$F_s = \frac{1}{T_s}$$

□ Capacité (C) :

Sachant que la tension aux bornes du condensateur est représentée par la figure suivante :

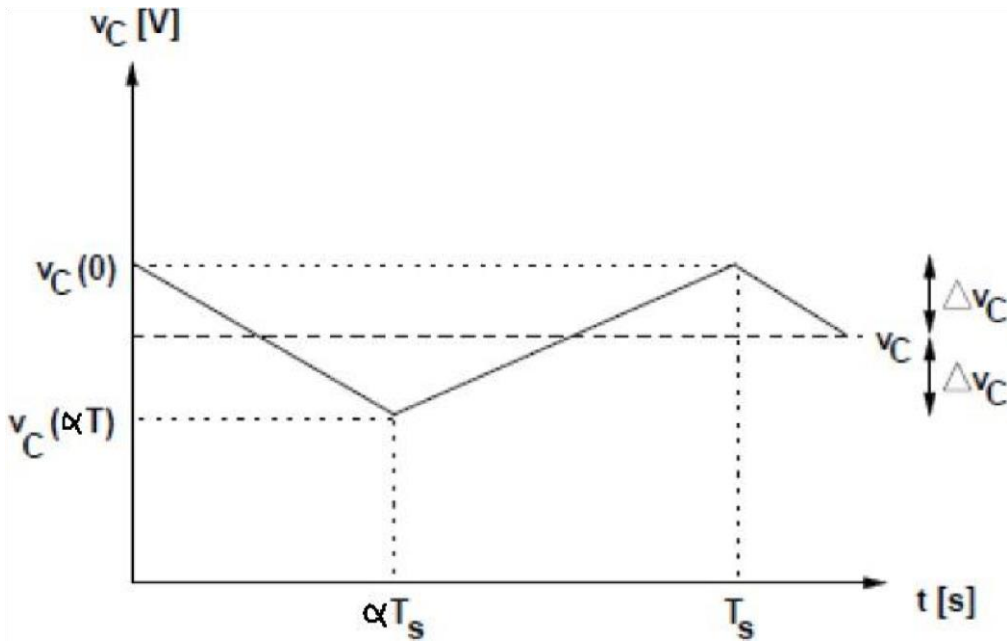
Nous aurons ainsi :

$$i_c = C \frac{dV_c}{dt} \quad [II.20]$$

$$\int_{-\Delta V_c}^{\Delta V_c} V_c = \frac{1}{C} \int_0^{\alpha T_s} i_c dt$$

$$-2\Delta V_c = -\frac{1}{C} \frac{V_s}{R} \alpha T_s$$

$$C = \frac{V_c}{2\Delta V_c R F_s} \alpha \quad [II.21]$$



Figure(II.9) : Ondulation sur la tension de condensateur

Application numérique :

Pour une tension d'entrée ($V_{in} = 34\text{ v}$) et une tension de sortie ($V_{out} = 400\text{ v}$), et à partir des équations précédentes on obtient :

$$\alpha = 1 - \frac{34}{400} = 0.915$$

D'après l'équation [II.13] :

D'après l'équation [II.14]

$$R = \frac{400^2}{100} = 1600\ \Omega$$

$$i_L = \frac{400}{1600} * \frac{1}{1-0.915} = 2.94\text{ A}$$

$$\Delta i_L = 0.1 * i_L = 0.294\text{ A}$$

D'après l'équation [II.19] :

$$L = \frac{34}{2 \times 0.294 \times 16 \times 10^3} * 0.915 = 3.31 \text{ mH}$$

$$\Delta V_c = 1 \% * 400 = 4 \text{ v}$$

D'après l'équation [II.21] :

$$C = \frac{400}{2 \times 4 \times 1600 \times 16 \times 10^3} * 0.915 = 1.79 \mu\text{F}$$

III.4 La puissance maximale du générateur photovoltaïque (MPPT) :

La théorie relative à la maximisation de la puissance produite d'un panneau solaire grâce aux grandeurs physiques agissant sur la caractéristique électrique courant tension ($I-V$), nous permet de créer une technique d'utilisation plus performante, et plus efficace pour extraire un point de puissance maximale d'une manière permanente sans perte dans l'énergie transférée du panneau photovoltaïque vers la charge. Pour obtenir ce résultat on utilise un système d'adaptation basé sur la commande MPPT. Plusieurs techniques nous permettent d'atteindre cet objectif, parmi eux la technique P&O. ce chapitre sera consacré à la définition de cette technique et son application à notre système photovoltaïque.

II.4 Suivi de MPPT

La poursuite du point maximum de la puissance (MPPT) est une partie essentielle dans les systèmes photovoltaïques. Plusieurs techniques sont développées depuis 1968 date de

publication de la première loi de commande de ce type adaptées à une source d'énergie renouvelable de type PV. Ces techniques se différencient entre eux par leur complexité, nombre de capteurs requis, la vitesse de convergence, coût, rendement et domaine d'application. [12]

II.4.1 Principe de MPPT

Par définition, une commande MPPT, associée à un étage intermédiaire d'adaptation, permet de faire fonctionner un générateur PV de façon à produire en permanence le maximum de sa puissance. Ainsi, quels que soient les conditions météorologiques (température et l'éclairement), la commande du convertisseur place le système au point de fonctionnement maximum (V_{mpp} , I_{mpp}). [12]

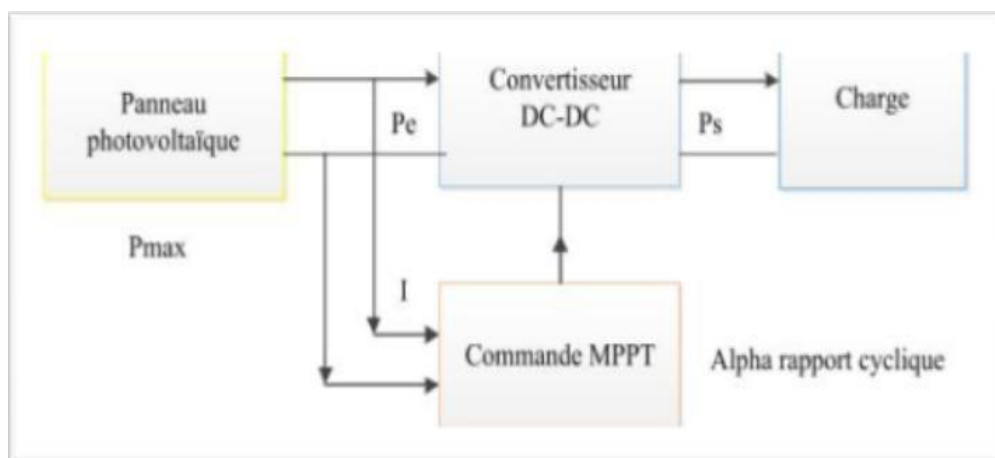


Figure (II.10) : Système photovoltaïque avec une commande MPPT

La technique de contrôle communément utilisée consiste à agir sur le rapport cyclique du hacheur de manière automatique pour amener le générateur à sa valeur optimale de fonctionnement qu'elles que soient les instabilités météorologiques ou variations brutales de charges qui peuvent survenir à tout moment.

La figure (II.11) illustre trois cas de perturbations. Suivant le type de perturbation, le point de fonctionnement bascule du point de puissance maximal PPM_1 vers un nouveau point P_1 de fonctionnement plus ou moins éloigné de l'optimum.

Pour une variation d'ensoleillement (cas a), il suffit de réajuster la valeur du rapport cyclique pour converger vers le nouveau point de puissance maximum PPM_2 .

Pour une variation de charge (cas b), on peut également constater une modification du point de fonctionnement qui peut retrouver une nouvelle position optimale grâce à l'action d'une commande.

Dans une moindre mesure, un dernier cas de variation de point de fonctionnement peut se produire lié aux variations de température de fonctionnement du GPV (cas c). Bien qu'il faut également agir au niveau de la commande, cette dernière n'a pas les mêmes contraintes temporelles que les deux cas précédents.

En résumé, le suivi du PPM est réalisé au moyen d'une commande spécifique nommée MPPT qui agit essentiellement sur le rapport cyclique du convertisseur statique (CS) pour rechercher et atteindre IPPM du GPV. [24]

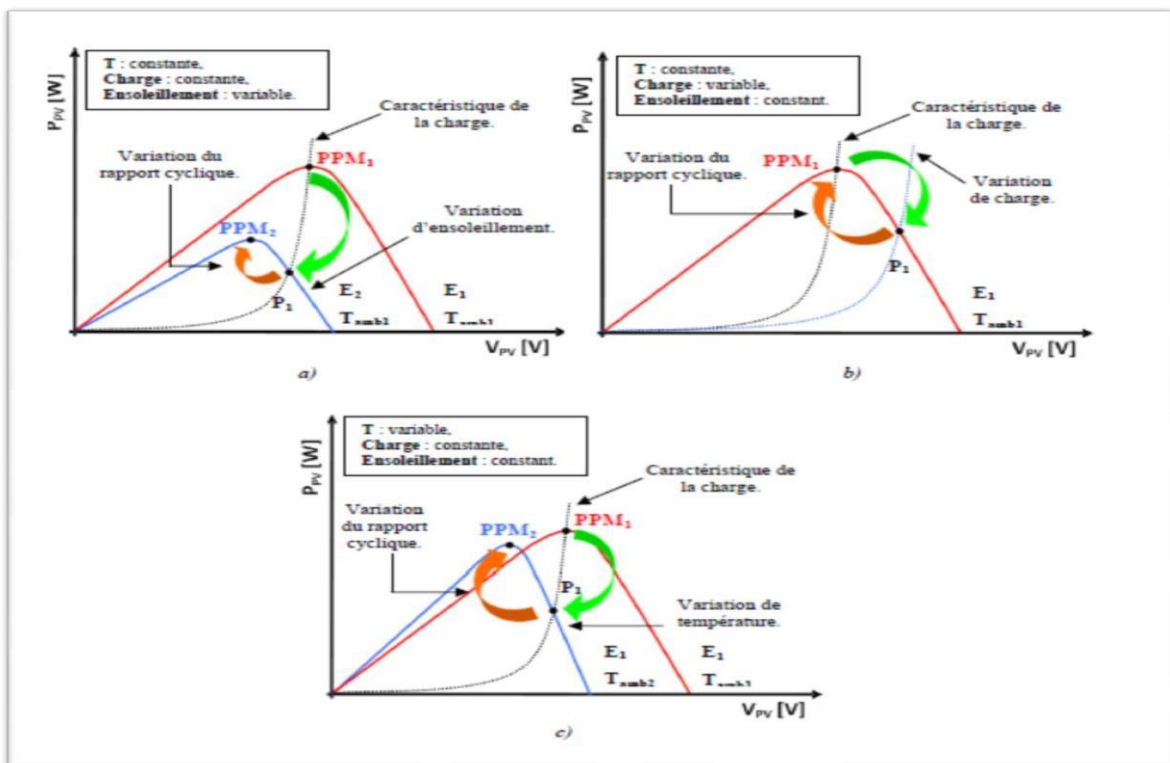


Figure (II.11) : Recherche et recouvrement du Point de Puissance Maximale a) suite à une variation d'éclairement, b) suite à une variation de charge, c) suite à une variation de température

II.5 Conclusion

Dans la première partie de ce chapitre on a définie l'hacheur comment il fonctionne, les types d'hacheur ainsi comment on choisit notre convertisseur DC-DC.

La deuxième partie est une La théorie relative à la maximisation de la puissance MPPT produite d'un panneau solaire, un suivi détaillé de cette commande lors de variation des différent paramètre (charge, température, éclairement) .

Chapitre III :

Convertisseur DC-DC (ONDULEUR)

III.1 Introduction

Dans le monde industriel, les entraînements électriques exigent de plus en plus des vitesses variables, à cet effet, le progrès de l'électronique de puissance a permis de développer plusieurs moyens qui assurent des entraînements alternatifs à vitesse variable. Parmi ces moyens, les onduleurs autonomes commandés en modulations de largeurs d'impulsion (MLI).

III.2 Classification des onduleurs

Un onduleur est un convertisseur statique assurant la conversion continu- alternatif, alimenté en continu, il modifie de façon périodique les connexions entre l'entrée et la sortie et permet d'obtenir de l'alternatif à la sortie.

Une première classification peut être faite en distinguant : onduleurs non autonomes et onduleur autonome.

Entre ces deux types d'onduleurs, il existe un type intermédiaire d'onduleur appelé onduleur à commutation par la charge « ou encore onduleur à résonance ».

III.2.1 Onduleurs non autonome

Un onduleur est dit non autonome si l'énergie nécessaire pour la commutation des thyristors est fournie par le réseau alternatif qui est donc un réseau actif. C'est le cas du fonctionnement en onduleur des redresseurs. La fréquence et la forme d'onde de la tension sont imposées par le réseau alternatif.

III.2.2 Onduleur autonome

Un onduleur autonome est un convertisseur statique assurant la conversion continu-alternatif. Alimenté en continu, il modifie de façon périodique les connexions entre l'entrée et la sortie et permet d'obtenir de l'alternatif à la sortie.

Un onduleur autonome dépend essentiellement de la nature du générateur et du récepteur entre lesquels il est monté cela conduit à distinguer :

- Les onduleurs de tensions.
- Les onduleurs de courant.

III.2.2.1 Les Onduleurs (autonomes) de tension :

Chapitre III : Convertisseur DC-AC (ONDULEUR)

Un onduleur de tension est un onduleur qui est alimenté par une source de tension continue (source d'impédance interne négligeable). La tension « u » n'est pas affecté par les variations du courant « i » qui la traverse, la source continue impose la tension à l'entrée de l'onduleur et donc à sa sortie.

Le courant à la sortie « i' » et donc le courant à l'entrée « i » dépendent de la charge placée du côté alternatif. Cette charge peut être quelconque à la seule condition qu'il ne s'agisse pas d'une autre source de tension (capacité ou f. e. m alternative) directement branchée entre les bornes de sortie.

III.2.2.2 Les onduleurs (autonomes) de courants :

Un onduleur de courant (souvent appelé commutateur de courant) est alimenté par une source de courant continu, c'est-à-dire par une source d'inductance interne si grande que le courant « i » qui la traverse ne peut être affecté par les variations de la tension « u » à ses bornes.

III.2.3 Les onduleurs à résonance :

Les onduleurs à résonance sont des onduleurs de tension ou de courant à un créneau par alternance fonctionnant dans des conditions particulières. La charge doit être un circuit oscillant peu amorti. On commande les interrupteurs par une fréquence voisine de la fréquence de résonance de la charge. Si celle-ci varie, il faut faire varier la fréquence de commande. L'onduleur doit donc être piloté par la charge, il n'est plus autonome.

III.3 Types d'onduleurs autonomes de tension :

III.3.1 Les onduleurs monophasés :

Pour obtenir une tension alternative à partir d'une tension continue en utilisant deux interrupteurs, il faut un point milieu, soit du côté de la sortie alternative, soit du côté de l'entrée continue :

- L'onduleur monophasé avec transformateur de sortie à point milieu appelé onduleur push-pull (Figure III.1).

- L'onduleur monophasé avec diviseur capacitif à l'entrée appelé onduleur en demi-pont. (Figure III.2).

Si on veut varier la largeur relative des créneaux formant les alternances de la tension de sortie, il faut quatre interrupteurs c'est : l'onduleur monophasé en pont (figure III.3).

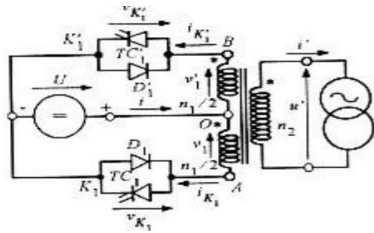
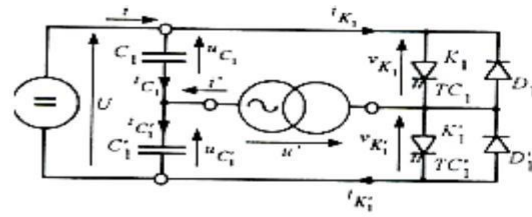


Figure III.1 Onduleur monophasé avec Transformateur de sortie à point milieu



III.2 Onduleur monophasé avec diviseur capacitif

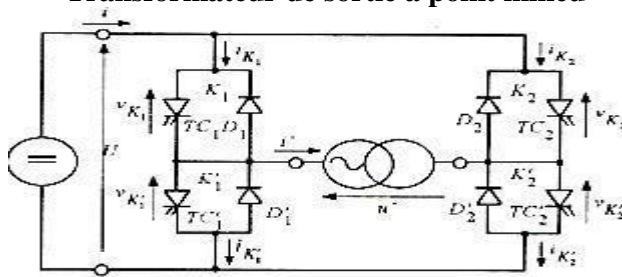


Figure III.3 Onduleur monophasé en pont

III.3.2 Les onduleurs triphasés

L'ondeur de tension triphasé découle immédiatement de trois demi pont monophasé, on obtient l'ondeur triphasé à six interrupteurs (figure III-4).

Chaque demi pont comprend un thyristor (ou un transistor) et une diode .la source de tension continue est obtenue à partir d'un pont redresseur.

Pour assurer la continuité des courants de sortie alternatif ia, ib, ic, les interrupteurs K1, K'1 et K2, K'2, K3 et K'3 doivent être complémentaires deux à deux.

On définit $K_i = (T_i, D_i)$.

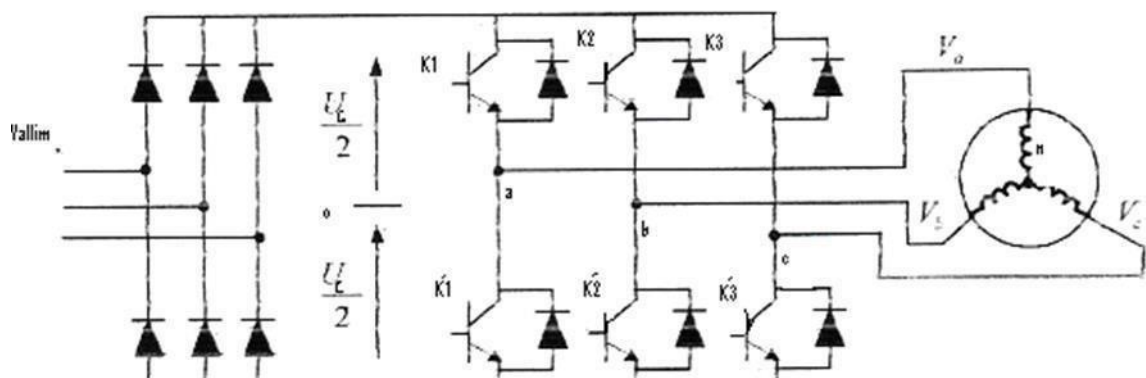


Figure III.4 Onduleur de tension triphasé

III.4 Les onduleurs multi niveaux

Les onduleurs multi niveaux permettent d'augmenter la tension de sortie des convertisseurs statiques au-delà des limites des semi-conducteurs. Pour les réaliser on doit disposer de plusieurs sources de tension continue (obtenue par exemple à partir d'un diviseur capacitif), on peut faire apparaître autant de cellules de commutation élémentaires et les associer en les superposant ou en les mettant en cascade. Cela permet de multiplier le nombre de niveau que l'on peut donner à la tension de sortie. Cette dernière est souvent obtenue par une modulation de largeur d'impulsions (MLI).

Ces onduleurs sont utilisés pour l'entraînement des moteurs asynchrones de grande puissance, d'autres applications sont possibles pour des moteurs qui tournent à vitesse élevée (> 5000 tr/mn).

Pour le cas de notre mémoire, on a mis en évidence un onduleur de tension autonome triphasé. Les signaux rectangulaires présentés par la figure (III.5) sont riches en harmoniques, ces dernières provoquent des couples pulsatoires et un échauffement supplémentaire.

La technique de la modulation de largeur d'impulsion est la plus appropriée à la commande des moteurs asynchrone. Car l'atténuation des harmoniques avec cette technique est remarquable.

III.5 Principe de fonctionnement de l'onduleur triphasé

L'onduleur de tension triphasé est plus important et plus utilisé que le monophasé, son application principale consiste en alimentation de moteur asynchrone à fréquence variable, dans ce cas il faut que la tension alternative soit pratiquement proportionnelle à la fréquence.

L'onduleur triphasé est l'assemblage de trois demi points monophasé formes chacun de deux " Interrupteurs "en série, K_1 et K_2' , K_2 et K_2' , K_3 et K_3' .

Les interrupteurs d'un même demi-point doivent être complémentaires pour que la source de tension ne soit jamais en court-circuit, pour que les circuits des courants i_a' , i_b' , i_c' , il faut que ces interrupteurs soient bidirectionnel en courant .

Chacun d'eux est formé d'un semi-conducteur à ouverture et ferme commandées et d'une diode montée en antiparallèle T_1 et D_1 , T_1' et D_1' , T_2 et D_2 ...

III.5.1 Les relations générales de tension

Chapitre III : Convertisseur DC-AC (ONDULEUR)

Quels que les courants, les interrupteurs fermés imposent les tensions entre les bornes de sortie A, B, C et le point milieu O (fictif) de la source de tension continue.

$$V_A - V_O = U/2 \text{ Quand } K1 \text{ est fermé, } -U/2 \text{ Quand il est ouvert donc } K1' \text{ fermé ;}$$

$$V_B - V_O = U/2 \text{ (} K2 \text{ fermé) ou } -U/2 \text{ (} K2' \text{ ouvert) ;}$$

$$V_C - V_O = U/2 \text{ (} K3 \text{ fermé) ou } -U/2 \text{ (} K3' \text{ ouvert).}$$

Les interrupteurs imposent donc aussi les tensions composées aux bornes des phases réceptrices.

$$V_{A'} - V_{B'} = (V_A - V_O) - (V_B - V_O) = U \text{ quand } K1 \text{ est fermé, } K2 \text{ ouvert,}$$

$$= 0 \text{ quand } K1 \text{ et } K2 \text{ sont fermé,}$$

$$= -U \text{ quand } K1 \text{ est ouvert, } K2 \text{ est fermé,}$$

$$= 0 \text{ quand } K1 \text{ et } K2 \text{ sont ouvert,}$$

Et de même pour $V_{B'} - V_{C'}$, égal à $(V_B - V_O) - (V_C - V_O)$ et pour $V_{C'} - V_{A'}$ égal à $(V_C - V_O) - (V_A - V_O)$.

On peut passer des tensions composées aux tensions simples $V_{A'}$, $V_{B'}$, $V_{C'}$ aux bornes des phases réceptrices, si le récepteur est équilibré et à point neutre isolé, quels que soient les courants.

Les tensions composées équilibrées ou non sont décomposables en série de Fourier. Les trois termes de même fréquence de ces trois tensions sont décomposables en un système équilibré direct, un système équilibré inverse et un système homopolaire.

Les deux premiers systèmes donnent les composants directs et inverse des tensions simples, composantes qui font circuler des courants, direct et inverse dans les phases du récepteur.

Il ne peut y avoir de composante homopolaire puisque, le neutre n'étant pas relié, la somme des courants est nulle. Quelle que soit l'impédance du récepteur pour les courants de la fréquence considérée, la tension homopolaire est nulle, c'est-à-dire que la somme des tensions simples est nulle pour la fréquence considérée.

Il en est de même pour les tensions simples de toutes les fréquences, donc pour leur somme. Le fait que la somme des courants $i_{a'}$, $i_{b'}$, $i_{c'}$ soit nulle et que le récepteur soit équilibré entraîne

$$V_{A'} + V_{B'} + V_{C'} = 0,$$

Chapitre III : Convertisseur DC-AC (ONDULEUR)

D'où l'expression de V_A' , V_B' , V_C' en fonction de $V_A'-V_B'$, $V_B'-V_C'$, $V_C'-V_A'$ et de (V_A-V_O) , (V_B-V_O) , (V_C-V_O) .

$$\ddot{V}_A' = 3[(V_A'-V_B') - (V_C'-V_A')] = 3(V_A-V_O) - 3(V_B-V_O) - 3(V_C-V_O)$$

III.5.2 Les relations générales de courants :

Des courants i_a' , i_b' , i_c' coté alternatif, on passe au courant i coté continu par $i = i_{k1} + i_{k2} + i_{k3}$

Avec $i_{k1} = i_a'$ quand K1 conduit,

$i_{k2} = i_b'$ quand K2 conduit,

$i_{k3} = i_c'$ quand K3 conduit,

Résumé :

Le tableau (II.1) donne, pour les huit configurations que peut donner au montage l'état fermé (F) ou ouvert (O) des interrupteurs K1, K2, K3, les expressions des tensions de sortie V_A' , V_B' , V_C' , en fonction de la tension d'entrée U :

Chapitre I :

K1	K2	K3	VA-VO	VB-VO	VC-VO	VA'	VB'	VC'	Convertisseur _{IK1}	DC _{IK2}	AC (ONDULEUR) _{IK3}	i
F	F	F	U/2	U/2	U/3	0	0	0	ia'	ib'	ic'	0
F	O	F	U/2	-U/2	U/2	U/3	-U/3	-2U/3	ia'	ib'	0	-ic'
F	O	O	U/2	-U/2	-U/2	2U/3	-U/3	-U/3	ia'	ib'	0	-ic'
F	O	O	U/2	-U/2	-U/2	2U/3	-U/3	-U/3	ia'	0	0	ia'
O	F	F	-U/2	U/2	U/2	-2U/3	U/3	U/3	0	ib'	ic'	-ia'
O	O	F	-U/2	-U/2	U/2	-U/3	-U/3	2U/3	0	0	ic'	ic'
O	O	O	-U/2	U/2	-U/2	-U/3	2U/3	-U/3	0	ib'	0	ib'
O	O	O	-U/2	-U/2	-U/2	0	0	0	0	0	0	0

II

Tableau (III.1) : les configurations de l'onduleur

III.5.3 Type de commandes :

On distingue les stratégies de commande suivante :

Chapitre III : Convertisseur DC-AC (ONDULEUR)

a- commande pleine onde (dite 180°).

b-Commande décalée.

c-Commande à Modulation de largeur d'impulsion (MLI).

La tension générée par les stratégies (a, b) à une forme rectangulaire, sa décomposition en série de Fourier à montrer que cette forme d'onde est riche en harmoniques.

Pour une commande 180°, la décomposition en série de Fourier de la tension composée est donnée par :

$$V_{AB} = \sum -\cos - \sin(n(\omega t + Q_n)).$$

Les tensions V_{bc} , V_{ca} sont décalée par rapport à V_{ab} respectivement de 120° et 240°.

La représentation du spectre d'harmonique des tensions simples et composées montre la présence des harmoniques d'ordre $K = 6n \pm 1$, avec k : entier

Cet inconvénient disparaît si l'onduleur est alimenté à tension constante et si le réglage de la tension de sortie se fait par un découpage approprié qui neutralise les harmoniques de rang bien spécifique.

III.6 Onduleur de tension triphasé à MLI

II.6.1 Principe de fonctionnement

On regroupant trois demi-points monophasés, on obtient l'onduleur triphasé à six interrupteurs de cet onduleur fonctionnant en MLI est très utilisé pour alimenter à tension et à fréquence variables des récepteurs équilibrés.

Donc dans un onduleur à MLI au lieu de former chaque alternance d'une tension de sortie avec seul créneau rectangulaire, On la forme de plusieurs créneaux de largeur convenable. Le schéma de l'onduleur reste le même, c'est la commande des interrupteurs qui est modifiée.

La multiplication du nombre d'impulsion formants chacune des alternances d'une tension de sortie présente deux avantages :



Chapitre III : Convertisseur DC-AC (ONDULEUR)

sortie, ce qui facilite le filtrage Elle repousse vers les fréquences plus élevées les harmoniques de la tension de la .



Elle permet de faire varier la valeur du fondamental de la tension de sortie.

III.6.2 Modulation de largeur d'impulsion

La technique de modulation de largeur d'impulsion permet de reconstituer des grandeurs telles que les tensions à partir d'une source à fréquence et tension fixe par l'intermédiaire d'un convertisseur direct.

La MLI, permet alors de s'approcher du signal désiré (onde sinusoïdal). Le contenu harmonique généré par une onde MLI entraîne des pertes dans le réseau (pertes fer dans le transformateur, perte joule).

Elles génèrent dans les machines tournantes des oscillations de couple, des bruits acoustiques et résonance électromagnétique, elle injecte du bruit sur la commande et introduit des non linéarités qui peuvent déstabiliser le système.

Il faut donc minimiser ses harmoniques.

Il existe plusieurs catégories de la MLI, dans notre étude nous intéressent à la technique MLI sinusoïdal.



MLI sinusoïdal



MLI par hystérésis.



MLI vectorielle.

III.2.1 Principe de la modulation de largeur d'impulsion

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

Le transfert d'énergie est contrôlé par le rapport entre intervalles d'ouverture et de fermeture (rapport cyclique) de chaque interrupteur, donc par la modulation de largeurs d'impulsions de

Chapitre III : Convertisseur DC-AC (ONDULEUR)

contrôle de ces interrupteurs (MLI), cette technique est basée sur la comparaison d'un signal de référence appelé aussi modulatrice d'amplitude A_r et de fréquence f_r avec un signal appelé porteuse d'amplitude A_p et de fréquence f_p très élevée.

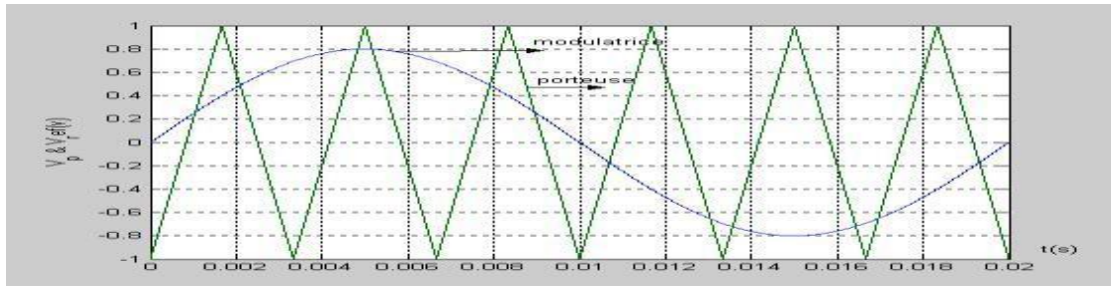


Figure III.5 Principe de la modulation

Le schéma synoptique de la commande par modulation triangulaire sinusoïdal triphasé est donné par la figure (III.06).

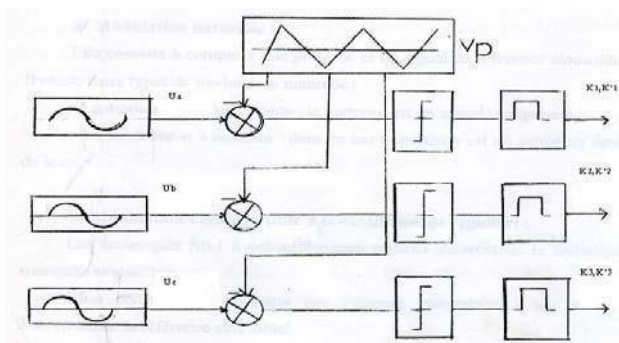


Figure III.6 Schéma synoptique de la commande en MLI (triphasé)

III.7 Les avantages et les inconvénients de l'onduleur de tension

Pour alimenter un moteur triphasé, l'onduleur de tension est d'ordinaire un pont à six interrupteurs. Il est précédé d'un filtre qui corrige l'imperfection de la source qui l'alimente et qui réduit l'ondulation du courant pris à cette source.

Notre charge alternative est donc son comportement en récepteur de courant ne pose pas de problème, au contraire, puisqu'un onduleur de tension est destiné à alimenter un récepteur de courant.

Si on utilise des semi-conducteurs rapides, on peut fonctionner à une fréquence de commutation

Chapitre III : Convertisseur DC-AC (ONDULEUR)

élevé.

L'ondulation de tension est réversible, c'est-à-dire permet le freinage par récupération du moteur. Mais cela suppose la réversibilité en courant de la source qui l'alimente. La réversibilité amène à compliquer l'alimentation de l'onduleur dans les équipements alimentés par le réseau industriel.

L'inconvénient majeur de l'onduleur est l'obtention de la tension non sinusoïdale à sa sortie, cela provoque un échauffement excessif aux niveaux des charges alternatives .

Ces tensions de sortie sont très riches en harmonique, donc il est nécessaire de les réduire cela est l'un des objectifs de notre travail.

III.8 Conclusion

Dans la première partie de ce chapitre on a détaillé les différents types des onduleurs qui peuvent être utiles dans le domaine des photovoltaïques de l'électronique de puissance et on s'est basé sur la commande des charges alternatives par un onduleur MLI .

La deuxième partie est une théorie relative à la maximisation de la puissance **MPPT** produite d'un panneau solaire, un suivi détaillé de cette commande lors de variation des différents paramètres (charge, température, éclairement) .

Chapitre IV :

chapitre IV simulation d'un système

photovoltaïque

Chapitre IV : Simulation d'un système photovoltaïque

I. 1 Panneau photovoltaïque

Nous avons choisi Le module AavidSolar ASms-220P. Qui est un panneau photovoltaïque composé de 60 cellules monocristallines en série, ayant une puissance maximale de 220 W et considéré dans les conditions standards (STC : Standard Test Conditions) $G = 1000 \text{ W/m}^2$; $T_c = 25^\circ\text{C}$. Pour réaliser la modélisation de ce module, nous avons utilisé MATLAB SIMULINK comme outil de tests et de simulation.

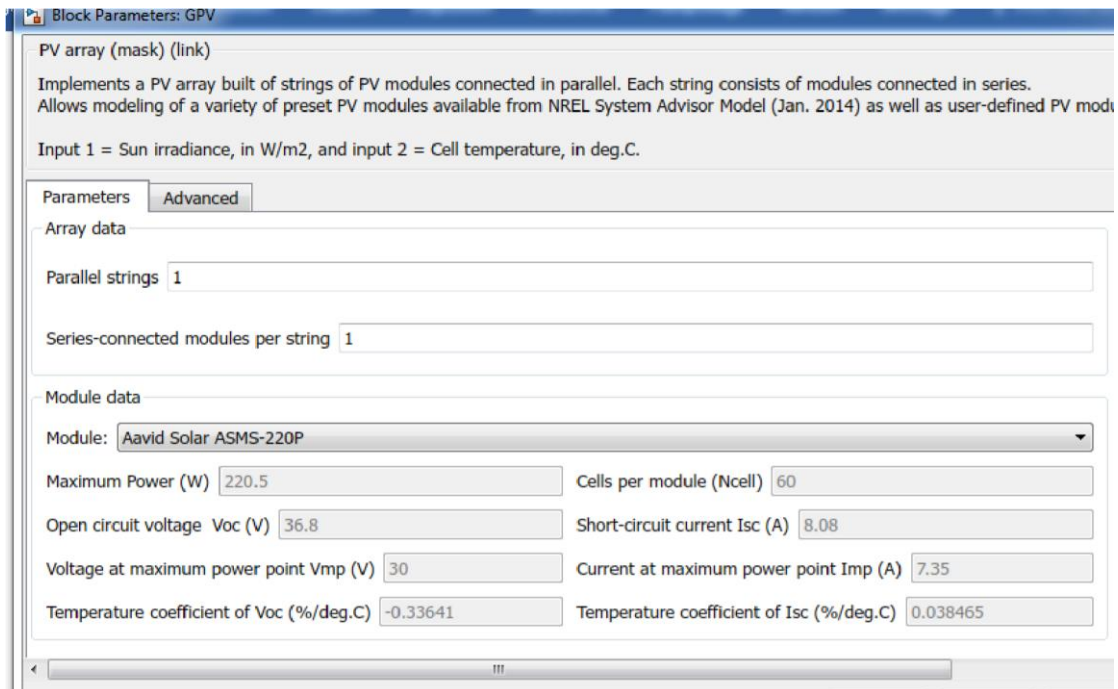
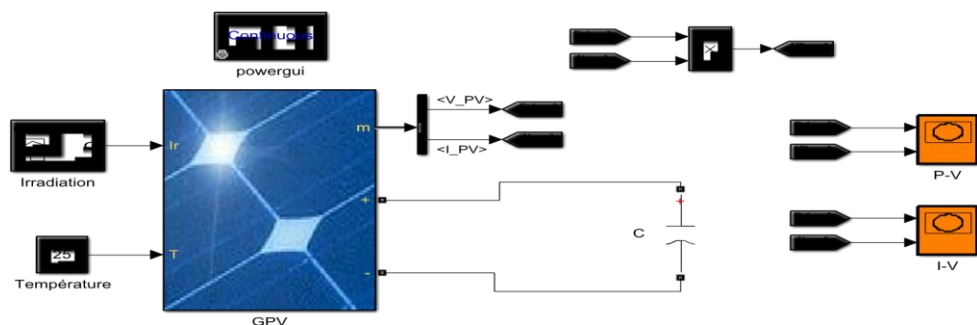


Figure (IV.1) : Caractéristiques électriques du Aavid solar ASMS-220P

IV .2 Simulation du panneau photovoltaïque

Pour l'analyse du fonctionnement du panneau photovoltaïque choisi, basé sur le modèle précédemment nous avons procédé à une série de simulations, ainsi les résultats obtenus sont présentés sur les figures suivantes :



Figure(IV.2) Schéma bloc du générateur photovoltaïque.

Chapitre IV : Simulation d'un système photovoltaïque

La figure(IV.3) présente l'évolution du courant générée du module en fonction de la tension à température et éclairement fixe. On note que le courant reste constant jusqu'à $V=25V$ puis il diminue rapidement jusqu'à son annulation.

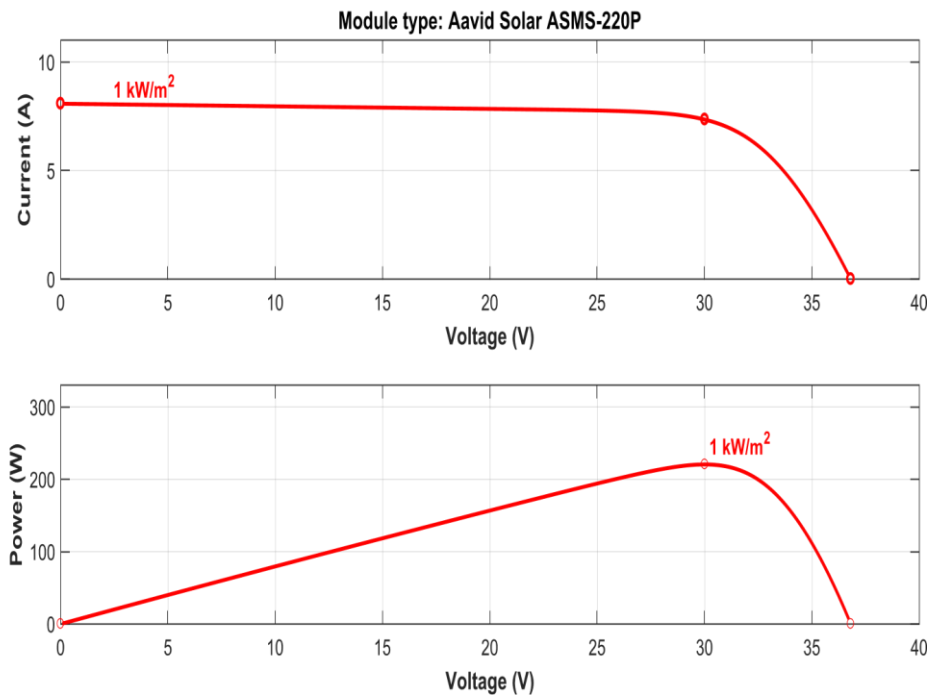
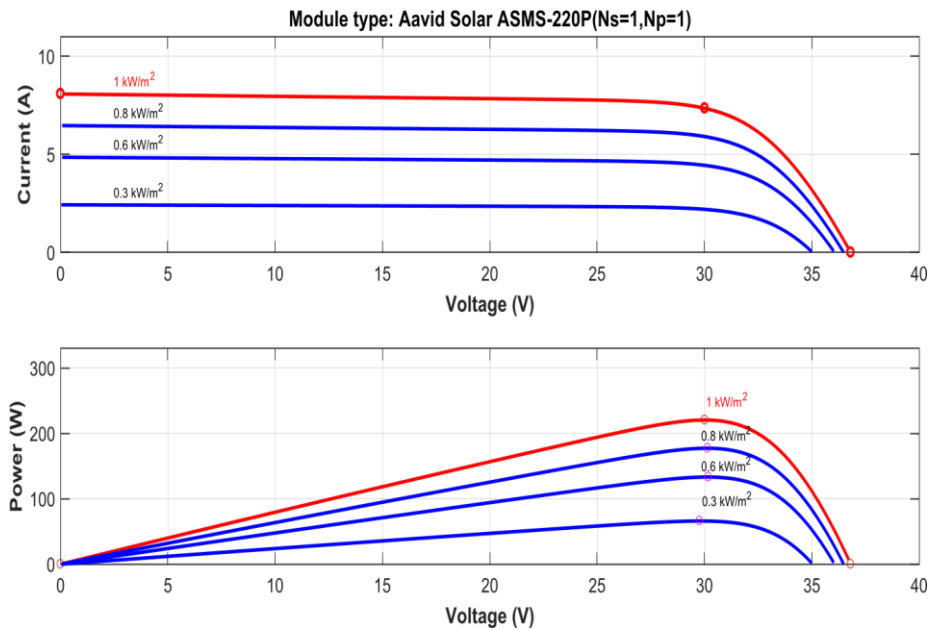


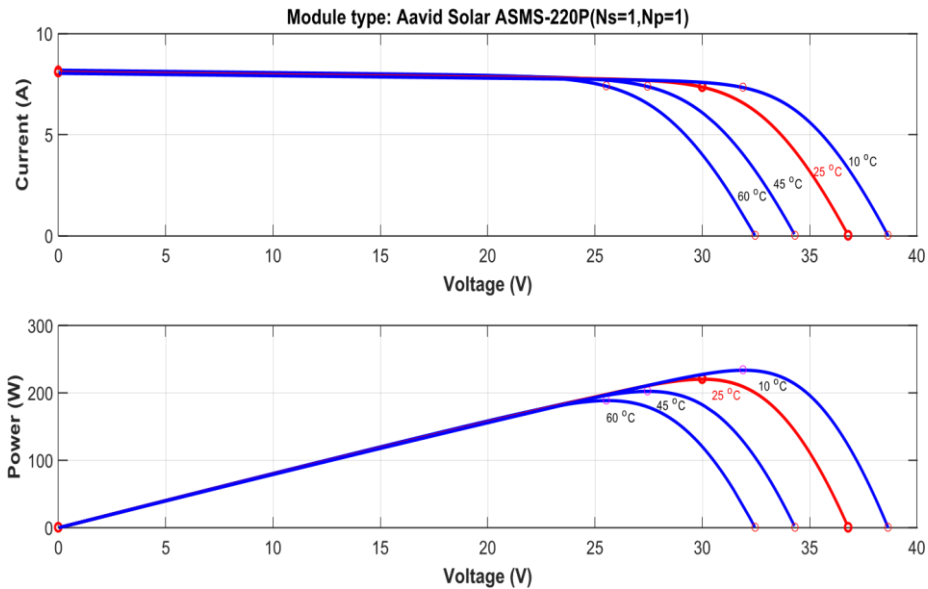
Figure (IV.3) Simulation de la caractéristique (I-V) et (P-V) du GP ($T=25^{\circ}$, $G=1000W/m^2$).



Figure(IV.4) Résultats de simulation des caractéristiques I-V et P-V Pour différents Eclairement et une Température $T=25^{\circ}C$

Chapitre IV : Simulation d'un système photovoltaïque

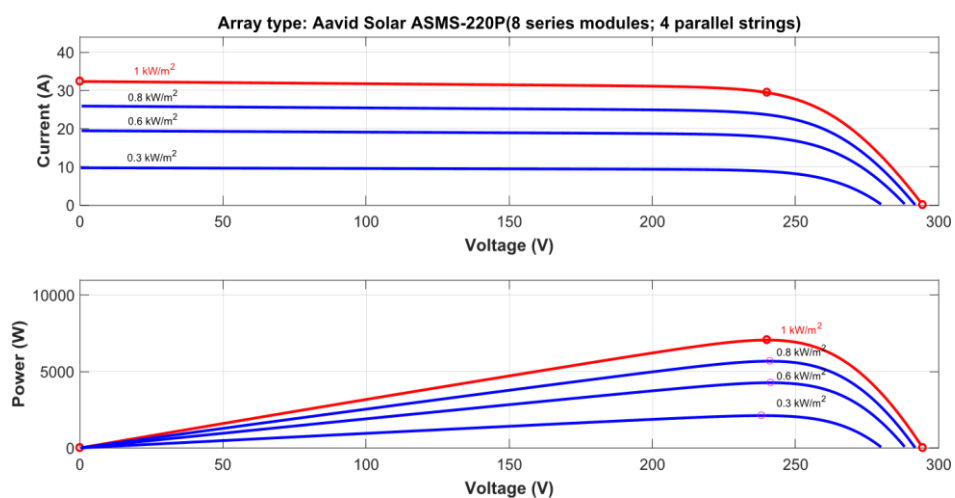
On conclue que avec une température ambiante 25° et une variation d'éclairement influe progressivement influe sur la puissance de panneau .



Figure(IV.5) Résultats de simulation des caractéristiques I-V et P-V, pour différentes températures et un éclairement $G=1000\text{W/m}^2$.

On conclue que avec un éclairement standart de 1000 W/m^2 et une variation de température influe progressivement influe sur la puissance de panneau .

Influence de l'éclairement : (Pour $N_s=8$, $N_p=4$) :

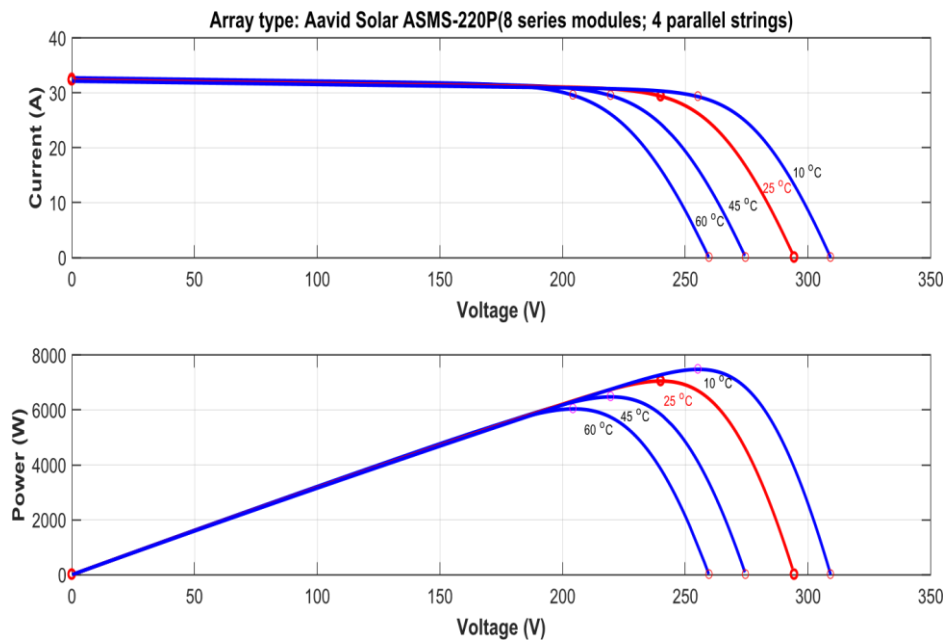


Figure(IV.6) Résultats de simulation des caractéristiques I-V et P-V Pour différents

Chapitre IV : Simulation d'un système photovoltaïque

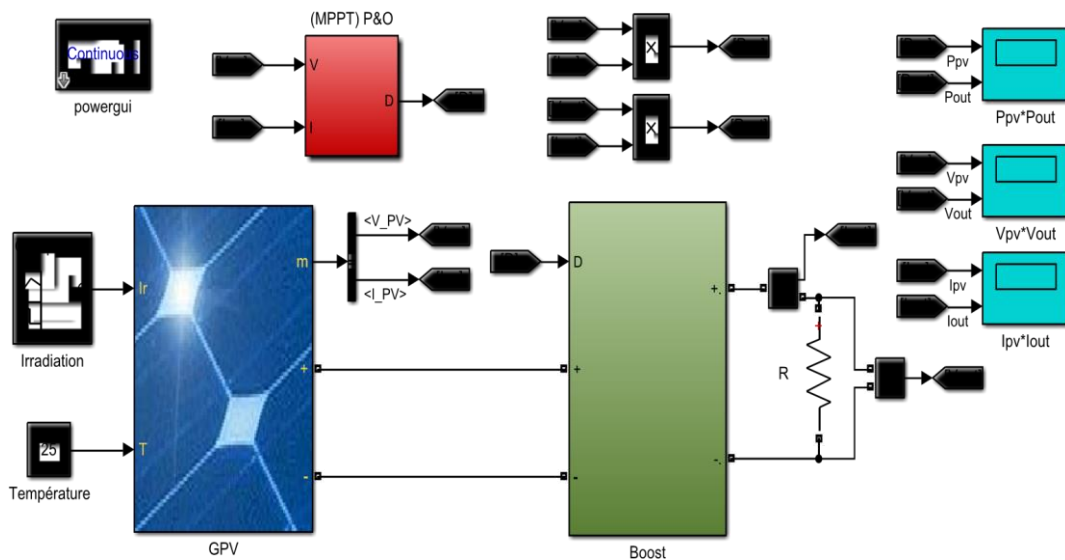
Eclairement et une température $T=25^{\circ}\text{C}$

Influence de température :(Pour $N_s=8$, $N_p=4$) :



Figure(IV.7) Résultats de simulation des caractéristiques I-V et P-V, pour différentes températures et un éclairement $G=1000\text{W}/\text{m}^2$.

II. Simulation d'un système (panneau + hacheur)



Figure(IV.8) Convertisseur (DC/DC) survolteur de tension (type boost) connecté à modèle PV avec MPPT.

Chapitre IV : Simulation d'un système photovoltaïque

Nous allons simuler le fonctionnement du système photovoltaïque constitué d'un panneau PV relié à un hacheur alimentant une charge résistive. Sont montrées dans les figures ci-dessus

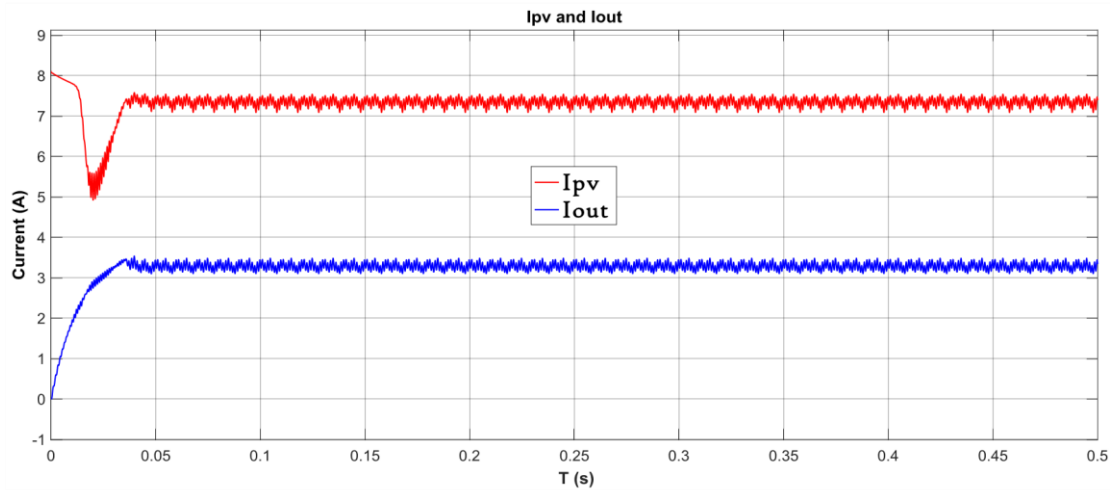


Figure IV.9 – le courant d'entrée I_{pv} et sortie I_{out} de le hacheur avec MPPT.

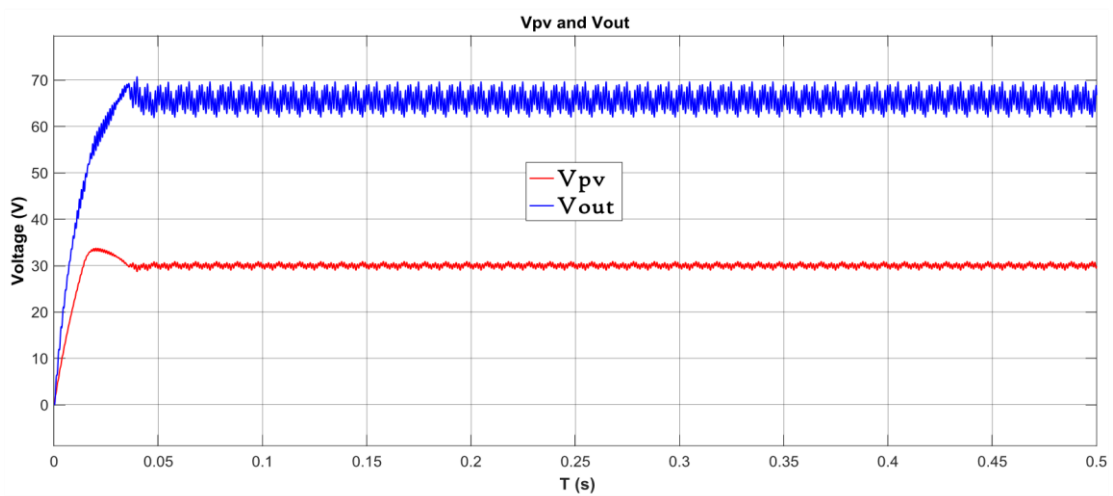


Figure (IV.10) La tension d'entrée V_{pv} et sortie V_{out} de le hacheur avec MPPT.

Chapitre IV : Simulation d'un système photovoltaïque

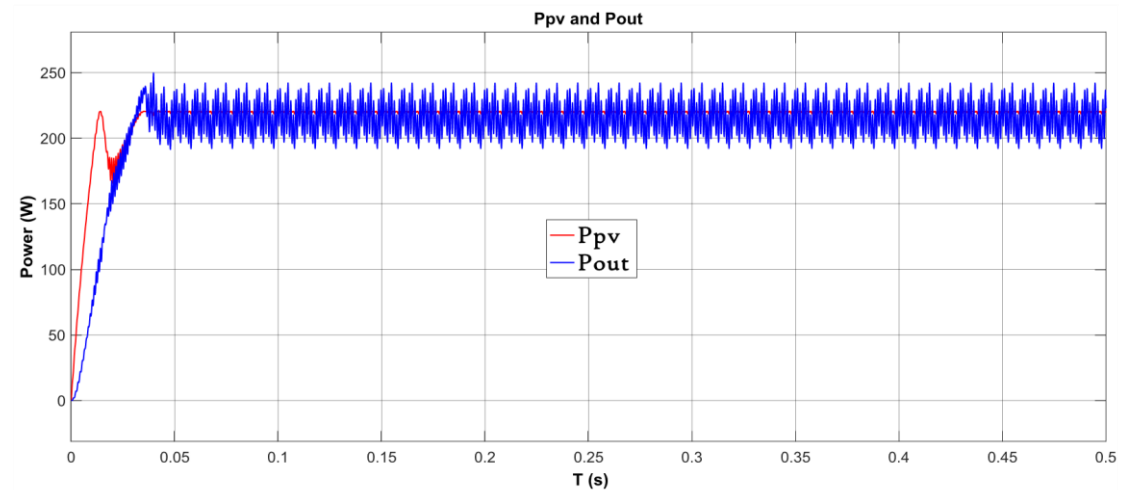


Figure (IV.11) La puissance d'entrée Ppv et sortie Pout de le hacheur avec MPPT.

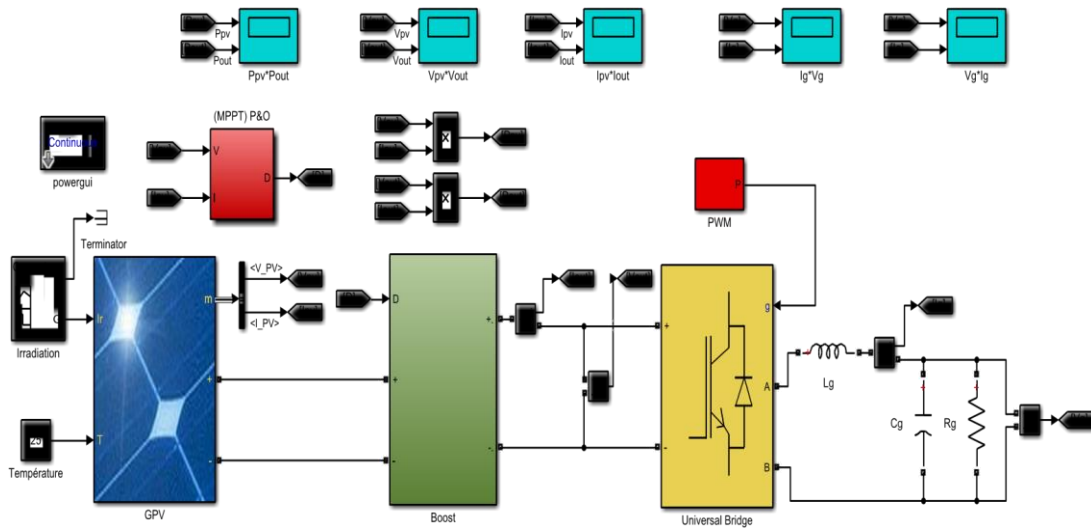
Interprétations des résultats :

D'après les résultats obtenus de la simulation, on remarque :

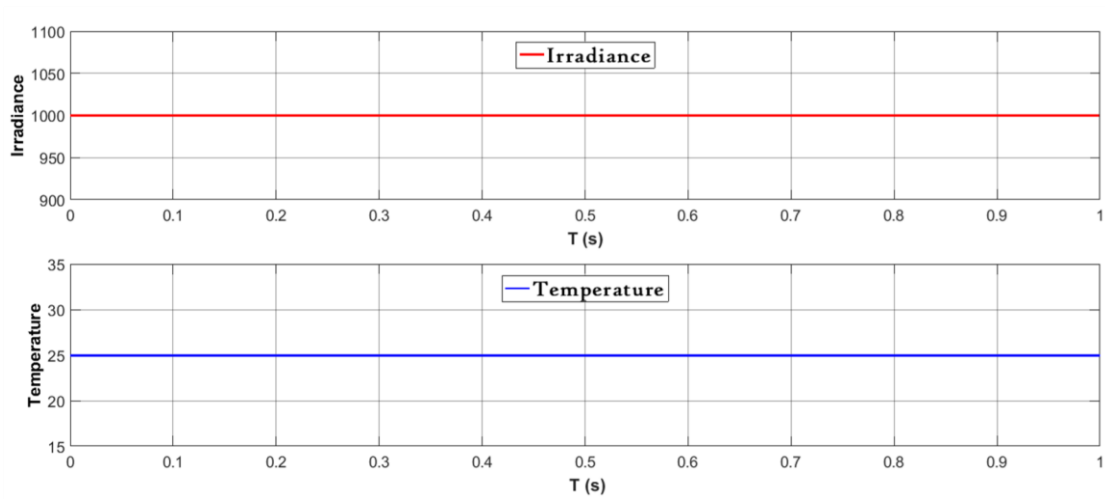
- La tension de sortie d'hacheur survolteur est supérieure à celle d'entrée. □ Le convertisseur DC-DC et la commande MPPT effectuent correctement leurs rôles. Le convertisseur fournit dans les conditions optimales une tension à sa sortie supérieure à celle fournie par le générateur PV .
- La commande MPPT adapte le générateur PV à la charge : transfert de la puissance maximale fournie par le générateur PV.

Chapitre IV : Simulation d'un système photovoltaïque

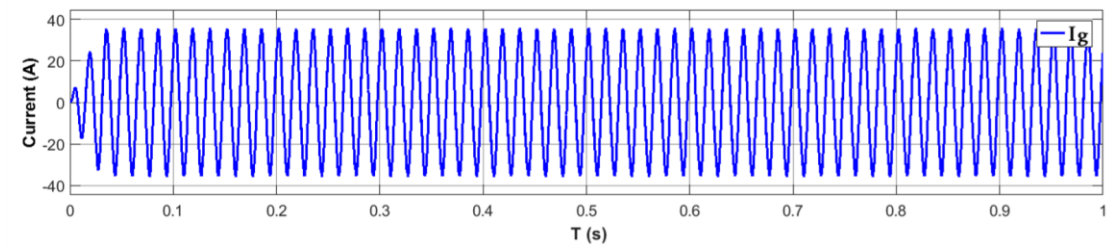
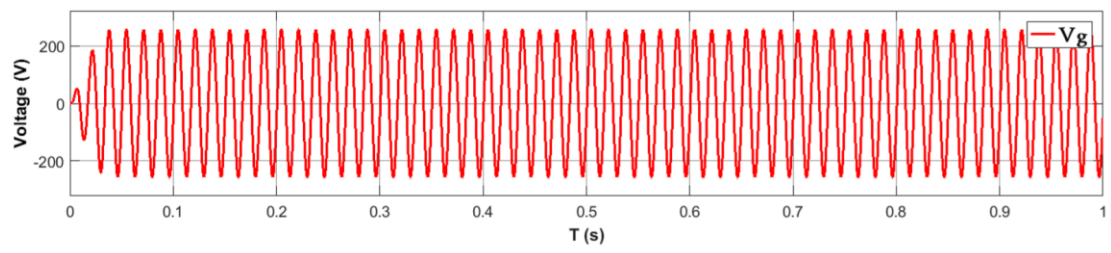
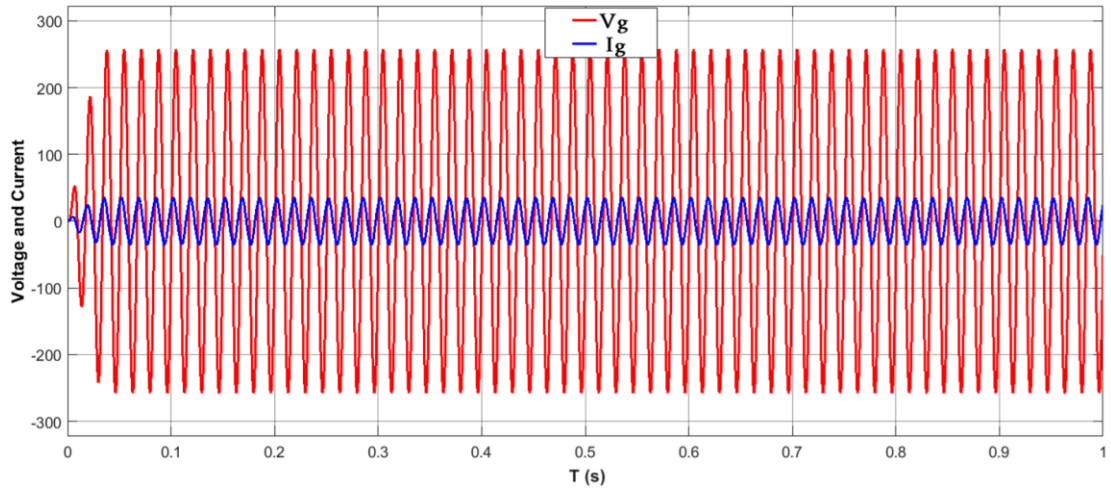
III. Simulation d'un système photovoltaïque complet :



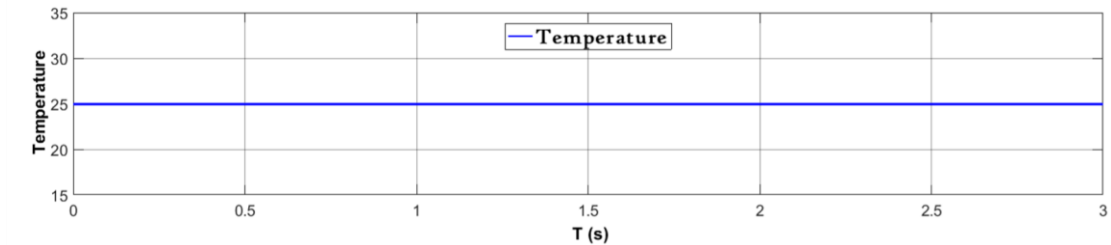
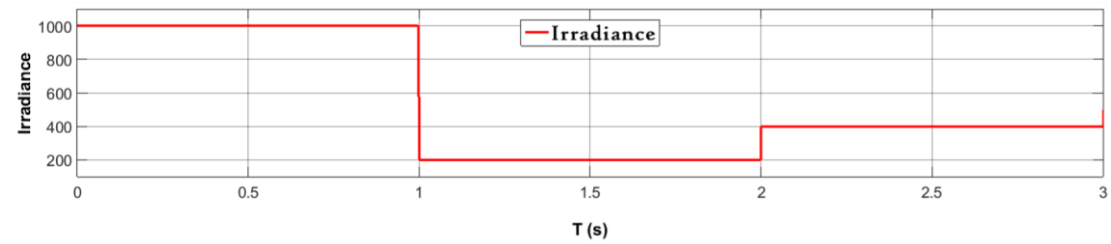
1



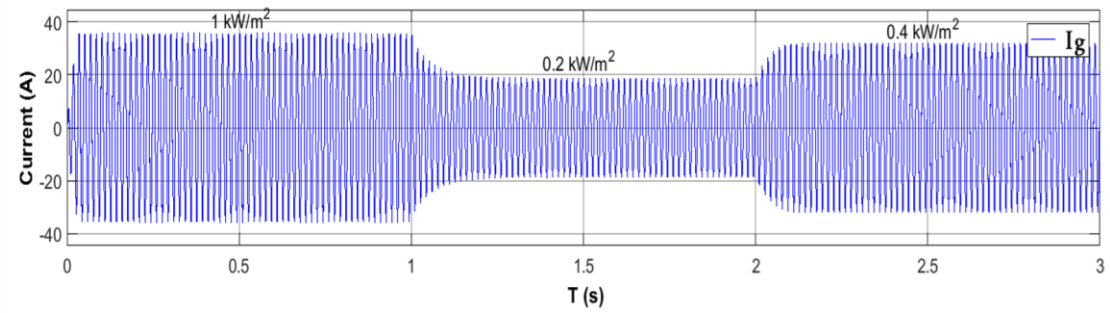
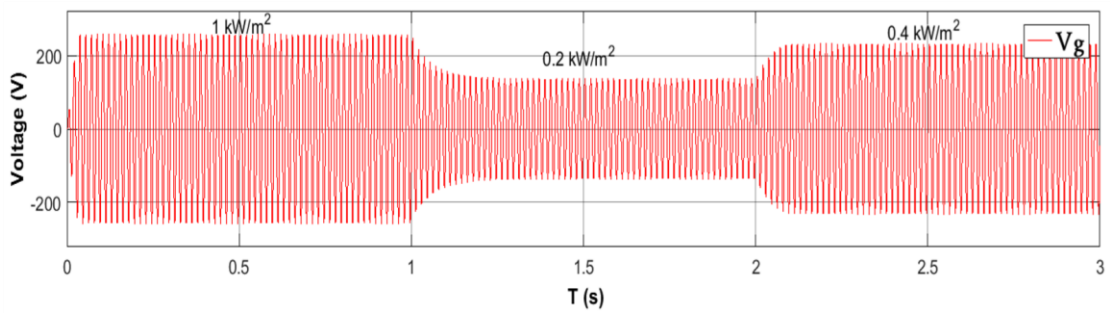
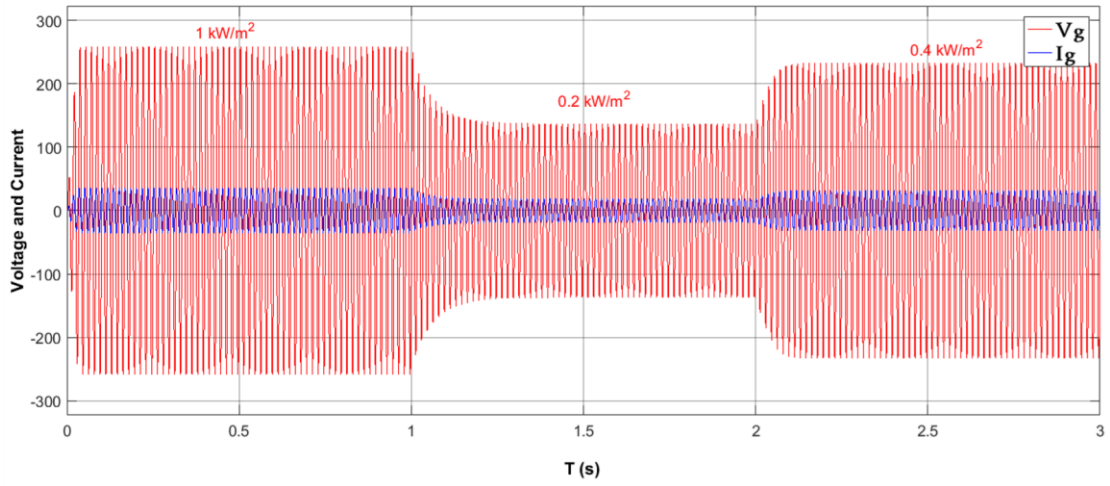
Chapitre IV : Simulation d'un système photovoltaïque



2



Chapitre IV : Simulation d'un système photovoltaïque



Chapitre IV : Simulation d'un système photovoltaïque

IV. 4 Contribution d'un système photovoltaïque :

Le nombre de panneaux solaires dont vous avez besoin dépend de plusieurs facteurs : votre consommation annuelle d'énergie, le rendement de votre installation et sa puissance. Pour calculer le nombre de panneaux, il faut diviser la consommation annuelle par le facteur de conversion (0,9). $E = P \cdot T$

Par exemple, si vous utilisez 450 KVA

220 W.

34 V

4.45 A

$450\ 000 / 220 = 2045.45$

En a 2046 cellule en parallèle

$450\ 000 / 220\ v = 2045.45\ A$

$2045.45 / 4.45 = 459.6$

En a 460 cellules en série

Exemple d'alimentation d'une maison

Lampe 200 w

Frigo 1600 w

Machine à laver 3000 w

Clim 3300 w 3

Pétrin 1200 w

Hotte 300 w

Tv 50 w

Cuisinière 2000 w

Microonde 1200 w

= 12 850 w

$450\ 000 / 12\ 850 = 35$

450 000w alimentent 35 maisons

Conclusion générale

Conclusion générale :

Le travail réalisé dans ce projet est basé essentiellement sur Le travail qu'on a présenté porte sur l'étude par simulation du fonctionnement d'un système photovoltaïque (PV) menu d'une commande MPPT assurant la poursuite de la puissance maximale fournie. Dans un premier temps, on a donné des généralités sur les systèmes PV, notions sur l'énergie et rayonnements solaire et ses caractéristiques ainsi l'effet PV, cellule PV et principe de fonctionnement, la modélisation de la cellule photovoltaïque

Le deuxième chapitre quelques types de convertisseurs DC-DC, utilisés dans les systèmes photovoltaïques. Pour adapter la source PV à la charge caractérisée par une tension continu nominale nous avons utilisé l'hacheur élévateur (dit Boost).

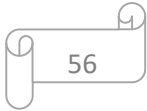
Le troisième chapitre, est une étude générale sur les différents types des onduleurs le choix d'onduleur MLI nous avons aussi étudié la commande MPPT, son principe, quelque méthode de mise en œuvre en particulier nous avons développé la méthode dite perturbe et observe, cette commande MPPT numérique utilise directement la tension et le courant du panneau photovoltaïque pour chercher le point de fonctionnement correspondant à la puissance maximale. Finalement, nous avons fait une application de la commande MPPT choisie sur le système PV associant panneau PV – hacheur – onduleur – charge alternatif (maison) pour une variation de Les résultats de simulation montre un fonctionnement satisfaisant malgré les faibles oscillations sur la tension et la puissance générée et au niveau de la charge.

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

- Les performances du panneau PV se dégradent avec l'augmentation de la température et la diminution de l'intensité d'éclairement.
- Les performances du générateur PV sont évaluées à partir des conditions standards (CST) : éclairement 1000W/m², température 25°C.
- Le convertisseur DC-DC et la commande MPPT effectuent correctement leurs rôles. Le convertisseur fournit dans les conditions optimales une tension à sa sortie supérieure à celle fournie par le panneau PV.
- La commande MPPT adapte le panneau PV à la charge, donc un transfert de la puissance maximale.

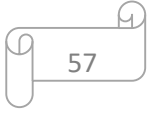
- l'importance de la modélisation de la connexion au réseau électrique et de sont ou ces systèmes de production.

- La commande de l'onduleur et les systèmes de productions déterminent le comportement



principal de la production décentralisée sur le réseau basse tension. Les technologies actuelles permettent une souplesse de commande importante.

- Pour les systèmes photovoltaïques, la souplesse de l'utilisation des convertisseurs statiques est sous employée.



REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] site de ministre de la transition énergétique et de l'Energie renouvelable <https://mteer.gov.dz/>.
- [2] F. Lasnier, T.G. Ang, "Photovoltaic Engineering Handbook", IOP Publishing Ltd. 1980. ISBN 0-85274-311-4
- [3] Centre de Développement des Energies Renouvelables ATLAS SOLAIE ALGERIEN. www.CDER.dz
- [4] Perrin C. Brichambaut et Vauge C., (2009), « le gisement solaire : Evaluation de la ressource énergétique », Technique et Documentation, Librairie Lavoisier, Paris.
- [5] Brochure, (2000), « Dimensionnement et installation des systèmes Solaires PV pour l'éclairage domestique », Centre de Développement des Energies Renouvelables Royaume du Maroc Marrakech édition l'UNESCO et l'IEPF Marrakech 29 juillet.
- [6] Bouchouicha Kada, (2017), «Modélisation multi spectrale des images satellitaire - Application : Quantification du bilan d'énergie Sol-Atmosphère », Thèse de Doctorat, option Rayonnement et Matière, université USTMB.
- [7] **KH. Ayache.** Modélisation et simulation d'un générateur photovoltaïque couplé à un réseau électrique. Mémoire de Magister, Université Mohamed Chérif Messaâdia de Souk- Ahras, 2014.
- [8] **M. Lakhdar Louazen.** Etude technico-économique d'un système de pompage photovoltaïque sur le site d'Ouargla. Mémoire de Magister, Université EL HADJ LAKHDAR – BATNA, 2008
- [9] **S.Djeriou.** Simulation d'un système photovoltaïque alimentant une machine asynchrone. Mémoire de Magister, Université FERHAT ABBAS DE SETIF, 2011.
- [10] **M.S.Fateh.** Modélisation d'un système multi générateurs photovoltaïques interconnectés au réseau électrique. Mémoire de Magister, Université FERHAT ABBAS DE SETIF, 2011.

Bibliographie

- [11] **S.Petibon.** Nouvelles architectures distribuées de gestion et de conversion de l'énergie pour les applications photovoltaïques, Thèse de doctorat de l'université de Toulouse, Janvier 2009.
- [12] **Antonio Luque and Steven Hegedus** Handbook of Photovoltaic Science and Engineering, John Wiley & Sons Ltd, 2003.
- [13] **M. Adouane**, «Etude et conception d'une stratégie de commande d'un onduleur connecté au réseau électrique», Mémoire de magistère, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, Algérie, 2008.
- [14] **W.Bensaci.** Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque adapté par une commande MPPT, Mémoire de Master, Université KASDI MERBAH OUARGLA, 2012.
- [15] **M. Belhadj**, "Modélisation D'un Système De Captage Photovoltaïque Autonome", Mémoire de Magister, université de Bechar, 2008.
- [16] **W.Xiao.** A Modified Adaptive Hill Climbing Maximum Power Point Tracking (MPPT) Control Method for Photovoltaic Power Systems, the University of British Columbia, 2003.
- [17] **M.Chaabene.** Cour Gestion énergétique des panneaux photovoltaïque, UNIVERSITE DE SFAX, 2008.
- [18] **Abouchabana Nabil**, "Etude d'une nouvelle topologie buckboost appliquée à un MPPT". Mémoire de Magister, Université de Laghouat, 2009

- [19] **Philippe Barrade.** L'électronique de puissance méthodologie et convertisseurs élémentaires. Press polytechnique et universitaires, 1ère édition, 2006.
- [20] **Lequeu Thierry,** "Cours d'électronique de puissance", IUT GEII 2ième année, Option EEP, 2005.
- [21] **Bogdan Grabowski, Christian Ripoll,** " Aide-mémoire Électronique", Dunod, 5^e édition, 2008.

Bibliographie

- [22] **Cédric Cabal.** Optimisation énergétique de l'étage d'adaptation électronique dédié à la conversion photovoltaïque. Thèse de doctorat, Université de TOULOUSE. 15 /12/2008
- [23] Trishan Eram, Student Member, IEEE, and Patrick L. Chapman, Senior member, IEEE. Compariason of Photovoltaic array maximum power point tracking techniques Techniques", IEEE TRANSACTIONS ON ENERGY CONVERSION, 2006.

