



وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
جامعة عبد الحميد ابن باديس مستغانم
Université Abdelhamid Ibn Badis de Mostaganem
كلية العلوم و التكنولوجيا
Faculté des Sciences et de la Technologie



Département de Génie Electrique
N° d'ordre : M... .../GE/2020

MEMOIRE DE FIN D'ÉTUDE DE MASTER ACADEMIQUE

Filière : Génie Électrique

Spécialité : (Électrotechnique industrielle)

Thème

**Etude et Simulation d'un Systèmes Photovoltaïque
Connectée Au Réseaux**

Présenté par :

1. M^r LAROUÏ Mohamed Amine
2. M^r DJAAFER Mohamed

Soutenu le 18 /09/ 2022 devant le jury composé de :

Président : M^{me} GHOMRI

Examineur : M^{me} BEKKOUCHE

Encadreur: M^r BENIAMINA Mansour

Année Universitaire : 2021 / 2022

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à:

🌹 A mes très chères parents qui m'ont soutenue moralement et financièrement et de tendresse qu'**Allah** me les garde durant toute ma vie.

🌹 A mes très chères sœurs.

🌹 A mes frères.

🌹 Ma grande mère et mon oncle et toute la famille **LAROUÏ et DJAAFAR**

🌹 A mon frère et mon binôme **djaafar mohamed** et sa respectueuse famille.

🌹 Toutes les autres qui je n'ai pas cité nommément et qui se reconnaîtront dans ma dédicace.

A tous ma promotion de Génie Civil **2021/2022**.

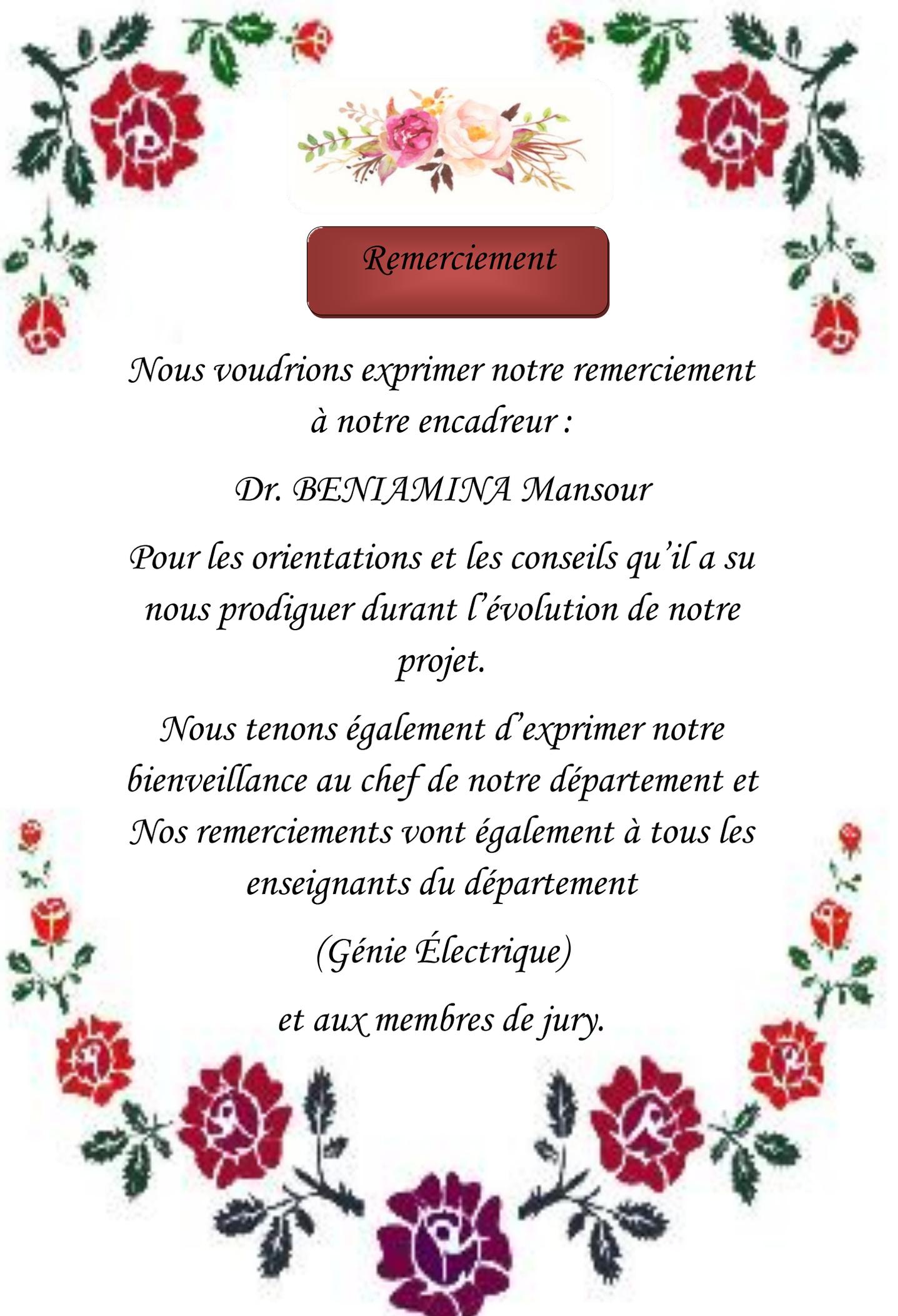
إن الذين نحبهم ونعزهم مكانتهم ليست

بين الأسطر والصفحات، لأن مقامهم أجل وأعلى

فالقلب سكناهم والذكرى ذكراهم، والقلب لن

ينساهم

Amine



Remerciement

*Nous voudrions exprimer notre remerciement
à notre encadreur :*

Dr. BENIAMINA Mansour

*Pour les orientations et les conseils qu'il a su
nous prodiguer durant l'évolution de notre
projet.*

*Nous tenons également d'exprimer notre
bienveillance au chef de notre département et
Nos remerciements vont également à tous les
enseignants du département*

(Génie Électrique)

et aux membres de jury.

SOMMAIRE

Liste des symboles et abréviation	
Introduction générale	
L'Objectif de travail	
Chapitre I:generalitr sur les systèmes photovoltaïque	
1-Introduction	03
2- L'énergie du solaire	03
2.1-Chaleur passive.....	03
2.2Solaire thermique.....	03
2.3Energie photovoltaïque (PV)	03
3- Système photovoltaïque	04
3.1-Les différents types de systèmes photovoltaïques	04
3.1.1-Installations photovoltaïques autonomes	05
3.1.2-Installations photovoltaïques raccordées au réseau	05
3.1.3Installations photovoltaïques hybride	06
4-La cellule photovoltaïque	07
4.1Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque	08
4.2-Type de cellules	09
4.3Modélisation d'une cellule PV	10
4.4-Caractéristiques électriques d'une cellule photovoltaïque	13
5-Panneaux PV	15
6-À quoi correspond le rendement d'un panneau solaire	16
7-Description du panneau photovoltaïque BP3165	17
7.1-Les caractéristiquesélectriquesd'unpanneauphotovoltaïqueBP3165	17
7.2-Les caractéristiques I(V) et P(V) du panneau PV aux conditions standard STC.....	18
7.3-L'influence des variations climatiques sur le panneau PV	17

8- Généralités sur le générateur PV	18
9-Les avantages et inconvénients	23
9-1-Les avantages	22
9-2-Les inconvénients	23
10- Conclusion	24

Chapitre II : Présentation des systèmes photovoltaïques connectés au réseau

1-Introduction	25
2-Principe du fonctionnement d'une installation solaire photovoltaïque	25
3-Systèmes photovoltaïques pour l'habitat	26
3.1-Isolé	26
3.2- Connecté au réseau	27
3.3- Les avantage	27
3.4- Les inconvénients	28
4- Etude des composants d'un système photovoltaïque connecté au réseau	28
4.1- Le générateur photovoltaïque	28
4.1.1- Regroupement des cellules	28
4.1.1.1-Regroupement en série	29
4.1.1.2- Regroupement en parallèle	29
4.1.1.3- Regroupement (série et parallèle)	30
4.1.2- Protection d'un générateur photovoltaïque	31
4.1.2.1-Protection lors de la connexion en parallèle de plusieurs GPV	31
4.1.2.2-Protection lors de la connexion en série de plusieurs GPV	31
5- Convertisseur	32
6- Structure générale d'un système photovoltaïque connecté au réseau	36
6.1- Système PV connecté directement au réseau	36
6.2- Systèmes à bus continu intermédiaire	36

7- Option de raccordement	36
8-Conclusion	37

Chapitre III : Modélisation d'un système photovoltaïque connecté au réseau électrique

1- Introduction.....	38
2-Convertisseurs DC/DC.....	38
2-1.-Composition du convertisseur.....	38
2-2-Hacheur survolteur(Boost).....	41
3-Recherche du point de puissance maximale (MPPT).....	42
3-1-Principe.....	42
3.2-Les techniques de commandes MPPT.....	43
3.2.1. Les commandes MPPT classiques.....	43
3-2--1-La méthode Perturbe & Observe (P&O).....	43
3-2-1-2-méthode Incrémentation des conductances (IncCond).....	46
3-2-2-Etude comparative.....	48
4-Convertisseur AC/DC	48
4-1-Redressement non commandé.....	48
4-1-1-Redressement double alternance.....	48
4-1-2-Filtrage de la tension redressée par un condensateur.....	49
4-1-3-Tension redressée.....	50
4-2-Convertisseurs continus-continus.....	51
4-3-Synthèse.....	51
4-4-Principe de fonctionnement.....	52
5-Modélisation d'un onduleur a trois niveaux type NPC	52.
6-Conclusion	55

Chapitre IIII : Simulation et interprétation des résultats

1- Introduction.....	56
----------------------	----

2- Simulation du générateur (GPV) avec les conditions standard.....	57
3-Simulation du générateur(GPV) à éclairment variable.....	58
4- Simulation de l'hacheur survolteur (BOOST).....	59
4-1- Commande MPPT.....	59
5-Simulation du Système PV connecté au réseau.....	63
6 - Simulation du Système PV connecté au réseau avec variation de charge.....	66
7- Conclusion	68
Conclusion générale.....	
Bibliographie.....	

Liste des symboles et abréviations

SYMBOLES

Pc	puissance de charge (w)
P	puissance fournie par GPV (w)
I	Le courant en (A)
Is	Courant de saturation (A)
Ic	Courant de condensateur (A)
Icc	Courant de court de circuit (A)
Ish	Le courant dérive par la résistance parallèle (A)
Ns	nombre de cellule en séries
Np	nombre de cellule en marelle
Fe	Fréquence (Hz)
Id	courant de diode(A)
Pc	Puissance de charge (W)
Ipv	courant fourni par la cellule (A)
C	Condensateur (F)
L	Inductance (H)
P	puissance fournie par GPV
Isc	Courant de court-circuit en série (A)
Fs	fréquence de commutation (rad /s)
G	l'irradiation solaire en (w=m2)
FF	Facteur de forme
Rp	Résistance parallèle shunt
Pm	La puissance maximale produite
E	Eclairement (W/m2)
S	Surface du module photovoltaïque(m ²)

Abréviations

INC	Incrémentale conductance
DC /AC	Continu /Alternative
DC/DC	Continu/Continu
H	Constante dePlanck
GPV	Générateur photovoltaïque
HT	Haute tension
MPPT	Maximum power point tracking
MT	Moyenne tension
PPM	Point de puissance Maximale
PV	Panneau photovoltaïque
P&O	Perturbation et Observation
PLL	Phase LockedLoop

1. Introduction Générale

Ces dernières années, la consommation mondiale en énergie électrique a augmenté considérablement. Ceci est dû à l'évolution démographique, au développement des nouvelles technologies et à la croissance des Pays émergents [1, 2, 3, 4]. Les systèmes actuels de production d'énergie électrique sont pour la plupart issus de sources fossiles (le pétrole, gaz et leurs dérivés) ou du nucléaire [2], notamment en France qui possède 58 réacteurs pour 67 millions d'habitants seulement [5]. Or ces sources ne sont pas inépuisables. On parle du tarissement du pétrole à l'horizon 2030 [3]. Ces sources ne pourront donc pas répondre, à elles seules, à nos besoins énergétiques sur le long terme [2]. De plus, la transformation des sources fossiles en énergie électrique s'accompagne d'un dégagement de gaz carbonique CO₂ qui a un impact non négligeable sur l'effet de serre et le réchauffement climatique. Le nucléaire, quant à lui, est une source dont les déchets radioactifs sont difficiles à traiter. Certains déchets ont des demi-vies extrêmement longues [6]. Les techniques d'enfouissement actuellement développées à Bures (Haute-Marne 52, France) permettront de stocker ces déchets en toute sécurité [7].

Cependant, nous laisserons le soin de leur retraitement aux générations futures. Par conséquent, il est urgent de passer à une source d'énergie plus sûre qui nous permettra de continuer notre vie normale sans endommager notre environnement ni mettre les gens en danger

Dans ce cadre, de nombreuses nations se sont engagées, à travers des conférences internationales sur le climat sous la bannière de l'Organisation des Nations Unies (ONU), à réduire les émissions de gaz à effet de serre. Parmi ces conférences on peut citer la COP21 tenue à Paris du 30 novembre au 12 décembre 2015. Lors de cette rencontre, pour la première fois de l'histoire, les représentants des cent quatre-vingt quinze Etats, issus de tous les continents, se sont accordés à réduire leurs émissions de gaz à effet de serre afin de stabiliser le réchauffement climatique en dessous de 2°C d'ici 2100 par rapport à la température de l'ère préindustrielle (période de référence 1861-1880) [8].

Cette réduction des émissions de gaz à effet de serre passe par la production d'électricité à partir d'énergies renouvelables non émettrices ou peu émettrices de gaz carbonique et une meilleure efficacité énergétique. L'une des formes d'énergie renouvelable les plus attractives est le solaire photovoltaïque (PV). En effet, l'énergie solaire PV est une source d'énergie propre, renouvelable (inépuisable) dont la source le soleil est gratuite.

Organisation du mémoire

Ce mémoire s'articule autour des chapitres suivants :

Chapitre 1 : Est consacré pour présenté des généralités sur les systèmes photovoltaïques, la définition, l'effet et la cellule PV, la modélisation est le module photovoltaïque.

Chapitre II : Fera un état de l'art sur les systèmes photovoltaïques PV raccordés au réseau.

Chapitre III : Abordera la modélisation des composants de notre système PV connecté au réseau électrique.

Chapitre IV : Traitera la simulation de notre système PV connecté au réseau électrique à l'aide d'un onduleur trois niveaux de type NPC et la commande INC (Incrémentale Conductance) avec le logiciel Matlab / Simulink.

Chapitre I :

Généralités sur les systèmes
photovoltaïques

1-Introduction :

Aujourd'hui, il est nécessaire de subvenir à l'augmentation du besoin de la société en énergie. Pour répondre à cette augmentation, on a deux façons possibles d'agir : Soit il faudrait diminuer la consommation des récepteurs d'énergie en améliorant leur efficacité et en augmentant leur productivité.

Soit, il faudrait développer des nouvelles sources d'énergie et d'ailleurs déjà des chercheurs sont en cours de recherche dans le domaine de la fusion nucléaire qui pourrait bien être une solution énergétique de la future mais jusque - là son avenir et son avènement ne sont pas assurés

Dans l'immédiat, nous avons déjà des sources en énergie renouvelable inépuisables qui sont le vent et le soleil et même qui ne cessent d'exister sur la terre entière et ne cessent de se régénérer naturellement sans jamais s'épuiser; et alors les chercheurs se sont retournés vers elles et ont découvert l'énergie photovoltaïque du soleil.[1]

2-L'énergie du solaire :

Peut être utilisée essentiellement de trois façons:

2-1-Chaleur passive :

Il s'agit de la chaleur que nous recevons naturellement du soleil. Cet élément peut être pris en compte dans la conception des bâtiments afin de réduire les besoins en chauffage

2-2-Solaire thermique :

Technologie utilisant l'énergie du soleil pour fournir de l'eau chaude (ou du chauffage) aux maisons et aux piscines.

2-3-Energie photovoltaïque (PV) :

Technologie utilisant l'énergie du soleil pour fournir l'électricité alimentant appareils électriques et éclairage. Un système photovoltaïque produit de l'électricité grâce à la lumière du jour et non pas uniquement grâce à la lumière du soleil. [2]

3-Système photovoltaïque :

La cellule individuelle, unité de base d'un système photovoltaïque, ne produit qu'une très faible puissance électrique, typiquement de 1 à 3 W avec une tension de moins d'un volt. Pour produire plus de puissance, les cellules sont assemblées pour former un module (ou panneau).[3]

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.

L'interconnexion de modules entre eux - en série ou en parallèle - pour obtenir une puissance encore plus grande, définit la notion de champ photovoltaïque.

Le générateur 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, comprend tous les équipements entre le champ de modules et la charge finale, à savoir la structure rigide (fixe ou mobile) pour poser les modules, le câblage, la batterie en cas de stockage et son régulateur de charge, et l'onduleur lorsque les appareils fonctionnent en courant alternatif.

Le système photovoltaïque est alors l'ensemble du générateur photovoltaïque et des équipements de consommation.[4]

3-1-Les différents types de systèmes photovoltaïques

3-1-1-Installations photovoltaïques autonomes :

- a-** Le rôle des systèmes autonomes est d'alimenter un ou plusieurs consommateurs situés dans une zone isolée du réseau électrique.
- b-** Le champ photovoltaïque voir figure (1.1) peut fournir directement l'énergie électrique nécessaire pour faire fonctionner les récepteurs (éclairage et équipement domestique).
- c-** Un système de régulation et une batterie d'accumulateurs permettent de stocker l'énergie électrique qui sera ensuite utilisé en l'absence du Soleil.

- d-** Les batteries sont utilisées pour stocker l'énergie électrique sous forme chimique. Elles restituent l'énergie électrique au besoin selon ses caractéristiques.
- e-** Le régulateur de charge a pour fonction principale de protéger la batterie contre les surcharges et les décharges profondes. Il est un élément essentiel pour la durée de vie de la batterie.
- f-** En site isolé, on peut aussi utiliser des récepteurs fonctionnant en courant alternatif.
- g-** Dans ce cas, l'installation comprendra un onduleur.

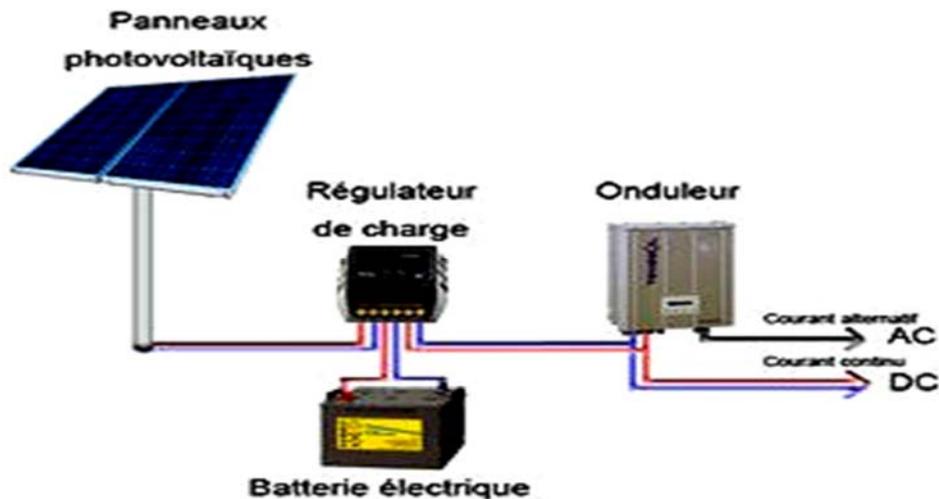


Figure I.1: Schéma typique d'une installation photovoltaïque autonome.

3-1-2-Installations photovoltaïques raccordées au réseau :

Un tel système est installé sur un site raccordé au réseau (Sonelgaz en Algérie). Généralement sur des habitations ou des entreprises qui souhaitent recourir à une forme d'énergie renouvelable et qui bénéficient d'un bon ensoleillement.

Un générateur photovoltaïque connecté au réseau n'a pas besoin de stockage d'énergie et élimine donc le maillon le plus problématique (et le plus cher).

C'est en fait le réseau dans son ensemble qui sert de réservoir d'énergie. Il y a deux formes d'injection du courant photovoltaïque :

- Soit injecter la totalité de la production photovoltaïque au réseau.
- Soit injecter le surplus de la production photovoltaïque au réseau. Deux compteurs d'énergie sont nécessaires :

Un compteur comptabilise l'énergie achetée au fournisseur d'énergie (consommation) et un autre compteur mesure l'énergie renvoyée sur le réseau électrique lorsque la production dépasse la consommation.

Un troisième compteur est ajouté dans le cas où l'énergie produite est injectée en intégralité dans le réseau (compteur de non-consommation).

Un onduleur pour la conversion du courant continu des panneaux en alternatif, et ce dernier doit être homologué par la compagnie d'électricité qui va recevoir ce courant. Afin d'assurer sur sa qualité «sinusoïdale»

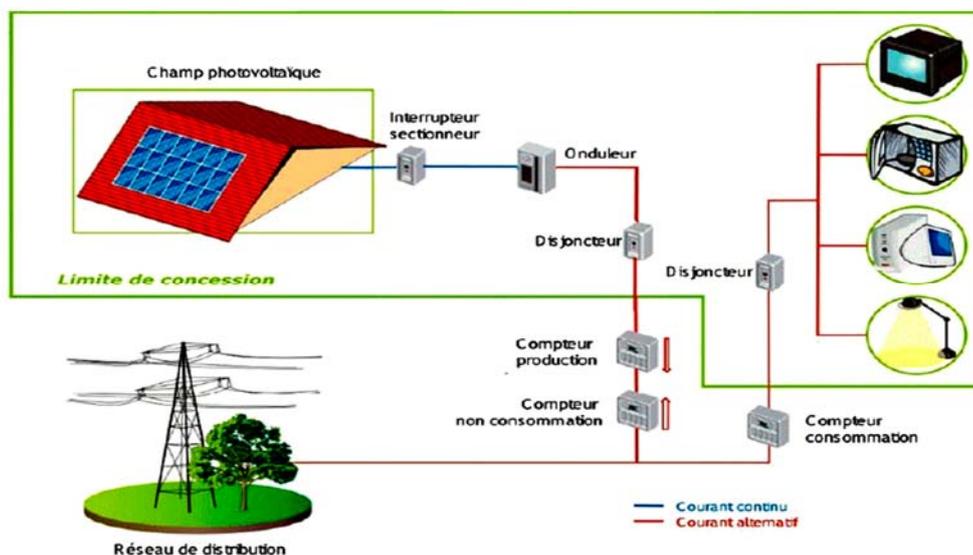


Figure I.2: Installation photovoltaïque raccordée au réseau.

3-1-3-Installations photovoltaïques hybride :

Il s'agit de systèmes qui regroupent des sources d'énergie de nature différentes telle une installation éolienne, un générateur diesel ou une centrale de cogénération en plus du générateur photovoltaïque.

Ce type d'installation est utilisé lorsque le générateur photovoltaïque seul ne couvre pas toute l'énergie requise.

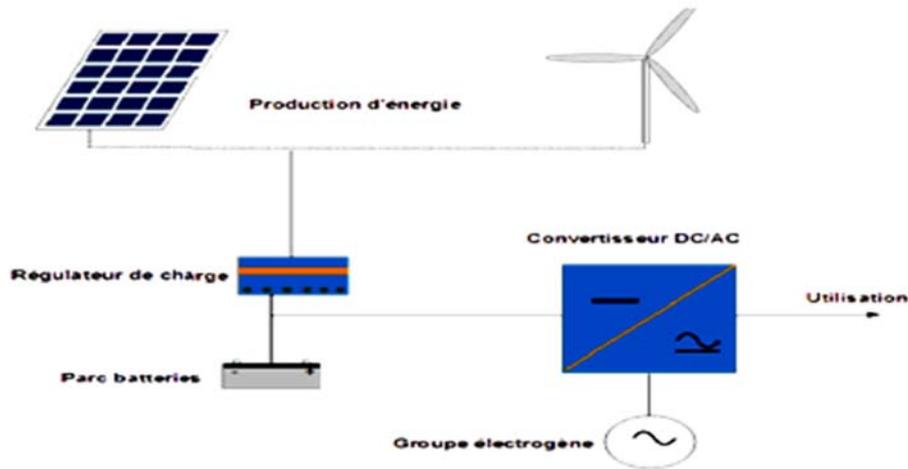


Figure I.3: Installations photovoltaïques hybride.

4-La cellule photovoltaïque :

Les éléments les plus importants d'un système photovoltaïque sont les cellules, éléments de base de l'unité qui collectent la lumière du soleil; les modules, qui rassemblent un grand nombre de cellules au sein d'une unité; et, dans certains cas, les onduleurs, qui transforment l'électricité générée en électricité utilisable au quotidien.

Les cellules photovoltaïques sont généralement réalisées à base de silicium cristallin, soit tranchées à partir de lingots, soit sous forme de rubans de silicium, soit en couches minces déposées sur un support à bas-coût. La performance d'une cellule solaire se mesure en termes de rendement de transformation de la lumière du soleil en électricité. Les cellules solaires les plus répandues dans le commerce ont un rendement de 15%-ce qui signifie qu'environ un sixième de la lumière du soleil frappant une cellule produit de l'électricité. Améliorer le rendement des cellules tout en poursuivant la réduction des coûts de production est un objectif important pour l'industrie photovoltaïque.[5]

4-1-Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

4-1-1-Jonction PN :

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.

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 via la connexion extérieure, donnant naissance à une différence de potentiel: le courant électrique circule.[6]

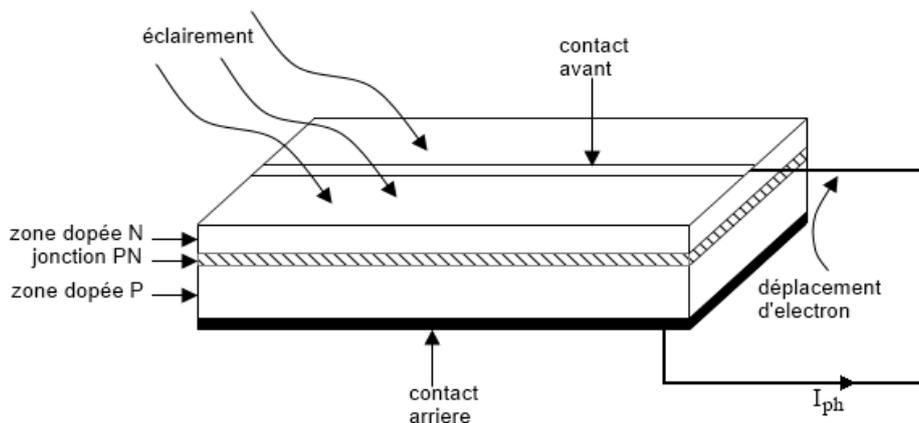


Figure I.4: Structure d'une cellule photovoltaïque.

4-1-2-Principe de la conversion photovoltaïque :

Le principe de la conversion photovoltaïque est résumé comme par:

- Absorption de la lumière et création de paire électron/trou;
- Séparation des paires électron/trous sous l'effet d'un champ induit;
- Transport de charge vers les électrodes;
- Collection des charges;

4.2--Type des cellules

4-2-1- Les cellules monocristallines :

Elles sont issues d'un seul bloc de silicium fondu, donc très "pures", mais aussi plus chères à la production, donc à la vente. Ces cellules sont en générale octogonales et d'une couleur uniforme foncée (bleu marine ou gris).

- C'est la première génération de photopiles;
- Un taux de rendement excellent (12-16%)(23% en Laboratoire);
- Une méthode de fabrication laborieuse et difficile, donc très chère;

Il faut une grande quantité d'énergie pour obtenir du cristal pur.

4-2-2-Les cellules poly-cristallines :

Elles sont élaborées à partir d'un bloc de silicium cristallisé en forme de cristaux multiples. Vues de près, on peut voir les orientations différentes des cristaux. Les cellules sont en générale de forme rectangulaire et sont bleu nuit avec des reflets.

- Coût de production moins élevé;
- Procédé nécessitant moins d'énergie;
- Rendement 11-13%(18%en Labo).

4-2-3-Les cellules amorphes :

Elles sont produites à partir d'un "gaz de silicium" qui est projeté sur du verre, du plastique souple ou du métal, par un procédé de vaporisation sous vide.

La cellule est gris très foncé. C'est la cellule des calculatrices et des montres dites «solaires», car ce type de cellule est bon marché et la technologie est utilisable sur de nombreux supports, notamment des supports souples.

- Coût de production bien plus bas;
- Rendement plus bas: 8-10%(13%en labo);
- Durée de vie plus faible.

C'est le silicium amorphe que l'on trouve le plus souvent dans les produits de consommation comme les calculatrices, les montres etc... Toutefois, ils réagissent mieux à des températures élevées ou à une lumière diffuse.

De plus ,les cellules mono et poly cristallines sont les types de cellules les plus répandues sur le marché du photovoltaïque(environ60%de la production).

4.2.4-Les cellules nanocristallines :

- Une des dernières générations de photopiles;

- Fonctionnent selon un principe qui différencie les fonctions d'absorption de la lumière et de séparation des charges électriques ;
- Rendement global de 10,4%, confirmé par des mesures au laboratoire; Procédé et coût de production encore plus bas.[7]

4-3-Modélisation d'une cellule PV :

La photopile présentée comporte en réalité une résistance série (R_s) et une résistance Shunt(R_{sh}). Ces résistances auront une certaine influence sur la caractéristique $I=f(V)$:

4-3-1-La résistance série :

Elle représente la résistance interne de la cellule, elle dépend principalement de la résistance du semi-conducteur utilisé, de la résistance de contact des grilles collectrices et de la résistivité de ces grilles.

4-3-2-La résistance shunt :

Elle est due à un courant de fuite au niveau de la jonction, elle dépend de la façon dont celle-ci a été réalisée.

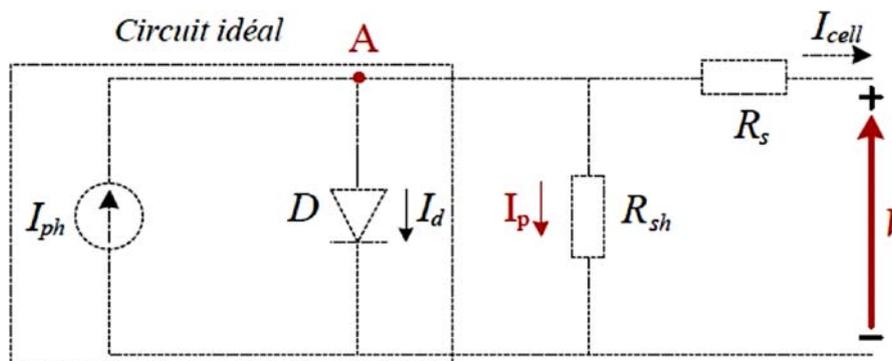


Figure I. 5: Schéma électrique d'une cellule PV.

Ce modèle fait intervenir un générateur de courant pour modéliser le flux lumineux incident, une diode pour les phénomènes de polarisation de la cellule et deux résistances (série et shunt) pour les pertes.

Ce modèle est dit cinq paramètres, ses paramètres sont:

Le photo-courant (I_{ph}), le courant de saturation (I_0), le facteur d'idéalité de la jonction (A), la résistance série (R_s) et la résistance shunt (R_{sh}).

Si on néglige l'effet de la résistance shunt R_{sh} , en le considérant infini, on retrouve le modèle à quatre paramètres qui est très utilisé. Et si en plus, on néglige la résistance série, on

retrouvera alors le modèle à 3 paramètres. Le choix du modèle se fait en fonction des besoins de l'étude. Le modèle à cinq paramètres offre un bon compromis entre simplicité et précision. Ces équations permettent de décrire la caractéristique I-V de la cellule et du module en donnant les expressions des différents courants.

L'étude physique d'une photopile nous permet d'obtenir l'équation de courant de la charge:

$$I_{cell} = I_{ph} - I_d - I_{Rsh} \quad (1.1)$$

Avec:

I_{cell} : Courant délivré par la photopile.

I_{ph} : Photo courant.

I_d : Courant de la diode.

I_{Rsh} : Courant shunt.

On a la résistance (R_{sh}) plus élevée donc on peut négliger le courant I_{Rsh} donc l'équation s'écrit:

$$I_{cell} = I_{ph} - I_d \quad (1.2)$$

a. Le photo-courant

C'est le courant généré par une cellule, il est proportionnel à l'irradiation solaire et il est légèrement influence par la température selon l'équation suivante:

Avec :

$$I_{cc} = [I_{cc} + K(T - T_{ref})] \frac{G}{G_{ref}} \quad (1.3)$$

l'équation suivante:

Avec:

I_{cc} [A] : courant de court-circuit du panneau (donné par le construction).

K [A/K] : Courant de court-circuit divisé par le coefficient de température du panneau.

T [K] : Température ambiante.

G [W/m²] : Irradiation sur la surface de la cellule.

T_{ref} [K] : Température de référence (298 K).

G_{ref} [W/m²] : Irradiation de référence (1000 K).

B. Le courant de saturation I_0 : Ce courant varie avec la température et il est donné par :

$$I_0 = I_c \cdot \left(\frac{T}{T_{ref}}\right)^3 \exp\left[\frac{a \cdot E_g}{AK} \left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T}\right)\right] \quad (1.4)$$

Avec :

E_g [eV]:Énergie de gap du semi-conducteur (eV pour le silicium poly cristallin à 25° C).

c. Le courant de saturation in verse de la diode (courant de fuite)

Son expression est donnée par l'équation:

$$I_c = \frac{I_{cc}}{\exp\left(\frac{qV_{co}}{KAT} - 1\right)} \quad (1.5)$$

Ou :

V_{co} [V] : la tension de circuit ouvert du module (donnée par constructeur).

g [C] : la charge absolue d'un électron en coulomb($1,60281 \times 10^{-19}$ C).

N_c : Nombre de cellules connectées en série.

A : la constante d'idéalité de la jonction ($1 < A < 2$).

K [J/K]:la constante de Boltzmann (1.38066×10^{-23} J/K = 8.61400×10^{-5} eV / K).

À partir des expressions décrites précédemment on peut déduire le courant délivré par une cellule:

$$I_{cell} = I_{ph} - I_0 \left[\exp\left(\frac{q(V_{cell} + R_s I_{cell})}{N_s A K T}\right) \right] - \frac{V_{cell} + R_s I_{cell}}{R_{sh}} \quad (1.6)$$

d. Le courant du panneau :

Les équations décrites précédemment ne peuvent représenter la caractéristique I-V d'un module PV puisqu'elles sont propres à une seule cellule PV qui représente l'élément de base du panneau, on introduit donc l'équation spécifique à un module:

$$I_p = N_p I_{ph} - N_p I_0 \left[\exp\left(\frac{q(V_{cell} + R_s I_{cell})}{N_s A K T}\right) \right] - N_p \frac{V_{cell} + R_s I_{cell}}{R_{sh}} \quad (1.7)$$

Ou :

N_s : Nombre de cellules connectées en série dans un module.

N_p : Nombre de cellules connectée en parallèle dans un module.[8]

4-4-Caractéristiques électriques d'une cellule photovoltaïque :

La figure (6) présente le schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque sous éclairement. Elles constituent d'un générateur de courant I_{ph} monté en parallèle avec une diode. Deux résistances parasites sont introduites dans ce modèle.

Ces résistances influencent sur la caractéristique $I=f(V)$ de la cellule:

La résistance série (R_s) est la résistance interne de la cellule; elle dépend principalement de la résistance du semi-conducteur utilisé, de la résistance de contact des grilles collectrices et de la résistivité de ces grilles;

La résistance shunt (R_{sh}) est due à un courant de fuite au niveau de la jonction; elle dépend de la façon dont celle-ci a été réalisée.[9]

En appliquant la loi des nœuds, on trouve:

$$I = I_{ph} - I_0 \left(\exp \left(\frac{e(V+IR_s)}{\alpha.K.T} \right) - 1 \right) - \frac{V+IR_s}{R_{sh}} \quad (1.8)$$

Où

α : Facteur d'idéalité de la diode et La valeur typique de α est 1.3.

T: est la température de la cellule en K,

e : est la charge de l'électron $e = 1.61010^{-19}C$

K: est la constante de Boltzmann $K = 1.385410^{-23}J.K^{-1}$.

La figure (7) montre la caractéristique courant tension d'une cellule PV à une température fixée et à une certaine ambiance irradiation G_a .

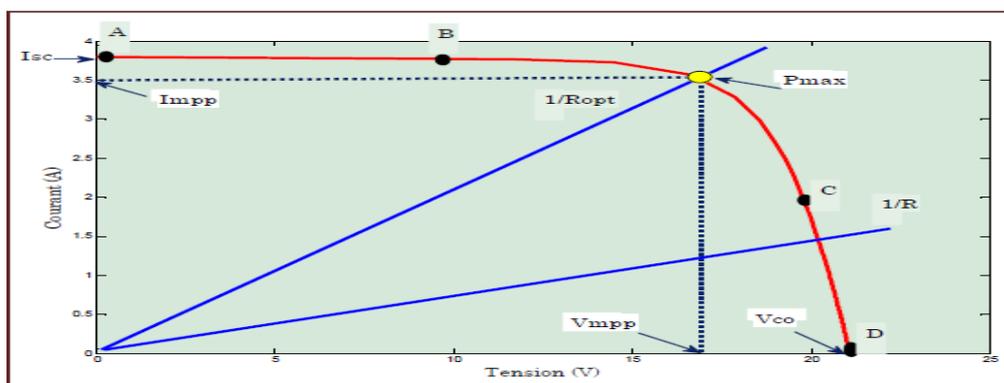


Figure I. 6:Caractéristiques courant-tension de la cellule photovoltaïque.

4-4-1-Courant de court-circuit (Isc) :

C'est le courant pour lequel la tension aux bornes de la cellule ou du générateur PV est nulle. Dans le cas idéal (R_s nulle et R_{sh} infinie), ce courant se confond avec le photo courant I_{ph} dans le cas contraire

Dans ce cas on peut écrire $I_{SC} \approx I_{ph}$ du fait que $R_s \ll R_{sh}$ [10]

4-4-2-Tension de circuit-ouvert(Vco) :

C'est la tension V_{co} pour la quelle le courant débité par la cellule est nul (la tension maximale d'une cellule).

$$V_{co} = V_t \times \ln \left(\frac{I_{ph}}{I_0} + 1 \right) \quad (1.9)$$

Avec: $V_t = \frac{\alpha \cdot k \cdot T}{e}$

Qui représente la tension thermique et I_0 le courant de saturation de la diode D.

4-4-3-Point du fonctionnement

La puissance maximale d'une cellule photovoltaïque éclairée est la grandeur essentielle pour évaluer sa performance.

Elle traduit sur la caractéristique **I-V** le point du fonctionnement $P_m = (V_m, I_m)$

Qui est situé au coude de la caractéristique **I-V** et dit point de puissance maximale où les valeurs de tension V_m et du courant I_m appelées tension et courant maximums respectivement.

4-4-4-Facteur De Forme

On appelle facteur de forme FF, dit aussi facteur de courbe ou facteur de remplissage (fill factor), c'est le rapport entre la puissance maximum fournie par la cellule $P_{max}(I_{opt}, V_{opt})$ et le produit du courant de court-circuit I_{sc} par la tension de circuit-ouvert V_{co} (c'est-à-dire la puissance maximale d'une cellule idéale). Le facteur de forme indique la qualité de la cellule ; plus il s'approche de l'unité plus la cellule est performante, Il est de l'ordre de 0.7 pour les cellules performantes ; il diminue avec la température. Il traduit l'influence des pertes par les deux résistances parasites R_s et R_{sh} [11]

Il exprime comme suite:

$$FF = \frac{P_{max}}{I_{SC} \times V_{CO}} \quad (1.10)$$

4-4-5-Rendement Energétique :

C'est le rapport entre la puissance électrique maximale fournie par la cellule P_{max} (I_{opt} , V_{opt}) et la puissance solaire incidente. Il est donné par :

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{inc}} \quad (1.11)$$

Avec: P_{inc} est égal au produit de l'éclairement et de la surface totale des photopiles. Ce paramètre reflète la qualité de conversion de l'énergie solaire en énergie électrique.

Les principales pertes sont dues à:

- ❖ Une absorption incomplète des photons,
- ❖ Les photons très énergétiques voient la part d'énergie supérieure perdue en chaleur,
- ❖ La collecte des paires d'électrons trous n'est pas optimum, certaines paires d'électrons trous se recombinent avant d'atteindre la jonction.
- ❖ La grille en face avant ne favorise pas la transmission optique maximale du rayonnement solaire. Sa forme géométrique est cependant très optimisée par les constructeurs. Chez certains la grille est faite par laser pour en diminuer la surface.
- ❖ Pertes dues à la résistance série (résistance de contact des deux grilles).

5-Panneaux PV :

Un panneau photovoltaïque est composé de cellules photovoltaïques, formées de couches de silicium. Ce matériau est essentiel pour assurer l'effet photovoltaïque, soit la conversion des rayons du soleil en courant électrique.[12]

6-À quoi correspond le rendement d'un panneau solaire?

Quand on accole les deux termes « panneau solaire » et « rendement », c'est dans l'optique d'évaluer la rentabilité d'une future installation.

Le rendement photovoltaïque vise à mesurer la part d'énergie lumineuse qu'un panneau est capable de convertir en énergie consommable. Soit à estimer la quantité d'électricité qui peut être produite par l'installation.

Cette électricité peut servir pour votre consommation personnelle et/ou être revendue à un

fournisseur d'énergie pour les installations connecté au réseau .Le rendement est exprimé en pourcentage.

Pour vous donner un exemple : s'il est de 10 %, cela signifie qu'un dixième de la lumière captée a été transformée en électricité consommable. Plus le pourcentage est élevé, plus le panneau solaire est dit à haut rendement.

Plusieurs facteurs influent sur le rendement photovoltaïque :

- Le type de matériau utilisé pour fabriquer les cellules photovoltaïques.
- La puissance des panneaux.
- La taille et le positionnement (orientation, inclinaison) des panneaux.
- La quantité d'ensoleillement, en fonction de la zone géographique et de la présence éventuelle d'obstacles créant des zones d'ombre.
- La température.
- La qualité des autres éléments de l'installation.[13]

7-Description du panneau photovoltaïqueBP3165 :

Le BP 3165 est un module de 72 cellules connecté en série, sa puissance maximale est de165W. Le BP3165 est recouvert de cellules semi-conductrices, conçues en silicium cristallin (cellules poly-cristalline), ce module sert pour les applications connectées aux réseaux.

7.1-Lescaractéristiquesélectriquesd'unpanneauphotovoltaïqueBP3165 :

Les caractéristiques électriques d'un panneau photovoltaïque BP3165 sont récapitulées dans le tableau suivant :

Tableau 01 : Caractéristiques électriques d'un panneau PV BP3165.

Puissance maximale(P_{mpp})	165W
Tension à puissance maximale	35.2V
Courant à puissance maximale	4.7A
Courant de court-circuit(I_{sc})	4.8A
Tension à circuit ouvert (V_{oc})	44.2V
Coefficient de température de Courant de	(0.065±0.015)%/°C

court-circuit	
Coefficient de température de Tension à Circuit ouvert	$-(160\pm 20) \text{ mV}/^\circ\text{C}$
Coefficient de température de la puissance	$-(0.5\pm 0.05)\%/^\circ\text{C}$
Nombre des cellules N_s	72
NOCT	$47\pm 2^\circ\text{C}$

7-2-Les caractéristiques I(V) et P(V) du panneau PV aux conditions standard STC :

Les résultats obtenus de la simulation (programmation en utilisant le logiciel MATLAB) d'une caractéristique courant-tension I(V) et puissance- tension P(V) de la cellule.

photovoltaïque dans les conditions standards ($T=25^\circ\text{C}$, $E=1000\text{W}/\text{m}^2$) sont représentés dans les figures suivante :

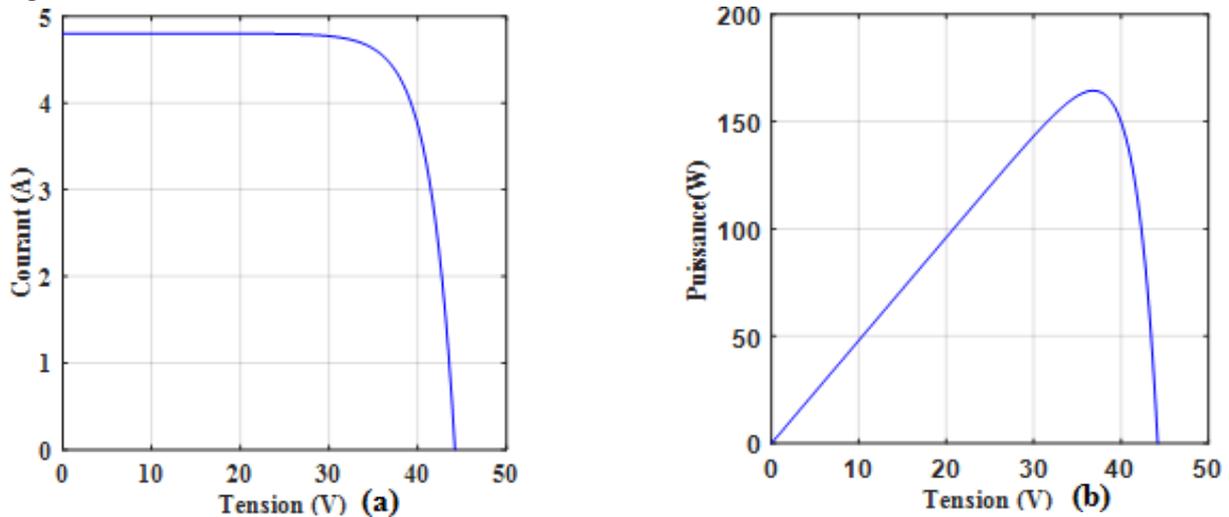


Figure I. 7:Caractéristique(a) : I(V) et (b) : P(V).

7-3-L'influence des variations climatiques sur le panneau PV :

a) Influence de la température :

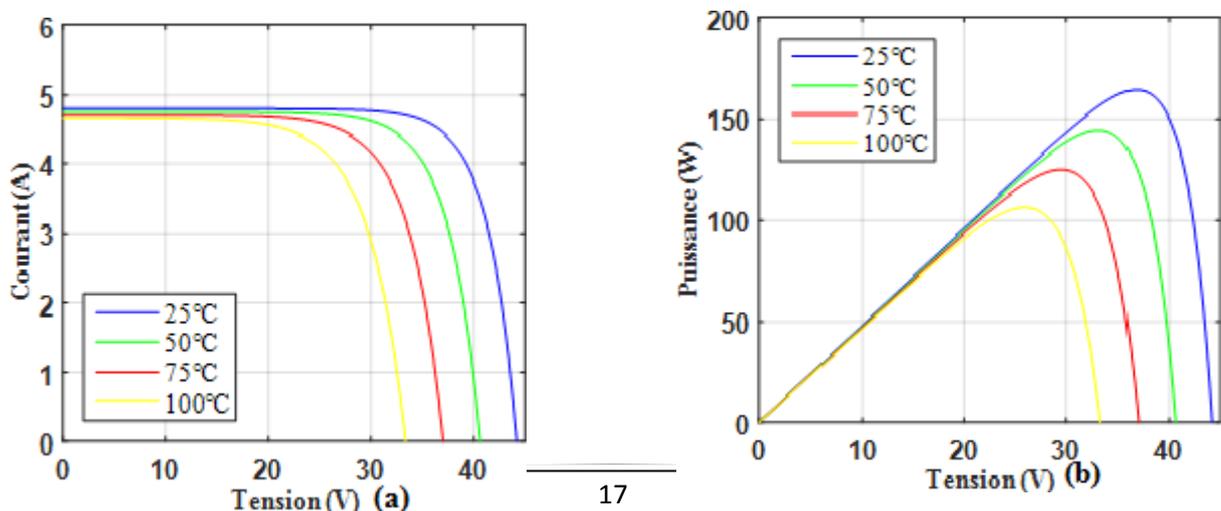


Figure I. 8: L'influence de la température sur la caractéristique (a) : $I(V)$ et (b) : $P(V)$.

La Figure 9 (a) montre l'influence de la température sur la caractéristique $I(V)$. Il est essentiel de comprendre l'effet de changement de la température d'une cellule solaire sur la caractéristique $I(V)$.

Le courant dépend de la température puisque le courant augmente légèrement à mesure que la température augmente, mais la température influe négativement sur la tension de circuit ouvert. Quand la température augmente la tension de circuit ouvert diminue. Par conséquent la puissance maximale du générateur subit une diminution.

La Figure 9 (b) illustre la variation de la puissance délivrée par le générateur en fonction de la tension pour différentes valeurs de la température, ce qui nous permet de déduire l'influence de la température sur la caractéristique $P(V)$. [14]

8- Généralités sur le générateur PV

Un générateur photovoltaïque est un système complet assurant la production et la gestion de l'électricité fournie par les capteurs photovoltaïques. L'énergie est stockée dans des accumulateurs et/ou transformée en courant alternatif suivant le type d'application. [15]

8-1-Constitution d'un générateur photovoltaïque(GPV) :

L'association de plusieurs cellules photovoltaïques en série/parallèle donne lieu à un générateur photovoltaïque. Si les cellules se connectent en série, les tensions de chaque cellule s'additionnent, augmentant la tension totale du générateur. D'une autre part, si les cellules se connectent en parallèle, c'est l'ampérage qui augmentera.

8.1.1-Association des Cellules Photovoltaïques en Parallèle

Les propriétés du groupement en parallèle des cellules sont duales de celles du groupement en série. Ainsi, dans un groupement des cellules connectées en parallèle, les cellules sont soumises à la même tension et la caractéristique résultante du groupement est obtenue par

addition des courants à tension donnée. Les figures suivantes montrent les caractéristiques résultantes (I_{PCC}, V_{PCO}) obtenues en associant en parallèle (indice p) N_p cellules identiques :

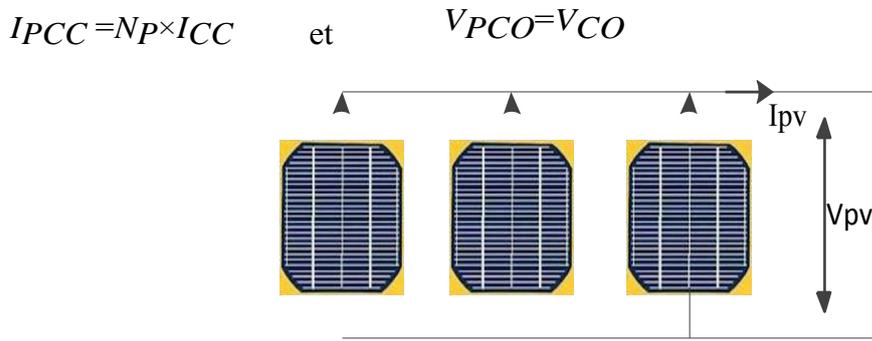


Figure.9 : Schéma de 3 cellules photovoltaïques associées en parallèle.

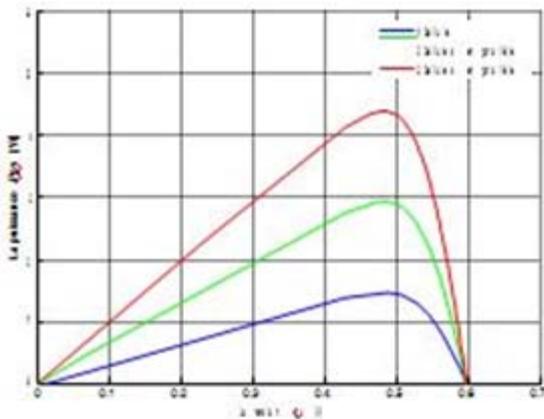


Figure.10 : Caractéristique P-V des cellules/
PV Raccordées en parallèle

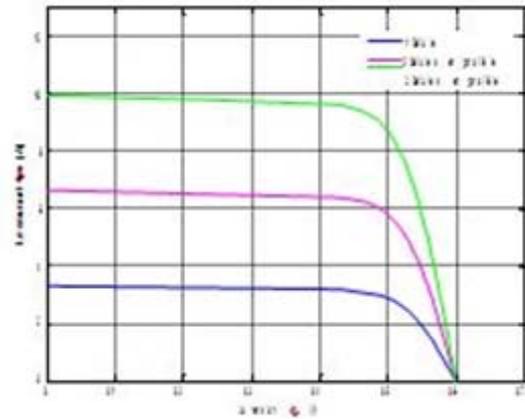


Figure I.11 : Caractéristique I-V des cellules
PV Raccordées en parallèle

8-1-2-Association des Cellules Photovoltaïques en Série :

Dans un groupement en série, les cellules sont traversées par le même courant et la caractéristique résultante du groupement en série est obtenue par addition des tensions à courant donné. Les figures (14) et (15) montrent la caractéristique résultante (I_{SCC}, V_{SCO}) obtenue en associant en série (indices) N_s cellules identiques (I_{CC}, V_{CO}) :

$I_{SCC} = I_{CC}$ et $V_{SCO} = N_s \times V_{CO}$

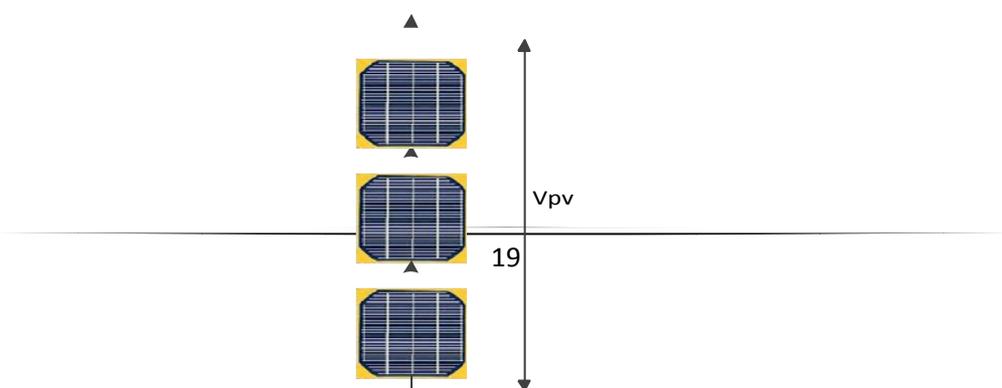


Figure. 12 : Schéma de 3cellules photovoltaïques associées en série.

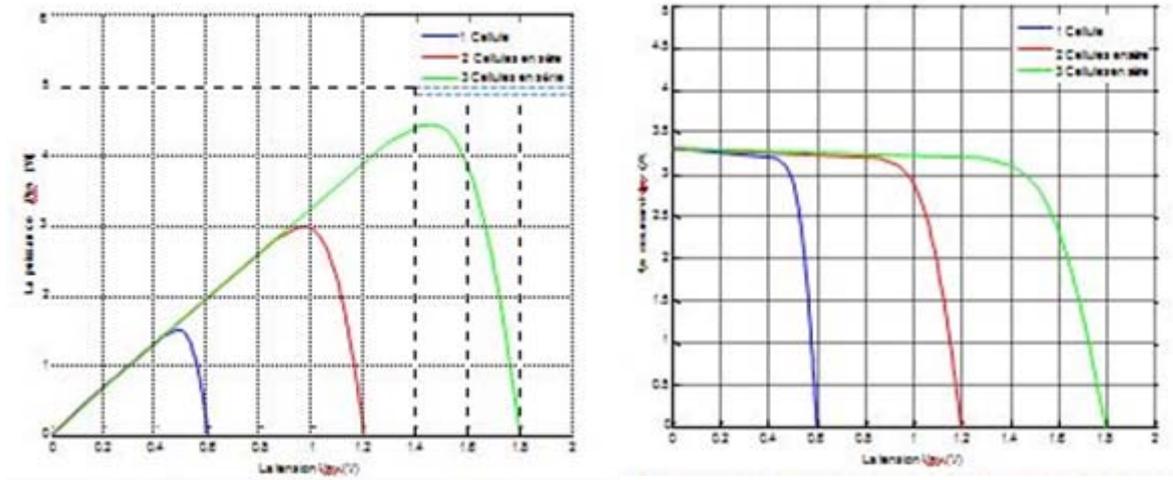


Figure. 13 : Caractéristique P-V des cellules photovoltaïque raccordées en série

Figure I.14: Caractéristique I-V des cellules photovoltaïque raccordées en série

La plupart des panneaux photovoltaïques commerciaux sont constitués par des sous- réseaux de cellules connectées en série. Chacun de ces sous-réseaux est lui-même constitué d'un groupe de cellules photovoltaïque connectés en série. Le nombre de cellules par sous-réseaux est le fruit d'un compromis économique entre protection et pertes d'une partie importante du générateur photovoltaïque en cas de défaut partiel.

Le site de démonstration, CDER, est actuellement doté de 3 panneaux, chacun d'eux est constitué de plusieurs modules connectés entre eux en série et en parallèle, référencés: ISOFOTON 106 W MONOCRISTALLIN, crêtes et structurés.

Chaque module est caractérisé par des paramètres illustrés dans le tableau (2)

Tableau 02 : Valeurs des paramètres de simulation.

Les parameters de module	La valeur de chaque paramètre
Le nombre de cellules en série N_s	36
Le nombre de cellules en parallèle N_p	2

La tension maximale $V_{r\grave{a}}$ PPM(V)	17.36
La tension en circuit ouvert V_{oc} (V)	21.54
Le courant maximal $I_{r\grave{a}}$ PPM(A)	6.08
Le courant de court-circuit I_{cc} (A)	6.65

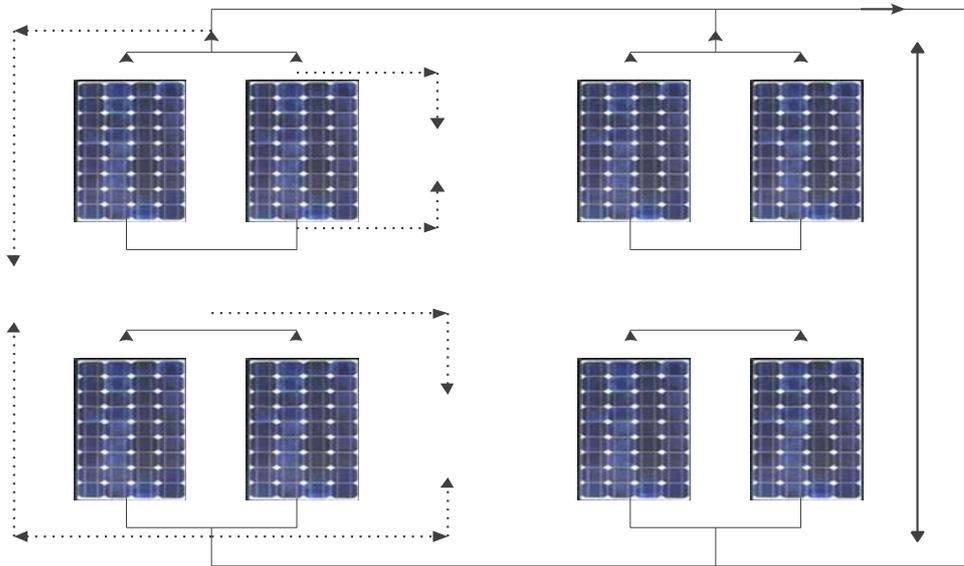


Figure. 15 : Schéma d'une partie de la centrale de production d'électricité d'un système photovoltaïque installé au CDER.

La puissance maximale débitée par le panneau photovoltaïque donnée par le produit entre la tension V_{op} et le courant I_{op} comme représente la formule suivante:

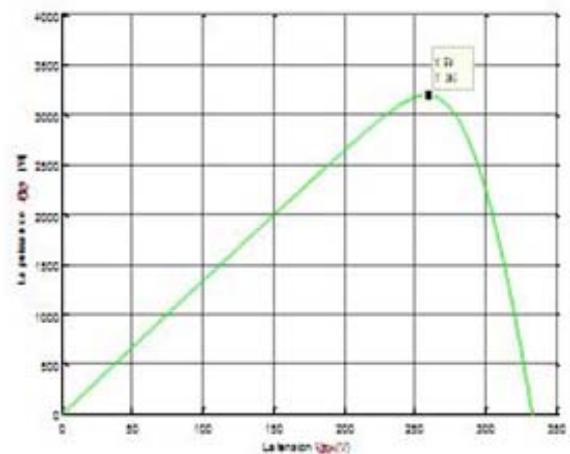
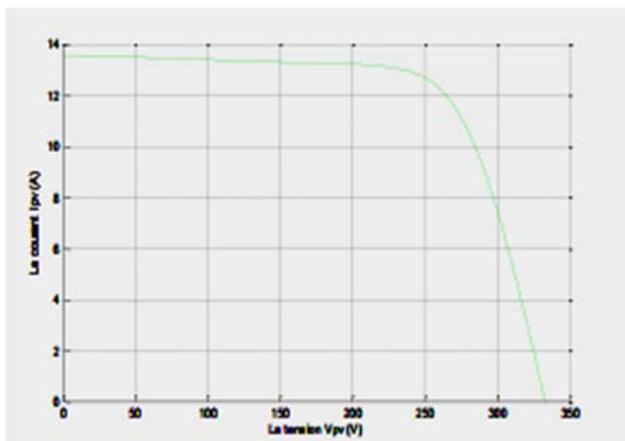


Figure I. 16 : Caractéristique P-V d'un générateur photovoltaïque

Figure I.17: Caractéristique I-V des générateur photovoltaïque.

8-2- Protections classiques d'un générateur photovoltaïque :

Lorsque nous concevons une installation photovoltaïque, nous devons assurer la protection électrique de cette installation afin d'augmenter sa durée de vie en évitant notamment des pannes des tractrices liées à l'association des cellules et de leur fonctionnement en cas d'ombrage.

Pour cela, deux types de protections sont classiquement utilisés dans les installations actuelles:

- La protection en cas de connexion en parallèle de modules PV pour éviter les courants négatifs dans les GPV (diode anti-retour).
- La protection lors de la mise en série de modules PV permettant de ne pas perdre la totalité de la chaîne (diode by-pass) et éviter les points chauds [17]

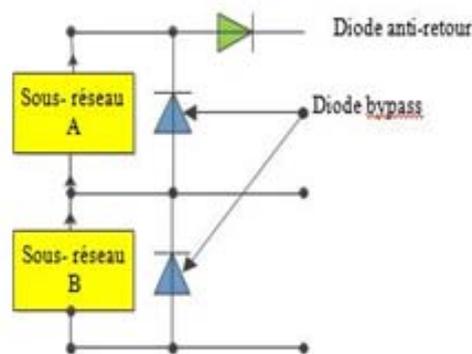


Figure I. 18 : Schéma d'un GPV élémentaire avec diode by-pass et diode anti-retour.

9- Les avantages et inconvénients :

9-1 Avantage :

Grâce à ses nombreux avantages environnementaux et économiques, ainsi qu'à sa fiabilité avérée, le photovoltaïque s'affirme comme une source majeure d'électricité.

Son carburant est gratuit.

L'énergie solaire photovoltaïque ne génère ni bruit, ni émissions nocives, ni gaz polluants.

Les systèmes photovoltaïques sont très sûrs et d'une grande fiabilité.

Les modules photovoltaïques sont recyclables et les matériaux utilisés pour leur production (silicium, verre, aluminium, etc.) peuvent être réutilisés. Le recyclage n'est pas seulement bénéfique pour l'environnement, il contribue également à réduire l'énergie nécessaire pour produire ces matériaux et ainsi à réduire leur coût de fabrication.

L'énergie solaire photovoltaïque exige peu de maintenance.

Les modules solaires ne nécessitent pratiquement aucune maintenance et sont faciles à installer.

L'énergie solaire photovoltaïque fournit de l'électricité aux zones rurales les plus isolées.

L'énergie solaire photovoltaïque peut être intégrée de manière esthétique dans les bâtiments.

Le temps de retour énergétique d'un module diminue constamment. Cela signifie que le temps mis par un module photovoltaïque pour générer autant d'énergie qu'il en faut pour le produire est très court ; il varie entre 1,5 et 3 ans. Sur sa durée de vie, un module produit donc entre 6 et 18 fois plus d'énergie qu'il n'en faut pour le fabriquer.[18]

9-2 Inconvénients :

Le système photovoltaïque présente toute fois des inconvénients:

La fabrication du module photovoltaïque relève de la haute technologie et requiert des investissements d'un coût élevé.

Les générateurs photovoltaïques ne sont compétitifs par rapport aux générateurs Diesel que pour des faibles demandes d'énergie en région isolée.

Enfin, lorsque le stockage de l'énergie électrique sous forme chimique (batterie) est nécessaire, le coût du générateur photovoltaïque est accru. La fiabilité et les performances du système restent cependant équivalentes pour autant que la batterie et les composants de régulations associés soient judicieusement choisis.[19]

10-Conclusion

Dans ce premier chapitre nous avons présenté des généralités sur l'énergie solaire et son utilisation comme source propre d'énergie. Nous avons parlé aussi des systèmes photovoltaïques et de ses types (autonome, hybride, connecté au réseau), de la cellule PV et

son principe de fonctionnement ainsi que ses caractéristiques (inorganiques, grätzel, organiques). Puis nous avons présenté la modélisation mathématique d'une cellule PV et ses caractéristiques. De plus, nous avons effectué un bref rappel sur le panneau PV, son rendement.

En montrant aussi l'influence des conditions standard météorologique (la température, l'éclairement). La constitution et la protection classique d'un générateur PV(GPV) ont été aussi abordées dans ce chapitre.

Chapitre II :

Présentation des systèmes
photovoltaïques connectés au réseau

1- Introduction

Au niveau mondial, le marché des systèmes photovoltaïques, connaît depuis maintenant plus de 10 ans, un taux de croissance très élevé, de l'ordre de 30 à 40 % par an.

Cette croissance exceptionnelle, due principalement aux systèmes photovoltaïques raccordés au réseau de distribution d'électricité, se traduit bien évidemment par des innovations technologiques et une baisse de coûts des modules photovoltaïques mais aussi à des efforts importants de recherche et de développement dans le domaine de l'électronique de puissance.

Ce chapitre s'intéresse à l'étude des systèmes photovoltaïques connectés au réseau. D'abord, le principe de fonctionnement de ces derniers et les systèmes PV pour habitat seront évoqués. Puis, les principaux composants d'un système PV connecté au réseau seront détaillés.

Ensuite, l'étude des principaux systèmes photovoltaïques connectés au réseau montrera la présence de deux classes de systèmes : les systèmes à connexion directe et les systèmes à bus continu intermédiaire. Ces systèmes fonctionnent avec un ou plusieurs convertisseurs de puissance.

Ces convertisseurs permettent la connexion au réseau et d'extraire le maximum de puissance des panneaux photovoltaïques grâce à l'algorithme MPPT (Maximum Power Point Tracking). Enfin, l'énergie photovoltaïque produite par le générateur PV sera injectée totalement ou seulement le surplus sur le réseau.

2- Principe du fonctionnement d'une installation solaire photovoltaïque

Une installation solaire photovoltaïque est composée de 4 grands éléments :

- Des modules photovoltaïques ou panneaux solaires qui sont les seuls composants présents dans toutes les installations,
- Des batteries si on veut pouvoir consommer de l'électricité la nuit ou pendant des périodes de faible ensoleillement,
- Un onduleur s'il faut convertir le courant continu produit par les modules photovoltaïques en courant alternatif, Un régulateur solaire pour améliorer la durée de vie et le rendement de l'installation. [21]

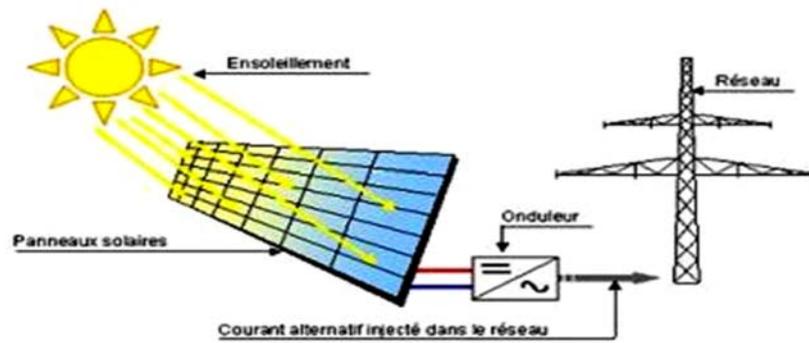


Figure II. 1 : Système PV raccordé au réseau.

3- Systèmes photovoltaïques pour l'habitat

Les systèmes PV sont classés en deux grandes catégories selon la manière dont l'énergie est utilisée.

3-1-Isolé :

Le rôle des systèmes autonomes est d'alimenter un ou plusieurs consommateurs situés dans une zone isolée du réseau électrique. Comme on le remarque sur la figure qui représente l'exemple d'un système PV autonome, un système de stockage est associé au générateur PV pour assurer l'alimentation à chaque instant et pendant plusieurs jours malgré l'intermittence de la production.

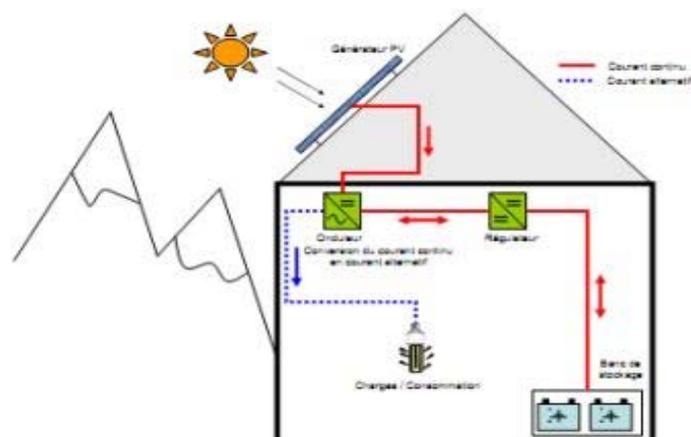


Figure II.2 : Structure d'un système PV autonome.

3-2-Connecté au réseau

Un tel système s'installe sur un site raccordé au réseau (Sonalgaz en Algérie). Généralement sur des habitations ou des entreprises qui souhaitent recourir à une forme d'énergie renouvelable et qui bénéficient d'un bon ensoleillement, voir figure 2-2 L'énorme avantage de cette solution est l'absence de batterie. On ne stocke plus l'énergie, on l'injecte directement dans le réseau local ou national. Et ceci sans limite quantitative, donc toute l'énergie est récupérée. Il ya un compteur qui tourne dans un sens pour la consommation, et un autre dans l'autre sens pour la production. Mais il faut tout de même convertir le courant continu des panneaux en alternatif au travers d'un onduleur et celui-ci doit être homologué par la compagnie d'électricité qui va recevoir ce courant. Car il doit respecter des normes sur sa qualité « sinusoïdale ». Ces systèmes ne sont pas des alimentations de secours en cas de coupure du réseau, car ils ne comportent aucune réserve d'énergie. Dans certains cas, on ajoute au système une batterie de secours pour les coupures de courte durée.[22]

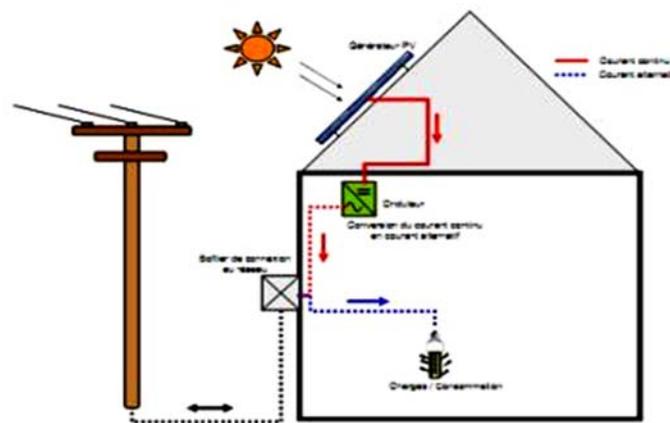


Figure II.3 : Structure d'un système PV connecté au réseau.

- Avantages

Par rapport à un système autonome, on gagne sur les points suivants :

- Economie de l'ordre de 40 % sur les investissements (les batteries en moins).
- Maintenance quasi inexistante (ce sont les batteries qui demandent le plus d'attention).
- Meilleure durée de vie du système.
- Cette solution est plus rentable que l'alimentation photovoltaïque purement indépendante.
- mais malheureusement encore très onéreuse en comparaison d'une alimentation électrique à 100% sur réseau. L'énergie produite par les modules est directement consommée sur place

par les charges. L'éventuel surplus de production par rapport à la consommation est injecté sur le réseau.

- Inconvénients :

Les installations photovoltaïques couplées au réseau ont cependant deux inconvénients majeurs :

- L'intermittence de la production d'énergie solaire ne permet pas le contrôle des périodes d'injections.
- Le déphasage entre la consommation et la production réduit la notion d'autonomie énergétique personnelle.[23]

4- Etude des composants d'un système photovoltaïque connecté au réseau

4.1- Le générateur photovoltaïque :

La cellule photovoltaïque élémentaire constitue un générateur de très faible puissance vis-à-vis des besoins de la plupart des applications domestiques ou industrielles. Une cellule élémentaire de quelques dizaines de centimètres carrés déli sous une tension inférieure au volt typiquement liée à une tension de jonction PN.

Pour produire d'avantage de puissance, plusieurs cellules doivent être assemblées afin de créer un module photovoltaïque complet (générateur d'énergie).



Figure II.4 : Générateur photovoltaïque

4-1-1-Regroupement des cellules

Dans les conditions d'ensoleillement standard (1000 W/m^2 ; 25°C ; AM 1,5), la puissance maximale délivrée par une cellule silicium de 150cm^2 est d'environ $2,3 \text{ W}_c$ sous une tension de $0,5 \text{ V}$. Une cellule photovoltaïque élémentaire constitue donc un générateur photovoltaïque

de faible puissance insuffisante en tant que telle pour la plus part des applications domestiques ou industrielles. Les générateurs photovoltaïques sont, de ce fait réalisés par association, en série et /ou en parallèle, d'un grand nombre de cellules élémentaires.[12]

4-1-1--Regroupement en série

Une association de (N_s) cellule en série (figure 5) permet d'augmenter la tension du générateur photovoltaïque. Les cellules sont alors traversées par le même courant et la caractéristique résultant du groupement série est obtenues par addition des tensions élémentaires de chaque cellule. L'équation résume les caractéristique électrique d'une association série de (N_s) cellules.[24]

$$V_{co}N_s = N_s * V_{co} \quad (2.1)$$

$$V_{co}N_s = N_s \times V_{co} \quad (2.2)$$

$$I_{cc}N_s = I_{cc} \quad (2.3)$$

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

$I_{cc}N_s$: courant de court-circuit de N_s cellules en série.

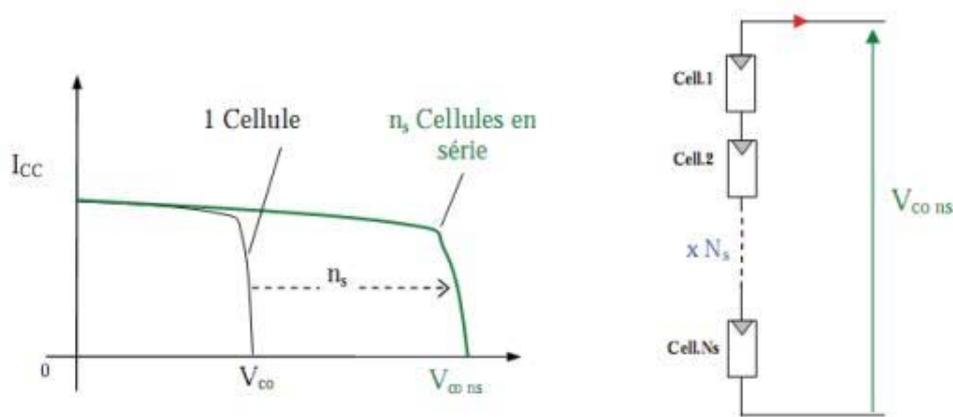


Figure II.5 : Caractéristique d'un groupement de n cellules identiques en série.

4-1-1-2-Regroupement en parallèle

Une association parallèle de (N_p) cellule voir figure (6) est possible et permet d'accroître le courant de sortie du générateur ainsi créé. Dans un groupement de cellules identiques connectées en parallèle, les cellules sont soumises à la même tension et la caractéristique résultante du groupement est obtenue par addition des courants.[19]

Avec :

$$I_{ccN_p} = I_{cc} \times N_p \quad (2.4)$$

$$V_{co} = V_{co} N_p \quad (2.5)$$

I_{ccN_p} : la somme des courants de court circuit de (N_p) cellule en parallèle.

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

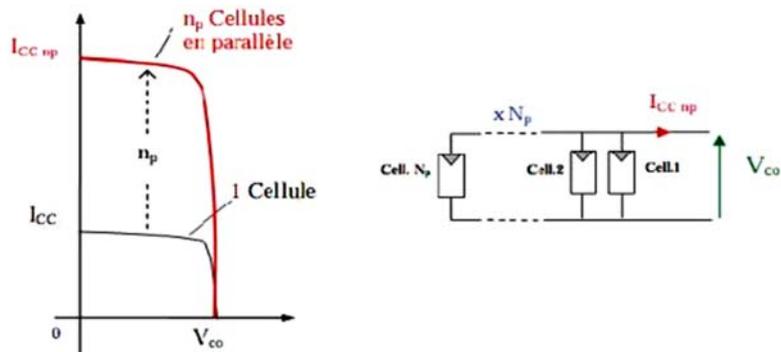


Figure II.6 : Caractéristique d'un regroupement de n cellules identiques en parallèle.

4-1-1-3-Regroupement (série et parallèle)

On utilise généralement ce type d'association pour en tirer une tension importante puisque l'association en série des photopiles délivre une tension égale à la somme des tensions individuelles et un courant égal à celui d'une seule cellule. La caractéristique d'un regroupement de deux modules solaires est représentée ci-dessous, ce qui peut être généralisé sur une gamme de N_s modules solaires en série. Ce genre de groupement augmente le courant.

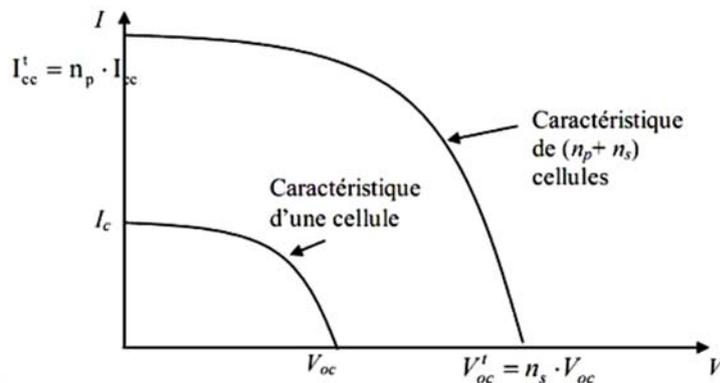


Figure II.7:Caractéristique résultante d'un groupement et bride de cellules identiques.

Afin d'obtenir des puissances de quelques kW, sous une tension convenable, il est nécessaire d'associer les modules en panneaux et de monter les panneaux en rangées de panneaux série et parallèle pour former ce que l'on appelle un générateur photovoltaïque.[08]

4-1-2-Protection d'un générateur photovoltaïque

Pour garantir la durée de vie d'une installation photovoltaïque destinée à produire de l'énergie électrique sur des années, des protections électriques doivent être ajoutées aux modules PV afin d'éviter des pannes destructrices liées à l'association de cellules en série et de panneaux en parallèle. Pour cela, deux types de protections classiques sont utilisés dans les installations actuelles la diode anti-retour empêchant un courant négatif dans les GPV. Ce phénomène peut apparaître lorsque plusieurs modules sont connectés en parallèle, ou bien quand une charge en connexion directe peut basculer du mode récepteur au mode générateur, par exemple une batterie durant la nuit. 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 mise en conduction de ces diodes affecte la caractéristique de sortie du générateur, par la perte d'une partie de la production d'énergie et par la présence de deux maximums de puissance.

4-1-2-1-Protection lors de la connexion en parallèle de plusieurs GPV

Dans le cas de plusieurs chaînes de cellules mises en parallèle sur une charge de type batterie par exemple, le risque est que les chaînes de cellule éclairées débitent dans des chaînes ombrées ou que la batterie se décharge à travers le générateur. On dispose pour cela de diodes anti-retour mises en série avec le GPV (de blocage) le diode est indispensable quand la charge du module PV est une batterie. En fait, cette diode évite que la batterie ne débite sur le module PV pendant la nuit. Quand la cellule est non éclairée, une batterie pourrait se décharger à travers la cellule si nous ne disposons pas d'une diode de blocage.

4-1-2-2-Protection lors de la connexion en série de plusieurs GPV

Sous l'effet d'un ombrage ou de la chaleur, toutes les cellules placées en série n'ont pas les mêmes caractéristiques, créant ainsi des déséquilibres. Lors d'un assemblage de cellules PV en série, il est nécessaire de mettre une diode by-pass pour empêcher le fonctionnement (en inverse) d'une cellule ombrée et ainsi empêcher la destruction de celle-ci.[06]

5- Définition Convertisseur

Les convertisseurs sont des appareils servant à transformer la tension continue fournie par les panneaux ou les batteries pour l'adapter à des récepteurs fonctionnant soit à une tension continue différente, à une tension alternative.

5-1- Définition Convertisseurs DC/DC

Les convertisseurs DC/DC assurent une tension continue régulée. L'utilisation de convertisseurs permet d'éviter les perturbations de votre application. Vous réactivez les tensions, de sorte que la charge est toujours alimentée en tension continue régulée, même avec des câbles très longs. Les convertisseurs DC/DC adaptent le niveau de tension et assurent la mise en place de systèmes d'alimentation indépendants, grâce à l'isolation galvanique.

Convertisseurs vers le haut (élevateur de tension)

Les composants typiques d'un convertisseur vers le haut .Lorsque l'interrupteur est fermé, l'inductance stocke le courant provenant de la batterie; lorsque l'interrupteur s'ouvre, l'interruption du courant dans l'inductance provoque une surtension qui est dérivée dans le condensateur et le récepteur ; la diode empêche tout retour de courant. Le condensateur sert à lisser la tension de sortie et l'interrupteur est commandé par une électronique de contrôle qui mesure en permanence la tension et le courant de sortie pour ajuster la fréquence et la largeur de commande de l'interrupteur et limite le courant à une valeur sûre pour les composants. Le rendement typique dépasse en général 70% et peut atteindre 85 à 90% pour les meilleurs convertisseurs.[14]

5-2-Onduleur DC/AC

5.-2-1-Principe de fonctionnement :

Un onduleur est un convertisseur de tension continue /alternative. Il est utilisé pour convertir l'énergie électrique photovoltaïque en énergie électrique alternative soit pour faire fonctionner des charges, soit pour débiter de l'énergie au réseau. Généralement à base de thyristors, selon l'exploitation de cet onduleur peut être monophasé ou triphasé.

Par exemple de circuit simple composé d'un pont de transistors commandé par PWM ; l'onduleur (monophasé ou triphasé) de tension impose à sa sortie un système de tension sous forme de créneaux modulés en largeur d'impulsion (MLI, ou PWM en anglais). Le signal alternatif obtenu est ensuite filtré par l'inductance L_d située avant le transformateur afin

d'obtenir un signal alternatif sinusoïdal à la fréquence du réseau. Ce dernier signal est ensuite ajusté à la tension du réseau par un transformateur 50Hz qui apporte en même temps une isolation galvanique au montage.

- Critères de choix des onduleurs :

Historiquement, les onduleurs peuvent être classés en générateurs produisant soit une onde sinusoïdale, soit une onde carrée ou encore une onde dite pseudo- sinusoïdale. Le choix de l'onduleur va dépendre des appareils qu'il devra faire fonctionner, ce choix s'appuyant sur des critères valables pour n'importe quelle onde.[02]

- Précision de la tension de sortie :

Ce chiffre est donné en pourcentage par rapport à 230 VAC. Utile dans certaines utilisations si l'on alimente des appareils électroniques délicats. L'onduleur doit être stable quelle que soit sa charge et quelle que soit sa tension d'entrée.

- Résistance aux surcharges et au courant réactif

Pour arriver à démarrer certaines charges, l'onduleur doit produire souvent plusieurs fois sa puissance maximale pendant un temps assez bref.[05]

- Distorsion harmonique

Dans certaines utilisations sensibles, la présence d'harmoniques est une gêne audible (hi-fi) ou elle perturbe le fonctionnement de la charge (moteurs). Les onduleurs non sinusoïdaux perturbent non seulement l'environnement électromagnétique mais les harmoniques sont également une perte d'énergie dans le cas de l'alimentation de moteurs par exemple. [08]

- Rendement

C'est sans conteste le critère de choix principal. On désire perdre le moins d'énergie possible entre les batteries et la charge en 230 VAC. On s'intéresse à la courbe de rendement en fonction de la charge d l'onduleur ; les appareils modernes performants atteignent un rendement supérieur à 90 % dès que la charge est de 5 à 10% de leur puissance nominale.[01]

- Onduleurs pour couplage au réseau :

Les onduleurs couplés au réseau utilisent deux techniques de génération du signal alternatif :

- Soit la sinusoïde est produite par l'onduleur qui utilise le passage par zéro du réseau pour se synchroniser.

- Soit le réseau est utilisé comme source du signal et de synchronisation.

Certains onduleurs utilisent un transformateur pour isoler les panneaux solaires du réseau.

D'autres, possède un système de test en continu du courant délivré par les panneaux.

En cas de fuite, l'onduleur s'arrête pour éviter tout court-circuit entre les panneaux et le réseau.

Chaque onduleur utilise pour son fonctionnement interne, une certaine quantité d'énergie fournie, soit par les panneaux photovoltaïques, soit par le réseau ce qui contribue à influencer les pertes de rendement annuelles.

Pour la sécurité du système, les compagnies d'électricité exigent en général une surveillance de la tension et de la fréquence produites et une coupure très rapide en cas d'absence de réseau.

La limitation de puissance à 3,5 kW par phase implique une limitation du courant produit.[09]

- **Onduleur central :**

Un onduleur central, ou « onduleur string », est un boîtier unique qui fonctionne pour tous les panneaux solaires. Tous les modules de vos panneaux sont reliés à l'onduleur : ils ne sont pas indépendants les uns des autres.[20]

• **Onduleur chaîne :**

Branché sur chaque chaîne de panneaux solaires en série, c'est une sorte d'onduleur « module » plus puissant. Il permet d'économiser sur le câblage et les protections DC (Direct courant). Son concept est proche de l'onduleur « module » avec l'avantage de travailler à plus grande puissance et tension, pour un meilleur rendement.

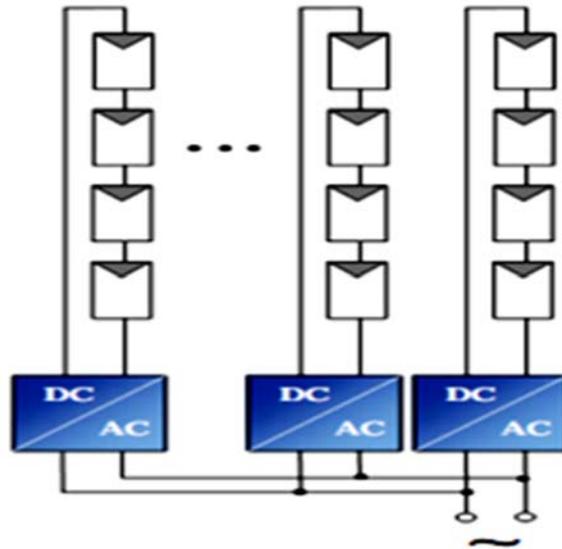


Figure II.8: Typologie des systèmes onduleur chaîne.

- **Onduleur module** : ce sont les modèles les plus petits (100-200 W). Ils se fixent derrière le panneau solaire qui produit alors directement du 230 VAC. Ses avantages sont un câblage réduit uniquement en alternatif, une liaison simplifiée au bâtiment et une moins grande sensibilité aux ombrages.

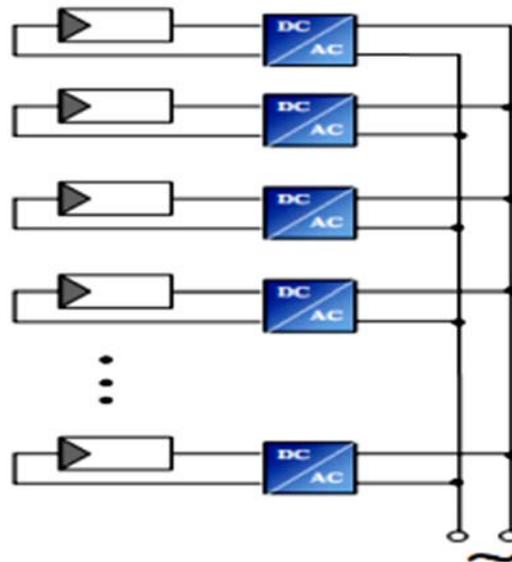


Figure II.9: Typologie des systèmes onduleur module AC.

6- Structure générale d'un système photovoltaïque connecté au réseau :

Il existe deux types de structures de système photovoltaïque :

6-1. 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.

6-2-Systèmes à bus continu intermédiaire :

Le générateur photovoltaïque est connecté par l'intermédiaire d'un convertisseur continu-continu. Un onduleur délivre une tension modulée, celle-ci est filtrée pour réduire le taux d'harmonique, on obtient alors en sortie de ce dispositif une tension pouvant être injectée dans le réseau.

Pour la conversion de puissance, 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. Les MOSFETS (transistors à effet de champ d'oxyde de métal) sont habituellement utilisés à la puissance relativement basse (quelques kW) et les IGBTs (transistors bipolaires à gâchette isolée) à des puissances plus élevées. Les thyristors ont été généralement utilisés et acceptés dans les plus hauts niveaux de puissance.[12]

7- Option de raccordement

7-1 Injection du surplus de la production :

Lorsque la production est supérieure à la propre consommation de l'abonné, l'électricité produite est injectée sur le réseau basse tension du distributeur. L'installation électrique est équipée de deux compteurs : l'un mesure l'énergie soutirée au réseau quand la consommation est supérieure la production, l'autre mesure l'énergie injectée dans le réseau.

L'installation électrique possède un seul point de livraison.

7-2-Injection de la totalité de la production :

Lorsque la totalité de la production est envoyée vers le réseau de distribution publique, le générateur de production possède son propre point de livraison.

Cette séparation entre le point de livraison "soutirage" et le point de livraison "injection", implique de séparer les deux parties de l'installation.

L'utilisation de la source d'injection comme source de remplacement pour l'ensemble de l'installation reste possible sous réserve des dispositions appropriées pour le couplage (NF C 15-100 Partie 5-55, guides UTE C 15-400 et UTE C 15-712).

La liaison au réseau basse tension de distribution publique reste commune aux deux points de livraison.[28]

Conclusion :

Ce chapitre a mis en évidence les principales composantes d'un générateur photovoltaïque couplé au réseau à prendre en compte pour son étude et sa modélisation. L'étude bibliographique de ces générateurs a permis de les classer en deux catégories : les structures à connexion directe et les structures à bus continu intermédiaire.

Le chapitre trois fait l'objet de la modélisation des différentes compositions du système PV connecté au réseau électrique.

Chapitre III

Modélisation d'un système
photovoltaïque connecté au réseau
électrique

1- Introduction :

Pour obtenir la conversion alternative-continu on utilise deux blocs de conversion :

Le premier bloc est Un montage redresseur qui permet d'obtenir une tension continue (de valeur moyenne non nulle) à partir d'une tension alternative sinusoïdale (de valeur moyenne nulle). On distingue le redressement non commandé, utilisant uniquement des diodes et délivrant une tension de valeur moyenne non réglable et le redressement commandé, utilisant des thyristors permettant d'obtenir une tension de valeur moyenne réglable.

Le deuxième bloc est un hacheur qui permet de construire une source de tension variable à partir d'une source de tension fixe, Pour alimenter une charge généralement un moteur à courant continu sous tension sensiblement continue et réglable.

Dans ce chapitre on consacre l'étude du convertisseur DC/DC type BUCK, et avec le convertisseur AC/DC on utilise un redresseur non commandé.

2- Convertisseurs DC/DC :

Les hacheurs sont des convertisseurs de type continu-continu permettant de contrôler la puissance électrique dans des circuits fonctionnant en courant continu avec une très grande souplesse et un rendement élevé.

Le hacheur se compose de condensateurs, d'inductance et de commutateurs. Dans le cas idéal, tous ces dispositifs ne consomment aucune puissance active, c'est la raison pour laquelle qu'on a de bons rendements pour les hacheurs.[21]

2-1-1- Composition du convertisseur

a)Le transistor MOSFET :

Le MOSFET de faible puissance (Métal Oxyde Semi-Conducator Field Effet Transistor). La figure (3.1.a) donne la représentation symbolique usuelle. La connexion partant de la borne reliée au substrat (Buck) B se termine par une flèche indiquant le sens passant des deux jonctions substrat - source et substrat - drain.

D'ordinaire le substrat et la source sont reliés. La figure (3.1.b) indique les notations utilisées.

Dans un semi-conducteur dopé de type P on a diffusé deux zones de type N sur les quelles sont soudés les deux contacts de source S et de drain D. Une couche d'oxyde recouvre la zone P située entre la source et le drain; sur cette couche est soudé le contact de grille (gate) G. C'est la succession Métal-Oxyde-Semi-conducators qui donne le préfixe MOS utilisé pour caractériser ce type de transistor. [04]

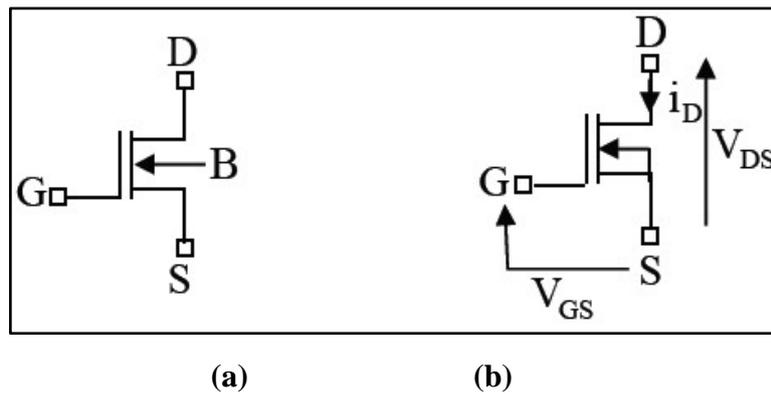


Figure III.1 : Représentation symbolique et notation pour le MOSFET à canal N.

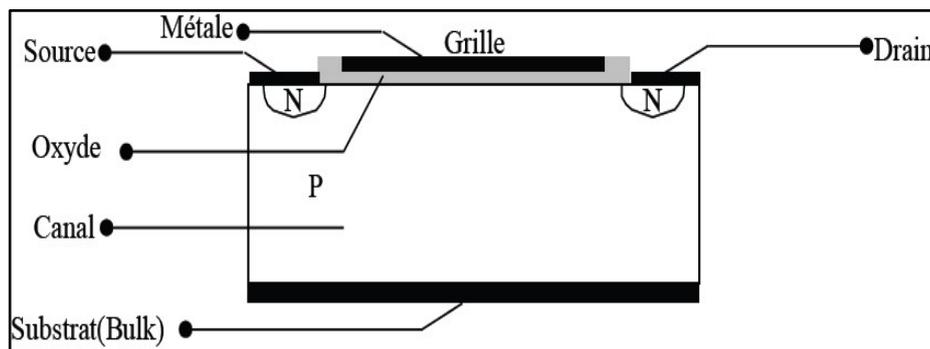


Figure III.2 : Structure d'une cellule de MOSFET de faible puissance.

L'utilisation du transistor MOSFET offre plusieurs avantages :

- Le bruit intrinsèque est toujours très faible.
- Ce type de transistor est simple à fabriquer et par la suite peu onéreux.
- La densité d'intégration autorisée par ce type de composant est très importante : on dépasse aujourd'hui le nombre de 10^7 transistors sur une seule puce.

b) Le condensateur

Les condensateurs que nous rencontrons dans les alimentations à découpage remplissent deux rôles distincts : ils servent d'énergie lors des variations de commande ou de charge, et ils servent également de condensateur de découpage ou filtrage vis-à-vis du fonctionnement en haute fréquence de l'alimentation. Ce sont les condensateurs chimique dits à faible résistance série qui présentent des valeurs de capacité importantes, tout en présentant une excellente tenue en fréquence. Le condensateur se caractérise par des grandeurs physiques qui définissent ses domaines d'application. La capacité d'un condensateur est égale au rapport de la charge électrique Q emmagasinée à la tension V appliquée entre ses armatures.

Dans le cas simplifié d'un condensateur dont la surface S des armatures en regard est Plane, l'expression de la capacité est :

$$C = \epsilon r \epsilon_0 \frac{S}{e} \quad (3.1)$$

Avec :

ϵ_0 : Permittivité du vide.

ϵ_r : Permittivité relative (2 à 20000) du diélectrique.

e : Épaisseur du diélectrique [18].

c) L'inductance

Le rôle d'une inductance est de stocker une énergie électrique sous forme magnétique, puis de la restituer. On peut naturellement réaliser des bobinages à air.

Mais, l'utilisation de circuits magnétiques tels que présentés après permet :

1. de diminuer l'encombrement, avec la même valeur de l'inductance.
2. de confiner le flux magnétique dans un espace restreint et ainsi de limiter les rayonnements parasites.

Les inductances sont utilisées essentiellement dans des applications de filtrage, de conversion d'énergie (alimentations à découpage...), et d'interrupteurs magnétique (inductances saturables). Le schéma électrique équivalent d'une inductance simple L est le suivant :

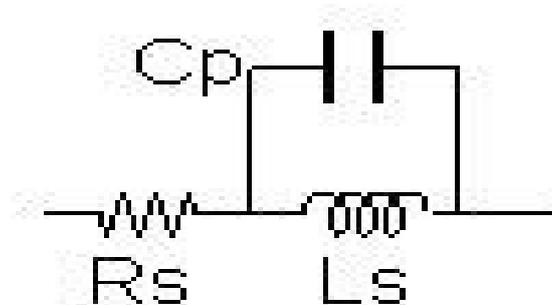


Figure III.3 : inductance simple L .

Où R_s représente la résistance série du fil bobiné et C_p les capacités parasites inter spires.

La valeur de l'inductance est obtenue par :

$$L = \mu_0 \mu_e \frac{S_e}{l_e} N^2 \quad (3.2)$$

avec : $\mu_0 = 4.\pi.10^{-7}$ (SI)

μ_e : perméabilité relative (y compris entre fer éventuel)

S_e : Section effective magnétique du noyau (section moyenne)

l_e : Longueur magnétique effective (longueur moyenne du circuit magnétique) N : nombre de spires [18].

d) La diode Schottky

La diode Schottky présente deux avantages par rapport aux diodes classiques :

- Caractéristique électrique : tension de blocage de 600 V .
- Tension de seuil plus faible ($V_s = 0,3V$).
- Les diodes Schottky ont des temps de recouvrement inverse très courts (t_r de 0,15 à 0.35 μ s)
- Applications de la diode Schottky :

Les diodes Schottky sont utilisées en basse tension dans les circuits nécessitant une grande vitesse de commutation, par exemple dans les montages hacheurs à haute fréquence que l'on rencontre dans les alimentations à découpage.

2-2- Hacheur survolteur (Boost)

Un convertisseur Boost (ou Step-Up en anglais), ou hacheur parallèle, est une alimentation à découpage qui convertit une tension continue en une autre tension continue de plus forte valeur .On utilise un convertisseur Boost lorsqu'on désire augmenter la tension disponible d'une source continue [17]. son schéma de principe de base est celui de la figure (3.4).

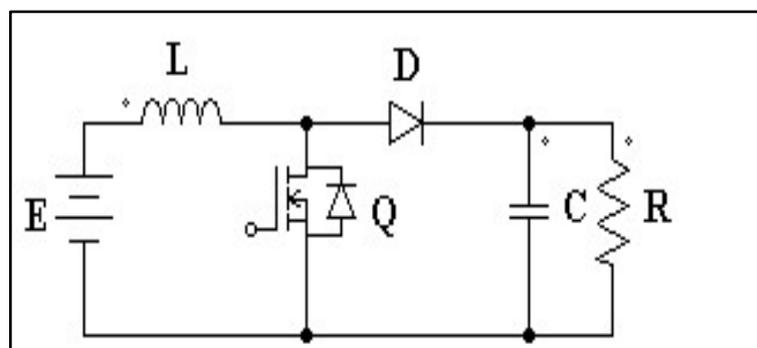
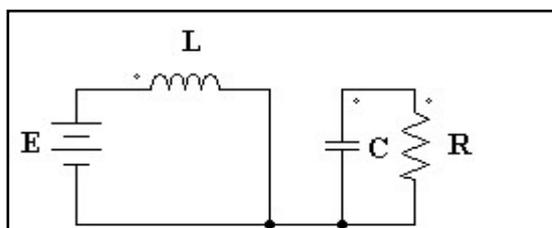
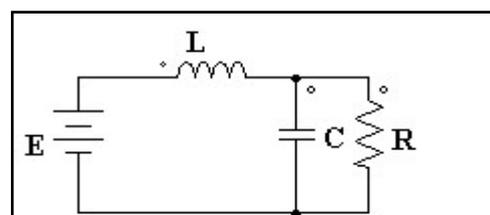


Figure III.4 : Convertisseur survolteur réel.



(a) Interrupteur position $u=1$



(b) Interrupteur position $u=0$

Figure III.5 : Circuits des topologies du convertisseur survolteur.

a) Si on considère que l'interrupteur est fermé ($u=1$) et en appliquant les lois de Kirchhoff au circuit on obtient les équations suivantes :

$$L \frac{di}{dt} = E \quad (3.3)$$

$$C \frac{dv}{dt} - \frac{v}{R} \quad (3.4)$$

b) Lorsque l'interrupteur est ouvert ($u=0$) on obtient la dynamique suivante :

$$L \frac{di}{dt} = E - V \quad (3.5)$$

$$C \frac{dv}{dt} = i - \frac{v}{R} \quad (3.6)$$

En comparant les deux situations on peut obtenir un seul modèle unifié qui est :

$$L \frac{di}{dt} = E - (1 - u)v \quad (3.7)$$

$$C \frac{dv}{dt} = (1 - u)i - \frac{v}{R} \quad (3.8)$$

En utilisant la normalisation :

$$x1 = \frac{i}{E} \sqrt{\frac{L}{C}}; x2 = \frac{v}{E}; \tau = \frac{t}{\sqrt{LC}} \quad ; \quad Q = R \sqrt{\frac{C}{L}} \quad (3.9)$$

On obtient alors le modèle moyen normalisé suivant :

$$\frac{dx1}{d\tau} = 1 - (1 - uav)x2 \quad (3.10)$$

$$\frac{dx2}{d\tau} = (1 - uav) - \frac{x2}{Q} \quad (3.11)$$

3-Recherche du point de puissance maximale (MPPT)

3-1-Principe

Pour que le système photovoltaïque fonctionne à des points de puissance maximums de leurs caractéristiques, il existe des lois de commande spécifiques qui répondent à ce besoin.

Cette commande est nommée dans la littérature « Recherche du Point de Puissance Maximum » ou « Maximum Power Point Tracking » en Anglais (MPPT). Le principe de ces commandes est de chercher le point de puissance maximale (PPM) en gardant une bonne adaptation entre le générateur et sa charge pour assurer le transfert de la puissance maximale.

La figure représente une chaîne de conversion photovoltaïque élémentaire associée à une commande MPPT. La commande MPPT est associée à un convertisseur statique permettant

de faire une adaptation entre le GPV et la charge de telle sorte que la puissance générée correspond à sa valeur maximale et qu'elle soit transférée directement à la charge. [10]

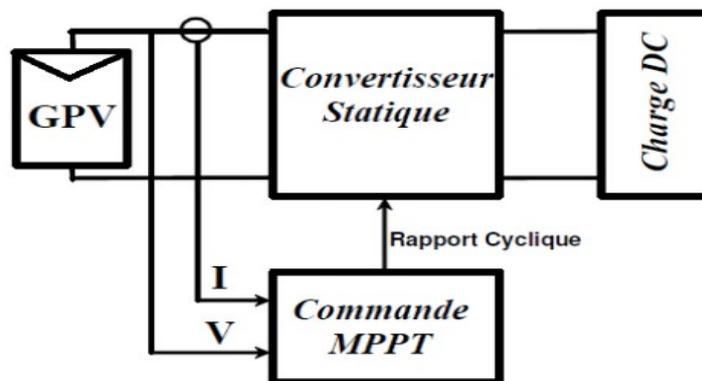


Figure III.6 : Chaîne de conversion photovoltaïque avec convertisseur statique contrôlé par une commande MPPT.

3-2- Les techniques de commandes MPPT

Il existe de nombreuses méthodes et techniques de commande MPPT disponibles dans la littérature dont on cite trois méthodes classiques:

Perturbe and Observe (P&O), l'incrémentation de conductance (IncCon) et la méthode Hill Climbing. Actuellement il existe des méthodes basées sur l'intelligence artificielles à savoir : logique floue, et réseau de neurones et les algorithmes génétiques. [15]

3-2-1- Les commandes MPPT classiques

3-2-1-1- La méthode Perturbe & Observe (P&O)

Le principe des commandes MPPT de type P&O consiste à perturber la tension V_{PV} d'une faible amplitude autour de sa valeur initiale et d'analyser le comportement de la variation de puissance PPV qui en résulte. Ainsi, comme l'illustre la figure (III.7), on peut déduire que si une incrémentation positive de la tension V_{PV} engendre un accroissement de la puissance PPV , cela signifie que le point de fonctionnement se trouve à gauche du PPM.

Si au contraire, la puissance décroît, cela implique que le système a dépassé le PPM. Un raisonnement similaire peut être effectué lorsque la tension décroît. À partir de ces diverses analyses sur les conséquences d'une variation de tension sur la caractéristique $PPV(V_{PV})$, il est alors facile de situer le point de fonctionnement par rapport au PPM, et de faire converger ce dernier vers le maximum de puissance à travers un ordre de commande. [18]

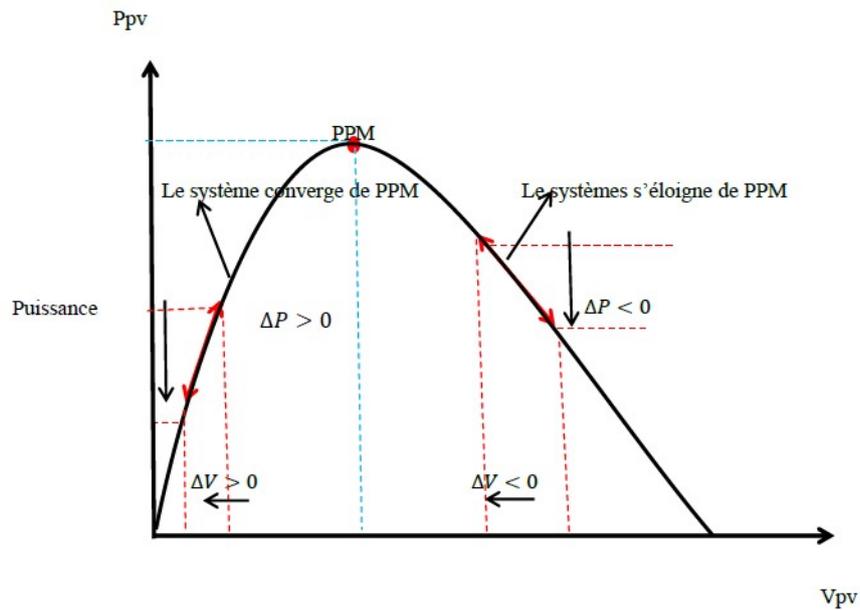


Figure III.7 : Schéma de convergence vers le PPM par P&O.

La figure (III.08) représente l'algorithme classique associé à une commande MPPT de type P&O, où l'évolution de la puissance est analysée après chaque perturbation de tension. Pour ce type de commande, deux capteurs (courant et tension du GPV) sont nécessaires pour déterminer la puissance du PV à chaque instant.

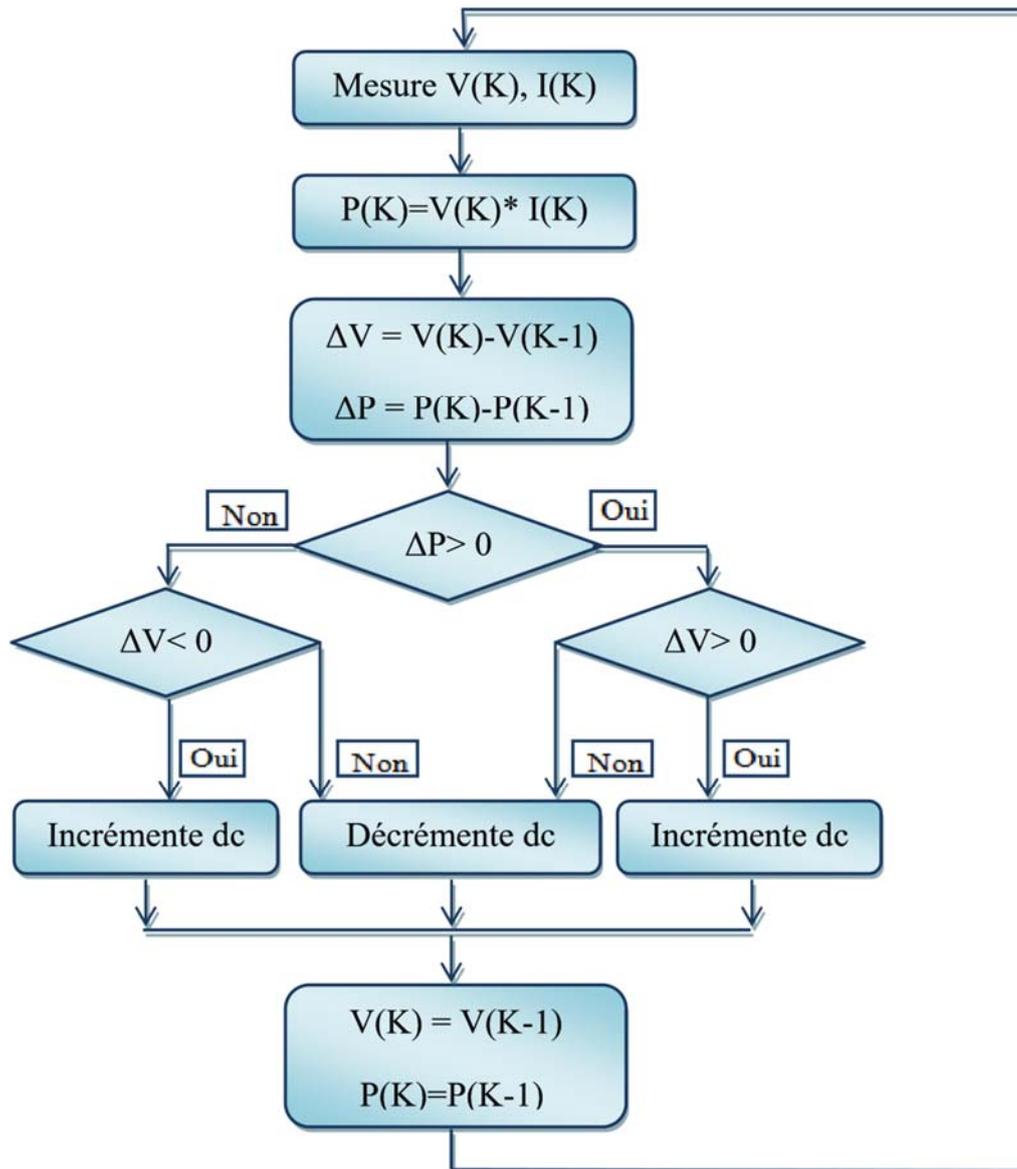


Figure III.8 : Algorithme de la méthode P&O.

Telle que :

P_{pvn} : la nouvelle puissance

P_{pvn-1} : l'ancienne puissance dans le temps (t-1).

$$\Delta V = V_{PVn} - V_{PVn-1}$$

$$\Delta P = P_{PVn} - P_{PVn-1}$$

À cause de la facilité de son implémentation, la méthode P&O est fréquemment utilisée malgré qu'elle présente des problèmes d'oscillations autour du PPM car la recherche doit être répétée périodiquement pour obliger le système à osciller autour du PPM. En plus, et pour des

variations brusques des conditions climatiques ou/et de la charge, cette méthode présente parfois des erreurs d'interprétation dans la direction qu'il faut suivre pour atteindre le PPM.

3-2-1-2- La méthode Incrémentation des conductances (INC)

Cette technique est basée sur la variation de la conductance du GPV et son influence sur la position du point de fonctionnement. La conductance et la variation élémentaire de la conductance (incrément) du module photovoltaïque sont définies respectivement par :

$$G = \frac{I_{pv}}{V_{pv}} \quad (3.12)$$

$$dG = \frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} \quad (3.13)$$

La caractéristique puissance-tension du GPV, permet d'écrire les conditions suivantes :

- Si $\frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} > 0$ le point de fonctionnement est à gauche du PPM.
- Si $\frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} = 0$ point de fonctionnement est sur le PPM.
- Si $\frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} < 0$ le point de fonctionnement est sur la droite du PPM.

En utilisant la relation (II.33), la dérivée de la puissance peut s'écrire sous la forme :

$$\frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} = \frac{d(V_{pv} \cdot I_{pv})}{dV_{pv}} = I_{pv} \cdot \frac{dV_{pv}}{dV_{pv}} + V_{pv} \cdot \frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} = I_{pv} + V_{pv} \frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} \quad (3.14)$$

On peut donc avoir d'autres conditions sur la variation de la conductance :

- Si $I_{pv} + V_{pv} \frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} = 0 \Rightarrow \frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} = -\frac{I_{pv}}{V_{pv}}$ le point de fonctionnement est sur le PPM.
- Si $I_{pv} + V_{pv} \frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} > 0 \Rightarrow \frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} > -\frac{I_{pv}}{V_{pv}}$, le point de fonctionnement est à gauche du PPM.
- Si $I_{pv} + V_{pv} \frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} < 0 \Rightarrow \frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} < -\frac{I_{pv}}{V_{pv}}$; le point de fonctionnement est sur la droite du PPM.

Le PPM peut être atteint en comparant à chaque instant la valeur de la conductance (I_{PV}/V_{PV}) avec celle de l'incrément de conductance (dI_{PV}/dV_{PV}). La figure (III.9) montre l'algorithme de cette méthode, où V_r représente la tension de référence.

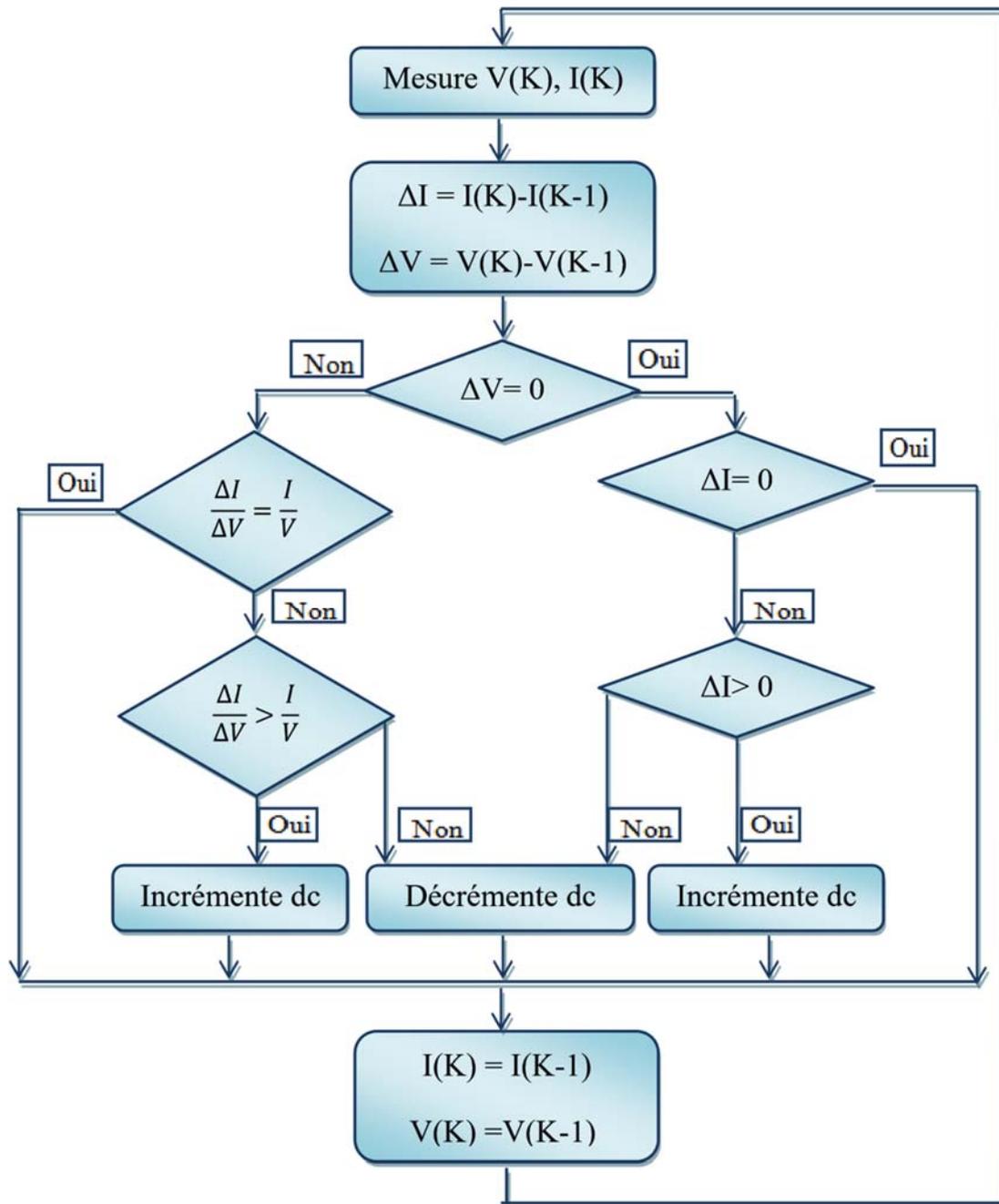


Figure III.9 : Algorithme de la méthode Incrément de conductance.

Pratiquement, comme la méthode P&O, cette technique présente des oscillations autour du PPM car il est difficile de remplir la condition $\frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} = 0$, ce qui fait que le système reste toujours en train de la chercher. L'algorithme IncCond est plus complexe que celui du P&O, ce qui engendre un temps d'exécution plus long.

3-2-2- Etude comparative

Le tableau suivant représente une étude comparative entre les techniques de commande MPPT classique « Perturbe & Observe » et « Incrément des conductances ».

Tableau III.1 : Comparaison des techniques MPPT P&O et INC [20].

Algorithmes MPPT.	P&O	INC
Type de capteurs utilisés.	1 Tension. 1 Courant.	1 Tension. 1 Courant.
Identification des paramètres du panneau PV	Non nécessaire.	Non nécessaire.
Complexité.	Basse	Moyenne.
Nombre d'itérations.	45	48
Vitesse de convergence.	Moyenne.	Moyenne.
Précision.	95%	98%

- **Remarques et interprétations**

Après cette étude, on peut dire que l'avantage d'utiliser la méthode P&O est sa simplicité et la facilité d'implémenter son algorithme.

4- Convertisseur AC/DC :

4-1 Redressement non commandé :

Le redressement permet d'obtenir un courant unidirectionnel à partir d'une source alternative, principalement monophasée ou triphasée. Les redresseurs sont du type simple alternance ou double alternance. En général, le lissage du courant par inductance est utilisé pour les fortes puissances, et le lissage de la tension par condensateur pour les faibles puissances.[07]

4-1-1- Redressement double alternance :

Pour obtenir le redressement double alternance on utilise le pont de Graëtz qui est constitué de quatre diodes montées en parallèle deux par deux. Les diodes D1 et D2 sont à cathodes communes et les diodes D3, D4 sont à anodes communes.

Le pont est alimenté par une tension alternative sinusoïdale [11]

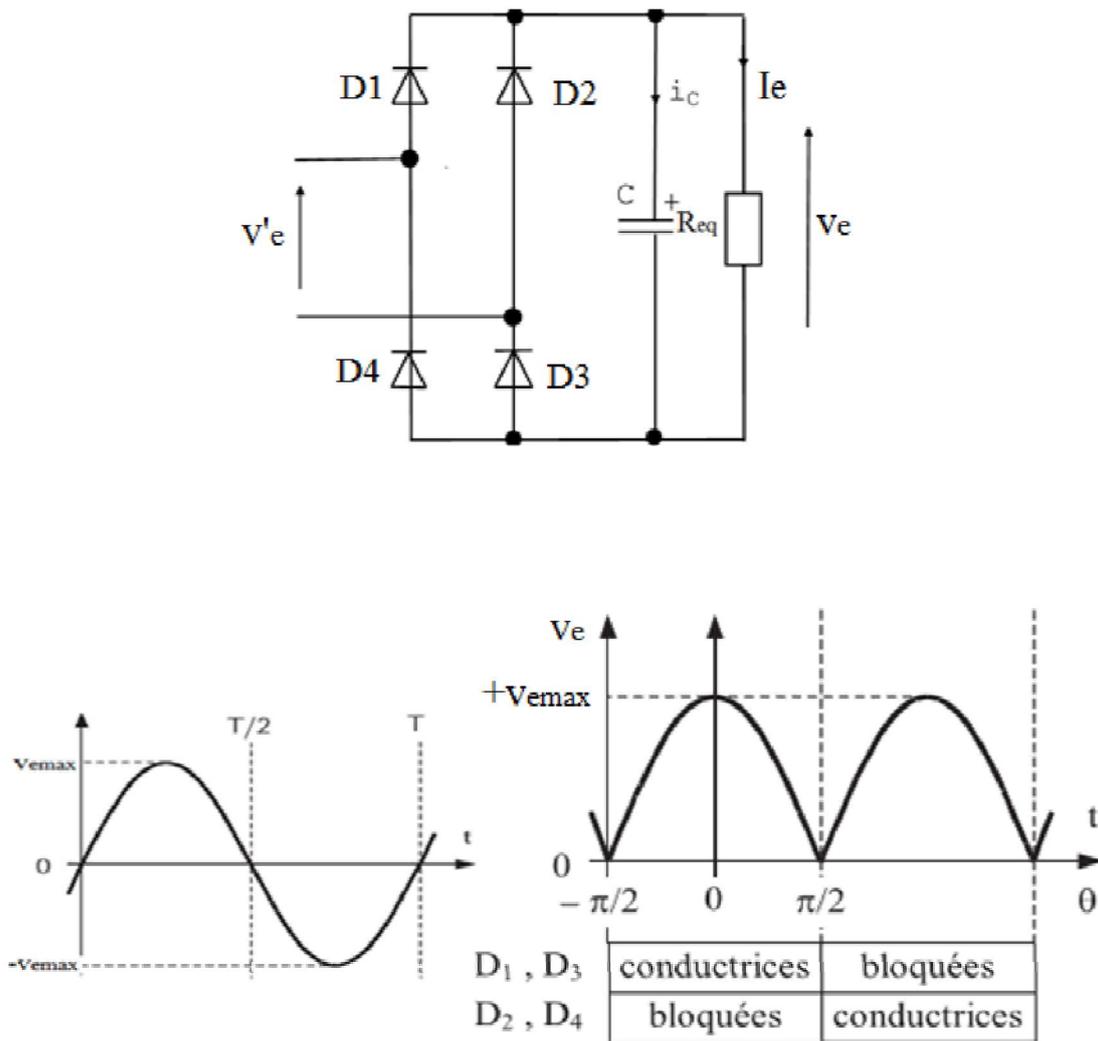


Figure III.10 :a) forme de tension d'alimentation b) tension redressée

4-1-2-Filtrage de la tension redressée par un condensateur :

Le filtrage de la tension par un condensateur en parallèle sur les bornes de sortie du pont devrait être utilisé : le redresseur relie alors directement deux dipôles de tension, réseaux et condensateur.

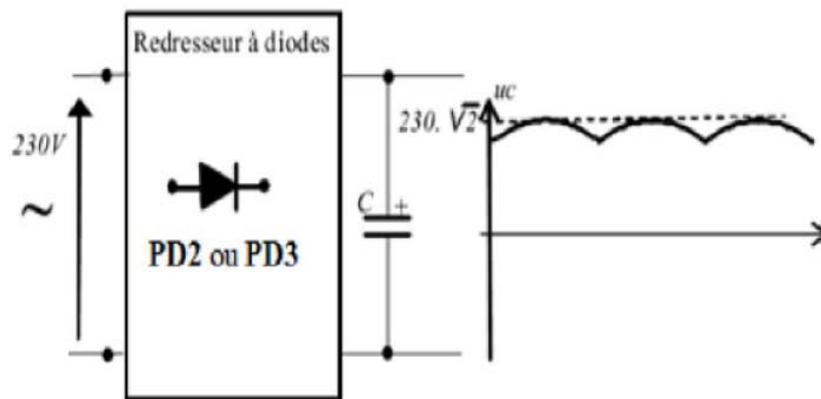


Figure III.11 : filtrage de la tension par un condensateur

L'association *pont de diode + condensateur* constitue le dispositif d'alimentation d'une multitude d'appareil, aussi bien dans le domaine de la domotique (téléviseur, four à microonde...) que l'électronique (alimentation des carte, matériels informatique) ou de l'électrotechnique (étage d'entrée des variateurs de vitesse).[23]

4-1-3-Tension redressée :

L'Allure de la tension redressée est donnée dans la figure(III.12), entre les instant t_1 et t_2 la tension $V_e(t)$ est égale à la tension du réseau, en suite le condensateur se décharge dans la charge R_{eq} jusqu'à ce que la tension a se borne redevienne égale à la tension du réseau, à l'instant $t_1 + (\pi/2)$.

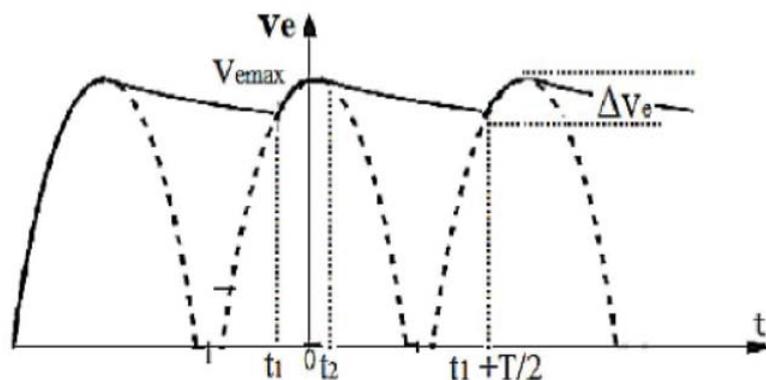


Figure III.12 : Tension redressées et filtrée

L'intervalle de conduction des diodes du pont est très réduit et la décharge du condensateur s'effectue selon une loi quasiment linéaire, avec une faible décroissance de $V_e(t)$. Dans ces conductions - qui sont généralement réalisées- nous pouvons admettre que la tension redressée et le courant dans la charge sont pratiquement constants

On parle alors de redresseur de crête.

Il est possible de donner une valeur approchée de l'ondulation crête à crête de $V_e(t)$.

4-2-Convertisseurs continu-continu :

Les hacheurs sont des convertisseurs statiques continu-continu permettant de fabriquer une source de tension continue variable à partir d'une source de tension continue fixe. On distingue trois familles de convertisseurs statiques (ou hacheurs) :

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

Notre étude est consacrée sur le convertisseur type buck [05]

4-3-Synthèse :

La structure de base d'un hacheur dévolteur ((un quadrant)), est donnée à la figure (III.18).

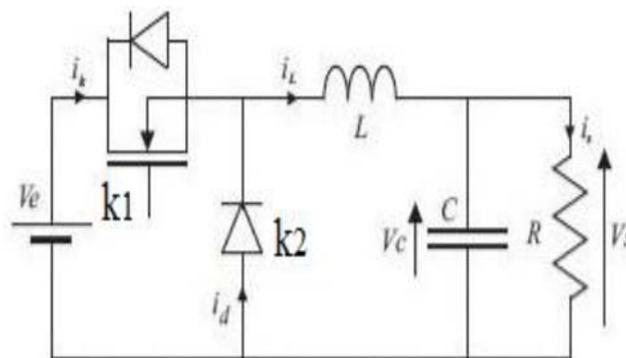


Figure III.13 : structure de convertisseur BUCK

Nous devons mettre en évidence deux points importants.

Le premier est relatif à la nature des commutations au sein de la cellule constituée par K1 et K2: l'amorçage et le blocage commandés de K1 entraînent respectivement le blocage et l'amorçage spontanés de K2.

Le second est relatif aux natures des interrupteurs K1 et K2 :

➤ Interrupteurs K1 : cet interrupteur doit supporter une tension positive, et doit pouvoir conduire un courant positif. En outre, on doit être en mesure de pouvoir commander son Amorçage et son blocage.

Cet interrupteur devra donc être de type transistor (bipolaire, MOS, IGBT ou GTO).

➤ Interrupteur K2 : cet interrupteur doit supporter une tension inverse, et doit pouvoir conduire un courant positif. En outre, toutes les commutations de cet interrupteur peuvent être spontanées.

Cet interrupteur sera donc de type diode (D).

La structure obtenue est dite convertisseur asynchrone.

Le couple de composants L et C forment un filtre passe-bas, pour limiter les ondulations du courant dans la charge, ainsi que les ondulations de la tension aux bornes de la charge.[22]

4-4- Principe de fonctionnement :

L'interrupteur K se ferme et s'ouvre pendant une période T. Il est fermé pendant l'intervalle $(0, \alpha T)$: la diode est bloquée, la source primaire fournit de l'énergie à l'inductance L et à la résistance R.

Il est ouvert de αT à T : la diode est passante et assure la continuité du courant et la décharge de L.[14]

5-Modélisation d'un onduleur a trois niveaux type NPC

On considère un onduleur triphasé du type NPC <<Neutral Point Clampe>> commande en MLI avec boucle de verrouillage de phase et de réglage du courant et de tension.

5-1-Commande complémentaire des onduleurs a trois niveaux

Pour un onduleur a trois niveaux, on définit la commande complémentaire suivante :

By: La commande de base de transistor Tks du bras k.

K: Le numéro du bras (k =1, 2, 3). [41]

5-2-Modèle de connaissance

On définit le . Modèle de connaissance des onduleurs a trois niveaux en utilisant la notion de fonction de connexion des interrupteurs et demi bras.

La commande complémentaire s'exprime en utilisant ces fonctions de connexion comme suit [41] :

(Fks) : La fonction de connexion de chaque interrupteur qui décrit son état fermé ou ouvert.

Cette fonction est définie comme suit :

$$F_{KS} = \begin{cases} 1 & \text{si TDks est fermé} \\ 0 & \text{si TDks est ouvert} \end{cases}$$

On définira la fonction de connexion du demi -bras Fkm comme suit :

$m=1$ Le demi bras du haut

$m=0$ Le demi bras du bas

Les fonctions de connexion des demi bras s'expriment, en fonction de celles des interrupteurs comme suit :

Avec F_{k1}^b et F_{k0}^b pour le demi-bras du haut et, celui du bas.

FKm vaut "1" dans le cas ou interrupteurs du demi bras sont fermés , et nulle dans tous les autre cas.

Tableau.III.2 : Table d'excitation des interrupteurs d'un bras de l'onduleur a trois niveaux

Etat des interrupteurs				Tension bloquée
Ka1	Ka2	Ka3	Ka4	
1	1	0	0	$E/2$
0	1	1	0	0
0	0	1	1	$-E/2$

5-3-Principe de fonctionnement de l'onduleur NPC a trois niveau

Pour décrire le fonctionnement de l'onduleur triphasé de type NPC, on considère un seul bras dont la structure. Il faut déterminer les valeurs que peut prendre la tension simple V_{ao} entre la borne "a" de la charge et le point neutre O. Cette tension est entièrement définie par l'état (0 ou 1) des quatre interrupteurs K1, K2, K3 et K4 du bras.

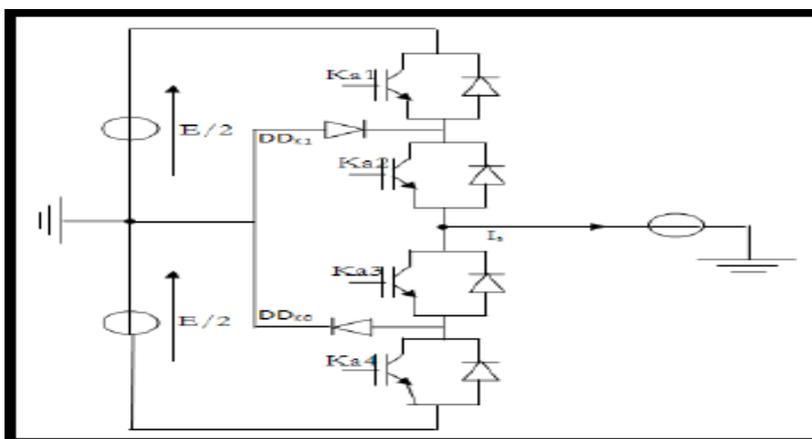


Figure III.14 : Bras d'onduleur à trois niveaux

Le sens positif ou négatif des courants I_{d0} , I_{d1} et I_{d2} fixe le sens du transfert de l'énergie du Convertisseur. Lorsque la source de tension est génératrice et la charge est réceptrice, le courant passe à travers les transistors. Lorsque le transfert d'énergie s'effectue de la charge vers la source d'entrée, ce sont les diodes antiparallèles qui assurent le passage du courant. Sur les $2^4 = 16$ séquences possibles, seules trois séquences sont mises en œuvre. Toutes les autres séquences ne sont pas fonctionnelles, et sont donc à éviter. En effet, elles provoquent, soient, des courts-circuits des sources de tension continue :

- * court-circuit d'E1 et d'E2 avec les séquences [1111] et [1001],
- * court-circuit d'E1 avec les séquences [1110], [1000] et [1010],
- * court-circuit d'E2 avec les séquences [0111], [0001] et [0101].

Soient, elles provoquent la déconnexion de la charge pour la séquence [0000]. Soient encore, Elles ne permettent pas d'assurer la connexion de la charge au point neutre pour les séquences [0100] et [0010].

La figure (III.15) montre les configurations du bras de l'onduleur de type NPC qui correspond aux trois séquences fonctionnelles suivantes:

- * Séquence 1: K1, K2 sont passants et K3, K4 sont bloqués (figure(III.15.a), on a:

La tension de sortie est :

$$V_{ao} = +E/2.$$

La tension inverse appliquée aux bornes des interrupteurs bloqués est :

$$V_{K3} = V_{K4} = +E/2.$$

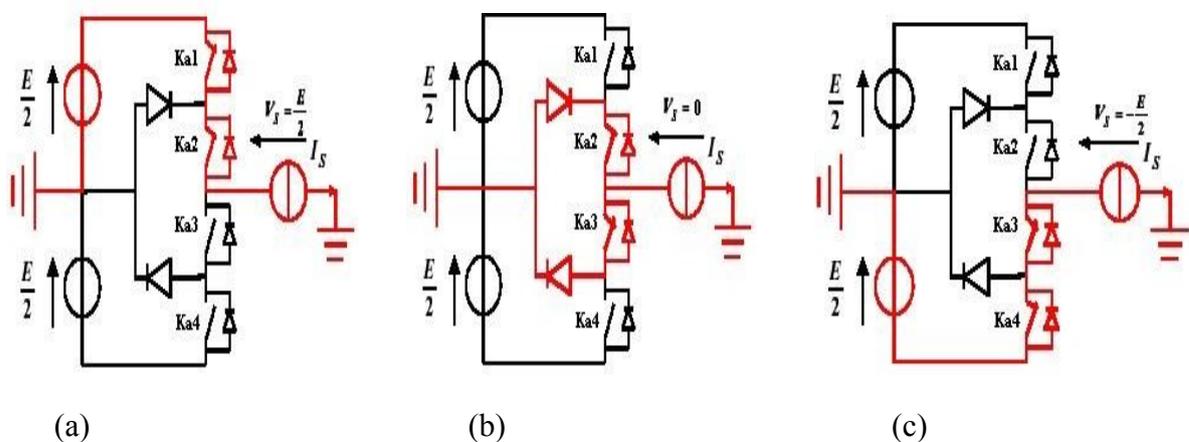


Figure III.15: Les différentes configurations fonctionnelles d'un bras

Séquence 2: K2, K3 sont passants et K1, K4 sont bloqués (figure (III.15.b)), on a:
 La charge est mise en court-circuit à travers l'un des interrupteurs K2 ou K3 et l'une des Diodes de bouclage. donc, le point a est relié directement au point neutre O.
 Alors, la tension de sortie V_{ao} est nulle :

$$V_{ao} = 0$$

La tension inverse appliquée aux bornes des interrupteurs bloqués est :

$$V_{K1}=V_{K4}= +E/2.$$

» Séquence 3: K1, K2 sont bloqués et K3, K4 sont passants (figure (III.15.c)), on a:
 La tension de sortie est :

$$V_{ao} = -E/2.$$

La tension inverse appliquée aux bornes des interrupteurs bloqués est :

$$V_{K1}=V_{K2}= +E/2$$

Les séquences 1,2 et 3 vont s'enchaîner durant chaque période de la façon suivante : 1-2-3-2

5- Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons présenté une étude théorique de deux convertisseurs statiques, le premier c'est un convertisseur AC/DC pour construire une source de tension continue et filtrée par un condensateur. et le deuxième c'est un convertisseur DC/DC type buck, pour construire une source de tension continue réglable.

Nous avons détaillé l'étude sur le convertisseur DC/DC dans les trois modes de conduction pour obtenir les relations entre les différents paramètres nécessaires du convertisseur.

Dans ce chapitre, nous avons présenté les convertisseurs DC/DC les plus utilisés comme étage d'adaptation (Buck, Boost et Buck-Boost) et détaillé le rôle de chaque composant dans le convertisseur Buck qui est utilisé dans notre projet.

La deuxième partie de ce chapitre on a présenté les techniques de commande MPPT qui sont nécessaires pour qu'un système photovoltaïque fonctionne à sa puissance maximale même pour des variations météorologiques ou de la charge.

Chapitre IV :

Simulation et interprétation
des résultats

1- Introduction

Dans ce chapitre, on présentera une étude de simulation d'un système photovoltaïque, ce système est composé d'un générateur photovoltaïque, d'un onduleur, et d'une charge ,puis d'un réseau électrique.

La simulation ainsi que le contrôle de puissances ont été effectués sous le logiciel MATLAB/Simulink.

Le modèle de la centrale est constitué de:

Générateur photovoltaïque : Il est Formé de 5 modules avec un nombre $N_s = 96$ de cellules en série. Nous avons étudié l'influence des paramètres extérieurs, l'éclairement et la température sur les caractéristiques (courant-tension, puissance-tension).

Convertisseur DC-DC :

Hacheur Boost contrôlé par MPPT type INC incrémentale conductance.

Convertisseur DC-AC : L'onduleur choisi dans ce travail est de type trois niveaux de tension.

Filtre L : Le filtre de type L permet de diminuer les harmoniques autour de la fréquence de commutation. Pour obtenir cela, la valeur de cette inductance doit être relativement élevée, cependant cette augmentation peut mettre en risque la capacité de compensation du système [8].

La charge : Dans le modèle nous avons insérés deux types de charge : résistive de 2MW et inductive de 20MW/2MVAR

Transformateurs et réseaux : Il représente le réseau électrique de distribution publique d'amplitude $V_r = 500$ V et de fréquence $f = 60$ Hz

Générateur photovoltaïque : On va choisir dans ce travail le générateur PV de 5 modules Sun Power SPR-305-WHT en série, qui contient 96 cellules solaire en série dans chaque module.

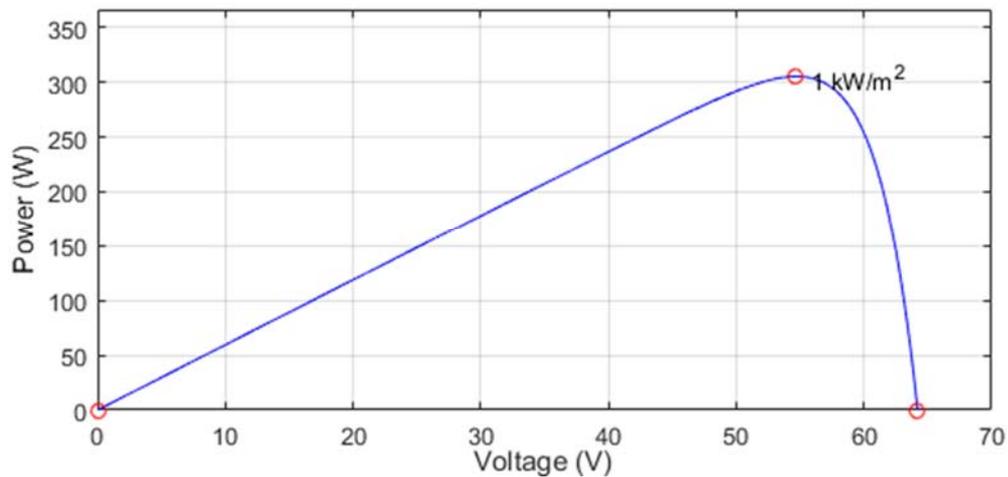
Les caractéristiques électriques de ce panneau photovoltaïque sont données par le tableau suivant :

Tableau IV.1 : Caractéristiques électriques du Module PV.

Eclairement et température	$E=1000 \text{ W/m}^2$ $T=25 \text{ }^\circ\text{C}$
Puissance maximale de module (P_{max})	305 W
Courant de court-circuit (I_{CC})	5.96 A
Tension de circuit ouvert (V_{oc})	64.2 V
Courant au point de MPPT (I_m)	5.85 A
Tension au point de MMPT (V_m)	54.7 V
Nombre des cellules par module	96
Nombre de modules en série (N_s)	5

2- Simulation du générateur(GPV) avec les conditions standard

La simulation d'un générateur PV sous les conditions standard ($E=1000\text{w/m}^2$ et $T=25^\circ$), a donnée les courbes présentés dans les figures (IV.2) et (IV.3).

**Figure IV.1:**Caractéristique (V-P)du générateur PV

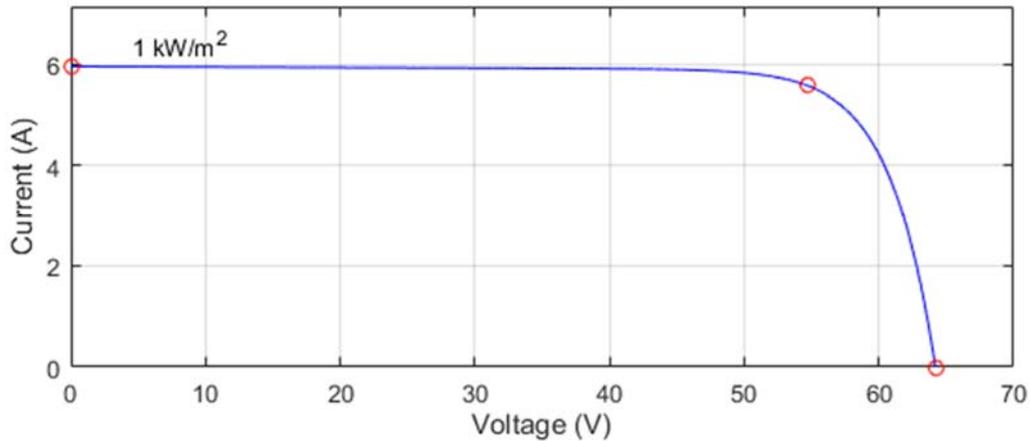


Figure IV.2 : Caractéristique (V-I) du générateur PV

3-Simulation du générateur (GPV) à éclairement variable

Afin de constater l'influence des conditions externes de l'éclairement (E) sur la caractéristique (I-V) (P-V), nous avons adopté la méthode suivante:

Pour visualiser l'influence de l'éclairement, on a fixé la température ambiante ($T=25^\circ$) avec variation de l'éclairement dans une gamme suffisante.

En faisant varier l'éclairement (E) entre 250 et 1000 avec un pas de 250, la caractéristique $P=f(V)$ est donnée par la figure (IV.4) et la caractéristique $I=f(V)$ est représentée par la figure (IV.5).

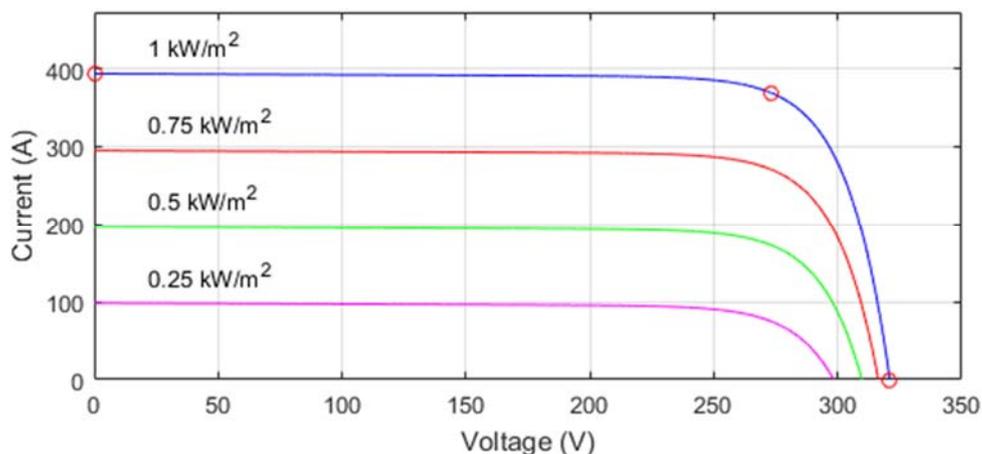


Figure IV.3 : Influence de variation de l'éclairement sur la caractéristique (I-V)

On remarque une forte diminution du courant de court-circuit par rapport à l'éclairement (E) et une faible diminution de tension de circuit ouvert.

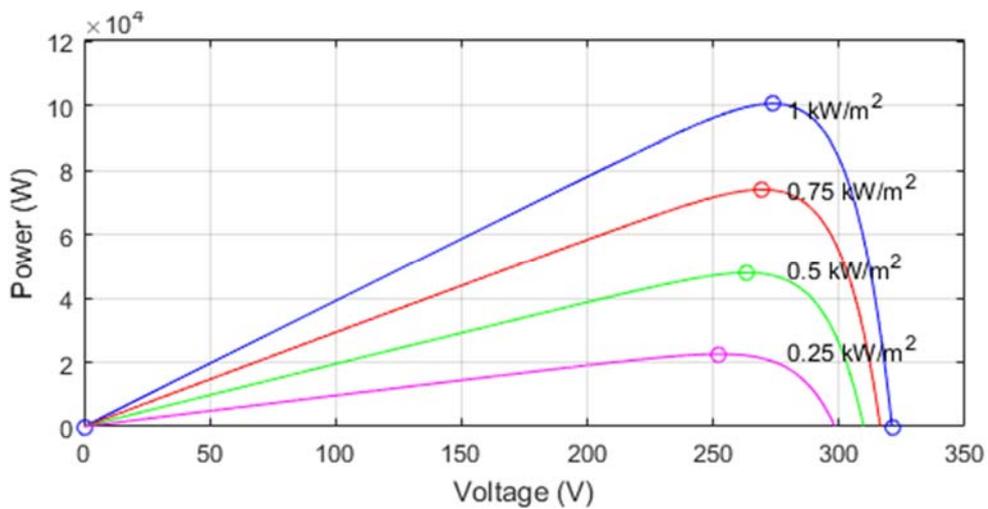


Figure IV.4 : Influence de la variation de l’éclairement sur la caractéristique(P-V)

On remarque sur les figures (III.4) et (III.5) que l’éclairement influe proportionnellement sur la puissance et la tension de circuit ouvert de GPV.

4- Simulation de l’hacheur survolteur (BOOST)

Parmi les techniques de commande à MPPT du hacheur (BOOST), nous avons choisi la méthode INC « Incrémentale Conductance ». Le schéma de simulation est donné par la Figure(IV.6).

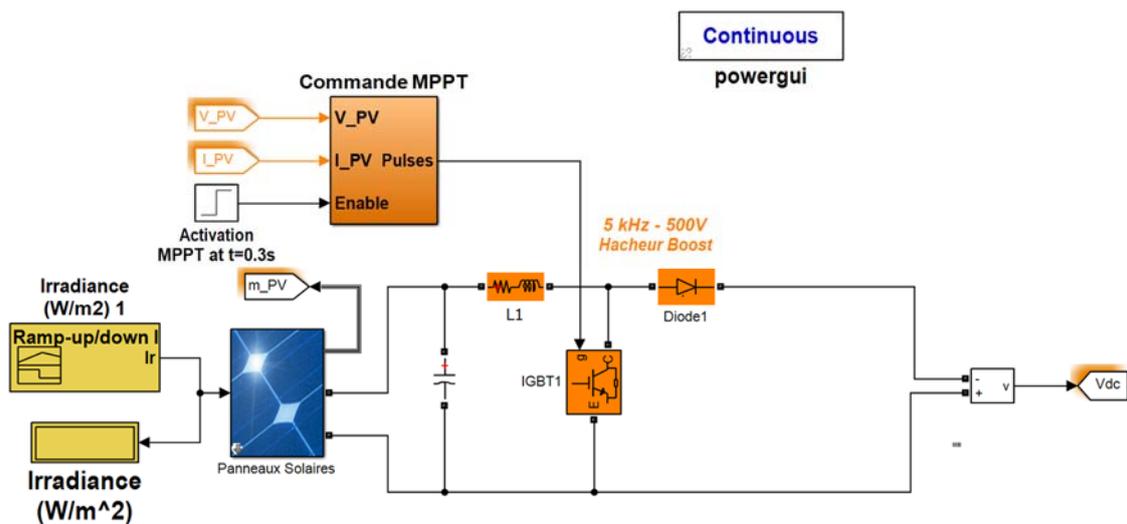


Figure IV.5 : Schéma de simulation d’un hacheur BOOST

4-1- Commande MPPT :

La simulation de l'INC est présentée par la figure(IV.7):

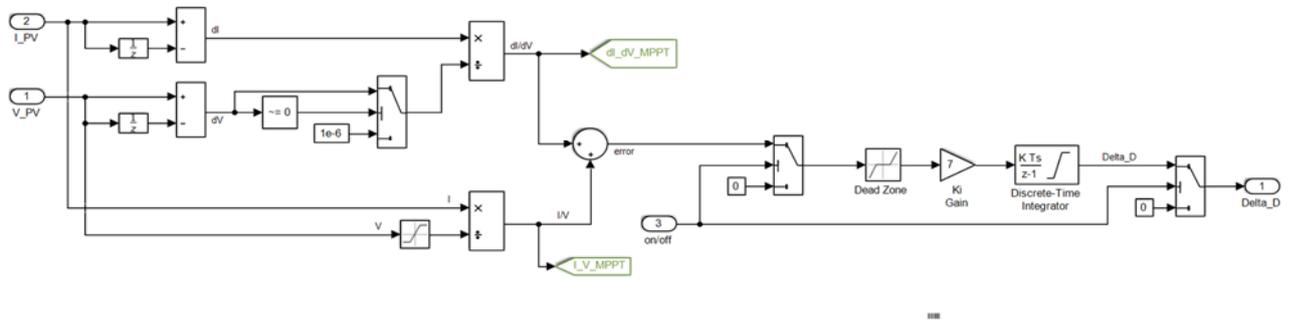


Figure IV.6 : Simulation de block MPPT par INC.

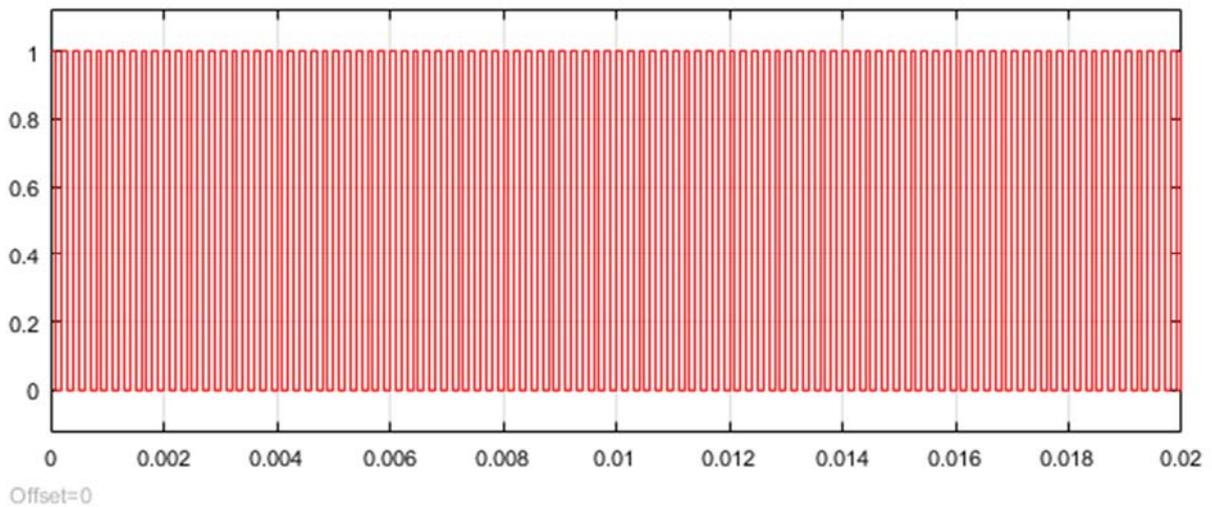


Figure IV.7: Signal de commande MPPT

On commande l'hacheur par la méthode INC, la réalisation de cette configuration est présentée sur la figure (IV.8) qui est implémentée sur Matlab /Simulink.

En a géré cette configuration avec la variation de l'irradiance figure (IV.9) et affiché la puissance obtenue sur un même graphe avec la puissance générée par le générateur qui est représenté par la figure (IV-9):

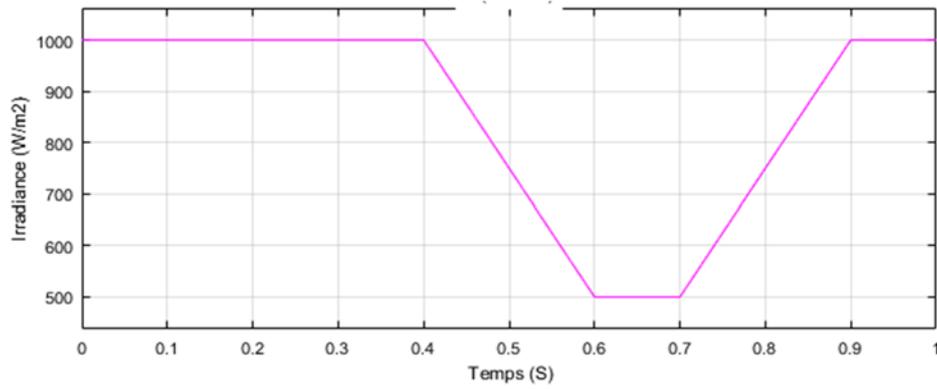


Figure IV.8 : Variation de l'éclairement en fonction du temps

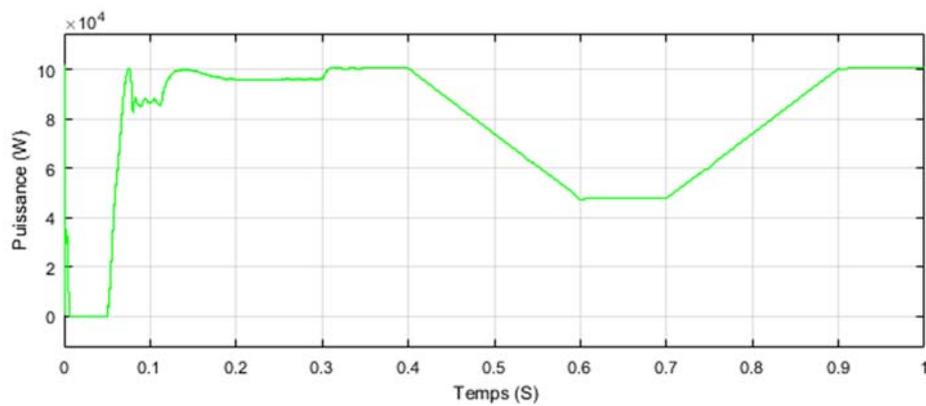


Figure IV.09 : Puissance générée par GPV

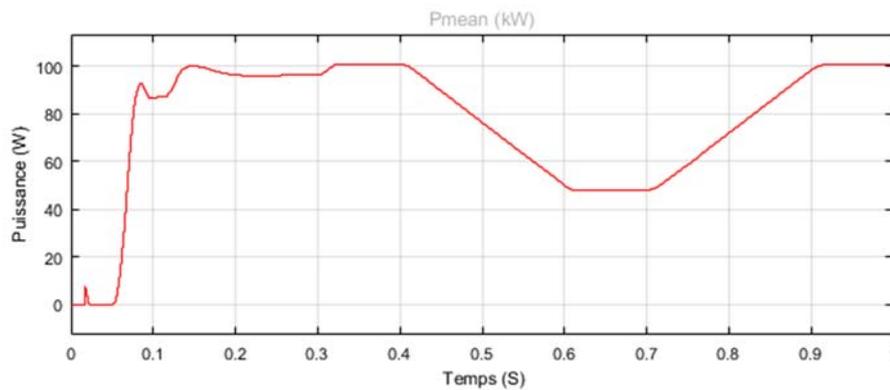


Figure IV.10 : Puissance générée par l'hacheur BOOST

On remarque sur cette figure que les courbes de puissance qui sont fournies par l'hacheur suivent la puissance générée par le générateur photovoltaïque.

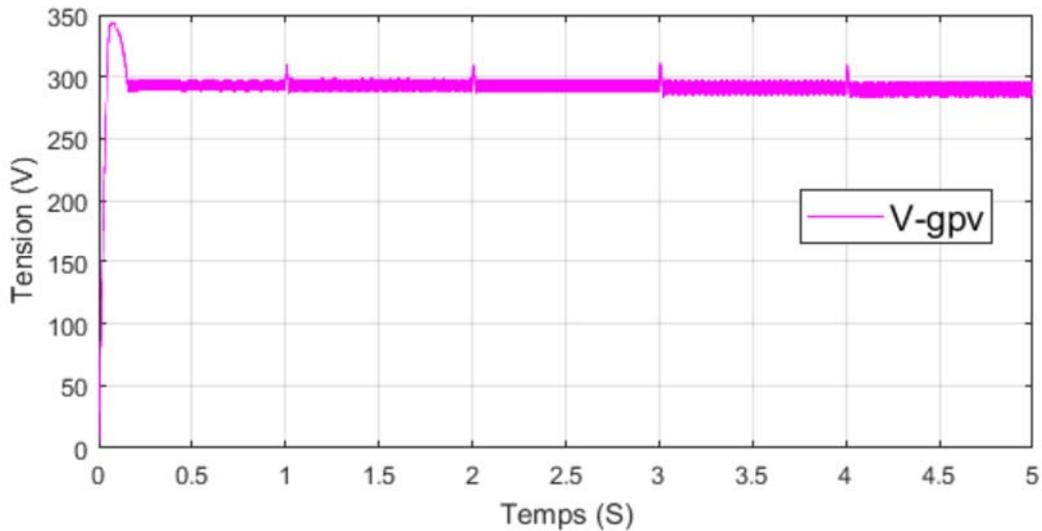


Figure IV.11 : Courbe de tension générée par le GPV

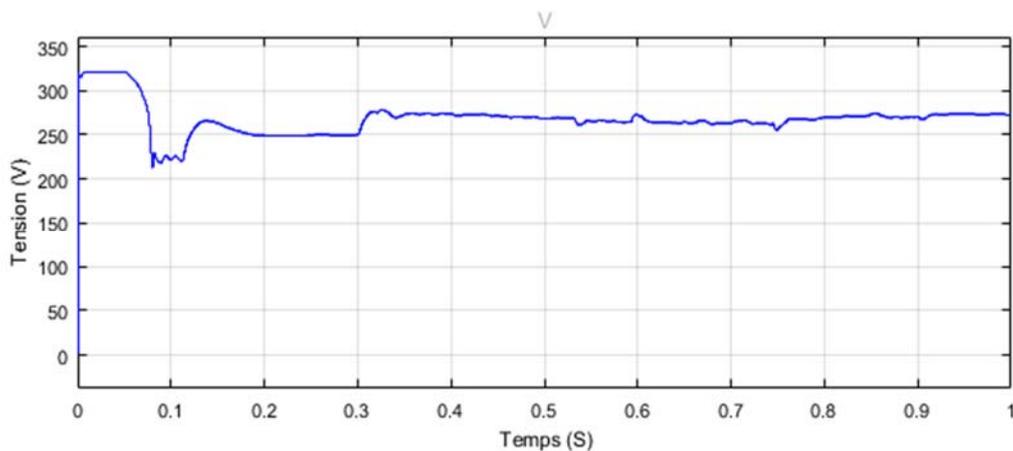


Figure IV.12: Tension à la sortie de l'hacheur

Les résultats de simulation du système photovoltaïque adapté par la commande MPPT sont représentés par les figures (IV.9) , (IV.10), (IV.11) ,(IV.12)

Ces figures représentent la tension générée par le GPV, la puissance générées par le générateur photovoltaïque, ainsi que la tension à la sortie de l'hacheur, et la puissance à la sortie du système photovoltaïque.

Ces résultats montrent que l'hacheur survolteur et la commande MPPT par la méthode INC effectuent correctement leurs rôles. L'hacheur survolteur fournit une tension assortie supérieure à celle fournie par le générateur photovoltaïque.

Et la commande MPPT adapte le générateur PV à la charge (transfert de la puissance maximale fournie par le générateur PV).

5-Simulation du Système PV connecté au réseau

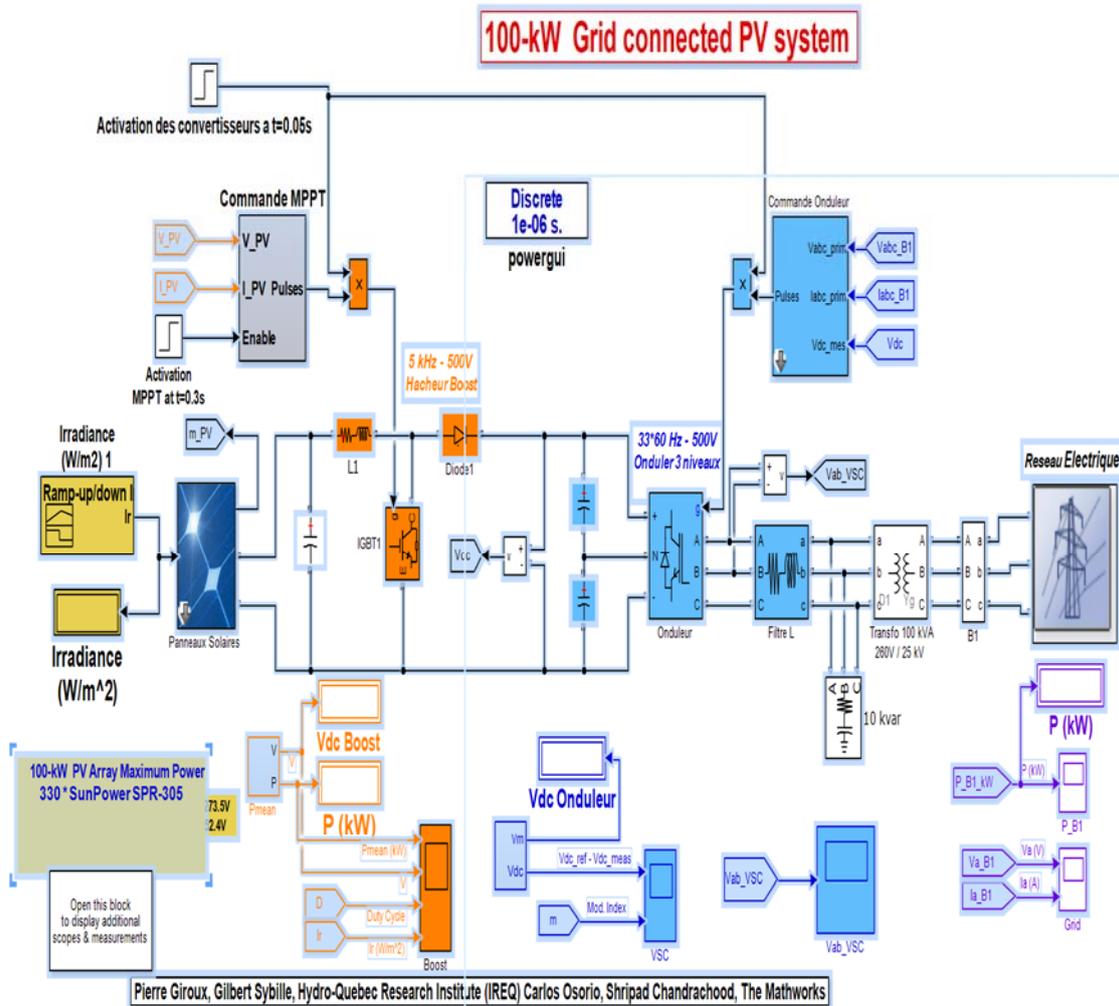


Figure IV.13 : Schéma de simulation du système photovoltaïque connecté au réseau alimentant une charge RL.

Ce système était simulé pour une température fixe de 25 C° et un éclairage (E) variable entre 500 et 1000 (W/m²) les résultats de simulations sont présentées par les figures suivantes:

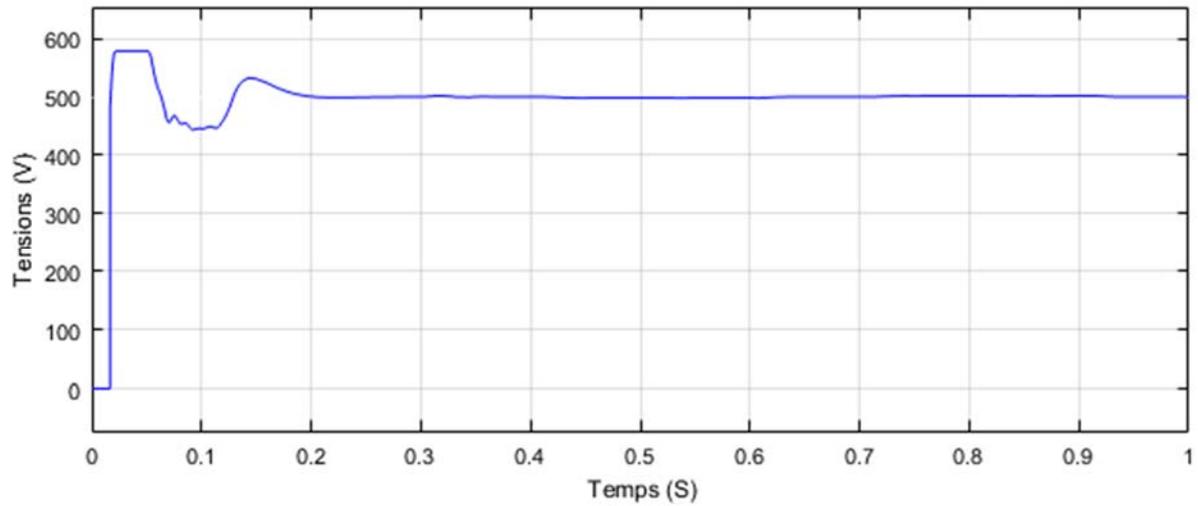


Figure IV.14 : Tension de sortie de l'hacheur BOOST.

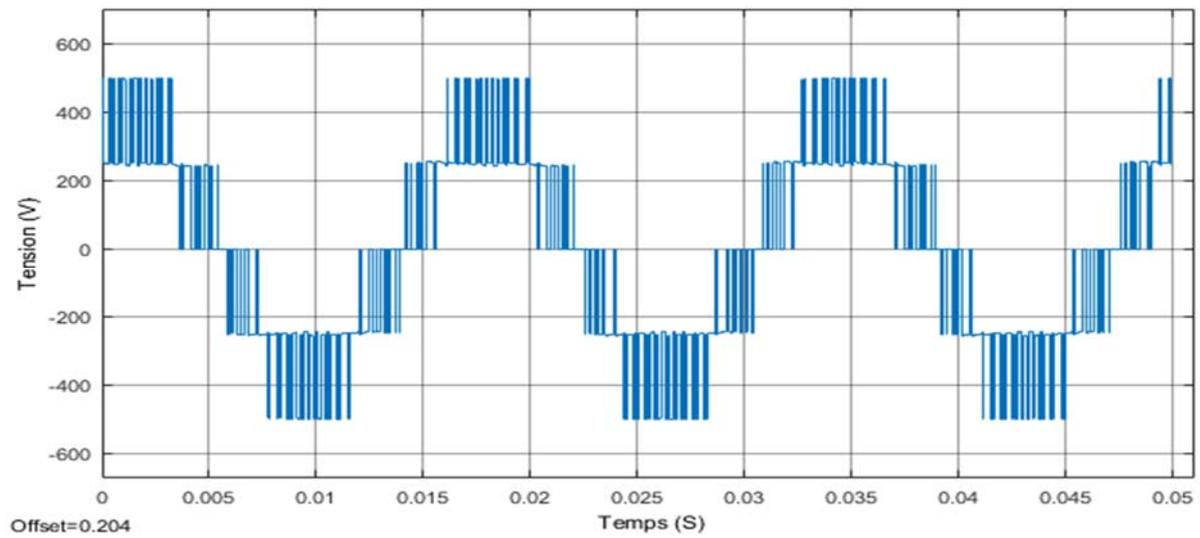


Figure IV.15 : Tension entre phase de l'onduleur trois niveaux V_{AB}

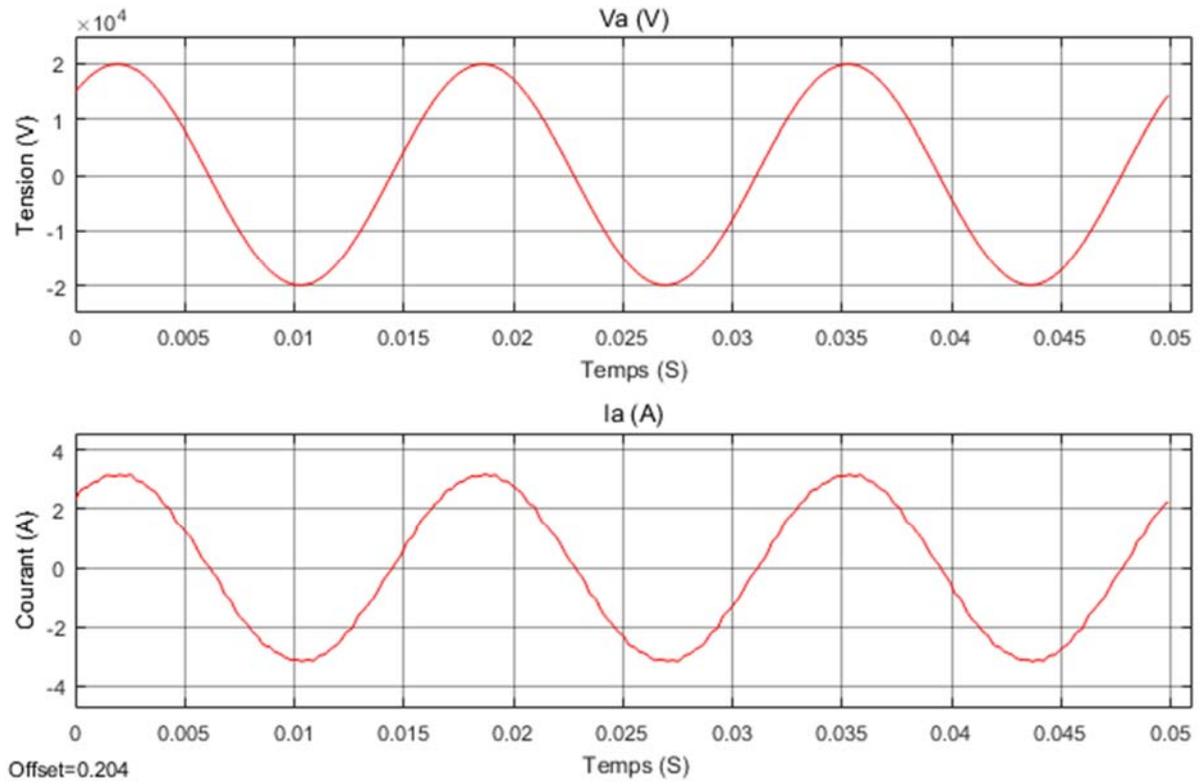


Figure IV.16 : Tensions et Courant de phase du réseau électrique (Va, Ia)

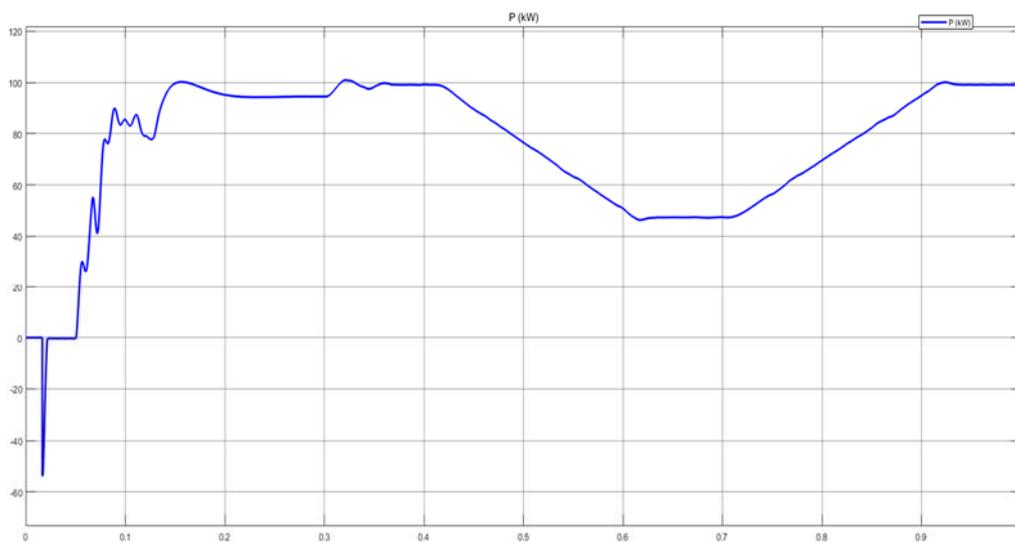


Figure IV.17:puissance de réseau électrique

6- Simulation du Système PV connecté au réseau avec variation de charge :

A l'instant $t=0.95$ nous avons simulés une variation de charge de 30MW/2MVAR à 50 MW/3MVAR.

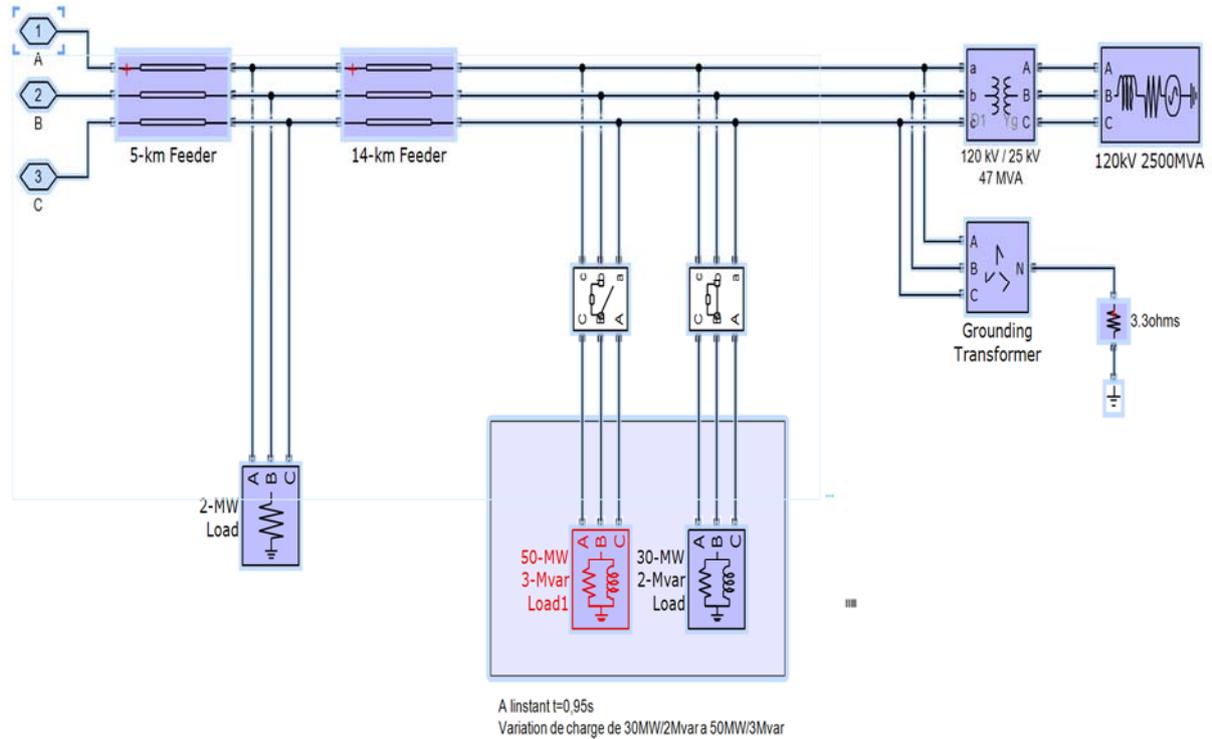


Figure IV.18: Modèle de simulation de la charge du réseau électrique.

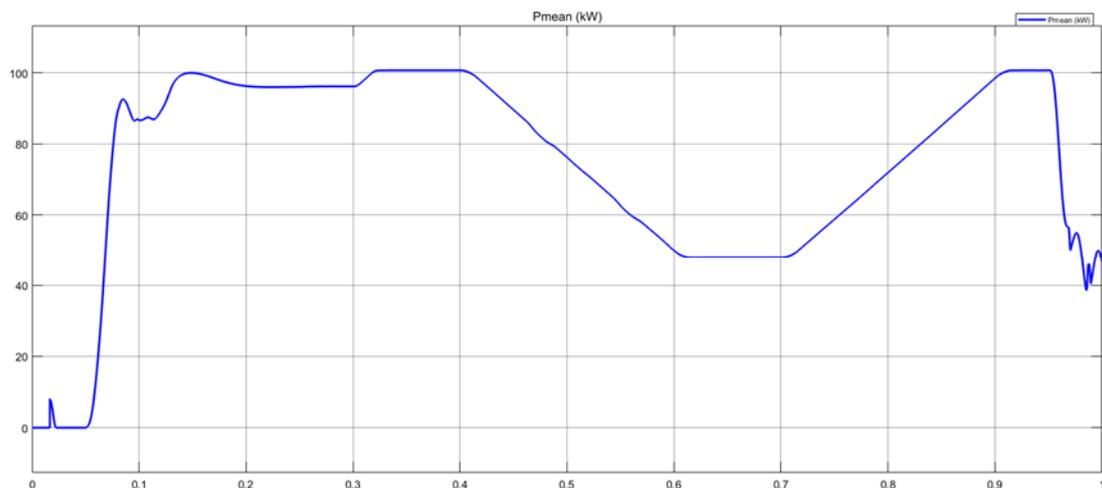
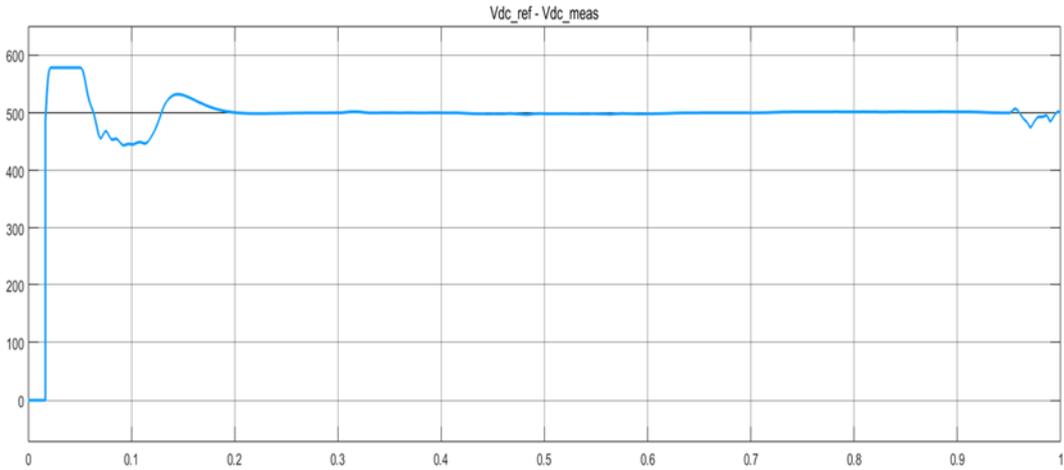


Figure IV.19: Puissance généré par l'hacheur BOOST



FigureIV.20:Tension à la sortie de l’hacheur

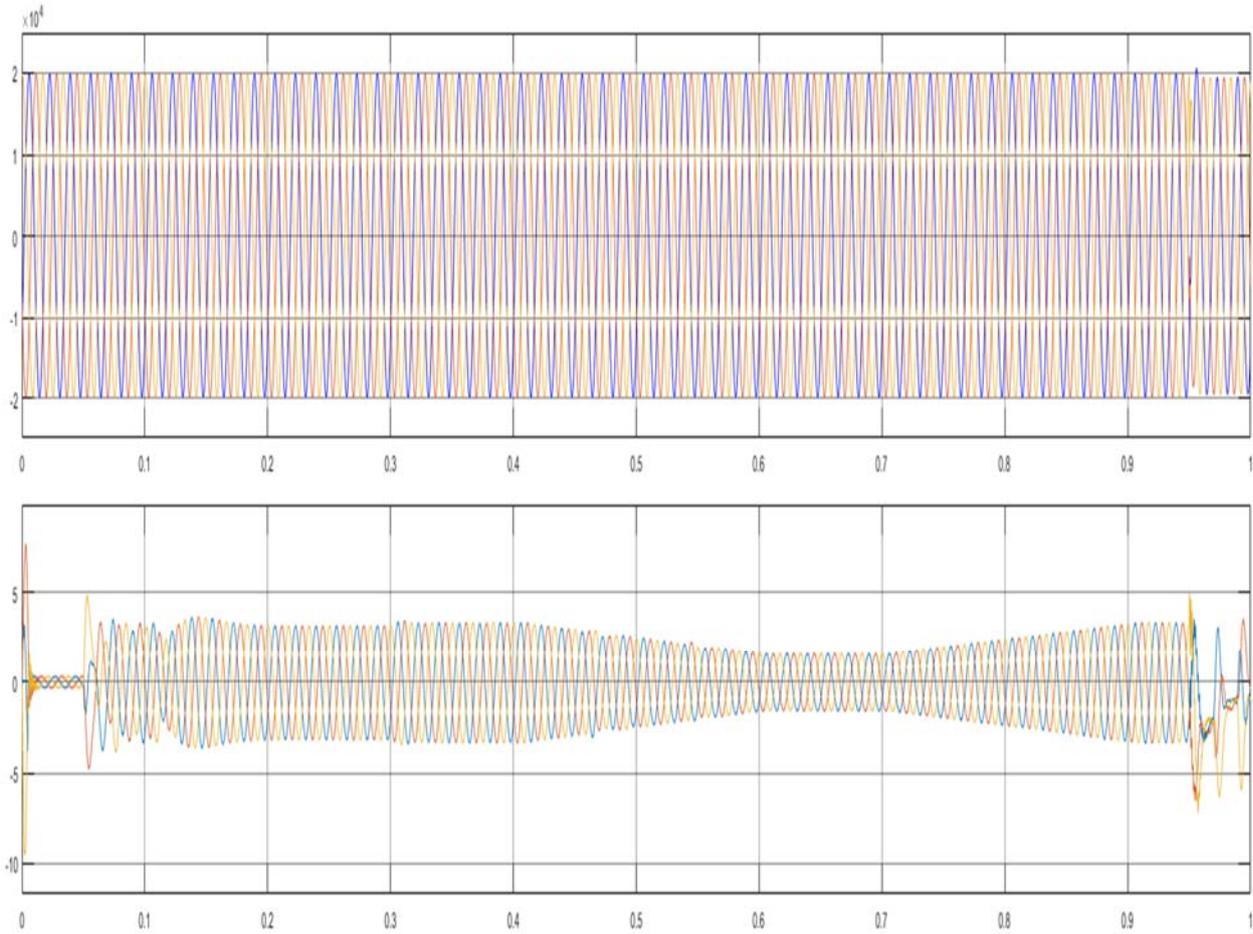


Figure IV.21:Tension et courant du réseau (V_a , I_a).

7- Conclusion

Pour mettre en évidence l'étude des systèmes PV connectés aux réseaux électriques triphasés de moyenne tension, on a pu simuler les caractéristiques fondamentales et calculer les performances du système du générateur PV, le hacheur BOOST et l'onduleur 3 niveaux type NPC.

Notamment le modèle global de simulation a permis d'obtenir une bonne qualité des signaux de tension et de courant et une bonne synchronisation avec le réseau électrique ainsi qu'une meilleure efficacité du système par l'onduleur multi-niveaux. Ce système a été étudié en considérant du modèle simplifié du réseau électrique et les simulations ont été faites avec des données d'ensoleillement statiques.

Bibliographic

[1] :M.ETIBON Stéphane. Nouvelles architectures distribuées de gestion et de conversion de l'énergie pour les applications photovoltaïques.ThèsedeDoctorat.UniversitédeToulouse,2009.

[2]: Ministère de l'Énergie et des Mines Algérie, Guide des Énergies Renouvelables, Édition2007.

[3]: M. BOUKLI-HACENE Omar. Conception et réalisation d'un générateur photovoltaïque muni d'un convertisseur MPPT pour une meilleure gestion énergétique. Mémoire de magister .Université ABOU BAKR BELKAID de Tlemcen, 2011.

[4]: M. DJERIOU Salim. Simulation d'un système photovoltaïque alimentant une machine asynchrone. Mémoire de magister. Université FARHATA BBAS de Sétif, 2011.

[5]: M. Jean-François REYNAUD. Recherches d'optimums d'énergie pour charge/décharge d'une batterie à technologie avancée dédiée à des applications photovoltaïques. Thèse de Doctorat. Université de TOULOUSE, 2011.

[6]: MODULE ELECTRICITESOLAIREPHOTOVOLTAIQUEM41.1, Edition2009.

[7]: M. BENSEDDIK Othmane. Etude et optimisation du fonctionnement d'un système photovoltaïque. Mémoire de Master. Université KASDIMERBAHOU ARGLA, 2012.

[8]: M
.ABBASEN Lyès. Etude de la connexion au réseau électrique d'une centrale photovoltaïque. Mémoire de magistère. Université Mouloud Mammeri Tizi Ouzou, 2011.

[9]: M. ZELLAGUI Mohamed. Etude des protections des réseaux électriques MT. Mémoire de magister. UNIVERSITE MENTOURI CONSTANTINE, 2010.

[10]: Melle. KHADRAOUI Fahima. La place de l'Algérie sur le marché euro-méditerranéen de l'électricité : Bilan et perspectives. Mémoire de Magister. Université M'HAMED BOUGARABOUMERDES, 2014.

[11]: Ministère de l'Énergie et des Mines Algérie, les réseaux électriques nationaux, 2013.

[12]: Ministère de l'Énergie et des Mines Algérie, 2011.

[13]: YANN RIFFONNEAU. Gestion des flux énergétiques dans un système photovoltaïque avec stockage connecté au réseau. Université Joseph Fourier, 2009.

[14]: HESPUL. Les Onduleurs pour Systèmes Photovoltaïques Fonctionnement Etat de l'Art et Etude des Performances, 2007.

[15]: PACER. Centrale photovoltaïque, Guide pour le dimensionnement et la réalisation de projets, 1996.

[16]: M .Thi Minh Chau LE. Couplage onduleur photovoltaïque et réseau, aspects contrôle/commande et rejet de perturbations.

[17]: CONDOR electronic .Catalogue des kits solaires,2014.

[18]: K. Kadda, Touati-Bergheul, M. Boudour , A. HadjArabetA.Malek. Etude de faisabilité de l'insertion d'une central photovoltaïque raccordée au réseau de distribution de Ghardaïa.Revue des Energies Renouvelables Vol.17 N°2(2014)309 – 322.

[19]: BRUXELLES ENVIRONNEMENT. Institut bruxellois pour la Gestion de l'Environnement, le photovoltaïque – module 5 –dimensionnement d'une installation PV,2010.

[20]: F. L. M. S. Issam Houssamo, "Maximum power tracking for photovoltaic power system: Development and experimental comparison of two algorithms," (elsevier) Contents listsavailableat ScienceDirect, 2010.

[21]: Zeidane, Bouna Ould, "Contribution to the Study of the Grid Connected Photovoltaic System," université de BatnaFaculté des Sciences de l'Ingénieur Mémoire de Magister,2006.

[22]: PACER. Centrale photovoltaïque, Guide pour le dimensionnement et la réalisation deprojets,1996.

[23]: A. Chouder¹, S. Silvestre ¹ and A. Malek ², "Simulation of photovoltaic grid connected inverter in case of grid-failure," *Revue des Energies Renouvelables*, vol. 9, no. 4, pp. 285-296, 2006.

[24]: F.Cherfa* ,A.Chouder, A.HadjArab,R.Oussaïd,F.ChenloetS.Sylverter,"Modélisation et simulation des composants de la mini-centrale photovoltaïque connectée au réseau du CDER,"*Revue des Energies Renouvelables ICRES*D, pp. 29-34, 2007.