

**UNIVERSITÉ KASDI MERBAH – OUARGLA**

**Faculté des sciences et technologies et sciences de la matière**

**Département : génie électrique**



**Mémoire**

**MASTER ACADEMIQUE**

Domaine : sciences et technologies

Filière : Génie électrique

Spécialité: Machine électrique et électronique de puissance

**Présenté par :**

**MECHALIKH Med Nadjib**

**HAMADA Charaf Eddine**

Thème

***Modélisation et simulation d'un système  
photovoltaïque en fonctionnement autonome  
et connecté au réseau***

Soutenu publiquement

Le : 25/06/2013

Devant le jury :

M.	A.DJELLAL	MAB	Président	UKM Ouargla
M.	M.BOUZIDI	MAB	Examineur	UKM Ouargla
M.	Y.GUEHRAR	MAA	Examineur	UKM Ouargla
M.	A.BOUHAFS	MAA	Encadreur/rapporteur	UKM Ouargla
M.	O.BOUAKAZ	MAA	Encadreur/rapporteur	UKM Ouargla

Année Universitaire : 2012 /2013

## **Remerciements**

*Avant tout, je remercie ALLAH, le tout puissant, de m'avoir donné le courage et la volonté pour accomplir ce travail*

*Nous tenons à remercier nos encadrateurs M Ali BOUHAFS et M Ouahid BOUAKKEZ d'avoir posé un sujet très intéressant et pour leurs conseils, leur disponibilité et pour nous avoir fait profiter de leurs connaissances et de leurs qualités tant professionnelles qu'humaines.*

*Nos respectueux remerciements à l'ensemble des membres du jury pour l'intérêt porté sur mon travail.*

*Nous voudrions témoigner notre reconnaissance à M Djamel TAIBI. Qu'il trouve ici l'expression de notre gratitude pour l'intérêt qu'il a accordé à notre travail. Nous voudrions aussi remercier M Khaled CHAIBAINOU qui nous a aidé pour le bon déroulement de ce travail et tout personne qui nous aidé à atteindre ce point-là.*

## Dédicaces

Je dédie ce modeste travail en premier lieu à mes parents qui m'ont soutenus pour me permettre de réaliser tous mes objectifs et qu'ils trouvent ici toute ma reconnaissance et ma gratitude.

A mon frère, ma sœur et toute ma famille

A mon binôme Charaf

A mon cher petit Raid

A tous mes enseignants depuis le primaire jusqu'à maintenant surtout nos enseignants du département génie électrique et en particulier M Laid KHETTACHE, M Yacine BOURK, M Mohamed Lakhdar LOUAZENE, M<sup>me</sup> Naima BENBOUZA, M<sup>me</sup> Amel BELKBIR.

A tous mes camarades et mes amis en particulier Houssam BOUZID, Jugurtha AITMOHAMED, Ramy BOUZID, Nader MAAMIR, Hakim TALBI, Rahim ALIOANE, Azdine KWIDRAT.

M<sup>ed</sup> Nadjib

## DEDICACE

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

*Je dédie ce modeste travail :*

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

*A mes frères*

*A mes sœurs*

*A belle-sœur assil*

*A mes grandes familles*

*Hamada et gheryssi*

*Aux chers amis surtout*

*Lokmane, dia elhak, Mustapha, houssam eddine, med Nadjib, ahmed ramy.....*

*A tous ce que j'aime et qui m'aiment*

*A tous mes collègues d'études surtout ceux*

*D'électrotechnique et MEP*

*A vous.....*

*Charaf Eddine*

## Table des matières

Introduction générale :.....	1
<b>Chapitre I : Généralité sur le photovoltaïque</b>	
I.1. Introduction :.....	2
I.2. L'énergie solaire :.....	2
I.3. Principes de calcul de l'énergie solaire : .....	3
I.3.1. La latitude ( $\psi$ ) :.....	3
I.3.2. La longitude ( $l$ ) : .....	3
I.3.3. L'altitude : .....	3
I.3.4. La déclinaison ( $\delta$ ) :.....	3
I.3.5. Le temps solaire vrai (TSV): .....	4
I.3.6. La durée et le taux d'insolation: .....	4
I.3.7. L'angle horaire :.....	4
I.3.8. Position du soleil :.....	5
I.4. Notions préliminaires sur le rayonnement solaire : .....	6
I.4.1. Rayonnement direct : .....	6
I.4.2. Rayonnement diffus :.....	6
I.4.3. Rayonnement réfléchi : .....	6
I.4.4. Rayonnement global : .....	7
I.5. Terminologie « photovoltaïque » - les dates importantes :.....	7
I.6. Cellules photovoltaïques :.....	8
I.6.1. Type des cellules photovoltaïques :.....	8
I.6.2. Principe de fonctionnement d'une cellule au silicium cristallin :.....	10
I.7. Module photovoltaïque :.....	11
I.8. Panneau photovoltaïque :.....	12
I.9. Modélisation d'une cellule photovoltaïque : .....	14
I.9.1. Modèle de cellule :.....	14
I.9.2. Modèle de simulation : .....	18
I.10. Influence de l'éclairement et de la température :.....	18
I.10.1. Influence de l'irradiation :.....	18
I.10.2. Influence de la température :.....	19
I.11. Avantages et inconvénients d'une installation PV .....	19
I.11.1. Avantage : .....	19
I.11.2. Inconvénient :.....	20
I.12. Conclusion : .....	20
<b>Chapitre II : modélisation et simulation des éléments du système photovoltaïque</b>	
II.1. Introduction :.....	21

II.2.	Electronique de puissance :.....	21
II.2.1.	Electronique de puissance et la conversion électrique :.....	22
II.2.2.	Convertisseurs électriques :.....	22
II.2.3.	Les Interrupteurs : .....	22
II.3.	Les Hacheurs : .....	23
II.3.1.	Exigences de l'utilisateur :.....	23
II.3.2.	Type des hacheurs : .....	24
II.3.2.1.	Hacheur Buck : .....	24
II.3.2.2.	Hacheur boost :.....	27
II.3.2.3.	Hacheur Buck-Boost : .....	29
II.4.	Commande MPPT : .....	32
II.5.	Les méthodes de poursuite de MPP :.....	32
II.5.1.	Méthodes a contre réaction de tension :.....	32
II.5.2.	Méthodes a contre réaction de courant : .....	32
II.5.3.	Méthodes a contre réaction de puissance :.....	32
II.5.3.1.	Algorithme perturbation et observation.....	33
II.5.3.2.	Algorithme incrémentation de la conductance .....	34
II.6.	Simulation du system photovoltaïque avec hacheur commandé en MPPT :.....	35
II.6.1.	Schéma de simulation : .....	36
II.6.2.	Résultat de simulation :.....	36
II.7.	Les onduleurs :.....	37
II.7.1.	Structure d'onduleur : .....	38
II.7.2.	Classification des onduleurs :.....	39
II.7.3.	Principe de fonctionnement : .....	39
II.7.3.1.	Commande plein onde :.....	39
II.7.3.2.	Commande MLI : .....	39
II.8.	Simulation globale de système PV en fonctionnement autonome:.....	40
II.8.1.	Schéma de simulation : .....	41
II.8.2.	Résultat de simulation :.....	41
II.9.	Conclusion : .....	42

### **Chapitre III : générateur PV raccordé au réseau**

III.1.	Introduction :.....	43
III.2.	Réseau électrique : .....	43
III.3.	Problème de connexion des systèmes photovoltaïques au réseau : .....	44
III.4.	Perturbations des réseaux électriques : .....	44
III.5.	Modélisation de réseau BT : .....	45
III.5.1.	Modèle mathématique :.....	45

III.5.2. Schéma de simulation de réseau : .....	46
III.6. Simulation global de PV raccordé au réseau : .....	46
III.6.1. Schéma de simulation : .....	46
III.6.2. Résultat de simulation : .....	48
III.7. Conclusion : .....	50
Conclusion générale.....	49
Conclusion générale :.....	51
Annexe : .....	53
Bibliographie : .....	54

# INTRODUCTION GÉNÉRALE



## **Introduction générale :**

Les énergies renouvelables se manifestent comme une solution potentielle à la réduction de la pollution. Parmi les moyens de production prometteurs (éolien, hydraulique...), le photovoltaïque (PV) apparaît aujourd'hui comme le plus approprié et le plus abouti à la production d'électricité d'origine renouvelable pour l'habitat. Ajoutons à cela la libéralisation du marché de l'électricité qui introduit des changements majeurs dans le domaine de l'énergie. La multiplication des producteurs indépendants et des productions décentralisées [36].

Par énergie renouvelable, on entend des énergies issues du soleil, du vent, de la chaleur de la terre, de l'eau ou encore de la biomasse. La filière étudiée dans ce mémoire est l'énergie solaire photovoltaïque. L'énergie solaire photovoltaïque (PV) est en forte croissance depuis quelques années car c'est une source inépuisable, non polluante pour l'environnement, silencieuse et non dérangeante pour les riverains. Le développement rapide de l'énergie solaire est apparu progressivement sous forme d'installations de petites puissances raccordées au réseau à Basse Tension (BT) et de fermes solaires connectées directement au réseau à Moyenne Tension (HTA).

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

Le but de ce travail est conception d'un système de conditionnement pour raccorder les systèmes photovoltaïques et le réseau électrique. La rédaction de notre mémoire se compose de trois chapitres :

Au premier chapitre, on fait une description générale sur les gisement solaire et la production de l'énergie par le photovoltaïque.

Le deuxième chapitre décrit une étude préliminaire des convertisseurs DC/DC et DC-AC, et leur principe et les différents types existants. Nous avons aussi présenté leur modèle mathématique ainsi que leur commande.

Le troisième chapitre présente la structure actuelle du réseau électrique. La modélisation des composants du réseau de distribution ainsi que le raccordement des systèmes PV au réseau.

CHAPITRE I :  
GÉNÉRALITÉ SUR LE  
PHOTOVOLTAÏQUE

## **I.1. Introduction :**

L'électricité, forme propre de l'énergie par excellence, est aujourd'hui produite, à près de 80 %, à partir de combustibles fossiles (pétrole, gaz,...) ou fissiles (nucléaire), ressources épuisables et polluantes à la fois. Pour un développement durable, les ressources énergétiques renouvelables sont « propres » et inépuisables, donc capables à long terme de satisfaire la majeure partie de nos besoins [1].

La prise de conscience que les coffres forts de la nature s'épuisent inexorablement est récente, mais les comportements sont longs à modifier. Sauf pour le bois, il faut des millions d'années pour que la nature fabrique des combustibles comme le charbon, le pétrole, ou le gaz naturel. Les énergies renouvelables sont des énergies issues du soleil, du vent, de la géothermie, des chutes d'eau, des marées ou de la biomasse ; leur exploitation n'engendre pas ou peu de déchets et d'émissions polluantes : ce sont les énergies de l'avenir ! [2].

Les cellules photovoltaïques (PV) ouvrent la possibilité de produire de l'électricité directement à partir du rayonnement solaire, sans nécessiter ni pièces mobiles, ni production de chaleur et sans entraîner de pollution atmosphérique, locale ou globale [3]. Ainsi que l'énergie produite est continue donc elle peut être stockée facilement pour l'utiliser une autre fois.

Dans ce chapitre nous présentons premièrement la définition de l'énergie solaire suivie de la construction des cellules photovoltaïques. Puis nous nous intéressons à présenter le principe de fonctionnement. Enfin nous abordons les différents types des cellules photovoltaïques.

## **I.2. L'énergie solaire :**

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

- L'énergie solaire thermique: qui consiste tout simplement à produire de la chaleur grâce à des panneaux solaires. On peut aussi produire avec de la vapeur à partir de la chaleur du soleil puis convertir la vapeur en électricité.

- L'énergie solaire photovoltaïque: qui consiste à produire directement de l'électricité à partir de la lumière à l'aide de panneaux solaires. Cette forme d'énergie est déjà exploitée dans de nombreux pays, surtout dans les pays ou les régions ne disposant pas de ressources énergétiques conventionnelles tels que les hydrocarbures ou le charbon [4].

### **I.3. Principes de calcul de l'énergie solaire :**

Avant d'entrer dans le calcul de l'irradiation solaire, certains principes de base et définitions méritent d'être rappelés, notamment plusieurs variables qui seront mentionnées à plusieurs reprises par la suite.

#### **I.3.1. La latitude ( $\psi$ ) :**

C'est l'angle formé par le plan équatorial et la direction reliant le lieu considéré, au centre de la terre. Les latitudes de l'hémisphère Nord sont affectées d'un signe positif et celles de l'hémisphère Sud d'un signe négatif [5].

#### **I.3.2. La longitude ( $l$ ) :**

Représente l'angle formé par le plan méridien de lieu considéré et le plan méridien origine. Ce dernier passe par l'observatoire de Greenwich et a pour longitude 00. Les longitudes situées à l'est de ce méridien sont positives et celles situées à l'Ouest négatives [5].

#### **I.3.3. L'altitude :**

L'altitude est l'élévation d'un lieu par rapport au niveau de la mer, mesurée en mètre (m).

#### **I.3.4. La déclinaison ( $\delta$ ) :**

C'est l'angle entre la direction du soleil et le plan équatorial Elle traduit l'inclinaison du plan équatorial par rapport au plan écliptique. La déclinaison varie entre  $-23.45^\circ$  (le 21 décembre) et  $+23.45^\circ$  (le 21 juin) (fig.I.1). Cet angle varie très peu pendant une journée, ce qui permet d'approcher le mouvement quotidien du soleil par une rotation sur cône d'axe l'équateur [5], [6].

$$\delta = 23.45 \cdot \sin\left(2\pi \frac{284 + n}{365}\right) \quad (I.1)$$

Où : n est le numéro de jour dans l'année.

### I.3.5. Le temps solaire vrai (TSV):

Défini par l'angle horaire  $\rho$  entre le plan méridien passant par le centre du Soleil et le méridien du lieu considéré. Il est compté de 0 à 24h à partir du midi vrai lorsque le Soleil culmine en un lieu donné [7].

La vitesse de la Terre sur sa trajectoire étant soumise à des variations, le jour solaire vrai n'est pas constant. Ainsi, un temps solaire moyen a été retenu comme unité de temps, le jour solaire moyen est défini [7].

$$TSV = 12 + \frac{\rho}{15} \quad (I.2)$$

### I.3.6. La durée et le taux d'insolation:

Par ciel claire et pendant la durée de jour d'ensoleillement  $S_0$  (de lever au coucher du soleil), le sol reçoit le rayonnement solaire maximal. Mais la durée effective d'ensoleillement  $S$  d'une journée ordinaire est inférieure à cette durée maximale [6].

Le taux d'insolation est donné par l'expression:

$$\sigma = \frac{S}{S_0} \quad (I.3)$$

La durée maximale  $S_0$  est calculée par l'expression suivante [7] :

$$S_0 = \left(\frac{2}{15}\right) \cos^{-1}(-\tan \psi \cdot \tan \delta) \quad (I.4)$$

Avec  $\delta$  : La déclinaison

$\psi$  : La latitude du lieu

### I.3.7. L'angle horaire :

C'est l'angle formé entre le plan méridien passant par le soleil et le plan méridien du lieu obtenu par le déplacement angulaire du soleil autour de l'axe polaire, dans sa course d'Est en Ouest, par rapport au méridien local. La valeur de l'angle est nulle à midi solaire, négative le matin, positive en après-midi et augmente de  $15^\circ$  par heure (donc un tour de  $360^\circ$  en 24 heures) [6].

**I.3.8. Position du soleil :**

La direction du soleil dans le ciel est repérée par l'intermédiaire de deux angles :

- La hauteur angulaire ( $h$ ) : Qui détermine la longueur de la traversée de la l'atmosphère est l'angle formé par la direction de soleil et le plan horizontal. Sa valeur sera comprise entre 00 (au lever et au coucher) et maximum au zénith (midi en temps solaire vrai) [5], [6].

Quand le sinus est négatif, c'est que le soleil n'est pas encore levé (la durée des journées varie dans l'année). Il faut donc écrêter cette variable

$$\sin(h) = \sin(\psi)\sin(\rho) + \cos(\psi)\cos(\rho)\cos(\delta) \quad (I.5)$$

L'angle horaire  $\rho_s$  au lever de soleil s'obtient en écrivant  $\sin(h) = 0$  :

$$\cos(\rho_s) = -\tan(\psi)\tan(\delta) \quad (I.6)$$

Où ( $\delta$ ) la déclinaison calculée d'après l'équation (1.1) et ( $\psi$ ) la latitude du lieu.

- Azimut du soleil ( $\beta$ ) : Angle que fait la projection de la direction du soleil avec la direction du sud. Cet angle étant orienté positivement vers l'Ouest [5], [6].

$$\sin(\beta) = \frac{\cos(\delta)\sin(\rho)}{\cos(h)} \quad (I.7)$$

Ces deux angles sont représentés sur la figure 1.2.

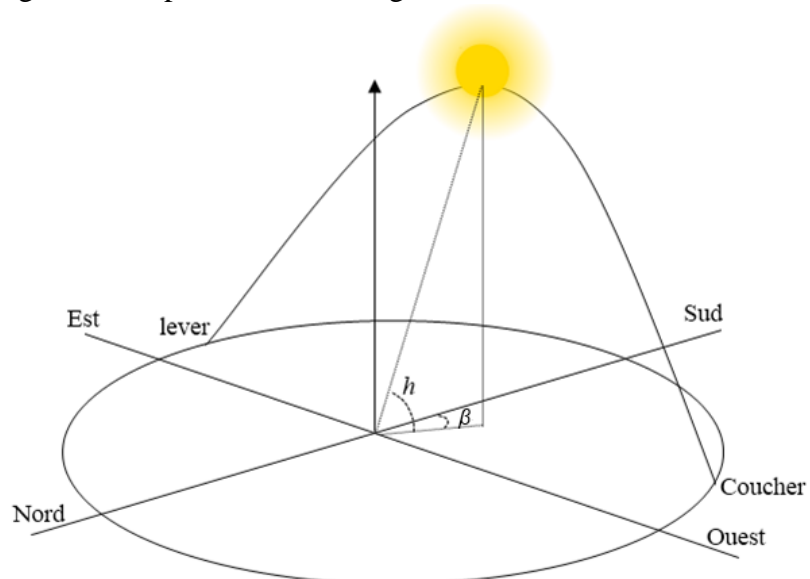


Fig.I. 1: Position du soleil.

Pour le site de Ouargla, les spécifications sont données par les grandeurs météorologiques suivantes [6]:

- La latitude : 31N
- La longitude : 5°24'E
- L'altitude : 141m
- Albédo : 0.35

#### **I.4. Notions préliminaires sur le rayonnement solaire :**

Le rayonnement solaire est constitué de photons dont la longueur d'onde s'étend de l'ultraviolet ( $0.2 \mu m$ ) à l'infrarouge lointain ( $2.5 \mu m$ ). On utilise la notion AM pour Air Mass afin de caractériser le spectre solaire en termes d'énergie émise [5]. Pour tenir compte de la distance traversée par les rayons, il est nécessaire d'introduire une notion de masse d'air (AM) elle correspond à la longueur relative du parcours à travers l'atmosphère terrestre traversée par le rayonnement solaire direct. La masse d'air est exprimée un multiple du trajet parcouru en un point au niveau de la mer, le soleil étant directement à l'aplomb [8].

Au niveau du sol le rayonnement global reçu par une surface plane d'inclinaison quelconque est constitué de trois composantes principales :

##### **I.4.1. Rayonnement direct :**

Flux solaire sous forme de rayons parallèles provenant de disque soleil sans avoir été dispersé par l'atmosphère. [9].

##### **I.4.2. Rayonnement diffus :**

C'est la partie du rayonnement provenant du soleil, ayant subi multiples réflexions (dispersions), dans l'atmosphère. [9].

##### **I.4.3. Rayonnement réfléchi :**

C'est la partie de l'éclairement solaire réfléchi par le sol, ce rayonnement dépend directement de la nature du sol (nuage, sable...). Il se caractérise par un coefficient propre de la nature de lien appelé Albédo ( $\varepsilon$ )  $0 \leq \varepsilon \leq 1$ [5].



#### I.4.4. Rayonnement global :

Un plan reçoit de la part du sol un rayonnement global qui est le résultat de la superposition des trois compositions direct, diffus et réfléchi

#### I.5. Terminologie « photovoltaïque » - les dates importantes :

Le terme « photovoltaïque » vient du grec «phos, photo» qui désigne la lumière et de «voltaïque», mot dérivé du physicien italien Alessandro VOLTA, connu pour ses travaux sur l'électricité. Une cellule photovoltaïque est donc une machine à produire de l'électricité sans mouvement circulaire, sans vapeur d'eau sous pression, sans turbine, sans refroidissement (sauf dans le cas des systèmes à concentration). Dès qu'elle est éclairée par de la lumière, elle se met à fonctionner. Le Tableau 1 résume les événements importants de l'histoire du photovoltaïque [10].

1839	Le physicien français Edmond Becquerel découvre l'effet photovoltaïque
1883	Fritts réalise des cellules solaires de grande surface à base de Se
1954	Des rendements de 6% sont obtenus : Si (Bell Lab, USA) and Cu <sub>2</sub> S/CdS (Air Force, USA)
1955	Hoffman électroniques (USA) propose des cellules Si à 2 % de rendement à \$1500/W
1958	Kearns et Calvin ont démontré l'effet photovoltaïque d'une cellule à base de MgPh
1970	Première cellule solaire à hétérostructures GaAs élaborée par Alferov, Andree et al. en URSS
1973	Première maison alimentée par des cellules photovoltaïques est construite à l'université Delaware, USA ; à base de Cu <sub>2</sub> S
1980	La première cellule à base de Cu <sub>2</sub> S/CdS délivrant un rendement > 10%
1982	Première unité de production de 1 MW (Californie, USA) avec des cellules Arco Si
1985	Les cellules à base de Si donnent un rendement > 20% sous le rayonnement solaire
1994	Des rendements > 30 % avec des cellules à concentration multijonctions à base de GaInP/GaAs (NREL, USA)
1996	Les cellules solaires hybrides à colorants atteignent un rendement de 11% (EPFL, Switzerland)
1998	Cellules couches minces Cu(InGa)Se <sub>2</sub> atteignent un rendement de 19% (NREL, US)
2002	Le photovoltaïque installé mondial cumulatif atteint 2000 MW
2007	Cellules solaires organiques en structure tandem avec un rendement de 6,5 % (UCSB, USA)
2008	Un rendement homologué de 5,9% sur une surface active de 2 cm <sup>2</sup> obtenu par Heliatek, BASF et l'Institut de photovoltaïque appliquée (IAPP) de l'Université technique de Dresde (Allemagne)
2009	Cellule polymère simple jonction avec un rendement de 6,1 % à base de PCDTBT et PC70BM (UCSB, USA)
	Cellule polymère simple jonction avec un rendement de 7,4 % à base de PBDTTT-CF et PC70BM (Solarmer Energy Inc., University of California, University of Chicago, USA)

Tab.I. 1: Evénements notables dans l'histoire du photovoltaïques [10].

Cellule solaire et photopile sont des termes équivalents qui désignent généralement des capteurs de petite taille, utilisés soit tels quels, soit en assemblage dans un panneau solaire, ou module photovoltaïque.

Quant au mot photogénérateur, il regroupe l'ensemble de ces composants d'énergie lumière en électricité, c'est pourquoi nous l'utiliserons pour les exposés d'ordre général [11].

## **I.6. Cellules photovoltaïques :**

Les cellules solaires sont des composants optoélectroniques qui transforment directement la lumière solaire en électricité par un processus appelé « effet photovoltaïque » [5], car le soleil est la source lumineuse la plus intense de notre planète, et la plupart des applications sont en plein air. Mais certains préfèrent l'expression énergie lumière, pour insister sur le fait que toute source de lumière, même artificielle (ampoules, tubes fluorescents...), peut générer de l'électricité à travers une cellule solaire [11].

### **I.6.1. Type des cellules photovoltaïques :**

Dans cette partie, nous présentons les différentes cellules photovoltaïques en donnant leurs caractéristiques principales selon le type de matériaux utilisés.

#### **a) Cellules inorganiques :**

- Cellule silicium

Le silicium polycristallin présente une couleur grise. Il est constitué d'une mosaïque de cristaux monocristallins de silicium, d'orientation et de tailles différentes (fig.I.2.a). Le silicium monocristallin ainsi obtenu, sous forme de lingots circulaires, est constitué d'un seul type de cristal et présente une couleur uniforme grise (fig.I.2.b). Le silicium monocristallin, plus élaboré que le silicium polycristallin, présente un rendement (conversion de l'énergie lumineuse en énergie électrique) supérieure. Sa production demande cependant une plus grande dépense énergétique [12].

- Cellules en couches minces :

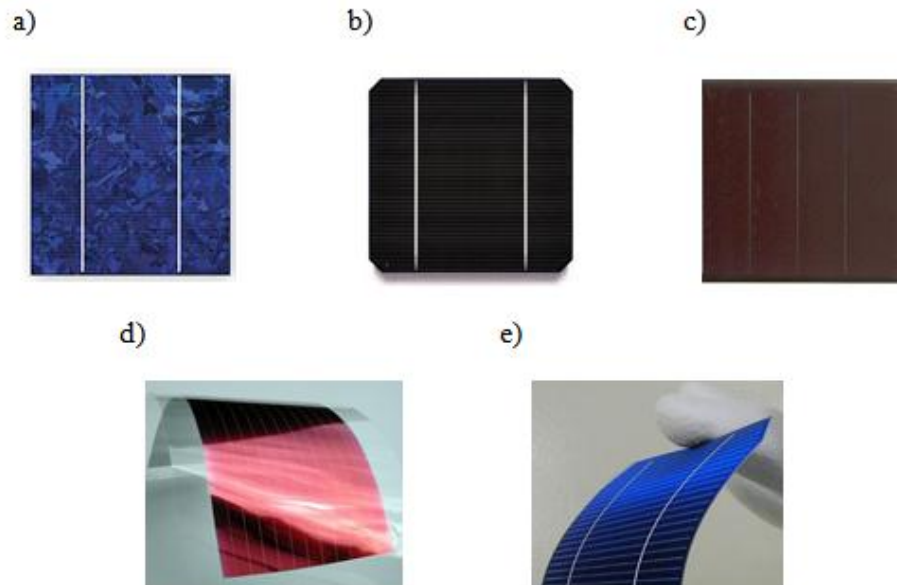
D'autres filières sont en cours de développement dans le secteur photovoltaïque inorganique comme les cellules dites de seconde génération composées de couches minces de matériaux inorganiques (fig.I.2.c). Les matériaux photoactifs les plus utilisés en couche minces sont le silicium amorphe (a-Si), le diséléniure de cuivre indium (CIS), le tellure de cadmium (CdTe). L'avantage principal des cellules photovoltaïques composées de couches minces de matériaux inorganiques est le faible coût de production par rapport à celui des cellules composées de silicium épais [13].

**b) Cellules de Grätzel :**

La couche active de ces cellules est composée d'une matrice poreuse de nano-cristallites d'oxyde métallique semi-conducteur ( $\text{TiO}_2$ ,  $\text{ZnO}$ ,  $\text{SnO}_2$ ,  $\text{Nb}_2\text{O}_5$ ) recouverte d'une monocouche de colorant (complexe de ruthenium ou de ditetra-butylammonium). En absorbant les photons le colorant va libérer un électron dans la bande de conduction de l'oxyde métallique. Le colorant oxydé va être ensuite réduit par l'électrolyte liquide qui est en général une solution d'iodure ( $\text{I}_2$ ). Ces cellules ont un coût de production un peu plus élevé que les cellules photovoltaïques tout polymère mais les rendements de conversion photoélectriques avoisinent les 10% [13].

**c) Cellules organiques :**

Les cellules connaissent un développement rapide et leur rendement de conversion ont franchi récemment la barre des 8%. Les matériaux les plus répondus dans le domaine du photovoltaïque organique à base de polymères est le mélange poly(3-hexylthiophene) (P3HT) le 6,6-phenyl-C61-butyric acide méthyl ester(PCBM) (fig.I.2.d) [14].



*Fig.I. 2: Des cellules photovoltaïques*

**d) Cellules hybrides :**

Les cellules hybrides sont composées d'un semi-conducteur organique et d'un semi-conducteur inorganique comme l'oxyde de titane ( $\text{TiO}_2$ ), l'oxyde de zinc ( $\text{ZnO}$ ) ou le séléniure de cadmium ( $\text{CdSe}$ ). Le principal avantage de ces cellules par rapport aux cellules

organiques est l'absence de 6,6-phenyl-C61-butyric acide méthyl ester (PCBM) ou de fullerène (C60) qui sont les matériaux les plus sensibles à l'oxygène, ce qui permet d'améliorer nettement la stabilité des cellules à l'air ambiant (fig.I.2.e). t. De plus ces cellules bénéficient des qualités des matériaux organiques comme la souplesse et la facilité de mise en forme et des qualités des matériaux inorganiques comme les mobilités élevées des charges électriques [13].

### I.6.2. Principe de fonctionnement d'une cellule au silicium cristallin :

Le but des cellules photovoltaïques est de convertir l'énergie lumineuse provenant du Soleil en énergie électrique. Ceci se fait en trois étapes [15]:

- Absorption des photons de la lumière solaire.
- Conversion de l'énergie reçue par les photons en énergie électrique (particules électriques libres).
- Collecte les particules dans un circuit électrique externe.

Le matériau constituant la cellule photovoltaïque doit donc posséder deux niveaux d'énergie et être assez conducteur pour permettre l'écoulement du courant, d'où l'intérêt des semi-conducteurs pour l'industrie photovoltaïque.

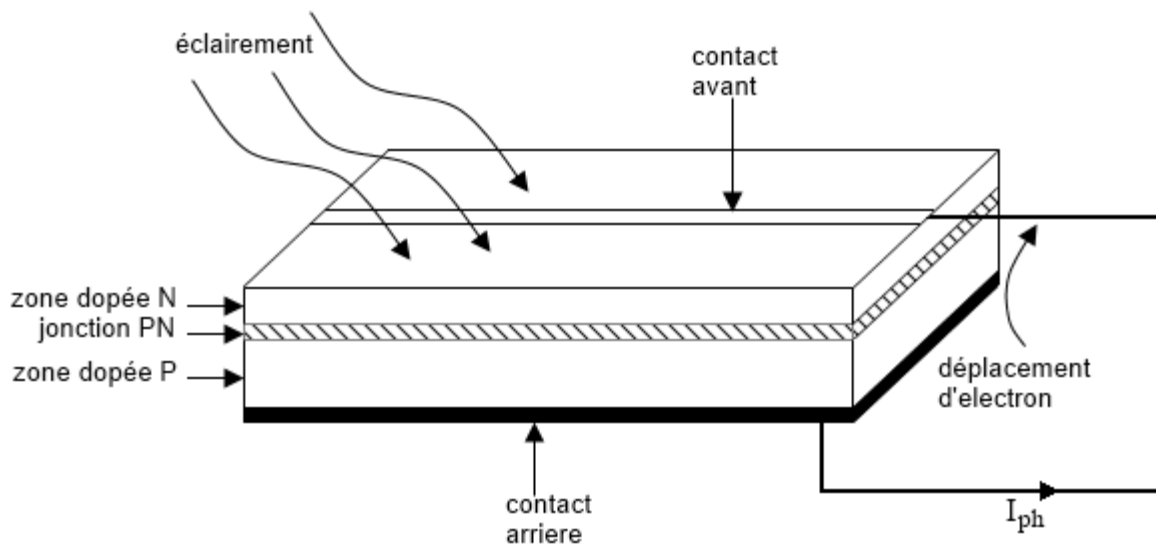


Fig.I. 3: Structure d'une cellule photovoltaïque

En résumé, technologiquement, un capteur PV est proche d'une diode PN de par sa constitution, les matériaux utilisés, et les phénomènes physiques identiques mis en œuvre. Le comportement d'une cellule PV peut donc se modéliser comme celui d'une mauvaise jonction PN autant en statique qu'en dynamique lorsque cette dernière n'est pas éclairée. Pour tenir compte du courant engendré par l'éclairage de la cellule et des différentes résistances modélisant les pertes dues à la connectique, trois termes sont ajoutés  $I_{sc}$ ,  $R_S$  et  $R_P$  [16].

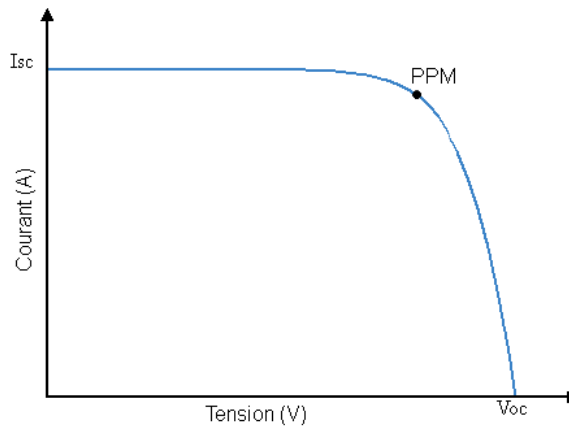


Fig.I. 4: Caractéristiques courant-tension de la cellule photovoltaïque

A partir de la caractéristique  $I(V)$  sous éclairage de la cellule photovoltaïque, on déduit les paramètres électriques propres à la cellule et notamment :

- $I_{sc}$  : Courant de court-circuit (obtenu pour  $V = 0$ )
- $V_{oc}$  : Tension en circuit ouvert (obtenu pour  $I = 0$ )
- Le point de fonctionnement optimal PPM (la puissance maximale de la cellule).

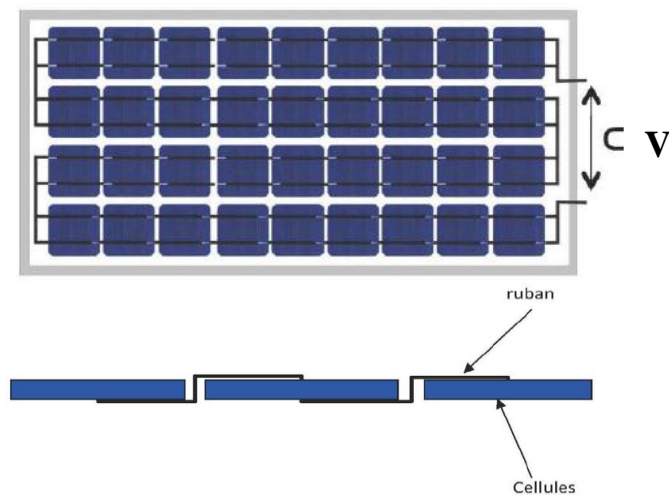
### **I.7. Module photovoltaïque :**

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, délivre au maximum, quelques watts sous une tension inférieure au volt (tension de jonction PN). Pour produire plus de puissance, plusieurs cellules doivent être assemblées afin de créer un module ou un panneau photovoltaïque. En effet, les modules PV sont composés d'un ensemble de cellules mises en série, réalisant la conversion proprement dite de la lumière du soleil en électricité. Ils sont eux-mêmes associés en série et parallèle pour former un champ photovoltaïque d'une puissance crête définie selon des conditions spécifiques d'éclairage, de température et de

spectre solaire. La plupart des modules commercialisés sont constitués de deux à quatre réseaux de cellules en silicium cristallins connectés en série [18].



*Fig.I. 5 : Module photovoltaïque*



*Fig.I. 6 : Câblage des cellules dans un module*

Les modules photovoltaïques assurent les fonctions suivantes :

- Protection des cellules contre les agents atmosphériques
- Protection mécanique et support.
- Connexion électrique entre cellules et avec l'extérieur [5].

### **I.8. Panneau photovoltaïque :**

Le panneau solaire ou (champ solaire) se compose de modules photovoltaïques interconnectés en série et/ou en parallèle afin de produire la puissance requise. Ces modules sont montés sur une armature métallique qui permet de supporter le champ solaire avec un angle d'inclinaison spécifique [5].



*Fig.I. 7: Panneau photovoltaïque*

Pour chaque panneau on peut avoir autant de sorties que de modules, ce que fait qu'on aura besoin de boîte de dérivation qui regroupe le tous, Alors cette boîte de dérivation fixée sur une structure du montage a comme rôle d'effectuer les connections entre les modules pour obtenir une puissance optimale en sortie.



*Fig.I. 8 : Boite de dérivation.*

La boîte de dérivation est composée également d'un circuit imprimé sur lequel se trouvent :

- Des diodes schotcky séries, placée sur un radiateur, sur chaque entrée, qui empêchent aux batteries de se décharger dans les panneaux.
- Des fusibles de protections qui empêcheront aux batteries de se décharger dans les modules en cas de destruction des diodes antiparallèles.
- Des diodes lumineuses, en parallèle sur chaque fusible de protection. Ces diodes permettant de contrôler individuellement chaque branche de modules. Par exemple une boîte à 4 entrées de 24 Volts sera constituée de deux branches de deux modules, il y aura donc deux diodes qui permettront de constater le fonctionnement de chaque branche.
- Une protection parafoudre (Transil ou VDR) en sortie de la boîte.

Le câblage de ces boîtes permet d'avoir une sortie en 12,24 ou 48 volts selon les modules, elles sont équipées de deux à douze entrées, selon les tensions de sortie. La quantité d'électricité dans l'ensemble des composants des panneaux PV dépend :

- des besoins en électricité.
- la taille du panneau.
- L'ensoleillement du lieu d'utilisation.
- La saison d'utilisation [5].

## I.9. Modélisation d'une cellule photovoltaïque :

### I.9.1. Modèle de cellule :

Les solutions analytiques donnent une compréhension intuitive des cellules solaires et de leurs performances. Elles sont limitées dans leurs précisions en raison des nombreuses hypothèses simplificatrices effectuées. Il est plus direct de résoudre les équations sans la nécessité de faire autant d'hypothèses simplificatrices avec des codes de calcul utilisant la méthode des différences ou éléments finis pour résoudre les équations concernant des matériaux semi-conducteurs constitutifs des cellules solaires. La simulation numérique permet une analyse de la configuration et des conditions de fonctionnement pour laquelle des expressions analytiques simples ne sont pas adaptées.

Une cellule photovoltaïque a un comportement équivalent à une source de courant shuntée par une diode (fig.I.9). Le modèle est complété par une résistance série  $R_s$  due à la contribution des résistances de base et du front de la jonction et des contacts face avant et arrière et une résistance parallèle ou shunt  $R_p$  qui provient des contacts métalliques et des résistances de fuite sur la périphérie de la cellule

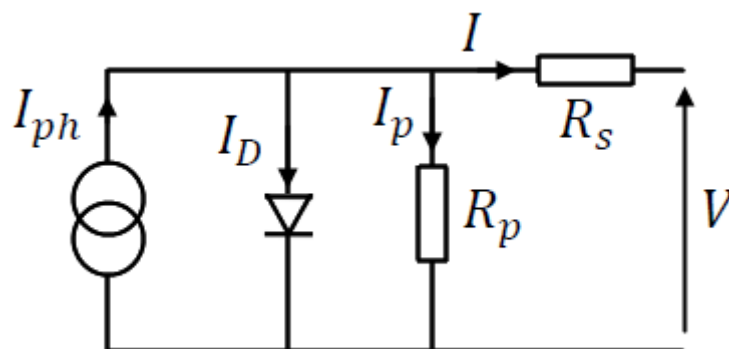


Fig.I. 9: Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque



En notant :

$$I = I_{ph} - I_D - I_p \quad (I.8)$$

Avec:

$$I_D = I_0 \left[ \exp\left(\frac{V + I \cdot R_s}{nV_T}\right) - 1 \right] \quad (I.9)$$

$$I_p = \frac{V + I \cdot R_s}{R_p} \quad (I.10)$$

$$I_0 = I_{SC} / \left[ \exp\left(\frac{V_{OC}}{nV_T}\right) - 1 \right] \quad (I.11)$$

$$I_{SC} = I_{SCR} \left( \frac{G}{1000} \right) \quad (I.12)$$

$$V_T = \frac{KT}{q} \quad (I.13)$$

Où

$I$ : Courant fourni par la cellule.

$V$ : Tension aux bornes de la cellule

$I_D$ : Courant de diode.

$I_{ph}$ : Photocourant, dépendant de l'intensité de l'irradiation.

$I_p$ : Le courant dérivé par la résistance parallèle.

$I_0$ : Courant de saturation de diode, dépendant de la température

$I_{SC}$ : Le courant de court-circuit de référence

$V_{OC}$ : La tension de circuit ouvert

$V_T$ : La tension thermique

$I_{SCR}$ : Courant de court-circuit de référence.

$R_p$ : Résistance en parallèle, représentant l'admittance parallèle du générateur de courant

$R_s$ : Résistance en série, modélisant les pertes ohmiques du matériau et des contacts

$G$ : L'irradiation solaire en  $W/m^2$

$q$  : Charge d'électron  $1.602 \cdot 10^{-9} C$ ,

$K$ : Constante de Boltzmann  $1.381 \cdot 10^{-23} J/K$

$n$ : Facture de non idéalité de la jonction comprise entre 1 et 5 dans la pratique.

$T$ : La température effective de la cellule en kelvin.

$$I = I_{ph} - I_0 \left[ \exp\left(\frac{V + I \cdot R_s}{nV_T}\right) - 1 \right] - \frac{V + I \cdot R_s}{R_p} \quad (I. 14)$$

La photopile réelle à une résistance série  $R_s$  dont l'influence est plus forte lorsque l'appareil fonctionne dans la région de source de tension, et une résistance parallèle  $R_p$  ayant une influence plus grande dans la région de fonctionnement en source de courant.

La caractéristique (I-V) de la photopile représentée sur la figure I.4 dépend de ses caractéristiques internes ( $R_s, R_p$ ) et des facteurs externes comme l'irradiation et la température. Dans les modèles photovoltaïques, on suppose généralement que  $I_{ph} = I_{SC}$  parce que dans la photopile réelle, la résistance série est faible et la résistance parallèle est élevée [7].

Donc l'équation(I. 14) devienne :

$$I = I_{ph} - I_0 \left[ \exp\left(\frac{V + I \cdot R_s}{nV_T}\right) - 1 \right] \quad (I. 15)$$

Calcul de la résistance série dans le point

$$dI = 0 - I_0 \left( \frac{dV + dI \cdot R_s}{nV_T} \right) \left[ \exp\left(\frac{V + I \cdot R_s}{nV_T}\right) \right] \quad (I. 16)$$

$$R_s = -\frac{dV}{dI} - \frac{nV_T}{I_0 \exp\left(\frac{V + I \cdot R_s}{nV_T}\right)} \quad (I. 17)$$

Enfin, pour résoudre l'équation de caractéristique non linéaire, on utilise la méthode de Newton décrite par :

$$x_{n+1} = x_n - \frac{f(x_n)}{f'(x_n)} \quad (I. 18)$$

Où :

$f'(x_n)$ : Le dérivé de la fonction  $f(x_n)$

$x_n$ : La présente itération.

$x_{n+1}$ : L'itération suivante.

Ainsi, on se pose que  $I_{ph} = I_{sc}$ , l'équation(I. 15) devient sous la forme suivante :

$$f(I) = I_{sc} - I - I_0 \left[ \exp\left(\frac{V + I \cdot R_s}{nV_T}\right) - 1 \right] = 0 \quad (I. 19)$$

En remplaçant dans l'équation(I. 18), on calcule le courant ( $I$ ) par les itérations [11] :

$$I_{n+1} = I_n - \frac{I_{sc} - I - I_0 \left[ \exp\left(\frac{V + I \cdot R_s}{nV_T}\right) - 1 \right]}{-1 - I_0 \left(\frac{R_s}{nV_T}\right) \left[ \exp\left(\frac{V + I \cdot R_s}{nV_T}\right) \right]} \quad (I. 20)$$

Les équations précédentes ne sont valables que pour un mode de fonctionnement optimal. Pour généraliser notre calcul pour différents éclairagements et températures, nous utilisons le modèle qui déplace la courbe de référence à de nouveaux emplacements.

$$I_{sc}(T) = I_{scR}(T_R) \cdot [1 + \alpha(T - T_R)] \quad (I. 21)$$

$$I_0(T) = I_0(T_R) \cdot \left(\frac{T}{T_R}\right)^{\frac{3}{n}} \cdot \left[ \exp\left(\frac{-q \cdot Eg}{nK}\right) \cdot \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_R}\right) \right] = 0 \quad (I. 22)$$

Où

$\alpha$ : Le coefficient de variation du courant en fonction de la température.

$T_R$ : La température de référence, 298k (25°C).

$Eg$ : L'énergie de la bande interdite (gap) du semi-conducteur (en eV)  $Eg \approx 1,12eV$  pour le silicium poly-cristallin à 25°C

Pour réaliser cette modélisation, nous avons utilisé MATLAB comme outil de tests et de simulation. Nous avons choisi le modèle photovoltaïque BP SX 150 de BP Solaire. La série SX de BP Solaire fournit une puissance photovoltaïque rentable destinée à un usage général par exploitation directe de charges courant continu, ou de charges courant alternatif sur les

systèmes munis d'onduleur. Le module est composé de 72 cellules solaires multi cristallines en silicone connectées en série pour produire une puissance maximale de 150 W [6].

Les caractéristiques électriques de ce module photovoltaïque a la température 25° et l'irradiation 1000 W/m<sup>2</sup> sont données dans le tableau suivant :

Puissance maximale $P_{max}$	150 W
Tension nominale $V_m$	34.5 V
Courant nominale $I_m$	4.35 A
Courant de court-circuit $I_{sc}$	4.75 A
Tension à circuit ouvert $V_{oc}$	43.5 V

Tab.I. 2 Les caractéristiques électriques de ce module photovoltaïque "BP SX 150"

**I.9.2. Modèle de simulation :**

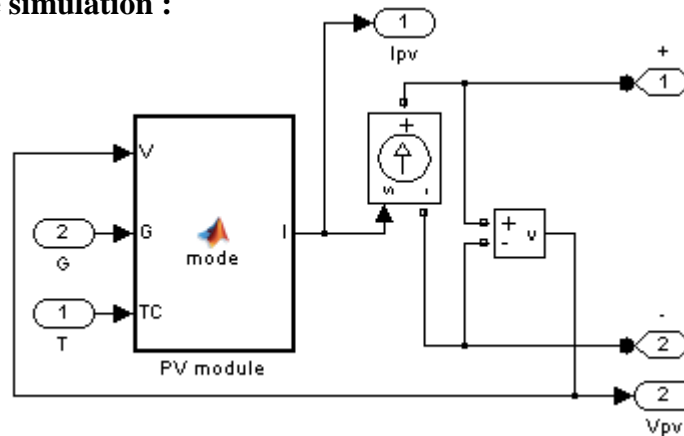


Fig.I. 10 : Modèle de simulation d'un générateur PV

**I.10. Influence de l'éclairement et de la température :**

Les caractéristiques d'un panneau dépendent de l'éclairement et de la température. Selon la technologie du générateur photovoltaïque, les variations des paramètres seront différentes.

**I.10.1. Influence de l'irradiation :**

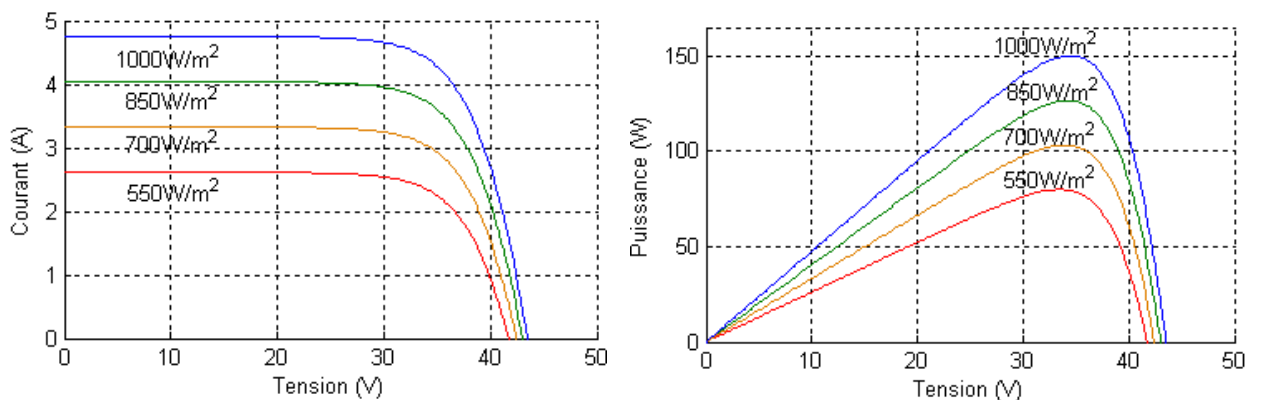


Fig.I. 11: Evolution de la caractéristique (I-V) et (P-V) du module en fonction de l'irradiation

Le courant  $I_{SC}$  varie directement avec le rayonnement lumineux (la relation est proportionnelle), la tension restant relativement constante. On remarque dans la figure (fig.1.11) que le courant optimal est très sensible à l'éclairement. Par contre la tension optimal varie très peu avec l'éclairement.

### I.10.2. Influence de la température :

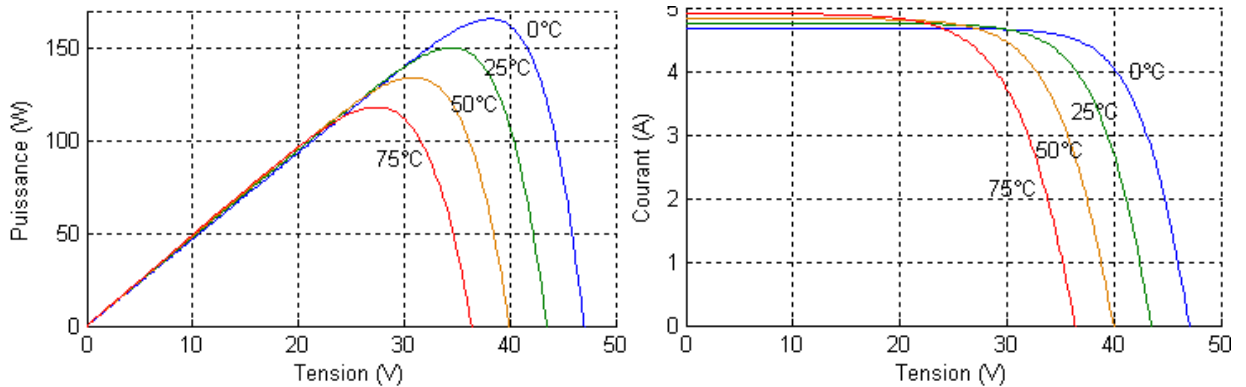


Fig.I. 12: Evolution de la caractéristique (I-V) (P-V) du module en fonction de la température

Quand la température diminue, la tension à vide augmente, mais le courant de court-circuit diminue dans des proportions moindres (Fig.I.12). La diminution du courant de saturation est la principale cause de la chute de courant à basse température.

Aussi, on considère en première approximation que le fonctionnement optimal du générateur PV correspond sensiblement à un fonctionnement à tension optimale constante.

## I.11. Avantages et inconvénients d'une installation PV

### I.11.1. Avantage :

- D'abord une haute fiabilité. L'installation ne comporte pas de pièces mobiles qui la rendent particulièrement appropriée aux régions isolées. C'est la raison de son utilisation sur les engins spatiaux.
- Ensuite le caractère modulaire des panneaux photovoltaïques permet un montage simple et adaptable à des besoins énergétiques divers. Les systèmes peuvent être dimensionnés pour des applications de puissances allant du milliWatt au MégaWatt.
- Le coût de fonctionnement est très faible vu les entretiens réduits et il ne nécessite ni combustible, ni son transport, ni personnel hautement spécialisé.

- La technologie photovoltaïque présente des qualités sur le plan écologique car le produit fini est non polluant, silencieux et n'entraîne aucune perturbation du milieu, si ce n'est par l'occupation de l'espace pour les installations de grandes dimensions [5].

#### **I.11.2. Inconvénient :**

- La fabrication du module photovoltaïque relève de la haute technologie et requiert des investissements d'un coût élevé.
- Le rendement réel de conversion d'un module est faible, de l'ordre de 10-15 % (soit entre 10 et 15  $MW/km^2$  par an pour le BENELUX) avec une limite théorique pour une cellule de 28%. · Les générateurs photovoltaïques ne sont pas compétitifs par rapport aux générateurs diesel que pour des faibles demandes d'énergie en régions isolées.
- Tributaire des conditions météorologiques.
- Lorsque le stockage de l'énergie électrique sous forme chimique (batterie) est nécessaire, le coût du générateur est accru.
- Le stockage de l'énergie électrique pose encore de nombreux problèmes.
- Le faible rendement des panneaux photovoltaïques s'explique par le fonctionnement même des cellules. Pour arriver à déplacer un électron, il faut que l'énergie du rayonnement soit au moins égale à 1 eV. Tous les rayons incidents ayant une énergie plus faible ne seront donc pas transformés en électricité. De même, les rayons lumineux dont l'énergie est supérieure à 1 eV perdront cette énergie, le reste sera dissipé sous forme de chaleur [5].

#### **I.12. Conclusion :**

Le monde de la conversion photovoltaïque connaît depuis quelques années une évolution profonde associée à l'intérêt croissant pour l'énergie photovoltaïque. Nous avons présenté dans ce chapitre les différentes notions qui entrent dans l'énergie solaire et la constitution d'un système photovoltaïque et nous avons exploré le principe de la conversion photovoltaïque et les technologies utilisées ainsi que les différents types des cellules photovoltaïques.

Les caractéristiques d'un module solaire montrent bien que la puissance maximale générée dépend fortement de l'intensité des radiations solaires ainsi que de la température. Le module solaire ne peut générer sa puissance maximale que pour une certaine tension et courant de fonctionnement.

CHAPITRE II :  
MODÉLISATION ET  
SIMULATION DES  
ÉLÉMENTS DU SYSTÈME  
PHOTOVOLTAÏQUE

## II.1. Introduction :

On a vu dans le chapitre précédent que la puissance maximale générée par un module solaire dépend fortement de l'intensité des radiations solaires ainsi que de la température. Pour avoir une puissance maximale le module solaire doit génère une certaine tension et courant de fonctionnement.

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

Certain dispositif utilise l'énergie alternative pour les alimenté par un générateur photovoltaïque il faut utiliser un convertisseur DC-AC, il y a plusieurs commande des et le but de ces commande c'est d'avoir un signale sinusoïdale.

Dans ce chapitre on va étudier quelque type des convertisseurs DC-DC et DC-AC, utilisés dans les systèmes photovoltaïques. Ainsi, on décrit la commande MPPT des convertisseurs DC-DC et la commande MLI des convertisseurs DC-AC.

## II.2. Electronique de puissance :

L'électronique de puissance est la branche de l'électrotechnique qui a pour objet de l'étude de la conversion statique d'énergie électrique (notamment les structure les composants, les commandes et les interactions avec l'environnement).

L'électronique de puissance traite l'énergie électrique par voie statique. Elle permet :

- Une utilisation plus souple et plus adaptée de l'énergie électrique
- Une amélioration de la gestion, du transport et de la distribution de l'énergie électrique
- Une discrétion par réduction des masses et des volumes ainsi par un fonctionnement ultrasonore des dispositifs.

La conversion statique est réalisée au moyen de convertisseur statique qu'ils sont des dispositifs qui transforme l'énergie électrique disponible en une forme appropriée à l'alimentation d'une charge. [19]



### **II.2.1. Electronique de puissance et la conversion électrique :**

L'énergie électrique est surtout distribuée sous forme de tensions alternatives sinusoïdales ou continues. L'électronique de puissance permet de modifier la présentation de l'énergie électrique pour l'adapter aux différents besoins. L'électronique de puissance utilise des convertisseurs statiques. Ces derniers utilisent des interrupteurs électroniques [20].

### **II.2.2. Convertisseurs électriques :**

Les convertisseurs sont des appareils servent à transformer la tension électrique pour l'adapter à des récepteurs fonctionnant en une tension continue différente ou une tension alternative.

L'étude du convertisseur est intéressante dans la mesure où il est utilisé dans la plupart des nouveaux types de sources de production d'énergie dispersée connectée au réseau (éolienne, photovoltaïque, pile à combustible...) [21].

La tension fournie par les panneaux photovoltaïques est une tension de type continu pour l'adapter à nous besoin il y a deux sorte de convertisseur (les hacheurs DC-DC, les onduleurs DC-AC)

### **II.2.3. Les Interrupteurs :**

Ces interrupteurs sont réalisés par un ou plusieurs composants électroniques a semi-conducteur. On a vu qu'en électronique de puissance, on met en œuvre des convertisseurs utilisant des interrupteurs électroniques fonctionnant soit à l'état passant (fermé), soit à l'état bloque (ouvert). Le passage d'un état à l'autre, appelé commutation, s'effectue périodiquement. On note  $T$  cette période [22].

Selon le composant utilisé, la fréquence de découpage  $f$  à laquelle est soumis le composant change. En général, on cherche à utiliser la fréquence la plus élevée possible. Cependant, plus la puissance nominale  $P_n$  d'un convertisseur est élevée, plus cette fréquence est faible [22].

La figure (fig.II.1) présente un diagramme a échelle logarithmique des domaines d'utilisation de chaque composant.

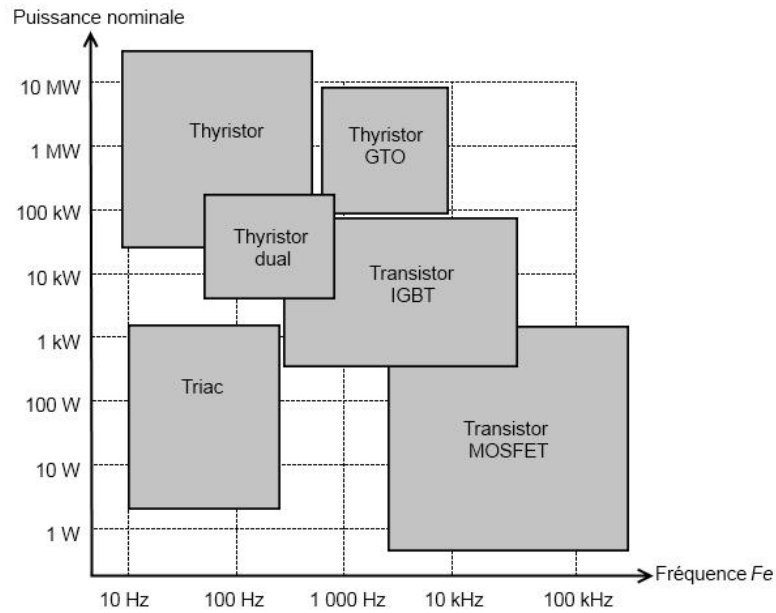


Fig.II. 1: Diagramme puissance-fréquence des composants

### II.3. Les Hacheurs :

Un hacheur permet de régler le transfert d'énergie d'une source continue vers la charge avec un rendement élevé. Selon la structure, il peut être abaisseur ou élévateur de tension et, dans certaines conditions, renvoyer de l'énergie à l'alimentation. Il est utilisé dans les alimentations et pour le pilotage des moteurs. [23].

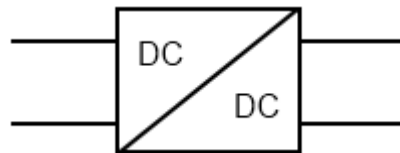


Fig.II. 2: Symbole d'un convertisseur DC-DC

#### II.3.1. Exigences de l'utilisateur :

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

Dans le principe, assurer ces deux fonctions n'est pas excessivement complexe: fabriquer une alimentation élémentaire demande un nombre de composants relativement réduit. Mais l'utilisateur privé ou professionnel a beaucoup d'autres exigences. Idéalement, un convertisseur doit en effet [24] :

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

### **II.3.2. Type des hacheurs :**

Nous traitons dans cette partie des convertisseurs unidirectionnels en courant et en tension. Cela implique que la fluence d'énergie ne peut se faire, au sein du convertisseur, que dans un seul sens. Cela revient également à considérer [25] :

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

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

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

#### **II.3.2.1. Hacheur Buck :**

C'est un convertisseur direct DC-DC. La source d'entrée est de type tension continue et la charge de sortie continue de type source de courant. L'interrupteur K figure (II.1) peut être remplacé par un transistor puisque le courant est toujours positif et que les commutations doivent être commandées (au blocage et à l'amorçage) [26].

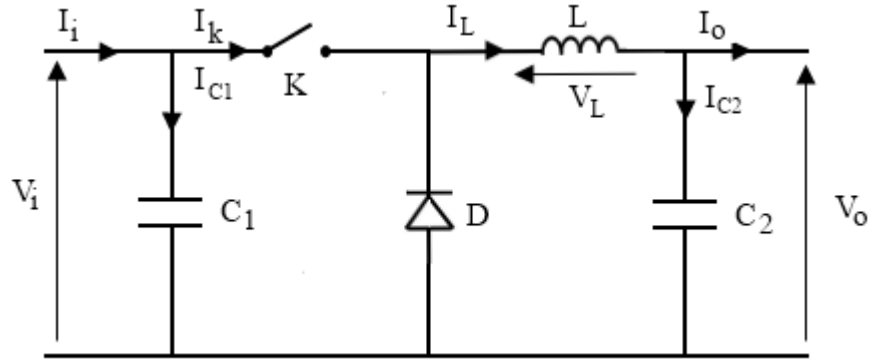


Fig.II. 3: Schéma électrique d'un hacheur buck

**a) Fonctionnement :**

Quand l'interrupteur est fermé pendant la durée  $\alpha T_e$ , la tension appliquée aux bornes de la diode est  $V_i$ . L'interrupteur est commandé à la fréquence de découpage  $f_e = \frac{1}{T_e}$ . La source  $V_i$  fournit de l'énergie à la charge et à l'inductance. Pendant le temps  $t \in [\alpha T_e, T_e]$ , l'interrupteur s'ouvre et l'énergie emmagasinée dans l'inductance commande la circulation du courant dans la diode de roue libre D. La tension à ses bornes est donc nulle [27].

Les chronogrammes (tracés dans le cas idéal) de la figure (fig.II.4) sont tracés dans le cas d'une conduction continue, c'est-à-dire que le courant ne repasse jamais par zéro. Pour calculer la relation entre la tension d'entrée et celle de sortie, on exprime que la tension moyenne aux bornes de l'inductance est nulle [27]:

$$V_0 = \alpha \cdot V_i \tag{II.1}$$

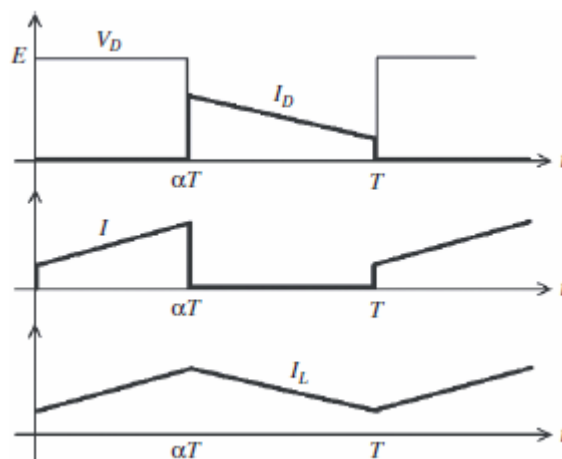


Fig.II. 4 : Chronogrammes de courant et tension d'un hacheur buck

**b) Modèle mathématique équivalent :**

Pour savoir le comportement réel nous devons faire la représentation du circuit équivalent par les deux états du commutateur et de tirer par suite le modèle mathématique reliant les variables d'entrée/sortie. La figure (fig.II.5) montre le schéma du circuit équivalent d'un convertisseur dévolteur avec le commutateur fermé, tandis que la figure (fig.II.6) représente le convertisseur dévolteur avec le commutateur ouvert pendant  $(1 - \alpha)T_e$  [24].

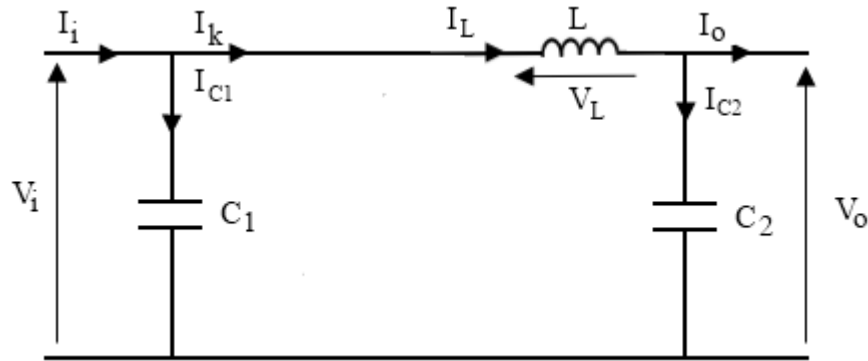


Fig.II. 5 : Schéma électrique d'un hacheur buck fermé

Lorsqu'on applique la loi de Kirchoff sur le circuit ci-dessus on aura les équations suivantes:

$$I_{C1}(t) = C_1 \frac{dV_i(t)}{dt} = I_i(t) - I_L(t) \quad (II.2)$$

$$I_{C2}(t) = C_2 \frac{dV_o(t)}{dt} = I_L(t) - I_o(t) \quad (II.3)$$

$$V_L(t) = L \frac{dI_L(t)}{dt} = V_i(t) - V_o(t) \quad (II.4)$$

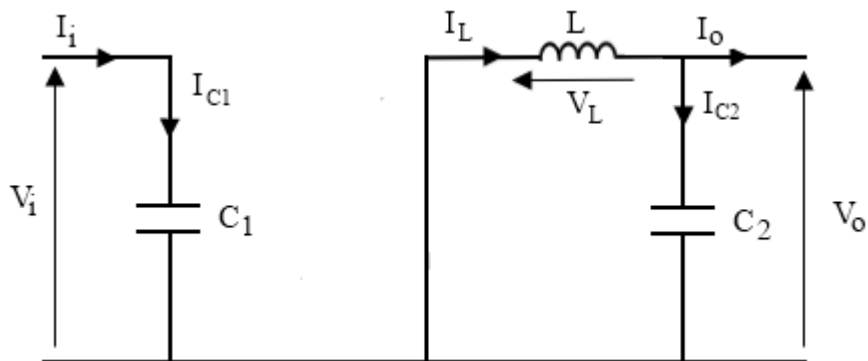


Fig.II. 6: Schéma électrique d'un hacheur buck ouvert

Les équations suivantes sont déduites de la figure (fig.II.6) :

$$I_{C1}(t) = C_1 \frac{dV_i(t)}{dt} = I_i(t) \quad (\text{II.5})$$

$$I_{C2}(t) = C_2 \frac{dV_o(t)}{dt} = I_L(t) - I_o(t) \quad (\text{II.6})$$

$$V_L(t) = L \frac{dI_L(t)}{dt} = -V_o(t) \quad (\text{II.7})$$

### II.3.2.2. Hacheur boost :

C'est un convertisseur direct DC-DC. La source d'entrée est de type courant continu (inductance en série avec une source de tension) et la charge de sortie est de type tension continue (condensateur en parallèle avec la charge résistive). L'interrupteur K peut être remplacé par un transistor puisque le courant est toujours positif et que les commutations doivent être commandées (au blocage et à l'amorçage) [26].

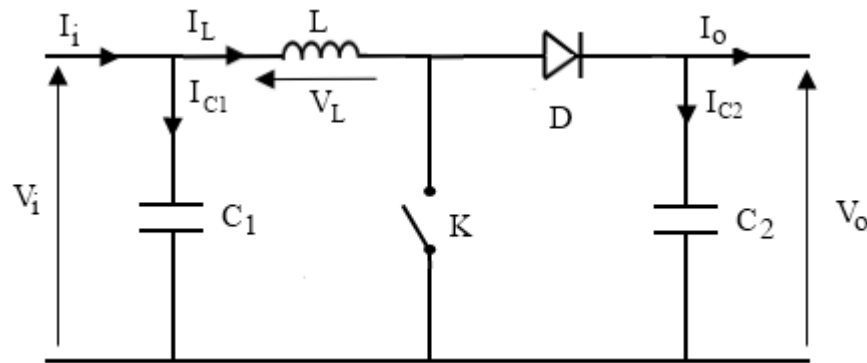


Fig.II. 7: Schéma électrique d'un hacheur boost

#### a) Fonctionnement :

Quand l'interrupteur est fermé pendant la durée  $\alpha T_e$ , le courant dans l'inductance croît linéairement. La tension aux bornes de K est nulle. Pendant le temps  $t \in [\alpha T_e, T_e]$ , l'interrupteur s'ouvre et l'énergie emmagasinée dans l'inductance commande la circulation du courant dans la diode de roue libre D. On a alors  $V_K = V_o$ . En écrivant que la tension aux bornes de l'inductance est nulle, on arrive à [27] :

$$V_o(1 - \alpha) = V_i \quad (\text{II.8})$$

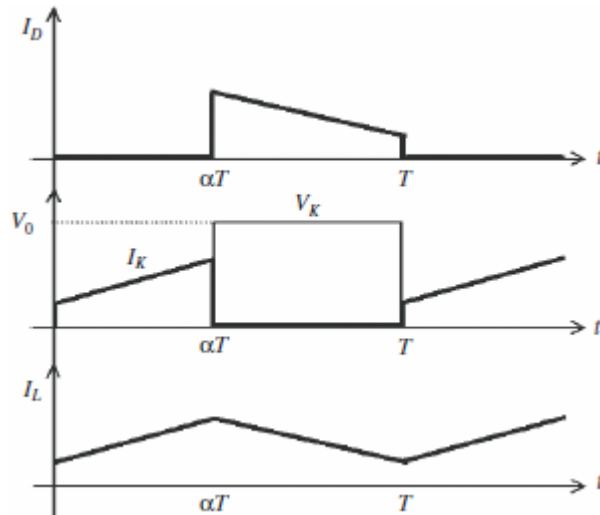


Fig.II. 8: Chronogrammes de courant et tension d'un hacheur boost

### b) Modèle mathématique équivalent :

Afin de pouvoir synthétiser les fonctions du hacheur survolteur à l'état d'équilibre, il est nécessaire de présenter les schémas équivalents du circuit à chaque position de l'interrupteur K. celui de la figure (fig.II.9), présente le circuit équivalent du boost lorsque K est fermé c-à-d entre  $[0, \alpha T_e]$  [24].

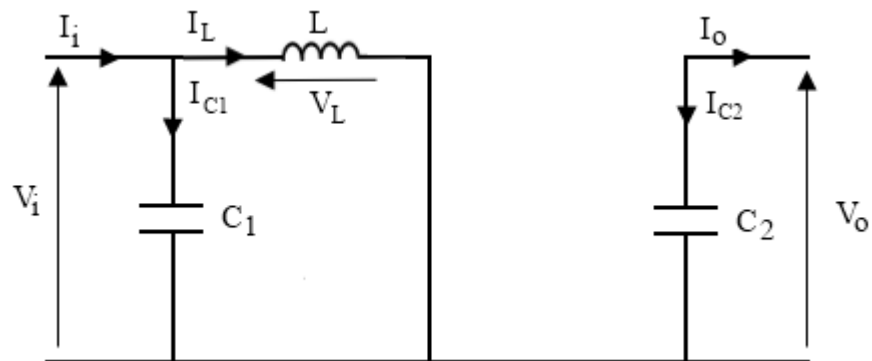


Fig.II. 9: Schéma électrique d'un hacheur boost fermé

Comme pour le circuit buck, l'application des lois de Kirchhoff sur les circuits équivalents des deux phases de fonctionnement donne :

$$I_{C1}(t) = C_1 \frac{dV_i(t)}{dt} = I_i(t) - I_L(t) \quad (\text{II. 9})$$

$$I_{C2}(t) = C_2 \frac{dV_o(t)}{dt} = -I_o(t) \quad (\text{II. 10})$$

$$V_L(t) = L \frac{dI_L(t)}{dt} = V_i(t) \quad (\text{II. 11})$$

À l'état ouvert de l'interrupteur K, le circuit équivalent au fonctionnement du Boost est le suivant:

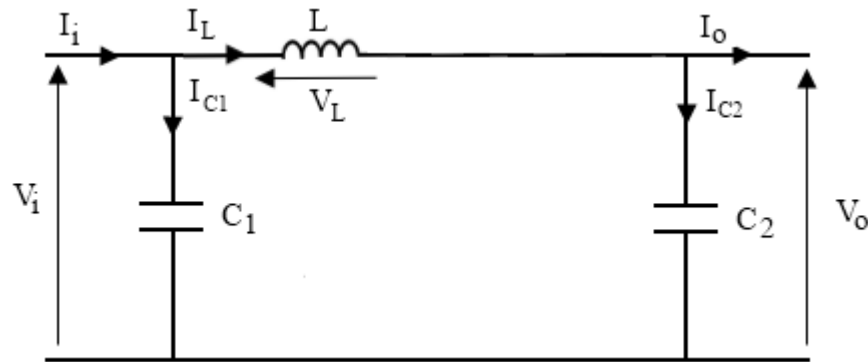


Fig.II. 10: Schéma électrique d'un hacheur boost ouvert

$$I_{C1}(t) = C_1 \frac{dV_i(t)}{dt} = I_i(t) - I_L(t) \quad (\text{II.12})$$

$$I_{C2}(t) = C_2 \frac{dV_o(t)}{dt} = I_L(t) - I_o(t) \quad (\text{II.13})$$

$$V_L(t) = L \frac{dI_L(t)}{dt} = V_i(t) - V_o(t) \quad (\text{II.14})$$

### II.3.2.3. Hacheur Buck-Boost :

Le hacheur buck-boost est un convertisseur indirect DC-DC à stockage inductif. La source d'entrée est de type tension continue (filtrage capacitif en parallèle avec une source de tension) et la charge de sortie continue de type source de tension (condensateur en parallèle avec la charge résistive). L'interrupteur K peut être remplacé par un transistor puisque le courant est toujours positif et que les commutations doivent être commandées (au blocage et à l'amorçage) [26].

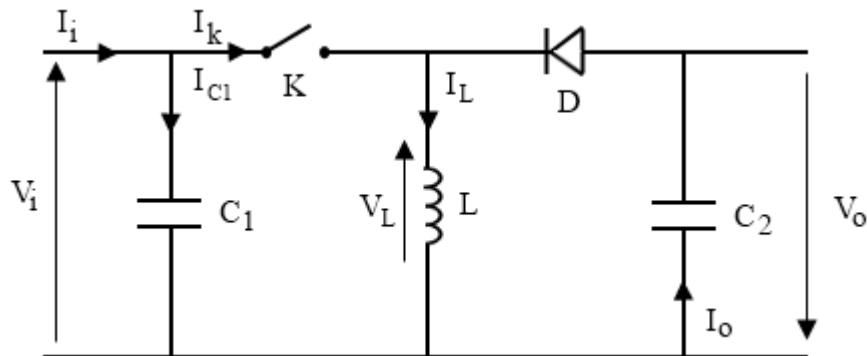


Fig.II. 11: Schéma électrique d'un hacheur buck- boost



**a) Fonctionnement :**

Cette structure de convertisseur permet d'obtenir des tensions négatives à partir de tension positive. Le schéma de principe est présenté figure (figII.11). Quand l'interrupteur est fermé pendant la durée  $\alpha T_e$ , le courant augmente linéairement. La tension est égale à  $V_i$ . À l'ouverture de K, la diode prend le relais et la tension  $V_L$  est égale à  $-V_0$ . Par définition la tension moyenne aux bornes de l'inductance est nulle. Il en résulte que [27] :

$$V_i \cdot \alpha \cdot T = V_0(1 - \alpha)T \quad (II.15)$$

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

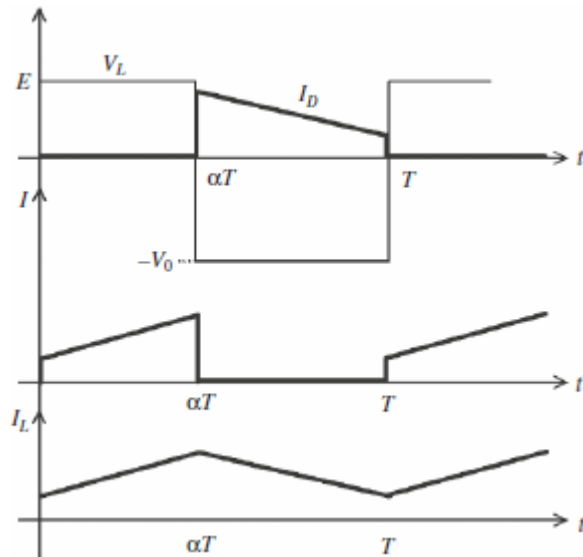


Fig.II. 12: Chronogrammes de courant et tension d'un hacheur buck-boost

**b) Modèle mathématique équivalent :**

Lorsque l'interrupteur K est fermé le circuit équivalent est montré sur la figure (fig.II.13)

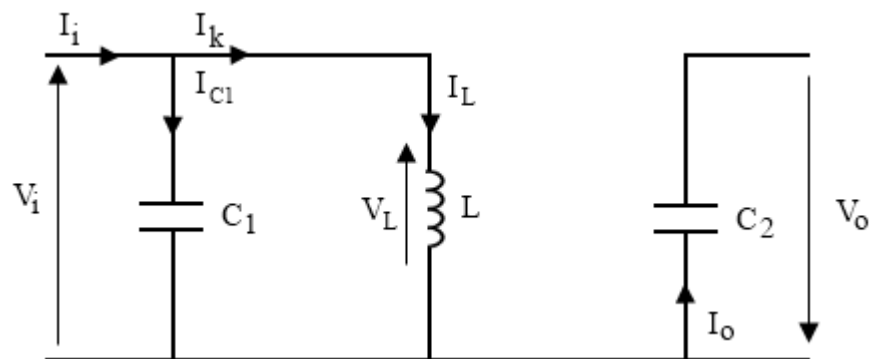


Fig.II. 13: Schéma électrique d'un hacheur buck- boost fermé

En appliquant la loi de Kirchhoff à ce circuit on obtiendra les équations suivantes :

$$I_{C1}(t) = C_1 \frac{dV_i(t)}{dt} = I_i(t) - I_L(t) \quad (\text{II. 16})$$

$$I_{C2}(t) = C_2 \frac{dV_o(t)}{dt} = -I_o(t) \quad (\text{II. 17})$$

$$V_L(t) = L \frac{dI_L(t)}{dt} = V_i(t) \quad (\text{II. 18})$$

Lorsque l'interrupteur K est ouvert le circuit équivalent apparaît à la figure (fig.II.14)

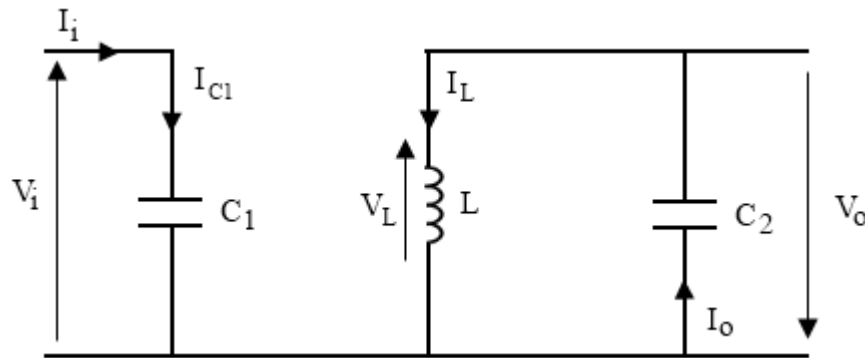


Fig.II. 14: Schéma électrique d'un hacheur buck- boost ouvert

Le modèle d'équation dans cette configuration est comme suit :

$$I_{C1}(t) = C_1 \frac{dV_i(t)}{dt} = I_i(t) \quad (\text{II. 19})$$

$$I_{C2}(t) = C_2 \frac{dV_o(t)}{dt} = I_o(t) - I_L(t) \quad (\text{II. 20})$$

$$V_L(t) = L \frac{dI_L(t)}{dt} = V_o(t) \quad (\text{II. 21})$$

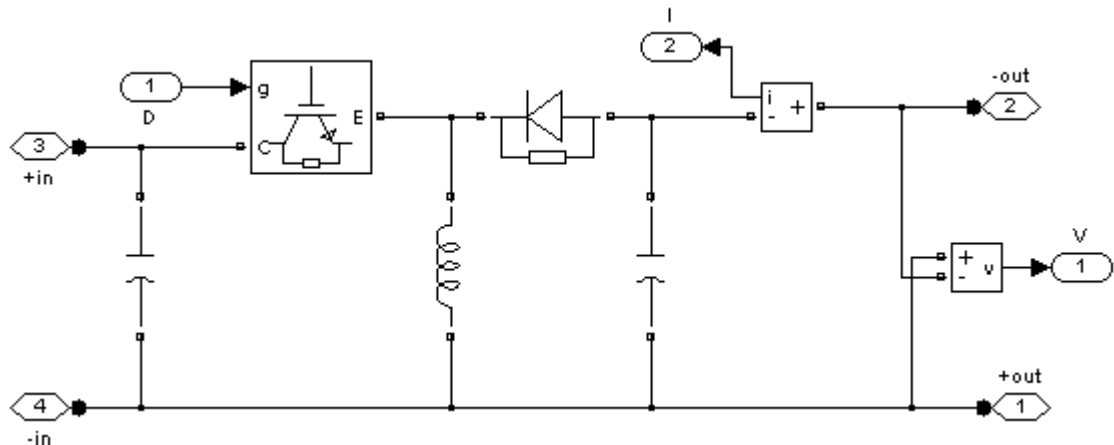


Fig.II. 15: Schéma de simulation d'un hacheur buck- boost

## **II.4. Commande MPPT :**

La poursuite de point de puissance maximale (MPPT) (The maximum power point tracker) est nécessaire pour extraire le maximum de puissance du module PV. En général, un convertisseur DC/DC est placé entre la PV et la charge, et en faisant varier le rapport cyclique du point de fonctionnement [28].

## **II.5. Les méthodes de poursuite de MPP :**

Il existe de nombreux algorithmes utilisés pour trouver le point de puissance maximale. Idéalement, le suivi de la puissance se fait automatiquement pour s'adapter aux conditions météorologiques variables [28].

### **II.5.1. Méthodes a contre réaction de tension :**

Ce genre de mécanismes repose sur le contrôle de la tension de fonctionnement des panneaux par la comparaison de cette tension avec une tension de référence. Cela génère une tension d'erreur qui fait varier le rapport cyclique de la PWM de commande afin d'annuler cette erreur. Selon la nature de cette tension de référence (fixe ou variable, interne ou externe) on a trois types de méthodes [29]:

- Méthode à tension de référence fixe
- Méthode a tension de référence en fonction de  $V_{oc}$
- Tension de référence extrême (Cellule pilote)

### **II.5.2. Méthodes a contre réaction de courant :**

Cette méthode utilise seulement une mesure de courant pour obtenir l'information sur le point opérationnel et actuel du système [30]. Permet de savoir la valeur du courant optimal dans lequel doit fonctionner le panneau pour extraire le maximum de puissance [29]

- Méthode à courant de référence en fonction du courant de court-circuit  $I_{sc}$
- Méthode de maximisation du courant de sortie

### **II.5.3. Méthodes a contre réaction de puissance :**

Ces méthodes sont basées sur des algorithmes de recherche itérative pour trouver le point de fonctionnement du panneau pour que la puissance générée soit maximale sans interruption de fonctionnement du système. Elles ne sont pas basées sur des valeurs de références prédéfinies ou à partir des paramètres opérationnels, mais sur la maximisation permanente de

la puissance générée par les panneaux solaires. Ainsi pour un point donné on fait la recherche dans un certain sens, si on a une augmentation de la puissance du panneau alors on maintient cette direction de recherche, sinon on cherche dans le sens opposé [29].

### II.5.3.1. Algorithme perturbation et observation

C'est l'algorithme de poursuite du point de puissance maximale (PPM) le plus utilisé, et comme son nom l'indique il est basé sur la perturbation du système par l'augmentation ou la diminution de la tension de référence, ou en agissant directement sur le rapport cyclique du convertisseur (DC-DC), puis l'observation de l'effet sur la puissance de sortie en vue d'une éventuelle correction de ce rapport cyclique ( $D$ ) [29].

Si la valeur de la puissance actuelle  $P(k)$  du générateur est supérieure à la valeur précédente  $P(k - 1)$  alors on garde la même direction de perturbation précédente sinon on inverse la perturbation du cycle précédent. L'organigramme de l'algorithme de perturbation et de l'observation ( $P$  et  $O$ ) est donné par la Figure Fig.II.16 [29].

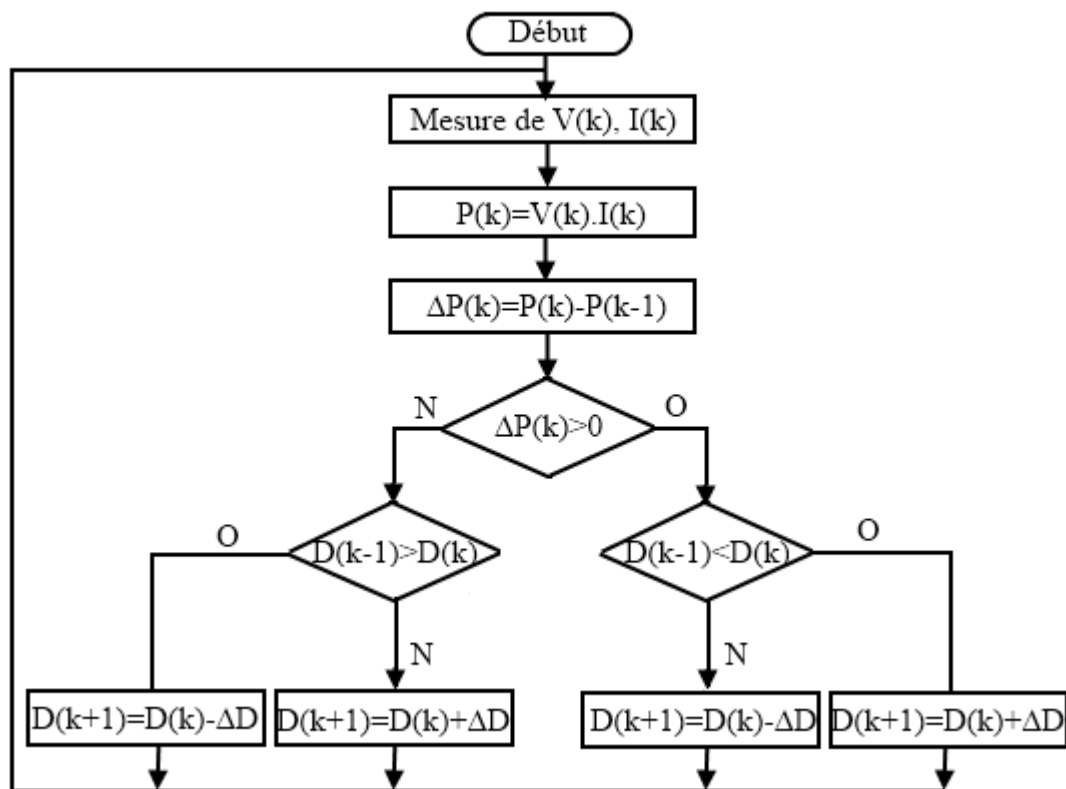


Fig.II. 16: Algorithme de perturbation et de l'observation ( $P$  et  $O$ )

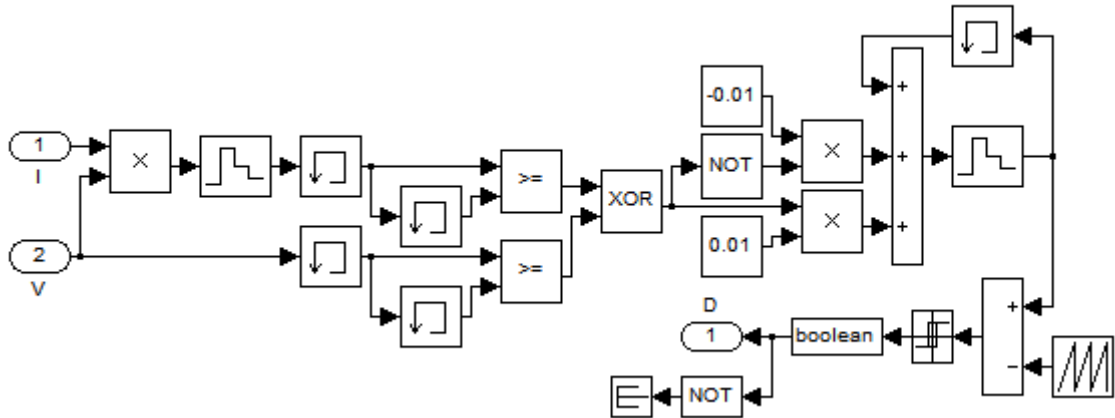


Fig.II. 17: Schéma de simulation de l'algorithme de perturbation et de l'observation (P et O)

### II.5.3.2. Algorithme incrémentation de la conductance

L'algorithme par incrémentation de conductance se résulte en dérivant la puissance du panneau photovoltaïque par rapport à la tension et en mettant le résultat égal à zéro. Ceci petit être décrit par les équations suivantes [30]:

$$\frac{dP}{dV} = I + V \frac{dI}{dV} \quad (\text{II. 22})$$

$$\frac{1}{V} \frac{dP}{dV} = \frac{1}{V} \quad (\text{II. 23})$$

On définit la conductance de la source  $\frac{1}{V}$  et incrémentation de la conductance  $\frac{dI}{dV}$ .

Puisque la tension V du panneau est toujours positive, la relation (11.8) explique que le point de puissance maximale MPP est atteint si la conductance de la source égale incrémentation de la conductance de la source avec un signe moins, et qu'elle est à gauche de ce point lorsque la conductance est supérieure il l'incrémentale conductance et vice-versa, [29] comme suit:

$$\frac{dP}{dV} > 0 \text{ si } \frac{1}{V} > -\frac{dI}{dV} \quad (\text{II. 24})$$

$$\frac{dP}{dV} = 0 \text{ si } \frac{1}{V} = -\frac{dI}{dV} \quad (\text{II. 25})$$

$$\frac{dP}{dV} < 0 \text{ si } \frac{1}{V} < -\frac{dI}{dV} \quad (\text{II. 26})$$

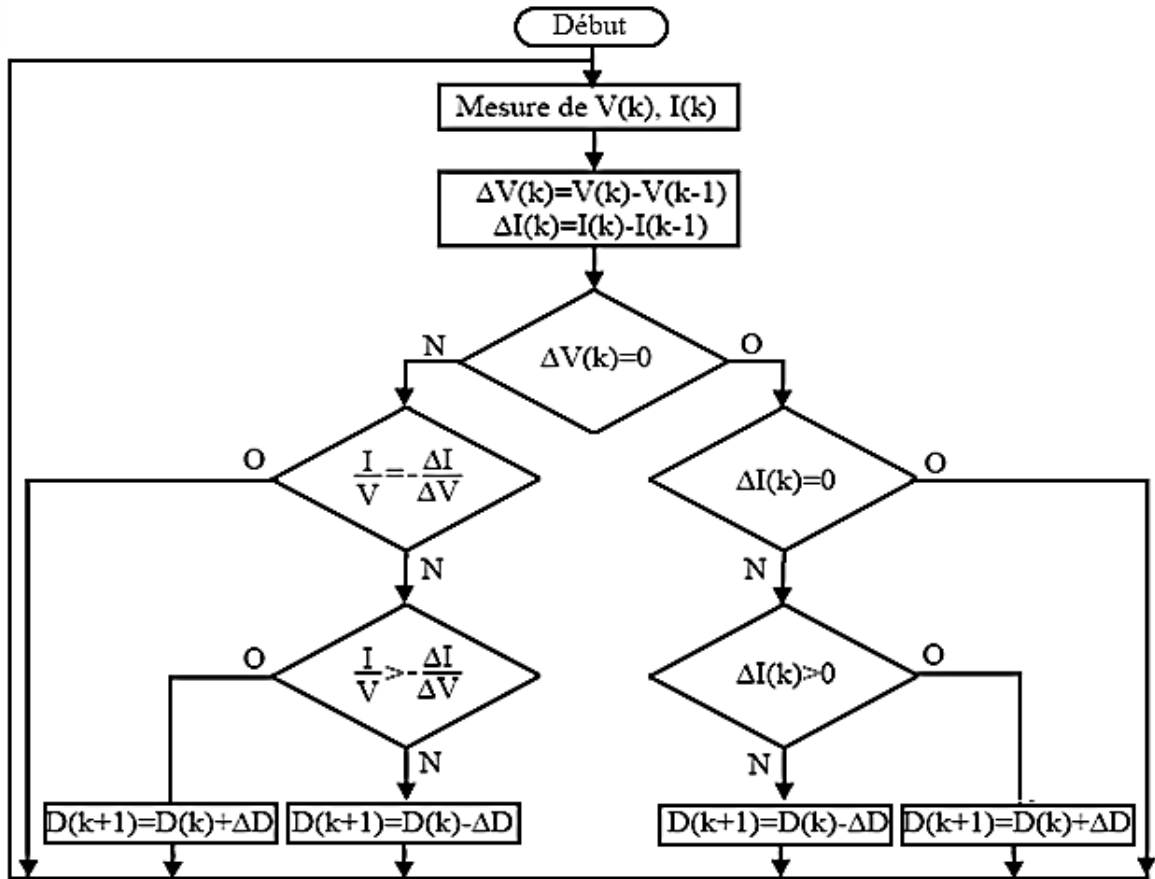


Fig.II. 18: Algorithme incrémental conductance

## II.6. Simulation du system photovoltaïque avec hacheur commandé en MPPT :

La figure (fig.II.16) montre le diagramme synoptique d'un système photovoltaïque composé avec un module PV avec un hacheur commandé en MPPT qui a pour entrées la tension et le courant de sortie du module.

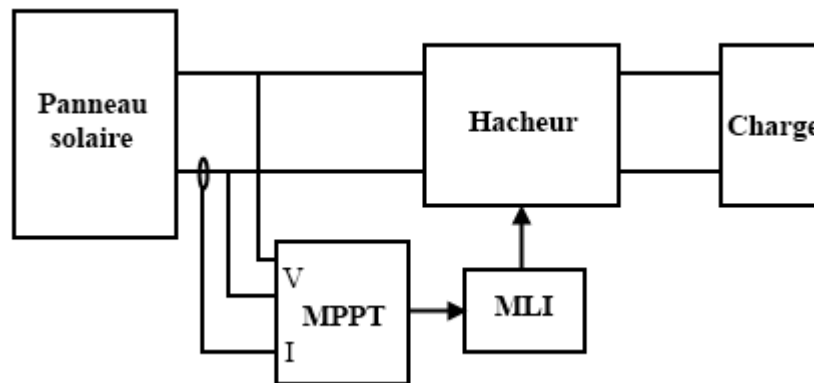


Fig.II. 19: Schéma d'un système photovoltaïque avec convertisseur DC-DC commandé par la MPPT

Dans cette simulation on a utilisé un générateur PV de type BP SX 150 un hacheur buck-boost caractérisé par:  $C_1 = 2500\mu F$ ,  $L = 130\mu H$ ,  $C_2 = 500\mu F$ , on a utilisé aussi une commande MPPT de type P&O et une charge RL  $R_{ch} = 10 \Omega$ ,  $L_{ch} = 0.01 H$

**II.6.1. Schéma de simulation :**

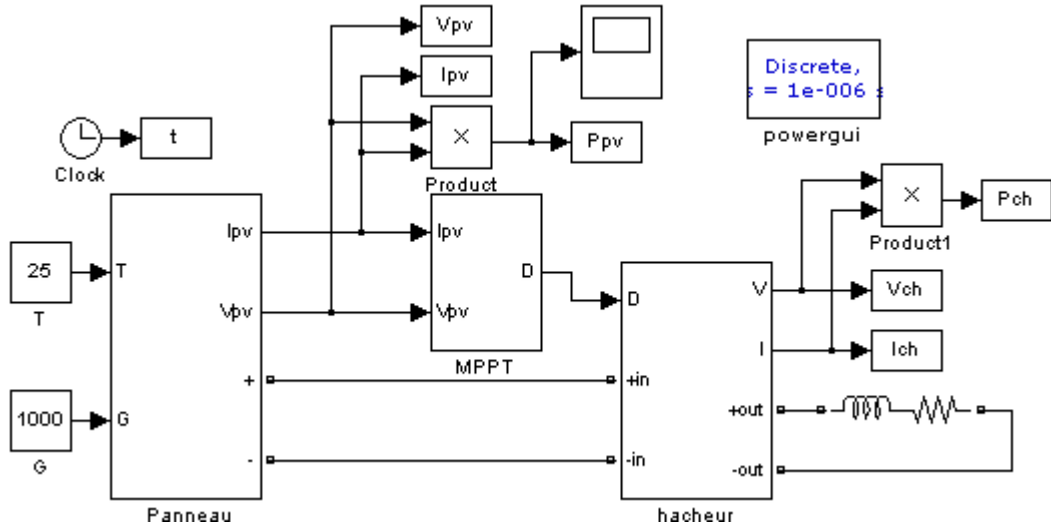


Fig.II. 20: Schéma de simulation d'un PV et un hacheur commandé en MPPT

**II.6.2. Résultat de simulation :**

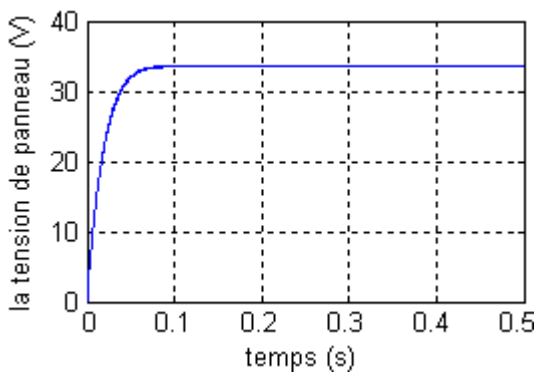


Fig.II. 21: La tension de panneau

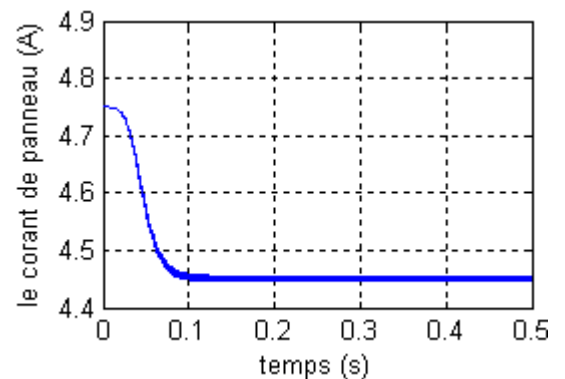


Fig.II. 22: Le courant de panneau

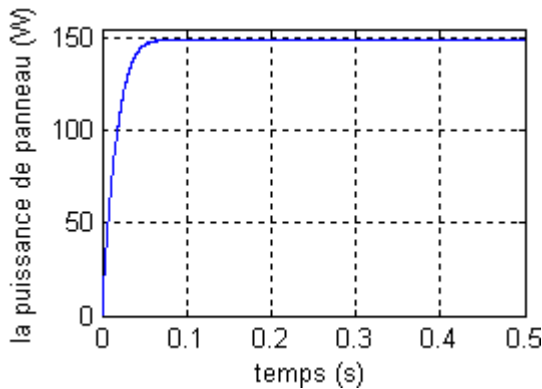


Fig.II. 23: La puissance de module photovoltaïque

D'après la figure (fig.II.21), au départ la tension de PV prend un saut pour qu'elle se stabilise à la valeur désirée. D'après la figure (fig.II.22), on remarque qu'au départ le courant

prend la valeur de court-circuit ensuite il prend la valeur nominale. Dans la figure (fig.II.23) on remarque que le générateur PV fonctionne en puissance maximale.

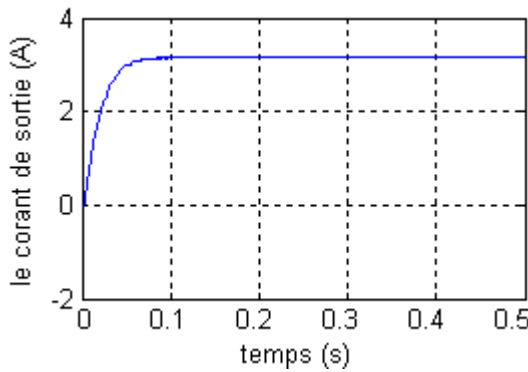


Fig.II. 24: La tension de sortie de hacheur

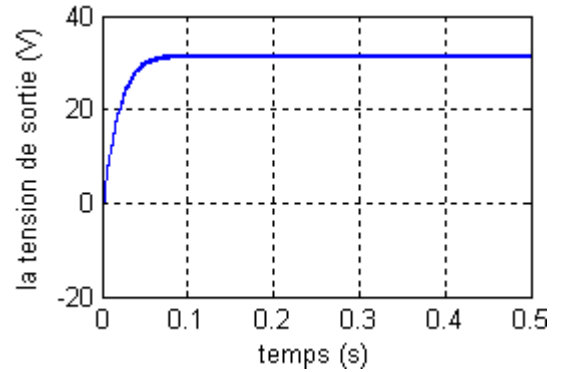


Fig.II. 25: Le courant de sortie de hacheur

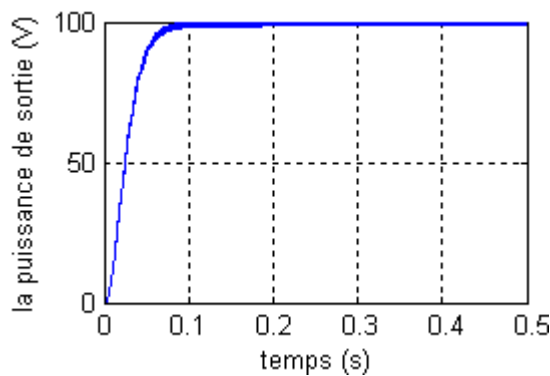


Fig.II. 26: La puissance de sortie de hacheur

D'après les figures (fig.II.24,25 et 26) on remarque que les valeurs de tension, courant et puissance de sortie de hacheur sont inférieures à celles de PV car la commande MPPT impose un rapport cyclique  $D > 0.5$ .

## II.7. Les onduleurs :

Un onduleur est un convertisseur statique qui permet la transformation de l'énergie de type continue, en une énergie alternative. La forme de la tension de la sortie de l'onduleur doit être plus proche d'une sinusoïde (l'allure sinusoïdale), c'est que le taux d'harmonique soit très faible, et ça dépend essentiellement de la technique de commande utilisée.

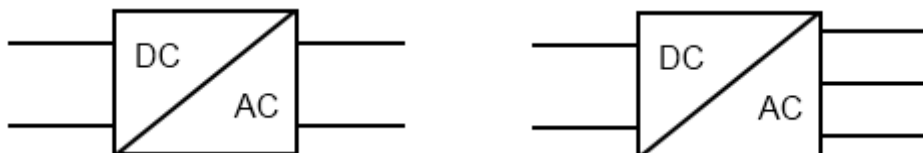


Fig.II. 27: Symbole de convertisseur DC-AC monophasé et triphasé



### II.7.1. Structure d'onduleur :

Les onduleurs triphasés constitués de trois bras chaque bras se compose de deux interrupteurs. Les interrupteurs choisis, constituent bien une cellule de commutation. Leur fonctionnement doit être complémentaire afin de ne jamais court-circuiter la source continue  $V_e$ . Donc les interrupteurs doivent être bidirectionnels en courant et se compose soit d'un thyristor et une diode en antiparallèle ou bien un transistor avec une diode en antiparallèle [25].

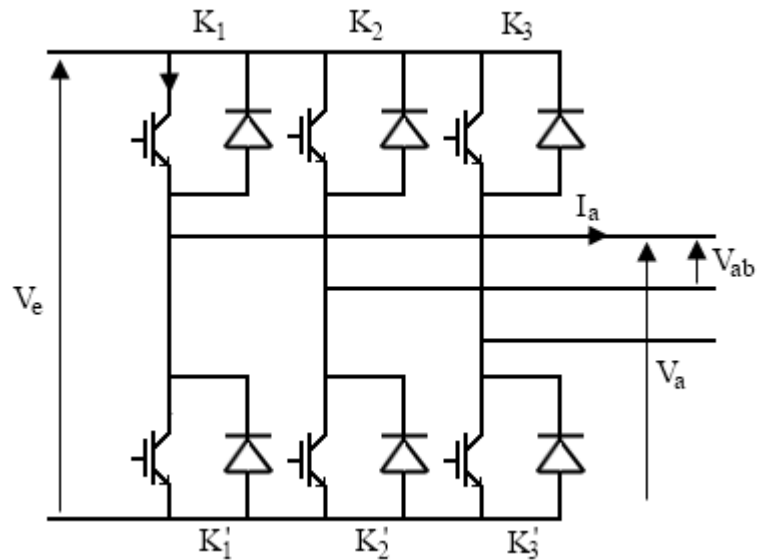


Fig.II. 28: Structure d'un onduleur triphasée

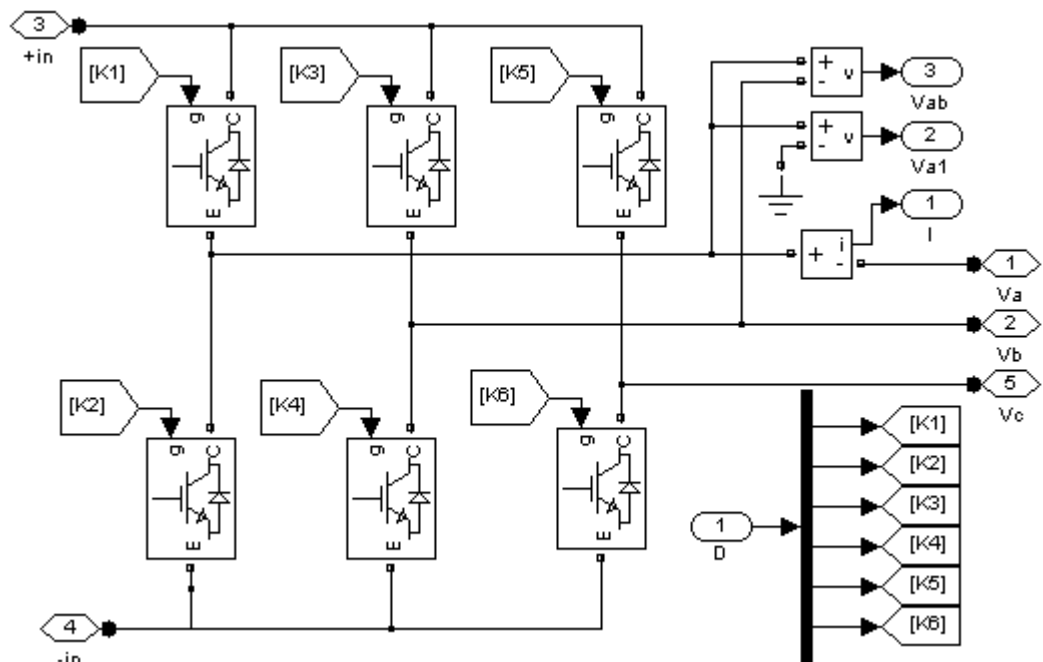


Fig.II. 29: Schéma de simulation d'un onduleur triphasée

### **II.7.2. Classification des onduleurs :**

Les onduleurs sont classés selon le mode de commutation :

- les onduleurs autonomes qui génèrent leur propre fréquence et leur propre tension alternative. Dans ces onduleurs la commutation est forcée [31].
- les onduleurs non autonomes dont la fréquence et la tension alternative sont imposées par le réseau qu'ils alimentent. Dans ces onduleurs la commutation est naturelle. Elle est naturelle en ce sens que ce sont les tensions alternatives du réseau qui effectuent le transfert du courant d'un thyristor à l'autre [31].

Selon la nature de la source continue :

- Onduleur de tension : la source DC impose la tension, la charge AC impose le courant sinusoïdal [25].
- Onduleur de courant : la source DC impose le courant, la charge AC impose la tension sinusoïdale [25].

### **II.7.3. Principe de fonctionnement :**

Il existe plusieurs types de commande d'onduleurs comme (commande symétrique (adjacente), Décalée (disjointe), MLI...). Les différentes commandes ont le but d'obtenir l'allure sinusoïdale ou niveau de la sortie. Et pour chaque commande le principe de fonctionnement se change.

#### **II.7.3.1. Commande plein onde :**

Deux thyristors d'un même bras sont commandés à  $180^\circ$  de décalage. Les thyristors de deux bras voisins sont commandés à  $120^\circ$  de décalage. On obtient ainsi des tensions composées dont les valeurs sont  $E$ ,  $0$  ou  $-E$  volts, la durée d'un niveau non nul étant de  $120^\circ$  par alternance. [32]

#### **II.7.3.2. Commande MLI :**

L'utilisation de la modulation de largeur d'impulsion (MLI) ou Pulse Width Modulation (PWM) permet d'éliminer les premiers rangs d'harmoniques de courant afin d'améliorer le facteur de puissance. Cependant, cette technique ne résout pas totalement le problème des harmoniques de courant [33].

La modulation MLI est fortement inspirée des techniques utilisées dans la transmission de l'information. Elle consiste à moduler une onde porteuse triangulaire (issue d'un

découpage à fréquence  $f_d$ ) par une onde modulante sinusoïdale (fréquence  $f_s$ ) à fréquence beaucoup plus basse [33].

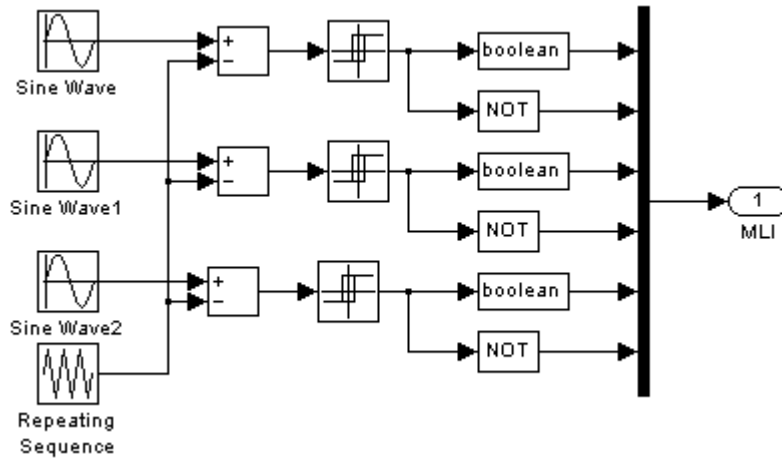


Fig.II. 30: Schéma de simulation d'une commande MLI

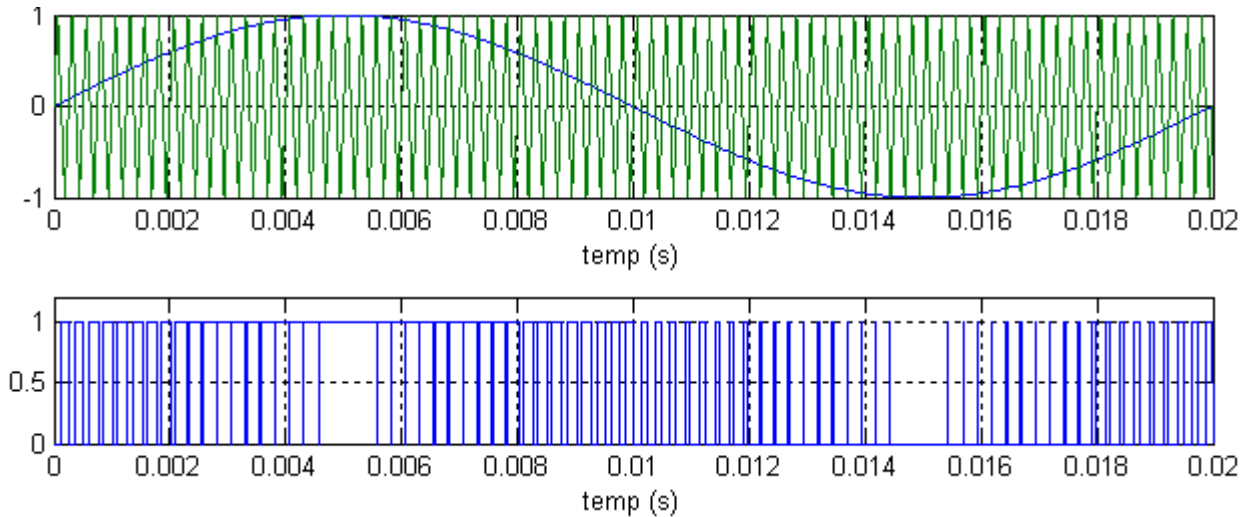


Fig.II. 31: Principe de la commande MLI et les impulsions d'un interrupteur

## II.8. Simulation globale de système PV en fonctionnement autonome:

Dans cette simulation on a utilisé un générateur PV de type BP SX 150 un hacheur buck-boost caractérisé par:  $C_1 = 2500\mu F$ ,  $L = 130\mu H$ ,  $C_2 = 500\mu F$  avec une commande MPPT de type perturbation et observation et un onduleur triphasé commandé par la commande MLI et une charge RL  $R_{ch} = 10 \Omega$ ,  $L_{ch} = 0.01 H$

**II.8.1. Schéma de simulation :**

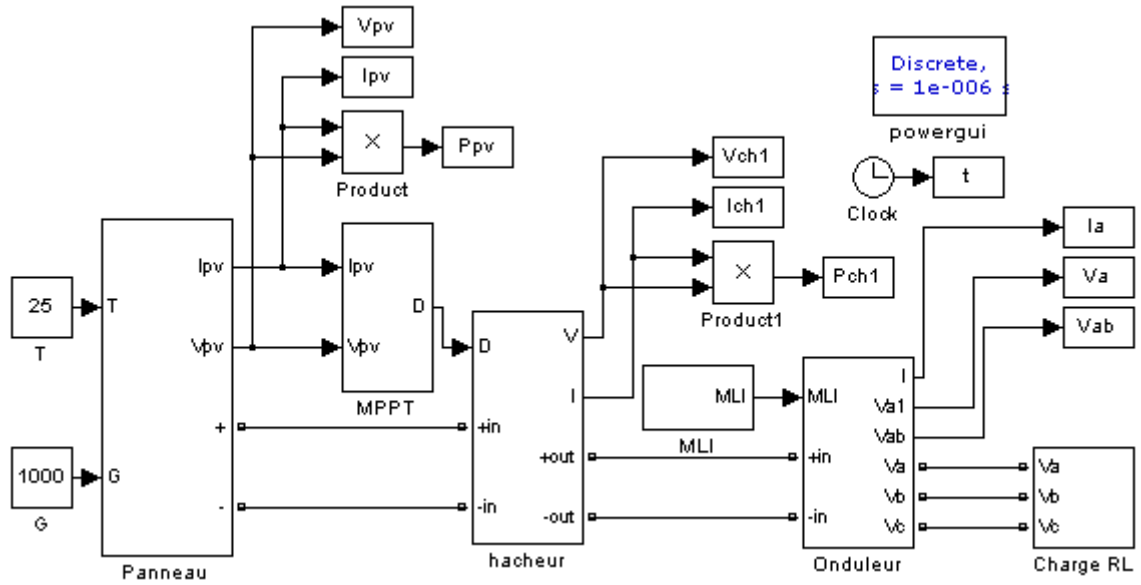


Fig.II. 32: Schéma de simulation globale

**II.8.2. Résultat de simulation :**

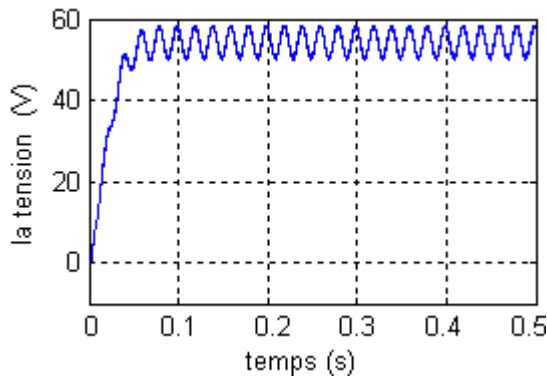


Fig.II. 33: La tension d'entrée de l'onduleur

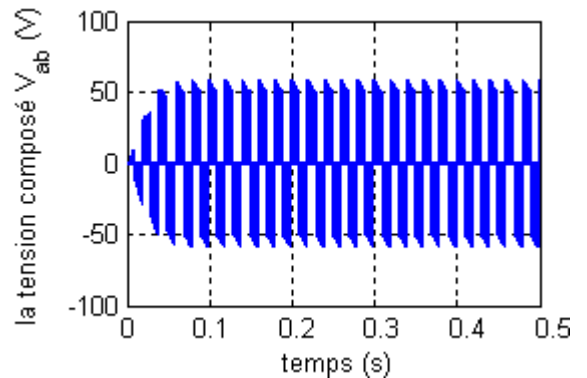


Fig.II. 35: La tension composé  $V_{ab}$

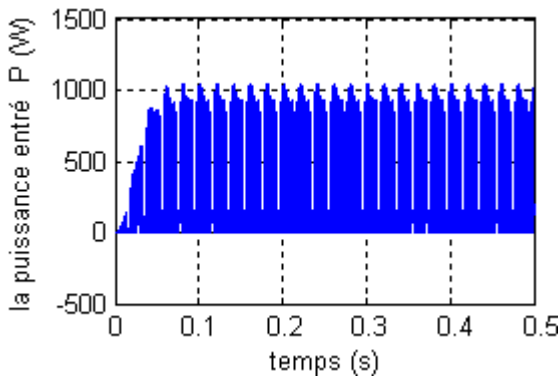


Fig.II. 34: La puissance d'entrée de l'onduleur

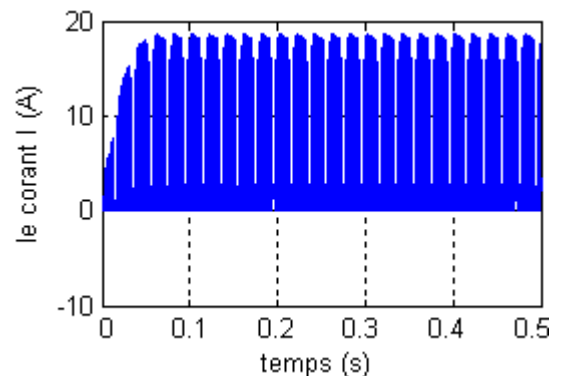


Fig.II. 36: Le courant d'entrée de l'onduleur

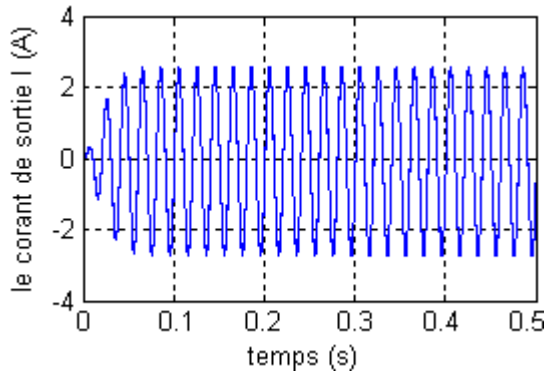


Fig.II. 37: Le courant de sortie de l'onduleur

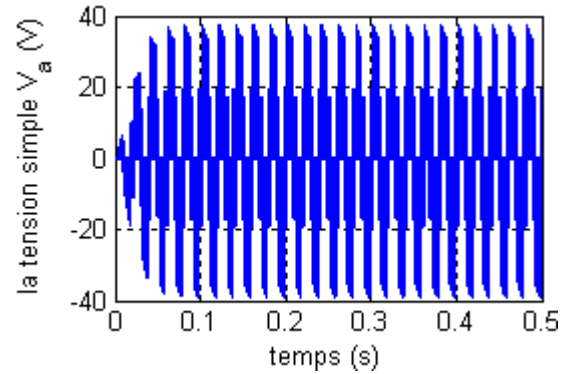


Fig.II. 38: La tension simple  $V_a$

D'après la figure (Fig.II.33, 34 et 35), on remarque que les valeurs de tension, courant et puissance d'entrée de l'onduleur sont supérieures à celles de PV. D'après la figure (Fig.II.36) on remarque que le courant de sortie de l'onduleur prend la forme sinusoïdale à cause de la charge inductive.

D'après la figure (Fig.II.37 et 38), on remarque la valeur max de la tension composée est égale à celle de la tension continue de l'entrée ainsi que la forme de la tension simple et la tension composée est découpé.

## II.9. Conclusion :

Dans ce chapitre on a étudié quelques types convertisseurs DC-DC, utilisés dans les systèmes photovoltaïques. Comme le hacheur dévolteur, le hacheur survolteur et le hacheur mixte (dévolteur-survolteur) la commande MPPT ainsi que les convertisseurs DC-AC et la commande MLI.

D'après les résultats obtenus de la simulation, on remarque que le convertisseur DC-DC et la commande MPPT effectuent correctement leurs rôles d'atteindre la puissance maximale de générateur PV. Le hacheur buck-boost peut augmenter la tension de sortie si le rapport cyclique est supérieur à 0.5. La commande MLI a le but d'obtenir l'allure sinusoïdale ou niveau de la sortie de l'onduleur.

CHAPITRE III :  
GÉNÉRATEUR PV  
RACCORDÉ AU  
RÉSEAU

### III.1. Introduction :

La consommation énergétique mondiale augmente sans cesse associée à une réduction des ressources énergétiques fossiles. Avec l'ouverture des marchés de l'énergie électrique et les incitations étatiques, les productions décentralisées basées sur les énergies renouvelables se développent dans tous les pays. Parmi les sources renouvelables, les éoliennes et les systèmes photovoltaïques (PV) présentent de grands intérêts.

Ce chapitre présente le contexte de notre étude sur le raccordement d'une centrale PV au réseau de distribution. Pour cela, nous présentons tout d'abord les réseaux de distribution (nature, structure). Ce chapitre aborde ensuite les interactions entre le réseau de distribution et les systèmes PV.

### III.2. Réseau électrique :

Le système électrique est structuré en plusieurs niveaux, assurant des fonctions spécifiques propres, et caractérisés par des tensions adaptées à ces fonctions. Il est fractionné en trois principales subdivisions à savoir le réseau de transport, de répartition et de distribution. Une notion de frontière peut être définie entre les niveaux de tension du réseau électrique, ces frontières étant définies par les postes sources et les transformateurs (voir Figure III.1) [34].

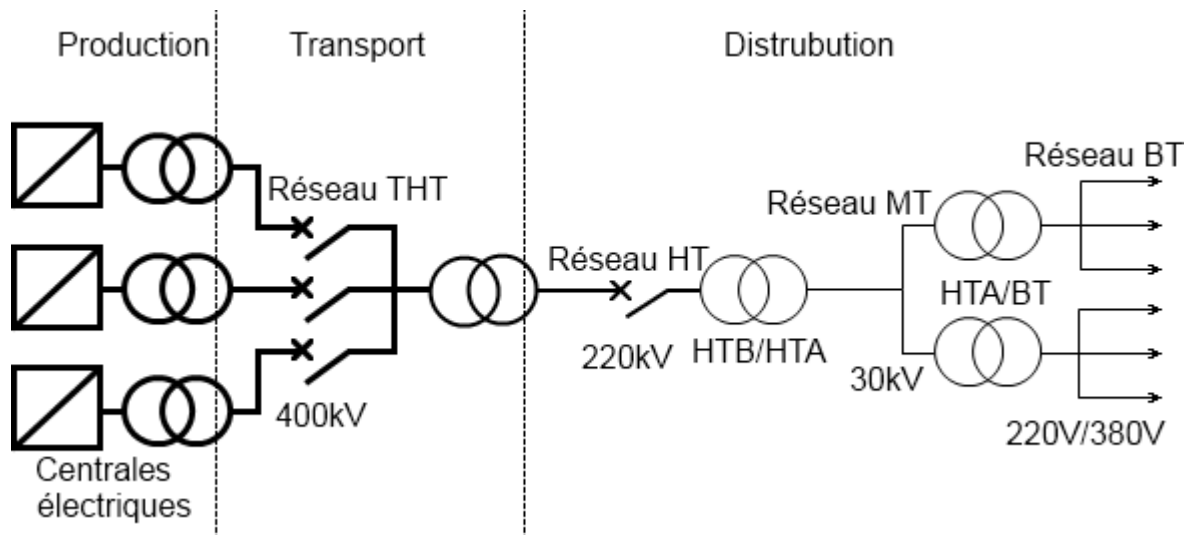


Fig.III. 1: Schéma générale de production, transport et distribution de l'énergie électrique

- Les réseaux de transport à très haute tension (THT.400 kV). C'est à ce niveau de tension que sont assurées les interconnexions entre régions au niveau national et les échanges (importation/exportation) d'énergie électrique au niveau international.

- Les réseaux de répartition à haute tension (HT, de 60 kV à 220 kV) assurent, à l'échelle régionale, assurant le transport de l'électricité vers les zones de consommations et à quelques gros clients industriels directement connectés à celui-ci.
- Les réseaux de distribution sont les réseaux d'alimentation de l'ensemble de la clientèle. On distingue deux sous niveaux : les réseaux à moyenne tension (MT, de 5,5 kV à 30 kV) et les réseaux à basse tension (BT, de 110 V à 220 V). Les réseaux de distribution moyenne tension transportent l'énergie vers les réseaux à basse. Les réseaux basse tension sont destinés à alimenter des clients à faible demande d'énergie [34,35].

### **III.3. Problème de connexion des systèmes photovoltaïques au réseau :**

Les problèmes concernant l'interconnexion du système photovoltaïque au réseau sont [30]:

- Le débrogage de système photovoltaïque si le réseau présente une défaillance (le problème d' 'islanding).
- La protection contre la foudre.
- La qualité de puissance fournie au réseau.
- Les effets des systèmes multiples sur une partie du réseau, en particulier monophasé non équilibré.
- Le dosage fiable des flux de puissance.
- Risques techniques et financiers.

### **III.4. Perturbations des réseaux électriques :**

L'énergie électrique est fournie sous forme de tension constituant un système sinusoïdal triphasé dont les paramètres caractéristiques sont les suivants [30]:

- La fréquence
- L'amplitude des trois tensions
- La forme d'onde qui doit être la plus proche possible d'une sinusoïde
- La symétrie du système triphasé (égalité des modules des trois tensions, leur déphasage et l'ordre de succession des phases).

Des relations contractuelles peuvent s'établir entre fournisseur d'énergie et utilisateur final, mais aussi entre producteur et transporteur ou entre transporteur et distributeur dans le cadre d'un marché. Une application contractuelle nécessite que les termes soient définis en commun et acceptés par les différentes parties [30].



Afin de décrire certaines perturbations et de donner le niveau de conformité de l'énergie fournie. Les perturbations électriques affectant l'un des quatre paramètres cités précédemment peuvent se manifester par : un creux ou une coupure de tension, une fluctuation de la tension, un déséquilibre du système triphasé de tension, une fluctuation de la fréquence, la présence d'harmoniques et/ou d'inter-harmoniques [30].

### III.5. Modélisation de réseau BT :

#### III.5.1. Modèle mathématique :

Le réseau triphasé trois grandeurs sinusoïdales de même fréquence, déphasées entre elles de  $2\pi/3$ , et ayant même valeur efficace, forment un système triphasé équilibré [23].

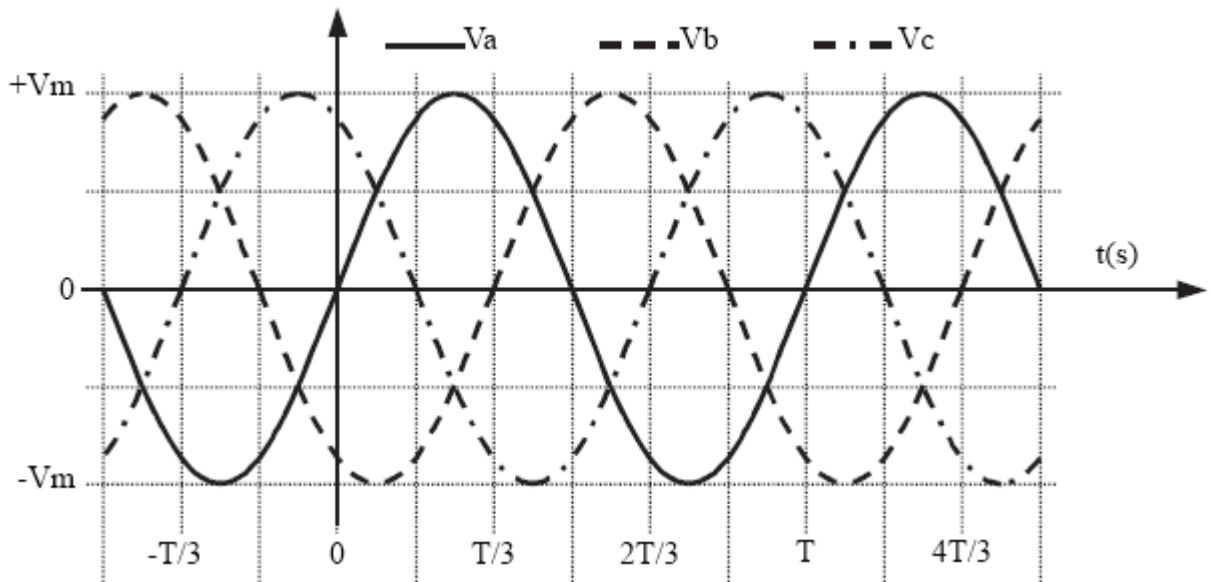


Fig.III. 2: Système de tensions triphasé équilibré

Réseau de distribution électrique. Il est basé sur un système triphasé de tensions. On peut généralement considérer que  $(V_a V_b V_c)$  est un système de tensions triphasé équilibré direct. Il en est de même pour  $(U_{ab} U_{bc} U_{ca})$ . On a [23]:

$$\begin{cases} V_a = V_m \sin(\omega t) \\ V_b = V_m \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) \\ V_c = V_m \sin\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right) \end{cases} \quad (\text{III.1})$$

$$\begin{cases} U_{ab} = V_a - V_b \\ U_{bc} = V_b - V_c \\ U_{ca} = V_c - V_a \end{cases} \quad (\text{III.2})$$

Relations pour un système triphasé équilibré

$$\begin{cases} V_m = \sqrt{2}V_{eff} \\ U_m = \sqrt{3}V_m \\ U_{eff} = \sqrt{3}V_{eff} \end{cases} \quad (III.3)$$

### III.5.2. Schéma de simulation de réseau :

On va utiliser un réseau BT (800V/1.38 kV) avec une fréquence de 50Hz raccordé à un filter de lissage de courant : Résistance égale 0.8929  $\Omega$  et l'inductance 16.58  $\cdot 10^{-3}H$

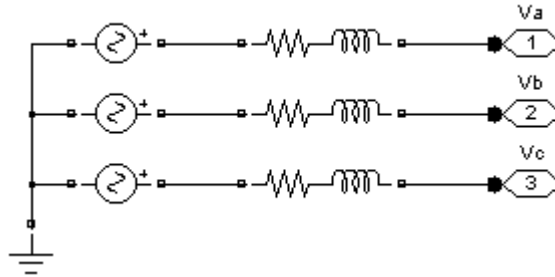


Fig.III. 3: Schéma de simulation de réseau

### III.6. Simulation global de PV raccordé au réseau :

#### III.6.1.Schéma de simulation :

Dans cette simulation on a utilisé un champ photovoltaïque de 18kW raccordé à un réseau de distribution de 800V, un hacheur buck-boost caractérisé par:  $L = 30\mu H$   $C_1 = 2000\mu F$ ,  $C_2 = 300\mu F$  commandé en MPPT de type P&O et un onduleur triphasé commandé en MLI, on a utilisé aussi une charge RL  $R_{ch} = 10 \Omega$ ,  $L_{ch} = 0.0223 H$

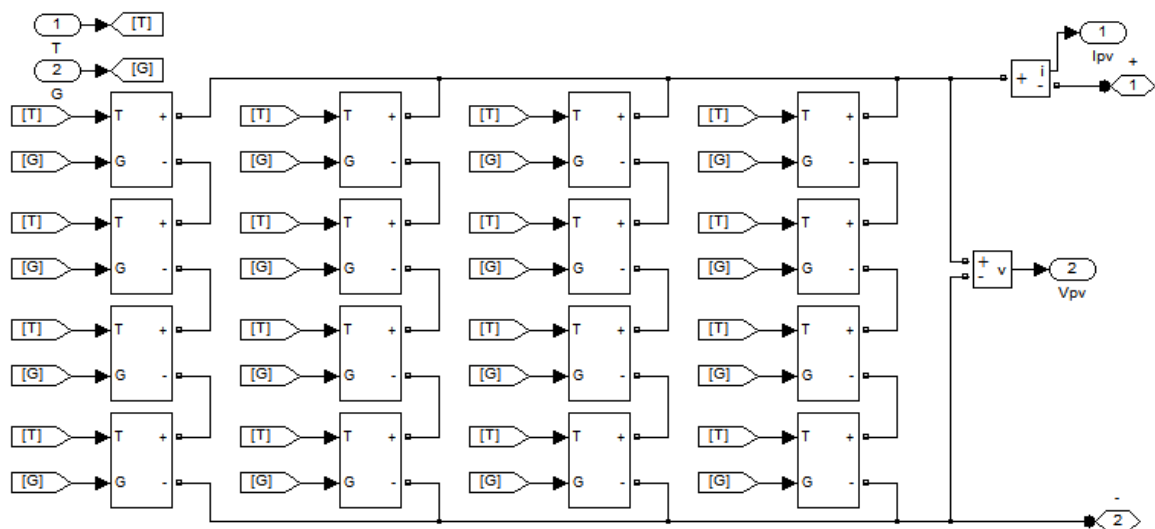


Fig.III. 4: Schéma de simulation de champ photovoltaïque

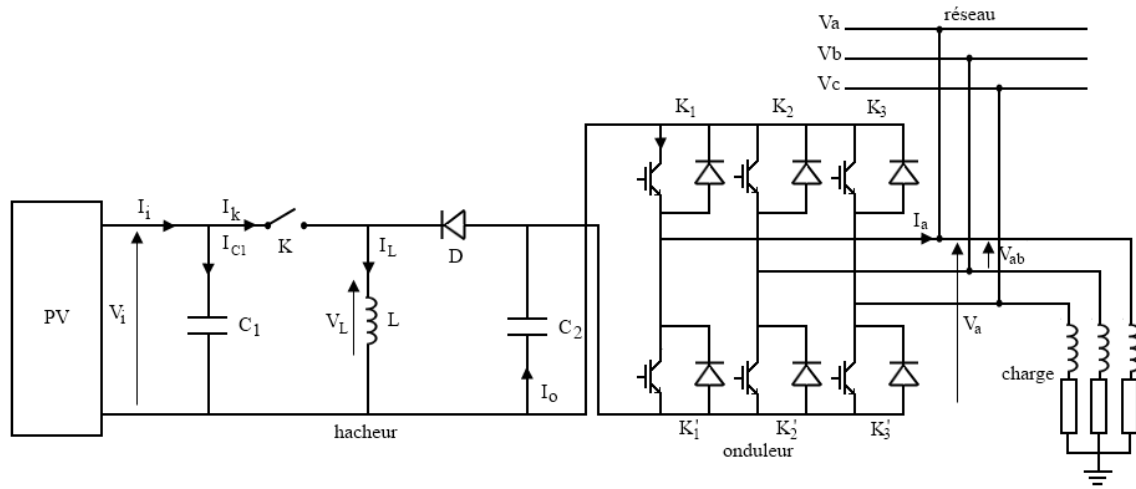


Fig.III. 5: Schéma électrique global PV raccordé au réseau

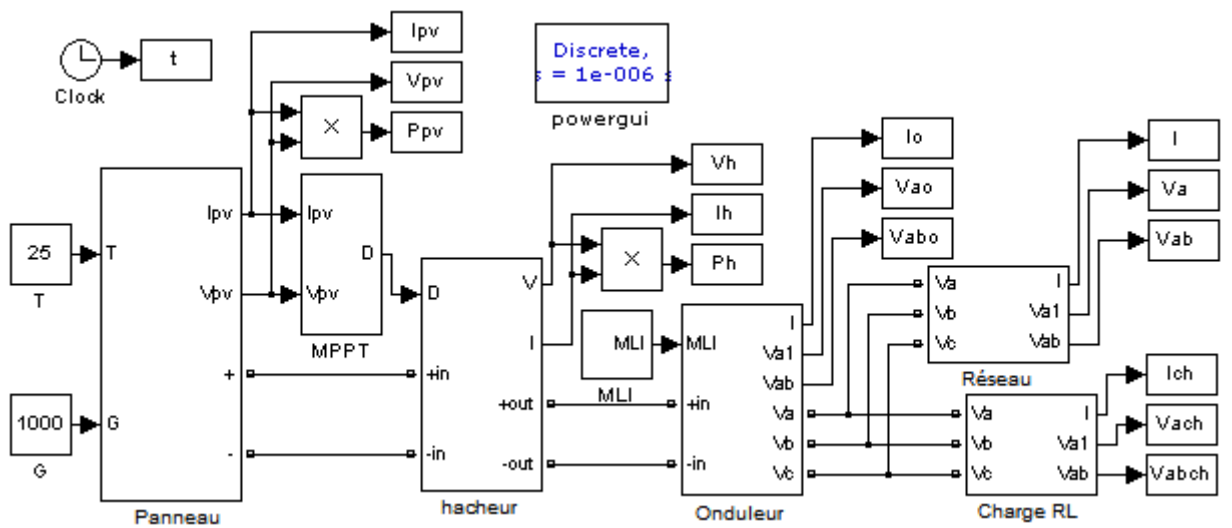
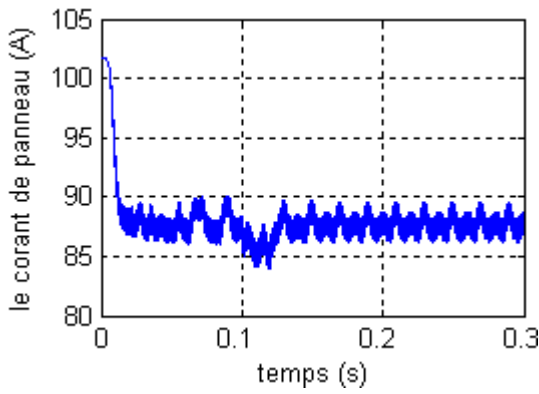
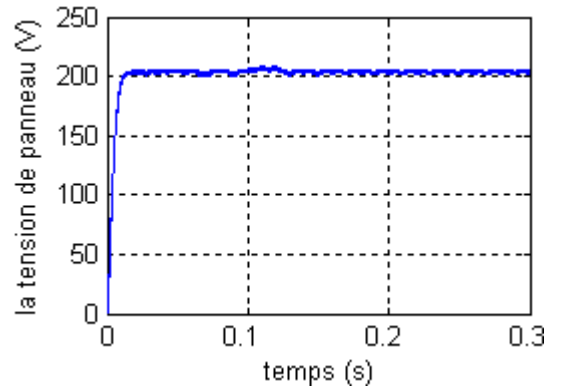


Fig.III. 6: Schéma de simulation global PV raccordé au réseau

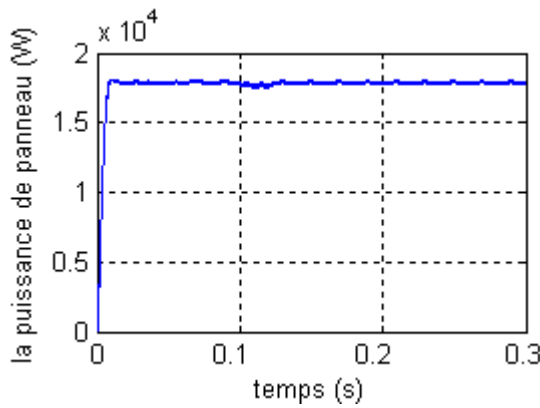
**III.6.2. Résultat de simulation :**



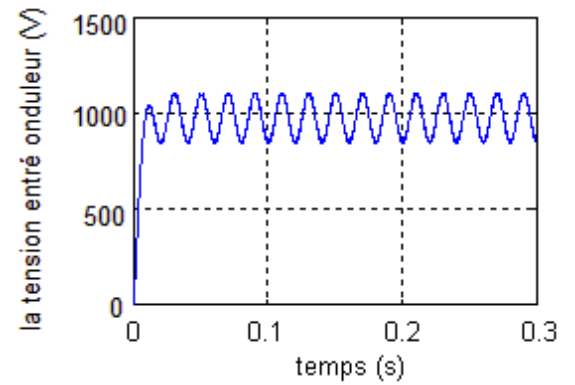
*Fig.III. 7: Le courant de panneau*



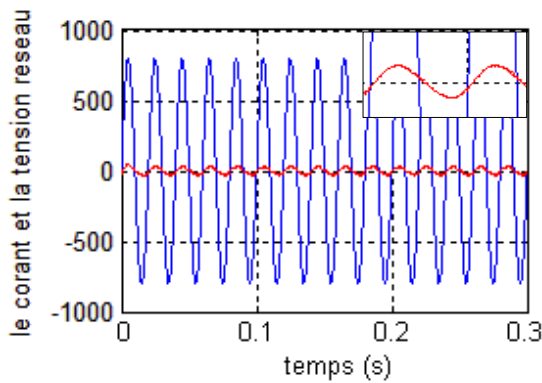
*Fig.III. 8: La tension de panneau*



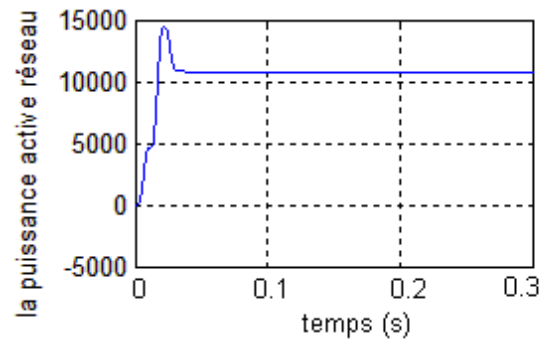
*Fig.III. 9: La puissance des panneaux*



*Fig.III. 10: La tension d'entrée de l'onduleur*



*Fig.III. 11: Le courant de réseau en rouge et la tension simple de réseau en bleu*



*Fig.III. 12: La puissance active de réseau*

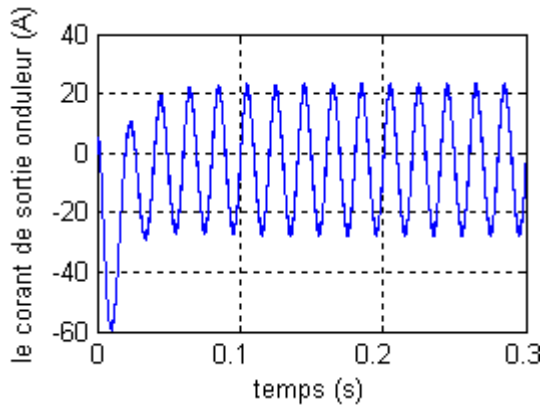


Fig.III. 13: Le courant de sortie de l'onduleur

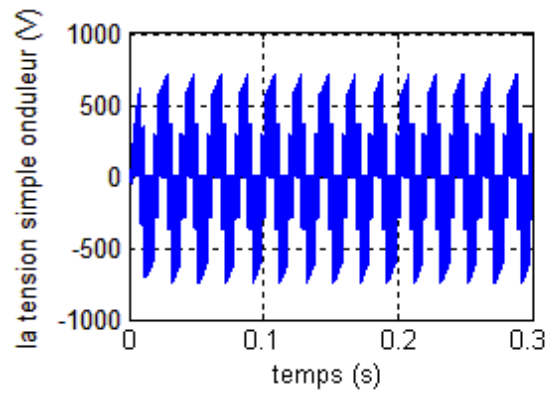


Fig.III. 14: La tension simple de l'onduleur

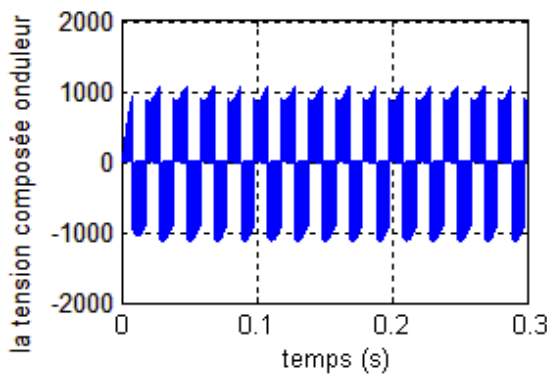


Fig.III. 15: La tension compose de l'onduleur

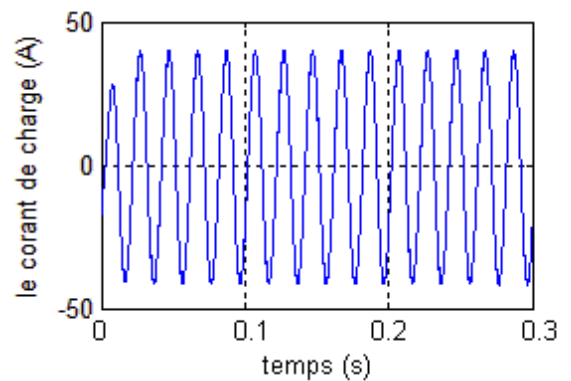


Fig.III. 16: Le courant de la charge

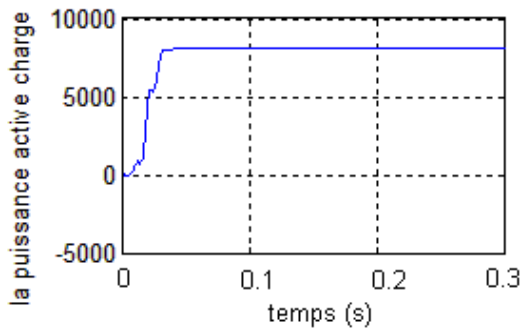


Fig.III. 17: La puissance active de la charge

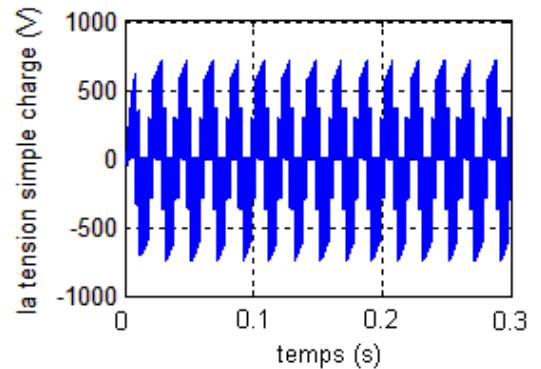


Fig.III. 18: La tension simple de la charge

On a remarqué que le courant de générateur PV dans la figure (fig.III.7) est stable à la valeur de 87A, la tension de GPV dans la figure (fig.III.8) se stabilise à 200V. D'après les résultats de simulation (fig.III.9) on remarque que la puissance de PV égale à la puissance nominale 18kW grâce à la commande MPPT.

On a remarqué aussi dans les figures (fig.III.10 et fig.III.8) que le hacheur fonction en mode survolteur car la tension d'entrée de l'onduleur est supérieure à celle de PV.

Dans la figure (fig III.11) on remarque que la tension est en avance par rapport au courant (un déphasage de  $19.44^\circ$ ). D'après la figure (fig III.12) la puissance de réseau est inférieure par rapport à la puissance de GPV car ce dernier alimente une charge.

Le courant de sortie de l'onduleur (fig.III.13) a une forme sinusoïdale avec une valeur maximale de 20A

La valeur max de la tension simple et la tension composée de sortie de l'onduleur (fig.III.14 et fig.III.15) égale à celle de réseau BT (fig.III.10) mais la forme de la tension de la charge est imposée par l'onduleur.

### **III.7. Conclusion :**

Dans ce chapitre nous avons modélisé et simulé tous les équipements représentant le système photovoltaïque connecté au réseau électrique, tel que le générateur photovoltaïque, le hacheur dévolteur-survolteur et l'onduleur et la charge.

# CONCLUSION GÉNÉRALE

### **Conclusion générale :**

Le travail présenté dans ce mémoire concerne les systèmes photovoltaïques en fonctionnement autonome couplés au réseau électrique. Ce dispositif est amené à connaître des développements importants liés essentiellement à une volonté de plus en plus affichée de diversification des moyens de production de l'énergie et d'un meilleur respect de l'environnement. Associées à une production décentralisée, ces petites ou moyennes unités peuvent permettre une mutualisation avantageuse de ressources très réparties. Très fluctuantes, et contribuer à une meilleure gestion de l'énergie électrique dans un contexte de développement durable.

L'intérêt porté aux énergies renouvelables. Nous a amené à nous intéresser aux systèmes photovoltaïques comme production décentralisée. Ces systèmes utilisent des convertisseurs pour se connecter au réseau électrique et la puissance injectée est fortement variable puisqu'elle est dépendante de l'éclairement et la température. Une étude bibliographique a permis de recenser les différents systèmes photovoltaïques pouvant être connecté au réseau.

Notre travail de simulation l'étude de la connexion au réseau électrique se résume à un convertisseur DC/DC de type buck-boost qui fournit une tension continue. Ce convertisseur présente l'avantage d'être un élévateur et abaisseur de tension ce qui permet à ce système de s'adapter aux changements météorologiques et pour extraire le maximum de puissance disponible et un autre convertisseur DC/AC commandé par la MLI (sinus triangle) à transistors IGBT qui converti la tension continu à une tension alternative filtrée par des filtres LR et on a modélisés et simulés sous Matlab-SIMULINK.

Les résultats de la simulation ont démontré l'intérêt d'un dispositif de recherche de la puissance maximale. La méthode P&O (perturbation and observation) a été choisie pour implanter un algorithme de poursuite du point de fonctionnement à puissance maximale du panneau PV (MPPT).

De cette étude ressort l'importance de la modélisation de la connexion au réseau électrique et de ces systèmes de production. La commande de l'onduleur et les systèmes de productions déterminent le comportement principal de la production décentralisée sur le réseau basse tension. Les technologies actuelles permettent une souplesse de commande importante et même de s'adapter aux défauts du réseau et ainsi de ne pas être déconnectée du réseau. Pour les systèmes photovoltaïques, la souplesse de l'utilisation des convertisseurs statiques est sous employée. Il serait intéressant d'étudier dans quelle mesure les limites d'une



déconnexion du réseau peuvent être repoussées. À ce point-là le concept des onduleurs multi niveau et d'autres méthodes de commande comme la commande SVM est besoin d'être prise en charge.

## Annexe :

Programme de simulation de generateur PV "BP SX 150" :

```

function I=modulePV(V,G,TC)
    k=1.381e-23;      % Constante de Boltzmann
    q=1.602e-19;    % La charge d'électron
    n=1.62;         % Le coefficient de non idéalité
    Eg=1.12;        % L'énergie de la bande de gap
    Ns=72;          % 72 Cellules en série
    TrK=298;        % La température de référence(25C) en Kelvin
    Voc=43.5/Ns;    % Voc (Tension à circuit ouvert )
    Isc=4.75;       % Isc (Courant de court-circuit )
    a=0.65e-3;     % Coefficient de température (0.065%/C)
    TK=273 + TC;   % La température en kelvin
    Vc=V/Ns;       % La tension à la borne de cellule.
    % Courant de court-circuit
    Isc=Isc*(1+(a*(TK-TrK)));
    % Le photo-courant
    Iph=G*Isc;
    % La tension thermique de référence
    Vtr=n*k*TrK/q;
    b=Eg*q/(n*k);
    % Le courant de saturation inverse d'une diode
    I0r=Isc/(exp(Voc/Vtr)-1);
    I0=I0r*(TK/TrK)^(3/n)*exp(-b*(1/TK-1/TrK));
    % La résistance série
    dVdI=-1.0/Ns;
    Xv=I0r/Vtr*exp(Voc/Vtr);
    Rs=-dVdI-1/Xv;
    % La tension thermique
    Vt=n*k*TK/q;
    % Initialisation du courant Ia à zéro
    I=zeros(size(Vc));
    for j=1:5;
        I=I-(Iph-I-I0.*(exp((Vc+I.*Rs)./Vt)-1))...
            ./(-1-I0*(Rs./Vt).*exp((Vc+I.*Rs)./Vt));
    end
end

```

## **Bibliographie :**

- [01] B.Multon, "Production d'énergie électrique par sources renouvelables", Techniques de l'Ingénieur Traité, D 4005.
- [02] M. Djarallah, "Contribution à l'étude des systèmes photovoltaïques résidentiels couplés au réseau électrique", Thèse de Doctorat, Université de Batna, 2008.
- [03] Madani Malika, "réalisation des couches antireflets dans les cellules solaire a couches minces", thèse de magister, université de Tlemcen, 2006
- [04] Belakehal Soltane, "Conception & Commande des Machines à Aimants Permanents Dédiées aux Energies Renouvelables", thèse de Doctorat, université de Constantine, 10/06/2010
- [05] Belhadj Mohammed, "Modélisation D'un Système De Captage Photovoltaïque Autonome", Mémoire de Magister, université de Bechar, 2008
- [06] Louazene Mohamed Lakhdar, "Etude technico-économique d'un système de pompage photovoltaïque sur le site de Ouargla", Mémoire de Magister, université de Batna, 12/06/2008
- [07] Camara Mohamed Ansoumane, "Modélisation du stockage de l'énergie photovoltaïque par supercondensateurs", thèse de Doctorat, université de Paris, 04/07/2011
- [08] Metri Noura, "élaboration de module  $\pi$ -conjuguées à base de triphénylamine pour la réalisation de dispositifs photovoltaïques hybrides sensibles", thèse de Doctorat, 30/09/2011
- [09] M. Capderou, "Atlas Solaire de L'Algérie", Tomel,2, OPU 1983.
- [10] Dang Minh Trung "élaboration de cellules solaire photovoltaïque à base de polymères conjugués, études des systèmes", thèse de Doctorat, université de Bordeaux 26/11/2009
- [11] Anne Labouret, Pascal Cumunel, "Cellules solaires Les bases de l'énergie photovoltaïque", Dunod, 5e édition, 2010
- [12] Hallou Solaire, "La fabrication des cellules photovoltaïques", fiche technique
- [13] Florent Monestier, "Amélioration de l'absorption photonique dans les cellules photovoltaïques organiques", thèse de Doctorat, Université de Marseille, 10/04/2008
- [14] Gernigon Véronique, "Utilisation de copolymères à blocs dans les cellules solaires organiques morphologie, transport de charges et conversion photovoltaïque", thèse de Doctorat, Université de Strasbourg, 04/01/2012
- [15] J.Pireaux, "Physique et énergie Travail sur les panneaux photovoltaïques", Université de Namur, 2006-2007
- [16] Cabal Cédric, " Optimisation énergétique de l'étage d'adaptation électronique dédié à la conversion photovoltaïque", thèse de Doctorat, Université de Toulouse, 15/12/2008
- [17] Meekhun Dariga, "Réalisation d'un système de conversion et de gestion de l'énergie d'un système photovoltaïque pour l'alimentation des réseaux de capteurs sans-fil autonomes pour l'application aéronautique", thèse de Doctorat, Université de Toulouse
- [18] Semassou Clarence, "Aide à la décision pour le choix de sites et systèmes énergétiques adaptés aux besoins du Bénin", thèse de Doctorat, Université de Bordeaux, 15/12/2011

- [19] C.Galize, "introduction à l'électrotechnique et à l'électronique de puissance" cours, université de montpellier II, 12/02/2002
- [20] Merabet Kamel, " commande mu d'un onduleur triphasé basée sur la dispersion de la tension triphasée", Université du Québec, 2011
- [21] Benseddik Othmane, Djaloud Fathi, "Etude et optimisation du fonctionnement d' système photovoltaïque", Mémoire de Master, Université de Ouargla, 27/06/2012
- [22] Michel Pinard, " convertisseurs et électronique de puissance", Dunod, 2007
- [23] Guy Chateigner, Michel Boës, "Manuel de génie électrique", Dunod, 2007
- [24] Abouchabana Nabil, "Etude d'une nouvelle topologie buck-boost appliquée à un MPPT", Mémoire de Magister, Université de Laghouat, 2009
- [25] Philippe Barrade, "électronique de puissance méthodologie et convertisseurs élémentaire", press polytechnique et universitaires, 1ère édition 2006.
- [26] Lequeu Thierry, "Cours d'électronique de puissance", IUT GEII 2ième année, Option EEP, 2004/2005
- [27] Bogdan Grabowski, Christian Ripoll, " Aide-mémoire Électronique", Dunod, 5e édition, 2008
- [28] Jordana Bratt, "grid connected pv inverters: modeling and simulation", Mémoire de Master, Université de San Diego State,2011
- [29] Sobaihi Khaled, " Etude et réalisation d'un hacheur de Tracking du Point de Puissance Maximale (MPPT) a contre réaction de tension", Mémoire de Magister, Ecole Nationale Polytechnique, 2003
- [30] Abbassen Lyes, "étude de la connexion au réseau électrique d'une centrale photovoltaïque", Mémoire de Magister, Université de Tizi Ouzou,05/05/2011
- [31] Wildi Théodore, Sybille Gilbert, " électrotechnique", de boeck, 4e édition, 2005
- [32] A.Fouillé, "Electrotechnique à l'usage des ingénieurs-Tome 3 ", 10ème édition, 1980
- [33] Touzani Youssef, " Commande aléatoire du convertisseur Buck-Boost triphasé à prélèvement sinusoïdal du courant", thèse de Doctorat, Université de Clermont-Ferrand, 10/07/2006
- [34] Thi Minh Chau LE, " Couplage Onduleurs Photovoltaïques et Réseau, aspects contrôle/commande et rejet de perturbations", thèse de Doctorat, Université de Grenoble, 25/01/2012
- [35] SONEGAS Spa, "Notice d'information", fiche technique,2006
- [36] Yann RIFFONNEAU, "Gestion des flux énergétiques dans un système photovoltaïque avec stockage connecte au réseau", thèse de Doctorat, Université Joseph Fourier, 23/10/2009

## **Symbole :**

$\psi$ :	La latitude.
$l$ :	La longitude.
$\delta$ :	La déclinaison.
$\rho$ :	L'angle horaire.
$\sigma$ :	Le taux d'insolation.
$S_0$ :	La durée maximale d'insolation.
$S$ :	La durée effective d'ensoleillement.
$h$ :	La hauteur angulaire.
$\alpha$ :	Azimut du soleil.
$\varepsilon$ :	Albédo.
$I$ :	Le courant en (A).
$V$ :	La tension en (V).
$I_{SC}$ :	Le courant de court-circuit en (A).
$V_{OC}$ :	La tension de circuit ouvert en (V).
$V_T$ :	La tension thermique (V).
$R$ :	Résistance en ( $\Omega$ ).
$G$ :	L'irradiation solaire en ( $W/m^2$ ).
$q$ :	Charge d'électron $1.602 \cdot 10^{-9}C$ .
$K$ :	Constante de Boltzmann $1.381 \cdot 10^{-23}J/K$ .
$n$ :	Facture de non idéalité.
$T$ :	La température en (K).
$E_g$ :	L'énergie de la bande interdite (gap) en (eV).
$C$ :	Condensateur en (F).
$L$ :	Inductance en (H).
$T_e$ :	Période en (s).
$f_e$ :	Fréquence (Hz).
$\alpha$ :	Rapport cyclique.
$P$ :	Puissance (W).
$t$ :	Temps (s).
$\omega$ :	Pulsation (rad/s).

## **Abréviation :**

PV:	Photovoltaïque.
PPM :	Le point de fonctionnement optimal.
MPPT:	Maximum Power Point Tracking.
P&O:	Perturbation et Observation.
DC:	Courant Continu (Direct Current).
AC:	Courant Alternatif (Alternative Current).
MLI, PWM :	Modulation de largeur d'impulsion (Pulse Width Modulation).
THT:	Très haute tension.
HT, HTB:	Haute tension.
MT, HTA:	Moyenne tension.
BT:	Basse tension.

## Liste des figures

### Chapitre I :

Fig.I. 1: Position du soleil .....	5
Fig.I. 2: Des cellules photovoltaïques .....	9
Fig.I. 3: Structure d'une cellule photovoltaïque.....	10
Fig.I. 4: Caractéristiques courant-tension de la cellule photovoltaïque .....	11
Fig.I. 5 : Module photovoltaïque.....	12
Fig.I. 6 : Câblage des cellules dans un module .....	12
Fig.I. 7: Panneau photovoltaïque .....	13
Fig.I. 8 : Boite de dérivation. ....	13
Fig.I. 9: Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque.....	14
Fig.I. 10 : Modèle de simulation d'un générateur PV .....	18
Fig.I. 11: Evolution de la caractéristique (I-V) et (P-V) du module en fonction de l'irradiation .....	18
Fig.I. 12: Evolution de la caractéristique (I-V) (P-V) du module en fonction de la température .....	19

### Chapitre II :

Fig.II. 1: Diagramme puissance-fréquence des composants .....	23
Fig.II. 2: Symbole d'un convertisseur DC-DC .....	23
Fig.II. 3: Schéma électrique d'un hacheur buck .....	25
Fig.II. 4 : Chronogrammes de courant et tension d'un hacheur buck.....	25
Fig.II. 5 : Schéma électrique d'un hacheur buck fermé .....	26
Fig.II. 6: Schéma électrique d'un hacheur buck ouvert.....	26
Fig.II. 7: Schéma électrique d'un hacheur boost .....	27
Fig.II. 8: Chronogrammes de courant et tension d'un hacheur boost.....	28
Fig.II. 9: Schéma électrique d'un hacheur boost fermé .....	28
Fig.II. 10: Schéma électrique d'un hacheur boost ouvert .....	29
Fig.II. 11: Schéma électrique d'un hacheur buck- boost .....	29
Fig.II. 12: Chronogrammes de courant et tension d'un hacheur buck-boost.....	30
Fig.II. 13: Schéma électrique d'un hacheur buck- boost fermé.....	30
Fig.II. 14: Schéma électrique d'un hacheur buck- boost ouvert.....	31
Fig.II. 15: Schéma de simulation d'un hacheur buck- boost .....	31
Fig.II. 16: Algorithme de perturbation et de l'observation (P et O).....	33
Fig.II. 17: Schéma de simulation de l'algorithme de perturbation et de l'observation (P et O) .....	34
Fig.II. 18: Algorithme incrémental conductance .....	35
Fig.II. 19: Schéma d'un système photovoltaïque avec convertisseur DC-DC commandé par la MPPT35	
Fig.II. 20: Schéma de simulation d'un PV et un hacheur commandé en MPPT .....	36
Fig.II. 21: La tension de panneau.....	36
Fig.II. 22: Le courant de panneau .....	36
Fig.II. 23: La puissance de module photovoltaïque .....	36
Fig.II. 24: La tension de sortie de hacheur .....	37
Fig.II. 25: Le courant de sortie de hacheur .....	37
Fig.II. 26: La puissance de sortie de hacheur.....	37
Fig.II. 27: Symbole de convertisseur DC-AC monophasé et triphasé .....	37
Fig.II. 28: Structure d'un onduleur triphasée.....	38
Fig.II. 29: Schéma de simulation d'un onduleur triphasée .....	38
Fig.II. 30: Schéma de simulation d'une commande MLI .....	40
Fig.II. 31: Principe de la commande MLI et les impulsions d'un interrupteur.....	40

Fig.II. 32: Schéma de simulation globale.....	41
Fig.II. 33: La tension d'entrée de l'onduleur.....	41
Fig.II. 34: La puissance d'entrée de l'onduleur.....	41
Fig.II. 35: La tension compose $V_{ab}$ .....	41
Fig.II. 36: Le courant d'entrée de l'onduleur .....	41
Fig.II. 37: Le courant de sortie de l'onduleur .....	42
Fig.II. 38: La tension simple $V_a$ .....	42

### **Chapitre III :**

Fig.III. 1: Schéma générale de production, transport et distribution de l'énergie électrique.....	43
Fig.III. 2: Système de tensions triphasé équilibré .....	45
Fig.III. 3: Schéma de simulation de réseau .....	46
Fig.III. 4: Schéma de simulation de champ photovoltaïque.....	46
Fig.III. 5: Schéma électrique global PV raccordé au réseau .....	47
Fig.III. 6: Schéma de simulation global PV raccordé au réseau .....	47
Fig.III. 7: Le courant de panneau .....	48
Fig.III. 8: La tension de panneau .....	48
Fig.III. 9: La puissance des panneaux.....	48
Fig.III. 10: La tension d'entrée de l'onduleur .....	48
Fig.III. 11: Le courant de réseau en rouge et la tension simple de réseau en bleu.....	48
Fig.III. 12: La puissance active de réseau .....	48
Fig.III. 13: Le courant de sortie de l'onduleur.....	49
Fig.III. 14: La tension simple de l'onduleur .....	49
Fig.III. 15: La tension compose de l'onduleur.....	49
Fig.III. 16: Le courant de la charge.....	49
Fig.III. 17: La puissance active de la charge.....	49
Fig.III. 18: La tension simple de la charge.....	49

### **Tableau:**

Tab.I. 1: Evénements notables dans l'histoire du photovoltaïques [10]. .....	7
Tab.I. 2 Les caractéristiques électriques de ce module photovoltaïque "BP SX 150" .....	18



## Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque en fonctionnement autonome et connecté au réseau

**Résumé :** Les convertisseurs électrique sont utilisés dans plusieurs domaines et jouent un rôle primordial dans les applications photovoltaïques. Ce travail constitue une étude sur les convertisseurs utilisé dans la plus part des systèmes photovoltaïques (PV) qu'ils sont raccordé au réseau électrique. Nous avons effectué une étude générale du générateur photovoltaïque et de son fonctionnement à sa puissance maximale en utilisant un hacheur buck-boost commandé par un algorithme MPPT de type P&O, le but étant d'améliorer le rendement en puissance du système PV. On va essayer de raccorder se system avec un réseau BT par un onduleur triphasé a deux niveau commandé par la MLI.

**Mots clé:** Photovoltaïques, Hacheur, MPPT, Onduleur, MLI, Réseau électrique

### نمذجة ومحاكاة نظام كهروضوئي في وضعية مستقلة والمتصلة بالشبكة

**ملخص:** تستخدم محولات الطاقة في العديد من المجالات وتلعب دورا هاما في مجال الفولتية الضوئية. هذا العمل عبارة عن دراسة المحولات المستخدمة في معظم انظمة الفولتية الضوئية المتصلة بالشبكة الكهربائية. لقد أجرينا دراسة شاملة للمولد مولد كهروضوئي وعمله عند أقصى قدر من الطاقة باستخدام المطبر تتحكم فيه خوارزمية MPPT (نقطة الاستطاعة القصوى لتوليد الكهربائي) من نوع P&O (تشويش و ملاحظة)، والهدف هو تحسين كفاءة الطاقة للأنظمة الكهروضوئية. سنحاول ربط هذا النظام مع شبكة التوتر المنخفض وذلك باستخدام موج تتحكم فيه PWM (تعديل عرض النبضة)

**الكلمات الدالة:** مولد كهروضوئي, المطبر, خوارزمية تقصي نقطة الاستطاعة القصوى, الموج, تعديل عرض النبضة, الشبكة الكهربائية

## Modeling and simulation of a photovoltaic system in standalone and connected to the network

**Abstract:** The power converters are used in many areas and play an important role in photovoltaic applications. This work is a study of the converters used in most of the photovoltaic (PV) systems that are connected to the grid. We conducted a comprehensive study of the photovoltaic generator and its operation at maximum power using a buck-boost chopper controlled by an MPPT algorithm, type P&O, the goal is to improve the power efficiency of the PV system. We will try to connect to BT network system with a two-level three-phase inverter controlled by PWM.

**Key words:** Photovoltaic, Chopper, MPPT, Inverter, PWM, Electrical network