



République algérienne démocratique et populaire

Ministère de l'enseignement supérieur et de la  
recherche scientifique

Université Abbes Laghrou – Khenchela

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de génie industriel

# MÉMOIRE DE MASTER

ELECTROTECHNIQUE  
COMMANDE ELECTRIQUE

---

Présenté et soutenu par :  
**TAIBI Mohammed islam**

Le : 18 juin 2023

## Etude et simulation d'un système de commande interconnecté au réseau (Système photovoltaïque)

---

**Jury :**

Dr. <b>REZZAK Daoud</b>	Université de Khenchela	Président
Dr. <b>BESSAM Besma</b>	Université de Khenchela	Examineur
Dr. <b>BOUMAARAF Abdelaali</b>	Université de Khenchela	Encadreur

Année universitaire : 2022 - 2023

# Remerciements

- ✓ Je remercie bien avec tous mes respects mon  
Encadreur, **Pr :BOUMAARAF abdellali**
- ✓ JE DEDIE CE TRAVAILLE A TOUS MES PROCHES  
SURTOUT : **MON PERE. Ma mère ET Mon FRERE ET Mes  
SOEURES**
- ✓ **A TOUS MES AMIES DE MA VIE**
- ✓ **A MES COUSINS ET ONCLES ET TOUTE LA FAMILLE  
SURTOUT : AMIN ET MOHAMED**
- ✓ **A TOUS ENSEIGNANT ET CEUX QUE M'ON AIDE DEPUIS  
LE PRIMAIRE JUSQU' A MAINTENANT**
- ✓ **A MES NEUVEUX SURTOUT : MINOU ET DJASSEM**

# Table des matières

<i>Introduction Générale</i> .....	4
Chapitre 01 : .....	6
Généralité sur l'énergie solaire photovoltaïque .....	6
<b>Introduction</b> .....	7
<b>Définition d'énergie solaire</b> .....	7
<b>Historique de l'énergie solaire photovoltaïque</b> .....	8
<b>Pour quoi l'énergie solaire ?</b> .....	9
<b>Qu'est-ce que l'énergie solaire photovoltaïque ?</b> .....	9
<b>Avantages et inconvénients [6]</b> .....	10
<b>L'utilisation de l'énergie solaire photovoltaïque :</b> .....	11
<b>Cellule solaire photovoltaïque</b> .....	11
Description de la cellule photovoltaïque .....	11
Structure d'une cellule photovoltaïque.....	11
<b>Le principe de fonctionnement de cellule photovoltaïque</b> .....	12
<b>Les types de cellules photovoltaïques</b> .....	12
La cellule photovoltaïque en silicium monocristallin : .....	13
La cellule photovoltaïque en silicium Polycristallin.....	13
La cellule au silicium Amorphe .....	14
<b>Les avantages et les inconvénients de chaque cellule</b> .....	14
La cellule photovoltaïque en silicium monocristallin.....	14
La cellule photovoltaïque en silicium polycristallin .....	15
La cellule au silicium amorphe .....	15
<b>Modélisation et Caractéristiques électriques d'une cellule PV</b> .....	15
<b>Effets des conditions climatiques sur les modules PV</b> .....	19
Influence de l'éclairement solaire:.....	19
Influence de la température .....	19
Effet de l'ombrage partiel: .....	20
<b>La constitution d'un module photovoltaïque :</b> .....	21
Mise en série :.....	22
La mise en parallèle: .....	23
Diodes de by-pass: .....	24
<b>Classification des systèmes photovoltaïques:</b> .....	24
Systèmes autonomes :.....	24

Systèmes connectés au réseau : .....	25
<b>Conclusion:</b> .....	26
<b>Chapitre 02 :</b> .....	27
<b>Les convertisseurs</b> .....	27
<b>Statiques</b> .....	27
<b>Introduction</b> .....	28
<b>L'hacheur Boost :</b> .....	28
Définition .....	28
Différent types d'hacheur : .....	29
<b>Convertisseur Boost</b> .....	30
Principe de fonctionnement .....	30
Onduleur PV .....	32
Onduleur de tension triphasé .....	32
Onduleur centralisé.....	33
Structure de l'onduleur triphasé .....	34
Fonctionnement de l'onduleur triphasé.....	36
<b>Commande MPPT</b> .....	37
Classification des commandes MPPT selon le type de recherche : .....	38
<b>Classification des quelques algorithmes du suiveur la puissance maximale :</b> .....	38
Méthode indirect .....	39
Méthode direct .....	39
<b>Chapitre 03 :</b> .....	44
<b>Les différent technique de commande pour optimiser la conversation PV</b> .....	44
<b>Introduction</b> .....	45
<b>Définition d'un réseau électrique</b> .....	45
<b>Niveaux des tensions des réseaux électriques</b> .....	46
<b>Constitution des réseaux électriques</b> .....	47
Générateur : .....	47
Postes Électriques .....	47
Transformateurs.....	48
Lignes électriques[28].....	49
Les charges électriques.....	49
<b>Réseaux basse tension ( BT)</b> .....	50
Définition .....	50
Constitution d'un réseau BT [27].....	50

<b>Structure de bases des réseaux électriques</b> .....	51
Qualité de l'énergie .....	51
Filtre de sortie .....	52
Taux de distorsion harmonique[28] .....	53
<b>Principe de la conversion Photovoltaïque</b> .....	54
<b>Principe de l'intégration du photovoltaïque au réseau</b> .....	55
<b>Conditions techniques de raccordement des générateurs photovoltaïque au réseau BT</b> .....	55
<b>Différents types de systèmes photovoltaïques connectés au réseau :</b> .....	56
Système PV connecté directement au réseau [23] .....	56
<b>Chapitre 04:</b> .....	58
<b>Simulation et résultats</b> .....	58
<b>Introduction</b> .....	59
<b>Description des centrales photovoltaïques connectées au réseau</b> .....	59
Systèmes raccordés directement au réseau : .....	59
Systèmes avec hacheurs .....	60
<b>Description de la configuration étudiée :</b> .....	60
Un générateur photovoltaïque: .....	60
Convertisseur Boost (Continu- Continu) .....	61
La commande MPPT : .....	61
Convertisseur DC/AC .....	61
La charge : .....	62
Le réseau électrique : .....	62
<b>Etape de la simulation</b> .....	63
Simulation du générateur GPV .....	63
Simulation du hacheur survolteur .....	65
La commande MPPT : .....	65
La commande de l'onduleur MLI: .....	66
<b>Résultats de la simulation :</b> .....	67
Caractéristiques du module photovoltaïque. ....	67
Simulation à ensoleillement variable et température constante .....	70
Simulation à température variable et ensoleillement constant : .....	72
Simulation dans les conditions variables d'ensoleillement et de température .....	74
<b>Conclusion</b> .....	79
Conclusion Générale .....	80

# *Introduction Générale*

L'électricité produite à partir de sources d'énergie renouvelables joue un rôle essentiel de nos jours. Parmi ces sources, l'énergie solaire, l'énergie éolienne et la géothermie sont largement utilisées. L'énergie solaire, en particulier, est une option attrayante en raison de sa disponibilité abondante et de son caractère propre. C'est pourquoi nous avons choisi de nous concentrer sur les systèmes photovoltaïques dans notre projet de fin d'études.

Dans un système photovoltaïque, l'énergie solaire est convertie directement en électricité par le biais de modules solaires photovoltaïques (PV). Ces modules ont des points de puissance maximale (MPP) qui dépendent des conditions environnementales telles que l'intensité lumineuse, la température des modules, la surface de la cellule et la charge. Afin d'exploiter au maximum la puissance des modules PV, plusieurs techniques de suivi du point de puissance maximale (MPPT) ont été proposées pour les systèmes autonomes ou connectés au réseau.

Dans les systèmes autonomes, les algorithmes MPPT sont généralement implémentés sur des convertisseurs DC-DC, avec des batteries pour stocker l'excédent d'énergie. Dans les systèmes connectés au réseau, l'énergie produite par le générateur photovoltaïque peut être injectée dans le réseau via un convertisseur DC-DC utilisé comme régulateur MPPT, suivi d'un onduleur qui convertit la tension continue en tension alternative. L'objectif de notre travail est de mieux comprendre les performances des convertisseurs DC-DC associés à une commande numérique lorsqu'ils sont couplés à un générateur photovoltaïque, et d'améliorer la tension de sortie pour obtenir une source d'électricité fiable.

Pour atteindre cet objectif, nous suivrons une approche méthodique détaillée dans les chapitres suivants de notre mémoire :

Au chapitre I, nous présenterons les concepts généraux des systèmes photovoltaïques. Nous définirons un système PV, expliquerons l'effet photovoltaïque, les composants et les différents types d'installations PV et leur contrôle.

Au chapitre II, nous aborderons les convertisseurs DC-DC, leur principe de fonctionnement et les différents types disponibles. Nous parlerons également des commandes MPPT, leur principe de fonctionnement, quelques algorithmes couramment utilisés et le choix de la commande MPPT appropriée.

Au chapitre III, nous étudierons les réseaux électriques, leurs types et leurs composants. Nous accorderons une attention particulière au réseau de distribution basse tension

(BT) en raison de sa pertinence pour notre projet. Nous décrirons également notre installation PV dans ce chapitre.

Au chapitre IV, nous procéderons à la simulation et présenterons les résultats obtenus.

Enfin, nous conclurons ce travail par une synthèse générale des résultats et des perspectives futures.

**Chapitre 01 :**  
**Généralité sur**  
**l'énergie solaire**  
**photovoltaïque**

## **Introduction**

Dans ce chapitre, nous abordons brièvement les énergies renouvelables, en particulier l'énergie solaire photovoltaïque. Nous menons une étude approfondie sur le rayonnement solaire, qui se convertit en énergie électrique. Nous examinons également la technologie utilisée dans les panneaux solaires, ainsi que toutes leurs propriétés électriques et leur influence sur des facteurs externes tels que la chaleur et l'humidité. Enfin, nous ne négligeons pas d'exposer de manière exhaustive tous les défauts des panneaux solaires et de les identifier. Cela marque la fin de ce chapitre.

## **Définition d'énergie solaire**

L'énergie solaire est une source inépuisable, si présente qu'elle est souvent négligée. Cependant, cette énergie incidente représente plus de 10 000 fois la consommation mondiale d'énergie [1]. Il s'agit donc d'une source abondante et renouvelable. Malheureusement, il n'est pas possible de l'exploiter directement, car il faut la convertir en d'autres formes d'énergie plus utiles [2]:

En bénéficiant directement du rayonnement solaire (énergie passive).

En utilisant la chaleur du rayonnement solaire (énergie thermique).

En convertissant le rayonnement solaire en électricité grâce à des cellules photovoltaïques (énergie photovoltaïque).



Figure 1: image de soleil

## Historique de l'énergie solaire photovoltaïque

En 1839, l'énergie solaire photovoltaïque fait son apparition dans l'histoire de l'énergie solaire. Le physicien français Alexandre Edmond Becquerel découvre pour la première fois l'effet photovoltaïque. Alors qu'il expérimentait avec une batterie électrolytique dotée d'électrodes en platine, il remarqua une augmentation du courant lorsque celle-ci était exposée au soleil. C'était le début de l'énergie solaire photovoltaïque.

Une avancée significative survint en 1873, lorsque l'ingénieur électricien anglais Willoughby Smith découvrit l'effet photovoltaïque dans les solides, en particulier dans le cas du sélénium.

Quelques années plus tard, en 1877, un professeur de philosophie naturelle au King's College de Londres nommé William Grylls Adams et son élève Richard Evans Day découvrirent que l'exposition du sélénium à la lumière produisait de l'électricité. Ils créèrent ainsi la première cellule photovoltaïque au sélénium.

En 1953, Calvin Fuller, Gerald Pearson et Daryl Chaplin découvrirent la cellule solaire en silicium. Cette cellule était capable de produire suffisamment d'électricité et était assez

efficace pour alimenter de petits appareils électriques. Ces cellules photovoltaïques jouèrent un rôle crucial dans l'avenir de l'énergie solaire.

Les premières cellules solaires disponibles commercialement ne firent leur apparition qu'en 1956, bien que leur coût restait prohibitif pour la plupart des gens jusqu'aux environs de 1970, lorsque le prix des cellules solaires chuta d'environ 80%.

À partir de la fin des années 1950, les cellules solaires furent utilisées dans les satellites américains et soviétiques [3].

## **Pour quoi l'énergie solaire ?**

La production d'électricité photovoltaïque a d'abord été développée pour des applications autonomes, ne nécessitant pas de connexion au réseau, telles que les satellites de télécommunications ou les maisons isolées. Aujourd'hui, elle se retrouve dans diverses applications d'alimentation, telles que les calculatrices, les montres et autres objets du quotidien. En effet, ce type d'électricité générée par une seule cellule photovoltaïque peut facilement alimenter différentes charges continues.

Récemment, avec l'avènement des installations photovoltaïques connectées au réseau de distribution, le photovoltaïque s'est considérablement développé en tant que moyen de production d'électricité.

## **Qu'est-ce que l'énergie solaire photovoltaïque ?**

L'énergie solaire photovoltaïque est une forme d'électricité générée à partir de la lumière du soleil grâce à un système photovoltaïque. Ce système est composé de panneaux photovoltaïques, de composants électriques tels que des câbles et des dispositifs de protection, ainsi que de composants électroniques tels qu'un onduleur. Les panneaux utilisent l'énergie solaire incidente pour produire de l'électricité grâce à l'effet photovoltaïque. En adoptant cette technologie, vous pouvez contribuer facilement à la préservation de l'environnement. Avec 4 panneaux photovoltaïques de 400 W, vous pouvez produire environ 2 600 à 2 900 kWh par an, ce qui couvre largement la consommation annuelle totale de votre foyer.

Le photovoltaïque est simplement la transformation directe de la lumière solaire en électricité grâce aux panneaux photovoltaïques. C'est une technologie remarquable qui

évolue constamment. Les panneaux solaires photovoltaïques permettent d'alimenter vos éclairages, appareils ménagers et systèmes de chauffage électriques.

Une installation photovoltaïque comprend des panneaux solaires ainsi qu'un onduleur. L'onduleur transforme le courant continu produit par les panneaux en courant alternatif, qui peut ensuite être injecté dans le réseau électrique.

C'est incroyable, n'est-ce pas ? Une bonne installation photovoltaïque peut durer en moyenne plus de 25 ans, et les résultats sont évidents, tant sur le plan économique que sur le plan environnemental.

L'énergie photovoltaïque est une forme d'énergie dérivée des rayons du soleil, propre, renouvelable, gratuite et facilement accessible. En passant à l'énergie photovoltaïque, vous économisez non seulement de l'argent sur votre facture d'électricité, mais vous vous alignez également sur les valeurs de la société actuelle et contribuez au respect de l'environnement. [5]



Figure 2: panneau photovoltaïque

## **Avantages et inconvénients [6] :**

En ce qui concerne les avantages de l'énergie solaire, il y en a plusieurs à mentionner :

- L'énergie solaire est une source renouvelable et gratuite.
- La production d'électricité à partir du solaire est propre et non toxique.
- Les panneaux solaires nécessitent peu d'entretien et peuvent résister à différentes conditions climatiques.
- L'électricité photovoltaïque est produite localement, de manière décentralisée, directement chez l'utilisateur.
- Contrairement aux éoliennes, elle ne génère pas de bruit lors de son fonctionnement.
- Elle offre une grande flexibilité de production, allant des milliwatts aux mégawatts.
- La durée de vie des panneaux solaires est très longue.

Malgré ces avantages, l'énergie photovoltaïque présente quelques inconvénients à prendre en compte :

- Le coût des installations solaires peut être élevé, en fonction de leur taille et de leur puissance.
- La production d'énergie dépend de l'ensoleillement, qui varie toujours.
- La production n'est pas constante tout au long de la journée et peut varier d'une région à l'autre.
- Le stockage de l'énergie avec des batteries augmente le coût de l'installation.
- Les composants du système peuvent être difficiles à recycler.

## **L'utilisation de l'énergie solaire photovoltaïque :**

L'énergie solaire photovoltaïque utilise la lumière du soleil comme source d'énergie. Cette forme d'énergie peut être captée et convertie en électricité grâce à l'utilisation de panneaux solaires installés sur les façades ou les toits des bâtiments. Ce processus de conversion est connu sous le nom d'"effet photovoltaïque" et a été découvert en 1839 par Antoine-César Becquerel. Lorsque la surface des panneaux est exposée à la lumière, cela génère un courant électrique. Le terme "photovoltaïque" est dérivé de deux mots : "photo", qui vient du grec et signifie "lumière", et "voltaïque", qui est dérivé du physicien italien Alessandro Volta et représente l'unité de mesure du potentiel électrique (le volt) [4, 2]. La cellule solaire est l'élément central d'un système photovoltaïque, responsable de la collecte de la lumière du soleil, tandis que les modules solaires regroupent un grand nombre de cellules pour augmenter la production d'électricité.

## **Cellule solaire photovoltaïque**

### **Description de la cellule photovoltaïque**

La cellule photovoltaïque est l'élément essentiel de la conversion photovoltaïque. Lorsqu'elle est exposée à la lumière (photons), cette cellule est capable de convertir directement l'énergie lumineuse en énergie électrique grâce à l'effet photovoltaïque. La tension produite dépend de la quantité de lumière incidente. Une photopile génère une tension variable comprise entre 0V et 0,7V [7], en fonction des propriétés des matériaux utilisés et de la température. Dans cette section, nous présenterons la structure et le fonctionnement d'une cellule photovoltaïque.

### **Structure d'une cellule photovoltaïque**

La fabrication d'une cellule solaire passe par les étapes suivantes :

La couche supérieure de la cellule est composée de silicium dopé de type N. Dans cette couche, il y a une quantité d'électrons libres plus élevée par rapport à une couche de silicium pur, d'où le terme de dopage N, qui fait référence à la charge négative des électrons. Le matériau reste électriquement neutre, car le réseau cristallin a une charge globale positive.

La couche inférieure de la cellule est composée de silicium dopé de type P. Cette couche a donc en moyenne une quantité d'électrons libres inférieure par rapport à une couche de silicium pur. Les électrons sont liés au réseau cristallin chargé positivement. La conduction électrique est assurée par des trous chargés positivement (P), comme illustré dans la figure suivante :

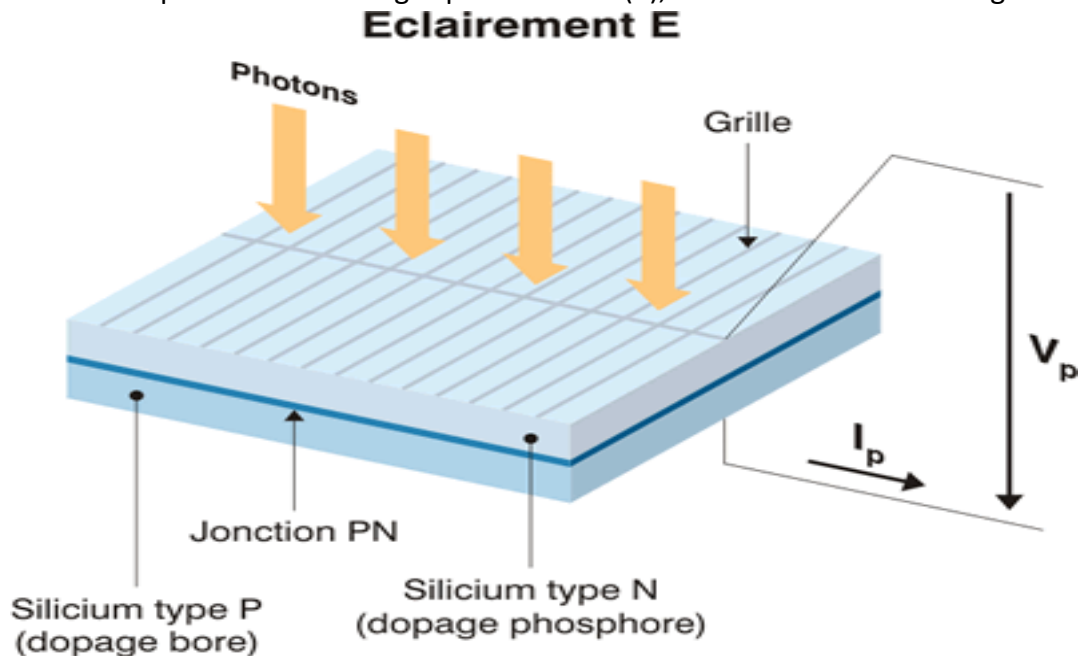


Figure 3: Synoptique d'une cellule solaire

## Le principe de fonctionnement de cellule photovoltaïque

La cellule photovoltaïque fonctionne grâce au rayonnement solaire. Pour générer de l'électricité, elle fait appel à l'effet photovoltaïque qui est obtenu à la suite du choc des photons issus de la lumière solaire sur un matériau semi-conducteur. Ce dernier transmet l'énergie des photons aux électrons qui vont alors créer la tension électrique. Voici le principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

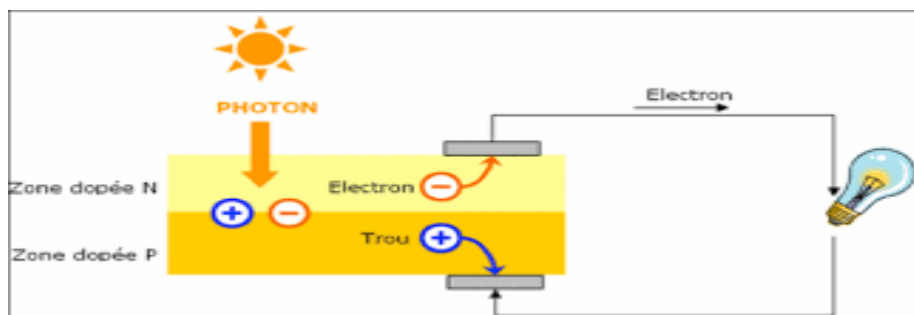


Figure 4: principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

## Les types de cellules photovoltaïques

Les photopiles en silicium cristallin sont très répandues et se présentent sous forme de plaquettes rondes, carrées ou pseudo-carrées. Leur appellation "cristallin" vient du fait que le silicium possède les propriétés d'un cristal, avec un arrangement parfait des atomes.

## La cellule photovoltaïque en silicium monocristallin :

Ce type de cellule photovoltaïque est l'un des plus courants. Elle est fabriquée à partir de silicium monocristallin et est composée d'une seule tranche de ce matériau. Ces cellules permettent de construire des panneaux solaires qui produisent de l'électricité utilisée pour alimenter des habitations ou le réseau public, par exemple.

Le silicium monocristallin est obtenu par le refroidissement du silicium fondu. Une fois solidifié, il se transforme en un cristal uniforme qui est ensuite découpé en fines tranches pour former la cellule photovoltaïque. Ce matériau présente une couleur bleue, sans présence de cristaux ou autres imperfections.



Figure 5: cellule en silicium monocristallin

## La cellule photovoltaïque en silicium Polycristallin

Facilement reconnaissable grâce à ses cristaux bleus, cette cellule photovoltaïque se compose d'une seule tranche de silicium. Elle est de forme carrée. On la trouve souvent dans les installations domestiques, agricoles ou industrielles. Pour obtenir du silicium polycristallin, on fait fondre le silicium dans un moule métallique carré et allongé, appelé lingotière. Le coloris de ce type de cellule est bleu et parsemé de motifs laissés par les cristaux. Cette particularité nous permet de reconnaître facilement cette cellule photovoltaïque

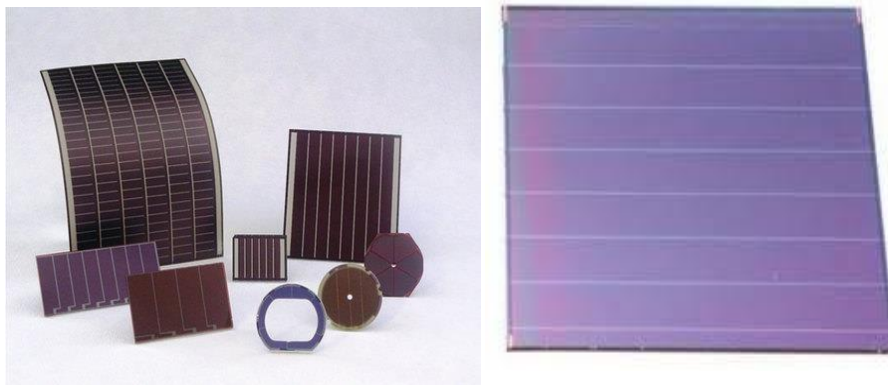


Figure 6: Cellules Polycristallines

### La cellule au silicium Amorphe

La cellule photovoltaïque au silicium amorphe est composée d'une couche fine de silicium, bien plus fine que les monocristallines ou les polycristallines. On la trouve essentiellement pour alimenter les appareils de faible puissance, comme les montres solaires, les éclairages de jardin ou encore les calculatrices solaires.

Le silicium amorphe est obtenu à partir de gaz de silicium. Ce gaz est vaporisé sur un support, en verre, en plastique souple ou en métal, grâce à un procédé de projection sous vide. Ces cellules photovoltaïques sont gris foncé. [8]



### Les avantages et les inconvénients de chaque cellule

#### La cellule photovoltaïque en silicium monocristallin

Cette cellule photovoltaïque offre un rendement d'environ 25 %, l'un des meilleurs sur le marché. La durée de vie des panneaux solaires composés de cellules en silicium

monocristallin avoisine les 30 ans, ce qui est très rentable, malgré le coût élevé à l'achat. L'inconvénient de ce type de cellule solaire est qu'elle offre un rendement très faible lorsqu'il n'y a pas assez de soleil. Elle convient donc mieux aux régions les plus ensoleillées.

### La cellule photovoltaïque en silicium polycristallin

La fabrication de ce type de cellule photovoltaïque est plus simple que la version en silicium monocristallin. Son coût est donc moindre. Côté rendement du panneau solaire, on peut espérer entre 10 et 15 %, ce qui est nettement inférieur aux cellules monocristallines. Elle a cependant l'avantage de pouvoir être utilisée par temps nuageux, ceci grâce à sa flexibilité d'irradiation.

### La cellule en silicium amorphe

Cette cellule solaire présente de nombreux avantages. Elle est tout d'abord peu chère à fabriquer. Elle peut aussi être intégrée sur tout type de support, flexible ou rigide. Un autre point positif est qu'elle capte les rayons solaires même par temps nuageux. Son principal inconvénient est qu'elle offre un faible rendement, environ 7 % au maximum. Pour être rentable, il faut donc que la surface du panneau solaire soit conséquente. De même, ses performances diminuent dans le temps. [5]

## Modélisation et Caractéristiques électriques d'une cellule PV: [10]

La figure ci bas représente le circuit équivalent du modèle à une seule diode de la cellule Photovoltaïque idéale

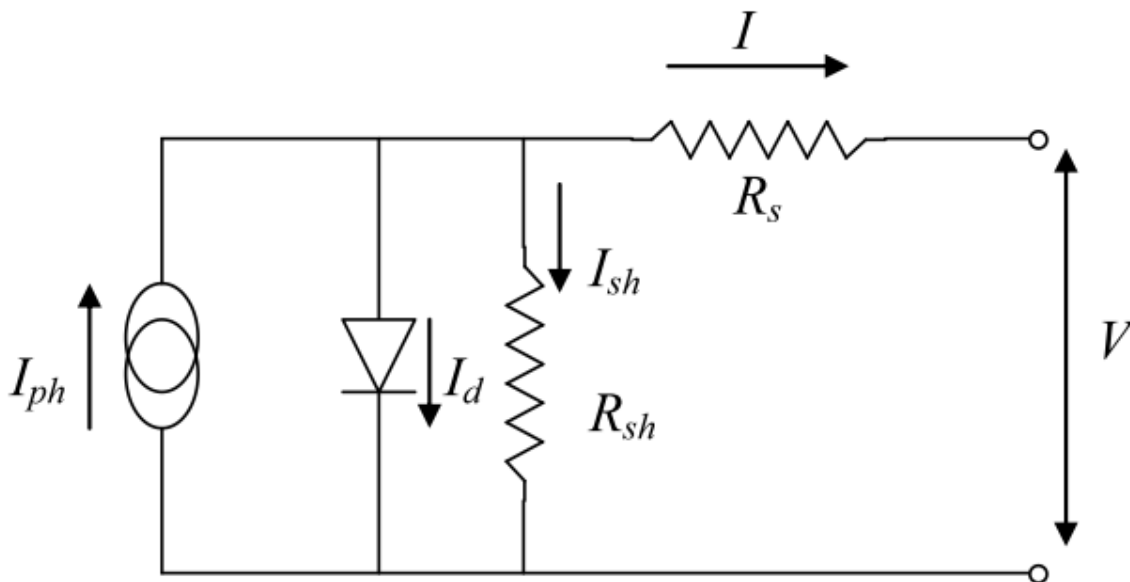


Figure 7: : Modèle à une seule diode de la cellule photovoltaïque et le circuit équivalent d'un module photovoltaïque réel, y compris les résistances série et parallèle.

L'équation de base de la théorie des semi-conducteurs qui décrit mathématiquement

la caractéristique I-V de la cellule photovoltaïque idéale est:

$$I = I_{pv,cell} - I_{0,cell} \left[ \exp \left( \frac{qV}{\alpha KT} \right) - 1 \right]$$

Ou :

$I_{pv}$ , est le courant généré par la lumière incidente.

$I_0$ , est le courant de fuite de la diode.

$K$  est la constante de Boltzmann ( $1.3806503 \times 10^{-23}$  J/K).

$T$  en Kelvin est la température de la jonction p-n

$\alpha$  est le facteur d'idéalité de la diode

Etant donné qu'une cellule individuelle produit seulement 0,5V environ, il est rare de rencontrer une application pour laquelle une seule cellule est suffisante. Au lieu de cela, le bloc de construction de base pour les applications photovoltaïques est un module constitué d'un certain nombre de cellules connectées en série, le tout intégré dans des structures résistantes aux intempéries. Un module typique possède 36 cellules en série, il est souvent désigné comme "un module 12V", même s'il est capable de délivrer des tensions plus élevées sous forte irradiation. L'équation de base (1.1) de la cellule photovoltaïque ne représente pas la caractéristique I-V d'un module PV. Un module PV est composé de plusieurs cellules PV raccordées en série ou en parallèle. Le modèle d'une seule diode représenté sur la figure. est décrit par l'équation:

$$I = I_{pv} - I_0 \left[ \exp \left( \frac{V + R_s I}{V_t \alpha} \right) - 1 \right] - \frac{V + R_s I}{R_p}$$

$I_{pv}$  et

$I_0$  sont le courant photovoltaïque (PV) et de saturation inverse (le courant de fuite), respectivement, du module PV.

$V_t = N_s K T / q$  est la tension thermique du module avec  $N_s$  les cellules connectées en série.

Les cellules connectées en parallèle augmentent le courant PV et les cellules connectées en série fournissent une plus grande tension de sortie du module PV.

Si le module est composé de cellules connectées en parallèles ( ) les courants du module PV et de saturation peuvent être exprimés par:

$$I_{pv} = I_{pv,cell} N_p \text{ et } I_0 = I_{0,cell} N_p$$

Dans l'équation  $R_s$  représente la résistance série équivalente du module et  $R_p$  la résistance parallèle équivalente.

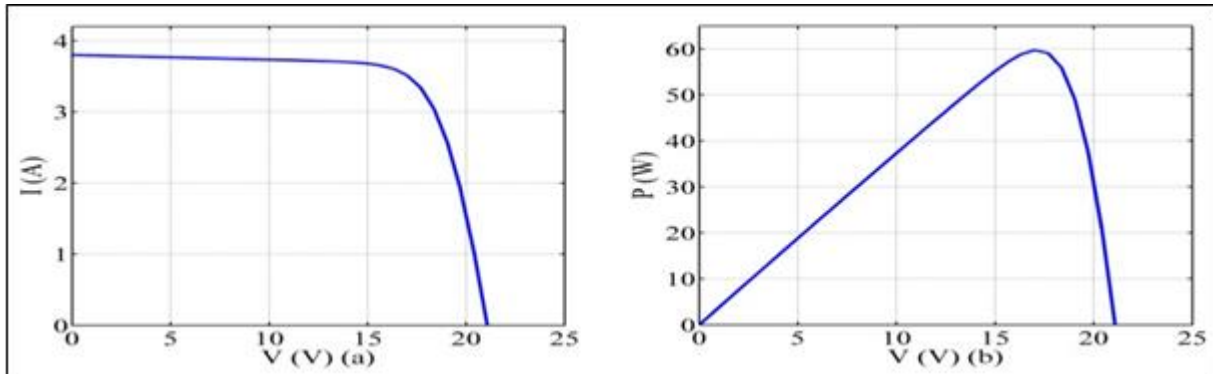


Figure 8:Caractéristiques I-V et P-V d'un module photovoltaïque (PV) MSX 60W.[8]

Le courant généré par la cellule solaire PV dépend linéairement du rayonnement solaire et est également influencé par la température, comme décrit dans l'équation

$$I_{pv} = (I_{pv,n} + K_i \Delta T) \left( \frac{G}{G_n} \right)$$

Où

$I_{pv}$ , est le courant solaire généré dans les conditions de tests standard (CTS) ( $25^\circ\text{C}$  et  $1000\text{W}/\text{m}^2$ ),  $\Delta T = T - T_n$  (et  $T_n$  sont les températures réelles et nominales [en Kelvin], respectivement),  $G$  ( $\text{W}/\text{m}^2$ ) est l'irradiation sur la surface du dispositif, et  $G_n$  est l'irradiation nominale,  $K_i$  est le coefficient de température du courant de court-circuit. Le courant de saturation de la diode  $I_0$  qui dépend de la température est donné comme suit:

$$I_{pv} = I_{0,n} \left( \frac{T_n}{T} \right)^3 \exp \left[ \frac{qE_g}{\alpha K} \left( \frac{1}{T_n} - \frac{1}{T} \right) \right]$$

Où  $E_g = 1.12\text{V}$  est l'énergie de la bande interdite du semi-conducteur pour le Si polycristallin à  $25^\circ\text{C}$ , le courant de saturation de la diode nominale  $I_0$ , est exprimé par l'équation (1.4), comme suit:

$$I_0 = \frac{I_{cc,n}}{\exp \left( \frac{V_{co,n}}{\alpha V_{t,n}} \right)^{-1}}$$

Où

$V_t$ , est la tension thermique nominale.

$I_0$  est le courant de saturation des cellules photovoltaïques qui dépend de la densité du courant de saturation du semi-conducteur

( $I_0$ , généralement donnée en  $[A/cm^2]$ ) et sur la surface efficace des cellules.

La densité du courant  $I_0$  dépend de la valeur des caractéristiques intrinsèques de la cellule photovoltaïque, qui résultent de plusieurs paramètres physiques tels que le coefficient de diffusion des électrons dans le semi-conducteur, la durée de vie des porteurs minoritaires, la densité de porteurs intrinsèques, etc.

Ce type d'information n'est généralement pas disponible dans les panneaux photovoltaïques commerciaux. Une modification sur l'équation (1.4) vise à faire correspondre les tensions en circuit ouvert du modèle avec les données expérimentales pour une très large gamme de températures.

$$I_0 = \frac{I_{cc,n} + K_I \Delta T}{\exp\left(V_{co,n} + \frac{K_V \Delta T}{\alpha V_t}\right)^{-1}}$$

Où  $V_{co}$  est la tension du circuit ouvert nominal, et  $I_{cc}$  est le courant de court-circuit nominal. L'équation (1.5) est modifiée à partir de (1.4) en incluant dans l'équation des coefficients de courant ( $K_I$ ) et de tension ( $K_V$ ).

Le courant de saturation est fortement dépendant de la température, l'équation (1.5) propose une approche différente pour exprimer la dépendance entre  $I_0$  et la température, de telle sorte que l'effet net de la température est la variation linéaire de la tension en circuit ouvert et des coefficients de température et de tension expérimentale.

Un champ PV pratique se compose de plusieurs modules photovoltaïques connectés en série et en parallèle et formés par des cellules solaires. Par conséquent, un panneau PV unique

$$I = N_{PP} I_{PV} - N_{PP} I_0 \left[ \exp\left(\frac{N_{SS} V + I R_S \left(\frac{N_{SS}}{N_{PP}}\right)}{V_t \alpha N_{SS}} - 1\right) - \left(\frac{N_{SS} V + I R_S \left(\frac{N_{SS}}{N_{PP}}\right)}{R_p \left(\frac{N_{SS}}{N_{PP}}\right)}\right) \right]$$

Où  $N_{pp}$  est le nombre de modules photovoltaïques connectés en parallèle et  $N_{ss}$  est le nombre de modules photovoltaïques connectés en série. La plupart des paramètres du champ PV dans l'équation (1.6) peuvent être obtenus à partir de la fiche technique fournie par le fabricant.

## Effets des conditions climatiques sur les modules PV:

Influence de l'éclairement solaire:

L'énergie électrique produite par une cellule photovoltaïque dépend de l'éclairement qu'elle reçoit sur sa surface.

La figure (9) représente la caractéristique courant-tension d'une cellule photovoltaïque à une température constante [8].

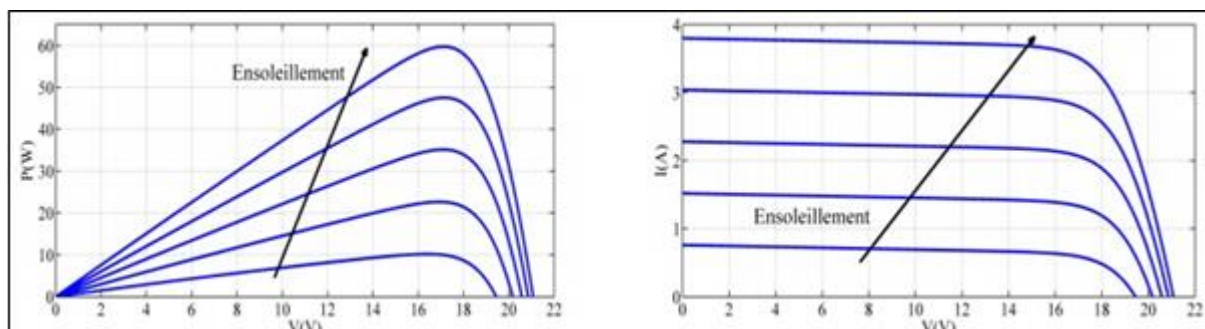


Figure 9: Effet de l'éclairement sur la caractéristique P-V et I-V pour une température constante.

Influence De La Température

La température est un paramètre important puisque les modules sont exposés au rayonnement solaire. Les courbes suivantes représentent l'évolution du courant et de la tension en fonction de la température de la cellule durant le même éclairement.

L'augmentation de la température du module PV (de 25 à 100°C) provoque une diminution de la tension du circuit ouvert, une légère augmentation sur le courant de court-circuit et une diminution de la puissance PV générée par le module PV. [9].

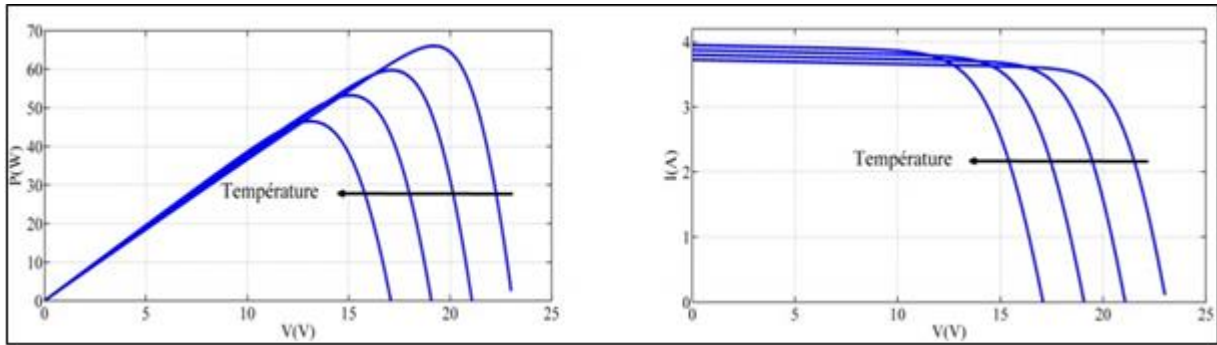


Figure 10: Effet de l'éclairement sur la caractéristique P-V et I-V pour une température constante. [8]

### Effet de l'ombrage partiel:

Lorsqu'une ombre d'un objet est projetée sur un module solaire, le système photovoltaïque en question est considéré comme étant sous l'influence de l'ombrage.

L'ombre peut provenir d'un objet à proximité, comme un arbre, une cheminée ou un bâtiment voisin. Cela peut également être causé par une feuille tombée d'un arbre.

L'ombrage dans les modules solaires interfère avec la courbe caractéristique I-V du système provoquant des pertes de performances. Si ces pertes ne sont pas prises en compte, la puissance de sortie d'un système photovoltaïque est souvent nettement inférieure aux attentes.



Figure 11: Exemples d'ombrage sur modules PV

La figure (11) montre les trois possibilités d'ombrage existantes:

- Les cellules non ombrées qui traduisent la production optimale en terme de courant et de tension.

Le module partiellement ombré, où seule une partie de la zone du module est affectée. Ce type d'ombrage conduit à une baisse de production de courant, car seule

- le pourcentage irradié de la cellule produit du courant, bien qu'il n'y ait pas d'impact sur la tension, qui reste constante.

- Le module totalement ombré qui traduit une production basse à nulle. [9]

## La constitution d'un module photovoltaïque :

Câblage des cellules photovoltaïques : les cellules sont connectées entre elles par un fin ruban métallique (cuivre étamé), du contact en face avant (-) au contact en face arrière (+).

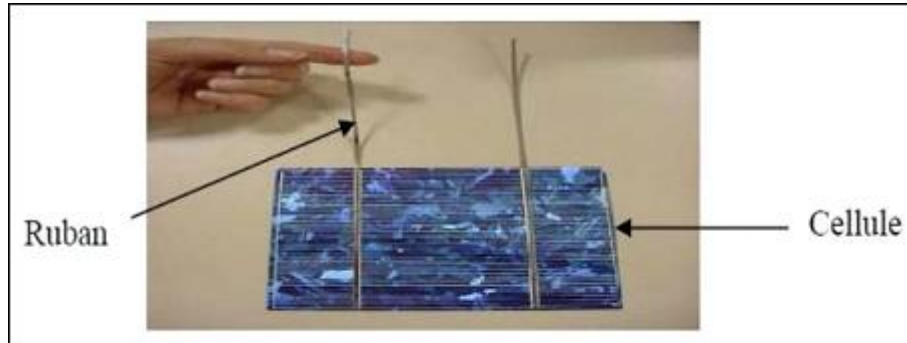


Figure 12: Ruban métallique d'une cellule.

- Les cellules sont encapsulées sous vide entre 2 films thermoplastiques transparents (EVA: Ethylène Acétate de Vinyle)
- Le plus souvent présence d'un cadre en aluminium avec joint périphérique pour permettre la dilatation
- un verre trempé en face avant protège les cellules sur le plan mécanique tout en laissant passer la lumière.
- la face arrière est constituée d'un verre ou d'une feuille TELDAR

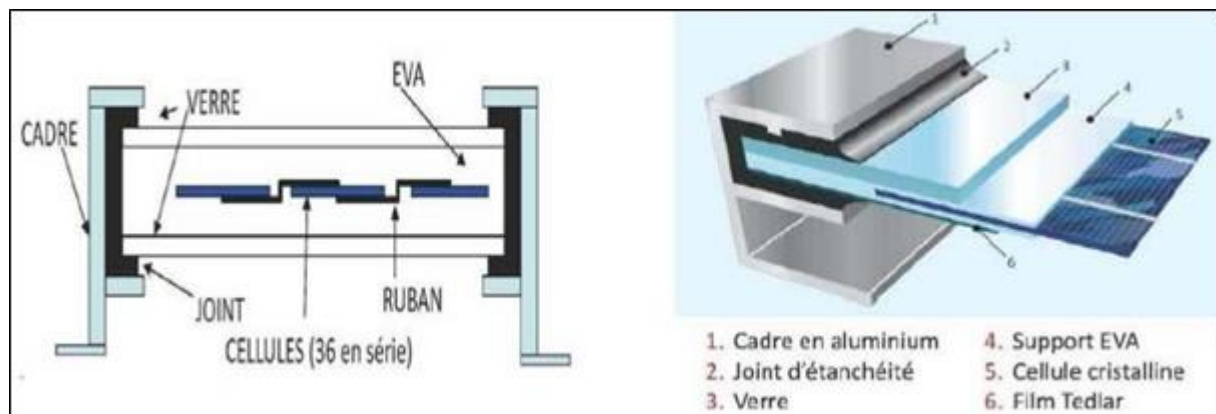


Figure 13: Encapsulation des cellules.

- Connexion ; la boîte de connexion étanche regroupe les bornes de raccordement, les diodes by-pass
- Les 2 câbles unipolaires sont raccordés

En associant les cellules PV en série (somme des tensions de chaque cellule) ou en parallèle (somme des intensités de chaque cellule), on peut constituer un générateur PV selon les besoins des applications visées. Les deux types de regroupement sont en effet possibles et souvent utilisés afin d'obtenir en sortie des valeurs de tension et intensité souhaitées. Ainsi, pour  $N_s$  cellules en série, constituant des branches elles-mêmes  $N_p$  en parallèle, la puissance disponible en sortie du générateur PV est donnée par :

$$P_{pv} = N_s \cdot V_{pv} \cdot N_p \cdot I_{pv}$$

Avec:

$P_{pv}$  : la puissance disponible en sortie du

GPV  $V_{pv}$ : la tension à la sortie du GPV

$I_{pv}$ : le courant en sortie du GPV

**Mise en série :**

Une association de  $N_s$  cellules en série permet d'augmenter la tension du générateur photovoltaïque (GPV). Les cellules sont alors traversées par le même courant et la caractéristique résultant du groupement série est obtenue par addition des tensions élémentaires de chaque cellule, figure 14. L'équation résume les caractéristiques électriques d'une association série de cellules.

$$V_{co} = N_s \cdot V_{co}$$

Avec:

$V_{co}$ : la tension du circuit ouvert

Ce système d'association est généralement le plus communément utilisé pour les modules photovoltaïques du commerce. Comme la surface des cellules devient de plus en plus importante, le courant produit par une seule cellule augmente régulièrement au fur et à mesure de l'évolution technologique alors que la tension reste toujours très faible.

L'association série permet ainsi d'augmenter la tension de l'ensemble et donc d'accroître la puissance de l'ensemble. Les panneaux commerciaux constitués de cellules de première génération sont habituellement réalisés en associant 36 cellules en série ( $V_{cons} = 0.6V \cdot 36 = 21.6V$ ) afin d'obtenir une tension optimale du panneau  $V_{op}$  proche de celle d'une tension de batterie de 12V. [11]

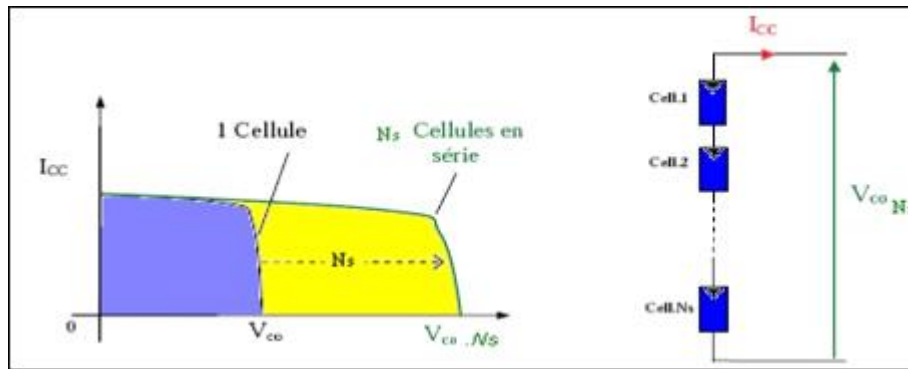


Figure 14: Caractéristiques résultantes d'un groupement de  $N_s$  cellules en série.

### La Mise en parallèle:

Les propriétés du groupement en parallèle des cellules sont duales de celles du groupement en série. Ainsi, dans un groupement de cellules connectées en parallèle, les cellules sont soumises à la même tension et la caractéristique résultante du groupement est obtenue par l'addition des courants à une tension donnée. La caractéristique résultante d'une mise en parallèle de  $N_p$  cellules PV identiques en série est présentée sur la Figure 1.13

En résumé, pour tracer la caractéristique équivalente d'un groupement de cellules PV:

- En parallèle, il faut se placer à une tension donnée et sommer les courants de chaque cellule. Il faut renouveler cette opération pour toutes les tensions entre 0 V et  $V_{oc}$
- En série, il faut cette fois-ci se placer à un courant donné et sommer les tensions des différentes cellules à ce courant.

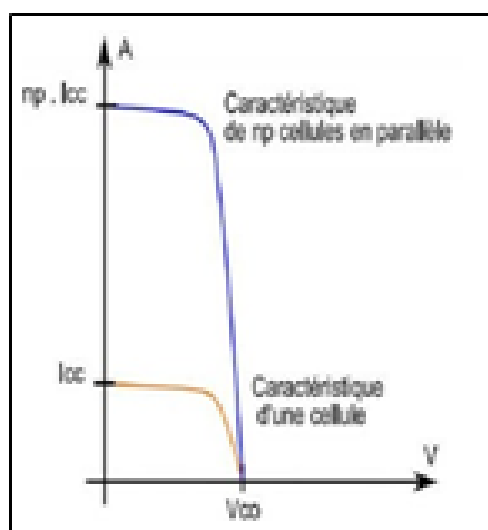


Figure 15: Caractéristique I-V résultant d'un groupement de cellules identiques [11]

## Diodes de by-pass:

Lors d'un assemblage de cellules PV en série, il est nécessaire de mettre une diode de by-pass pour empêcher le fonctionnement dans la zone II (en inverse) d'une cellule ombrée et ainsi empêcher la destruction de celle-ci. Pour empêcher cette destruction, la tension inverse vue par la cellule ne doit pas dépasser la tension d'avalanche (environ 12V).

Pour que cette condition soit vérifiée, une diode by-pass doit être mise en parallèle

au maximum toutes les 20 cellules [pour les technologies silicium. Dans les faits, p

our des raisons de simplicité de réalisation, une diode de by-pass est placée en parallèle de chaque groupe de 18 cellules constituant le module. Deux (02) diodes de by-pass sont nécessaires pour un module 12V, quatre (4) pour un 24V et ainsi de suite.

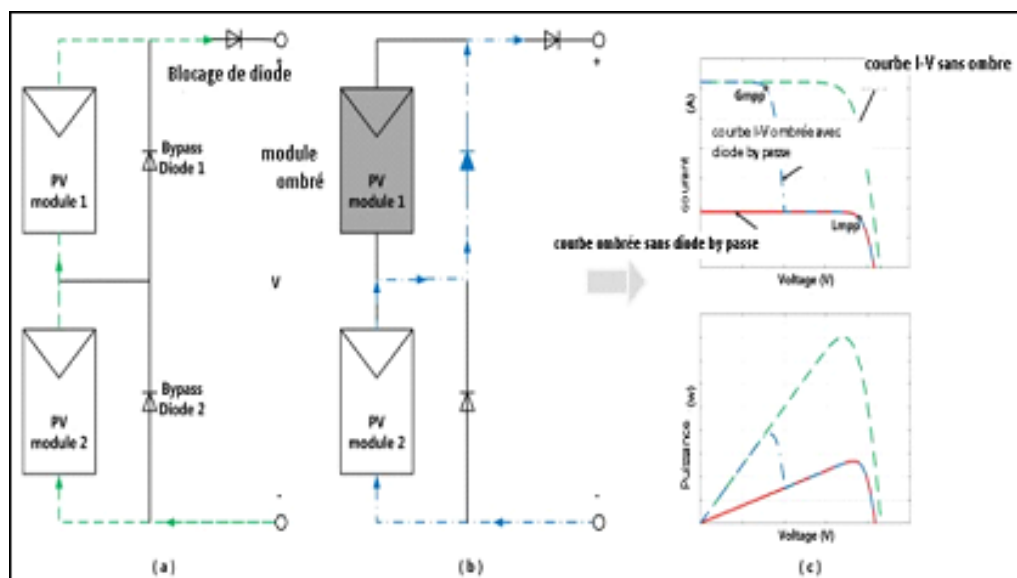


Figure 16: Les diodes de by-pass et la déformation de la courbe ( $I_{pv}$ - $V_p$ )

## Classification des systèmes photovoltaïques:

Il existe plusieurs types des systèmes photovoltaïques les plus couramment rencontrés sont : les systèmes autonomes, et les systèmes connectés au réseau électrique.

### Systèmes autonomes :

Ce sont des systèmes qui travaillent 24 h/24 h avec l'énergie solaire convertie

en énergie électrique sans l'aide d'aucune autre source électrique, et cela à l'aide de plusieurs composants mais le plus importants ce sont les batteries qui aident à emmagasiner de l'énergie électrique et d'un contrôleur de charge pour assurer la durabilité des batteries. Il faut mentionner que les batteries les plus utilisées dans le marché actuellement sont : Accumulateurs au plomb-acide et accumulateurs au nickel-cadmium.

Le système autonome doit être capable de fournir du courant aux consommateurs pendant la période de l'année de moindre irradiation lumineuse. Si on a besoin du courant toute l'année, la période de moindre irradiation est l'hiver (pour l'Algérie). Pendant cette période, il faut plus de panneaux pour couvrir les mêmes besoins qu'en été. [10]

En général ces installations comprennent quatre éléments:

- Un ou plusieurs modules PV
- Le système de régulation
- Une ou plusieurs batteries
- L'onduleur

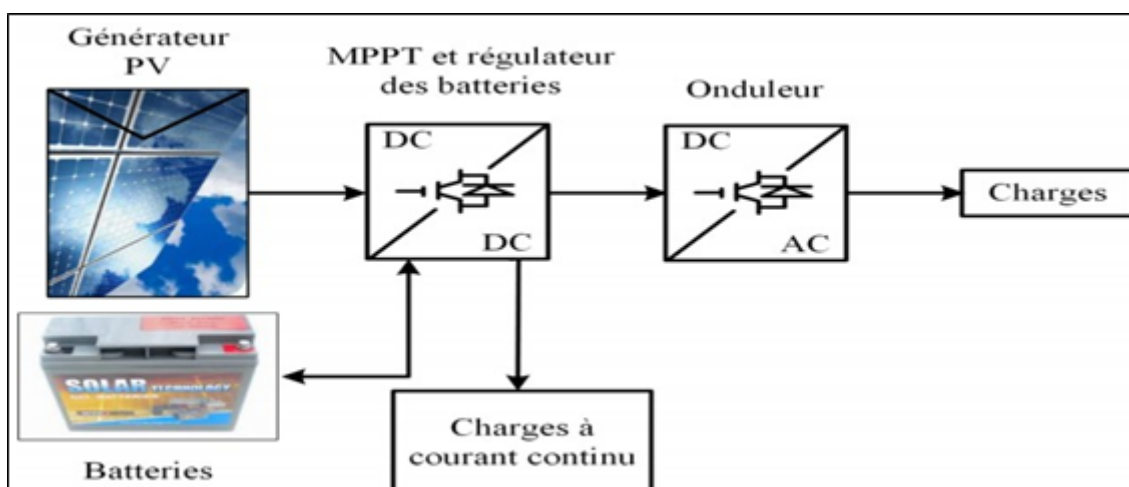


Figure 17: Système photovoltaïque autonome avec stockage. [10]

Systèmes connectés au réseau :

Un système photovoltaïque connecté au réseau, c'est un système couplé directement au réseau électrique à l'aide d'un onduleur. Ce type de système offre beaucoup de facilité pour le producteur/consommateur puisque c'est le réseau qui est chargé de l'équilibre entre la production et la consommation d'électricité. L'électricité générée n'est donc pas stockée mais fournie au réseau local de distribution.

On distingue deux types d'installations connectées au réseau:

\* Installation centralisée

: génération de la puissance photovoltaïque à grande échelle centralisée dans les stations de puissance photovoltaïque.

\* Installation décentralisée: forme alternative de génération de puissance distribuée dans les unités situées directement dans le lieu du consommateur.

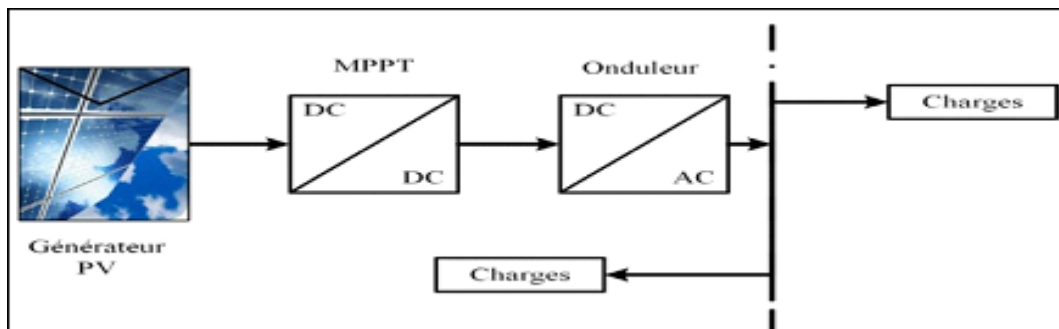


Figure 18: Système photovoltaïque connecté au réseau électrique.

## Conclusion:

Ce chapitre s'est consacré à présenter les différents composants d'un système photovoltaïque. On a étudié le principe de l'effet photovoltaïque, la cellule PV et ses paramètres. Ensuite on a fait un rappel sur les systèmes PV et leurs performances. Dans le chapitre prochain, on présentera une étude sur la modélisation de systèmes photovoltaïques, les convertisseurs DC-DC (hacheurs), les convertisseurs DC-DC (onduleur) et leur commande MPPT.

# **Chapitre 02 :**

# **Les convertisseurs**

# **Statiques**

## Introduction

Le système photovoltaïque est un ensemble de blocs essentiels pour assurer son fonctionnement et l'alimentation du réseau électrique. Parmi ces blocs, on retrouve le convertisseur DC-DC (hacheur), le convertisseur DC-AC (onduleur) et le contrôleur MPPT (Maximum Power Point Tracking).

Le convertisseur DC-DC, également appelé hacheur, joue un rôle crucial dans le système photovoltaïque. Il permet de réguler et de convertir l'énergie électrique en courant continu (DC) générée par les panneaux solaires. Ce bloc est responsable de l'optimisation de l'énergie produite par les panneaux solaires en ajustant la tension et le courant en fonction des besoins du système.

Le convertisseur DC-AC, ou onduleur, est chargé de convertir le courant continu produit par le convertisseur DC-DC en courant alternatif (AC). Cette conversion est nécessaire pour alimenter les appareils et les équipements qui fonctionnent avec du courant alternatif. L'onduleur assure également la synchronisation avec le réseau électrique, permettant ainsi l'injection de l'électricité produite dans le réseau.

Le contrôleur MPPT (Maximum Power Point Tracking) est un élément essentiel du système photovoltaïque. Il permet d'optimiser la production d'énergie en suivant le point de puissance maximale des panneaux solaires. Le contrôleur MPPT ajuste en permanence la charge et la tension des panneaux pour garantir une utilisation optimale de l'énergie solaire disponible.

Dans ce chapitre, nous examinerons en détail ces différents blocs du système photovoltaïque. Nous fournirons des explications approfondies sur leur fonctionnement, discuterons des différents types disponibles sur le marché et effectuerons des simulations pour mieux comprendre leur impact sur les performances globales du système.

## L'hacheur Boost :

### Définition

Le hacheur, également connu sous le nom de convertisseur continu-continu, est un dispositif de l'électronique de puissance qui utilise un ou plusieurs interrupteurs commandés pour modifier la valeur de la tension d'une source de tension continue avec un rendement élevé. Le processus de commutation se fait à une fréquence

élevée, ce qui a pour effet de créer une tension moyenne. Cela équivaut, dans le domaine des tensions continues, au fonctionnement d'un transformateur utilisé dans le domaine des tensions alternatives.

Selon que la tension de sortie est inférieure ou supérieure à la tension d'entrée, on distingue deux types de hacheurs : le dévolteur et le survolteur. Certains hacheurs sont capables de fonctionner dans les deux modes (Boost-Buck).

Il est important de noter que le hacheur permet de réguler efficacement la tension d'une source de tension continue, ce qui le rend particulièrement utile dans de nombreuses applications, telles que les systèmes solaires photovoltaïques, les véhicules électriques et les alimentations à découpage.

Dans les prochaines sections, nous explorerons plus en détail le fonctionnement et les caractéristiques des hacheurs, ainsi que leurs applications dans divers domaines de l'électronique de puissance

#### Différent types d'hacheur :

Dans le domaine des convertisseurs de tension, différents types peuvent être réalisés en fonction de la position du commutateur et de l'hacheur. Parmi ces types, nous trouvons :

- L'abaisseur de tension (back) : Ce type de convertisseur permet de réduire la tension de sortie par rapport à la tension d'entrée.
- L'élévateur de tension (boost) : À l'inverse de l'abaisseur, ce convertisseur permet d'augmenter la tension de sortie par rapport à la tension d'entrée.
- L'abaisseur élévateur (back-boost) : Ce convertisseur est capable de réaliser à la fois une réduction et une augmentation de la tension de sortie par rapport à la tension d'entrée.

Dans le contexte de notre sujet, nous nous intéressons particulièrement au convertisseur élévateur de tension (boost). Ce type de convertisseur est utilisé pour augmenter la tension d'une source de tension continue afin de l'adapter aux besoins spécifiques d'un système ou d'une charge. Il trouve des applications dans divers domaines tels que les systèmes d'alimentation solaire, les véhicules électriques et les alimentations à découpage.

Dans les sections suivantes, nous explorerons en détail le fonctionnement, les caractéristiques et les applications du convertisseur élévateur de tension (boost) dans le domaine de l'électronique de puissance

## Convertisseur Boost

Le convertisseur Boost, également connu sous le nom de hacheur parallèle, est un dispositif d'alimentation à découpage utilisé pour convertir une tension continue en une tension continue de valeur plus élevée. Il fonctionne en utilisant une source d'entrée de type courant continu, généralement une inductance en série avec une source de tension, et une charge de sortie de type tension continue, souvent un condensateur en parallèle avec une charge résistive. Ce type de convertisseur est largement utilisé dans les systèmes d'alimentation à découpage pour augmenter la tension de sortie et répondre aux besoins spécifiques des applications électriques et électroniques.[10]

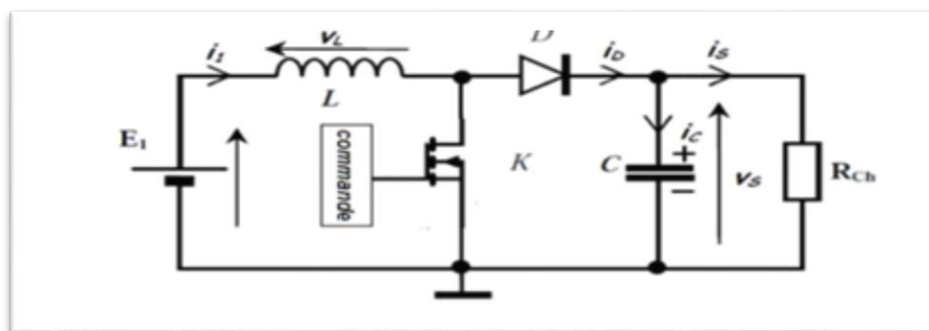


Figure 19: : Le fonctionnement d'un hacheur boost [10]

L'interrupteur K1 peut être remplacé par un transistor puisque le courant est toujours positif et que les commutations doivent être recommandées (au blocage et à l'amorçage).

### Principe de fonctionnement

L'interrupteur K1 est fermé pendant la fraction  $DT$  de la période de découpage  $T$ . La source d'entrée fournit l'énergie à la charge  $R$  à travers l'inductance  $L$ . Lors du blocage du transistor, la diode  $K2$  assure la continuité du courant dans l'inductance. L'énergie emmagasinée dans cette inductance est alors déchargée dans le condensateur et la résistance de charge. Les formes d'ondes en conduction continue sont représentées à la figure suivante :

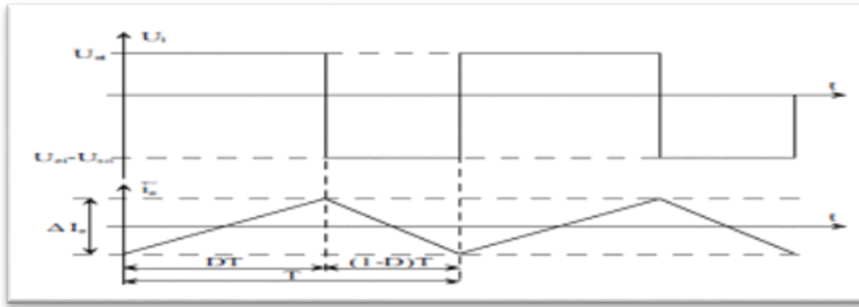


Figure 20: Formes d'ondes de la tension de sortie d'un hacheur de type BOOST

En régime permanent, la valeur moyenne de la tension aux bornes de l'inductance est nulle, ce qui impose la relation suivante:

$$U_1 = \frac{1}{T} \int_0^T U_1(t) dt$$

$$U_1 = \frac{1}{T} \int_0^{DT} U_{ei}(t) dt + \frac{1}{T} \int_{DT}^T (U_{ei}(t) - U_{so}) dt$$

$$U_1 = U_{ei} D + (U_{ei} - U_{so})(1 - D)$$

En régime permanent, la tension moyenne aux bornes de l'inductance L est nulle. Par conséquent :

$$U_1 = 0$$

$$U_{so} = U_{ei} \frac{1}{1-D}$$

- Une telle relation illustre la nature «élevateur» du convertisseur considéré. Le rapport cyclique pouvant varier de 0 à 1, la tension  $U_{so}$  en sortie peut varier de  $U_{ei}$  à l'infini.
- Il est bien entendu que ces derniers cas peuvent s'avérer «problématique» pour le dimensionnement du convertisseur : il faudrait trouver la diode et le transistor capables de tenir une tension infinie.

Malgré cette restriction (qui peut rendre un tel convertisseur difficile à commander), le hacheur élévateur permet donc, grâce à la valeur du rapport cyclique D d'obtenir en sortie une tension nettement plus élevée que celle appliquée en son entrée.

### Onduleur PV

Un onduleur, également connu sous le nom de convertisseur DC/AC, joue un rôle essentiel dans un système photovoltaïque connecté au réseau. Son rôle principal est de convertir la puissance continue générée par les modules photovoltaïques en puissance alternative qui peut être injectée dans le réseau électrique. L'onduleur est composé d'une commande MPPT qui suit le point de fonctionnement optimal des modules, d'un pont permettant de convertir l'électricité continue en électricité alternative, et d'un transformateur qui ajuste la tension pour correspondre aux exigences du réseau.

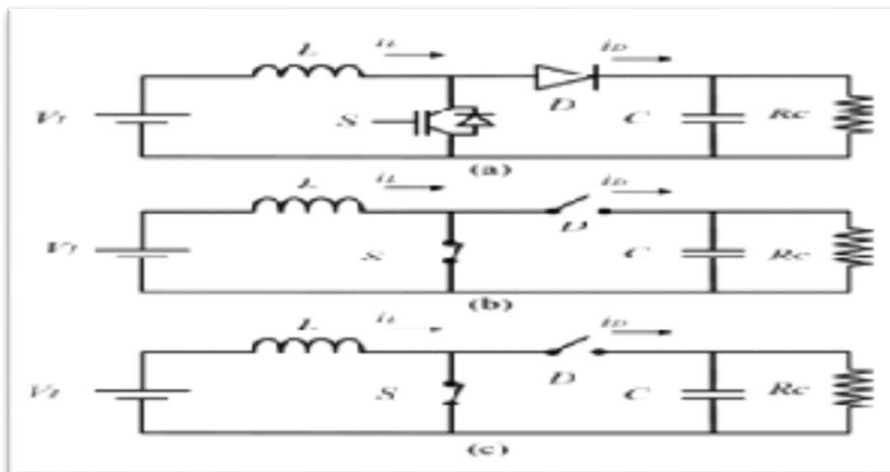


Figure 21: Convertisseur boost et ses circuits équivalents idéaux pour la CCM.[10]

### Onduleur de tension triphasé

L'onduleur autonome de tension triphasé réalise une conversion réversible continu- alternatif, de type  $(U) \leftrightarrow (V', f')$ , avec  $U > 0$ . On se limite ici au montage en trois demi-points représentés

à la Figure 1.19 On verra l'intérêt de cette présentation pour la commande de l'onduleur en modulation de largeur d'impulsions.

Les sources de tension continue et de courant alternatif sont parfaites :

- la tension  $U$  reste constante pour toute valeur positive ou négative, et toute évolution du courant  $i_m(t)$ .
- la valeur efficace  $I$  des courants  $i_1(t)$ ,  $i_2(t)$ ,  $i_3(t)$  reste constante pour toute valeur et toute évolution de la tension  $v_m(t)$ .

En fonctionnement normal, la source  $U$  est génératrice et les sources  $i_1(t)$ ,  $i_2(t)$ ,  $i_3(t)$  sont réceptrices. On désigne toujours par  $f_{ij}$  le signal de commande de l'interrupteur  $K_{ij}$ . On admet que les courants sont sinusoïdaux :

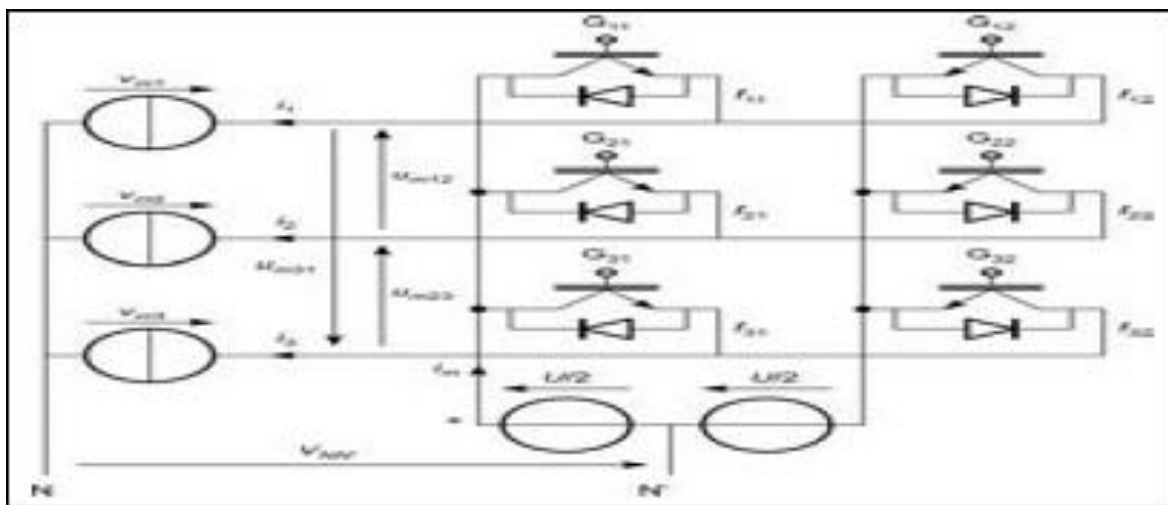


Figure 22: Montage de l'onduleur triphasé de tension en trois demi-points

### Onduleur centralisé

Un onduleur centralisé de forte puissance transforme l'ensemble du courant continu produit par un champ de cellules solaires en courant alternatif. Le champ de cellules solaires est en règle générale constitué de plusieurs rangées connectées en parallèle. Chaque rangée est elle-même constituée de plusieurs modules solaires connectés en série. Pour éviter les pertes dans les câbles et obtenir un rendement élevé, on connecte le plus possible de modules en série.

### Structure de l'onduleur triphasé

Nous examinons le schéma de principe de l'onduleur illustré dans la Figure (5). Nous distinguons, d'une part, les tensions de branche  $U_{10}, U_{20}, U_{30}$  mesurées par rapport à la borne (-) par rapport à la tension  $U_E$ , et d'autre part, les tensions de phase  $U_1, U_2, U_3$  mesurées par rapport à un neutre flottant N. Nous supposons que la charge est triphasée symétrique. Cependant, de manière générale, étant donné que l'onduleur fonctionne de manière autonome, la configuration de la charge est un problème secondaire à prendre en compte [17].

Les tensions de branches  $U_{k0}$  (avec  $k=1, 2$  et  $3$ ) peuvent être imposées par une

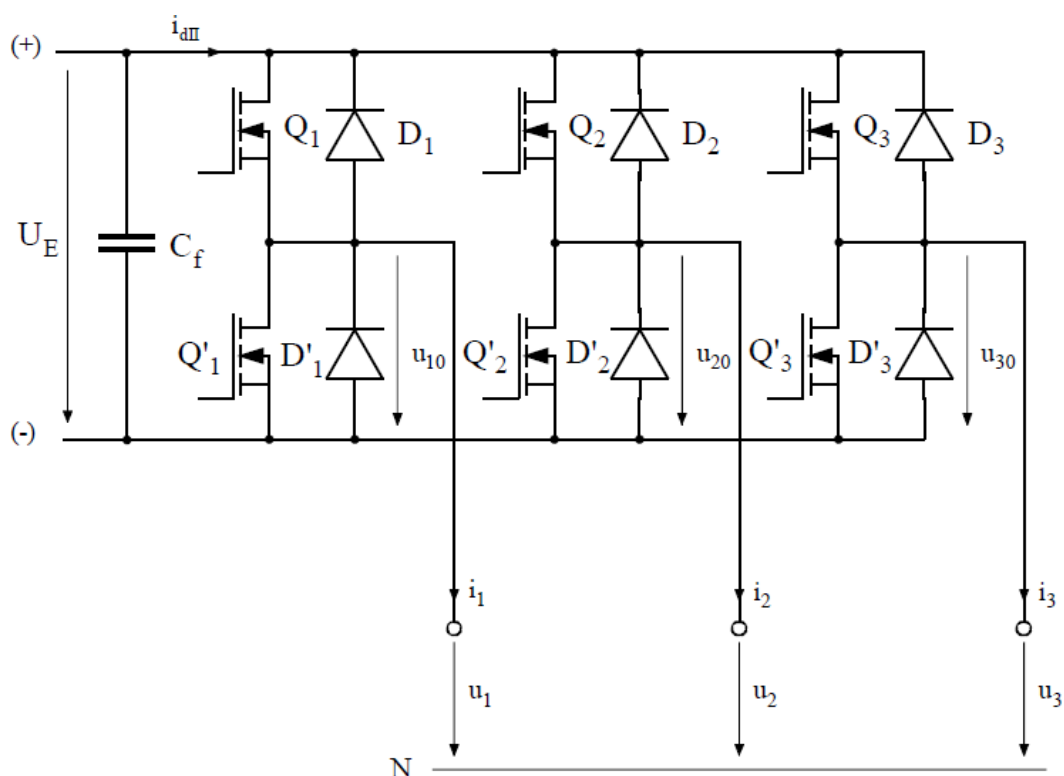


Figure 23: Structure d'un onduleur triphasé [17].

Les tensions de branches  $U_{k0}$  (avec  $k=1, 2$  et  $3$ ) peuvent être imposées par une commande appropriée des commutateurs électroniques (contacteurs statiques). On peut alors déterminer les tensions  $U_{k0}$  à la sortie de l'onduleur.

On a:

- $u_{10} + u_1 - u_2 + u_{20} = 0$
- $u_{10} + u_1 - u_3 + u_{30} = 0$

Dans une charge triphasée symétrique (sans composant homopolaire) avec point neutre flottant, on a:



- $u_1 + u_2 + u_3 = 0$
- $i_1 + i_2 + i_3 = 0$

À l'aide des relations on obtient :

$$U_1 = \frac{1}{3}(2U_{10} - U_{20} - U_{30})$$

$$U_2 = \frac{1}{3}(2U_{20} - U_{10} - U_{30})$$

$$U_3 = \frac{1}{3}(2U_{30} - U_{20} - U_{10})$$

On utilise les équations et implémente sur Simulink.

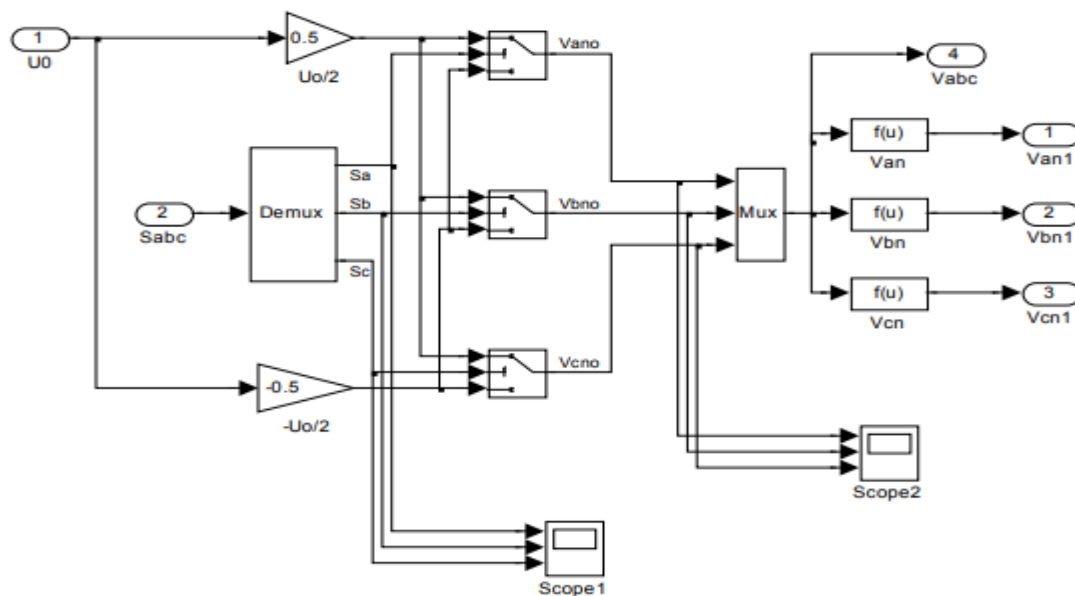


Figure 24: Schéma de simulation d'un onduleur triphasé

### Fonctionnement de l'onduleur triphasé

Il existe plusieurs types de commandes d'onduleurs, tels que la commande symétrique (adjacente), la commande décalée (disjointe) et la modulation de largeur d'impulsion (MLI). Chaque type de commande vise à obtenir une forme d'onde sinusoïdale ou un niveau de sortie spécifique, et le principe de fonctionnement varie en fonction de la commande utilisée.

L'utilisation de la modulation de largeur d'impulsion (MLI) ou Pulse Width Modulation (PWM) permet de supprimer les premiers rangs d'harmoniques du

courant afin d'améliorer le facteur de puissance. Cependant, cette technique ne résout pas entièrement le problème des harmoniques de courant.[18]

La modulation MLI est largement inspirée des techniques utilisées dans la transmission de l'information. Elle consiste à moduler une onde porteuse triangulaire (générée par une fréquence de découpage  $F_p$ ) avec une onde modulante sinusoïdale (fréquence  $F_m$ ) beaucoup plus basse.[18]

La modulation MLI permet de former chaque alternance de la tension de sortie à partir de plusieurs créneaux. On observe que la tension ( $V=900V$ ) dans chaque phase est enrichie en harmoniques.

## **Commande MPPT**

Le MPPT (Maximum Power Point Tracking), ou suivi du point de puissance maximale, est un principe utilisé pour optimiser la production d'énergie d'un générateur électrique non linéaire. Les systèmes MPPT sont couramment utilisés avec les générateurs photovoltaïques et les générateurs éoliens.

L'objectif principal du MPPT est de maintenir le générateur électrique au point de fonctionnement où la puissance produite est maximale. Cela se fait en ajustant en temps réel les paramètres de fonctionnement du générateur, tels que la tension ou le courant, afin de suivre les variations des conditions environnementales, telles que l'ensoleillement ou la vitesse du vent.

Pour les générateurs photovoltaïques, le MPPT est essentiel pour exploiter au maximum l'énergie solaire disponible. Il permet de maintenir les panneaux solaires à leur point de puissance maximale, même en cas de variations de l'intensité lumineuse ou de la température. De cette manière, le système MPPT garantit une production d'électricité optimale et améliore le rendement global du générateur photovoltaïque.

De même, dans le cas des générateurs éoliens, le MPPT joue un rôle crucial en ajustant les paramètres de fonctionnement de l'éolienne pour maximiser la production d'énergie électrique, en fonction de la vitesse et de la direction du vent.

En résumé, le MPPT est un système de suivi du point de puissance maximale qui permet d'optimiser la production d'énergie des générateurs électriques non linéaires, tels que les générateurs photovoltaïques et éoliens, en ajustant les paramètres de fonctionnement en temps réel.

## **Principe de fonctionnement MPPT**

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

Classification des commandes MPPT selon le type de recherche :

### **MPPT indirect :**

Les commandes MPPT de ce type exploitent la relation entre les variables mesurées, telles que  $I_{sc}$  (courant de court-circuit) ou  $V_{oc}$  (tension circuit ouvert), qui peuvent être facilement déterminées, et la position approximative du point de puissance maximale (MPP). Elles utilisent également des commandes basées sur une estimation du point de fonctionnement du générateur photovoltaïque (GPV) à partir d'un modèle paramétrique préalablement défini. Certaines commandes prennent également en compte les variations de température des cellules solaires, mesurées par un capteur, afin d'établir une poursuite de la tension optimale.[13]

Ces commandes présentent l'avantage d'être simples à mettre en œuvre. Elles sont principalement destinées aux systèmes peu coûteux et moins précis, conçus pour fonctionner dans des zones géographiques où les variations climatiques sont limitées.

### **MPPT direct**

Les méthodes de suivi du point de puissance maximale (MPPT) utilisent les mesures de tension et de courant des panneaux solaires, et leur algorithme repose sur la variation de ces mesures. L'avantage de ces algorithmes est qu'ils ne nécessitent pas de connaissances préalables sur les caractéristiques spécifiques des générateurs photovoltaïques (GPV). Parmi ces méthodes, on retrouve la méthode de différenciation, la méthode "Perturb & Observe" (Perturbation et Observation), ainsi que l'incrément de conductance.

## **Classification des quelques algorithmes du suiveur la puissance maximale :**

La classification des algorithmes de suiveurs du PPM peut être basée sur la fonction du technique ou des stratégies de commande utilisées. Ainsi, deux catégories peuvent être présentées: méthodes directes et indirectes :

### Méthode indirect

Les approches indirectes reposent sur l'utilisation de bases de données contenant les caractéristiques des panneaux solaires dans différentes conditions climatiques (température, ensoleillement, etc.), ainsi que sur des équations mathématiques empiriques permettant de déterminer le point de puissance maximale. Ces méthodes sont souvent spécifiques à chaque type de panneau, ce qui les rend difficiles à généraliser. Parmi les méthodes indirectes, on peut citer l'ajustement de courbe, la méthode "look-up table", la méthode de la tension de circuit ouvert du générateur, et la méthode du court-circuit.

### Méthode direct

Les approches directes sont des méthodes qui exploitent les mesures de tension et de courant des panneaux solaires, en se basant sur la variation de ces mesures. L'avantage de ces algorithmes est qu'ils ne requièrent pas de connaissances préalables sur les caractéristiques des panneaux photovoltaïques. Parmi ces méthodes, on trouve la méthode de différenciation, l'incrément de conductance et la méthode Perturb & Observe (P&O).

Par la suite, nous examinerons plus en détail les méthodes directes.

### Méthode incrémental conductance

Cette approche se base sur l'observation de  $dP/dV$ . Lorsque cette dernière quantité atteint 0, cela signifie que la puissance extraite est sur l'unique extremum de la courbe et par conséquent au maximum de puissance extractible. L'avantage de cet algorithme est la rapidité de poursuite du PPM quand les conditions atmosphériques changent précipitamment ;

la description de l'algorithme sera présentée par la suite [14].

La puissance produite par le générateur PV peut être exprimée par :

$$P_{PV} = I_{PV} \cdot V_{PV}$$

La conductance et l'incrément de la conductance peuvent être identifiées en dérivant l'équation par rapport à la tension  $P_{pv}$  :

$$\frac{1}{V_{PV}} * \frac{dP_{PV}}{dV_{PV}} = \frac{I_{PV}}{V_{PV}} * \frac{dI_{PV}}{dV_{PV}}$$

Ainsi on a noté avec  
conductance:

Gla

conductance et avec  $\Delta G$

l'incrément

de la

$$G = \frac{I_{PV}}{V_{PV}}$$

$$\Delta G = \frac{dI_{PV}}{dV_{PV}}$$

$\frac{dI_{PV}}{dV_{PV}} > 0$  : Le point de fonctionnement est à gauche du PPM.

$\frac{dI_{PV}}{dV_{PV}} = 0$  : Le point de fonctionnement sur le PPM.

$\frac{dI_{PV}}{dV_{PV}} < 0$  : Le point de fonctionnement est à la droite du PPM.

Ceci est illustré dans la Figure et récapitulé dans l'algorithme de la Figure

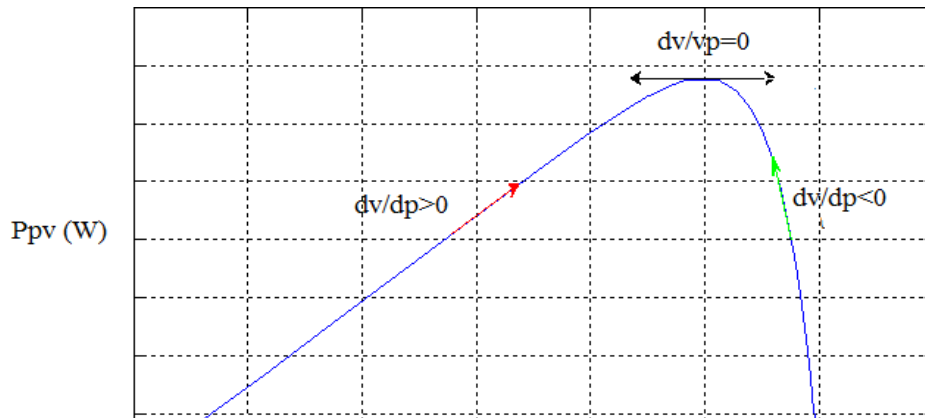


Figure 25: Trajectoire par Incrément de Conductance [14].

Vpv (V)

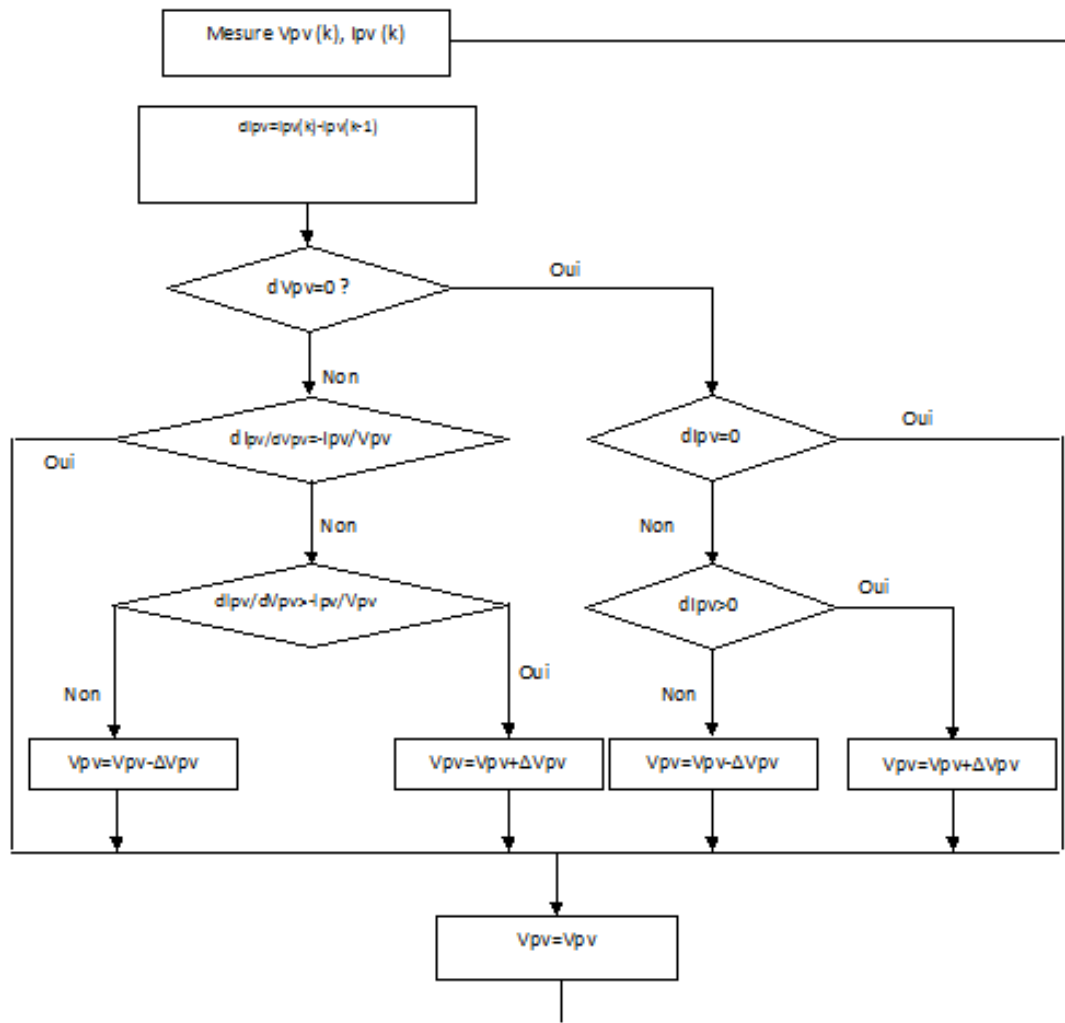


Figure 26: Algorithme d'incrément de la conductance

En réalité, cet algorithme est une correction de l'algorithme "P&O" puisqu'il est capable de calculer la direction dans laquelle la perturbation du point de fonctionnement devrait être pour atteindre le PPM, et il peut aussi déterminer l'atteinte du PPM. De plus, dans les conditions de changement rapide de l'ensoleillement, l'algorithme ne devrait pas prendre la mauvaise direction comme c'est le cas avec l'algorithme "P&O", et d'ailleurs, il n'oscille pas autour du PPM une fois qu'il l'atteint.

Cette méthode est plus rapide que P&O mais elle présente de mauvais résultats pour des faibles ensoleillements (très faible évolution de P sur le pas de calcul fixe d'où des dérivées très petites et des difficultés d'interprétations) [15].

## Méthode Perturb & Observe (P&O)

La méthode P&O fonctionne en perturbant périodiquement la tension du panneau VPV, avec une faible amplitude autour de sa valeur initiale ( $\Delta V$ ), et on observe la variation de la puissance Ppv qui en résulte [15].

Examinons la Figure (9) pour la description du principe de fonctionnement de cet algorithme : Ainsi, on peut déduire que si une incrémentation positive de la tension Vpv engendre un accroissement de la puissance Ppv c'est-à-dire  $\Delta P > 0$ , la perturbation de la tension déplace le point de fonctionnement vers un point plus proche du PPM, et on continue à perturber la tension dans la même direction, ceci va déplacer le point de fonctionnement jusqu'à atteindre le PPM [15].

Si au contraire, la puissance décroît  $P < 0$ , le point de fonctionnement s'éloigne du PPM. Alors, on doit perturber la tension avec signe algébrique contraire au signe précédent pour déplacer le point de fonctionnement jusqu'à atteindre le PPM.

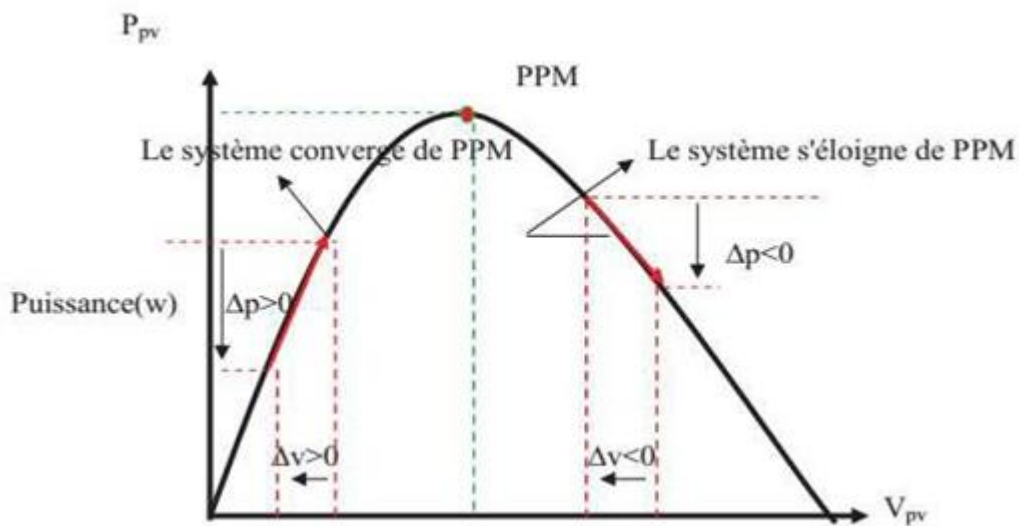


Figure 27: Schéma de convergence vers le PPM .

A partir de ces diverses analyses sur les conséquences d'une variation de la tension sur la caractéristique Ppv ( $V_{pv}$ ), il est alors facile de situer le point de fonctionnement par rapport

au PPM, et de faire converger ce dernier vers le maximum de puissance à travers un ordre de commande approprié [16].

En résumé, et comme son nom l'indique, l'algorithme P&O dont l'organigramme est présenté dans la Figure (10) est basé sur la perturbation du système par l'augmentation ou la diminution de  $V_{ref}$ .

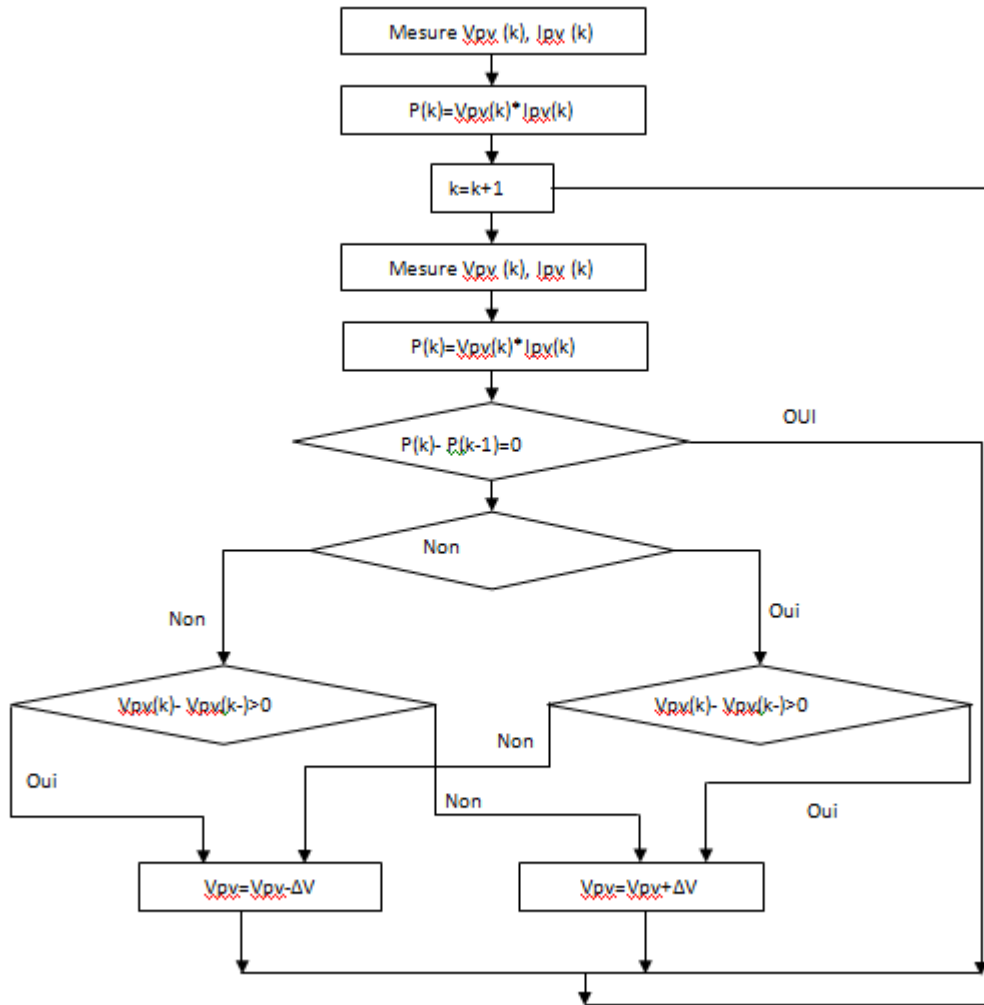


Figure 28: Organigramme de l'algorithme perturbation et observation (P&O)

La principale limitation de la méthode Perturb & Observe (P&O) réside dans sa sensibilité aux changements rapides des conditions atmosphériques, tels que le passage d'un nuage mobile. Dans de tels cas, cette méthode peut déplacer le point de fonctionnement dans une direction incorrecte [16].

Pour contourner ce problème, nous avons utilisé un organigramme de l'algorithme P&O pour développer un programme en environnement MATLAB, sous forme de S-Function, permettant de suivre le point de puissance maximale (PPM). La tension correspondant au PPM est extraite et convertie en tension électrique à l'aide du bloc "Controlled Voltage source" de la bibliothèque Simulink. Ensuite, cette tension électrique alimente un convertisseur survolteur (boost).

Le modèle créé dans MATLAB/Simulink est illustré dans la Figure (III.7), où l'on peut observer que la valeur de tension correspond à la valeur de puissance maximale ( $V=54,7V$ ) pour un panneau, et ( $V=328.2V$ ) pour six panneaux connectés en série. Cette tension finale alimente le convertisseur DC/DC.

**Chapitre 03 :**  
**Les différent**  
**technique de**  
**commande pour**  
**optimiser la**  
**conversation PV**

## **Introduction**

Dans ce chapitre, nous explorerons plusieurs méthodes et stratégies visant à améliorer la qualité du courant électrique généré par les systèmes photovoltaïques (PV). Ces systèmes sont soumis à diverses fluctuations et perturbations qui peuvent affecter leur performance. Pour mieux comprendre ces aspects, nous commencerons par une explication approfondie du réseau électrique, en détaillant ses différents types et composants. Nous examinerons également la structure fondamentale des réseaux électriques pour avoir une vision claire de leur fonctionnement.

Ensuite, nous plongerons dans le principe de la conversion photoélectrique, qui est le cœur du fonctionnement des systèmes photovoltaïques. Nous explorerons en détail le processus par lequel l'énergie solaire est captée et transformée en électricité utilisable. De plus, nous étudierons le principe d'intégration de l'énergie photovoltaïque dans le réseau électrique, en mettant l'accent sur les différentes configurations de systèmes photovoltaïques connectés au réseau.

Au cours de cette exploration, nous mettrons l'accent sur les solutions et les techniques qui peuvent être mises en œuvre pour améliorer la qualité du courant électrique produit par les systèmes PV. Nous aborderons des concepts tels que la régulation de tension, la gestion de la puissance, la compensation des harmoniques, et d'autres stratégies visant à optimiser les performances et à minimiser les perturbations sur le réseau électrique.

En résumé, ce chapitre offre un aperçu approfondi des moyens d'améliorer la qualité du courant électrique généré par les systèmes photovoltaïques connectés au réseau. Il met en lumière les aspects essentiels du réseau électrique, du processus de conversion photoélectrique et des techniques de gestion pour assurer une intégration efficace de l'énergie photovoltaïque dans le réseau.

## **Définition d'un réseau électrique**

La notion de réseau électrique englobe d'abord un ensemble de fonctions et de comportements globaux qui nécessitent une définition, une mise en œuvre et une maîtrise appropriées à travers une conception et une exploitation adéquates.

Ensuite, elle englobe des infrastructures et des équipements tels que des lignes aériennes ou souterraines, des postes, des câbles, des appareils, des transformateurs, des parafoudres, etc., qui, lorsqu'ils sont assemblés, forment le réseau physique. La qualité de ces infrastructures et équipements joue un rôle déterminant dans la qualité du réseau et, par conséquent, dans la qualité de l'alimentation électrique fournie aux consommateurs.

Enfin, un réseau électrique comprend un ensemble d'automatismes, de systèmes de transmission d'informations et de commandes qui fonctionnent de manière coordonnée. Ce système, assimilable à un système nerveux, est essentiel pour la protection des infrastructures et des équipements, la résilience du réseau face aux pannes internes et aux agressions externes telles que la foudre et les conditions climatiques extrêmes. Il permet également à l'exploitant de maîtriser cet outil technique qui, dans le cas des réseaux publics, couvre des milliers, voire des centaines de milliers, de kilomètres carrés.

En conclusion, un réseau électrique dépasse largement le simple assemblage d'infrastructures et d'équipements. C'est un système complexe composé de fonctions, de dispositifs et de systèmes interconnectés qui doivent travailler de manière harmonieuse afin d'assurer un fonctionnement fiable et de fournir une alimentation électrique de qualité aux consommateurs.

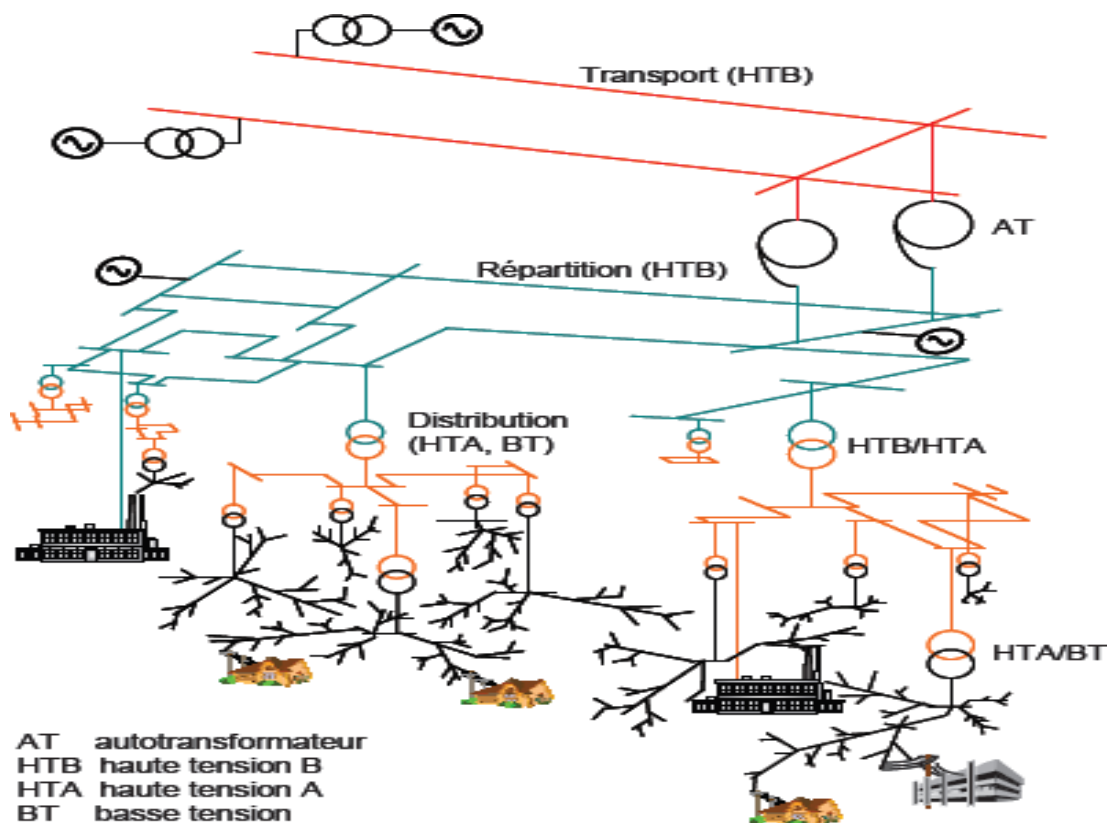


Figure 29: Schéma de réseau général

## Niveaux des tensions des réseaux électriques

Le réseau électrique joue un rôle essentiel en tant que lien indispensable entre la production d'énergie électrique et les utilisateurs finaux. Ce système est organisé en plusieurs niveaux, chacun remplissant des fonctions spécifiques et étant caractérisé par des tensions adaptées à ces fonctions [3]. Dans la plupart des pays, on retrouve généralement les niveaux suivants [25]:

- Le réseau de transport et d'interconnexion, opérant à des tensions très élevées (THT) de **220/800 kV**.
- Le réseau de répartition, fonctionnant à des tensions élevées (HT) de **60/170 kV**.
- Le réseau de distribution, utilisant des tensions moyennes (MT) de **5/36 kV**.
- Le réseau de livraison à l'abonné, opérant à des tensions basses (BT) de **230/400V**.

Ces différents niveaux de réseau sont conçus de manière à garantir un acheminement efficace de l'énergie électrique depuis les centrales de production jusqu'aux utilisateurs finaux, en assurant des conditions de fonctionnement adaptées à chaque étape du processus de distribution.

## Constitution des réseaux électriques

### Générateur :

Les générateurs, en tant que sources d'énergie électrique, ont la capacité de produire de la puissance active, qui est la puissance réelle utilisée pour effectuer un travail, ainsi que de fournir ou absorber de la puissance réactive, qui est associée au flux d'énergie entre les éléments inductifs et capacitifs d'un système électrique. Les générateurs de grande taille s'efforcent de maintenir un niveau de tension spécifié à leurs bornes, afin d'assurer un fonctionnement stable et efficace du réseau électrique.

### Postes Électriques

Les réseaux électriques sont interconnectés par le biais de postes électriques, qui jouent un rôle essentiel dans la transmission et la distribution de l'électricité. Il existe trois types de postes électriques, chacun ayant des fonctions spécifiques [28]:

- **Les postes de production** : Ces postes électriques sont situés près des centrales de production d'électricité, qu'il s'agisse de centrales thermiques, nucléaires, hydrauliques ou éoliennes. Leur fonction principale est de convertir et de transformer l'énergie produite par les générateurs en une forme adaptée pour la transmission sur le réseau.
- **Les postes de transformation**: Ces postes électriques se trouvent le long du réseau de transmission et de distribution. Leur rôle est de modifier la tension de l'électricité pour l'adapter aux besoins spécifiques des différentes zones du réseau. Les postes de transformation peuvent abaisser la tension (transformateurs abaisseurs) pour la distribution locale ou augmenter la tension (transformateurs éleveurs) pour le transport sur de longues distances.

- **Les postes de distribution:** Ces postes électriques sont situés près des consommateurs finaux, tels que les entreprises, les habitations et les institutions. Leur fonction est de distribuer l'électricité à des tensions plus basses, adaptées aux besoins des utilisateurs finaux. Ils sont responsables de la gestion et de la régulation de la distribution de l'électricité à travers les réseaux de distribution locaux.

En résumé, les postes électriques assurent différentes fonctions cruciales dans les réseaux électriques, de la production à la transmission et à la distribution de l'électricité, en veillant à ce que l'énergie électrique soit acheminée de manière efficace et fiable vers les utilisateurs finaux.

### Transformateurs

En raison de leur coût élevé, les transformateurs bénéficient d'une protection renforcée grâce à divers mécanismes redondants.

Il existe différents types de transformateurs utilisés dans les systèmes électriques :

- Les transformateurs électriques : Ils convertissent les valeurs de tension et de courant provenant du réseau en un système de tensions et de courants de valeurs différentes.
- Les transformateurs de courant : Ils permettent de mesurer la valeur du courant circulant dans le réseau.
- Les transformateurs de tension : Ils permettent de mesurer la valeur de la tension du réseau.
- Les autotransformateurs : Ils remplissent la même fonction que les transformateurs électriques standards.
- Les transformateurs déphaseurs : Leur rôle est de modifier plus ou moins la phase de la tension secondaire par rapport à la tension primaire, afin de réguler le flux de puissance active dans les différentes branches du réseau.

Ces différents types de transformateurs sont utilisés pour des applications spécifiques dans les systèmes électriques, et ils contribuent à assurer un fonctionnement optimal et sûr du réseau électrique.

## Lignes électriques[28]

Une ligne électrique est composée d'un ensemble de conducteurs, d'isolants et d'éléments accessoires qui permettent le transport de l'énergie électrique. Les conducteurs utilisés sont généralement en aluminium, en cuivre, etc. . On distingue quatre types de lignes :

- Lignes de distribution à basse tension : Elles sont installées à l'intérieur des usines et des habitations pour alimenter les équipements et les appareils électriques à faible consommation.
- Lignes de distribution à moyenne tension : Elles relient les clients aux postes de transformation principaux de la compagnie d'électricité, permettant la distribution de l'énergie électrique à des niveaux de tension adaptés aux besoins des utilisateurs.
- Lignes de transport à haute tension : Elles assurent la liaison entre les postes de transformation principaux et les centrales de génération d'électricité. Ces lignes permettent le transport de l'énergie sur de plus longues distances avec des pertes minimales grâce à des niveaux de tension élevés.
- Lignes de transport à très haute tension : Elles relient les centrales de production d'électricité éloignées au centre d'utilisation, tel que les grandes villes ou les zones industrielles. Ces lignes à très haute tension sont capables de transporter de grandes quantités d'énergie sur de très longues distances, réduisant ainsi les pertes pendant le transport.

Ces différents types de lignes électriques sont essentiels pour assurer la distribution efficace et fiable de l'électricité, en adaptant les niveaux de tension et les capacités de transport aux besoins spécifiques des différents secteurs et zones géographiques.

## Les charges électriques

Les charges électriques peuvent être classées en trois catégories en fonction de la nature des récepteurs :

- Première catégorie : Cette catégorie regroupe les récepteurs qui ne tolèrent pas plus de deux secondes d'interruption d'alimentation, tels que les hôpitaux et les zones militaires.
- Deuxième catégorie : Les récepteurs de cette catégorie peuvent supporter une interruption d'alimentation de moins de deux heures, comme les usines.

- Troisième catégorie : Dans cette dernière catégorie, les récepteurs peuvent supporter une interruption d'alimentation de plus de 24 heures, tels que l'éclairage public et les habitations.

Cette classification permet de déterminer les exigences en termes de continuité d'alimentation et de temps d'arrêt acceptables pour différents types de charges. Elle est essentielle pour la planification et la conception des systèmes d'alimentation électrique afin de garantir une alimentation fiable et adaptée aux besoins spécifiques de chaque catégorie de charge.

## Réseaux basse tension ( BT)

### Définition

Le réseau BT, ou réseau Basse Tension, est une partie du système de distribution électrique qui assure la distribution d'énergie électrique aux utilisateurs finaux tels que les foyers, les commerces et les petites industries. Il fonctionne à des tensions relativement basses, généralement comprises entre 230 volts et 400 volts en courant alternatif. Le réseau BT est le dernier niveau de distribution avant la connexion directe des appareils électriques des consommateurs. Il est responsable de fournir une alimentation électrique fiable, sécurisée et de qualité aux utilisateurs finaux, en veillant à ce que la tension et la puissance électrique soient adaptées aux besoins des charges connectées. Le réseau BT est composé de transformateurs de distribution, de postes de distribution, de lignes et de câbles basse tension, ainsi que de dispositifs de protection et de commande pour assurer le bon fonctionnement et la sécurité du réseau. Il joue un rôle crucial dans le secteur de l'électricité en assurant la distribution efficace de l'énergie électrique dans les zones résidentielles, commerciales et industrielles. [27]

### Constitution d'un réseau BT [27]

La constitution d'un réseau BT (Basse Tension) implique plusieurs éléments qui permettent de fournir de l'électricité aux utilisateurs finaux à un niveau de tension inférieur. Voici les principaux éléments constitutifs d'un réseau BT :

- **Source d'alimentation** : Le réseau BT est généralement alimenté par un réseau de distribution de moyenne tension (MT) provenant d'un transformateur de distribution. Ce transformateur abaisse la tension de la source d'énergie (généralement du réseau de distribution MT) à une tension adaptée pour le réseau BT.
- **Poste de transformation** : Les postes de transformation sont utilisés pour abaisser la tension du réseau de distribution MT à la tension nominale du réseau BT, qui est généralement de 230/400 volts en courant alternatif. Ces postes de transformation peuvent être situés dans des armoires de rue ou dans des locaux dédiés.

- **Câbles et lignes électriques** : Les câbles et lignes électriques assurent la transmission de l'électricité à partir du poste de transformation vers les différents points de consommation. Ils sont généralement enterrés (câbles souterrains) ou aériens (lignes aériennes) en fonction des exigences techniques et des conditions locales.
- **Dispositifs de protection** : Pour assurer la sécurité du réseau BT, des dispositifs de protection tels que des disjoncteurs, des fusibles et des dispositifs différentiels sont installés pour détecter les surcharges, les courts-circuits et les fuites de courant. Ces dispositifs sont conçus pour interrompre l'alimentation en cas de problème afin de prévenir les dommages matériels et les risques pour les personnes.
- **Compteurs d'électricité** : Dans un réseau BT, des compteurs d'électricité sont installés pour mesurer la consommation d'électricité des utilisateurs finaux. Ces compteurs peuvent être de différentes technologies, y compris les compteurs électromécaniques traditionnels ou les compteurs électroniques plus avancés.
- **Raccordements des utilisateurs finaux** : Le réseau BT comprend également les raccordements individuels des utilisateurs finaux, qui sont généralement effectués à partir du réseau de distribution BT vers les bâtiments résidentiels, commerciaux ou industriels. Ces raccordements peuvent être réalisés via des tableaux de distribution et des câbles internes.

Il convient de noter que la constitution exacte d'un réseau BT peut varier en fonction des réglementations et des normes en vigueur dans chaque pays. Il est donc important de se référer aux réglementations locales et aux pratiques de l'industrie pour obtenir des informations précises sur la constitution spécifique d'un réseau BT dans une région donnée.

## Structure de base des réseaux électriques

### Qualité de l'énergie

Le concept de "qualité de l'énergie électrique" englobe plusieurs aspects, notamment la stabilité de la tension, la stabilité de la fréquence du réseau et l'absence de divers phénomènes électriques indésirables tels que le flicker ou les distorsions harmoniques. La Figure (2) présente une classification de ces perturbations en fonction de leurs caractéristiques [17]

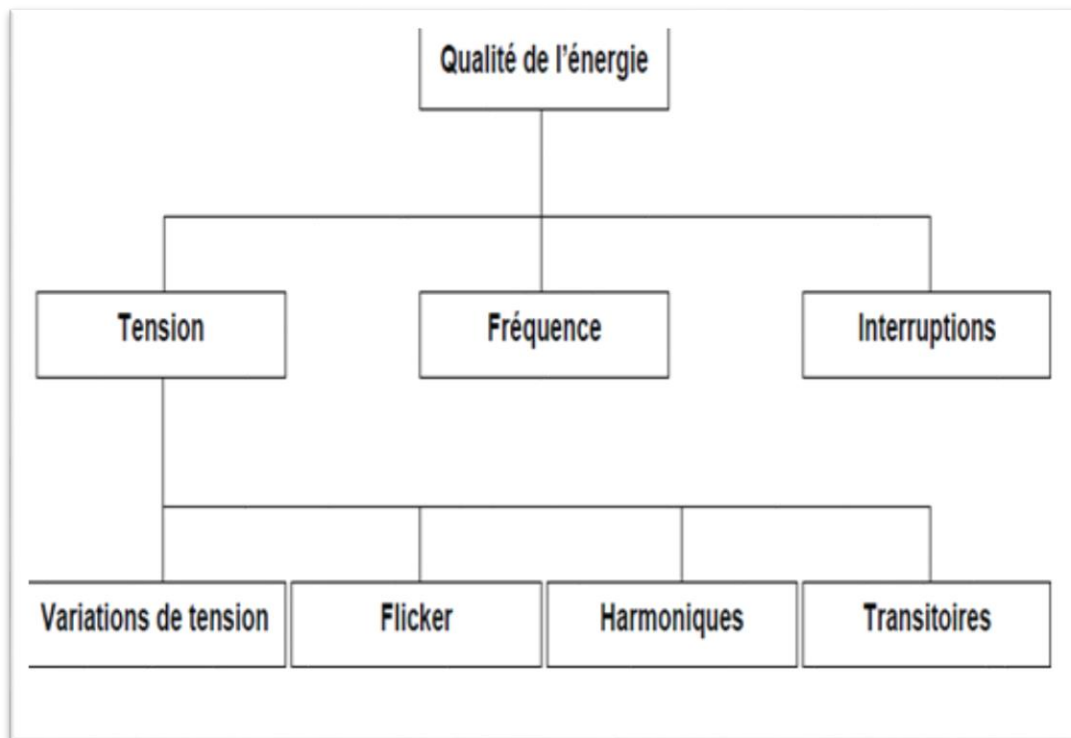


Figure 30: Schéma de structure de qualité de l'énergie

Bien qu'il n'existe pas de normes internationales spécifiques pour les systèmes de génération en site isolé, les caractéristiques du réseau isolé doivent être similaires à celles des grands réseaux interconnectés. En effet, les consommateurs connectés aux réseaux isolés utilisent les mêmes appareils que ceux connectés aux grands réseaux interconnectés. Par conséquent, les exigences en matière de qualité de l'énergie sont généralement les mêmes. La plupart des mesures et définitions utilisées dans les normes se basent sur l'analyse de la fréquence et de la tension [17]. Les caractéristiques de la tension sont définies et décrites en termes de fréquence, d'amplitude, de distorsions harmoniques et de symétrie du système triphasé.

### Filtre de sortie

Plusieurs solutions ont été proposées pour résoudre le problème de la pollution harmonique dans les réseaux électriques de distribution. Ces solutions peuvent être regroupées en deux approches distinctes : la première, connue sous le nom de conditionnement des charges, vise à rendre les équipements moins sensibles aux perturbations énergétiques, assurant ainsi la continuité du service même en présence d'une distorsion significative de la tension. La deuxième approche consiste à installer des systèmes de conditionnement qui visent à contrer les perturbations harmoniques. L'un de ces systèmes de conditionnement est le filtrage actif de puissance. En réalité, le terme "conditionnement de puissance" englobe plusieurs significations, telles que le filtrage des harmoniques, la compensation de l'énergie réactive, la correction du facteur de puissance, la rééquilibrage des charges, la réduction des creux de tension, etc. [22].

Un réseau de distribution est considéré comme sain et de bonne qualité s'il satisfait les conditions suivantes :

- Les courants et tensions sont sinusoïdaux (sans distorsion) et en phase (facteur de puissance proche de 1).
- Les courants et tensions sont équilibrés (mêmes amplitudes et déphasages).
- Les tensions ne présentent pas de creux.
- Les tensions ne fluctuent pas rapidement (flicker).
- Les tensions ne dépassent pas les valeurs nominales (pas de surtensions).
- La fréquence reste dans les limites de variation tolérées ( $\pm 2$  Hz).

Un réseau qui ne satisfait pas ces conditions est considéré comme perturbé et nécessite un traitement. Ce traitement peut prendre la forme d'un filtrage interne (comme l'utilisation de la modulation de largeur d'impulsion) ou d'un filtrage externe. En cas d'option pour un filtrage externe, on peut choisir entre [22] :

- ❖ L'application d'un filtrage passif adapté aux perturbations harmoniques de courant, qui utilise des composants passifs tels que des circuits RLC.
- ❖ L'application d'un filtrage actif adapté au traitement de l'ensemble des perturbations, qui utilise des composants actifs tels qu'un onduleur.

La caractérisation des perturbations harmoniques permet d'évaluer la qualité de l'énergie du réseau étudié. Comment ? Cela se fait en calculant le taux de distorsion harmonique en courant global, noté THD (Total Harmonic Distortion), et en mesurant le facteur de puissance qui quantifie la consommation de puissance réactive.

#### Taux de distorsion harmonique[28]

Le taux de distorsion harmonique est utilisé pour mesurer la différence entre la forme d'onde réelle d'un courant ou d'une tension et une forme d'onde sinusoïdale idéale. Il représente le rapport entre la valeur efficace des harmoniques et celle du fondamental. Le taux global de distorsion harmonique est une mesure qui caractérise l'impact des harmoniques sur la forme d'onde déformée du courant.

$$THD\% = \frac{\sum_{h=2}^{\infty} A_h^2}{A_1}$$

Sachant que :

A : Amplitude du courant fondamental.

h : Amplitude du courant harmonique range h.

Ce taux est très supérieur à la valeur tolérée qui est 5%.

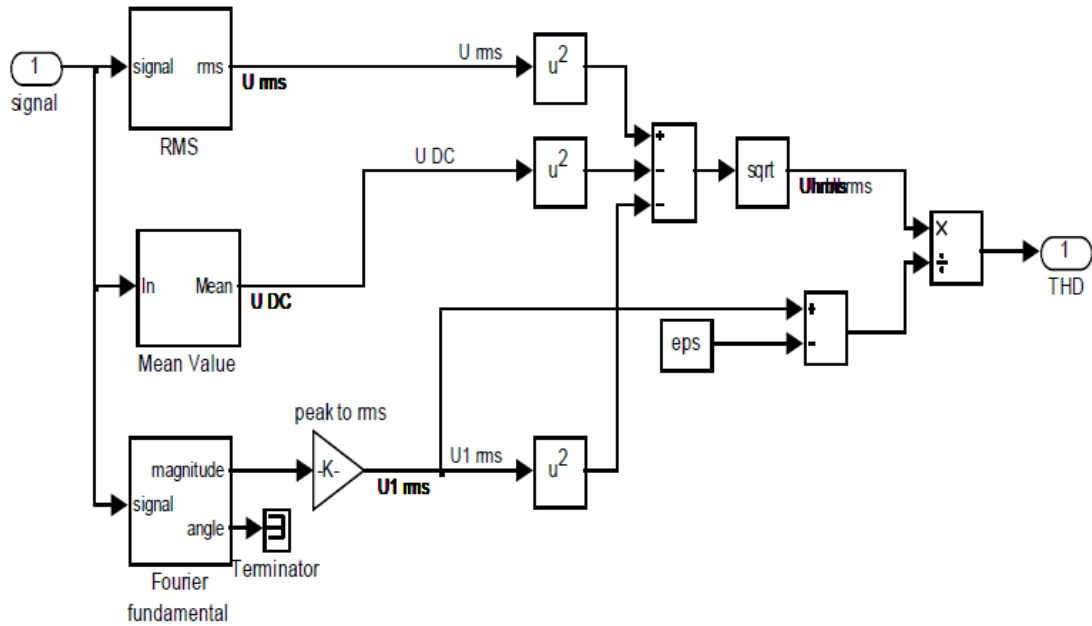


Figure 31: Modèle de bloc déterminé le THD établi sous Matlab-Simulink.[28]

## Principe de la conversion Photovoltaïque

L'exploitation de l'énergie solaire offre un potentiel considérable, ce qui a conduit au développement des panneaux photovoltaïques. Bien que leur rendement soit relativement faible (environ 30 à 40%), il est essentiel de rechercher la puissance maximale. Cependant, les panneaux photovoltaïques sont soumis à des variations d'ensoleillement et de température qui influencent la puissance qu'ils peuvent fournir.

En effet, sous ces conditions changeantes, la puissance disponible varie en fonction de la tension (ou du courant) aux bornes du panneau photovoltaïque. Il est donc crucial que le système d'exploitation s'adapte pour extraire le maximum de puissance. C'est ainsi que l'idée du MPPT (Maximum Power Point Tracker) est née.

L'utilisation du MPPT permet de surveiller en continu le point de puissance maximale fourni par un panneau ou un ensemble de panneaux photovoltaïques, dans le but d'améliorer le rendement. Le point de puissance maximale (PPM) sur la courbe courant-tension d'un système photovoltaïque est l'endroit où la puissance maximale est produite.

Dans les systèmes de charge directe, les panneaux photovoltaïques sont souvent surdimensionnés afin de fournir une puissance suffisante à la charge, ce qui rend le système coûteux. Pour surmonter ce problème, le suivi du point de puissance maximale peut être utilisé pour maintenir le fonctionnement du panneau photovoltaïque à son niveau de puissance maximale. Le MPPT réalise cela en contrôlant la tension ou le courant du générateur indépendamment de ceux de la

charge. L'emplacement du PPM dans la caractéristique courant-tension du panneau photovoltaïque n'est pas connu à l'avance. Cependant, grâce à un algorithme de suivi intelligent, le PPM peut être localisé et suivi, soit par des calculs de modélisation, soit par un algorithme de recherche. La situation est d'autant plus complexe que le PPM dépend de manière non linéaire de l'ensoleillement et de la température.[28]

## **Principe de l'intégration du photovoltaïque au réseau**

Un système photovoltaïque (PV) est conçu pour alimenter des charges avec ou sans stockage. Pendant les jours clairs successifs en hiver, il peut y avoir un surplus d'énergie non utilisée. Dans le but d'exploiter ce surplus, il existe généralement deux solutions [19] : les applications autonomes telles que le chauffage de l'eau ou l'injection de ce surplus dans le réseau électrique.

Dans cette étude, nous nous intéressons aux systèmes d'injection au réseau, où l'objectif est de clarifier certaines caractéristiques dynamiques des différents composants constituant l'interface entre le réseau électrique et le générateur photovoltaïque.

L'association de la source d'énergie photovoltaïque avec le réseau électrique permet soit de prélever de l'énergie du réseau, soit d'injecter de l'énergie dans le réseau à travers un système de conditionnement comprenant des onduleurs, des dispositifs de suivi du point de puissance maximale (MPPT), des filtres, des transformateurs, et autres.

## **Conditions techniques de raccordement des générateurs photovoltaïque au réseau BT**

Le raccordement d'un générateur photovoltaïque au réseau de distribution électrique doit, comme celui d'une installation standard, respecter les normes et règlements. La principale difficulté réside dans le manque de prise en compte des spécificités des générateurs PV par les normes et dans le faible retour d'expérience français [20].

Pour faire la connexion de centrale avec le réseau, il faut réaliser les trois conditions suivantes:

- La tension: il faut assurer que la tension de centrale et la tension du réseau sont les mêmes.
- La fréquence: il prend la fréquence d'électricité de centrale égale

la fréquence d'électricité de réseau.

- Le déphasage: il faut assurer que le déphasage entre tension de centrale et la tension de réseau est nulle. [21]

## **Différents types de systèmes photovoltaïques connectés au réseau :**

Il existe deux types de structure de systèmes photovoltaïques:

- Les systèmes à connexion directe au réseau. Cette installation est constituée d'un générateur photovoltaïque qui est connecté à l'aide d'un onduleur au réseau électrique. Il existe dans la littérature de nombreux exemples [20].
- Le système à bus continu intermédiaire. Le générateur photovoltaïque est connecté à un bus continu par l'intermédiaire d'un convertisseur continu-continu. Un onduleur délivre une tension modulée. Celle-ci est filtrée pour réduire le taux d'harmonique (THD). On obtient alors en sortie de ce dispositif une tension utilisable pouvant être injectée dans le réseau [22].

Système PV connecté directement au réseau [23]

### **Structure avec bus à basse tension alternative**

La Figure (4) montre un onduleur associé à un circuit de commande qui est directement connecté au module photovoltaïque. La tension en sortie de ce dernier est transformée en une tension alternative de fréquence 50 Hz. Cette tension est transportée grâce à un bus alternatif (20 V - 50 Hz, exemple du schéma) vers un transformateur central qui l'élève au niveau désiré. Le faible niveau de tension dans le bus est l'avantage majeur de ce type de montage, puisqu'il assure la sécurité du personnel. Cependant, la distance entre le transformateur et le module doit être faible à cause du courant important qui traverse les câbles et qui génère des pertes Joules. Il y a un compromis à faire au niveau de la tension du bus alternatif. D'une part, il faut que sa valeur crête soit inférieure à celle délivrée par le module (même avec un faible ensoleillement). D'autre part, une tension faible dans ce bus diminue le rendement [23].

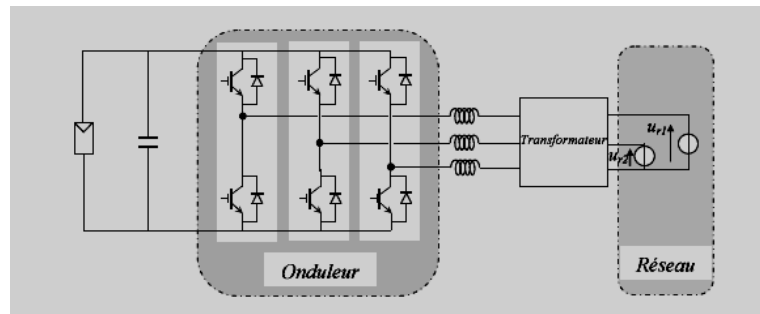


Figure 32: Bus à basse tension alternative [23].

### Structure à convertisseur unique

Le dispositif présenté à la Figure (5) est le plus simple, car il comporte le moins de composants possibles. On associe plusieurs modules photovoltaïques en série pour obtenir une tension continue suffisamment grande. Cette solution est une alternative à un hacheur élévateur de tension. La tension continue obtenue alimente directement un onduleur central, qui fournit la tension sinusoïdale désirée (230 V). Il pourrait être avantageux d'insérer un transformateur pour isoler le système photovoltaïque du réseau. L'inconvénient majeur de ce dispositif est l'arrêt total et immédiat de la production d'énergie lors d'un problème survenant en amont de l'onduleur. De plus, le contrôle du point de maximum de puissance est approximatif car toutes les cellules ne délivrent pas le même courant en raison de leurs différences de structure interne et d'ensoleillement [24].

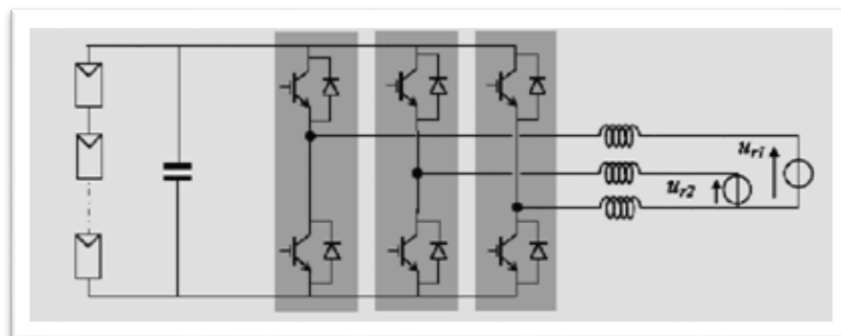


Figure 33: Plusieurs modules PV en série vers un seul onduleur [24].

# **Chapitre 04:**

## **Simulation et résultats**

## Introduction

Dans ce chapitre, nous proposons une étude détaillée et descriptive d'un système photovoltaïque connecté au réseau. Nous commencerons par présenter les concepts généraux relatifs à un système relié au réseau. Ensuite, nous aborderons la modélisation mathématique et la simulation du système, ainsi que la méthode de recherche du point de puissance maximale. Tout au long de cette étude, nous utiliserons des termes techniques couramment utilisés dans le domaine des systèmes photovoltaïques connectés au réseau

## Description des centrales photovoltaïques connectées au réseau

Systèmes raccordés directement au réseau :

Les installations photovoltaïques connectées au réseau conventionnel sont généralement situées à proximité des lieux de consommation et intégrées, en partie ou en totalité, à l'architecture des bâtiments. Elles fonctionnent en synchronisation avec la disponibilité du soleil tout au long de la journée. Leur fonctionnement est spécialement optimisé pour répondre aux exigences techniques de connexion au réseau de distribution électrique. [29]

Il existe deux types de structures pour les systèmes photovoltaïques connectés au réseau. Le premier type est celui des systèmes à connexion directe au réseau. Comme illustré dans la figure 1, ces systèmes comprennent un générateur photovoltaïque connecté directement au réseau électrique à l'aide d'un onduleur.

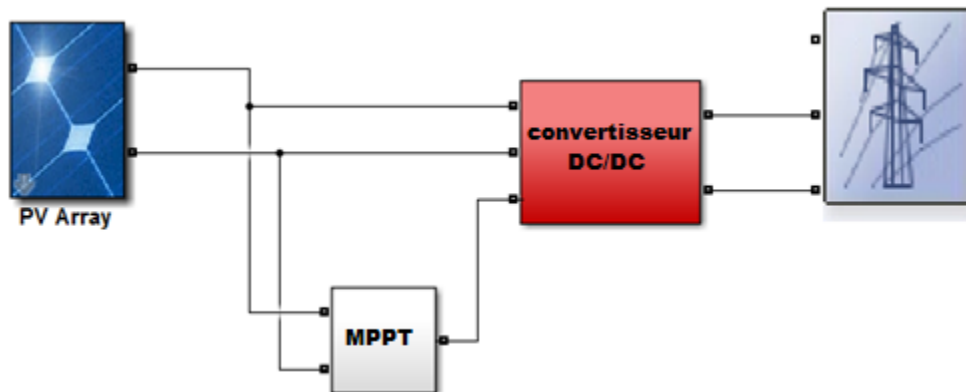


Figure 34: Générateur photovoltaïque connecté directement au réseau.

## Systèmes avec hacheurs

Ce type de système se compose principalement d'un hacheur situé à la sortie du panneau solaire et d'un onduleur connecté au réseau pour convertir la tension continue en tension alternative (figure 2). Les hacheurs sont des convertisseurs de type continu-continu. Leur utilisation permet de contrôler la puissance électrique dans les circuits fonctionnant en courant continu avec une grande souplesse et un rendement élevé. Ils permettent également de réguler le point de puissance maximale des panneaux photovoltaïques.

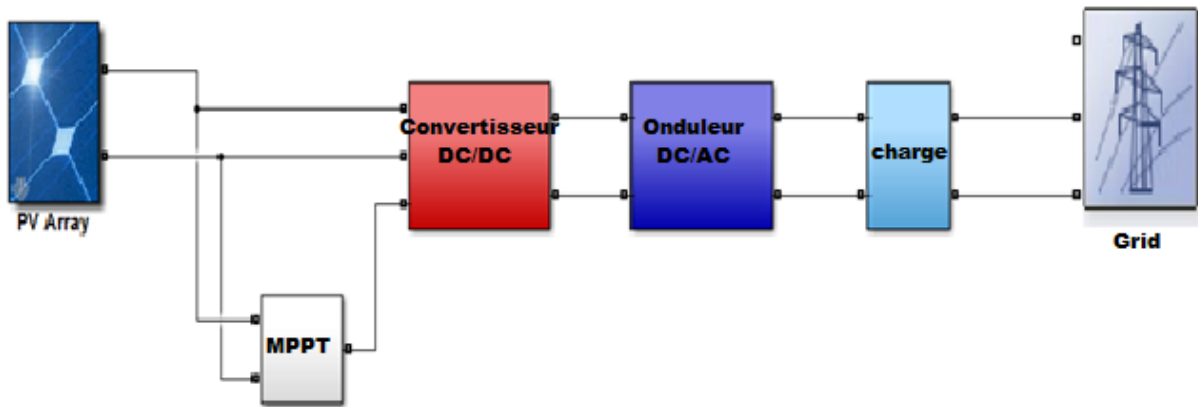


Figure 35:GPV relié au réseau par l'intermédiaire d'un hacheur et d'un onduleur

C'est la structure que nous allons étudier dans ce travail.

## Description de la configuration étudiée :

La configuration étudiée se compose d'un générateur solaire PV connecté à un hacheur survolteur (boost), ce dernier est connecté sur le bus continu d'un onduleur de tension triphasé qui est connecté au réseau électrique (grid). Le modèle global de la centrale photovoltaïque représenté par la (Figure 2) est constitué de:

### Un générateur photovoltaïque:

Nous avons étudié l'influence des paramètres extérieurs ; l'éclairement et la température sur les caractéristiques (courant-tension, puissance-tension). Formé de 66 modules en parallèle et 5 modules en série, il peut délivrer dans les conditions standards une puissance de 305 W, un courant de 5.96 A sous une tension optimale de 54.7V. Le circuit équivalent du module est présenté sur la (Figure 3)

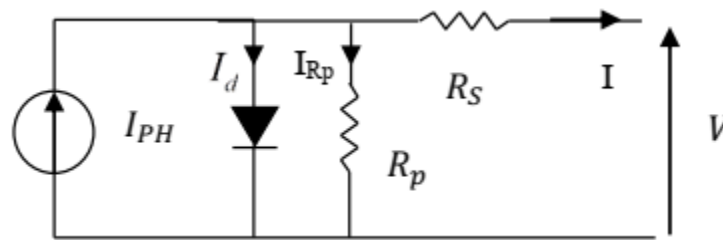


Figure 36:circuit équivalent d'un module PV

### Convertisseur Boost (Continu- Continu)

Ce convertisseur est l'étage d'adaptation (DC-DC) entre le (GPV) et la charge de sortie (Figure4). Il est adapté pour des applications nécessitant des tensions supérieures à 54V.

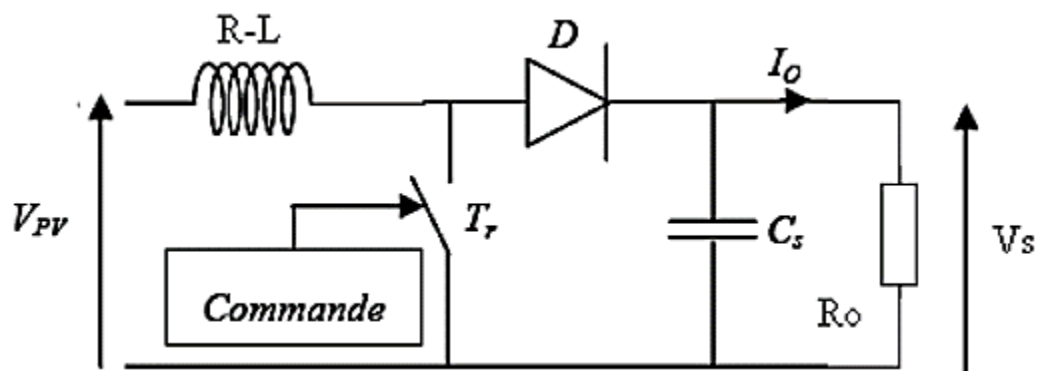


Figure 37:circuit électrique d'un hacheur survolteur (boost)

### La commande MPPT :

La commande MPPT (Maximum Power Point Tracking) permet de chercher le point de fonctionnement optimal du générateur PV qui dépend des conditions météorologiques, de manière à maximiser continuellement la puissance à la sortie du panneau PV.

### Convertisseur DC/AC

Ces convertisseurs continu-alternatif sont des convertisseurs directs, ils ne sont composés que d'interrupteurs semi-conducteurs, et la nature de la source continue impose la nature de la source alternative : - Les commutateurs de courant sont connectés à une source de tension alternative (Figure5 a). - Les onduleurs de tension sont connectés à une source de courant alternative (Figure5 b)

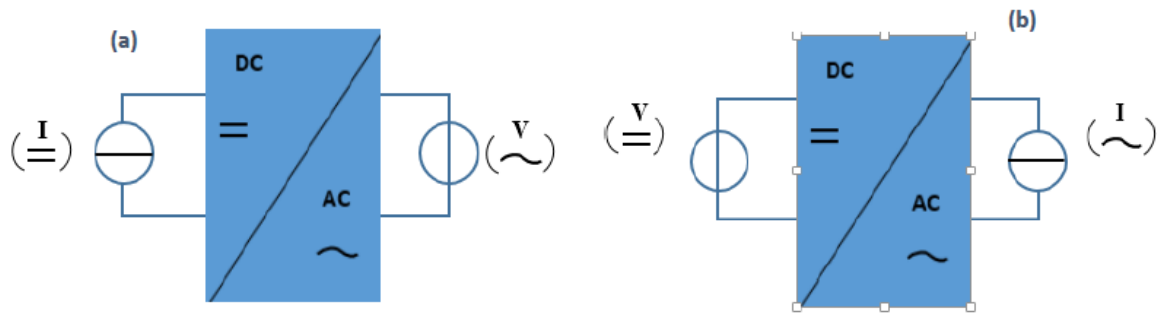


Figure 38: convertisseur DC/AC

Le plus souvent, on utilise deux ou trois phases, mais dans les applications de grande puissance, le nombre de phases peut être plus élevé (12, 24) par transformation [30].

La charge :

La charge sur le côté (AC) est une choisi une charge équilibrée (RL).

Le réseau électrique :

Il représente le réseau électrique de distribution publique d'amplitude

$V_r = 22\text{kV}$  et de fréquence  $f = 50\text{Hz}$ .

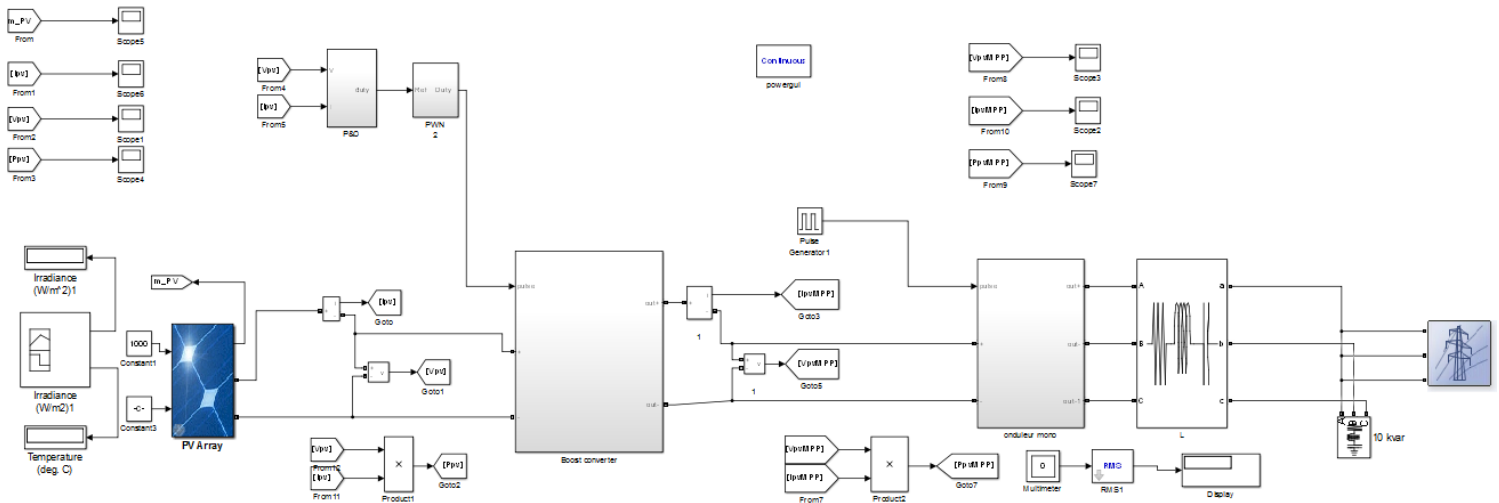


Figure 39: Schéma block de la simulation sous Simulink

## Etape de la simulation

La structure complète du générateur photovoltaïque connecté au réseau que nous proposons pour l'étude et la simulation est présentée sur la (Figure 6).

### Simulation du générateur GPV

Le module photovoltaïque choisi pour la simulation. Il contient (96) cellules solaires du silicium multi cristallines, et fournit une puissance maximum nominale de 106W

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

<b>Ensoleillement standard G</b>	1000W
<b>Température standard, T</b>	25°C
<b>Puissance maximale Pmax</b>	305 W
<b>Tension à Pmax ou tension optimale (Vop)</b>	54.7 V
<b>Courant à Pmax ou courant optimal (Iop)</b>	5.58 A
<b>Tension de circuit ouvert Vco</b>	64.2 V
<b>Courant de court-circuit Icc</b>	5.96 A
<b>Nombre de cellule en série</b>	96
<b>Courant photonique Iph</b>	5.96 A
<b>Courant de saturation Isat</b>	5.26 μA

La caractéristique de ce modèle est donnée par :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_{set} \left[ \exp\left(\frac{V_{pv} + R_s \cdot I_{pv}}{nK_T}\right) - 1 \right]$$

Avec :

**I<sub>pv</sub>** : Courant du panneau photovoltaïque.

**I<sub>ph</sub>** : Courant photonique.

**I<sub>sat</sub>** : courant de saturation

**V<sub>pv</sub>** : Tension aux bornes du PV.

**R<sub>s</sub>** : résistance série

**n** : facteur d'idéalité

**K** : constante de Boltzmann

L'équation du courant photo-généré I<sub>ph</sub> ramenée aux conditions standard (G = 100W /m<sup>2</sup> et Ta = 250 C) est donnée par :

$$I_{ph} = N_p \left( I_{cc} \frac{G}{G_r} + I_t (T_c - T_r) \right)$$

Avec :

**I<sub>ph</sub>** :Le courant photonique(A).

**G<sub>r</sub>** : Eclairage ou flux de référence 1000W /m<sup>2</sup>.

**I<sub>t</sub>** : Coefficient de température du courant de court-circuit (I<sub>t</sub> = 3.516e-3)

**I<sub>cc</sub>** : Courant de court-circuit.

**T<sub>c</sub>** : Température de la cellule (kelvin).

**T<sub>r</sub>** : Température de référence (300 K).

**N<sub>p</sub>** : Nombre de cellules connectées en parallèle.

Le courant de conduction de la diode dans le cas d'un module est donné par l'équation suivante :

$$I_d \approx -I_{sat}(t) \cdot \left[ \exp\left(\frac{q \cdot (V + \frac{R_s \cdot I}{N_s})}{nK_T}\right)^{-1} \right] \cdot N_p$$

Le courant de saturation de la diode est donné par l'équation suivante :

$$I_{sat} = I_0 \left(\frac{T_c}{T_r}\right)^3 \cdot \exp\left[\frac{q \cdot E_g}{n \cdot k} \cdot \left(\frac{1}{T_r} - \frac{1}{T_c}\right)\right]$$

Avec:

**q** : La charge de l'électron (1.6e-19).

**V** : Tension aux bornes de la charge.

**k** : Constante de Boltzmann (1.38e-23).

**n** : Coefficient adimensionnel du matériau semi-conducteur.

**N<sub>s</sub>** : Nombre de cellules connectées en série.

**I<sub>0</sub>** : Courant de saturation inverse de la diode à la température de référence.

**E<sub>g</sub>** : Le gap d'énergie du semi-conducteur, E<sub>g</sub> = 1.1 eV pour le silicium cristallin

Le schéma représentatif du modèle mathématique du module photovoltaïque sous Matlab-simulink est donné par la (Figure 7):

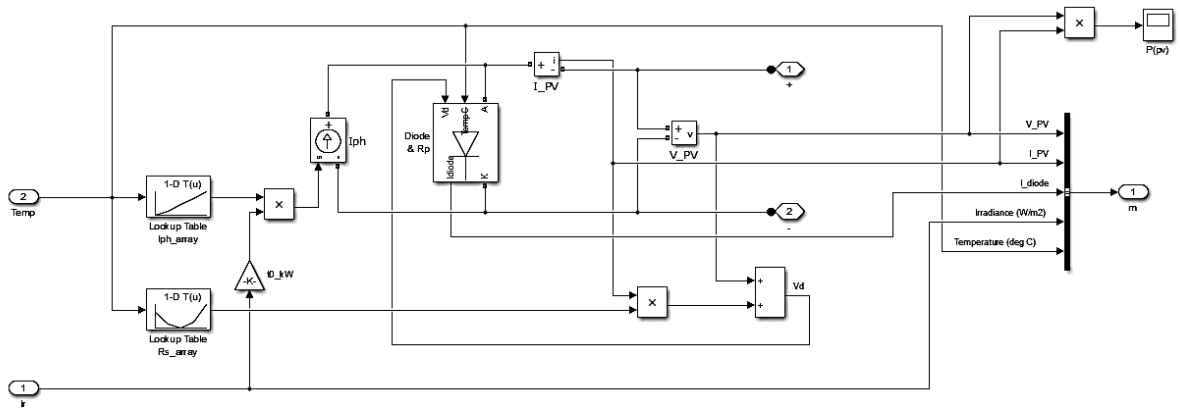


Figure 40: Schéma de simulation du PV sous Simulink.

### Simulation du hacheur survolteur

Le hacheur est constitué de condensateurs, d'inductances et de commutateurs. Dans une situation idéale, ces composants ne consomment aucune puissance active, ce qui explique les bons rendements obtenus dans les hacheurs. Le rapport cyclique ( $d$ ) est contrôlé en fonction de la valeur  $V_{pv} = V_h$ . (Figure 8) représente le schéma bloc du hacheur élévateur utilisé pour la simulation dans Simulink.

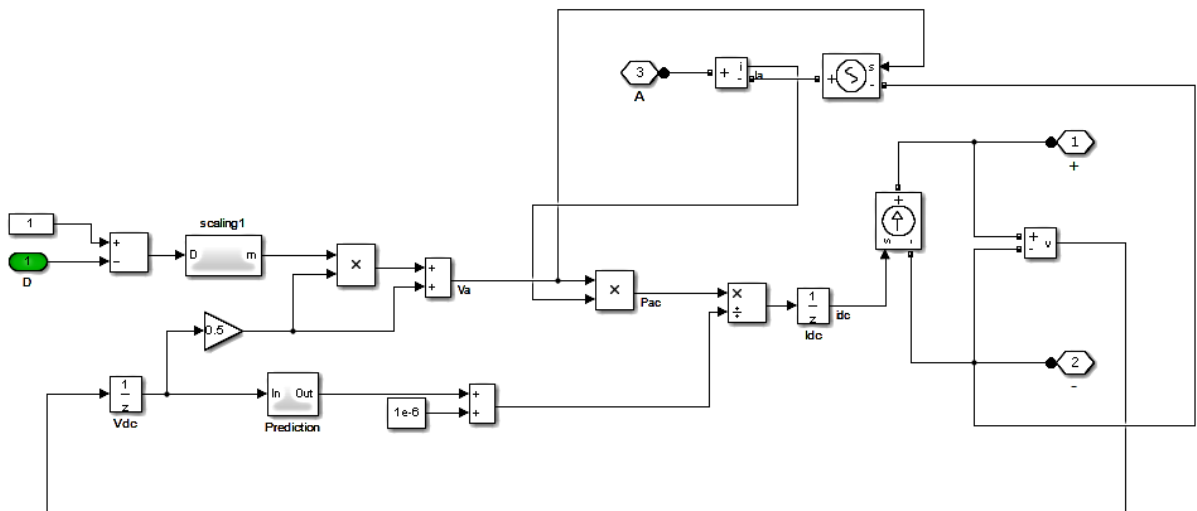


Figure 41: Schéma block du hacheur survolteur.

### La commande MPPT :

La technique de commande MPPT "P&O" est simple et ne nécessite que des mesures de tension et de courant du panneau photovoltaïque,  $V_{pv}$  et  $I_{pv}$  respectivement. Elle est capable de déterminer le point de puissance maximale même en présence de variations d'intensité lumineuse et de température. Dans cette étude, nous analysons la simulation d'une

commande MPPT numérique basée sur la méthode de "perturbation-observation" appliquée aux convertisseurs DC-DC élévateurs.

La (Figure9) illustre le bloc schématique de SIMULINK de la commande MPPT :

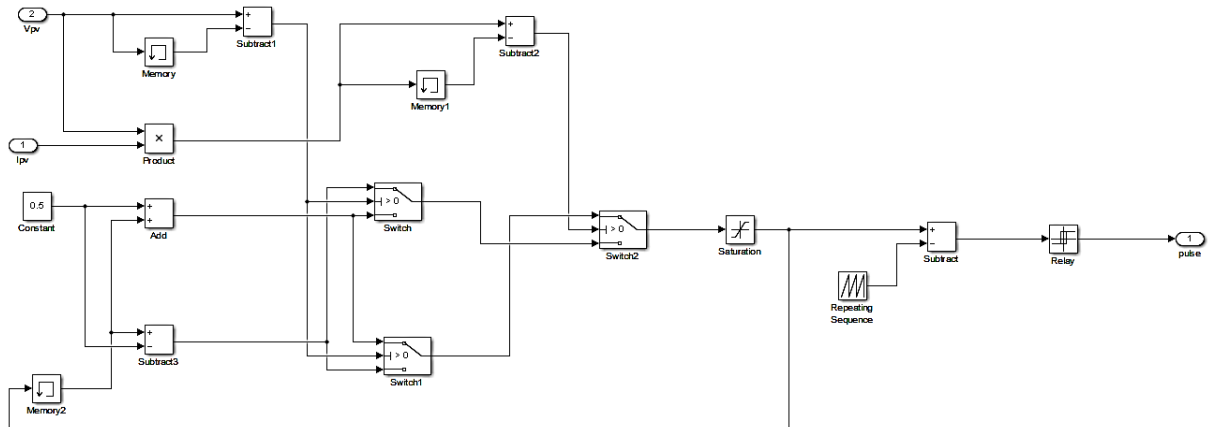


Figure 42:Schéma block de la commande MPPT sous simulink.

La commande de l'onduleur MLI:

L'onduleur triphasé a pour but de convertir la tension continue à la sortie des panneaux en tension alternative afin d'alimenter le réseau triphasé .Cet onduleur est commandé en modulation de largeur d'impulsions (Figure 10) ; Le circuit d'alimentation est généralement constitué de commutateurs IGBT contenant un pont de six transistors de puissance avec des diodes antiparallèles. Il donne la possibilité de mesurer aux bornes des condensateurs une tension continue (Vdc) sans fluctuations. Afin d'assurer que l'onduleur dispose d'une tension maximale à sa sortie, il faut que la tension continue (Vdc) soit maintenue dans une plage bien spécifiée. En effet, la valeur minimale des tensions continues détermine directement l'amplitude de la tension de sortie de l'onduleur.

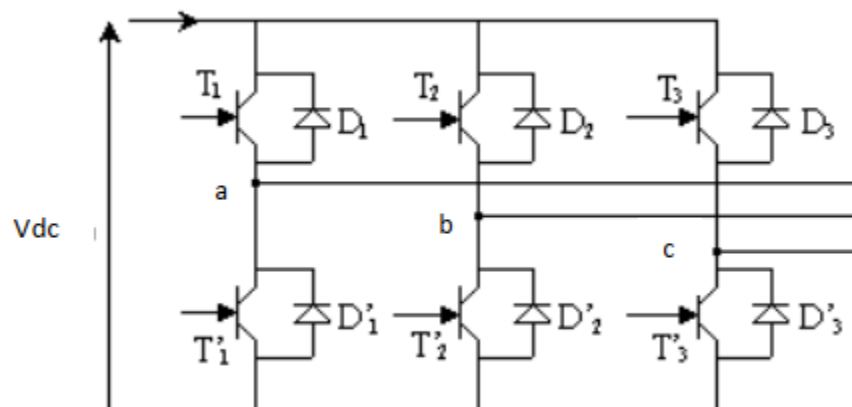


Figure 43:Schéma block de la commande de l'onduleur triphasé.

Les états de commutation de l'onduleur sont définis par les fonctions logiques suivantes

$$F_a = \begin{cases} 0 & \text{si } T_1 \text{ conduit et } T'_1 \text{ bloqué} \\ 1 & \text{si } T'_1 \text{ conduit et } T_1 \text{ bloqué} \end{cases}$$

$$F_b = \begin{cases} 0 & \text{si } T_2 \text{ conduit et } T'_2 \text{ bloqué} \\ 1 & \text{si } T'_2 \text{ conduit et } T_2 \text{ bloqué} \end{cases}$$

$$F_c = \begin{cases} 0 & \text{si } T_3 \text{ conduit et } T'_3 \text{ bloqué} \\ 1 & \text{si } T'_3 \text{ conduit et } T_3 \text{ bloqué} \end{cases}$$

Avec  $T_i, T'_i$  ( $i = 1, 2, 3$ ) : transistors des trois bras de l'onduleur, chaque bras est composé de deux interrupteurs bidirectionnelle (Figure 10).

Les tensions des phases sont exprimées en fonction des variables logiques  $F_a$ ,  $F_b$  et  $F_c$  par la relation suivante :

$$\begin{pmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{pmatrix} = \frac{V_{dc}}{3} \begin{pmatrix} 2F_a - F_b - F_c \\ 2F_b - F_a - F_c \\ 2F_c - F_a - F_b \end{pmatrix}$$

**V<sub>dc</sub>** : tension d'alimentation continue de l'onduleur, obtenue à la sortie des PV.

## Résultats de la simulation :

Dans ce qui suit nous allons présenter les différents résultats de la simulation :

Caractéristiques du module photovoltaïque.

### Influence de l'éclairement :

Les (Figure 11 et 12) montrent l'influence de l'éclairement sur les caractéristiques courant-tension et puissance-tension. A une température constante, on constate que le courant subit une variation importante, mais par contre la tension varie légèrement. Car le courant de court-circuit est une fonction linéaire de l'éclairement alors que la tension de circuit ouvert est une fonction logarithmique.

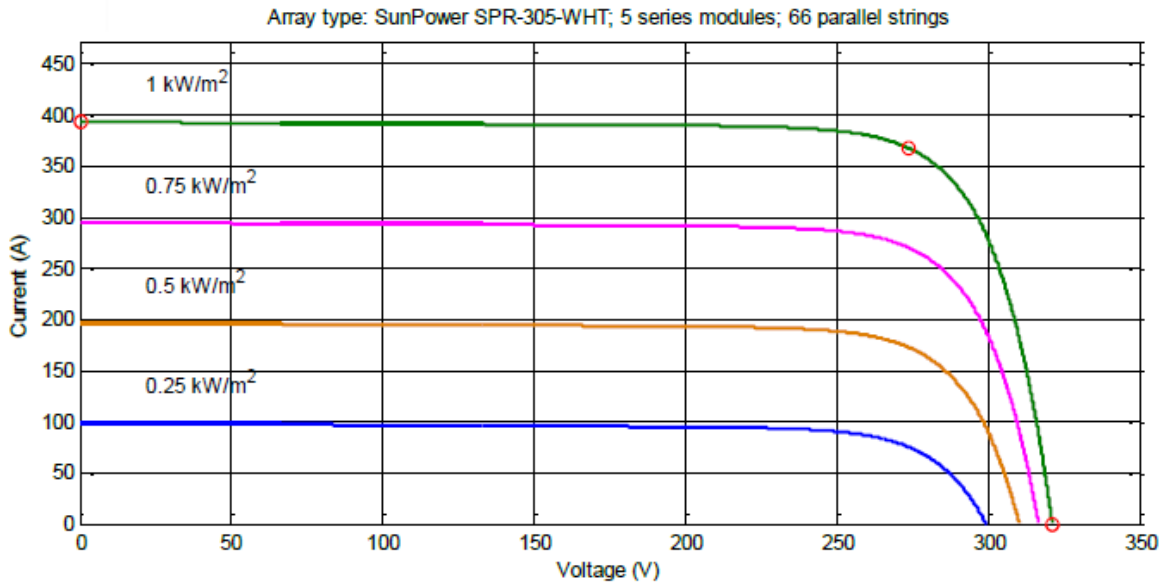


Figure 44:Allure de la caractéristique (I-V) à ensoleillement variable

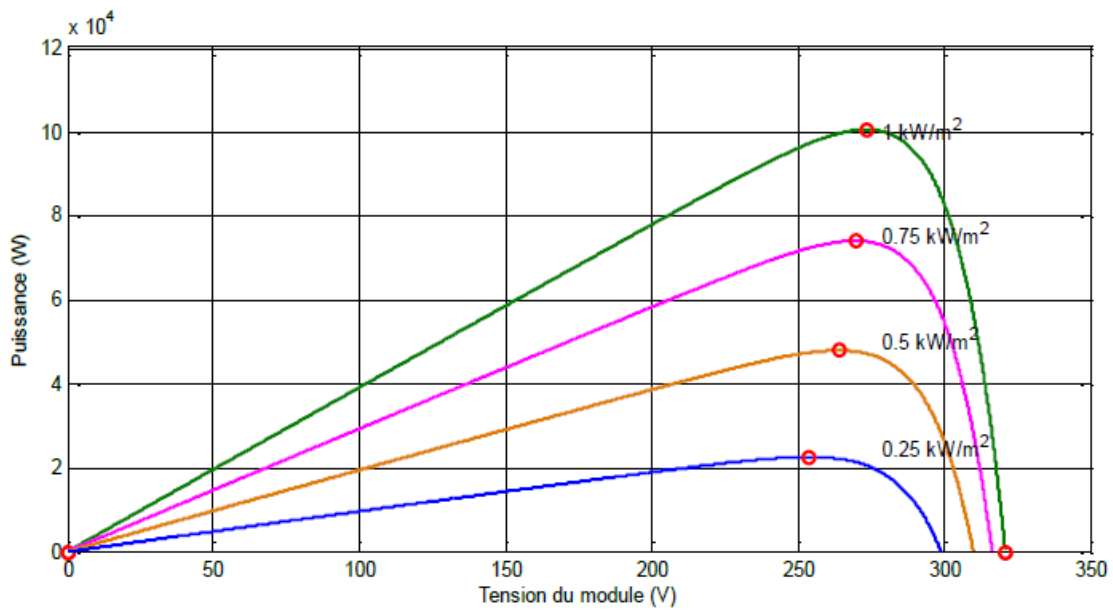


Figure 45:Allure de la caractéristique (P-V) à ensoleillement variable.

### Influence de la température :

Les (Figure 13 et 14) ci-dessous montrent que la tension d'un module photovoltaïque diminue avec l'augmentation de la température du module PV (de la cellule). Le courant de court-circuit, par contre, augmente légèrement avec la température du module PV (de la cellule solaire). Ces figures montrent clairement la baisse du rendement causée par l'augmentation de la chaleur sur la cellule. On peut remarquer sur la (Figure 14) que l'augmentation de la

température se traduit aussi par une diminution de la puissance maximale disponible.

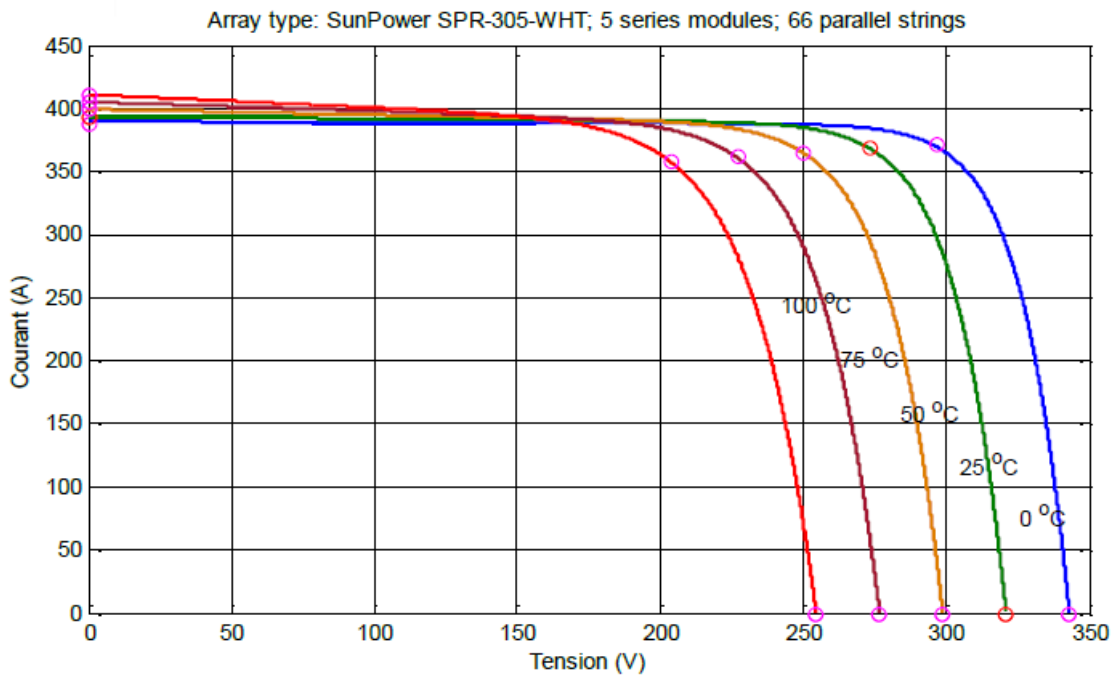


Figure 46:Allure de la caractéristique (I-V) à température variable.

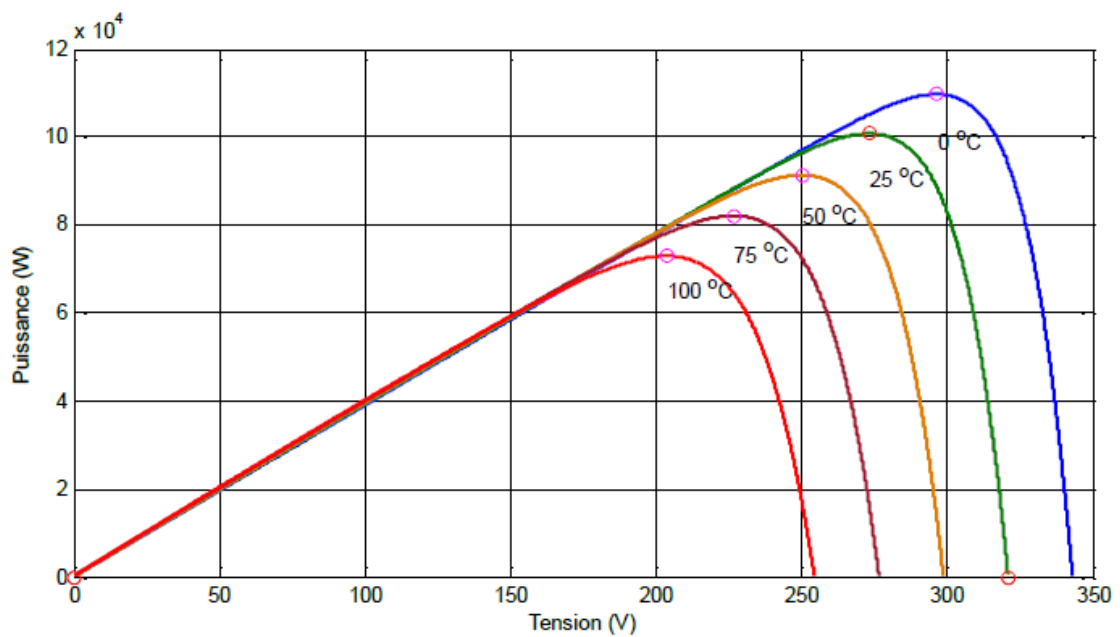


Figure 47:Allure de la caractéristique (P-V) à température variable.

- i. **Résultats de la simulation de l'installation sous différentes conditions métrologique :**

### Simulation à ensoleillement variable et température constante

Dans le but d'étudier les performances du système, on a appliqué un éclaircissement variable tel qu'il est donné en (figure 15) à une température fixée à 25°C.

L'allure de la puissance maximale extraite du générateur photovoltaïque est montrée dans (figure 16). La tension optimale correspondante, obtenue à partir de l'algorithme PO est représentée sur (figure 17). (figure18) représente l'allure du courant photovoltaïque  $I_{pv}(t)$  qui change suivant les variations de l'ensoleillement.

La caractéristique du générateur photovoltaïque  $P(V)$  au point PPM est représentée sur (figure19) avec les caractéristiques théoriques pour les variations du niveau de l'irradiation.

La diminution de l'irradiation implique une diminution de la puissance photovoltaïque produite. Donc le point de puissance maximale se déplace pour rejoindre le nouveau point maximum correspondant à cette irradiation. L'algorithme PO détermine continuellement la tension optimale qui donne la puissance maximale

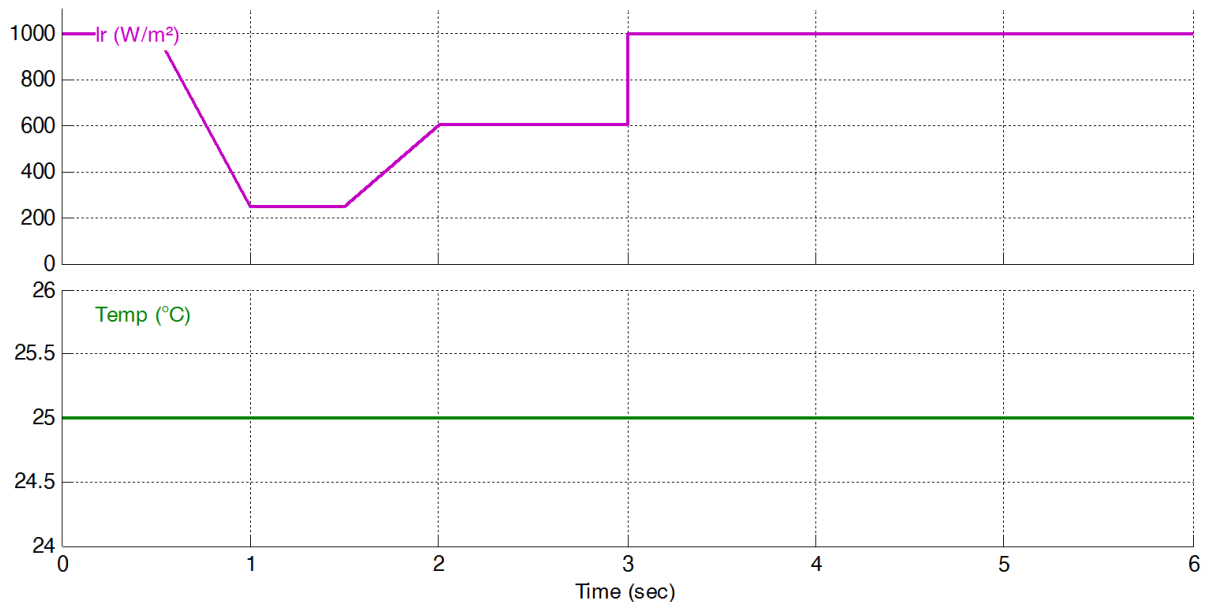


Figure 48: Variation de l'éclairement à une température fixe (25°C).

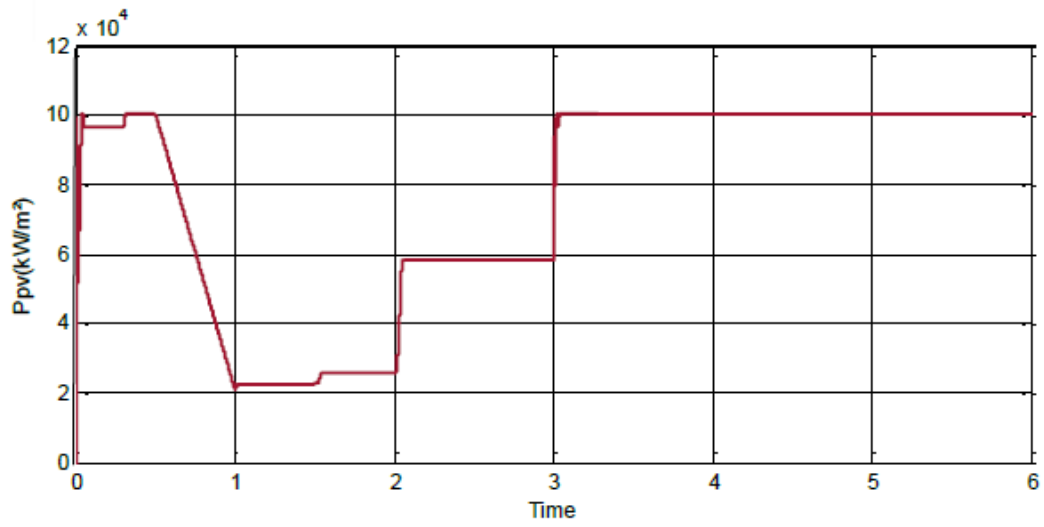


Figure 49: Allure de la puissance du panneau photovoltaïque  $P_{pv}$

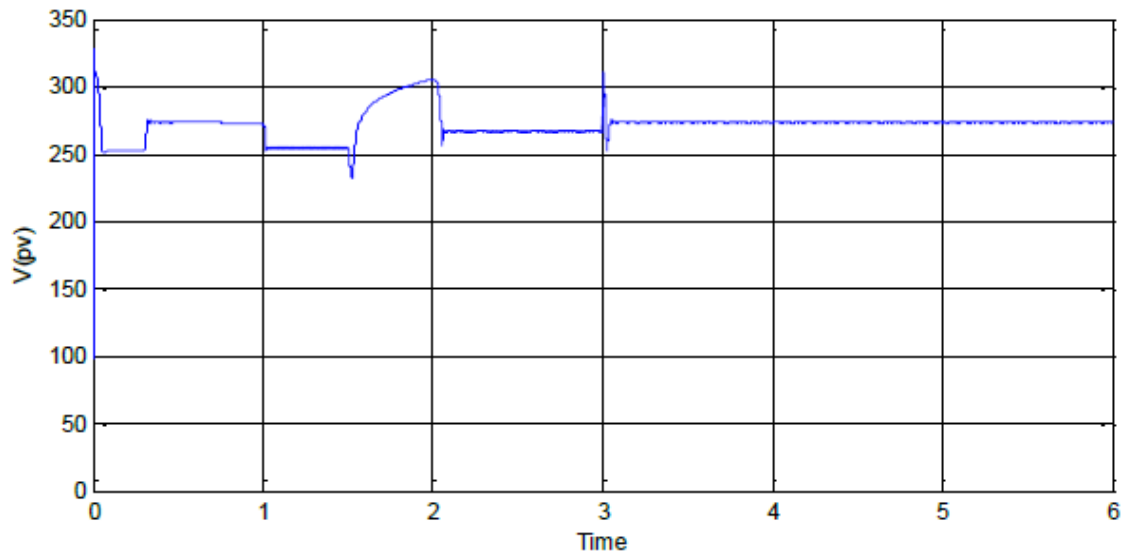


Figure 50: Allure de la tension du panneau photovoltaïque  $V_{pv}$

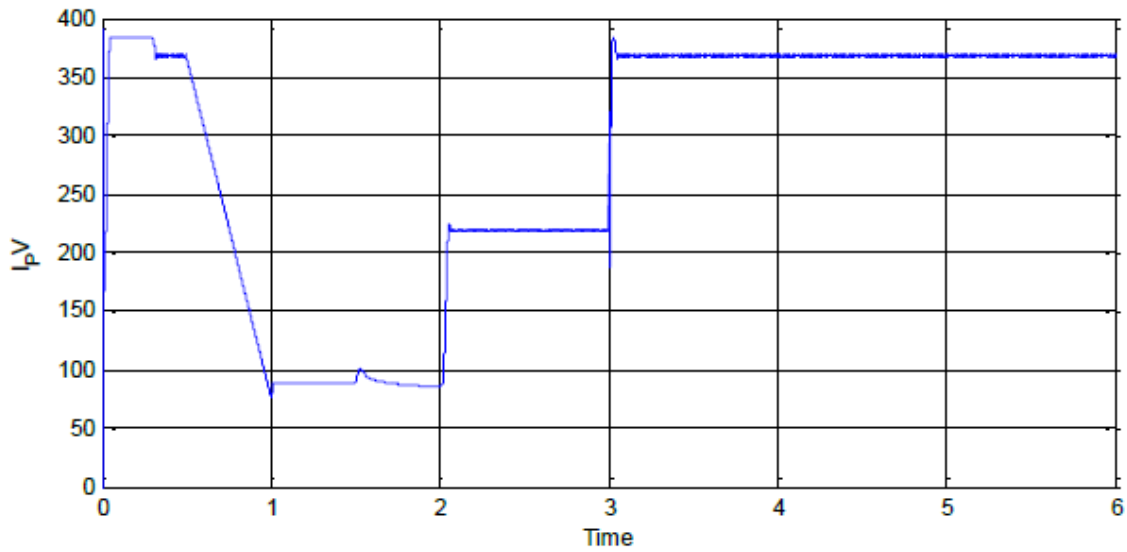


Figure 51:Allure du courant panneau photovoltaïque Ipv.

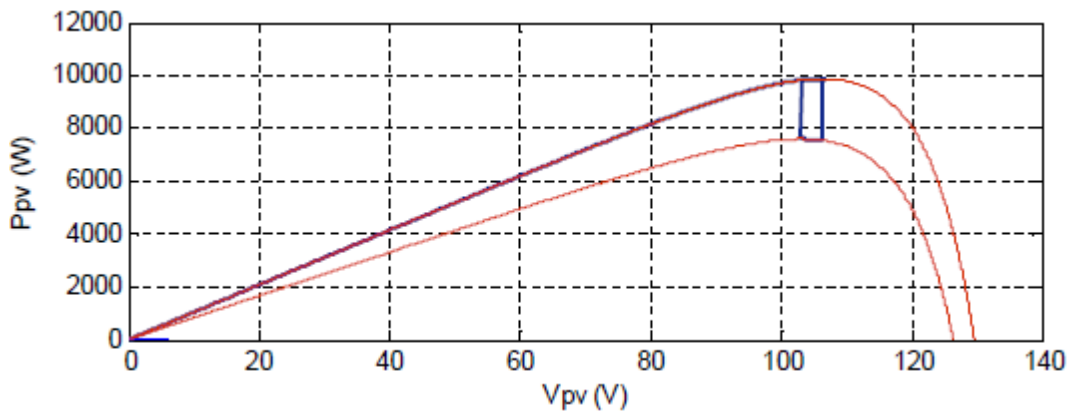


Figure 52:caractéristique P(V) du panneau photovoltaïque

Simulation à température variable et ensoleillement constant :

Nous avons soumis le système à une température variable tout en maintenant un ensoleillement constant de  $1000\text{W}/\text{m}^2$ , comme illustré dans (Figure 20), afin de démontrer le fonctionnement du point de puissance maximale (PPM) de l'algorithme P&O.

La courbe représentant la puissance maximale extraite du générateur photovoltaïque est présentée dans (Figure 21). La tension optimale correspondante, calculée à l'aide de l'algorithme PO, est affichée dans (Figure 22). On peut clairement observer que la tension augmente à mesure que la température diminue, tandis que le courant photovoltaïque reste pratiquement inchangé, comme le montre (Figure 23).

La caractéristique  $P_{pv}(V_{pv})$  du générateur photovoltaïque au point PPM est comparée aux caractéristiques théoriques pour différentes variations de

température, comme indiqué dans (Figure 24). Une diminution de la température entraîne une augmentation de la puissance photovoltaïque produite. Par conséquent, le point de puissance maximale se déplace pour atteindre le nouveau point maximum correspondant à cette température.

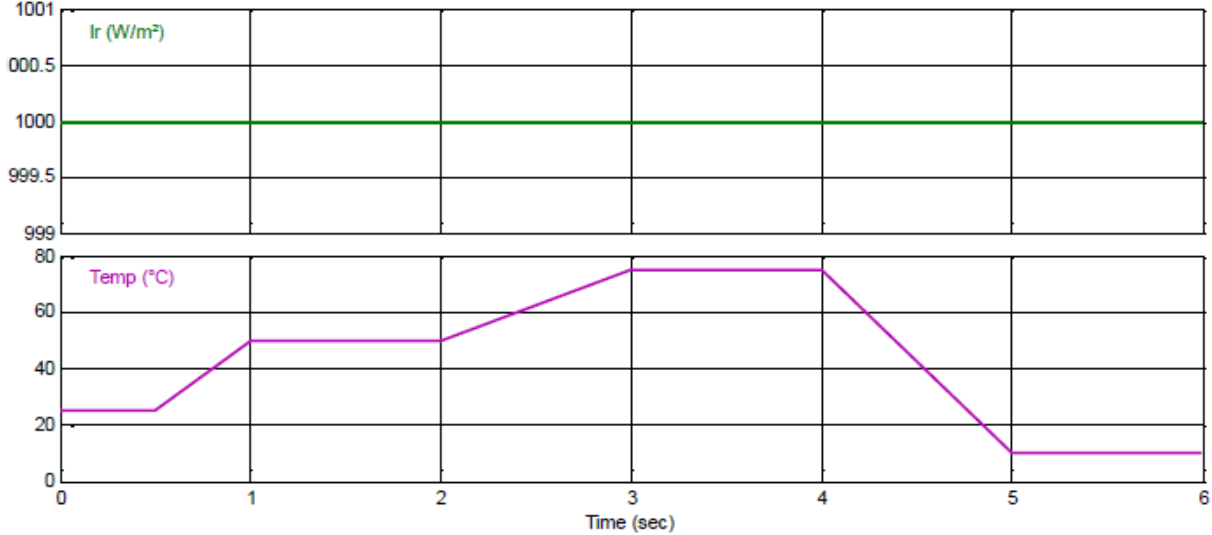


Figure 53:Variation de la température à une irradiance fixe (1000 W/m²).

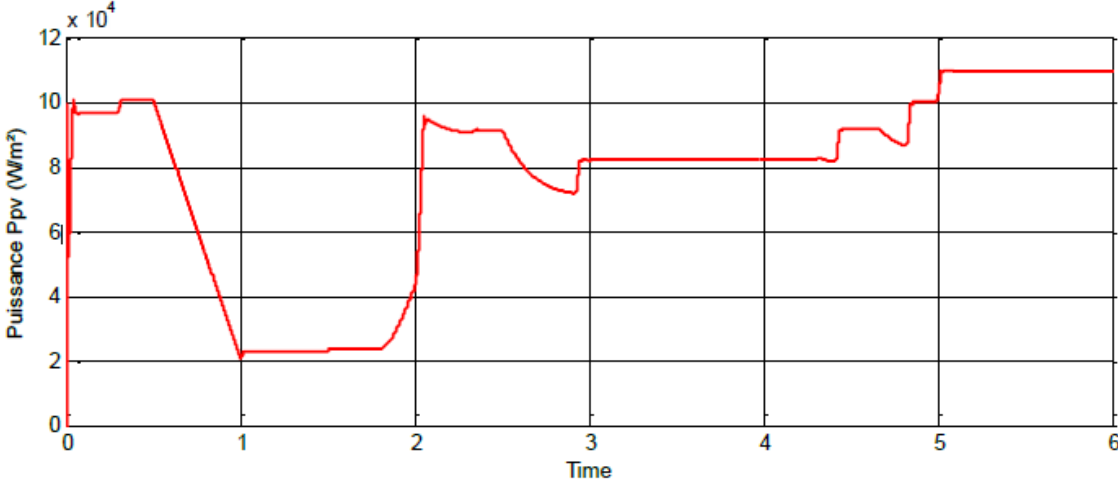


Figure 54:Allure de la puissance photovoltaïque Ppv à Irradiance fixe (1000 W/m²).

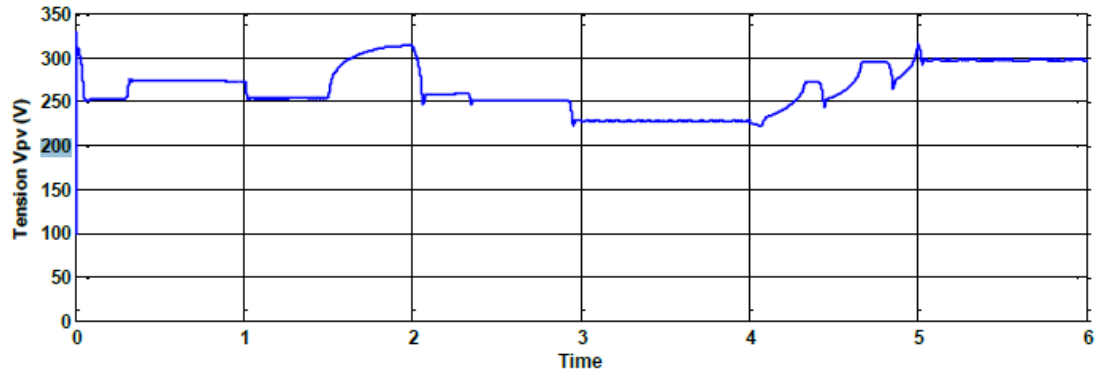


Figure 55:Allure de la tension photovoltaïque Vpv.

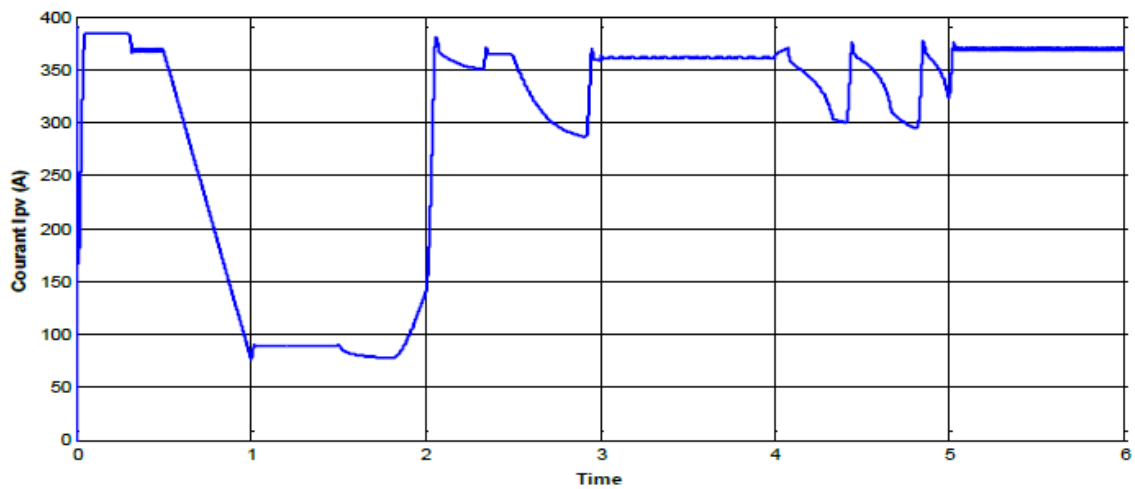


Figure 56:Allure du courant photovoltaïque Ipv.

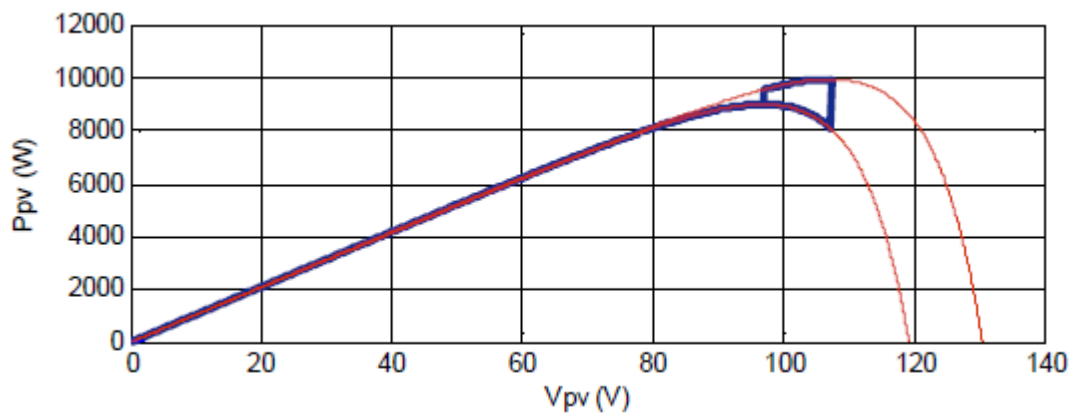


Figure 57:Allure de la puissance photovoltaïque en fonction de la tension photovoltaïque Ppv(Vpv)

Simulation dans les conditions variables d'ensoleillement et de température

Afin d'étudier les performances du système photovoltaïque connecté au réseau, en mode de fonctionnement à puissance maximale, sur une période donnée, nous utiliserons des profils variables d'ensoleillement et de température

présentés dans (Figure 25). La courbe de la puissance extraite des panneaux photovoltaïques est illustrée dans (Figure 26).

La tension du panneau  $V_{pv}$  est représentée dans (Figure 27), tandis que le courant photovoltaïque  $I_{pv}$  varie en fonction de l'ensoleillement, comme indiqué dans (Figure 28). L'évolution du rapport cyclique de la commande MPPT est présentée dans (Figure29).

La tension au niveau du bus continu, obtenue à partir de la commande MPPT basée sur la perturbation et l'observation, est affichée dans ( Figure30). On peut constater qu'elle est régulée avec précision à sa valeur de référence de 500 V, même en cas de variations des conditions environnementales. La commande PO permet d'extraire le point de puissance maximale même lorsque les conditions climatiques changent rapidement.

La comparaison entre les courbes de la puissance photovoltaïque et de la puissance fournie au réseau est illustrée dans (Figure 31). On peut observer que la puissance photovoltaïque produite correspond à la puissance fournie au réseau. De plus, la puissance réactive est nulle, comme le montre (Figure32), ce qui indique un fonctionnement à facteur de puissance unitaire.

Les Figures (33 et34) représentent les courbes de tension et de courant prélevés sur le réseau électrique ( $V_{rés}$  et  $I_{rés}$ , respectivement).

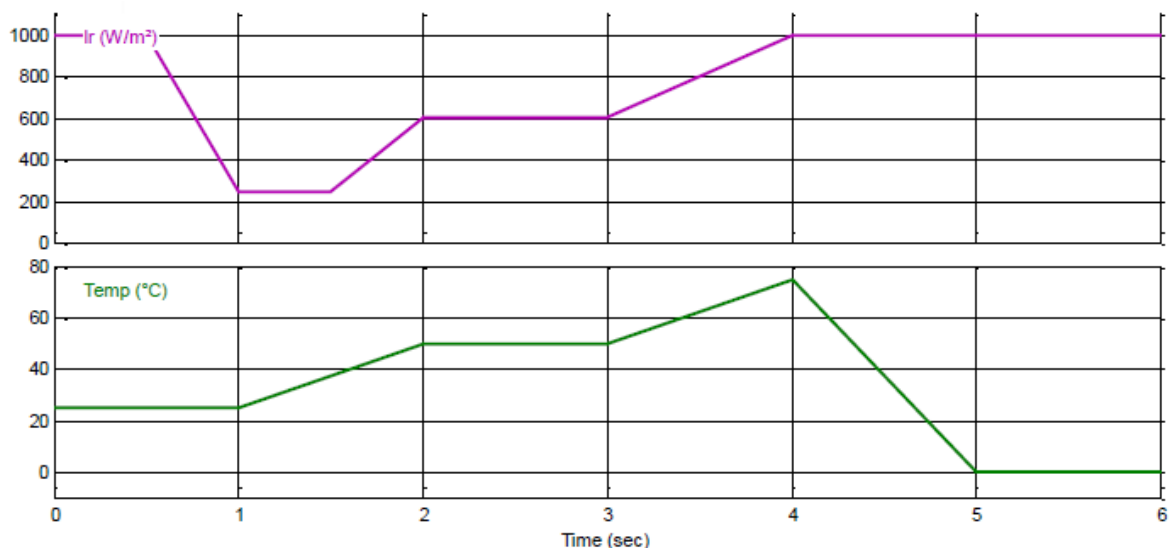


Figure 58:Variation de la température et de l'ensoleillement

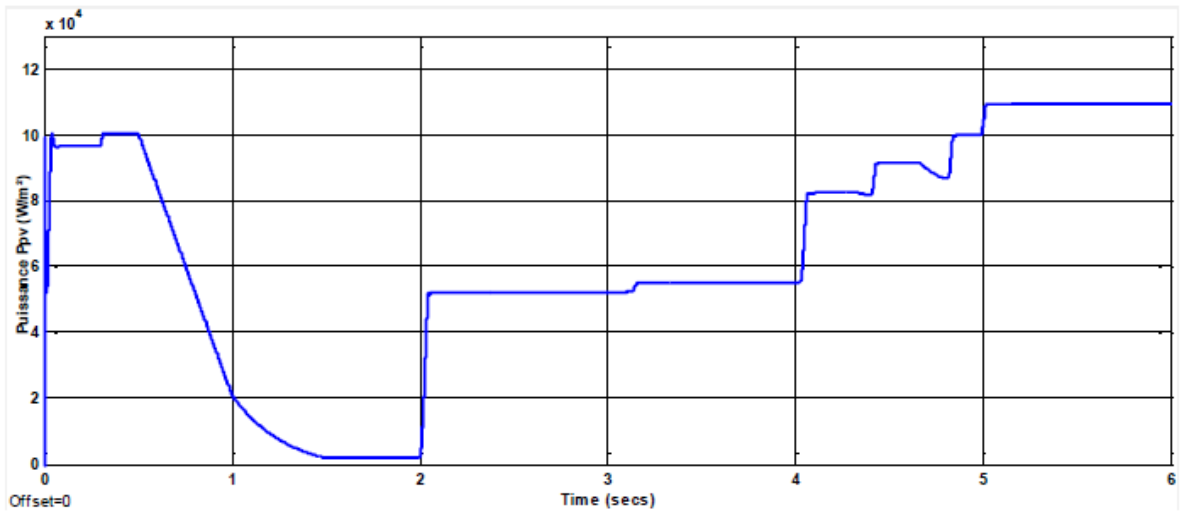


Figure 59:Allure de la puissance du panneau Ppv

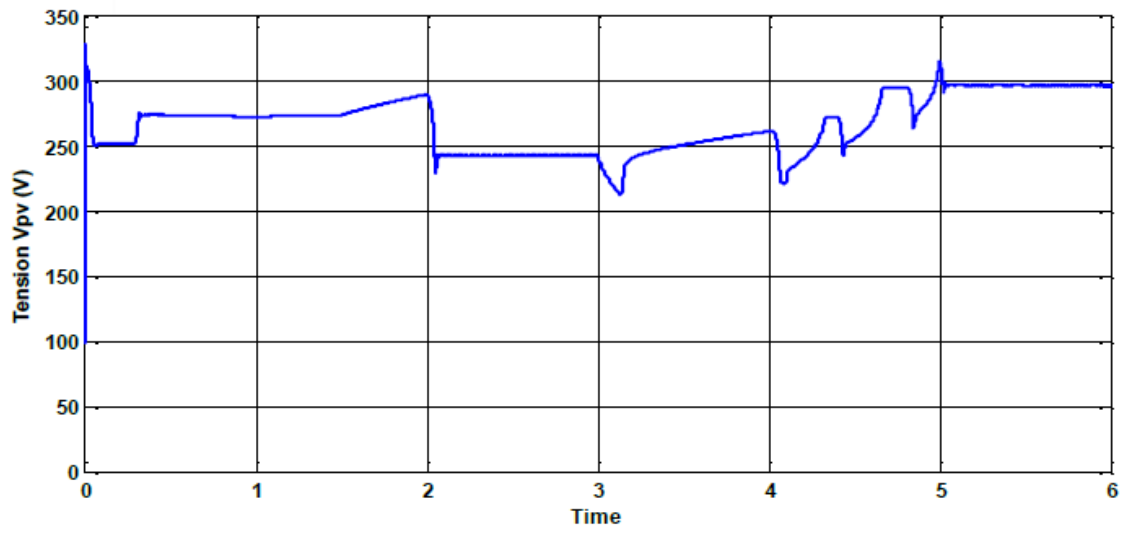


Figure 60:Allure de la tension du panneau Vpv.

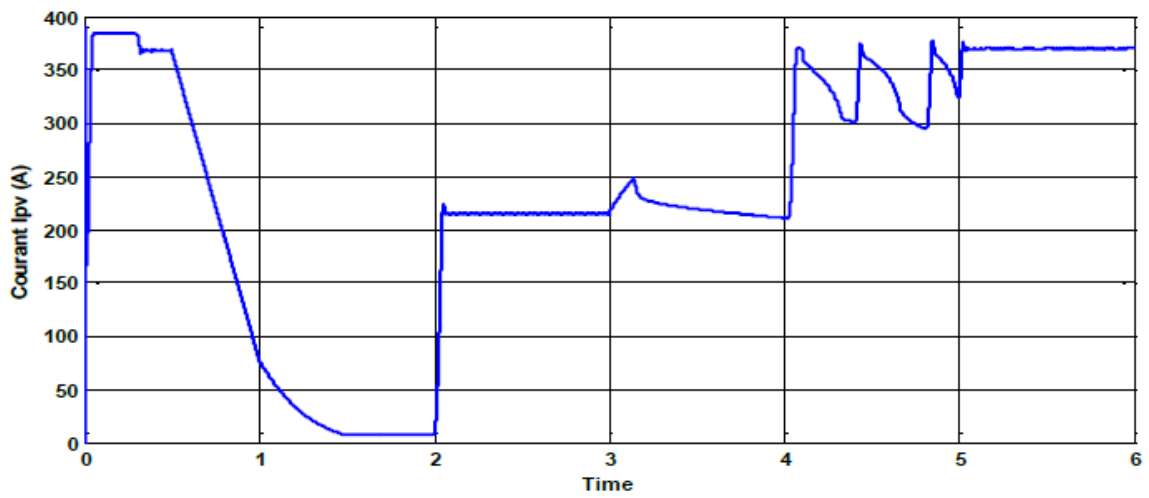


Figure 61:Allure du courant photovoltaïque Ipv.

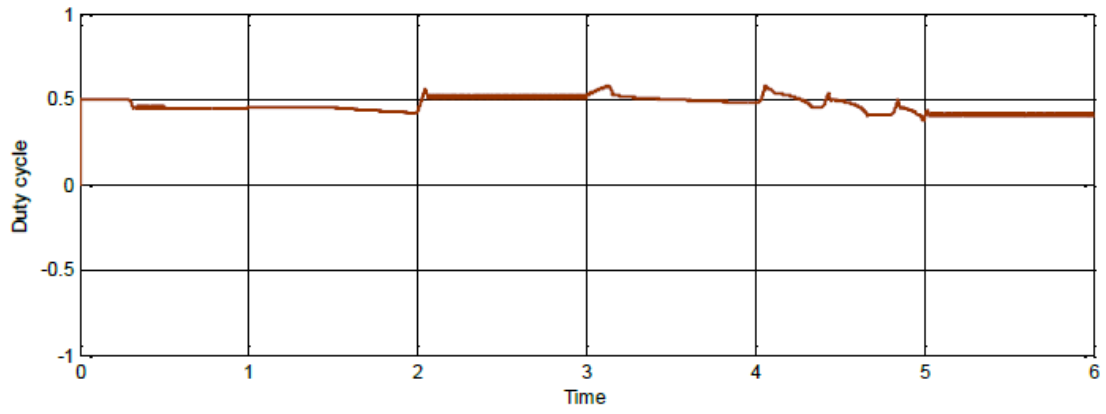


Figure 62:Allure du rapport cyclique la commande MPPT (D)

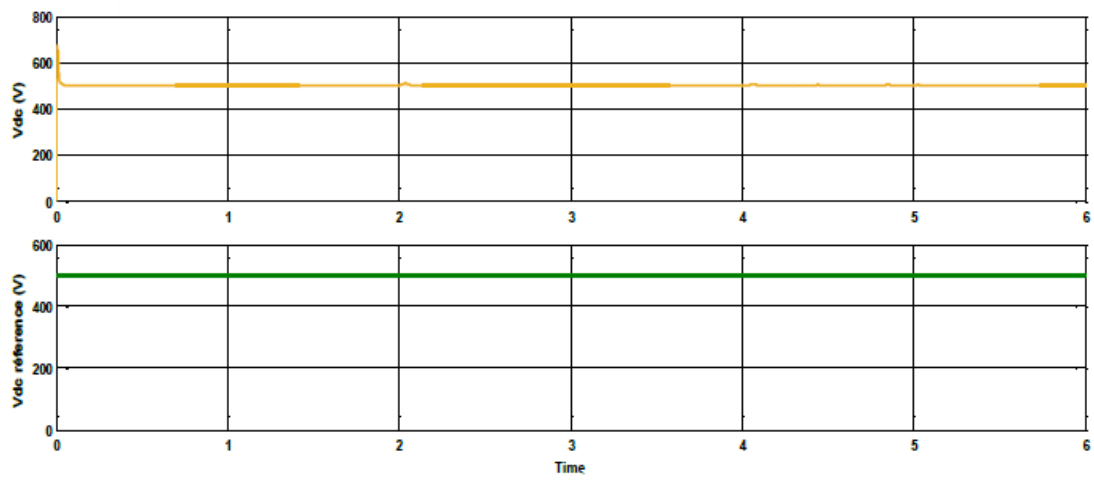


Figure 63:Allure de la tension du bus Vdc

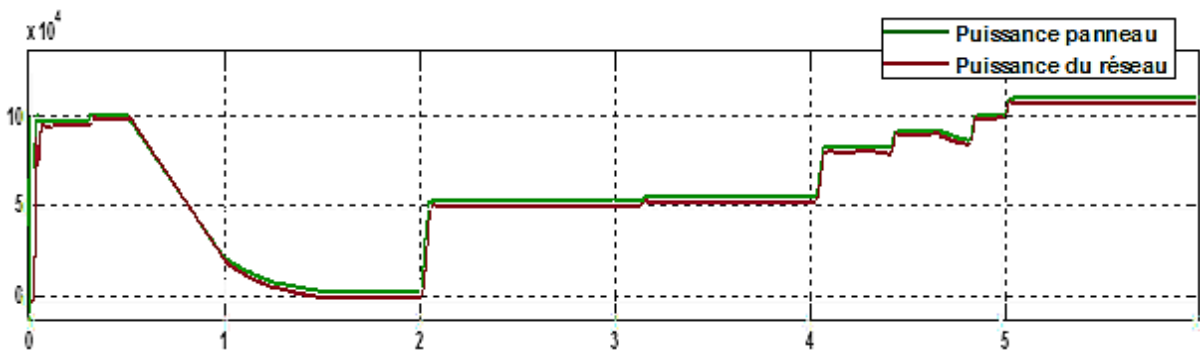


Figure 64:Allure de la puissance active fournie au réseau.

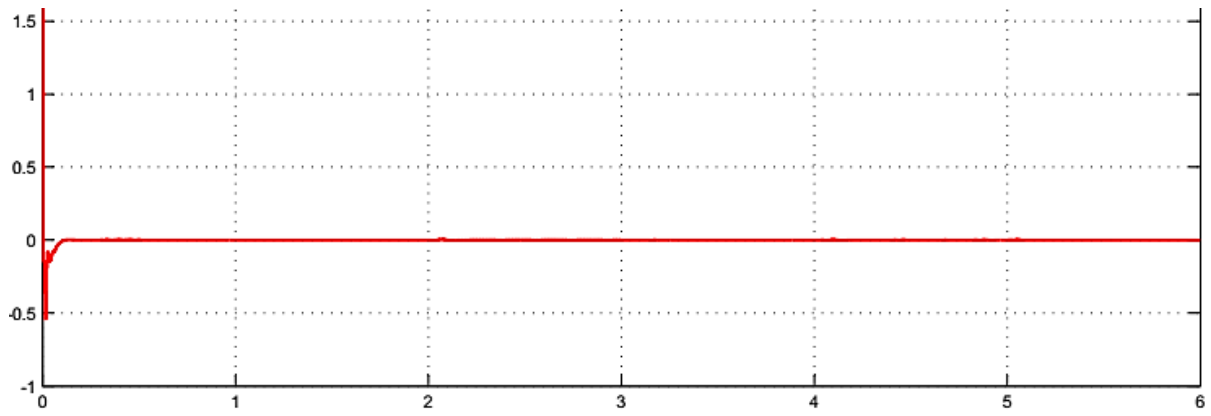


Figure 65: Allure de la puissance réactive du réseau.

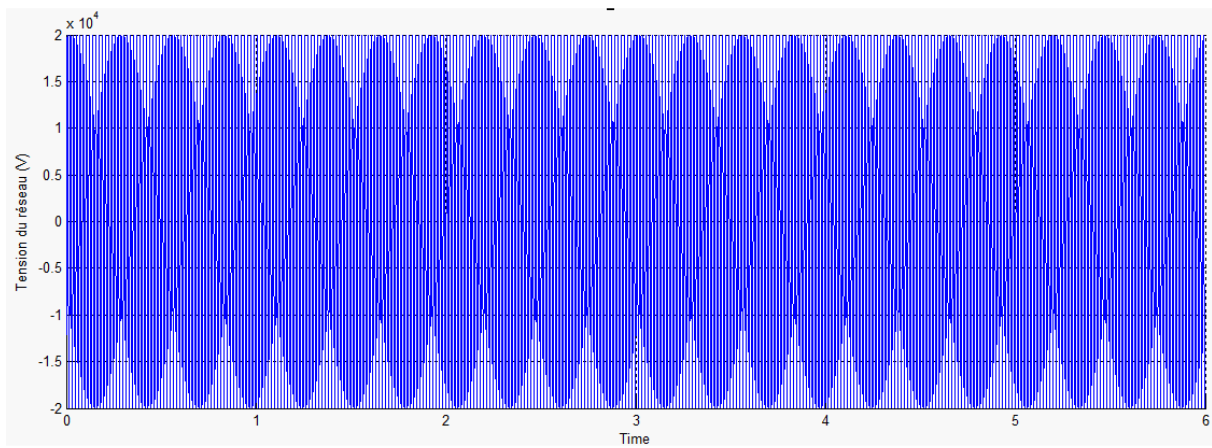


Figure 66: Allure de la tension extraite du réseau

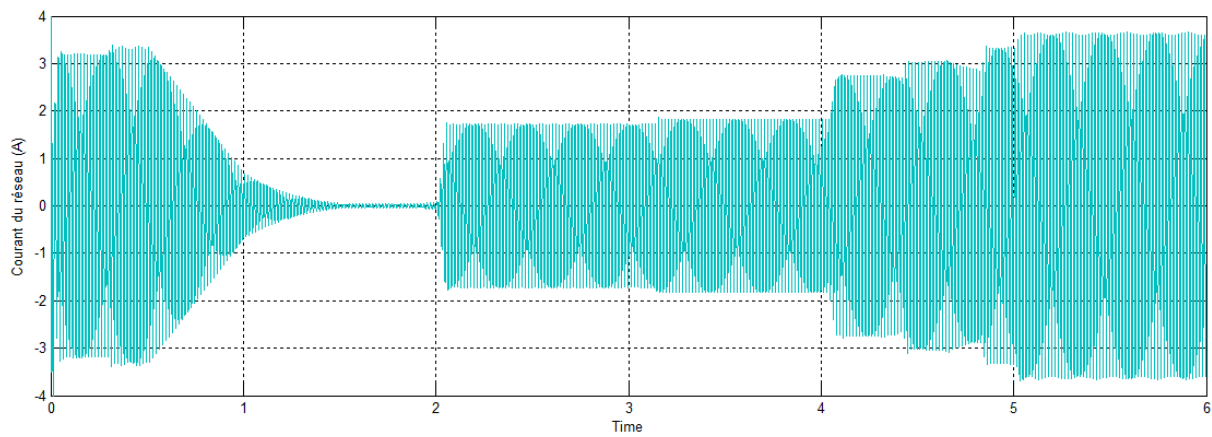


Figure 67: Allure du courant extrait du réseau

## Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les différentes étapes de simulation d'un générateur photovoltaïque (GPV) connecté au réseau, en illustrant les schémas bloc réalisés sous Simulink.

Les résultats de la simulation du système photovoltaïque, avec l'application de la commande MPPT "perturbation et observation", ont été présentés. Ces résultats comprennent les variations de tension, de courant et de puissance générées par le générateur photovoltaïque, ainsi que la tension, le courant et la puissance en sortie du système photovoltaïque. Ces résultats démontrent que le hacheur survolteur et la commande MPPT "perturbation et observation" remplissent correctement leurs fonctions.

Le hacheur survolteur produit une tension en sortie supérieure à celle fournie par le générateur photovoltaïque, tandis que la commande MPPT adapte le générateur photovoltaïque pour transférer la puissance maximale fournie par celui-ci à la charge.

# Conclusion Générale

Des recherches ont été menées pour répondre aux besoins énergétiques en utilisant des sources d'énergie renouvelable. Parmi ces sources, l'énergie solaire photovoltaïque est une option propre, silencieuse, disponible et gratuite, ce qui explique sa croissance significative à l'échelle mondiale. Ce mémoire se concentre sur les systèmes photovoltaïques connectés au réseau électrique, qui connaissent des développements importants en raison de la volonté croissante de diversifier les moyens de production et de respecter davantage l'environnement.

L'objectif de ce travail était de modéliser et de simuler un système photovoltaïque connecté au réseau électrique en utilisant le logiciel MATLAB (Simulink). L'étude a été réalisée en quatre étapes : une introduction générale sur les systèmes photovoltaïques, les convertisseurs statiques, les techniques de conversion photovoltaïque optimisée, et enfin la simulation globale du système.

La première partie du travail aborde les bases de la cellule solaire, le schéma équivalent de la cellule solaire et l'effet photovoltaïque. Ensuite, nous avons examiné les convertisseurs DC-DC et avons opté pour le convertisseur survolteur "BOOST" en raison du faible niveau de tension généré par le panneau solaire. Le convertisseur BOOST permet d'augmenter la tension afin d'optimiser la puissance de l'installation.

La modélisation du MPPT (Maximum Power Point Tracking) a été facilitée par l'utilisation du convertisseur DC-DC. Ensuite, nous avons étudié la commande MPPT numérique "perturbation et observation", qui utilise directement la tension et le courant du panneau solaire pour rechercher le point de fonctionnement correspondant à la puissance maximale. Pour garantir une efficacité maximale, l'ensemble du panneau solaire doit fonctionner à ce point spécifique.

Enfin, nous avons utilisé un onduleur triphasé (convertisseur DC-AC) pour convertir le courant continu en courant alternatif, qui est ensuite injecté dans le réseau domestique et l'excédent est transféré au réseau principal. Nous avons réalisé une démonstration complète de ce processus en utilisant Matlab/Simulink, en intégrant toutes ces parties pour simuler un panneau solaire connecté au réseau.

Les résultats de la simulation ont confirmé que les convertisseurs et la commande MPPT "perturbation et observation" remplissent correctement leur

fonction. À partir de ce travail, nos perspectives sont de pouvoir connecter une installation photovoltaïque au réseau électrique à haute tension afin de répondre aux besoins en électricité, tout en optimisant l'installation pour obtenir un rendement et une puissance optimale.

## **Résume :**

La consommation mondiale d'énergie continue d'augmenter malgré la diminution des ressources énergétiques fossiles. Les énergies renouvelables, notamment l'énergie éolienne et solaire photovoltaïque, connaissent un développement important grâce à l'ouverture des marchés de l'électricité et aux incitations gouvernementales. Dans ce contexte, notre objectif est de connecter un générateur d'énergie solaire renouvelable au réseau électrique basse tension, en veillant à réunir toutes les conditions idéales de connexion. Nous souhaitons également tenir compte de l'incertitude de l'onduleur pour garantir une alimentation électrique stable sans dépendre du réseau. Avant d'optimiser le convertisseur utilisé dans la plupart des systèmes photovoltaïques (PV), nous réalisons une étude approfondie des différentes méthodes de suivi de la puissance maximale (MPPT). L'ensemble est connecté au réseau électrique basse tension à l'aide d'un onduleur triphasé commandé par modulation de largeur d'impulsion (MLI).

# Références

- [1] - Falk Antony, Christian Durschner, Karl-Heinz Remmers : « Le photovoltaïque pour tous, conception et réalisation d'installations », deuxième édition, Berlin 2010.
- [2] - Liman Amine et Soukane Samir « Etude et modélisation d'un système photovoltaïque autonome », mémoire d'Ingénieur, UMMTO, 2012.
- [3] - <https://lenergie-solaire.net/qu-est-ce-que-energie-solaire/histoire>.
- [4] <http://tpe-energie-solaire.e-monsite.com/pages/science-et-technique/l-energie-%20%20%20%20%20%20%20%20%20%20%20photovoltaique/avantages-et-inconvenients-du-photovoltaique.html>
- [5] - <https://www.greenoor.ma/generalite-sur-lenergie-solaire-photovoltaique>
- [6] – S. Sumathi, L. Ashok Kumar et P.Surekha, Solar PV and Wind Energy Conversion Systems An Introduction to Theory, Modeling with MATLAB/SIMULINK, and the Role of Soft Computing Techniques, livre, SPRINGER International Publishing, Switzerland 2015
- [7] - Anne Labouret, Michel Viloz : « Energie solaire photovoltaïque », Dunod 3ème édition 2006.
- [8] - <https://total.direct-energie.com/>
- [9] - S. ABOUDA, « Contribution à la commande des systèmes photovoltaïques: application aux systèmes de pompage » Thèse de doctorat, co-tutelle de l'Université de Reims Champagne-Ardenne et de l'Université de Sfax, Avril 2015.
  
- [10] - Boualem BOUKEZATA, *Etude et commande d'une chaine de conversion d'énergie d'un système solaire photovoltaïque*, thèse de doctorat en électrotechnique, UNIVERSITE FERHAT ABBAS - SETIF 1 UFAS (ALGERIE), 2018
- [11] - Dr. BOUBOU-BOUZIANI Naima, *Potentiel et développement des énergies renouvelables en Algérie*, article, ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUES -ORAN (AL-GERIE), 2014.
- [12] - Home Energy, «Etude comparative de panneaux solaires photovoltaïques», Rapport de stage de fin de D.U.T. Mesures Physiques, Université Paris VII 2, place Jussieu 75005 PARIS, Mai 2006/Juillet 2006 .
- [13] - Minwon Park, In-Keun Yu, Member IEEE, "A Study on the Optimal Voltage for MPPT obtained by Surface Temperature of Solar Cell ", Changwon National University, 2000

- [14] - Petrone et al., 2007] Petrone, G., Spagnuolo, G., et Vitelli, M. (2007). Analytical Model of Mismatched Photovoltaic Fields by Means of Lambert W-Function. Solar Energy Materials and Solar Cells, 91(18) :1652-1657.
- [15] - M. Azab, "A New maximum power point tracking for photovoltaic systems", In WASET.ORG, vol.34, pp.571-547, 2008.
- [16] - Sofiane Abada, "Etude et optimisation d'une générateur photovoltaïque pour la recharge d'une batterie avec un convertisseur sepic", Pour l'obtention du grade de maitre (M,Sc), Université Laval, Quebec, 2011.
- [17] - Philippe Barrade, "Electronique de puissance méthodologie et convertisseursélémentaire ",press polytechnique et universitaire,1ère édition 2006.
- [18] - Touzani Youssef, "Commande aléatoire du convertisseur Buck-Boost triphasé àprélèvement sinusoïdal", Thèse de Doctorat, Université de ClermontFerrand, 2006.
- [19] - N. Achaibou, A. Malek , N. Bacha, "Modèle de vieillissement des batteries plomb acide dans l'installation PV", Revue des Energies Renouvelables, N.spécial (CHEMSS), pp61-66,2000.
- [20]- Salim Abouda, "Contribution à la commande des systèmes photovoltaïques application aux systèmes de pompage", Thèse de Doctorat, Université de Reims champagne Ardenne et de l'université de Sfax.
- [21] - Aoun Nouar, " Etude et modélisation des différents modèles de la cellules photovoltaïque établis sur base de valeurs nominales", Thèse de Magister en physique, Université Mentouri Constantine, 2010.
- [22] - M. A. Alali, " Contribution à l'étude des compensateurs actifs des réseaux électriques basse tension", Thèse de Doctorat, Ecole Doctorale Sciences pour l'Ingénieur, Université Louis Pasteur, Strasbourg, France, Septembre, 20002.
- [23] - Yann Pankow, "Etude de l'intégration de la production décentralisée dans un réseau Basse Tension. Application au générateur photovoltaïque", Doctort de l'école Nationale Supérieure d'arts et Métiers, Laboratoire d'électrotechnique et électronique de puissance de lille, 2004.
- [24] - Serir. Chafiaa,"Optimisation des systèmes de pompage photovoltaïque", Mémoire de Magister, Université de Bejaia, 2012.
- [25] - Jean-Claude Sabonnadière, Nourdine Hadjsaid, " Lignes et réseaux électriques ", Vol.1.
- [26] - M. Boudour,A. Hellal, " Génie Electrique : Réseaux électriques fondamentaux et concepts de Base Cours, Exercice et TP",vol.1, Département de Génie Electrique Université de l'USTHB ALGER,2010 .
- [27] support de cours , Réseaux Electriques, Département de Technologie , Centre Universitaire Nour El Bachir El Bayadh,2017
- [28] Assia Zerddoudi , " Étude de l'intégration de la production décentralisée dans un réseau basse tension: Application au générateur photovoltaïque" , thèse de doctorat , Université des Frères Mentouri de Constantine1,2019.

- [29] M. Adouane, «*Etude et conception d'une stratégie de commande d'un onduleur connecté au réseau électrique*», Mémoire de magistère, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, Algérie, 2008.
- [30] Abbassen Lyes, «*Etude de la connexion au réseau électrique d'une centrale photovoltaïque* », Mémoire de Magister En Electrotechnique, Option machines électriques Université Mouloud Mammeri de Tizi-ouzou, 2011.