



Université Mohamed Khider de Biskra  
Faculté des Sciences et de la Technologie  
Département de Génie Electrique

# MÉMOIRE DE MASTER

Sciences et Technologies  
**Electrotechnique**  
**Réseaux Electriques**

Réf. : .....

---

Présenté et soutenu par :  
**MOUSSAOUI Mofida**                      **NAMMOUCHI Malak**

Le : mercredi 1er juin 2022

## *L'intégration d'une Source Photovoltaïque dans le Réseau Electrique*

---

### Jury :

Mr. <b>BETKA Achour</b>	Pr	Université de Biskra	Président
Mr. <b>GHAMRI Ahmed</b>	Pr	Université de Biskra	Examineur
Mlle. <b>GUERGAZI Aicha</b>	MCA	Université de Biskra	Rapporteur

Année universitaire : **2021-2022**



Université Mohamed Khider de Biskra  
Faculté des Sciences et de la Technologie  
Département de Génie Electrique

# MÉMOIRE DE MASTER

Sciences et Technologies

Electrotechnique

Réseaux Electriques

Mémoire de Fin d'Etudes  
En vue de l'obtention du diplôme Master :

## *Thème*

***l'Intégration d'une Source Photovoltaïque dans le Réseau  
Electrique***

Présenté par : MOUSSAOUI Moufida

NAMMOUCHI Malak

Avis favorable de l'encadreur :  
M<sup>elle</sup> GUERGAZI Aicha

Avis favorable du Président du Jury : Pr BETKA Achour  
signature

## ***Thème : l'Intégration d'une Source Photovoltaïque dans le Réseau Electrique***

### **Résumé**

La production d'énergie électrique par l'énergie solaire photovoltaïque connaît une forte croissance et une évolution remarquable dans ces dernières années, car cette source d'énergie présente de nombreux avantages par rapport aux sources d'énergie conventionnelles. Parmi ces avantages, il s'agit d'une source propre, non polluante. Toutefois, le raccordement du système photovoltaïque avec le réseau électrique peut provoquer de nombreux impacts néfastes sur le fonctionnement de réseau.

Dans ce contexte, le mémoire met en œuvre par simulation l'utilisation de l'énergie solaire extraite des panneaux photovoltaïques raccordé au réseau électrique via des convertisseurs. Il est consacré à une étude générale sur les réseaux électrique, ensuite sur les panneaux photovoltaïques, leurs fonctionnements, leurs caractéristiques et leur Modélisation, en prenant en compte la synthèse du convertisseur élévateur et sa commande MPPT (P&O).

L'efficacité des convertisseurs de puissance et la facilité de leur contrôle à travers la commande nous permettrons de faire le lien entre l'énergie créée et le réseau électrique. Le montage global est alors réalisé en utilisant le logiciel **Matlab /Simulink**. Les résultats obtenus lors de la simulation ont démontrés que les convertisseurs et la commande « Perturbation et Observation » effectuent correctement leurs rôles.

**Mots clés :** photovoltaïques, générateur photovoltaïque, hacheur boost, MPPT, onduleur ..., connecté au réseau

### **Summary**

The production of electrical energy by photovoltaic solar energy has experienced strong growth and a remarkable evolution in recent years, because this energy source has many advantages over conventional energy sources. Among these advantages, it is a clean, non-polluting source. However, the connection of the photovoltaic system with the electrical network can cause many harmful impacts on the operation of the network.

In this context, the thesis implements by simulation the use of solar energy extracted from photovoltaic panels connected to the electricity grid via converters. It is devoted to a general study on electrical networks, then on photovoltaic panels, their operation, their characteristics and their modeling, taking into account the synthesis of the boost converter and its MPPT (P&O) control.

The efficiency of the power converters and the ease of their control through the command will allow us to make the link between the energy created and the electrical network. The overall assembly is then carried out using the Matlab / Simulink software. The result obtained during the simulation demonstrated that the converters and the "Disturbance and Observation" command perform their roles correctly.

**Keywords :** photovoltaic, photovoltaic generator, chopper, boost, MPPT, inverter, etc., connected to the network

## *Remerciement*

*Nous remercions Dieu Le Tout Puissant de nous avoir donné la force et la volonté pour mettre au point et d'achever cette recherche.*

*nous voudrions à remercier tous ceux qui m'ont aidée et soutenue de près ou de loin à l'élaboration de ce travail.*

*nous voudrions à remercier en particulier mon*

*encadreur Aicha GUERGAZI pour ses précieux conseils et orientations qu'elle m'a prodigués tout au long de la réalisation de ce mémoire.*

*Ma gratitude s'adresse aussi au corps enseignant du*

*département de Génie Electrique de l'université de Biskra.*

*Nous remercions notre famille qui a été le premier à me soutenir, et qui m'a encouragée tout au long de mes études.*

## *Dédicace*

*Avec l'expression de ma reconnaissance, je dédie ce modeste travail à ceux qui, quels que soient les termes embrassés, je n'arriverais jamais à leur exprimer mon amour sincère.*

- *A l'homme, mon précieux offre du dieu, qui doit ma vie, ma réussite et tout mon respect : mon chère père **Mohammed Moussaoui***
- *A la femme qui a souffert sans me laisser souffrir, qui n'a jamais dit non à mes exigences et qui n'a épargné aucun effort pour me rendre heureuse : ma mère **Nacira Bahri***
- *A ma chère sœur **Abla** , et mon frère **Mahdi** qui n'ont pas cessée de me conseiller, encourager et soutenir tout au long de mes études. Que Dieu les protège et leurs offre la chance et le bonheur.*
- *A tous les cousins, les voisins et les amis que j'ai connu jusqu'à maintenant. Merci pour leurs amours et leurs encouragements.*

*MOUSSAOUI Moufida*

## *Dédicace*

*Avec l'expression de ma reconnaissance, je dédie ce modeste travail à ceux qui, quels que soient les termes embrassés, je n'arriverais jamais à leur exprimer mon amour sincère.*

*A l'homme, mon précieux offre du dieu, qui doit ma vie, ma réussite et tout mon respect : mon cher père **Abd El Majide***

- A la femme qui a souffert sans me laisser souffrir, qui n'a jamais dit non à mes exigences et qui n'a épargné aucun effort pour me rendre heureuse : mon adorable mère **Sabrina Ghourabe***
- A mes frères '**Wassim , Alla et Abd Rahime**' et mon fiancé **Raouf**, qui n'ont pas cessée de me conseiller, encourager et soutenir tout au long de mes études. Que Dieu les protège et leurs offre la chance et le bonheur.*
- A mon adorable petite sœur **Farah**, qui sait toujours comment procurer la joie et le bonheur pour toute la famille.*

*A tous les cousins, les voisins et les amis que j'ai connu jusqu'à maintenant. Merci pour leurs amours et leurs encouragements*

***NAMMOUCHI Malak***

# Table des matières

## INTRODUCTION GENERAL

### Chapitre I : les Architectures et évolution des réseaux électriques

---

I.1 INTRODUCTION.....	4
I.2. DEFINITION DE RESEAU ELECTRIQUE .....	4
I.2.1. Architecture des réseaux électriques.....	5
I.2.2. Les différents types des réseaux électriques.....	5
I.2.3. Description des réseaux électriques.....	6
I.2.3.1. Le réseau de transport THT.....	6
I.2.3.2. Le réseau de répartition HT .....	6
I.2.3.3. Le réseau de distribution MT.....	6
I.3. L'EVOLUTION DU RESEAU ELECTRIQUE .....	7
I.4. DIFFERENTS TYPES DE RESEAUX ELECTRIQUES EN ALGERIE.....	9
I.4.1. Réseaux de transport et d'interconnexion.....	9
I.4.2. Réseaux de répartition.....	10
I.4.3. Réseaux de distribution.....	10
I.4.3.1. Réseaux de distribution à moyenne tension.....	10
I.4.3.2. Réseaux de distribution à basse tension.....	11
I.5. LA DISTRIBUTION PUBLIQUE MT.....	12
I.5.1. Les poste sur les réseaux MT.....	12
I.5.1.1. Le poste HT/MT en distribution publique.....	12
I.5.1.2. Le poste MT/MT en distribution publique.....	12
I.5.1.3. Le poste MT/BT en distribution publique.....	12
I.5.1.4. Le poste de livraison à un abonné HT ou MT.....	13
I.6. LA PROBLEMATIQUE DES RESEAUX ELECTRIQUES .....	14
I.7. TOPOLOGIES DES RESEAUX ELECTRIQUES.....	15
I.7.1. Réseau maillé.....	15
I.7.2. Réseau bouclé.....	15
I.7.3. Réseau radial.....	16
I.7.4. Réseau arborescent.....	16
I.8. DIFFERENTS TYPES DE GED D'ORIGINE RENOUVELABLE.....	16

## Table des matières

I.8.1. Hydraulique.....	16
I.8.2. Eolien.....	17
I.8.3. Géothermie.....	18
I.8.4. Solaire.....	18
I.8.5. Energies fossiles (gaz, charbon, pétrole).....	19
I.8.6. Hydrogène (piles à combustible).....	19
I.8.6.1. Type 1.....	19
I.8.6.1. Type 2.....	19
I.8.6.1. Type 3.....	19
I.8.6.1. Type 4.....	20
I.9. CONCLUSION.....	20

### **Chapitre II: Généralités sur les énergies renouvelables et sur les photovoltaïques**

---

II.1. INTRODUCTION.....	21
II.2. L'ENERGIE SOLAIRE PHOTOVOLTAÏQUE.....	21
II.2.1. Le soleil.....	21
II.2.2. Avantages et inconvénients de l'énergie solaire photovoltaïque .....	22
II.2.2.1. Avantage.....	22
II.2.2.2. Inconvénients.....	22
II.3. PRODUCTION MONDIALE DES MODULES PHOTOVOLTAÏQUE.....	23
II.4. LES ENERGIES RENOUVELABLES EN ALGER.....	24
II.5. LES MODES D'EXPLOITATION D'UN PANNEAU PHOTOVOLTAÏQUE.....	25
II.5.1. Le mode autonome.....	25
II.5.2. Le mode connecté au réseau.....	26
II.5.3. Mode hybride .....	26
II.6. EFFET PHOTOVOLTAÏQUE .....	27
II.7. GENERATEUR PHOTOVOLTAÏQUE.....	27
II.7.1. CELLULES PHOTOVOLTAÏQUES.....	27
II.7.2. Principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque.....	28
II.8. MODELISATION ELECTRIQUE D'UNE CELLULE PHOTOVOLTAÏQUE.....	29
II.8.1. Paramètres d'une cellule photovoltaïque.....	29
II.8.2. Générateur photovoltaïque et ses performances.....	31
II.8.2. 1. Mise en série.....	32



## Table des matières

II.8.2.2. Mise en parallele.....	33
II.8.2.3. Association en Série/Parallèle .....	33
II.8.3. Caractéristique Courant-Tension.....	34
II.8.3.1. Influence de l'association série ou parallèle des cellules PV .....	35
II.9.SYSTEME PHOTOVOLTAÏQUE CONNECTE AU RESEAU ELECTRIQUE.....	35
II.9.1. Les systèmes PV connectés au réseau sans stockage .....	35
II.9.2. Les systèmes PV connectés au réseau avec batterie de stockage.....	36
II.10. TYPES DE STRUCTURE D'UN SYSTEME PV.....	36
II.10.1. Systèmes raccordés directement au réseau.....	37
II.10.2. Systèmes avec hacheurs.....	37
II.11. ELEMENTS CONSTITUTIFS D'UNE INSTALLATION PV CONNECTE AU RESEAU.....	38
II.12. PROBLEME DE CONNEXION DES SYSTEMES PV AU RESEAU.....	38
II.13. MAINTENANCE D'UN SYSTEME CONNECTE AU RESEAU.....	38
II.14. PROTECTION D'UN MODULE PHOTOVOLTAÏQUE.....	39
II.15. CONCLUSION.....	40

## Table des matières

---

III.1. INTRODUCTION.....	41
III.2. MODELISATION DU PANNEAU SOLAIRE:.....	41
III.2.1. Circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque PV :.....	41
III.3. CONVERTISSEUR SURVOLTEUR (BOOST) DC/DC :.....	44
III.3.1. Principe de fonctionnement.....	45
III.3.2. La command MPPT .....	46
III.3.3.Méthodes de recherche du point optimal de fonctionnement .....	46
III.3.4.Algorithmes de commande MPPT.....	47
III.3.5. Principe de la commande "Perturbation et Observation" (P&O).....	48
III.4. CONVERTISSEUR DC/AC.....	49
III.4.1. Stratégie de Commande de l'onduleur coté réseau .....	50
III.4.2. Objectif de la commande de l'onduleur .....	50
III.5. LA CHARGE :.....	51
III.6. LE RESEAU ELECTRIQUE .....	51

## Table des matières

III.7. SIMULATION D'UN SYSTEME PHOTOVOLTAÏQUE RACCORDE AU RESEAU	51
.....	51
III.7.1. L'outil Matlab/Simulink [BEMANA].....	52
III.8. SYSTEME PHOTOVOLTAÏQUE CONNECTE AU RESEAU PROPOSE .....	52
III.8.1. Description du modèle PV proposé .....	53
III.8.1.1. Simulation du générateur PV à éclairement et température variable.....	55
III.8.2.Simulation de Hacheur Boost et la commande Mppt.....	57
III.8.3. Résultats de la simulation de l'installation sous différentes conditions métrologique	
.....	59
III.8.3.1. Simulation de l'installation à éclairement variable et température fixe .....	59
III.8.3.2. Simulation à température variable et éclairement constant .....	61
III.8.3.3. Simulation dans les conditions variables d'ensoleillement et de température.....	63
III.9. CONCLUSION.....	68
CONCLUSION GENERALE .....	70
BIBLIOGRAPHIE	

## Table des figures

LISTE DE FIGURE	N°
<b>Chapitre I : les Architectures et évolution des réseaux électrique</b>	
Figure I.1 Architecture de réseau électrique avec diverses sources de production	5
Figure I.2. Schéma d'un réseau électrique	6
Figure I.3 : Schéma général de la production, du transport et de la distribution d'énergie	7
Figure I .4 : Architecture verticale du réseau.	8
Figure I.5 : Architecture horizontale du réseau	9
Figure I.6 : Architecture générale de réseau d'énergies électrique en Algérie	11
Figure.7 : Différents types de schéma de postes utilisés sur les réseaux de distribution publique	14
Figure I.8 : Différentes topologies des réseaux électriques : (a) Réseau maillé, (b). Réseau bouclé, (c). Réseau radial, (d). Réseau arborescent	15
Figure I.9 : Centrale hydraulique	17
Figure I.10: Fonctionnement d'une éolienne.	17
Figure I.11: Centrale biomasse	18
Figure I.12: L'énergie solaire	18
<b>chapitre II : Schéma de principe d'un générateur photovoltaïque</b>	
Figure II.1 : Schéma de principe d'un générateur photovoltaïque	21
Figure II.2 : Partition de la production des modules photovoltaïque dans le monde en 2013	24
Figure II.3 : Le mode connecté aux réseaux	26
Figure II.4: Le mode connecté aux réseaux	26
Figure II.5: Schéma de Branchement d'un system PV Mode Hybride	27
Figure II.6 : cellule photovoltaïque	28
Figure II.7: Schéma de principe de fonctionnement d'un générateur PV	28
Figure II.8 : Modèle de la cellule photovoltaïque réel	29
Figure II.9: Caractéristique de la cellule photovoltaïque dans le noir et sous éclairnement	32
Figure II.10: Caractéristique courant tension de Ns cellule en série.	33
Figure II.11 : Caractéristique courant tension de (Np) cellule en parallèle	33
Figure II.12: caractéristique résultante obtenue en associant, en série et en parallèle cellules identiques	34
Figure II.13 : Caractéristique $I = f(V)$ d'un module photovoltaïque	35
Figure II.14 : Installation photovoltaïque relié au réseau sans batterie	36
Figure II.15 : Installation photovoltaïque relié au réseau avec batterie	36

## Table des figures

Figure II.16: Générateur photovoltaïque connecté directement au réseau	37
Figure II.17: GPV relié au réseau par l'intermédiaire d'un hacheur et onduleur	38
Figure II.18: Protection d'un GPV par des diodes by-pass et anti-retour	40
<b>CHAPITRE III : Intégration de panneau photovoltaïque au réseau électrique</b>	
Figure III.1: Modèle équivalent d'une cellule PV	42
Figure III .2: Organigramme de calcul de courant et tension sortie du module	44
Figure III .3 électrique équivalent du convertisseur Boost	45
Figure 4. :IIIChaîne de conversion d'énergie solaire comprenant une commande MPPT	46
Figure III .5 :Courbe caractéristique de puissance d'un GPV	47
Figure III.6 : Organigramme de la méthode P&O	48
Figure III.7: Schéma équivalent d'un onduleur avec filtre L	49
Figure III.8: Tension à la sortie d'un onduleur non filtrée et filtrée	49
Figure III.9 : Commande des interrupteurs et contrôle de courant par MLI	51
Figure III.10: système photovoltaïque connecté au réseau électrique	52
Figure III.11: Schéma Globale de système PV connecté au réseau	53
figure III.12 : les caractéristiques électriques des module photovoltaïques	53
Figure III.13: Schéma de simulation du panneau PV	54
Figure III.14: Caractéristique Courant-Tension du panneau PV	
Figures III.15 : Caractéristique Puissance-Tension du panneau PV	55
Figure III.16: Influence de variation de l'éclairement sur les caractéristiques(IV) et (P-V)	56
Figure III.17: Influence de variation de température sur les caractéristiques (I-V) et (P-V)	57
Figure III.19: Block de la simulation du hacheur	58
Figure III.18 : Schéma de simulation de l'algorithme	58
Figure III.20 : Rapport cyclique de convertisseur Boost.	59
Figure III.21: Variation de l'éclairement à une température fixe (25°C).	60
Figure III.22: Allure du courant de panneau photovoltaïque $I_{pv}$	60
Figure III.23: Allure de la tension de panneau photovoltaïque $V_{pv}$	60
Figure III.24: Allure de la puissance de panneau photovoltaïque $p_{pv}$	61
Figure III.25: Variation de la température à un éclairement fixe (1000 W/m <sup>2</sup> ).	61
Figure III.26: Allure du courant photovoltaïque $I_{pv}$	62
Figure III.27: Allure de la tension photovoltaïque $V_{pv}$ .	62
Figure III.28:Allure de la puissance photovoltaïque $P_{pv}$ à éclairer	63
Figure III.29: Variation de la température et l'éclairement.	64

## Table des figures

Figure III.30: Allure du courant photovoltaïque $I_{pv}$	64
Figure III.31: Allure de la tension du panneau $V_{pv}$	64
Figure III.32: Allure de la puissance du panneau $P_{pv}$	65
Figure III.33: Allure de la tension du bus $V_{dc}$ .	65
Figure III .34: Allure de la puissance réactive du réseau.	66
<b>Figure III.35</b> : Allure du rapport cyclique la commande MPPT(S)	66
Figure III.36 : Allure de tension extrait de réseaux	67
Figure III.37 : Allure de tension extrait de réseaux	68

## **Liste des tableaux**

**Tableau II.1 : Potentiel solaire en Algérie.**

**Tableau III.1 : Les caractéristiques électriques du module photovoltaïque**

## Liste de symbole

---

$V_{mpp}$  : Tension à puissance maximale [V].

$I_{mpp}$  : Courant à puissance maximale [A].

$T_c$  : est la température effective des cellules en Kelvin(K),

$q$ : est la charge de l'électron ( $q=1,610^{-19}$  C),

$n$  : est le facteur d'idéalité de la jonction ( $1 < n < 3$ ),

$I_{pv}$ :Est le courant fourni par la cellule lorsqu'elle fonctionne en générateur,

$V_{pv}$ :Est la tension aux bornes de cette même cellule

$R_{sh}$  : Est la résistance shunt caractérisant les courants de fuite de la jonction,

$R_s$  : est la résistance série représentant les diverses résistances de contacts et de connexions

$I_{ph}$ :Est un courant généré par la lumière ou le photo courant.

$I_p$ : Courant qui circule dans la résistance parallèle, est donnée par l'équation suivante

$I_s$  : est le courant de saturation inverse en ampère (A)

$q$ : charge d'électrons ( $1,6 \times 10^{-19}$  C)

$k$ : constante de Boltzmann ( $1,38 \times 10^{-23}$  J / K)

$I_{sc}$ : est le courant de court-circuit de la cellule à  $25^\circ$  C et  $1000W / m^2$ ,

$K_i$ : le coefficient de température du courant de court-circuit de la cellule,

$T_{ref}$ : est la température de référence de la cellule, en Kelvin (K) ( $= 25C^\circ + 273$ ),

$G$ : est l'ensoleillement en watt /mètre carré ( $W / m^2$ ),

$G_{ref}$ : est l'insolation de référence de la cellule ( $= 1000W / m^2$ ),

$I_{rs}$ : le courant de saturation inverse de la cellule à une température de référence et un rayonnement solaire

$E_g$ : est l'énergie de gap du semi-conducteur utilisé dans la cellule en électronvolt (eV)

$A$ : est le facteur idéal qui dépend de la technologie PV

$I_{sc}$ : est le courant de court-circuit

$V_{OC}$ : est la tension en circuit ouvert

$I_{ccNp}$ : La somme des courants de court circuit de ( $N_p$ ) cellule en parallèle

$V_{coNp}$ :Tension du circuit ouvert de ( $N_p$ ) cellules en parallèle

## Liste de symbole

---

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

$I_{ccNs}$ : courant de court circuit de  $N_s$  cellules en série

$N_p$  : Nombre de cellule en parallèle

$N_s$ : nombre des cellules en série



## **ACRONYMES**

**THT** : Très haute tension

**HT, HTB** : Haute tension

**MT, MTA** : Moyenne tension

**BT** : Basse tension

**FF** : Facteur de forme

**PV** : Photovoltaïque.

**MPPT** : Maximum Power Point Tracking.

**P&O** : Perturbe & Observe.

**DC** : Courant Continu (Direct Current).

**AC** : Courant Alternatif (Alternative Current).

**MLI, PWM**: Modulation de largeur d'impulsion (Pulse Width Modulation).

**GPV**: générateur photovoltaïque.

# **Introduction générale**

La production d'énergie est un défi de grande importance pour les années à venir. En effet, les besoins énergétiques des sociétés industrialisées ne cessent d'augmenter. Par ailleurs, les pays en voie de développement auront besoins de plus en plus d'énergie pour mener à bien leur développement. Une grande partie de la production mondiale d'énergie est assuré à partir de sources fossiles [1].

La consommation mondiale d'électricité observée durant ces dernières décennies est fortement liée au développement de l'industrie, du transport et des moyens de communications. De nos jours, une grande partie de la production électrique est produite à partir de ressources non renouvelables comme le charbon, le gaz naturel, le pétrole et l'uranium dont la vitesse de régénération est extrêmement lente à l'échelle humaine, ce qui entrainera à plus ou moins courte échéance un risque non nul d'épuisement de ces ressources [2].

D'autant plus que la demande ne cesse de croître se traduisant par exemple par une forte fluctuation du prix mondial du pétrole. Par énergie renouvelable, on entend des énergies issues du soleil, du vent, de la chaleur de la terre, de l'eau ou encore de la biomasse. A la différence des énergies fossiles, les énergies renouvelables sont des énergies à ressource illimitée qui regroupent un certain nombre de filières technologiques selon la source d'énergie valorisée et l'énergie utile obtenue.

L'Algérie, pays du soleil et de l'espace, peut s'inspirer de ces programmes pour une exploitation à grande échelle de l'énergie solaire. Elle a les moyens humains et financiers à la mesure de ces programmes. L'enjeu est grand, et vital. L'Algérie est dans le monde l'un des pays de fort potentiel d'exportation de l'énergie électrique solaire [2]. Une caractéristique importante des panneaux solaires est que la puissance maximale disponible est fournie seulement en un seul point de fonctionnement défini par une tension et un courant connus, appelé point de puissance maximale. En outre, la position de ce point n'est pas fixe mais elle se déplace en fonction de l'irradiation et de la température des cellules solaires ainsi que de la charge utilisée [3]. A cause du coût relativement onéreux de ce genre d'énergie, on doit extraire le maximum de puissance des panneaux solaires. Cela nécessite un mécanisme de poursuite de ce point afin que la puissance maximale soit générée en permanence ce qui est connu sous le nom de commande MPPT « The maximum power point Tracking ». [1]

Dans ce mémoire, notre étude s'intéresse à la filière photovoltaïque et consiste essentiellement à la modélisation et le contrôle d'un système photovoltaïque connecté au réseau électrique.

Cependant, le raccordement des systèmes PV au réseau de distribution peut avoir quelques objectifs sur les réseaux électriques : buts sur la puissance, sur le plan de tension et sur la qualité de l'énergie. [4]

A cet effet nous nous intéressons aux modèles des composants, de la chaîne énergétique, c'est à dire le champ photovoltaïque, le dispositif de conversion et d'adaptation (hacheurs, onduleur, transformateurs) et le réseau public de distribution.

***Ce pendant notre but principal est l'intégration d'un système photovoltaïque raccordé au réseau électrique. (Simulation)***

Ce présent travail est par conséquent réalisé en trois chapitres :

**Le premier chapitre** décrit les réseaux électriques de distribution publique et ses problématiques, la structure des réseaux électriques conventionnels avec une description plus détaillée des réseaux de distribution, on parlera des différents types de productions selon le type de source d'énergie utilisée et la capacité.

**Le second chapitre** présente une étude théorique sur le rayonnement solaire et un bref rappel sur le principe de l'effet photovoltaïque, la cellule photovoltaïque et ses performances ainsi le générateur solaire photovoltaïque et leurs performances. Ainsi la modélisation et simulation des GPV et la stratégie de leur commande permettant le raccordement au réseau.

**Le Troisième chapitre** est consacré à l'étude par modélisation d'un panneau solaire. Pour cela, dans une première étape, nous donnerons une introduction sur les cellules Photovoltaïques (l'effet photovoltaïque), le panneau solaire et une description détaillée de leurs modèles mathématiques. Dans une seconde étape nous abordons les convertisseurs DC/DC également le Boost (Hacheur élévateur de tension) et leur modèle mathématique, et leur commande et contrôle basée sur les algorithmes de maximisation (Méthode de poursuite du point de puissance maximale) MPPT (maximum power point Tracking) dans notre étude, l'algorithme Perturb and Observe "P&O", est L'onduleur triphasé commande MLI.

Finally, we will finish this thesis with a general conclusion that summarizes our study in its theoretical part and simulation results.

# **Chapitre I : Les Architecture et évolution des réseaux électriques**

## **.1INRODUCTION**

Les réseaux électriques sont les infrastructures qui permettent d'acheminer l'énergie électrique des installations de production jusqu'aux consommateurs. En Algérie, les réseaux électriques utilisent le courant alternatif triphasé sinusoïdal à la fréquence de 50 Hz. Il comprend des milliers de composants (Générateurs, transformateurs, lignes, système de protection, etc.).[5]

L'ouverture du marché de l'énergie électrique, les préoccupations environnementales liées au changement climatique planétaire et l'évolution technologique des moyens de production décentralisée, basée sur les énergies renouvelables, amènent des changements importants en particulier sur les réseaux de distribution. Cependant, le réseau de distribution n'a pas été conçu, à l'origine, pour accueillir des unités de production mais pour acheminer, de manière unidirectionnelle, l'électricité qui provient du réseau de répartition jusqu'aux consommateurs moyenne et basse tension.

Il est à prévoir que cette production d'énergie va tendre à s'accroître dans le future, amenant avec elle des problèmes d'intégration dans le réseau de distribution actuel et des impacts sur les différents paramètres du réseau à savoir l'impact sur la stabilité des réseaux, le problème d'ajustement des protections, l'impact sur les niveaux de tension et la difficulté de contrôle de tension.

Pour faire face à ces défis les autorités prennent des mesures pour moderniser les infrastructures du réseau électrique, et en particulier le réseau de distribution, afin d'assurer la gestion, la sécurité et la fiabilité de ce dernier.

Dans ce premier chapitre, on présentera, en premier lieu, la structure des réseaux électriques conventionnels avec une description plus détaillée des réseaux de distribution, on parlera des différents types de productions décentralisées selon le type de source d'énergie utilisée et la capacité de fournir de la puissance active et de la puissance réactive .Cette partie présente quelques principes généraux des réseaux électriques.

## **I .2. DEFINITION DE RESEAU ELECTRIQUE**

Un réseau électrique est un ensemble d'infrastructures permettant d'acheminer l'énergie électrique des centres de production vers les consommateurs en passant par des lignes électriques et des transformateurs. Il est défini par le type de courant électrique qu'il utilise, la valeur de tension et la fréquence. [6]

## I.2.1. Architecture des réseaux électriques

La conception et l'utilisation de chaque architecture du réseau électrique permettent d'atteindre plus ou moins une grande disponibilité de l'énergie électrique. Le coût économique du réseau dépend naturellement de sa complexité. Le choix d'une architecture de réseau est donc un compromis entre des critères techniques et économiques.

En fonction de la densité et de la nature des unités de production, un réseau aura une architecture semblable à celle de la figure I.1

Nous pouvons noter que les unités de production peuvent être raccordées aux différents étages selon la puissance mise en jeu. Les transformateurs jouent un rôle très important pour passer d'un niveau de tension à un autre donc pour passer d'un type de réseau à un autre. [7]

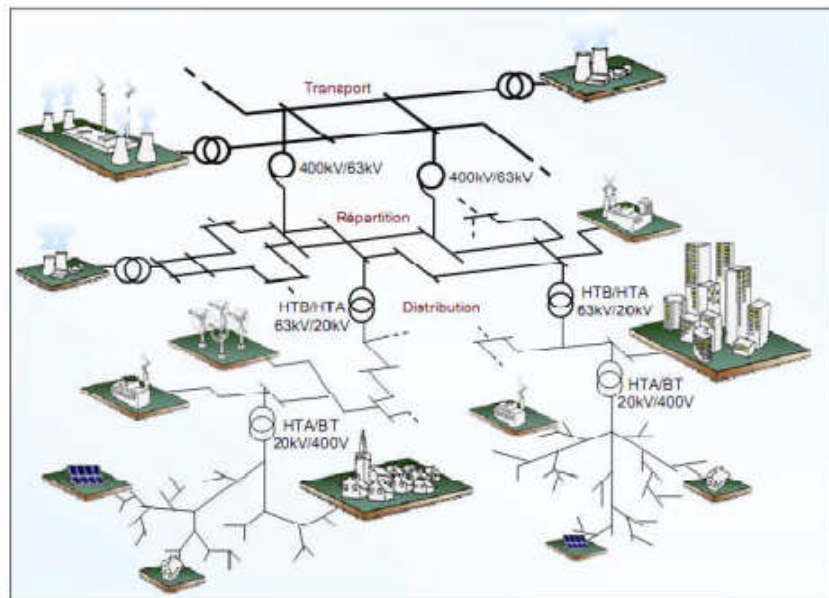


Figure I.1 Architecture de réseau électrique avec diverses sources de production [3]

## I.2.2. Les différents types des réseaux électriques

Le réseau électrique se compose de l'ensemble des câbles électriques connectés entre eux. Il existe différents types de réseaux :

- Le réseau HT (Haute Tension) qui est utilisé pour le transport et la répartition de l'électricité. Il se décompose en deux sous réseaux :
- Le réseau HTB (Haute Tension B) qui sert à l'alimentation générale du niveau national (réseau 400 kV) au niveau régional (réseau 63 kV ou 90 kV) ;
- Le réseau HTA (Haute Tension A) qui est le réseau de distribution local en moyenne tension (rayon de 10 à 20 km autour d'un poste source) ;



- Le réseau BT (basse tension) (tension inférieure à 1000 V) qui sert à la distribution électrique dans les quartiers ou communes (rayon d'environ 500 m autour des postes de distribution).

Les câbles reliant les utilisateurs aux postes d'alimentation sont de types divers. En effet, il existe plusieurs sections de câbles. De plus, les câbles sont soit en aluminium, soit en cuivre et ils sont soit aériens (sur des « poteaux »), soit souterrains. [8]

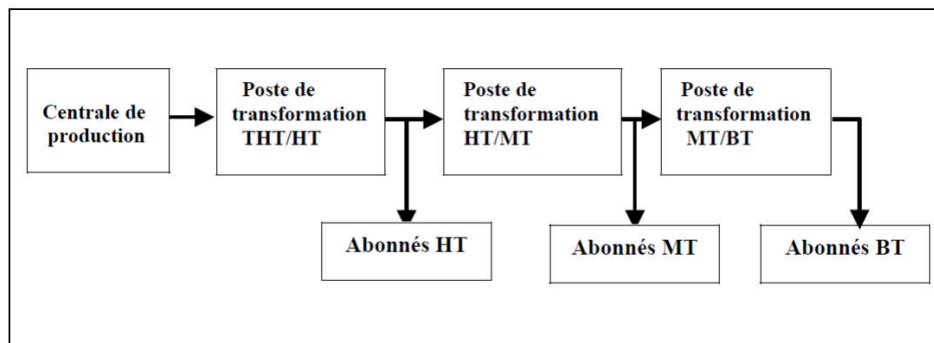


Figure I.2. Schéma d'un réseau électrique [9]

### I.2.3. Description des réseaux électriques

#### I.2.3.1. Le réseau de transport THT

C'est généralement le réseau qui permet le transport de l'énergie depuis les centres éloignés de production vers les centres de consommation. Le réseau THT branche les centrales de grandes puissances (> 300 MW) qui sont la plupart aériens et souterrains dans les villes ou à leur approches.

Ils sont étudiés pour un transit donné correspondant en général à la limite thermique de la ligne.

#### I.2.3.2. Le réseau de répartition HT

La finalité de ce réseau est avant tout d'acheminer l'électricité du réseau de transport vers les grands centres de consommation qui sont :

- Soit du domaine public avec l'accès au réseau de distribution MT,
- Soit du domaine privé avec l'accès aux abonnés à grande consommation (supérieure à 10 MVA) livrés directement en HT .la structure de ces réseaux est généralement de type aérien (parfois souterrain à proximité de sites urbains).

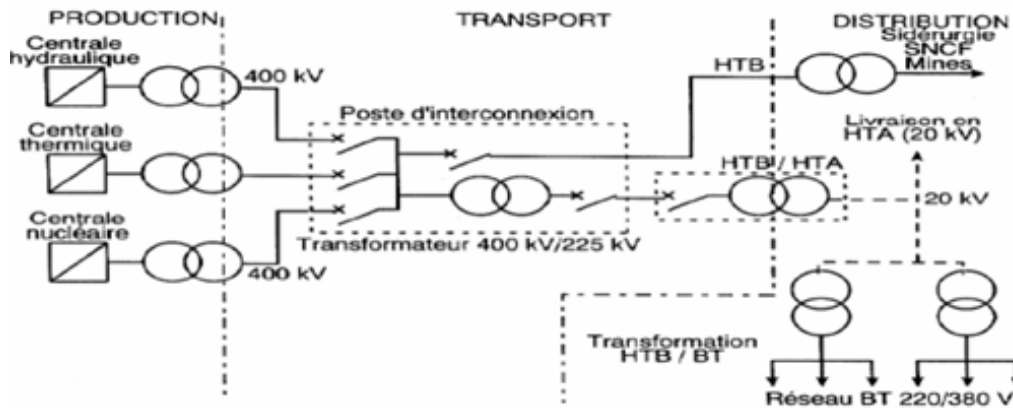
#### I.2.3.3. Le réseau de distribution MT

Les utilisateurs peuvent être groupés d'une façon très dense comme dans les villes ou bien séparés les uns des autres par des distances plus ou moins grandes comme dans les campagnes.

## Chapitre I : Les Architecture et évolution des réseaux électriques

Ils sont desservis par un réseau de distribution alimenté par un poste de répartition qui reçoit l'énergie, provenant de centrales éloignées, par l'intermédiaire du réseau de transport.

Des lignes de distribution à moyenne tension (MT) partent des postes de répartition et alimentent des postes de transformation répartis en différents endroits de la zone à desservir ; ces postes de transformation abaissent la tension à une valeur convenable pour alimenter le réseau de distribution publique auquel les abonnés sont raccordés par des branchements. [9]



**Figure I.3 : Schéma général de la production, du transport et de la Distribution d'énergie [10]**

### I.3. L'EVOLUTION DU RESEAU ELECTRIQUE [11]

Le réseau électrique a évolué de façon désorganisée à partir de petits réseaux formés dans la première moitié du Xxème siècle jusqu'aux grands réseaux continentaux d'aujourd'hui.

Afin de réaliser des économies d'échelle, il a évolué vers une structure «verticalement intégrée », c'est-à-dire que la puissance est produite par des grandes centrales électriques potentiellement très éloignée des centres de consommation. Le réseau a ainsi été conçu pour fonctionner avec des réserves suffisantes afin de fournir l'énergie électrique à la demande d'une manière économique et fiable. La production d'énergie est principalement basée sur des sources primaires contrôlables telles que : les centrales thermiques utilisant les combustibles fossiles, les centrales hydro-électriques, etc. Les machines utilisées dans ces centrales sont de grande taille et développées à grande échelle. Ces sources permettent de contrôler la production d'énergie en fonction des critères de sécurité et d'économie.

Le réseau est exploité de sorte que des évènements sévères ne provoquent pas la perte totale du système ou la propagation des défaillances sur les réseaux voisins. Il doit aussi permettre la reprise rapide de la portion du réseau électrique affecté par des évènements majeurs.

## Chapitre I : Les Architecture et évolution des réseaux électriques

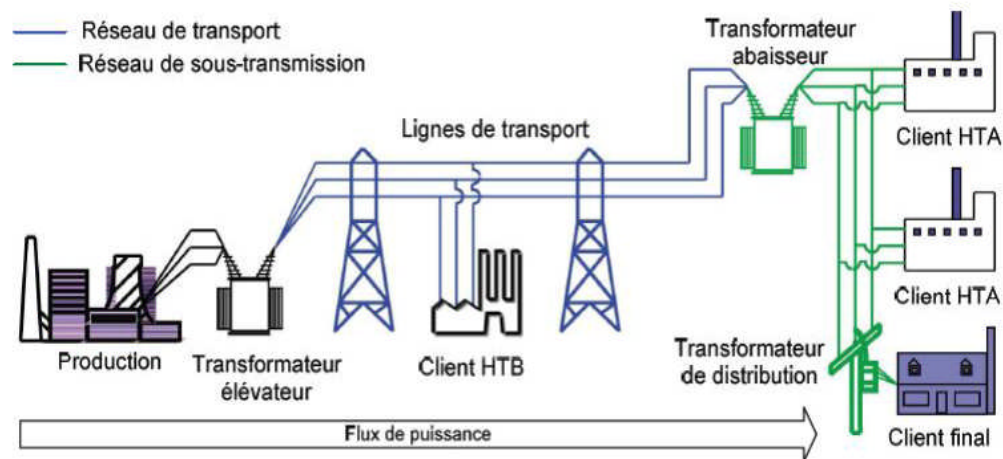
Dans les structures traditionnelles, l'énergie électrique est transportée des centrales électriques vers les consommateurs à travers une structure du réseau hiérarchique, de la très haute tension HTB ( $U_n > 50 \text{ kV}$ ), à la moyenne tension HTA ( $1 \text{ kV} < U_n < 50 \text{ kV}$ ) puis à la basse tension BT ( $U_n < 1 \text{ kV}$ ).

Les réseaux de transport HTB sont maillés pour assurer la fiabilité et la disponibilité de l'énergie, en cas de défauts sur des ouvrages.

Par contre, les réseaux de distribution HTA et BT sont majoritairement passifs avec une configuration exploitée en structure radiale (un seul chemin vers le réseau amont) qui permet l'utilisation de plans de protection simples et robustes.

La topologie du système fait que le flux d'énergie électrique est unidirectionnel (Figure 1.4), de la production vers la consommation. Le réseau doit fonctionner sous la contrainte que la puissance électrique produite doit être, à chaque instant, égale à la puissance consommée. Par conséquent, le fonctionnement du réseau repose sur un contrôle temps réel de la production d'énergie et son adaptation aux fluctuations de la charge, selon les restrictions imposées par le gestionnaire du réseau de transport d'électricité.

Une telle structure « verticalement intégrée » du système d'alimentation apporte des avantages, tels que la réduction du coût d'exploitation, la mutualisation des marges de réserve des générateurs, une meilleure efficacité énergétique des grands générateurs, une réduction du risque de défaillances.



**Figure I.4 : Architecture verticale du réseau.**

Les nouvelles politiques énergétiques et environnementales, qui ont prévalu au cours des dernières années, ont encouragé l'interconnexion de nouvelles sources de production d'énergie électrique non conventionnelles et décentralisées dans le réseau ainsi que une séparation administrative stricte sur les activités d'exploitation, de fourniture et de commercialisation. Cette redistribution des rôles doit permettre de créer des conditions d'accès non discriminatoires et

## Chapitre I : Les Architecture et évolution des réseaux électriques

ainsi d'augmenter le nombre d'acteurs et ainsi la liquidité (et donc la concurrence) sur les marchés de l'énergie.

L'insertion de la production décentralisée conduit à une transition vers une nouvelle structure plus « éclatée » (Figure 1.5). Dans cette structure, les petites et moyennes unités de production sont souvent reliées au réseau de distribution.

La connexion de ces unités sur les réseaux HTA et BT, conduit à un fort bouleversement de l'ancienne structure « verticale » du système électrique. Le flux de puissance n'est plus distribué « verticalement » de la haute tension à la basse tension, mais aussi « horizontalement », avec même la capacité d'inverser ces flux de puissance entre les réseaux HTA ou BT ou même avec les niveaux de tension supérieurs. Les systèmes de distribution deviennent donc des réseaux actifs.

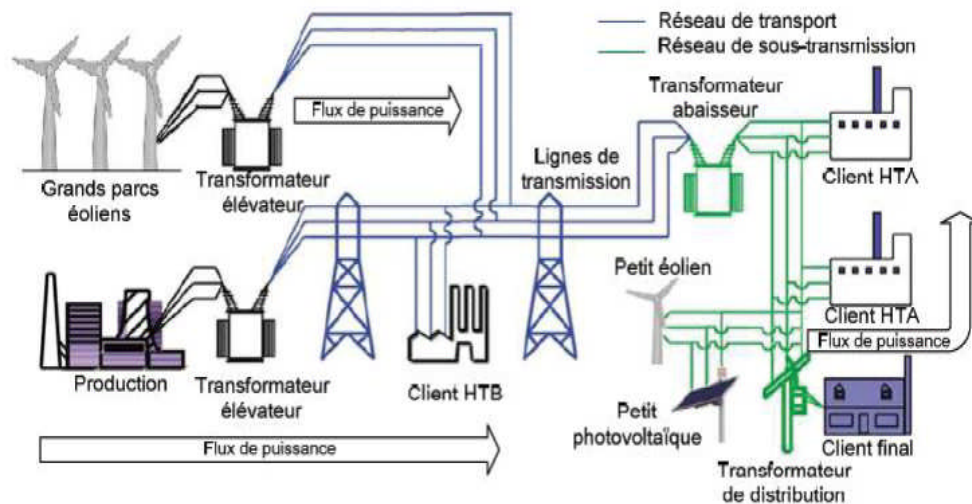


Figure I.5 : Architecture horizontale du réseau.

### I.4. DIFFERENTS TYPES DE RESEAUX ELECTRIQUES EN ALGERIE

#### I.4.1. Réseaux de transport et d'interconnexion

Les réseaux de transport et d'interconnexion ont principalement pour mission :

- ❖ De collecter l'électricité produite par les centrales importantes et de l'acheminer par grand flux vers les zones de consommation (fonction transport),
- ❖ De permettre une exploitation économique et sûre des moyens de production en assurant une compensation des différents aléas (fonction interconnexion),
  - La tension est 150 kV, 220 kV et dernièrement 400 kV,
  - Neutre directement mis à la terre,
  - Réseau maillé.

### I.4.2. Réseaux de répartition

Les réseaux de répartition ou réseaux Haute Tension ont pour rôle de répartir, au niveau régional, l'énergie issue du réseau de transport. Leur tension est supérieure à 60 kV selon les régions.

Ces réseaux sont, en grande part, constitués de lignes aériennes, dont chacune peut transiter plus de 60 MVA sur des distances de quelques dizaines de kilomètres. Leur structure est, soit en boucle fermée, soit le plus souvent en boucle ouverte, mais peut aussi se terminer en antenne au niveau de certains postes de transformation [8].

En zone urbaine dense, ces réseaux doivent être souterrains sur des longueurs n'excédant pas quelques kilomètres.

Ces réseaux alimentent d'une part les réseaux de distribution à travers des postes de transformation HT/MT et, d'autre part, les utilisateurs industriels dont la taille (supérieure à 60 MVA) nécessite un raccordement à cette tension.

- La tension est 90 kV ou 60 kV,
- Neutre à la terre par réactance ou transformateur de point neutre,
- Limitation courant neutre à 1500 A pour le 90 kV,
- Limitation courant neutre à 1000 A pour le 60 kV,
- Réseaux en boucle ouverte ou fermée,

### I.4.3. Réseaux de distribution

Les réseaux de distribution commencent à partir des tensions inférieures à 60 kV et des postes de transformation HTB/HTA avec l'aide des lignes ou des câbles moyenne tension jusqu'aux postes de répartition HTA/HTA. Le poste de transformation HTA/BTA constitue le dernier maillon de la chaîne de distribution et concerne tous les usages du courant électrique.

#### I.4.3.1. Réseaux de distribution à moyenne tension

- HTA (30 et 10 kV le plus répandu),
- Neutre à la terre par une résistance,
- Limitation à 300 A pour les réseaux aériens,
- Limitation à 1000 A pour les réseaux souterrains,
- Réseaux souterrains en boucle ouverte ,

## I.4.3.2. Réseaux de distribution à basse tension

- BTA (230 / 400 V),
- Neutre directement à la terre,
- Réseaux de type radial, maillés et bouclés.

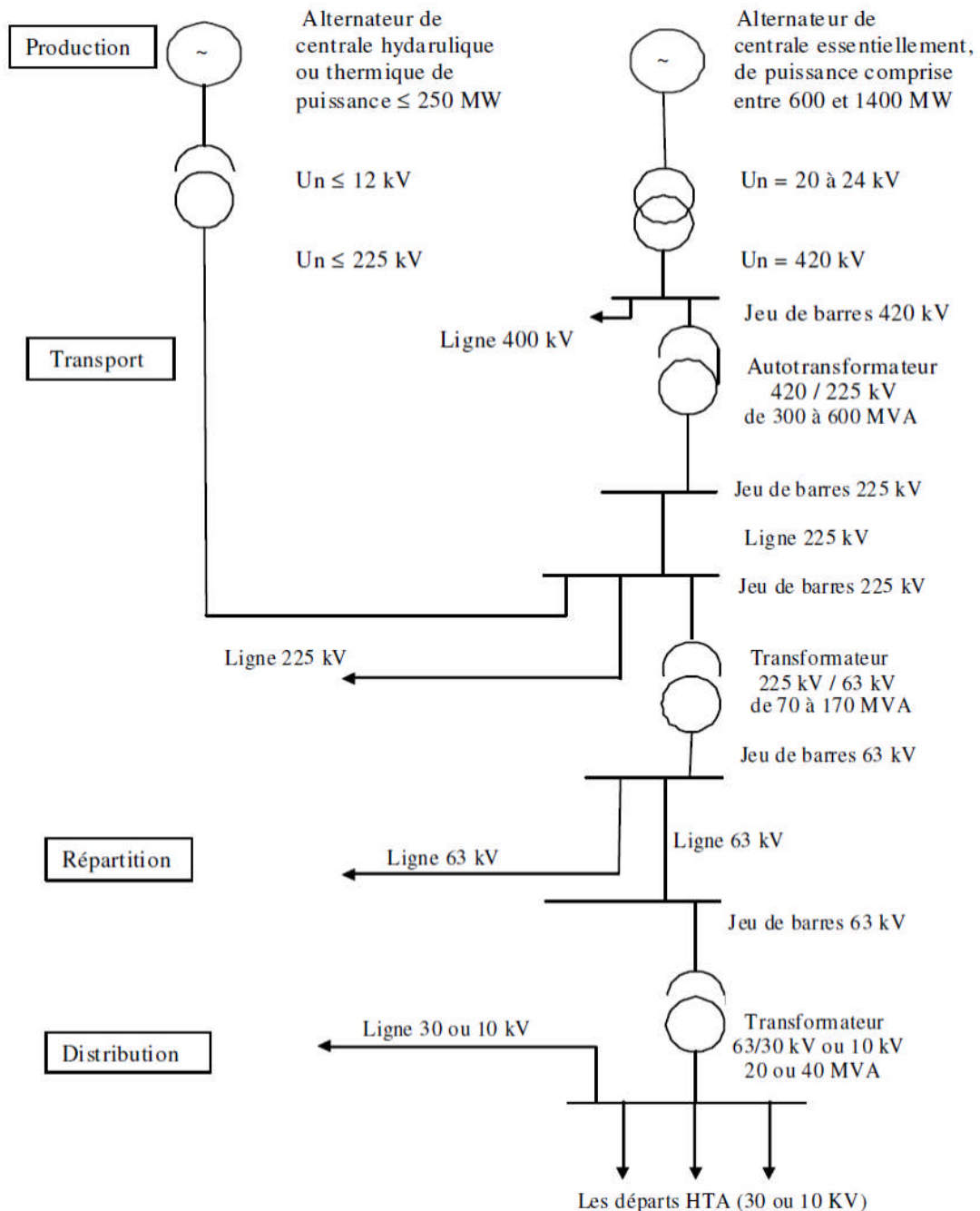


Figure I.6 : Architecture générale de réseau d'énergies électrique en Algérie.

### I.5. LA DISTRIBUTION PUBLIQUE MT

Cette partie est un rappel des principaux postes installés sur les réseaux MT, et des principales technologies utilisées au niveau des matériels MT [10]. Il se termine par deux schémas illustrant plus concrètement leurs applications :

#### I.5.1. Les poste sur les réseaux MT

Un poste ou ouvrage est une entité physique définie par sa localisation et ses fonctionnalités dans les réseaux électriques.

La vocation d'un poste est avant tout d'assurer la transition entre deux niveaux de tension et/ou d'alimenter l'utilisateur final.

##### I.5.1.1. Le poste HT/MT en distribution publique

Cet ouvrage est présent dans toute structure électrique d'un pays, il est situé entre le réseau de répartition et le réseau de distribution MT.

Sa fonction est d'assurer le passage de la HT ( $\approx 220$  kV) à la MT ( $\approx 60$  kV).

Son schéma type (Figure 1.7-a) comporte deux arrivées HT, deux transformateurs HT/MT, et de 10 à 20 départs MT. Ces départs alimentent des lignes en aérien et/ ou des câbles en souterrain.

##### I.5.1.2. Le poste MT/MT en distribution publique

Cet ouvrage peut réaliser deux fonctions :

- Assurer la démultiplication des départs MT en aval des postes HT/MT (Figure 1.7-b).

Dans ce cas, le poste ne comporte aucun transformateur. Il est constitué de deux arrivées MT et de 8 à 12 départs MT. Ce type de poste est présent dans quelques pays, comme l'Espagne, la Belgique, l'Afrique du sud.

- Assurer le passage entre deux niveaux MT. De tels postes MT/MT intègrent des transformateurs. Ils sont nécessaires dans certains pays qui utilisent deux niveaux successifs de tension sur leur réseau MT, c'est le cas par exemple de la Grande- Bretagne où le réseau MT est décomposé en deux niveaux avec le 11 kV et le 33 kV. Leur schéma type s'apparente à celui du poste HT/MT.

##### I.5.1.3. Le poste MT/BT en distribution publique

Localisé entre le réseau de distribution MT et le réseau de distribution BT, cet ouvrage assure le passage de la MT ( $\approx 60$  kV) à la BT ( $\approx 400$  V).

Le schéma type de ce poste (Figure I.7-c) est évidemment beaucoup plus simple que celui des ouvrages précédents. En particulier, l'appareil de base MT utilisé est l'interrupteur et non plus le disjoncteur.

Ces postes sont constitués de quatre parties :

- ❖ l'équipement MT pour le raccordement au réseau amont,
- ❖ le transformateur de distribution MT/BT,
- ❖ le tableau des départs BT comme points de raccordement du réseau aval de distribution (en BT),
- ❖ et de plus en plus souvent une enveloppe extérieure préfabriquée (métallique ou de plus en plus souvent en béton) qui contient les éléments précédents,

### I.5.1.4. Le poste de livraison à un abonné HT ou MT

Ces ouvrages assurent le passage de la distribution publique à la distribution privée. Ils permettent le raccordement

- ❖ au réseau de répartition HT d'un abonné à grande consommation ( $\approx$ MVA) via un poste HT/MT,
- ❖ au réseau de distribution MT d'un abonné à moyenne consommation ( $\approx$  100 kVA) via un poste MT/BT.

Le choix de la tension de raccordement au réseau de distribution publique pour un abonné dépend essentiellement de :

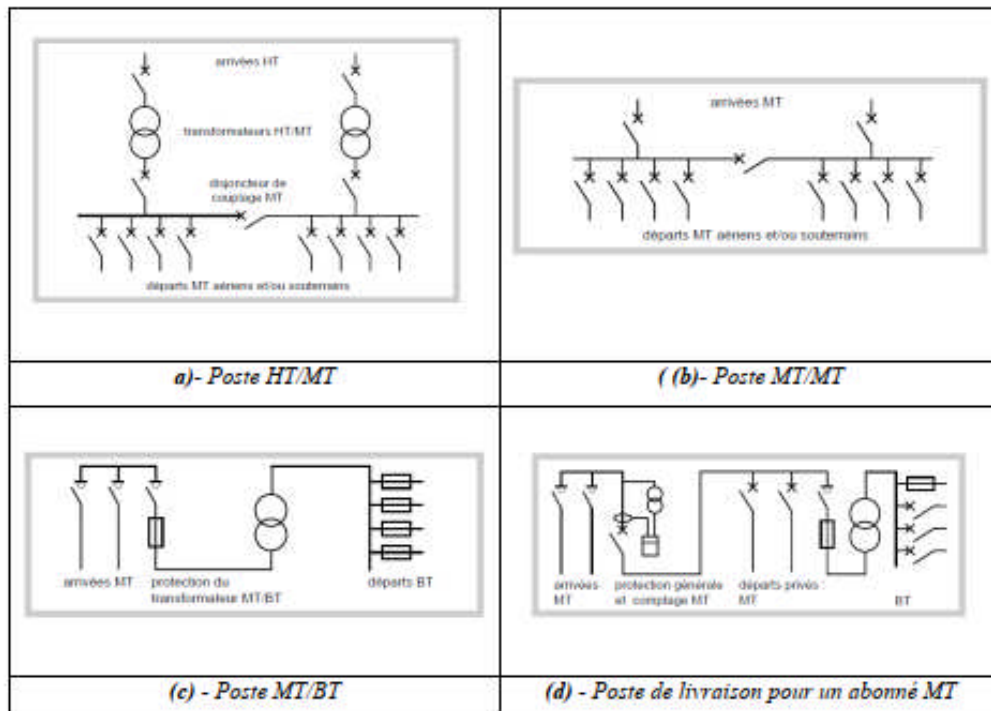
- ❖ la qualité du réseau BT, en particulier de sa limite en puissance (tenues électriques) ;
- ❖ la politique du distributeur, en particulier de la tarification qu'il propose, car pour l'abonné elle définit l'intérêt économique de l'énergie électrique, en concurrence avec les autres sources d'énergie : fuel, gaz, ...

Dans la pratique, c'est la puissance souscrite par l'abonné qui définit le raccordement en BT ou en MT, avec des valeurs fort différentes selon les pays.

Dans le cas des abonnés livrés en HT, le schéma du poste est conçu spécifiquement. Mais si l'abonné est alimenté en MT, un schéma type peut être proposé (Figure 1.7-d).

Cependant, l'installation d'un tel poste est évidemment liée à un accord du distributeur qui peut avoir des spécificités propres (comptage, conditions d'exploitation, ...).





**Figure I.7 : Différents types de schéma de postes utilisés sur les réseaux de distribution publique. [10]**

### I.6. LA PROBLEMATIQUE DES RESEAUX ELECTRIQUES

Les problèmes majeurs du réseau électrique sont les perturbations, facteurs entachant la qualité des grandeurs électriques [11]. L'énergie électrique est fournie sous forme de tension constituant un système triphasé dont les paramètres caractéristiques sont les suivants [12] :

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

Ces perturbations sont caractérisées par les fluctuations de puissances transitées dans le réseau et se mesure par les variations dans le temps des tensions et fréquences associées [7].

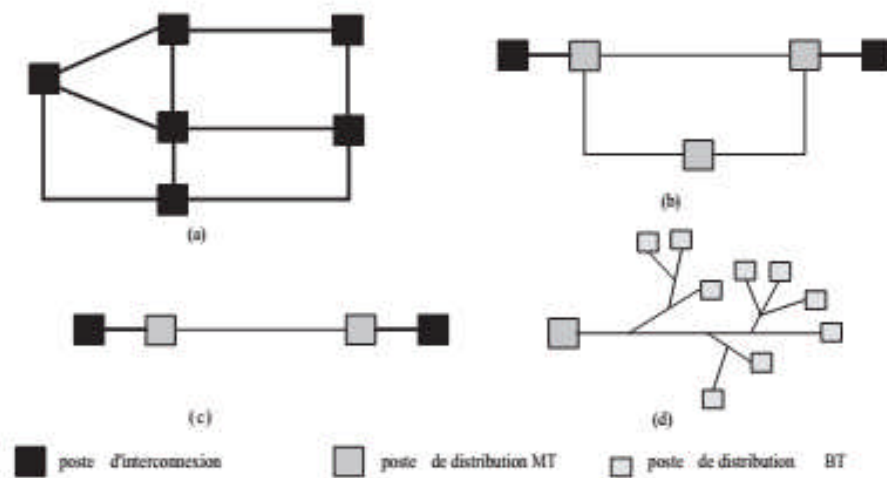
La variation de fréquence et tension peut résulter :

- ❖ D'un court-circuit proche ou loin d'une source, dû à la foudre ou aux manœuvres internes ;

- ❖ D'une très grosse variation de puissance de la source due à un appel fort de courant par la charge ;
- ❖ Du passage sur une source de remplacement ou de secours.

### I.7. TOPOLOGIES DES RESEAUX ELECTRIQUES [13]

Les topologies diffèrent d'un type de réseau à un autre. Cette topologie est dictée par : le niveau de fiabilité recherché, la flexibilité et la maintenance, ainsi que les coûts d'investissement et d'exploitation. Les différentes topologies qu'on trouve usuellement sont illustrées sur la Figure (I.8).



**Figure I.8 : Différentes topologies des réseaux électriques : (a) Réseau maillé, (b). Réseau bouclé, (c). Réseau radial, (d). Réseau arborescent.**

#### I.7.1. Réseau maillé

Cette topologie est presque la norme pour les réseaux de transport. Tous les centres de production sont liés entre eux par des lignes THT au niveau des postes d'interconnexion, ce qui forme un maillage. Cette structure permet une meilleure fiabilité mais nécessite une surveillance à l'échelle nationale voire continentale.

#### I.7.2. Réseau bouclé

Cette topologie est surtout utilisée dans les réseaux de répartition et distribution MT. Les postes de répartition HT ou MT alimentés à partir du réseau THT sont reliés entre eux pour former des boucles, ceci dans le but d'augmenter la disponibilité. Cependant, il faut noter que les réseaux MT ne sont pas forcément bouclés.

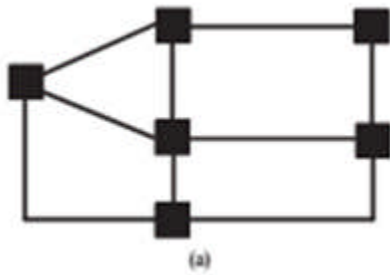


Figure 1.8.a : réseaux maille

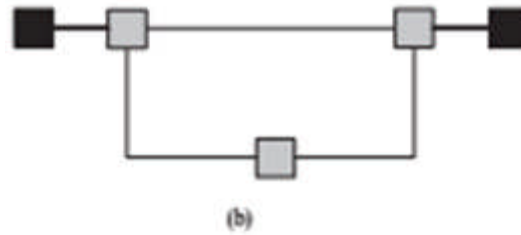


Figure 1.8.b : réseau bouclé

### I.7.3. Réseau radial

C'est une topologie simple qu'on trouve usuellement dans la distribution MT et BT. Elle est composée d'une ligne alimentée par des postes de distribution MT ou BT alimentés au départ par un poste source HT ou MT.

### I.7.4. Réseau arborescent

Cette structure est très utilisée en milieu rural et quelque fois en milieu urbain où la charge n'est pas très sensible aux interruptions. Elle est constituée d'un poste de répartition qui alimente plusieurs postes de distribution (BT) grâce à des piquages à différents niveaux des lignes alimentant les postes MT/BT

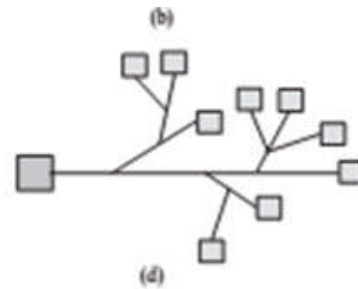


Figure I.8.c : réseau radial    Figure I.8.d : réseau arborescent

## I.8. DIFFERENTS TYPES DE GED D'ORIGINE RENOUVELABLES

Des classifications sont faites en fonction de type de source d'énergie utilisée et en fonction de la capacité de fournir des puissances actives et réactives.

En fonction de type de source d'énergie utilisée, la production décentralisée peut être classifiée en deux catégories : les énergies renouvelables et les énergies non renouvelables. Les principales sources d'énergies renouvelables sont : [14]

### I.8.1. Hydraulique :

## Chapitre I : Les Architecture et évolution des réseaux électriques

Les centrales hydrauliques fonctionnent grâce à l'énergie potentielle de pesanteur de l'eau des rivières, des lacs ou des fleuves. La puissance produite dépend de la hauteur de chute et du débit d'eau. Pour la production décentralisée, des microcentrales hydrauliques sont employées avec un ordre de grandeur de puissance de 5MW. Ce type de production présente comme avantages la gratuité de l'énergie primaire et la régularité de la production électrique. Les inconvénients principaux sont le prix élevé de l'investissement initial et l'impact sur l'environnement.

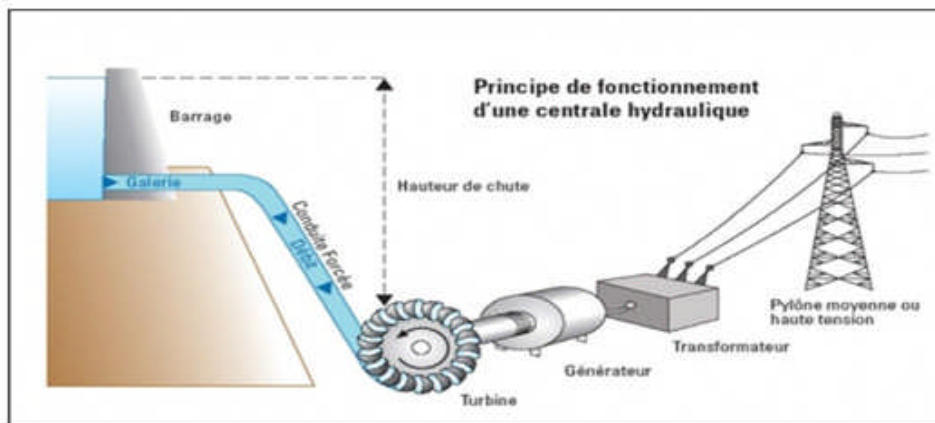


Figure I.9 : Centrale hydraulique

### I.8.2. Eolien :

Les aérogénérateurs, ou éoliennes, transforment l'énergie cinétique du vent en Energie électrique en la transmettant par le rotor et le multiplicateur de vitesse à une génératrice. Cette source d'énergie est de plus en plus répandue grâce à son développement technologique et son fort attrait écologique. Les coûts d'investissement sont relativement importants, surtout pour l'éolien offshore mais là encore, l'énergie primaire est gratuite et l'impact environnemental assez réduit.

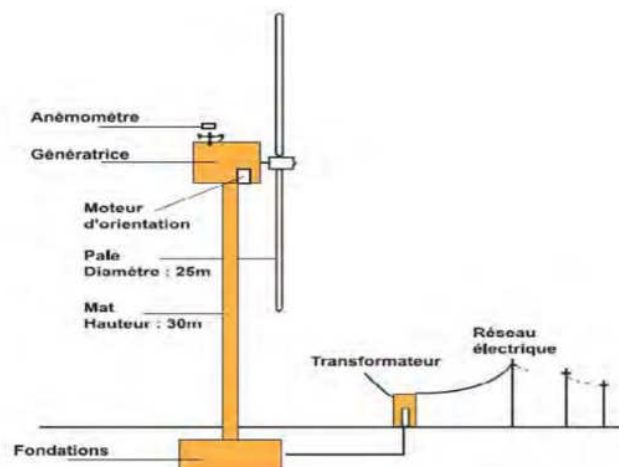


Figure I.10 : Fonctionnement d'une éolienne.

### I.8.3. Géothermie :

Le principe de la géothermie est d'utiliser la chaleur de nappes d'eau souterraine qui peuvent atteindre 350°C dans les zones les plus favorables pour générer directement par prélèvement ou indirectement par échange de chaleur de la vapeur d'eau.

La vapeur produite entraîne par la suite des turbines dans une installation thermique classique.

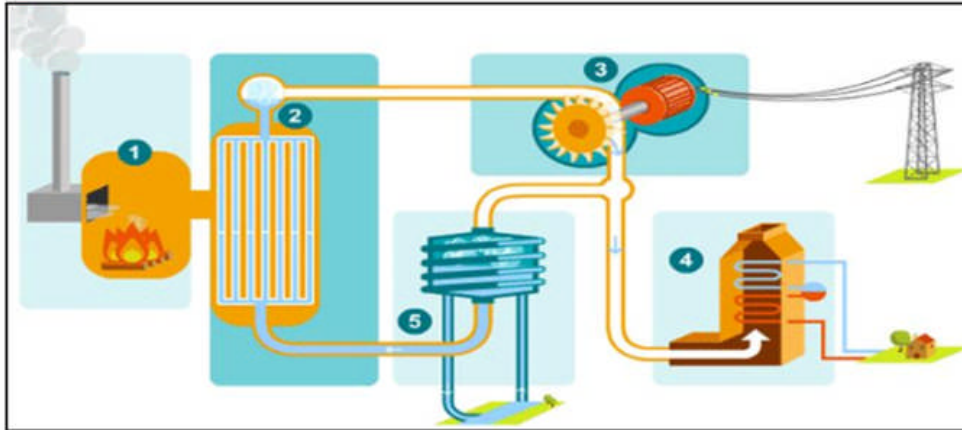


Figure I.11 : Centrale biomasse

### I.8.4. Solaire :

Bien qu'elle ne soit pas l'énergie renouvelable représentant la puissance installée la plus importante, l'énergie solaire est de loin l'énergie renouvelable qui compte le plus d'installations. Dans la très grande majorité des cas, l'énergie solaire est convertie en électricité à l'aide d'installation Photovoltaïque (PV) qui permet de transformer le rayonnement solaire en courant continu. L'autre solution, beaucoup plus rare et généralement pour des installations de puissances importantes, consiste à concentrer les rayonnements solaires pour produire de la chaleur qui est ensuite convertie en électricité. Le PV a l'avantage de présenter un coût d'installation modéré (face aux autres types de GED) grâce à un faible taux d'équipement et une implantation sur site peu contraignante. Les PV sont les GED les plus présentes sur le réseau de distribution, la majorité des installations ne dépassent pas quelques kilo Watt. [11]



Figure I.12 : L'énergie solaire

### **I.8.5. Energies fossiles (gaz, charbon, pétrole) :**

Le principe est le même que celui utilisé dans les centrales thermiques de, grande puissance. La combustion de combustibles fossiles (charbon, pétrole, gaz) génère de la chaleur elle-même transformée en électricité. Les Principales technologies sont la thermique à flamme (avec turbine à vapeur), les turbines à gaz et les moteurs atmosphériques (moteurs diesel). Ces systèmes, et notamment les turbines à gaz, peuvent aussi être utilisés pour générer à la fois de l'électricité et de la chaleur. On parle alors de cogénération. Ces systèmes permettent d'avoir un rendement global très proche de l'unité.

### **I.8.6. Hydrogène (piles à combustible) :**

Les piles à combustible produisent directement de l'électricité à partir d'hydrogène et d'oxygène par réaction inverse de l'électrolyse de l'eau. C'est une énergie sur laquelle beaucoup d'espoirs sont fondés, bien que l'hydrogène ne se trouve pas sous forme directement exploitable dans la nature, il faut en effet de l'énergie pour le produire.

Aujourd'hui, deux technologies sont principalement étudiées : PEMFC (Proton Exchange Membrane Fuel Cell) pour des applications de faibles puissances et SOFC (Solid Oxid Fuel Cell) pour des applications stationnaires de cogénération. Ces technologies restent cependant coûteuses et donc peu répandues. La production décentralisée peut être aussi classées en quatre grands types basés sur la capacité de fournir de la puissance active et réactive.

#### **I.8.6.1. Type 1 :**

Ce type de DG est capable de fournir que la puissance active tels que les photovoltaïques, les micro-turbines, les piles à combustible, qui sont intégrés au réseau à l'aide des convertisseurs /onduleurs.

#### **I.8.6.2. Type 2 :**

DG capable de délivrer des puissances active et réactive. Les unités à base de machines synchrones (cogénération, turbines à gaz, etc) font partie de ce type.

#### **I.8.6.3. Type 3 :**

DG capable de fournir que la puissance réactive. Les compensateurs synchrones tels que les turbines à gaz sont un exemple de ce type fonctionnant avec facteur de puissance nulle.

### **I.8.6.4. Type 4 :**

DG capable de délivrer une puissance active en consommant de la puissance réactive. Principalement les générateurs à induction, qui sont utilisés dans des parcs éoliens, entrent dans cette catégorie.

## **I.9. CONCLUSION**

On a présenté dans ce chapitre le système d'énergie électrique sous forme générale et on essaye d'illustrer les principaux éléments du réseau d'énergie électrique, la structure des réseaux électriques conventionnels avec une description plus détaillée des réseaux de distribution, on parlera des différents types de productions décentralisées selon le type de source d'énergie utilisée.

# **Chapitre II : Généralité sur les énergies renouvelable et sur les photovoltaïques**



### II.1. INTRODUCTION

L'énergie solaire photovoltaïque désigne l'électricité produite par transformation d'une partie du rayonnement solaire avec une cellule photovoltaïque. Plusieurs cellules sont reliées entre elles et forment un panneau solaire (ou module) photovoltaïque. Plusieurs modules qui sont regroupés dans une centrale solaire photovoltaïque sont appelés champ photovoltaïque. Le terme photovoltaïque peut désigner soit le phénomène physique- l'effet photovoltaïque-ou la technologie associée. [11]

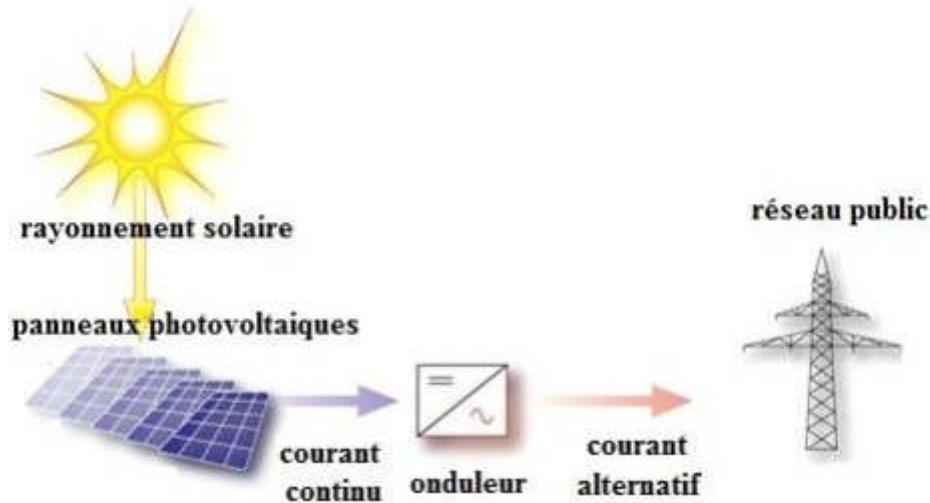


Figure II.1 : Schéma de principe d'un générateur photovoltaïque

Pour comprendre le fonctionnement de cette énergie et en optimiser son utilisation, nous effectuons dans ce chapitre une étude théorique sur le rayonnement solaire et un bref rappel sur le principe de l'effet photovoltaïque, la cellule photovoltaïque et ses performances ainsi le générateur solaire photovoltaïque et leurs performances.

### II.2. L'ENERGIE SOLAIRE PHOTOVOLTAÏQUE :

#### II.2.1. Le soleil :

Le soleil est une étoile de forme pseudo-sphérique dont le diamètre 1391000 km. Il est situé à une distance moyenne de 149598000km de terre. Sa lumière, à une vitesse de 300000km/s, met environ 8 minutes pour parvenir la terre. Le soleil décharge continuellement une énorme quantité d'énergie radiante dans le système solaire, la terre intercepte une toute petite partie de l'énergie solaire rayonnée dans l'espace. Une moyenne de 1367 watts atteint chaque mètre carré du bord externe de l'atmosphère terrestre (pour une distance moyenne Terre-soleil de 150 Millions de km), c'est ce que l'on appelé la constante solaire égale à 1367W/m<sup>2</sup>. [12]

### II.2.2. Avantages et inconvénients de l'énergie solaire photovoltaïque :

#### II.2.2.1. Avantage :

Les avantages des énergies renouvelables sont nombreux, car ces dernières sont en général propres, sûres et surtout, elles existent en quantité illimitée (contrairement aux énergies fossiles). [13]

- Sûreté : En les utilisant en majorité, on retrouverait une stabilité climatique, économique, environnementale et sociale surtout en développant de grandes centrales thermiques. La sûreté est l'un des avantages principaux, car il existe de très faibles risques d'accident.
- Peu de déchets : Elles génèrent également peu de déchets, et ces déchets sont parfois recyclables.
- Energie indépendante, le combustible (le rayonnement solaire) est renouvelable et gratuit.
- Génère l'énergie requise.
- L'extension des systèmes est facile, la taille d'une installation peut aussi être augmentée par la suite pour suivre les besoins de la charge.
- Entretien minimal.
- Aucun bruit.
- La décentralisation des énergies renouvelables est aussi un facteur positif très important pour développer certains territoires et le développement local. Le marché du travail concernant ces énergies représente presque un million deux cent mille emplois surtout dans le photovoltaïque, l'éolien et la biomasse. Ces énergies respectent l'environnement pendant leur fabrication, leur fonctionnement et lors de leur fin de vie, au moment de leur démantèlement.

#### II.2.2.2. Inconvénients :

- La fabrication des panneaux photovoltaïques relève de la haute technologie demandant énormément de recherche et développement et donc des investissements coûteux.
- Les rendements des panneaux photovoltaïques sont encore faibles.
- Nécessite un système d'appoint (batteries) pour les installations domestiques.
- Le coût d'investissement sur une installation photovoltaïque est cher.
- Leur disponibilité dépend du climat. Pour celles fonctionnant au solaire, il n'est possible d'utiliser que 50 % de leur capacité réelle dans les zones équatoriales et encore moins à cause de la disparition du soleil pendant plusieurs mois dans les pôles. En outre, quand le

ciel est nuageux, le rayonnement solaire est moindre. Lors de périodes anticycloniques, il n'y a pas de vent. Cette énergie n'est pas très stable.

- La responsabilité sur le réchauffement climatique des énergies renouvelables est un inconvénient majeur. Elles sont souvent présentées et admises pour justement résoudre ce problème, mais pour que ce soit réel, il faudrait diminuer considérablement la consommation des énergies fossiles comme le pétrole, le charbon ou le gaz et mieux maîtriser l'énergie renouvelable pour l'économiser davantage.
- L'impact visuel sur le paysage est à prendre en compte surtout lors de constructions de grandes centrales solaires ou de champs d'éoliennes. Ces productions décentralisées aideraient à diminuer le nombre de lignes à haute tension. Elles restent donc une pollution pour la faune. De plus, les expériences menées déjà dans certains pays montrent qu'elles aident à l'accroissement de ces mêmes lignes.

### II.3. PRODUCTION MONDIALE DES MODULES PHOTOVOLTAÏQUE :

La technologie silicium cristallin (cis) est composée de 90% de la production de module en 2013, contre 89% en 2012. Le poly cristallin représente environ trois quarts de la production de cis, qui est un changement significatif de 2008, quand la production a été divisée presque uniformément avec le monocristallin [14].

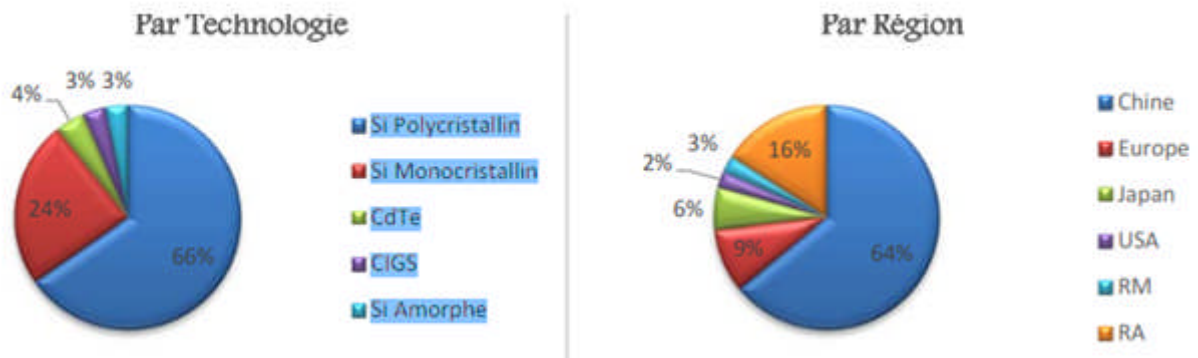
La production totale de la couche mince a diminué pendant la deuxième année consécutive : la production en 2013 a été estimée à 4.2 GW, contre 4.7 GW en 2011.

La part de 10% de la couche mince du marché global module était la plus basse depuis 2006. D'une façon générale, la pertinence de la couche mince dans le marché solaire a été en flèche depuis 2009, quand elle a atteint une hauteur de 19 pour cent de production totale de module. Les raisons de ceci sont simples : la couche mince est plus chère, moins efficace que la technologie cristalline chinoise de silicium, qui domine le marché aujourd'hui.

Regardant la production de la couche mince plus étroitement, CdTe a composé 39% de la production totale de la couche mince en 2013, suivis de CIGS (31%) et de silicium amorphe (30%) [14]. Après une décennie d'expansion continue, la part de la Chine de la production globale de module a chuté légèrement en 2013, finissant l'année à 64% comparés à 65% en 2012. Les facteurs comprenant un manque d'expansion sont les limitations sur les importations chinoises dans l'UE.

## Chapitre II : Généralité sur les énergies renouvelables et sur les photovoltaïques

En attendant, d'autres nations asiatiques (RA), principalement le Japon, la Malaisie, la Corée du Sud et Taiwan, ont composé encore 22% de la production globale des modules. Avec la part de production du module de l'Asie entrant à 86%, les 14% demeurant ont été divisés entre l'Europe (9%), les États-Unis (2%) et le reste de monde (RM) représente 3% [14], figure (I.7).



**Figure II.2 : Partition de la production des modules photovoltaïques dans le monde en 2013 [14].**

### II.4. LES ENERGIES RENOUVELABLES EN ALGERIE

De par sa situation géographique, l'Algérie dispose d'un des gisements solaires les plus importants du monde et en particulier de la région. La durée d'insolation sur la quasi-totalité du territoire national dépasse les 2000 heures annuellement et atteint les 3900 heures (hauts plateaux et Sahara). L'énergie reçue quotidiennement sur une surface horizontale de 1 m<sup>2</sup> est de l'ordre de 5 kWh sur la majeure partie du territoire national, soit près de 1700 kWh/m<sup>2</sup>/an au Nord et 2263 kWh/m<sup>2</sup>/an au sud du pays. Le tableau (II.1) résume le potentiel solaire en Algérie [20].

Régions	Région côtier	Haute plateaux	Sahara
Superficie (%)	4	10	86
Durée moyenne d'insolation (h/an)	2650	3000	3500
Energie moyenne reçue (KWh/m <sup>2</sup> /an)	1700	1900	2650

**Tableau II.1 : Potentiel solaire en Algérie. [20]**

L'Algérie en particulier et les pays du Maghreb ont un potentiel solaire élevé. Les taux d'irradiation solaire effectués par satellites par l'Agence Spatiale Allemande (DLR), montrent

des niveaux d'ensoleillement exceptionnels de l'ordre de 1200 kWh/m<sup>2</sup>/an dans le Nord du Grand Sahara.

Par contre, les meilleurs taux d'irradiation solaire en Europe sont de l'ordre de 800 kWh/m<sup>2</sup>/an limités à la partie sud de l'Europe. Suite à une évaluation par satellites, l'Agence Spatiale Allemande (ASA) conclut, que l'Algérie représente le potentiel solaire le plus important de tout le bassin méditerranéen, soit : 169.000 TWh/an pour le solaire thermique, 13,9 TWh/an pour le solaire photovoltaïque et 35 TWh/an pour l'éolien. Cette énergie renouvelable présente à l'heure actuelle une réponse aux problèmes environnementaux et aux émissions de gaz à effet de serre qui menace la planète entière et une solution durable à la crise actuelle de l'énergie, avec la hausse du prix du baril de pétrole, ce qui place les énergies renouvelables, ENR, (hydraulique, éolien, photovoltaïque, solaire thermique, géothermie, biomasse, biogaz et pile à combustible), au centre des débats portant sur l'environnement, et plus généralement le développement durable.

Dans ce contexte vient le projet allemand DESERTEC «clean frome désert» dans cet article, nous décrivons le potentiel algérien en matière d'énergie renouvelable surtout solaire et éolien et leurs intégration dans une vision de développement à travers plusieurs scénarios énergétiques mettant l'Algérie comme un noyau de production d'énergie renouvelable et son environnement surtout européen dont les études de la banque mondiale indiquent qu'il sera obligé dans les années à venir d'importer son énergie du grand Sahara d'où vient l'initiative allemande pour exporter l'énergie solaire du grand Sahara à l'Europe.

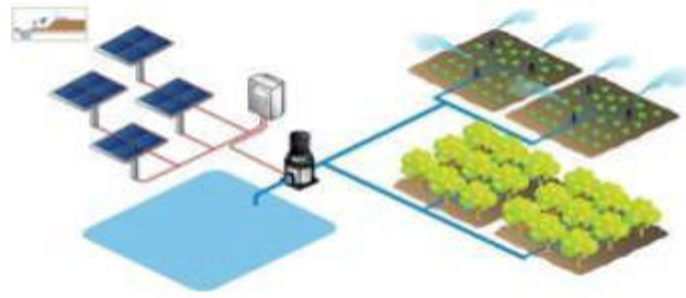
L'Algérie a adopté en 2011 une stratégie ayant pour objectif de produire d'ici 2030, 40% d'électricité à partir de ressources renouvelables. Cette stratégie vise en outre à développer une véritable industrie du solaire, associée à un programme de formation et de capitalisation qui permettra, à terme, d'asseoir un savoir-faire efficient, notamment en matière d'engineering et de management de projets. [21]

### **II.5. LES MODES D'EXPLOITATION D'UN PANNEAU PHOTOVOLTAÏQUE**

On distingue trois modes d'exploitation d'un panneau PV : autonome, connecté au réseau et hybride [22].

#### **II.5.1. Le mode autonome**

En mode autonome figure (II.3), le générateur photovoltaïque représente la seule source d'énergie électrique pour alimenter des récepteurs. [23].



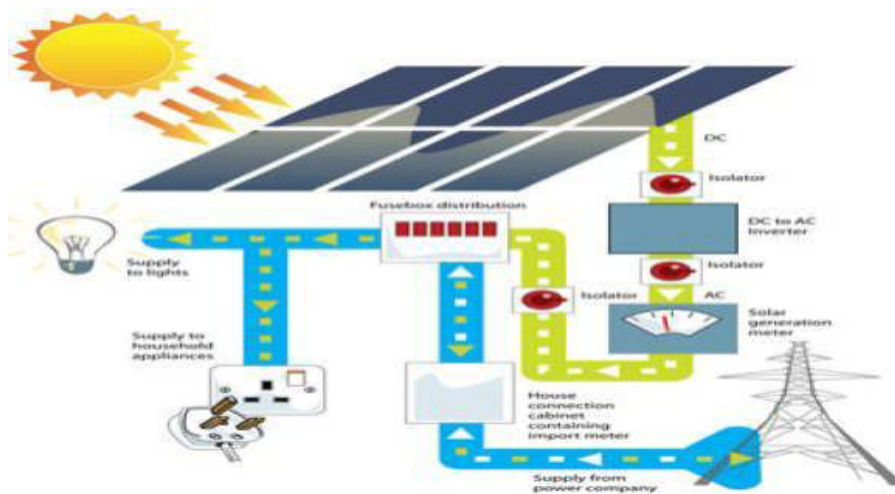
**Figure II.3 : Le mode connecté aux réseaux.**

Ce mode adopté lorsque le réseau n'est pas disponible ou lorsque fonctionnement des récepteurs dépend uniquement du fil de soleil (Pompage, éclairage, climatisation, chauffage...) [22].

### II.5.2. Le mode connecté au réseau

Dans ce mode, le panneau PV est connecté au réseau électrique figure (II.4), Le système photovoltaïque est muni de convertisseurs de puissance pour adapter l'énergie produite par les panneaux PV.

Ces convertisseurs sont composés d'un hacheur muni d'un MPPT, d'un filtre d'un onduleur et d'une électronique appropriée pour assurer l'adaptation en amplitude et fréquence avec le réseau (accrochage au réseau) [22].



**Figure II.4 : Le mode connecté aux réseaux**

### II.5.3. Mode hybride

Un système d'énergie hybride comporte plus qu'une source d'électricité telle que les panneaux photovoltaïques, les cellules à combustible, les générateurs éoliens, les batteries de stockage, les groupes électrogènes, etc... figure (II.5)

Ce type d'installation est utilisé pour l'électrification des régions loin du réseau.

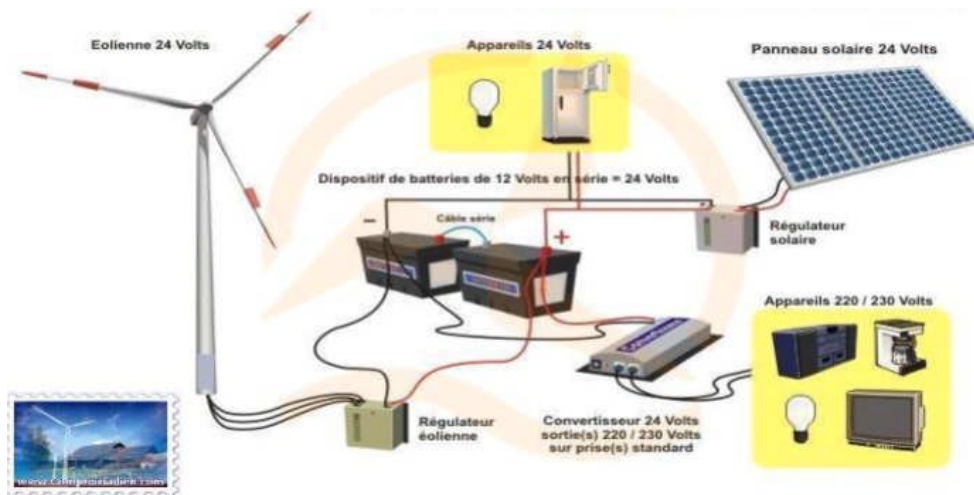


Figure II.5 : Schéma de Branchement d'un system PV Mode Hybride.

Ils sont généralement à base de sources d'énergie renouvelables tel que les panneaux photovoltaïques, les éoliennes, les piles à combustibles, les batteries de stockage, les groupes électrogènes [22].

### II.6. EFFET PHOTOVOLTAÏQUE

L'effet photovoltaïque est un phénomène physique propre à certains matériaux Appelés « semi-conducteurs » qui exposés à la lumière, produisent de l'électricité. Le plus connu d'entre eux est le silicium cristallin qui est utilisé aujourd'hui dans 90% des panneaux solaires produits dans le monde. [19]

Cet effet est obtenu par absorption des photons dans un matériau semi-conducteur qui génère alors des paires électrons-trous (excitation d'un électron de la bande de valence vers la bande de conduction) créant une tension ou un courant électrique. Plusieurs types de composants peuvent être créés à partir de ce principe. Ils sont appelés photodiodes, phototransistors ou des photopiles

### II.7. GENERATEUR PHOTOVOLTAÏQUE

#### II.7.1. CELLULES PHOTOVOLTAÏQUES

La cellule photovoltaïque (photopile) forme l'élément de base du générateur photovoltaïque, c'est une méthode optoélectronique de conversion de l'énergie solaire en énergie électrique. Elle est réalisée à base de matériaux semi-conducteurs, généralement le silicium.



Figure II.6 : cellule photovoltaïque

### II.7.2. Principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque :

Une cellule photovoltaïque est un dispositif qui permet de transformer l'énergie solaire en énergie électrique. Cette transformation est basée sur les trois mécanismes suivants :

- absorption des photons (dont l'énergie est supérieure au gap) par le matériau constituant le dispositif ;
- conversion de l'énergie du photon en énergie électrique, ce qui correspond à la création de paires électron/trou dans le matériau semi-conducteur ;
- collecte des particules générées dans le dispositif.

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

Afin de collecter les particules générées, un champ électrique permettant de dissocier les paires électrons / trou créées est nécessaire. Pour cela on utilise le plus souvent une jonction p-n.

D'autres structures, comme les hétérojonctions et les schottky peuvent également être utilisées.

Le fonctionnement des cellules photovoltaïques est illustré sur la Figure (II.7)

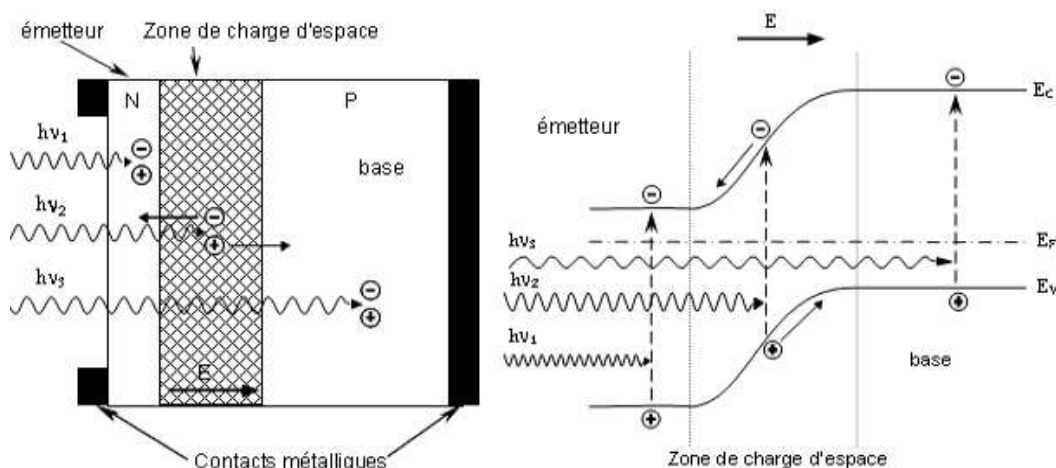
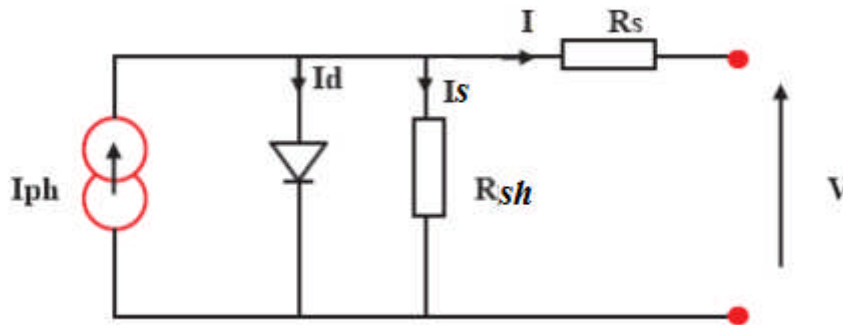


Figure II.7 : Schéma de principe de fonctionnement d'un générateur PV



**II.8. MODELISATION ELECTRIQUE D'UNE CELLULE PHOTOVOLTAÏQUE :**

Une cellule photovoltaïque a un comportement équivalent à une source de courant shuntée par une diode (Figure II.8). Le modèle est complété par une résistance série  $R_s$  due à la contribution des résistances de base et du front de la jonction et des contacts face avant et arrière et une résistance parallèle ou shunt  $R_p$  qui provient des contacts métalliques et des résistances de fuite sur la périphérie de la cellule[26] [16][18][17].



**Figure II.8 : Modèle de la cellule photovoltaïque réel**

Le modèle mathématique pour la caractéristique courant-tension d'une cellule PV est donné par :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_s \left( \exp\left(\frac{V_{pv} + I_{pv}R_s}{V_t n}\right) - 1 \right) - \left( \frac{V_{pv} + I_{pv}R_s}{R_{sh}} \right) \quad (II.1)$$

Avec :

$$V_t = \frac{KT_c}{q} : \text{représentant le potentiel thermodynamique}$$

Où

$K$  est la constante de Boltzmann ( $1,381 \times 10^{-23}$  J/K),

$T_c$  : est la température effective des cellules en Kelvin(K),

$q$  est la charge de l'électron ( $q=1,610^{-19}$  C),

$n$  est le facteur d'idéalité de la jonction ( $1 < n < 3$ ),

$I_{pv}$  est le courant fourni par la cellule lorsqu'elle fonctionne en générateur,

$V_{pv}$  est la tension aux bornes de cette même cellule,

$I_{ph}$  est le photo-courant de la cellule dépendant de l'éclairement et de la température ou bien le courant de (court-circuit),

$R_{sh}$  est la résistance shunt caractérisant les courants de fuite de la jonction,

$R_s$  est la résistance série représentant les diverses résistances de contacts et de connexions

**II.8.1. Paramètres d'une cellule photovoltaïque**

La cellule solaire photovoltaïque est caractérisée par plusieurs paramètres dont le rendement de conversion, la tension de court-circuit et de circuit ouvert, le courant de court-circuit et le facteur de forme (FF). Ces paramètres sont extraits des caractéristiques courant-tension qui permettent de comparer différentes cellules dans des conditions identiques. Ces paramètres sont définis comme suit :

➤ **Courant de court-circuit  $I_{cc}$**

Le courant de court-circuit est le courant le plus important que l'on puisse obtenir avec une cellule solaire, augmente généralement avec l'intensité d'illumination.  $I_{cc}$  est la valeur du courant lorsque la tension  $V=0$ .

➤ **Tension à circuit ouvert,  $V_{oc}$**

La tension à circuit ouvert est obtenue quand le courant qui traverse la cellule est nul. Elle dépend de la barrière d'énergie et de la résistance shunt. Elle décroît avec la température et varie peu avec l'intensité lumineuse.[2] [ABL 06]

$$V_{oc} = \frac{KT}{e} \ln \left( \frac{I_{cc}}{I_s} + 1 \right) \quad (\text{II.2})$$

➤ **Point du fonctionnement  $P_m$  ( $V_m, I_m$ )**

La puissance maximale d'une cellule photovoltaïque éclairée est la grandeur essentielle pour évaluer sa performance ; elle est donnée par la relation :

$$P_m = V_m * I_m \quad (\text{II.3})$$

Elle traduit sur la caractéristique  $I-V$  le point du fonctionnement  $P_m = (V_m, I_m)$  qui est situé au coude de la caractéristique  $I-V$  et dit point de puissance maximale où les valeurs de tension  $V_m$  et du courant  $I_m$  appelées également tension et courant maximums respectivement.

➤ **Facteur de forme, FF**

Un paramètre important est souvent utilisé à partir de la caractéristique  $I(V)$  pour qualifier la qualité d'une cellule ou d'un générateur PV : c'est le facteur de remplissage ou fill factor (FF). Ce coefficient représente le rapport entre la puissance maximale que peut délivrer la cellule notée  $P_{max}$  et la puissance formée par le rectangle  $V_{co} * I_{cc}$ . Plus la valeur de ce facteur sera grande, plus la puissance exploitable le sera également. Les meilleures cellules auront donc fait l'objet de compromis technologiques pour atteindre le plus possible les caractéristiques idéales [17]. Il est défini par la relation suivante :

$$FF = \frac{P_{mx}}{V_{co} I_{cc}} \quad (\text{II.4})$$

### ➤ Le rendement

Le rendement des cellules PV désigne le rendement de conversion en puissance. Il est défini comme étant le rapport entre la puissance maximale délivrée par la cellule et la puissance lumineuse incidente,  $P_{in}$  :

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{in}} = \frac{FF I_{cc} V_{co}}{P_{in}} \quad (\text{II.5})$$

Ce rendement peut être amélioré en augmentant le facteur de forme, le courant de court-circuit et la tension à circuit ouvert. Le rendement de conversion est un paramètre essentiel. [7]

En effet, la seule connaissance de sa valeur permet d'évaluer les performances de la cellule.

### II.8.2. Générateur photovoltaïque et ses performances :

Le générateur photovoltaïque est un ensemble d'équipements mis en place pour exploiter l'énergie photovoltaïque afin de satisfaire les besoins en charge.

En fonction de la puissance désirée, les modules peuvent être assemblés en panneaux pour constituer un « champ photovoltaïque. La puissance électrique fournie au récepteur est fonction de la puissance d'ensoleillement. Elle est donc à son maximum lorsque le soleil est au zénith et nul ;

Mais, très souvent, les besoins en électricité ne correspondent pas aux heures d'ensoleillement et nécessitent une intensité régulière (éclairage ou alimentation de réfrigérateurs, par exemple). On équipe alors le système de batteries d'accumulateurs qui permettent de stocker l'électricité et de la restituer en temps voulu.

Pour un certain nombre d'applications, le courant continu produit, par le générateur photovoltaïque, est converti à l'aide d'un onduleur en courant alternatif.

Un module photovoltaïque est constitué d'un ensemble de cellules photovoltaïques élémentaires montées en série ou en parallèle afin d'obtenir des caractéristiques électriques désirées tels que : la puissance, le courant de court-circuit  $I_{cc}$  ou la tension en circuit ouvert  $V_{oc}$ .

Un générateur photovoltaïque est constitué d'un ou plusieurs modules PV en série ou en Parallèle.

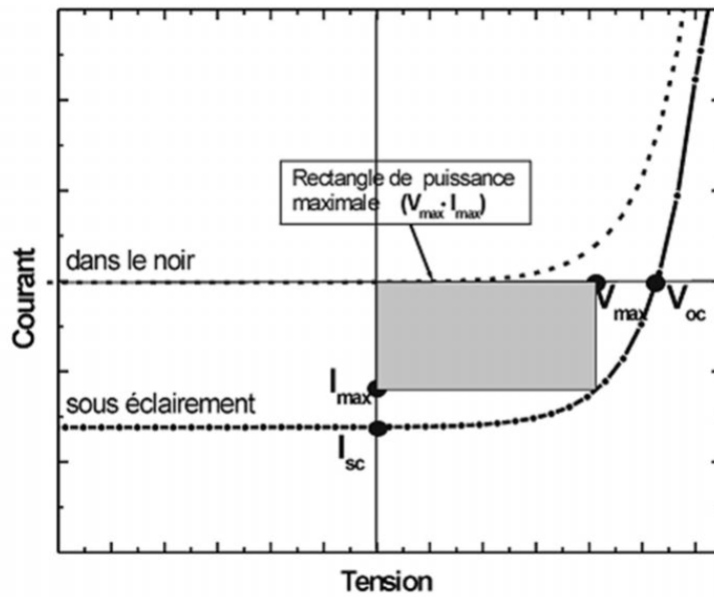


Figure II.9 : Caractéristique de la cellule photovoltaïque dans le noir et sous éclairement. [31]

### II.8.2. 1. Mise en série :

Une association de ( $N_s$ ) cellule en série figure (II.10) permet d'augmenter la tension du générateur photovoltaïque. Les cellules sont alors traversées par le même courant et la caractéristique résultant du groupement série est obtenues par addition des tensions élémentaires de chaque cellule. L'équation résume les caractéristique électriques d'une association série de ( $N_s$ ) cellules [29].

$$\begin{cases} V_{coNs} = N_s \times V_{co} \\ I_{cc} = I_{ccNs} \end{cases} \quad (II.6)$$

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

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

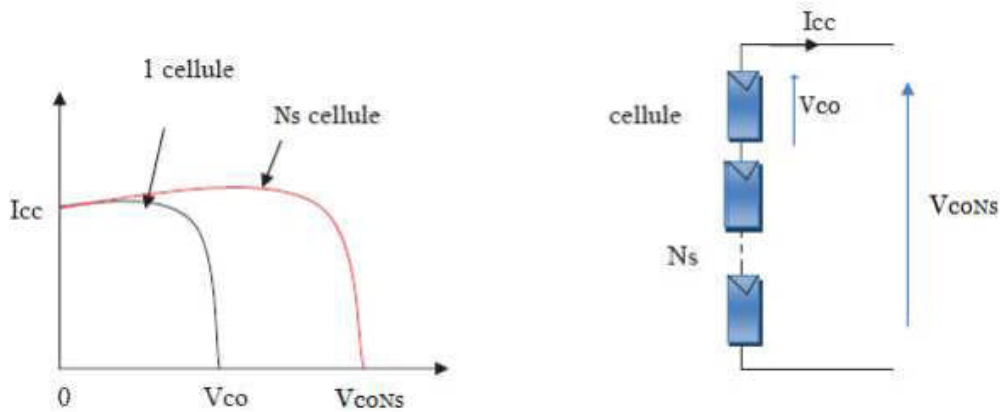


Figure II.10 : Caractéristique courant tension de Ns cellule en série.

### II.8.2.2. Mise en parallèle :

Une association parallèle de ( $N_p$ ) cellule Figure (II.11) est possible et permet d'accroître le courant de sortie du générateur ainsi créé. Dans un groupement de cellules identiques connectées en parallèle, les cellules sont soumises à la même tension et la caractéristique résultante du groupement est obtenue par addition des courants [30].

$$\begin{cases} I_{ccNp} = N_p I_{cc} \\ V_{co} = V_{coNp} \end{cases} \quad (II.7)$$

$I_{ccNp}$  : La somme des courants de court circuit de ( $N_p$ ) cellule en parallèle

$V_{coNp}$  : Tension du circuit ouvert de ( $N_p$ ) cellules en parallèle

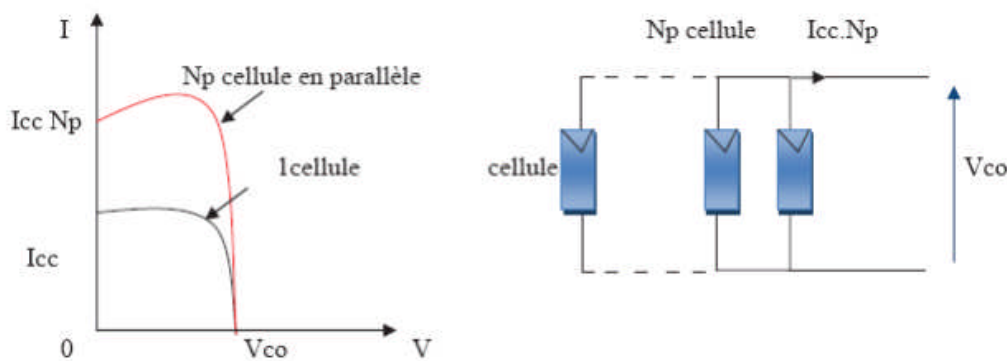


Figure II.11 : Caractéristique courant tension de ( $N_p$ ) cellule en parallèle

### II.8.2.3. Association en Série/Parallèle :

Selon l'association en série et/ou parallèle de ces cellules, les valeurs du courant de Court-circuit total et de la tension à vide totale sont données par les relations :

$$\begin{cases} I_{tcc} = N_p I_{cc} \\ V_{toc} = N_s V_{oc} \end{cases} \quad (\text{II.8})$$

$N_p$  : Nombre de cellule en parallèle.

$N_s$  : Nombre de cellule en série.

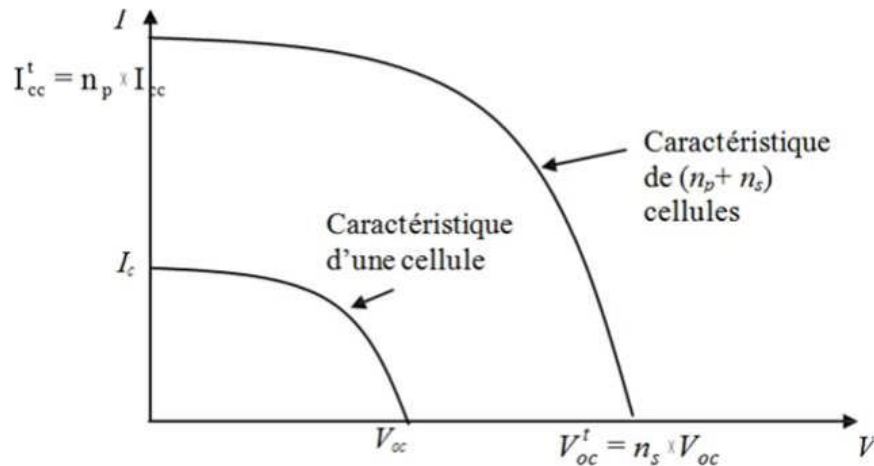


Figure II.12 : caractéristique résultante obtenue en associant, en série et en parallèle cellules identiques. [32]

### II.8.3. Caractéristique Courant-Tension :

La figure (II.13) représente la courbe  $I = f(V)$  d'un module photovoltaïque typique dans des conditions constantes d'irradiation et de température.

L'irradiation standard adoptée pour mesurer la réponse des modules photovoltaïques est une intensité rayonnante de  $1000 \text{ W/m}^2$  et une température de  $25^\circ\text{C}$ .

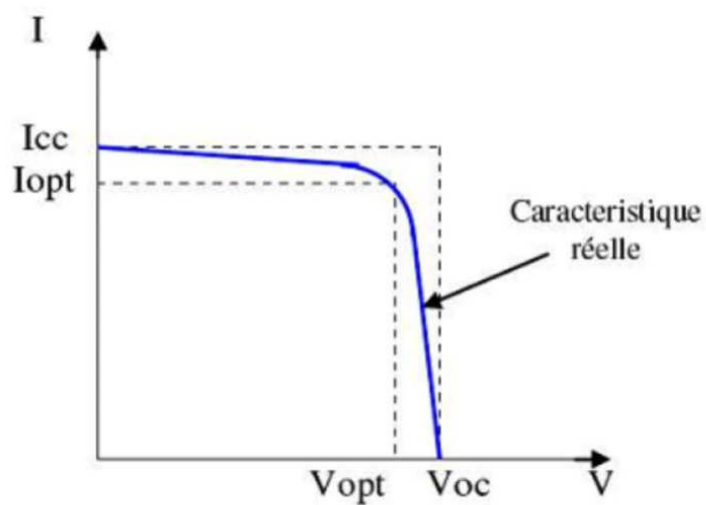


Figure II.13 : Caractéristique  $I = f(V)$  d'un module photovoltaïque. [11]

Il est difficile de donner un caractère source de courant ou de tension à un module photovoltaïque sur toute l'étendue de la caractéristique courant-tension. Par conséquent, le module photovoltaïque est considéré comme une source de puissance avec un point  $P_{max}$ . Où la puissance se trouve être maximale. Il est donc intéressant de se placer sur ce point pour tirer le maximum d'énergie et ainsi exploiter au mieux la puissance crête installée. Il est important de noter que certains régulateurs solaires réalisent une adaptation d'impédance afin qu'à chaque instant on se trouve proche de ce point  $P_{max}$  [11]

### II.8.3.1. Influence de l'association série ou parallèle des cellules PV :

La cellule individuelle, unité de base d'un système photovoltaïque, ne produit qu'une très faible puissance électrique, typiquement de 0.5 W avec une tension de moins d'un volt.

Pour produire plus de puissance, les cellules sont assemblées pour former un module (ou panneau).

Un module de 36 cellules en série est suffisant pour obtenir une tension compatible avec la charge. Pour avoir plus de tension, il faut assembler  $N_s$  modules en série, par contre pour le courant généré, un nombre  $N_p$  de modules en parallèle permet d'en ajouter, les diodes de protection série et parallèles protègent le circuit contre le retour du courant.

L'association en série des cellules délivre une tension égale à la somme des tensions individuelles et un courant égal à celui d'une seule cellule. [11]

## II.9. SYSTEME PHOTOVOLTAÏQUE CONNECTE AU RESEAU ELECTRIQUE

Dans ce système, l'ensemble de l'installation est connectée au réseau de distribution après une adaptation des paramètres. L'énergie produite est soit consommée sur place par l'utilisateur et le surplus est injecté sur le réseau, où bien injectée en totalité dans le réseau électrique sans limite. Ces dernières centrales peuvent être conçues avec ou sans stockage [33].

### II.9.1. Les systèmes PV connectés au réseau sans stockage

Ces systèmes sont ainsi conçus pour fonctionner en parallèle et en interconnexion avec le réseau public d'électricité pour couvrir les besoins en énergie. Les principaux composants de la connexion au réseau de ce type de système sont l'onduleur et le transformateur. Il convertit la puissance continue obtenue à partir des modules PV en puissance alternative en respectant les conditions de qualité de la tension et de la puissance exigées par le réseau, avec une possibilité d'arrêt automatique quand le réseau n'est pas en fonctionnement. Une interface bidirectionnelle est placée entre la sortie alternative du système PV et le réseau constitué par un dispatching. La

maintenance de ce système fonctionnant sans batterie, est particulièrement facile. Elle se limite à la vérification de l'état de propreté des modules (PV), comme est indiqué sur la figure (II.14) [33].

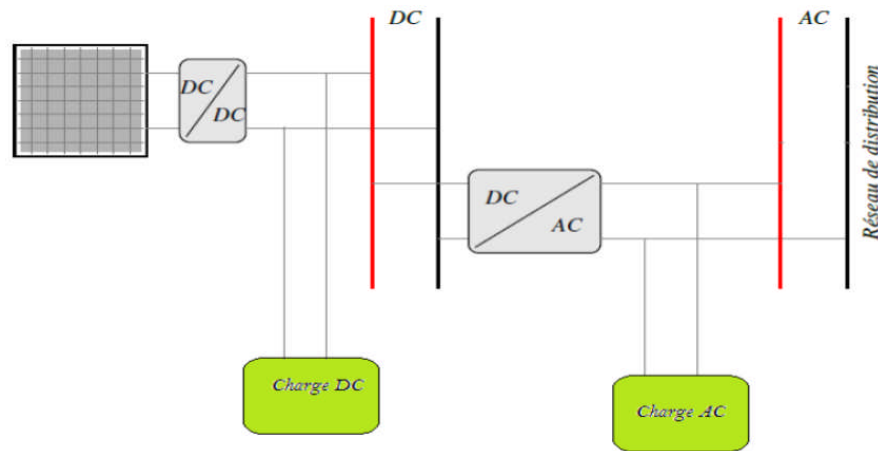


Figure II.14 : Installation photovoltaïque relié au réseau sans batterie.

### II.9.2. Les systèmes PV connectés au réseau avec batterie de stockage

Ce système a pour objectif de permettre, en absence d'énergie fournie par le réseau, l'utilisation d'énergie stockée par les batteries et celle fournie par le champ photovoltaïque afin d'alimenter des usages prioritaires de l'installation. Les batteries d'accumulateurs et l'onduleur forment une alimentation sans interruption (ASI) pour le système comme le montre la Figure (II.15).

Cette configuration permet d'utiliser au maximum l'énergie produite par les modules PV par l'intermédiaire des caractéristiques spécifiques de l'onduleur permettant un fonctionnement en mode synchrone sur la sortie du réseau [33].

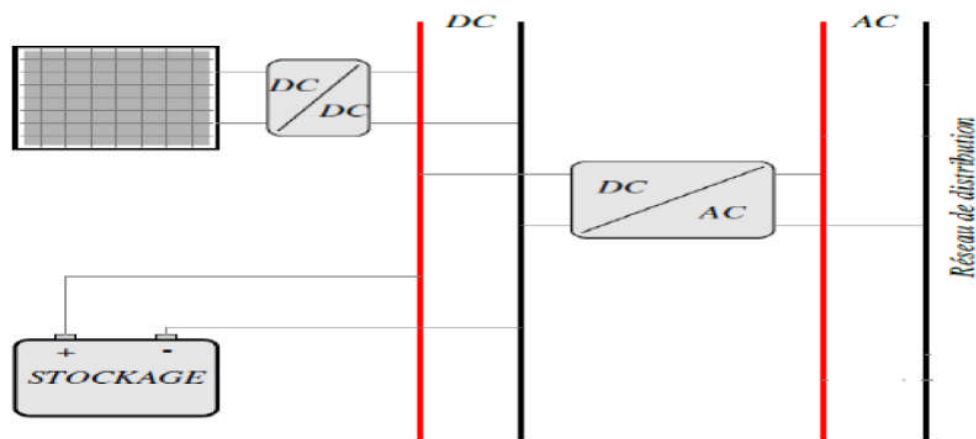


Figure II.15 : Installation photovoltaïque relié au réseau avec batterie.

### II.10. TYPES DE STRUCTURE D'UN SYSTEME PV

Il existe deux types de structures photovoltaïques connectées au réseau électrique.



### II.10.1. Systèmes raccordés directement au réseau :

Les centrales photovoltaïques connectées au réseau électrique conventionnel sont généralement installées à proximité du lieu de consommation et intégrées dans l'architecture en plus ou moins grande partie sur l'édifice de consommation. Elles fonctionnent « au fil du jour ». Leur fonctionnement est particulièrement optimisé du fait des exigences imposées par les caractéristiques techniques de la connexion au réseau de distribution électrique. [33]

La Figure (II.16) montre un générateur photovoltaïque connecté directement au réseau électrique à l'aide d'un onduleur.

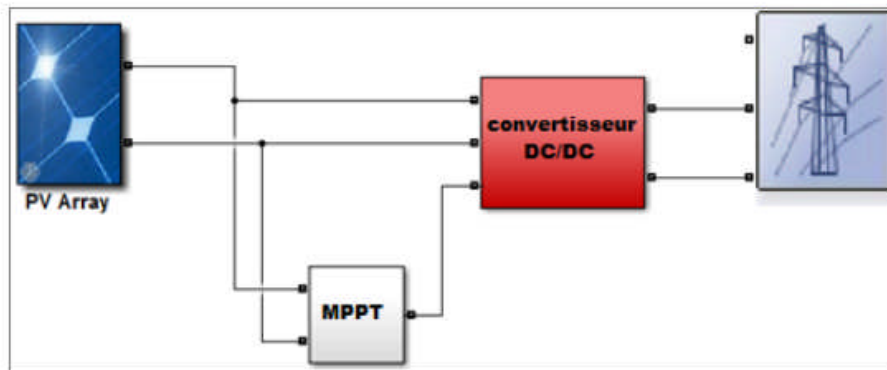


Figure II.16 : Générateur photovoltaïque connecté directement au réseau

### II.10.2. Systèmes avec hacheurs

Ce type de systèmes est constitué essentiellement d'un hacheur à la sortie du panneau et un onduleur au côté réseau pour convertir la tension continu en alternatif Figure (II.17). Les hacheurs sont des convertisseurs du type continu-continu. Leur utilisation permet le contrôle de la puissance électrique dans des circuits fonctionnant en courant continu avec une très grande souplesse et un rendement élevé. Ils permettent aussi de contrôler le point de puissance maximale des panneaux photovoltaïques.

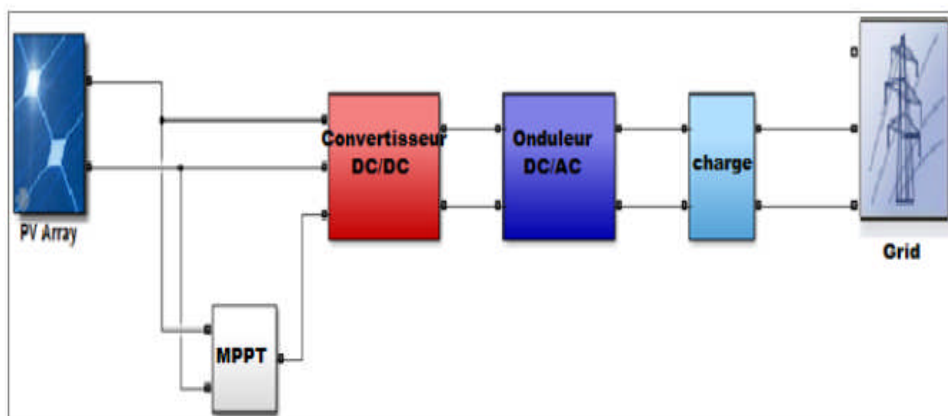


Figure II.17 : GPV relié au réseau par l'intermédiaire d'un hacheur et d'un onduleur

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

### **II.11. ELEMENTS CONSTITUTIFS D'UNE INSTALLATION PV CONNECTE AU RESEAU**

- Les panneaux photovoltaïques
- Un convertisseur DC/DC.
- Un onduleur qui transforme le courant pour qu'il soit compatible avec les caractéristiques du réseau. C'est « l'interface » entre l'installation et la compagnie d'électricité.
- La charge
- Le réseau électrique
- Équipement de raccordement
- Accessoires.

### **II.12. PROBLEME DE CONNEXION DES SYSTEMES PV AU RESEAU :**

Les problèmes concernant l'interconnexion du système photovoltaïque au réseau sont, [23] :

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

### **II.13. MAINTENANCE D'UN SYSTEME CONNECTE AU RESEAU**

Le système photovoltaïque raccordé au réseau est le système d'énergie renouvelable le plus facile à utiliser car aucune maintenance préventive n'est nécessaire. L'injection de l'électricité produite sur le réseau ainsi que la fourniture de la consommation du site se font automatiquement. À l'exception d'un site industriel enfumé ou poussiéreux, le nettoyage des capteurs se fait naturellement par le vent et la pluie. Une surveillance simple peut détecter d'éventuelles défaillances du système. Cependant, il est nécessaire de prévoir le remplacement de l'onduleur qui a en moyenne une durée de vie de 8 à 12 ans.

#### **➤ Avantages**

- Des systèmes tels que le comptage net et le tarif de rachat, proposés par certains opérateurs de système, peuvent compenser les coûts de consommation d'un client.

- Les systèmes PV connectés au réseau sont relativement faciles à installer car ils ne nécessitent pas de système de batterie.
- L'interconnexion de réseaux de systèmes de production d'énergie photovoltaïque (PV) présente l'avantage d'une utilisation efficace de l'énergie générée car il n'y a pas de pertes de stockage impliquées.
- Un système photovoltaïque a un bilan carbone négatif sur toute sa durée de vie, dans la mesure où toute énergie produite en sus de la construction du panneau compense initialement le besoin de brûler des combustibles fossiles. Même si le soleil ne brille pas toujours, toute installation donne une réduction moyenne raisonnablement prévisible de la consommation de carbone.

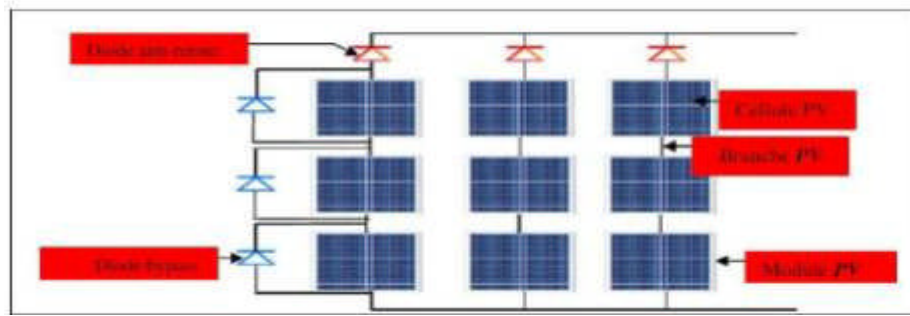
### ➤ Inconvénients

- Le PV connecté au réseau peut causer des problèmes de régulation de la tension. La grille traditionnelle fonctionne sous l'hypothèse d'un écoulement unidirectionnel ou radial. Mais l'électricité injectée dans le réseau augmente la tension et peut entraîner des niveaux en dehors de la bande passante acceptable de  $\pm 5\%$ .
- Le PV connecté au réseau peut compromettre la qualité de l'alimentation. La nature intermittente du PV signifie des changements rapides de tension. Cela non seulement élimine les régulateurs de tension en raison des ajustements fréquents, mais peut également entraîner un scintillement de la tension.
- La connexion à la grille pose de nombreux problèmes liés à la protection. En plus de l'îlotage, comme mentionné ci-dessus, des niveaux trop élevés de PV connectés au réseau entraînent des problèmes tels que la désensibilisation du relais, le déclenchement intempestif, l'interférence avec les réenclenches automatiques et la Ferro résonance.

## II.14. PROTECTION D'UN MODULE PHOTOVOLTAÏQUE

Lorsque nous concevons une installation photovoltaïque, nous devons assurer la protection électrique de cette installation afin d'augmenter sa durée de vie en évitant notamment des pannes destructrices liées à l'association des cellules et de leurs fonctionnement. Pour cela, deux types de protection sont classiquement utilisés dans les installations actuelles :

- la protection en cas de connexions en parallèle de cellules photovoltaïques pour éviter les courants négatifs dans les GPV (diode anti-retour).
- La protection lors de la mise en série de cellules photovoltaïques permettant de ne pas perdre la totalité de la chaîne (diode by-pass). Figure (II.18)



**Figure II.18 : Protection d'un GPV par des diodes by-pass et anti-retour [29]**

### II.15. CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons rappelé quelques notions sur le rayonnement solaire, et son application dans le domaine photovoltaïque. En suite nous avons vu que la cellule PV présente une caractéristique non linéaire et qu'elle peut être modélisée par un circuit électrique simple.

Nous avons présenté les différentes technologies de cellules actuellement sur le marché, et malgré la fin du silicium annoncée depuis de nombreuses années, ce dernier garde environ de 90% du marché.

Après, nous avons étudié sa modélisation et sa caractéristique technique, sa protection. Les modules peuvent également être connectés en série et/ou en parallèle pour construire un champ photovoltaïque afin d'augmenter la tension et l'intensité d'utilisation.

Dans la littérature, plusieurs travaux se sont intéressés à l'étude des systèmes photovoltaïques connectés au réseau électrique. Ce deuxième chapitre a été consacré à l'introduction de quelques notions sur les types des systèmes PV connecté au réseau (sans stockage et avec batterie de stockage). L'étude bibliographique de ces générateurs a permis de les classer en deux catégories: les structures à connexion directe et les structures à bus continu intermédiaire.

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

# **Chapitre III : Intégration de panneau photovoltaïque au réseau électrique**

### III.1. INTRODUCTION

Les installations photovoltaïques peuvent être raccordées au réseau, ce qui représente une économie importante en investissement et en fonctionnement. Elles utilisent le réseau comme un stock, et transforment la totalité de l'électricité produite en courant alternatif de 220 V ou 380V. Les systèmes photovoltaïques connectés au réseau jouent un rôle primordial pour compléter la génération conventionnelle d'énergie dans plusieurs pays industrialisés. Pour cette raison, il y a plusieurs projets de recherche qui étudient cette possibilité [31].

Ce chapitre présente un modèle mathématique de simulation s'appliquant à chaque composant de la centrale PV connectée au réseau. Le système détaillé est composé de générateur photovoltaïque, de convertisseur DC/DC, de l'onduleur DC/AC commandé par la MLI, de filtre et le réseau électrique.

Une commande des convertisseurs sera développée dans le but d'extraire et d'injecter le maximum de puissance du GPV. L'onduleur, chargé de transférer l'énergie produite des modules PV dans le réseau doit garder la tension alternative constante. Le contrôle de la puissance, ainsi que la modélisation et simulation seront effectués sous le logiciel Matlab/Simulink. Ce système de contrôle permettra d'injecter la puissance active désirée et de régler la tension au point de raccordement du réseau connecté.

### III.2. MODELISATION DU PANNEAU SOLAIRE:

#### III.2.1. Circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque PV :

Un module PV se compose d'un certain nombre de cellules solaires connectées en série et en parallèle pour obtenir les niveaux de tension et de courant désirés. Une cellule de panneau solaire est essentiellement une jonction de semi-conducteur p-n.

Lorsqu'il est exposé à la lumière, un courant continu est généré. Pour simplifier, le modèle à une seule diode de la figure (III.1) est utilisé dans ce document. Ce modèle offre un bon compromis entre simplicité et précision avec la structure de base. Le circuit équivalent du modèle général se compose d'un photo-courant ( $I_{ph}$ ), d'une diode, d'une résistance parallèle ( $R_p$ ) exprimant un courant de fuite et d'une résistance série ( $R_s$ ) due aux contacts entre les semi-conducteurs et les parties métalliques [32]

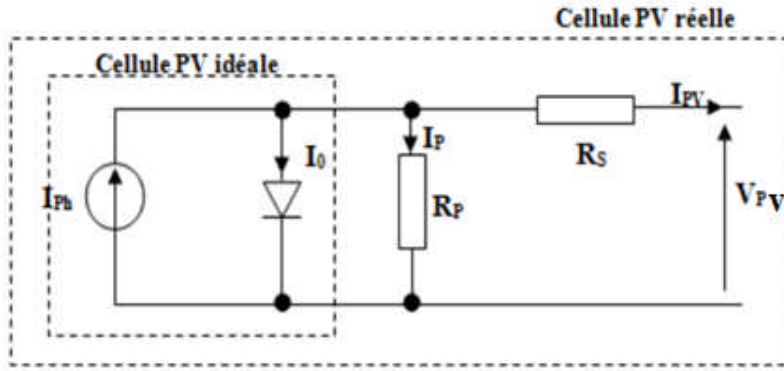


Figure III.1: Modèle équivalent d'une cellule PV

Dans la Figure (III.1), en appliquant la loi de Kirchhoff, le courant sera obtenu par l'équation suivante

$$I_{pv} = I_{ph} - I_0 - I_p \quad (III.1)$$

Avec :

$I_{ph}$ : Est un courant généré par la lumière ou le photo courant.

$I_p$ : Courant qui circule dans la résistance parallèle, est donnée par l'équation suivante

$$I_p = \frac{V + I.R_s}{R_p} \quad (III.2)$$

$I_0$ : Le courant de la diode qui est proportionnel au courant de saturation, il est donné par l'équation suivante :

$$I_0 = I_s \left[ \exp\left(\frac{q.(V + I.R_s)}{K.T_c.A}\right) - 1 \right] \quad (III.3)$$

Avec :

$I_s$  : est le courant de saturation inverse en ampère (A)

$q$ : charge d'électrons ( $1,6 \times 10^{-19}$  C)

$k$ : constante de Boltzmann ( $1,38 \times 10^{-23}$  J / K)

$T_c$ : est une température de cellule en Kelvin (K)

$A$ : est un facteur idéal qui dépend de la technologie PV et est répertorié dans le tableau I. [33]

$R_s$ : est une résistance série ( $\Omega$ )

Nous remplaçons dans l'équation (III.1), l'équation caractéristique tension-courant d'une cellule solaire est donnée comme suit :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_s \left[ \exp\left(\frac{q.(V + I.R_s)}{K.T_c.A}\right) - 1 \right] - \frac{(V + I.R_s)}{R_p} \quad (III.4)$$

La photo courant dépend principalement de l'ensoleillement et de la température de fonctionnement de la cellule, qui est décrite par l'équation suivante :

$$I_{Ph} = [I_{sc} + K_i \cdot (T_c - T_{ref})] \cdot \frac{G}{G_{ref}} \quad (III.5)$$

$I_{sc}$ : Est le courant de court-circuit de la cellule à 25 ° C et 1000W/m<sup>2</sup>,

$K_i$ : Le coefficient de température du courant de court-circuit de la cellule,

$T_{ref}$ : est la température de référence de la cellule, en Kelvin (K) (= 25C ° + 273),

G: est l'ensoleillement en watt /mètre carré (W/m<sup>2</sup>),

$G_{ref}$ : est l'insolation de référence de la cellule (1000W/m<sup>2</sup>),

D'autre part, le courant de saturation de la cellule varie avec la température de la cellule, qui est décrite comme suit

$$I_s = I_{sc} \left(\frac{T_c}{T_{ref}}\right)^3 \exp \left[ \frac{q \cdot E_g}{K \cdot A} \left( \frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T_c} \right) \right] \quad (III.6)$$

Où

$I_{sc}$ : le courant de saturation inverse de la cellule à une température de référence et un rayonnement solaire

$E_g$ : est l'énergie de gap du semi-conducteur utilisé dans la cellule en électronvolt (eV)

Le courant de saturation inverse est donné par l'équation suivante

$$I_{sc} = \frac{I_{sc}}{\exp\left(\frac{q \cdot V_{oc}}{N_s \cdot A \cdot K \cdot T_c}\right) - 1} \quad (III.7)$$

Où

$N_s$ : nombre des cellules en série d'un module PV

Toutes les fonctions décrites dans la section sont représentées dans l'organigramme suivant :



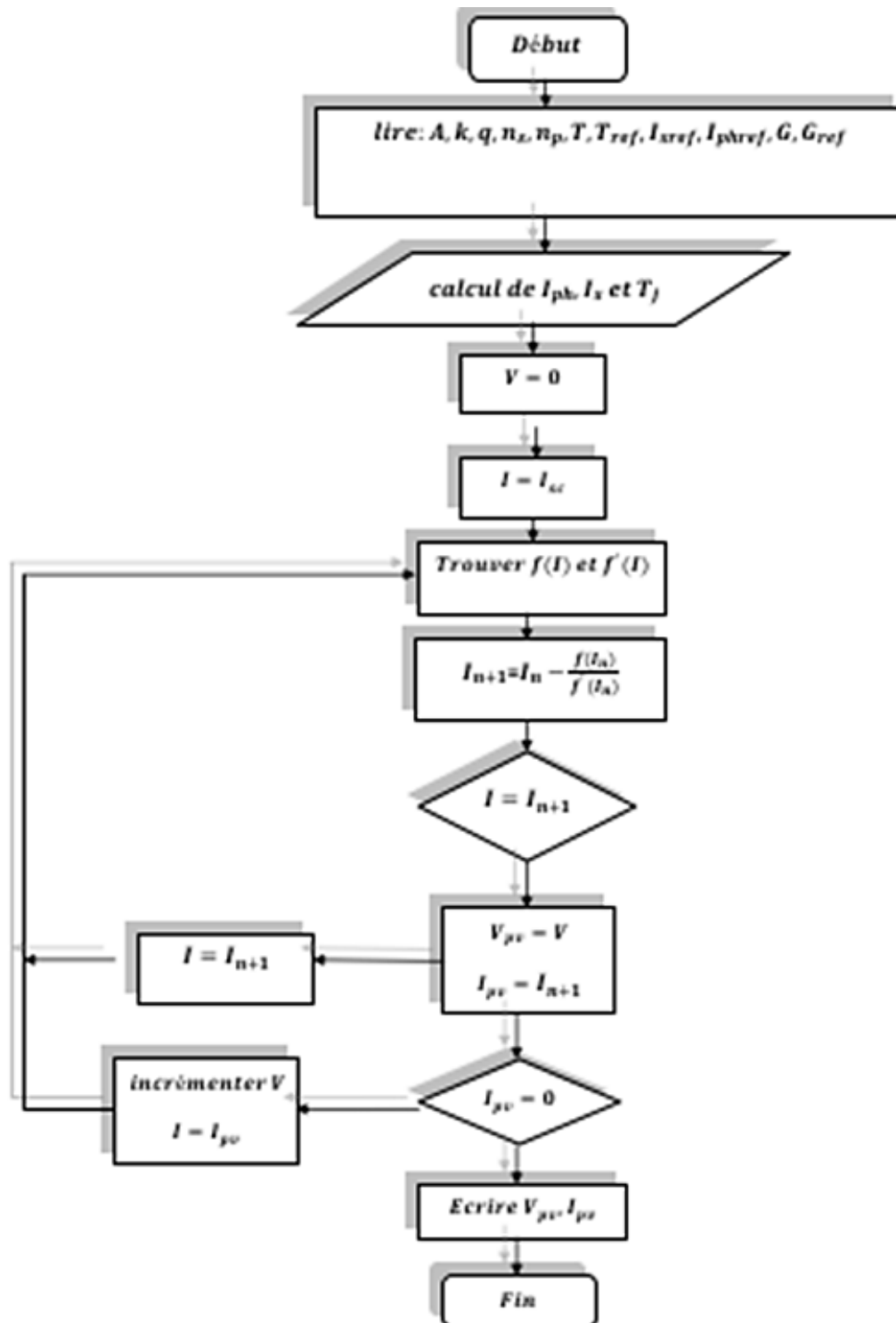


Figure III.2 : Organigramme de calcul de courant et tension sortie du module.

### III.3. CONVERTISSEUR SURVOLTEUR (BOOST) DC/DC :

Un convertisseur Boost est connu par le nom d'élevateur de tension, permet d'augmenter la tension fournie par la cellule photovoltaïque, ainsi diminuer le nombre de cellule nécessaires pour atteindre le niveau de tension désiré [34]. La Figure (III.2), représente le circuit électrique du Boost.

Le fonctionnement d'un convertisseur survolteur (Boost) peut être divisé en deux phases distinctes:

- Une phase d'accumulation d'énergie : lorsque l'interrupteur semi-conducteur est fermé (état passant), cela entraîne l'augmentation du courant dans l'inductance donc le stockage d'une quantité d'énergie sous forme d'énergie magnétique. La diode D est alors bloquée la charge est alors déconnectée de l'alimentation.
- Lorsque l'interrupteur semi-conducteur est ouvert, l'inductance se trouve alors en série avec le générateur et sa f.é.m. s'additionne à celle du générateur (effet survolteur). Le courant traversant l'inductance traverse ensuite la diode D, le condensateur C et la charge R. Il en résulte un transfert de l'énergie accumulée dans l'inductance vers la capacité. Quand un convertisseur Boost travaille en mode de conduction continue, le courant  $I_L$  traversant l'inductance ne s'annule jamais.

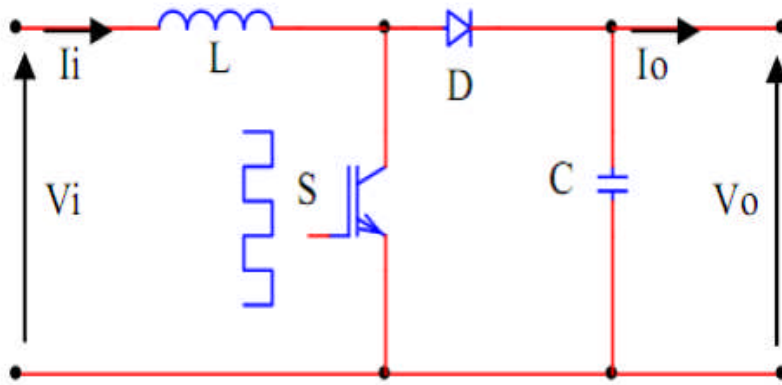


Figure III .3 électrique équivalent du convertisseur Boost

La tension et le courant de la charge du convertisseur survolteur en conduction continue sont donnés par les équations suivantes :

$$V_0 = \frac{1}{1-\alpha} V_i \text{ (III.8)}$$

$$I_0 = (1 - \alpha) i_l \text{ (III.9)}$$

$\alpha$ : est le rapport cyclique

### III.3.1. Principe de fonctionnement

On utilise un convertisseur DC/DC lorsqu'on désire augmenter (dans notre cas) ou diminuer la tension disponible d'une source continue. Cette configuration permet une simple connexion directe pour effectuer le transfert d'énergie du GPV à la charge. Cependant, les caractéristiques non-linéaires du module photovoltaïque et sa sensibilité aux conditions extérieures, comme l'éclairement et la température, induisent des pertes énergétiques.

Cette structure est celle d'un système autonome et peut être utilisée aussi pour un système connecté au réseau. Ce système permet le plus souvent d'alimenter une batterie pour stocker de l'énergie ou une charge qui ne supporte pas les fluctuations de la tension (Ballast,...).

L'utilisation d'une commande MPPT qui permet de rechercher le point de puissance maximale que peut fournir un panneau solaire photovoltaïque s'avère nécessaire et important. L'algorithme de recherche MPPT peut être plus ou moins complexe en fonction du type d'implantation choisie et des performances recherchées. Cependant au final, tous les algorithmes performants doivent jouer sur la variation du rapport cyclique du convertisseur de puissance associé.

Il existe dans la littérature de nombreuses recherches sur les commandes MPPT afin de trouver un système optimal permettant une recherche du point de puissance maximale. Les commandes MPPT choisies pour notre étude, sont toutes basées sur une commande extrême de type Perturbe & Observe (P&O) [35].

#### III.3.2. La command 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.

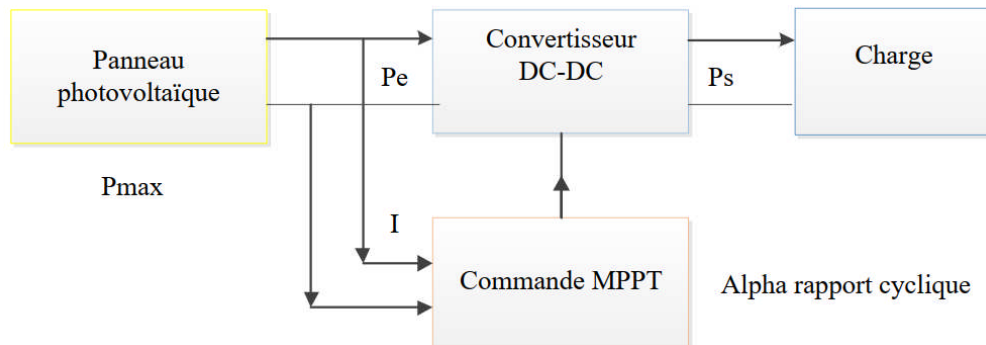


Figure III.4 : Chaîne de conversion d'énergie solaire comprenant une commande MPPT

Dans le but d'optimiser l'investissement dans le générateur photovoltaïque, on souhaite toujours faire fonctionner celui-ci à son point de puissance maximale (MPP).

#### III.3.3.Méthodes de recherche du point optimal de fonctionnement

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 éclairage), la commande du convertisseur place le système au point de fonctionnement maximum ( $V_{mpp}$ ,  $I_{mpp}$ ). [36] L'adaptation d'impédance est souvent sous forme d'un convertisseur DC-DC comme représenté sur la figure (III.5)

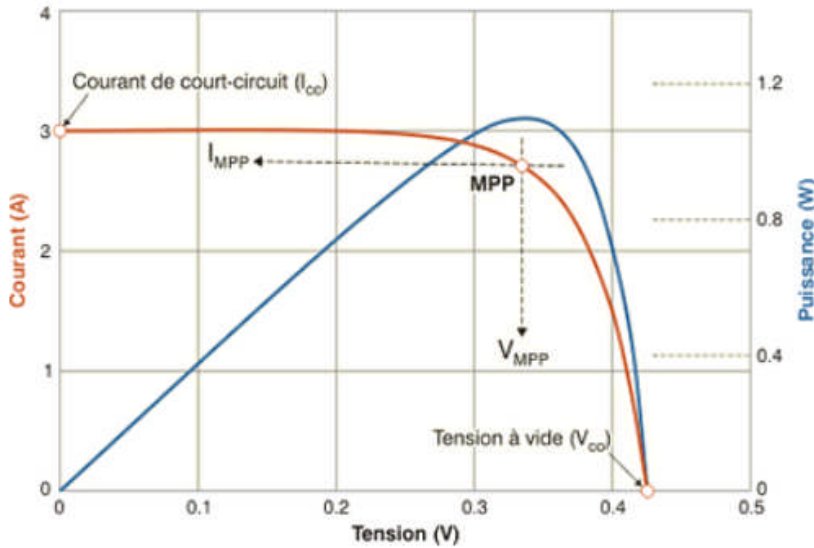


Figure III .5: Courbe caractéristique de puissance d'un GPV[37].

### III.3.4.Algorithmes de commande MPPT

Dans la littérature, nous pouvons trouver différents types d'algorithmes effectuant la recherche du PPM. Les trois méthodes les plus couramment rencontrées sont communément appelées respectivement : Hill Climbing, Perturb&Observ (P&O) et Incrément de conductance (INC).

Dans notre travail on se limite à la méthode de perturbation et observation (P&O) qui est très simple à implanter et de bon rendement. Pour une meilleure compréhension de cette commande. Le diagramme de l'algorithme P et O est représenté par la figure (III.5).

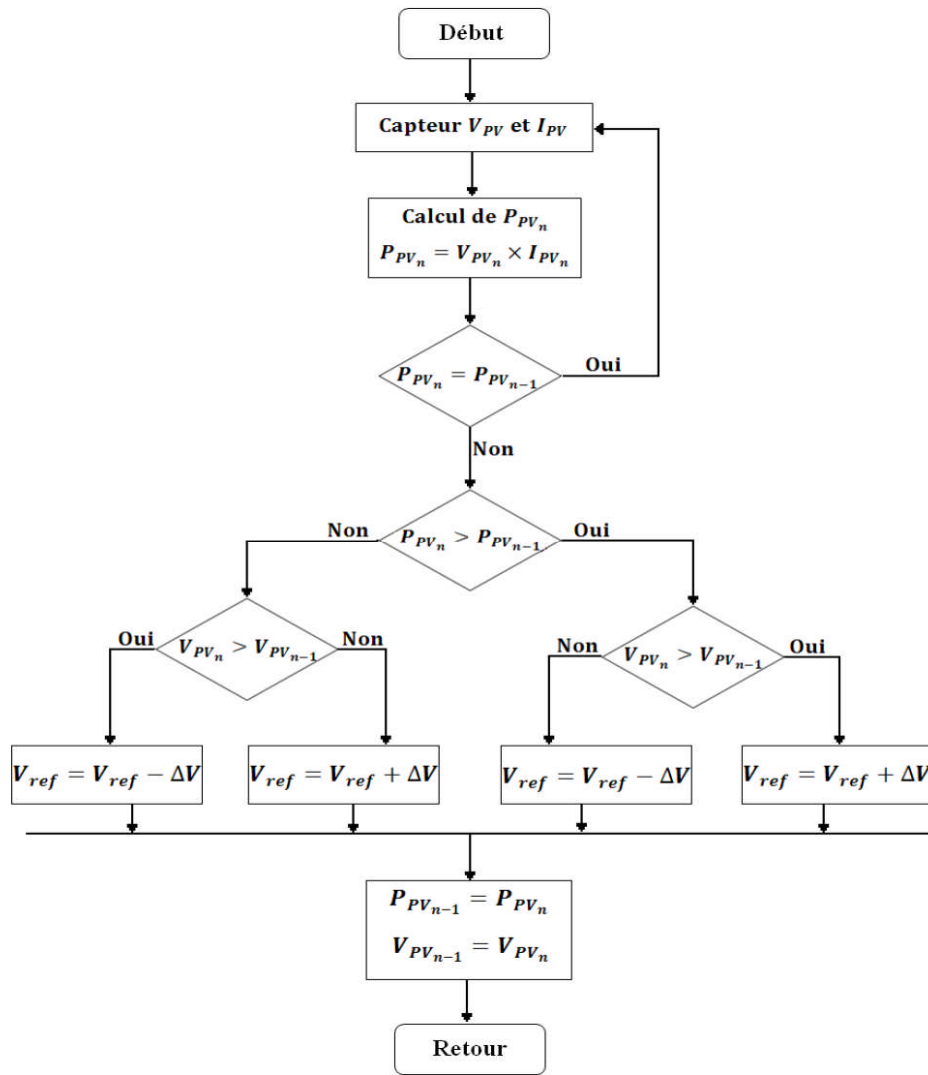


Figure III.6 : Organigramme de la méthode P&O.

### III.3.5. Principe de la commande ‘‘Perturbation et Observation’’ (P&O)

Cette méthode fonctionne en observant la variation de la puissance à la sortie du panneau photovoltaïque. Sur la figure(III.5) on voit que si la tension de fonctionnement varie dans une direction donnée ce qui implique que la puissance augmente, la variation doit alors se déplacer vers le point de fonctionnement (PPM).L’algorithme P&O continuera à observer la variation de la tension dans la même direction.

Par contre, si la puissance diminue, alors la variation est éloignée du point de fonctionnement du PPM. L’algorithme inversera alors la direction de la variation suivante .Cet algorithme est résumé sur la figure (III.6). Le processus est répété périodiquement jusqu’à ce que le PPM soit atteinte. Le système oscille alors autour du PPM, ce qui provoque des pertes de puissance .L’oscillation peut être minimisée en diminuant la taille de la variation. Cependant, une taille de variation trop petite ralentit considérablement la poursuite du PPM. Il existe alors un compromis entre précision et rapidité. [38]

### III.4. CONVERTISSEUR DC/AC

Un convertisseur DC/AC (onduleur de tension) est essentiellement utilisé pour fournir une tension ou un courant alternatif afin d'assurer l'alimentation en énergie des charges critiques (télécommunication,...) pendant la coupure du réseau électrique ou une alimentation permanente pour les systèmes autonomes (centrales photovoltaïques, engins aérospatiaux, ) [39].

Les trois principaux éléments qui constituent un onduleur sont les suivants:

- Source de tension continue (par exemple: batterie) ;
- Convertisseur DC/AC ;
- Filtre LC ou L ;

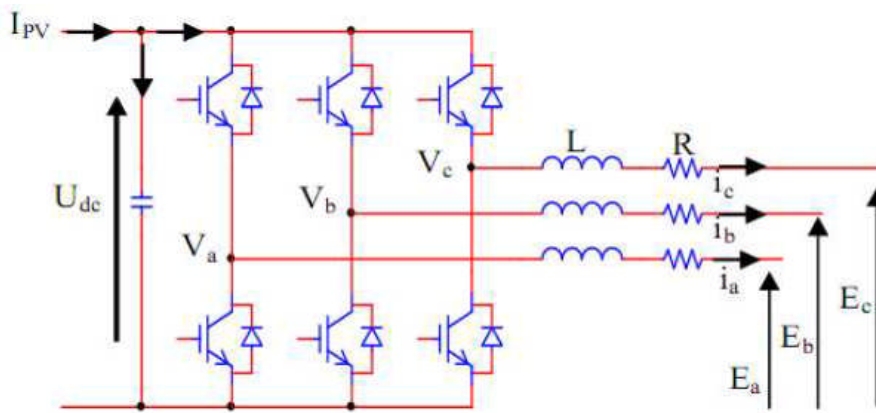


Figure III.7: Schéma équivalent d'un onduleur avec filtre L.

L'onduleur de tension impose à sa sortie un système de tensions sous forme de créneaux modulés en largeur d'impulsions (MLI\* ou PWM\* en anglais). Ces créneaux ne posent aucun problème pour l'alimentation d'un moteur, mais sont incompatibles avec les tensions sinusoïdales du réseau.

On place alors entre chaque sortie de l'onduleur et chaque phase du réseau (onduleur monophasé ou triphasé) une inductance qui joue le rôle de filtre et permet à l'onduleur de fournir au réseau des courants quasi sinusoïdaux.

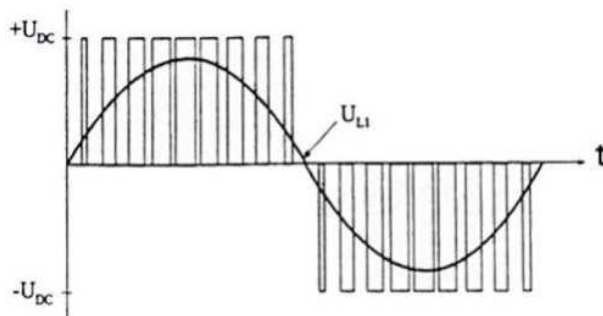


Figure III.8: Tension à la sortie d'un onduleur non filtrée et filtrée.

### III.4.1. Stratégie de Commande de l'onduleur coté réseau

La structure du système de commande de l'onduleur peut être séparée en deux sous-système seyant des dynamiques différentes : le système rapide lié aux courants et le système lent qui est associé à la tension continue. De ce fait, une synthétisation de deux régulateurs pour la boucle des courants, et pour la boucle externe de la tension continue peut se faire. La performance de la boucle des courants joue un rôle essentiel dans la performance globale du système ; c'est pourquoi une commande ayant une réponse rapide et un bon comportement en état stationnaire s'avère nécessaire. Pour le réglage de la tension continue, l'utilisation de commandes classiques, en particulier du type proportionnel intégral, semble être suffisante pour obtenir des performances acceptables [40].

### III.4.2. Objectif de la commande de l'onduleur

Le but de la commande est de gérer l'ordre d'ouverture et de fermeture des interrupteurs de sorte que la tension créée par l'onduleur soit la plus proche de la tension de référence. Ils existent dans différentes méthodes dans la littérature peuvent être utilisées [41].

- Commande par hystérésis ;
- Commande par MLI (Modulation de Largeur d'Impulsion).

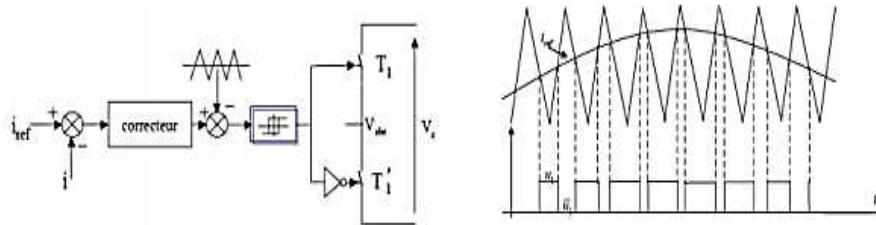
Ce type de modulation est souvent utilisé pour générer une tension triphasée à fréquence et amplitude variables. Il existe 3 manières de gérer la commutation des interrupteurs ou des transistors de puissance [43] :

- MLI à commande par sinusoïde ;
- MLI synchrone pour limiter les harmoniques ;
- MLI asynchrone pour améliorer la réaction du moteur à toute modification rapide de la commande du variateur de fréquence.

Le principe de commande de l'onduleur réside dans l'utilisation d'un comparateur de tensions. Ce comparateur superpose à trois tensions sinusoïdales de référence une tension de forme triangulaire (porteuse). La fréquence des trois sinusoïdes de référence correspond à celle des tensions souhaitées à la sortie de l'onduleur. Les intersections entre les sinusoïdes et l'onde triangulaire détermine l'allumage ou l'extinction des interrupteurs (Thyristors, ou des transistors de puissance) selon le cas.

La méthode basée sur la MLI met en œuvre d'abord un régulateur qui, à partir de l'écart entre le courant et sa référence, détermine la tension de référence de l'onduleur

(modulatrice). Cette dernière est ensuite comparée avec un signal en dent de scie à fréquence élevée (porteuse). La Sortie du comparateur fournit l'ordre de commande des interrupteurs. Le schéma de principe de cette méthode est donné sur la figure suivante [40] :



**Figure III.9 : Commande des interrupteurs et contrôle de courant par MLI [42].**

#### III.5. LA CHARGE :

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

#### III.6. LE RESEAU ELECTRIQUE :

Il représente le réseau électrique de distribution publique d'amplitude  $V_R = 220V$  et de fréquence  $f = 50Hz$ .

#### III.7. SIMULATION D'UN SYSTEME PHOTOVOLTAÏQUE RACCORDE AU RESEAU

Dans cette partie, on présentera une étude de simulation d'un système photovoltaïque raccordé au réseau adapté par une commande MPPT numérique « perturbation et observation ». Ce système comprend un générateur photovoltaïque, un convertisseur survolteur « boost », une commande MPPT « perturbation et observation », un onduleur triphasé ainsi qu'un réseau.

Une commande des convertisseurs sera développée dans le but d'extraire et d'injecter le maximum de puissance du GPV. L'onduleur, chargé de transférer l'énergie produite des modules PV dans le réseau doit garder la tension alternative constante. Le contrôle de la puissance, ainsi que la modélisation et simulation seront effectués sous le logiciel Matlab/Simulink. Les grandeurs contrôlées sont la tension efficace, la fréquence et la phase.

Ce système de contrôle permettra d'injecter la puissance active désirée et de régler la tension au point de raccordement du réseau connecté.

Le contrôle de la puissance, ainsi que la simulation ont été effectués sous le logiciel MATLAB/Simulink.



### III.7.1. L’outil Matlab/Simulink [BEMANA]

MATLAB fait également partie d'un ensemble d'outils intégrés dédiés au traitement du Signal. En complément du noyau de calcul Matlab, l'environnement comprend des modules optionnels qui sont parfaitement intégrés à l'ensemble :

- Une vaste gamme de bibliothèques de fonctions spécialisées (Toolboxes).
- Simulink, un environnement puissant de modélisation basée sur les schémas-blocs et de simulation des systèmes dynamiques linéaires et non linéaires.
- Des bibliothèques de blocs Simulations spécialisés (Blocksets).
- D'autres modules dont un Compilateur, un générateur de code C, un accélérateur.
- Un ensemble d'outils intégrés dédiés au Traitement du Signal : le DSP Workshop.

**SIMULINK** est une plate-forme de simulation multi-domaine et de modélisation des systèmes dynamiques.

Il fournit un environnement graphique et un ensemble de bibliothèques contenant des blocs de modélisation qui permettent le design précis, la simulation, l'implémentation et le contrôle de systèmes de communications et de traitement du signal [44].

### III.8. SYSTEME PHOTOVOLTAÏQUE CONNECTE AU RESEAU PROPOSE :

La figure (III.10) présente le schéma global proposé pour l'étude et la simulation du système photovoltaïque connecté au réseau :

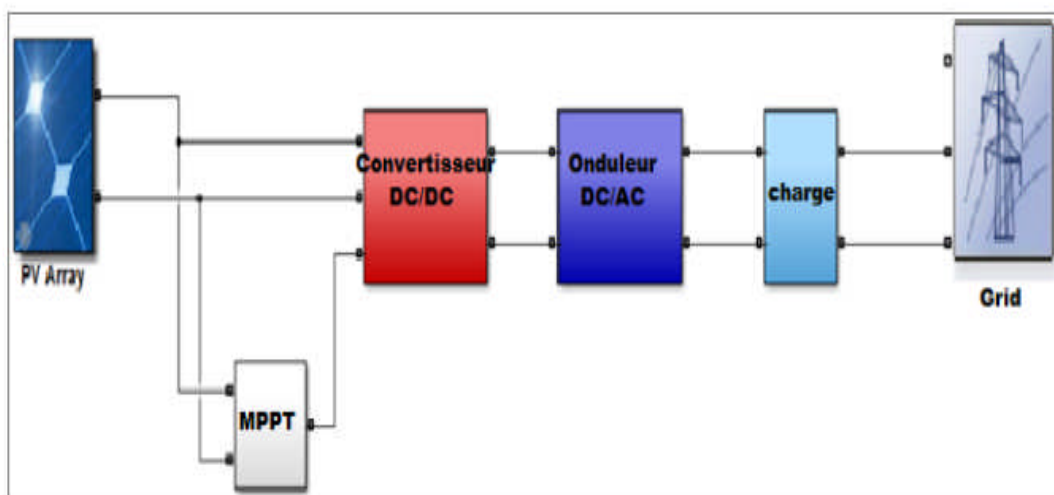


Figure III.10: système photovoltaïque connecté au réseau électrique.

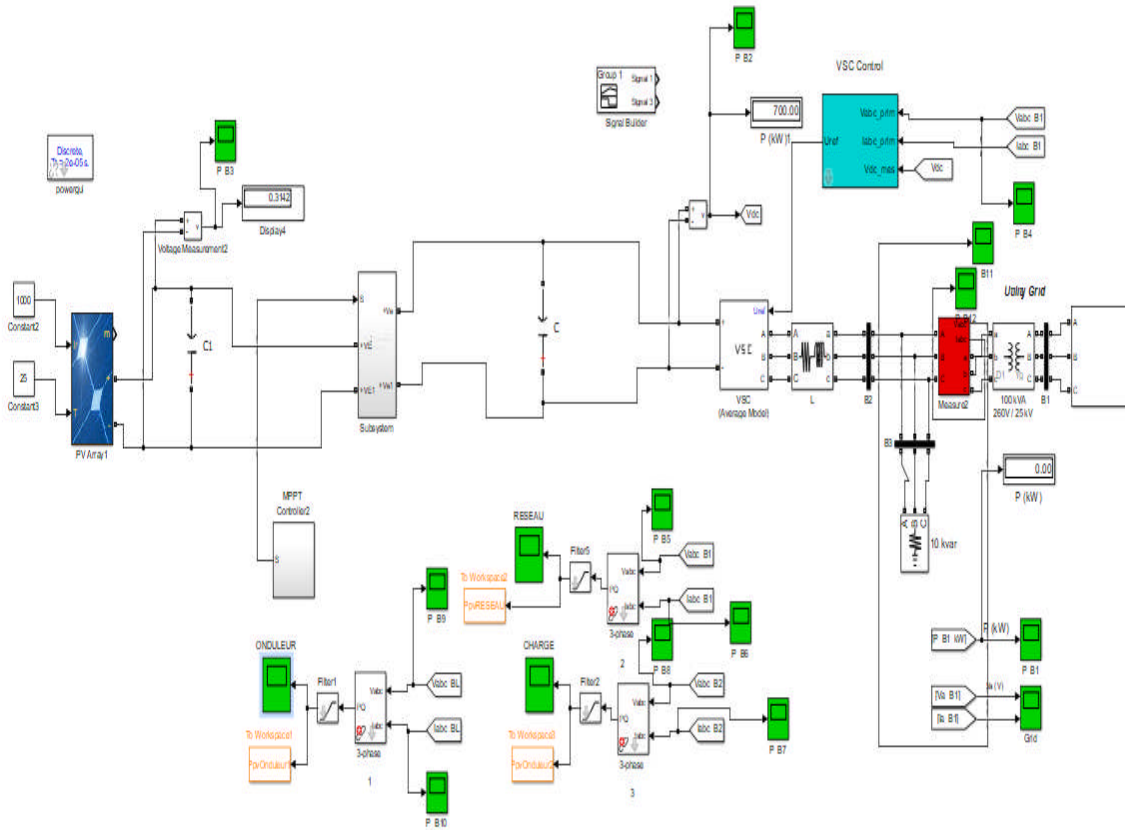


Figure III.11: Schéma Globale de système PV connecté au réseau.

### III.8.1. Description du modèle PV proposé

Les caractéristiques électriques du module photovoltaïque sont données dans le tableau (III.1) suivant :


	<p>Puissance maximale (<math>P_{max} = 85260</math>) (w)                  Tension de crête maximale (<math>V_{mp} = 29</math>) (v)                  Courant de crête maximale (<math>I_{mp} = 7.35</math>) (A)                  Tension de circuit ouvert (<math>V_{oc} = 36.3</math>) (V)                  Courant de court circuit (<math>I_{sc} = 7.84</math>) (A)  <math>N_s=10</math>  <math>N_p=40</math>  <math>T=25^\circ\text{C}</math>  <math>E=1000\text{w}/\text{m}^2</math></p>
---	--

Tableau III.12 : Les caractéristiques électriques du module photovoltaïque.

Le schéma de générateur photovoltaïque sous l'environnement Matlab-Simulink est représenté par la figure (III.13) suivante :

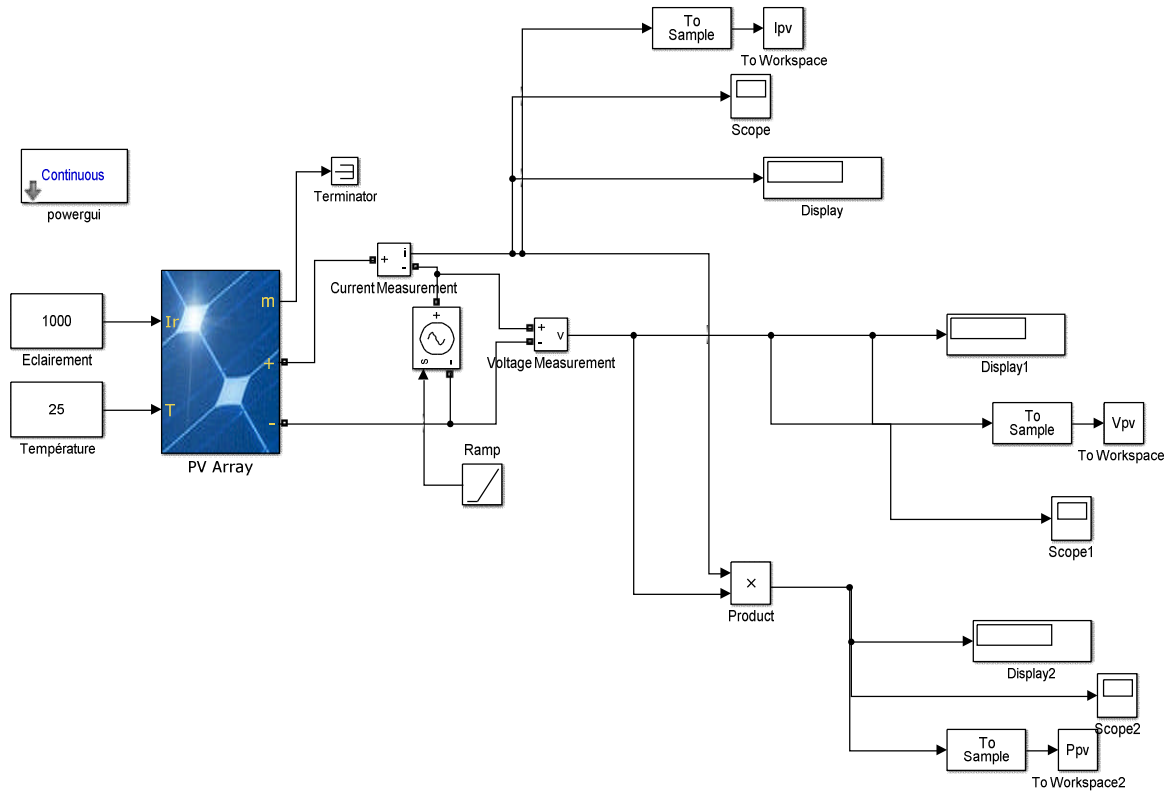
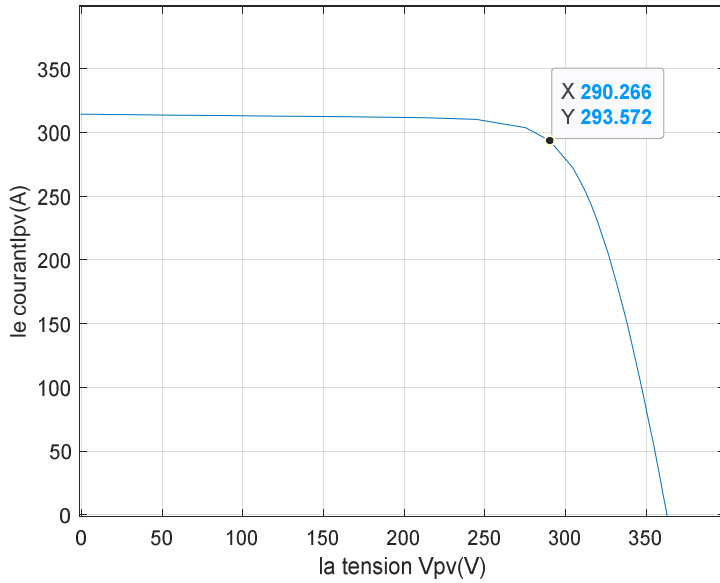


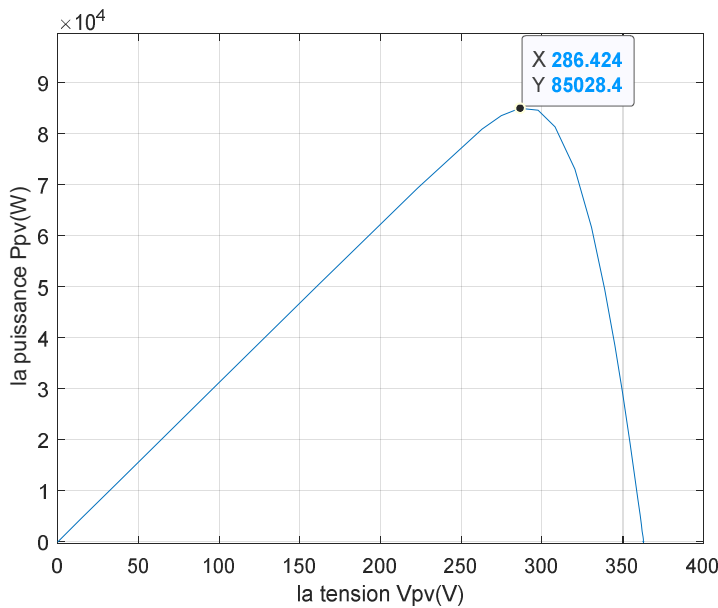
Figure III.13: Schéma de simulation du panneau PV

Pour l'analyse du fonctionnement du panneau photovoltaïque choisi, nous avons procédé à une série de simulations. Les résultats obtenus sont présentés sur les figures suivantes: La figure(III.14) et la figure (III.15), présentent respectivement la caractéristique Courant-Tension et la caractéristique Puissance-Tension du panneau PV pour l'éclairement  $G=1000W/m^2$  et de température  $T_c=25^{\circ}C$ .



**Figure III.14: Caractéristique Courant-Tension du panneau PV.**

$X=290.266$  (A) exprime le courant maximal et  $Y=293.572(V)$  exprime la tension maximal. On remarque que le courant reste constant jusqu'à  $V=285V$  puis il diminue rapidement jusqu'à son annulation



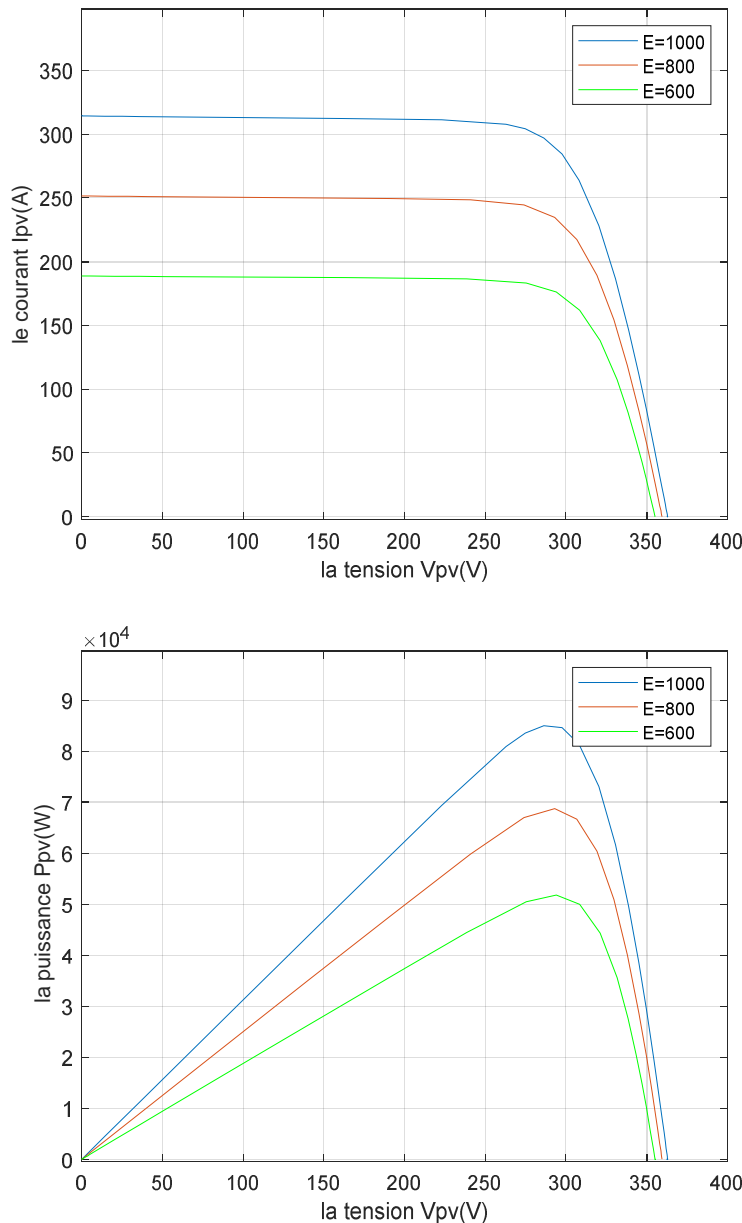
**Figures III.15 : Caractéristique Puissance-Tension du panneau PV**

Le point dans la courbe exprime la valeur de MPPT (maximum power point track)  
 $MPPT=85028.4(W)$

### III.8.1.1. Simulation du générateur PV à éclairement et température variable

Pour constater l'influence des conditions externes de l'éclairement et de la température sur la caractéristique (I-V) (P-V), nous avons adopté les méthodes suivantes :

1. Pour visualiser l'influence de l'éclairement, on a fixé la température a ( $T=25^{\circ}\text{C}$ ) et on fait varier l'éclairement dans une gamme suffisante. la caractéristique ( $I=f(V)$ ) et la caractéristique ( $P=f(V)$ ) sont données par la figure (III.15)



**Figure III.16: Influence de variation de l'éclairement sur les caractéristiques (I-V) et (P-V)**

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

On remarque aussi que l'éclairement influe proportionnellement sur la puissance et la tension de circuit ouvert de générateur photovoltaïque.

2. Pour un éclairement constant ( $E=1000 \text{ W/m}^2$ ), on varie la température afin de voir l'influence de ce dernier par rapport aux caractéristique de générateur PV. En faisant varier la température de  $25^\circ\text{C}$  à  $75^\circ\text{C}$ , la caractéristique ( $I=f(V)$ ) et la caractéristique ( $P=f(V)$ ) sont données par la figure (III.17)

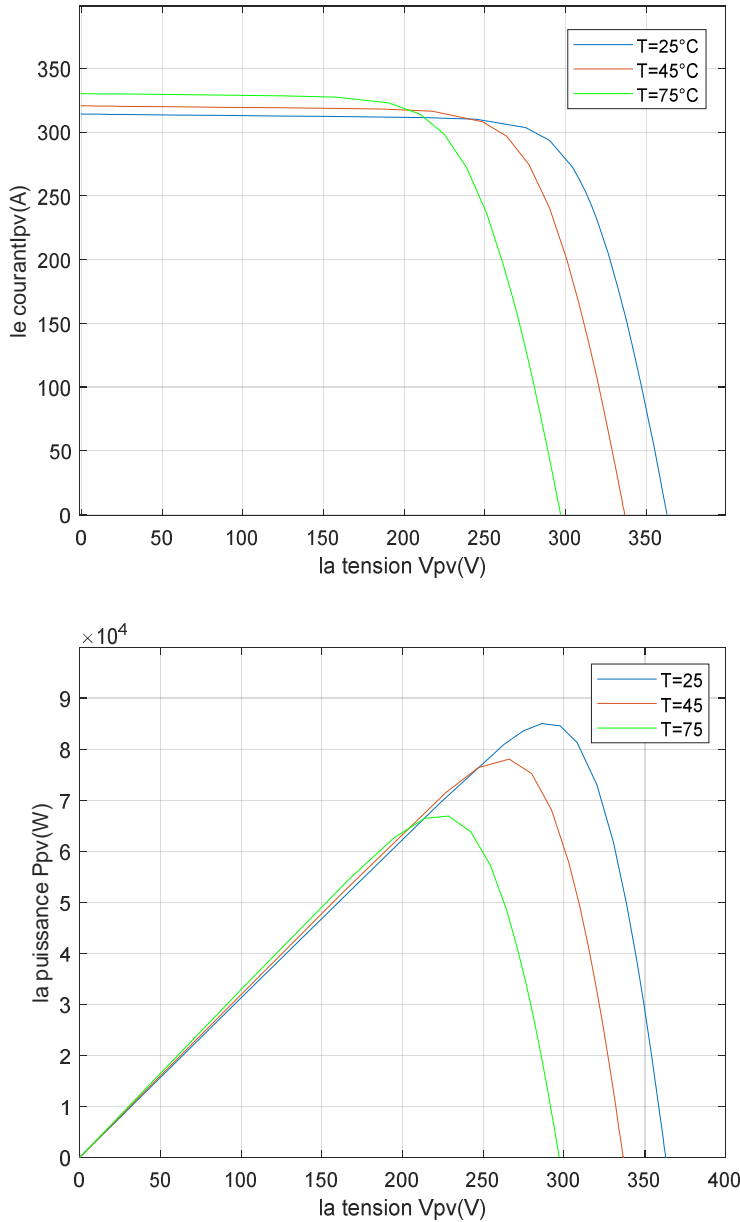


Figure III.17: Influence de variation de température sur les caractéristiques (I-V) et (P-V)

L'augmentation de température fait diminuer la tension du circuit ouvert de générateur photovoltaïque, contrairement au courant de court-circuit qui reste constant.

### III.8.2.Simulation de Hacheur Boost et la commande Mppt

Pour simuler le fonctionnement du hacheur élévateur, nous avons utilisé Matlab/Sim power system pour nous rapprocher du fonctionnement réel, ce qui est présenté par la figure (III.18).

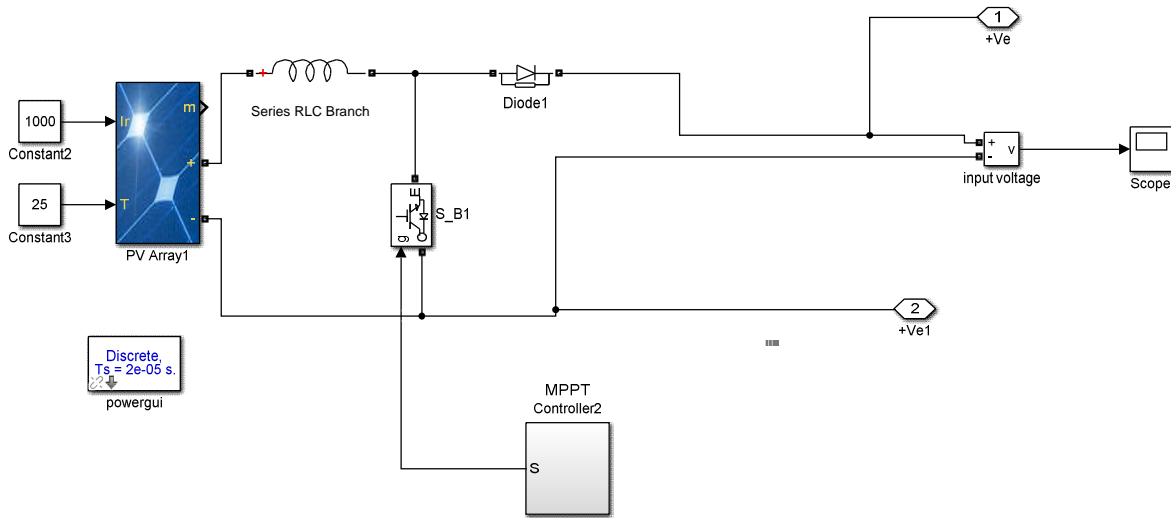


Figure III.18: Block de la simulation du hacheur

Nous avons réalisé le modèle de simulation de l'algorithme P&O. La figure (III.19) illustre le bloc schématique de SIMULINK de la commande de poursuite MPPT

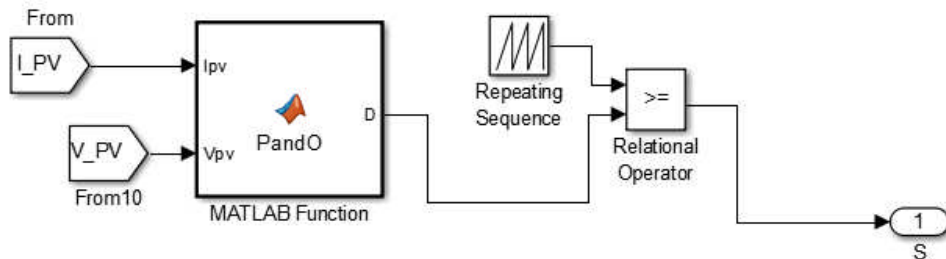


Figure III.19 : Schéma de simulation de l'algorithme

Les résultats de simulation du système PV associé à un convertisseur Boost et commandé par la commande MPPT de type P&O, pour une température de  $T= 25^{\circ}\text{C}$  et une irradiation de  $E=1000 \text{ W/m}^2$  sont illustrés sur les Figures suivantes

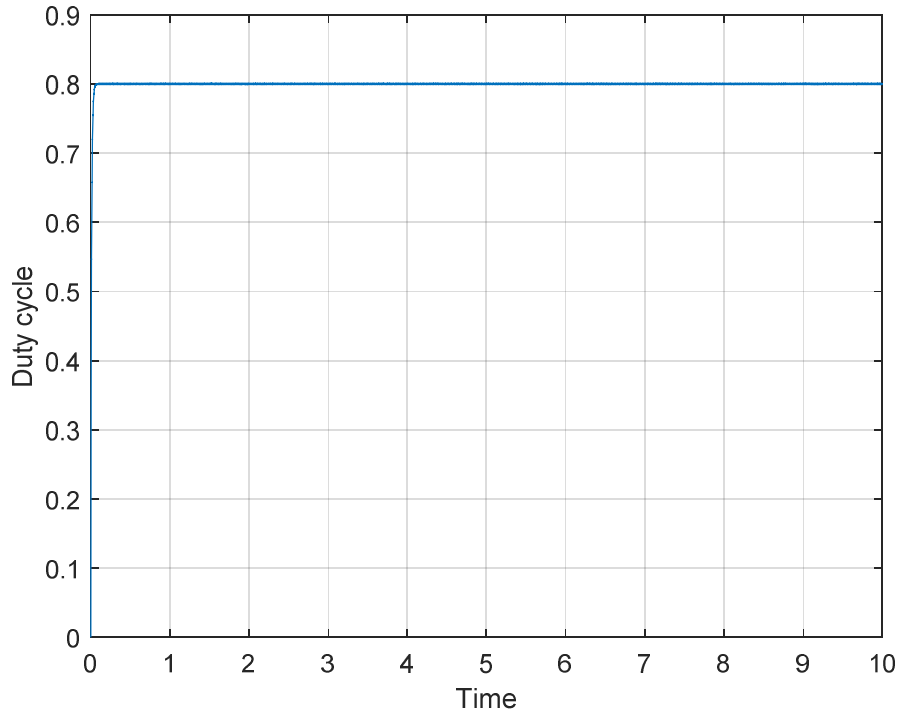


Figure III.20 : Rapport cyclique de convertisseur Boost.

### III.8.3. Résultats de la simulation de l'installation sous différentes conditions métrologique

Différentes simulations sont effectuées pour évaluer les performances des différentes parties du système (panneaux photovoltaïques, convertisseur DC/DC, convertisseur DC/AC, filtre et réseau). Les figures suivantes montrent les résultats obtenus sous différentes conditions métrologiques.

#### III.8.3.1. Simulation de l'installation à éclairement variable et température fixe

Dans le but d'étudier les performances du système, on a appliqué un éclairement variable tel qu'il est donné en Figure (III.21) à une température fixée à  $T_c = 25^\circ\text{C}$ .



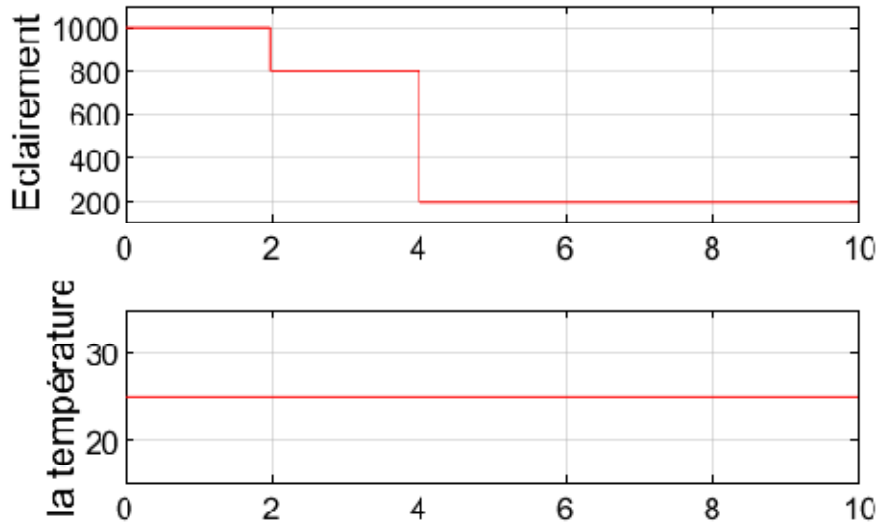


Figure III.21: Variation de l'éclaircissement à une température fixe (25°C).

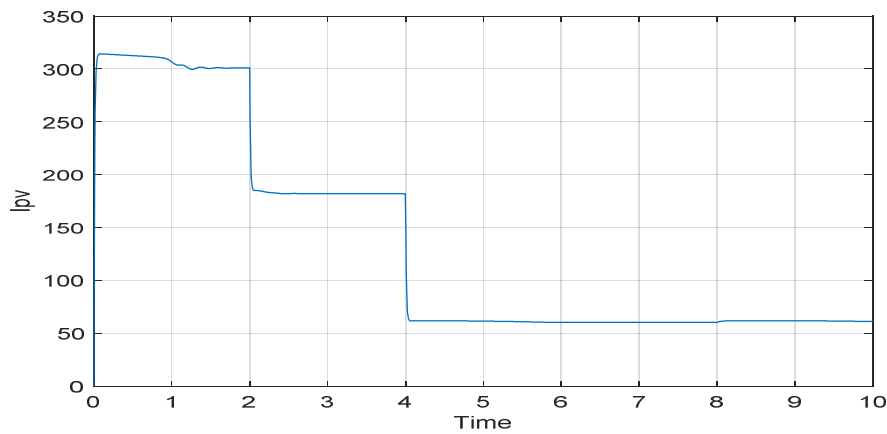


Figure III.22: Allure du courant de panneau photovoltaïque  $I_{pv}$

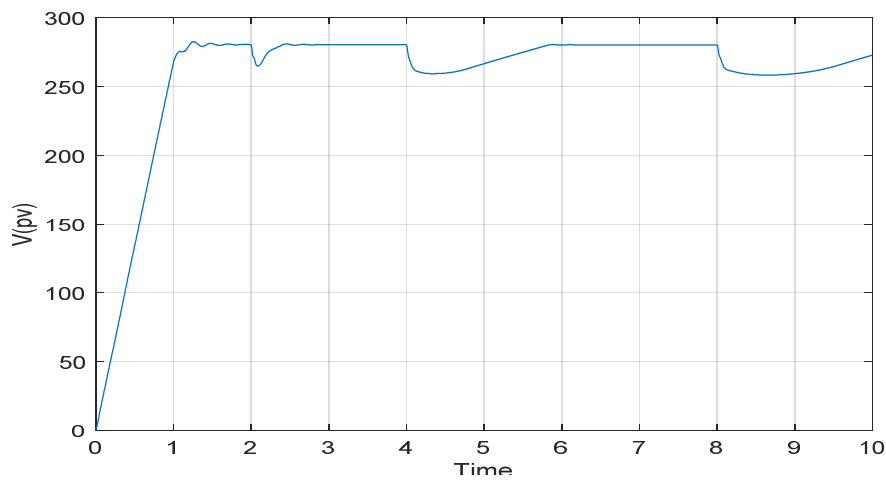


Figure III.23: Allure de la tension de panneau photovoltaïque  $V_{pv}$

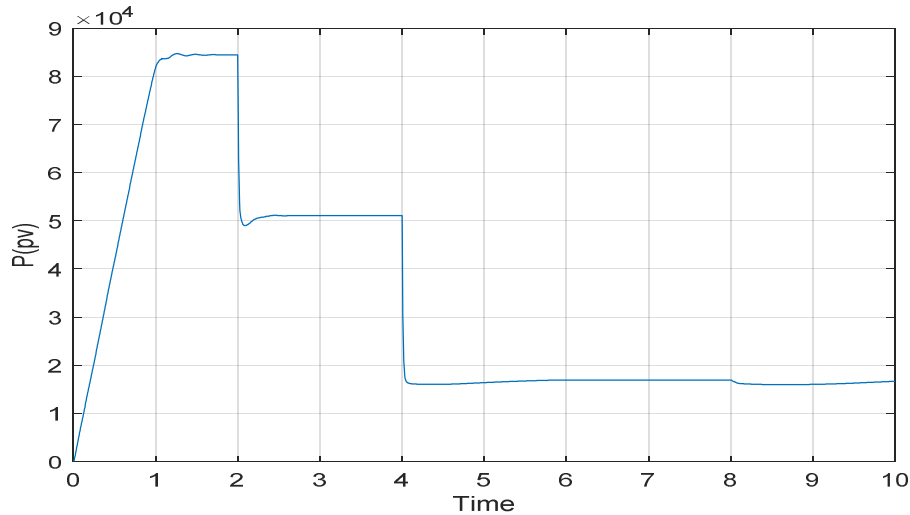


Figure III.24: Allure de la puissance de panneau photovoltaïque  $p_{pv}$

Dans le but d'étudier les performances du système, on a appliqué un éclairement variable tel qu'il est donné en figure (III.21) à une température fixée à 25°C. L'allure de la puissance maximale extraite du générateur photovoltaïque est montrée dans la figure (III.24).

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 P&O détermine continuellement la tension optimale qui donne la puissance maximale.

### III.8.3.2. Simulation à température variable et éclairement constant :

On a appliqué une température variable et un ensoleillement constant de 1000W/m<sup>2</sup> tel qu'il est donné en figure (III.26), pour montrer le fonctionnement au point PPM de l'algorithme P&O.

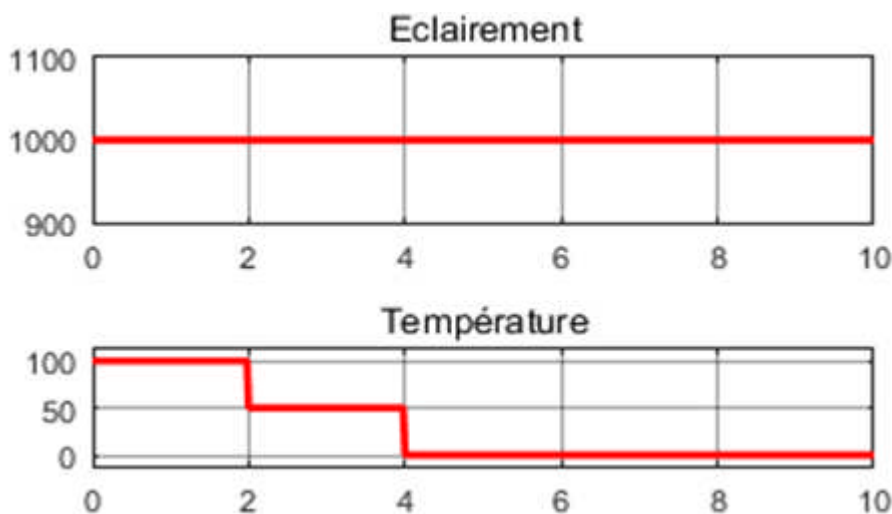


Figure III.25: Variation de la température à un éclairement fixe (1000 W/m<sup>2</sup>).

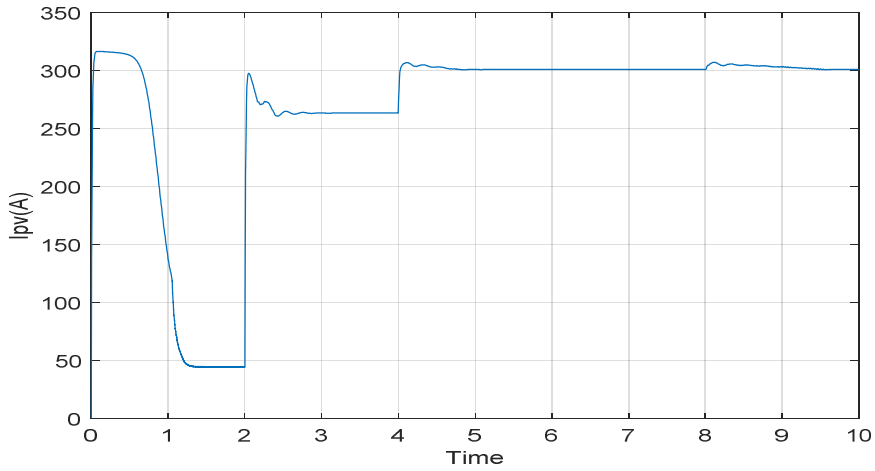


Figure III.26: Allure du courant photovoltaïque  $I_{pv}$

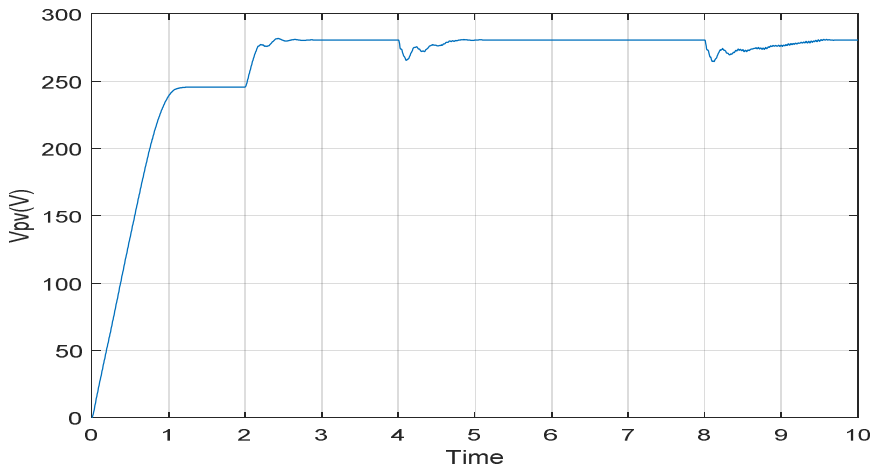


Figure III.27: Allure de la tension photovoltaïque  $V_{pv}$ .

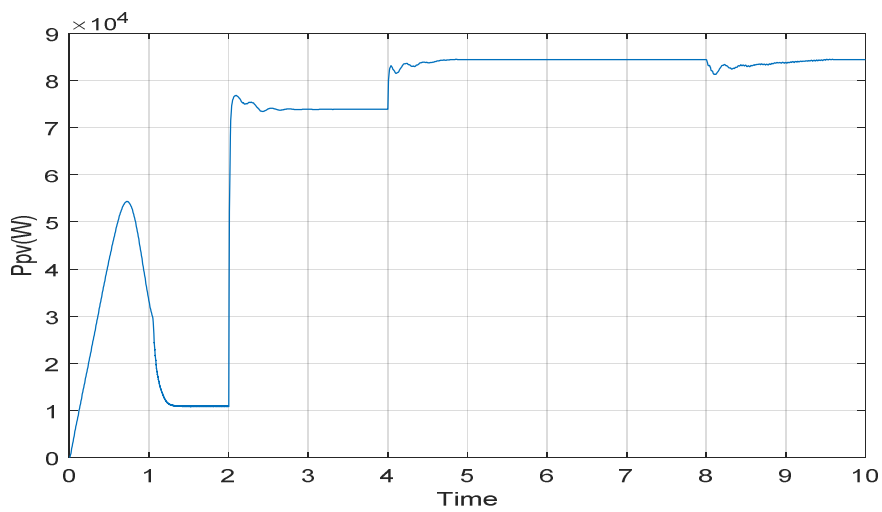


Figure III.28: Allure de la puissance photovoltaïque  $P_{pv}$  à éclairer

On voit bien que la tension augmente avec la diminution de la température et le courant photovoltaïque reste pratiquement inchangeable tel qu'il est représenté sur la figure (III.27). La diminution de la température implique une augmentation de la puissance photovoltaïque produite. Donc le point de puissance maximale se déplace pour rejoindre le nouveau point maximum correspondant à cette température.

#### III.8.3.3. Simulation dans les conditions variables d'ensoleillement et de température

Dans le but d'étudier les performances du système photovoltaïque connecté au réseau, en fonctionnement à puissance maximale, durant une certaine période, nous utiliserons des profils variables d'ensoleillement et de la température qui sont donnés sur les figures (III.30).

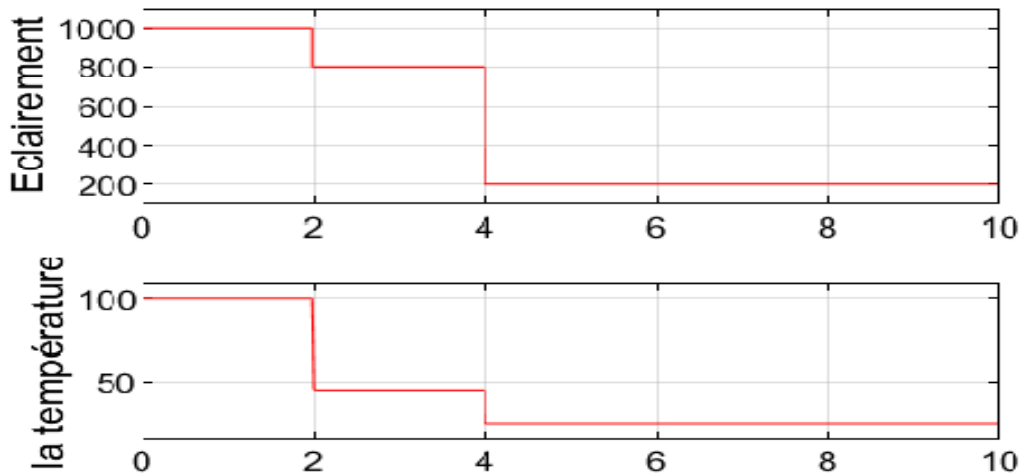


Figure III.39: Variation de la température et l'éclairement.

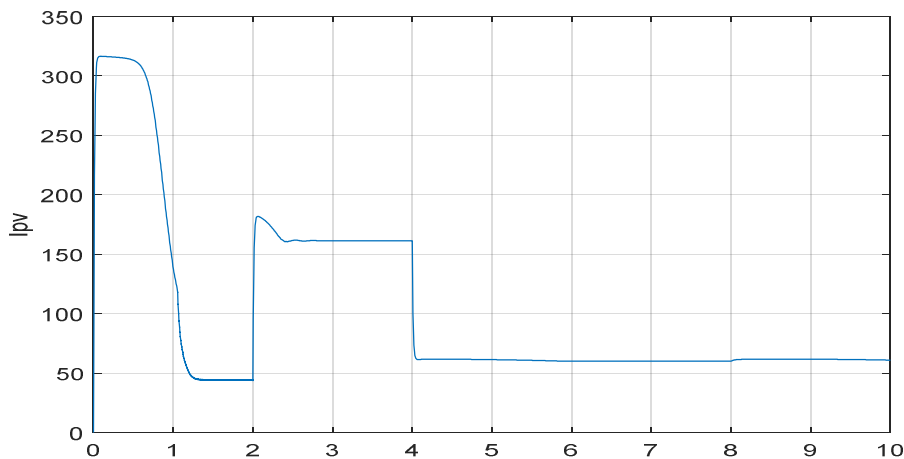


Figure III.30: Allure du courant photovoltaïque  $I_{pv}$

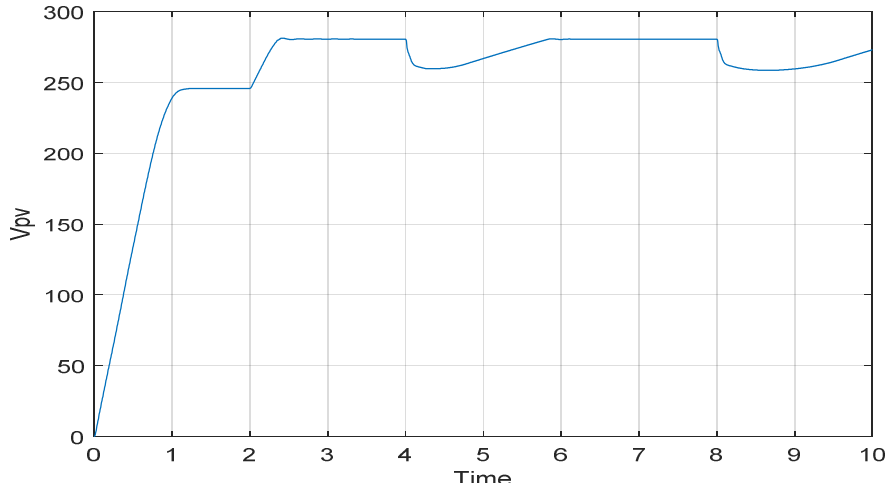


Figure III.31: Allure de la tension du panneau  $V_{pv}$

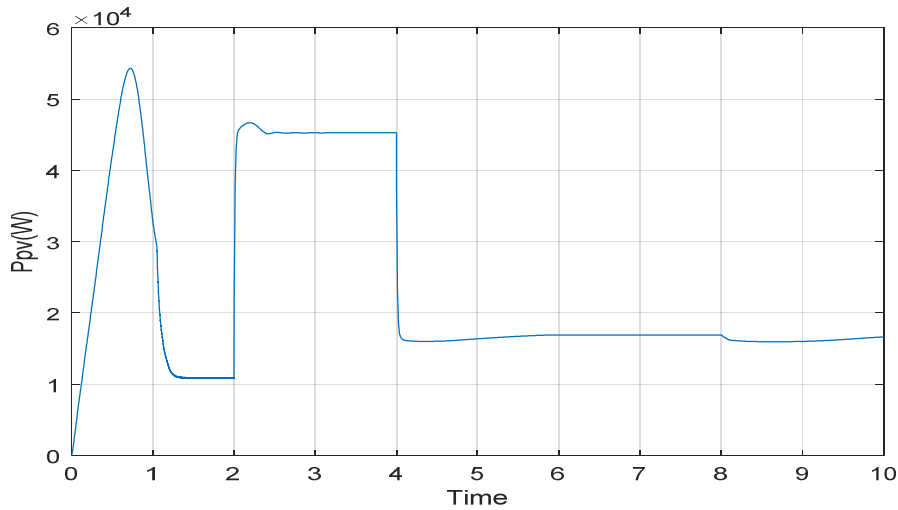


Figure III.32: Allure de la puissance du panneau  $P_{pv}$

La tension aux bornes du bus continu obtenue à partir de la commande MPPT de type perturbation et observation est montrée sur la figure(III.33), elle est bien régulée à sa valeur de référence qui est de 700 V même lors de variations des conditions environnementales. La commande P&O permet d'extraire le MPP même quand les conditions climatiques changent rapidement.

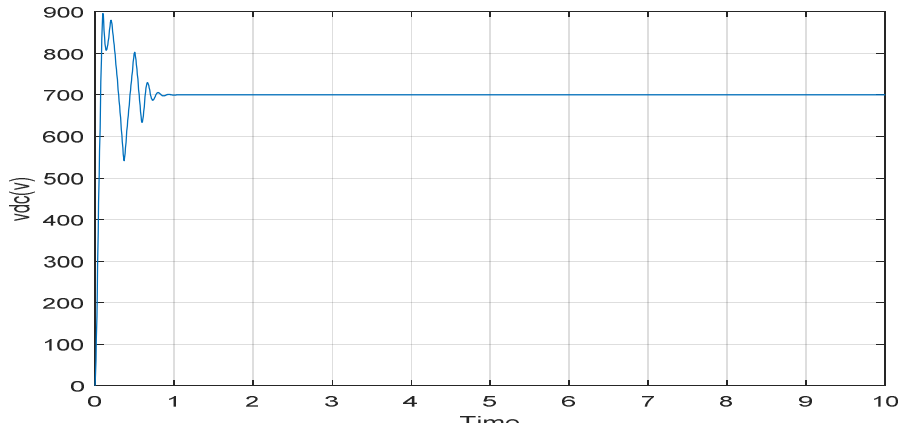


Figure III.33: Allure de la tension du bus  $V_{dc}$ .

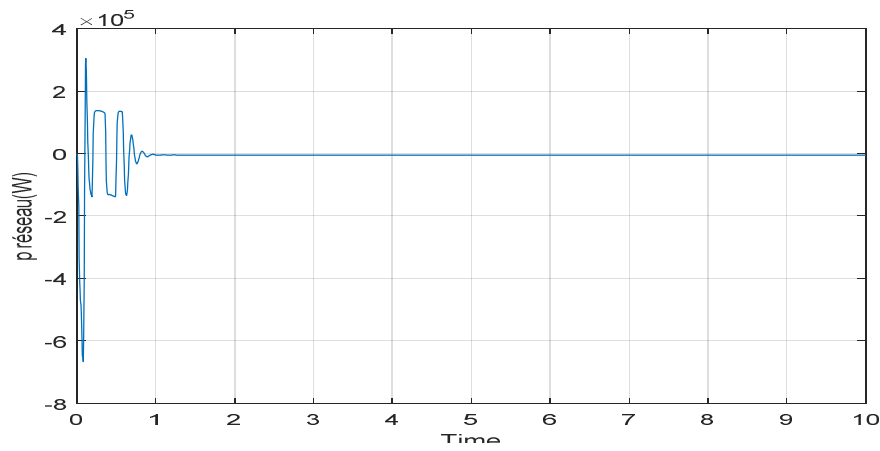


Figure III .34: Allure de la puissance réactive du réseau.

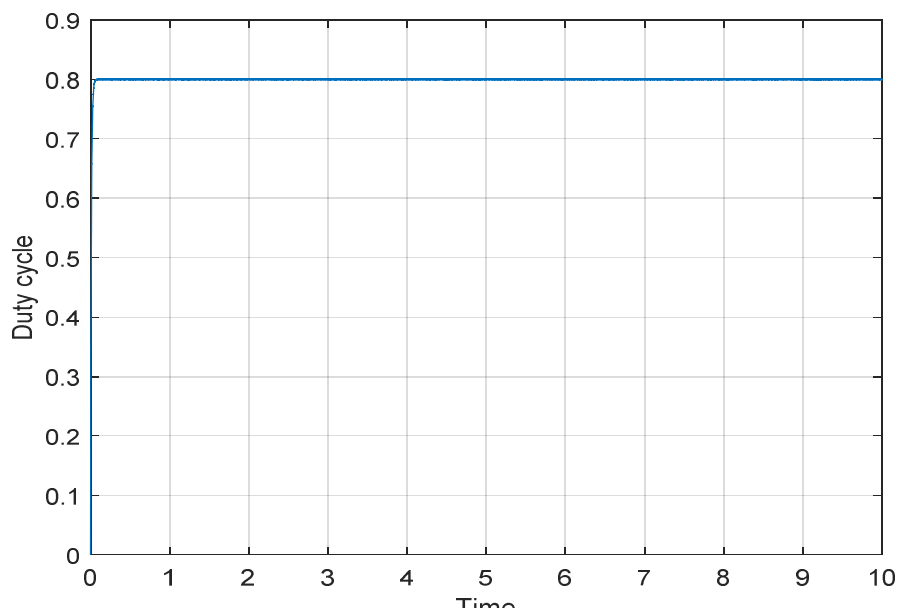
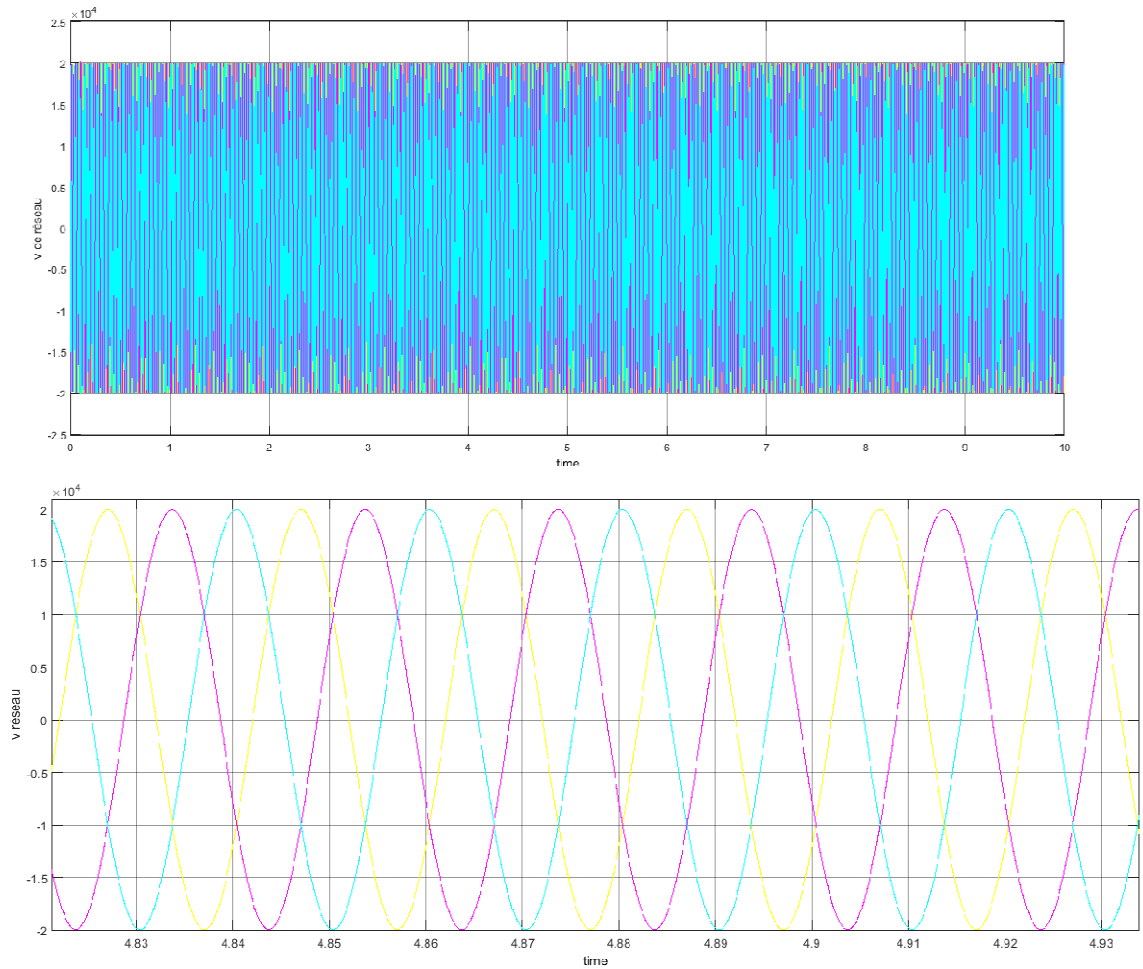
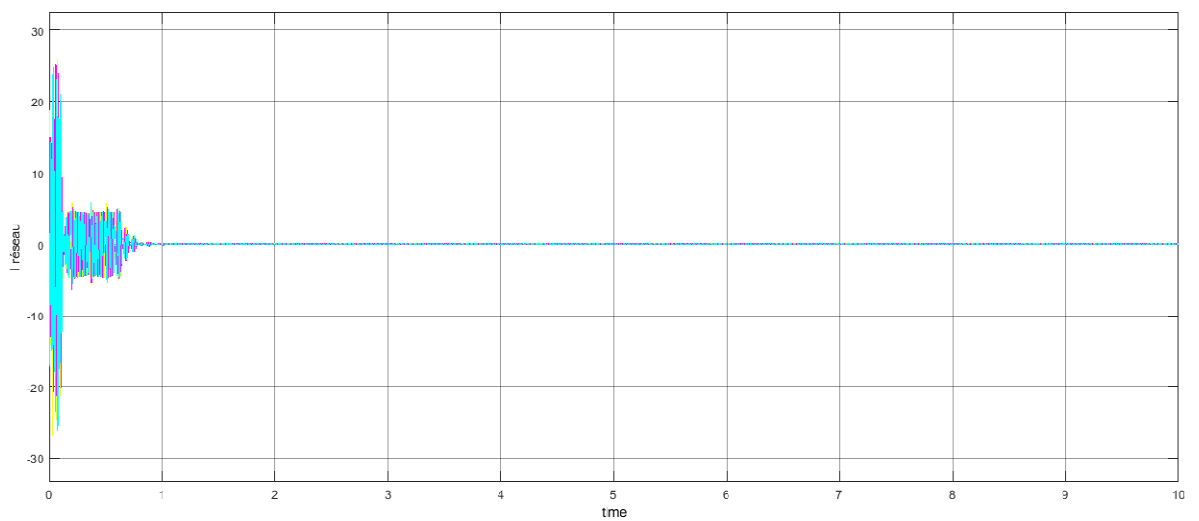


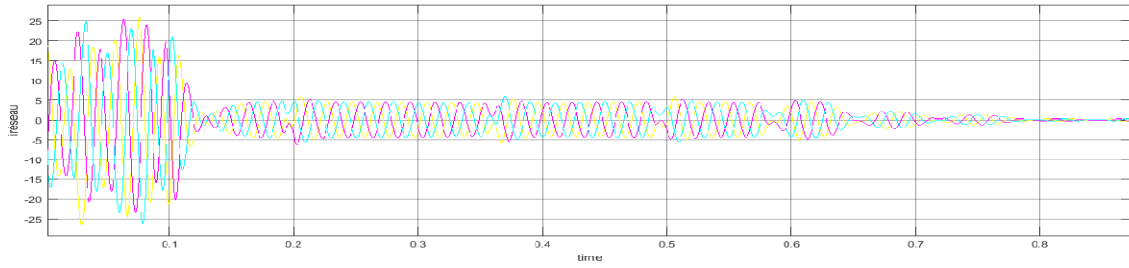
Figure III.35 : Allure du rapport cyclique la commande MPPT(S)



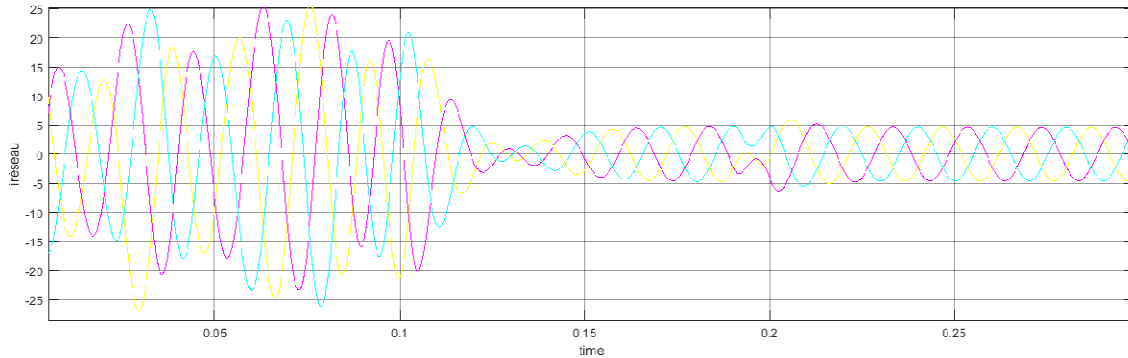
**Figure III.36 : Allure de tension extrait de réseaux.**

La Figure III.36 représente la courbe de tension extrait de réseaux en fonction de temps, On remarque que le système de ce réseau est un système triphasé et la tension est constante, on zoome à la période( $T=4.83$  ;  $T=4.93$ )

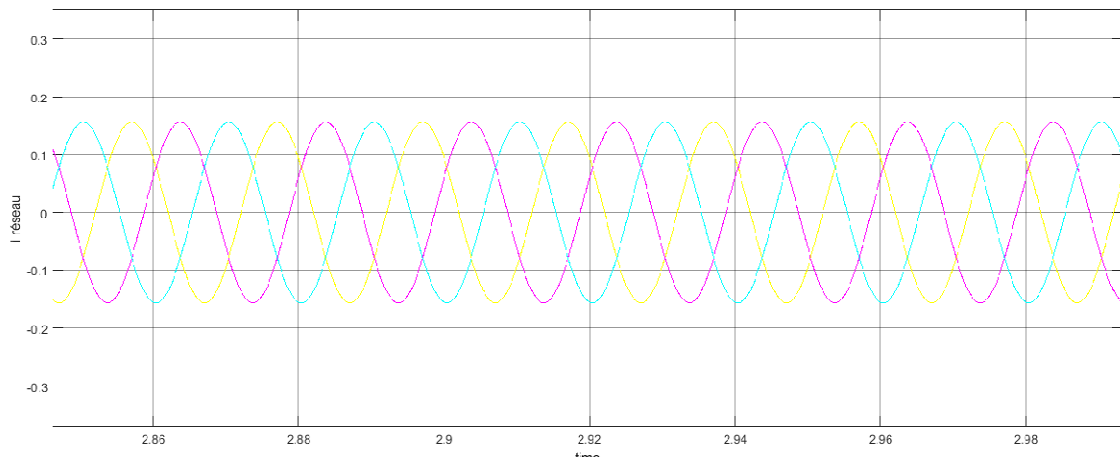




Zoome (T=0.1 ;T=0.8)



Zoome (T=0.05 ; T=0.25)



Zoome(T=2.66 ; T=2.98)

**Figure III.35 : Allure de courant extrait de réseaux.**

La figure explique le courant extrait de réseau dans condition de température et éclairement sont variables, on remarque que la courbe de courant sinusoïdale, d'abord élevée puis presque régulière on zoome par étapes à temps

### III.9. CONCLUSION



Dans ce chapitre, nous avons représenté la modélisation et la simulation de l'ensemble composé de : générateur photovoltaïque, hacheur survolteur et la commande MPPT

« perturbation et observation », l'onduleur. D'après les résultats obtenus de la simulation, on remarque :

Les performances du générateur PV se dégradent avec l'augmentation de la température, la diminution de l'intensité de l'éclairement et les variations de la charge. Les performances du générateur PV sont évaluées à partir des conditions standards (CST) : éclairement  $1000\text{W}/\text{m}^2$ .

Le convertisseur DC-DC et la commande MPPT effectuent correctement leurs rôles. Le convertisseur fournit dans les conditions optimales une tension à sa sortie supérieure à celle fournie par le générateur PV. Température  $25^\circ\text{C}$ .

La commande MPPT adapte le générateur PV à la charge: transfert de la puissance maximale fournie par le générateur PV.

# **Conclusion Générale**

Le travail présenté dans ce mémoire concerne les systèmes photovoltaïques connectés au réseau électrique. Ce dispositif est amené à connaître des développements importants liés essentiellement à une volonté de plus en plus affichée de diversification des moyens de production et d'un meilleur respect de l'environnement. Ce travail a donc porté sur la modélisation et la simulation d'un système : photovoltaïque connecté au réseau électrique moyennant le logiciel MATLAB (Simulink).

Nous avons consacré à l'étude du comportement d'un générateur photovoltaïque associé à un convertisseur DC-DC. Nous avons exposé aussi les différentes classifications des commandes MPPT qui adapte le panneau PV à la charge. Ensuite nous avons étudié en simulation l'association d'un générateur PV avec un convertisseur DC/DC de type Boost commandé par la méthode MPPT basée sur l'algorithme de perturbation et observation (P&O).

Enfin, on a utilisé un onduleur triphasé (convertisseur DC-AC) pour transformer le courant continu en courant alternatif, qui transfèrera ce courant en réseau domestique et l'excédent au réseau central. Nous avons démontrés tous le processus en utilisant Matlab/Simulink qui a englobé toute ces parties pour simuler un Panneau photovoltaïque connecté au réseau. Les résultats obtenus lors de la simulation ont démontrés que les convertisseurs et la commande « Perturbation et Observation » effectuent correctement leurs rôles.

Comme perspectives pour ce travail, on propose :

- ☞ L'étude expérimentale de l'association présentée dans ce travail du mémoire.
- ☞ Utilisation des techniques de contrôle MPPT à base d'intelligence artificielle.
- ☞ Pouvoir raccorder une installation photovoltaïque au réseau électrique de haute tension pour subvenir aux besoins en énergies électriques, et optimiser cette installation afin d'avoir un meilleur rendement et une puissance optimale.
- ☞ Il serait intéressant d'associer d'autres sources d'énergies pour former un système hybride pour compenser les périodes d'ensoleillement défavorables.

## Bibliographe

- [1] Salma Fateh. « Modélisation d'un système multi générateurs photovoltaïque interconnectés au réseau électrique ». Mémoire de Magister, Université Ferhat Abess Sétif Algérie, 2011.
- [2] Hananou Fatiha et Rouabah Aicha. « Modélisation et simulation d'un système Photovoltaïque ». Mémoire de master, Université Ouargla, 2014.
- [3] Fairouz Kendouli. « Etat de l'art et modélisation des microcentrales ». Magister en Electrotechnique, Université Mentouride Constantine, 2007.
- [4] A. MESKANI « Modélisation Et Simulation D'un Système PV Intégré à UnRéseau BT Par La Méthode Du Watt-Var découplé » Laboratoire des Technologies Innovantes(LTI), Université ABDELMALEK ESSAËDI, (ENSA) Tanger, Maroc, 2012.
- [5] D. labeled , « Production décentralisé et couplag un réseau », Thèse de doctorat, Université de Constantine, 2008.
- [6] DERRADJ Lounis « Généralité sur les réseaux électriques » mémoire.
- [7] BEMANA NGUEOUELE Yannick « Modélisation des injections de puissance d'un système PV sur un réseau public »institut international d'ingénierie de l'Eau et de l'Environnement, Mémoire Master 2012.
- [8] LIVRE BLANC Des industriels au service de l'intelligence énergétique rédigé par le Gimélec version-finale-2011-00768-01-E1.
- [9] Généralités sur les réseaux électriques (cours)
- [10] Sybil bartelmaos « Adaptation des Smart grids pour une meilleure intégration des énergies renouvelables » mémoire Ingénieur ; université libanaise 2013.
- [11] BENSACI.Wafa<<Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque adapté parune commande MPPT>>Thème de Master en Génie électrique, Université KasdiMerbah–Ouargla.2011/2012.
- [12] K. Kassmi et M. Hamdaoui et F. Olivie 'Conception et modélisation d'un système photovoltaïque adapté par une commande MPPT analogique', université de maroc, revue des énergies renouvelables, pp 451 – 462, 2007.
- [13] R. Badreddine et O. Souhila, « modélisation et commande du système photovoltaïque par les réseaux de neurones » Mémoire de Master Académique2017.
- [14] Techniques de L'ingénieur (D4091) Réseaux D'interconnexion Et De Transport.

- [15] F. A. Viawan., Voltage Control and Voltage Stability of Power Distribution Systems in the Presence of Distributed Generation, PhD thesis, Chalmers university of technology, Göteborg, Sweden 2008.
- [16] S. Zahar, C. Makhlof, « Etudes et simulation d'un générateur photovoltaïque muni d'un convertisseur MPPT pour une meilleur gestion énergétique», Mémoire de Master, Université de M'SILA, 2016/2017.
- [17] H. Berrzzoug, «Principe de fonctionnement et mesure des caractéristiques d'une cellule photovoltaïque», Mémoire de Master, Université de Saida, 2016.
- [18] <https://www.nouvelr-energie.com/installation-panneau-solaire/rendement/>
- [19] O.BENSEDDIK et F.DJALOUDD '' Etude et optimisation du fonctionnement d'un système photovoltaïque ''Mémoire de Master Université KasdiMerbah-Ouargla 2012.
- [20] Mr. ADIL « Création d'une entreprise d'installation des panneaux solaires» mémoire fin d'études master Université Abou BekrBelkaïd – Tlemcen. 2014.
- [21] M. Hatti, « Contrôleur Flou pour la Poursuite du Point de Puissance Maximum d'un Système Photovoltaïque », JCGE'08, Lyon, 2008.
- [22] K.Amara, «Contribution à l'étude de conception d'une centrale photovoltaïque de puissance (1MW) interconnectée au réseau de distribution électrique moyen tension », Mémoire de Master, Université de Tizi-Ouzou, 2015.
- [23] M.L.Louazane ''Etude technico-économique d'un système de pompage photovoltaïque sur le site de Ouargla ''Mémoire de Magister Université El Hadj Lakhdar-Batna 2008.
- [24]. S. PETIBON ' Nouvelles architectures distribuées de gestion et de conversion de l'énergie pour les applications photovoltaïques', université de Toulouse, 2009.
- [25] L. ABBASSEN ' Etude de la connexion au réseau électrique d'une centrale photovoltaïque' Mémoire de magister, université mouloud Mammeri Tiziouzzo, 2011.
- [26] A. T.SINGO ' Système d'alimentation photovoltaïque avec stockage hybride pour l'habitat énergétiquement autonome' Thèse de doctorats, université Henri Poincaré, Nancy-I, 2010.
- [27] HELALI KAMELIA, Modélisation D'une Cellule Photovoltaïque, Etude Comparative, Université Mouloud Mammeri de Tizi-ouzou, Thèse de Magister 2012 .
- [28] M.ALAIN BILBAO LEARETTA, « Réalisation d'une commande MPPT numérique » rapport de stage fin d'étude, Université Rovira et Virgili, 2006.
- [29] [www.prepa-cpe.fr/documents/Les-cellules-photovoltaïques.pdf](http://www.prepa-cpe.fr/documents/Les-cellules-photovoltaïques.pdf).
- [30] [www.peracod.sn](http://www.peracod.sn)

- [31] Salima ALEM-BOUDJEMLINE <<Réalisation et caractérisation des cellules photovoltaïques plastique>>Thèse de Doctorat, Ecole de doctorale d'Angers,2004.
- [32] Melle DEBILI. Narimen<<Etude et optimisation en environnement Mat lab/Simulinkd'un système de pompage Photovoltaïques>>Thèse de Magister. UniversitéConstantine.2014-2015.
- [33] 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.
- [34] Abbassen Lyes, "étude de la connexion au réseau électrique d'une centrale photovoltaïque", Memoire de Magister, Université de Tizi Ouzou,05/05/2011.
- [35] NatarajanPandiarajan,RamabadranRamaprabha, and RanganathMuthu Department of Electrical & Electronics Engineering, SSN College of Engineering, Kalavakkam 603110, India"Application of CircuitModel for Photovoltaic Energy Conversion System"
- [36] C. C. Hua and C. M. Shen, "Study of maximum power tracking techniques and control of dc-dc converters for photovoltaic power system," Proceedings of 29th annual IEEE Power Electronics Specialists Conference, vol. 1, 1998, pp. 86-93
- [37] Huan-Liang Tsai, Ci-Siang Tu, and Yi-Jie Su, Member, IAENG "Development of Generalized Photovoltaic Model Using MATLAB/SIMULINK"Proceedings of the World Congress on Engineering and Computer Science 2008 WCECS 2008, October 22 - 24, 2008, San Francisco, USA
- [38] M. Veerachary, T. Senjyu, and K. Uezato, "Voltage-based maximum power point tracking control of PV system," IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, vol. 38, no. 1, 2002, pp. 262-270
- [39] Entreprise écologique « Solaire photovoltaïque ».PDF.
- [40] Mme.OBEIDI,"Commande des hacheurs MPPT par logique floue", Ecole Nationale Polytechnique Mémoire de Magister, 2006.
- [41] BOUALEM, DENDIB, "Technique conventionnelles et avancée de poursuite MPPT pour des applications photovoltaïque : étude comparative," Université Ferhat Abbes-Sétif Mémoire de Magister TS4/6338, 2007.
- [42] Jordana Bratt. « Grid connected pv inverters: modeling and simulation ». Mémoire de Master, Université de San Diego State, 2011.

[43] 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 Tiziouzou, 2011.

[44] S. Nema, R.K Nema., G. Agnihotri, “Matlab/ simulink based study of photovoltaic cells/modules/array and their experimental verification”, International Journal of Energy and Environment, Vol.1, pp.487-500, 2010.