

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université Ibn Khaldoun de Tiaret

Faculté des Sciences Appliquées

Département de Génie Mécanique



## **PROJET DE FIN DE CYCLE**

### **MASTER**

**Domaine :** Sciences et Technologie

**Filière :** Electromécanique

**Parcours :** Master

**Spécialité :** Maintenance Industrielle

**Thème**

# **Simulation et commande d'un système photovoltaïque**

Préparé par :

**SEGHIER Abdelbasset / REGUIEG Saddam**

Soutenu publiquement le : 27 / 06 / 2022, devant le jury composé de :

M. BOUZOUINI Mohamed	Maître Assistant (Univ. Ibn Khaldoun)	Président
M. SLIMANI Halima	Maître de Conférences "A" (Univ. Ibn Khaldoun)	Examineur
M. ASRI Aisha	Maître de Conférences "B" (Univ. Ibn Khaldoun)	Examineur
M. BOUREGUIG Kada	Maître de Conférences "B" (Univ. Ibn Khaldoun)	Encadrant

Année universitaire : 2021 - 2022

# Dédicaces

*Je dédie ce modeste travail:*

❖ *A mon cher père, à ma chère mère, pour leur tendresse, leurs conseils, leurs sacrifices, leur présence à mes côtés et leur soutien, auxquels je dois ce que je suis et à qui je souhaite une longue vie pleine de bonheur et de santé. Qu'ils trouvent ici l'expression de mon éternelle reconnaissance et de ma profonde affection.*

❖ *A Mes frères.*

❖ *A Mes sœurs.*

*A toute ma famille.*

*Sans oublier mon binôme **Abdelbasset**, sa famille et tous mes Amis(e)*

*REGUIEG Saddam*



# Dédicaces

*Je dédie ce modeste travail:*

❖ *A mon cher père, à ma chère mère, pour leur tendresse, leurs conseils, leurs sacrifices, leur présence à mes côtés et leur soutien, auxquels je dois ce que je suis et à qui je souhaite une longue vie pleine de bonheur et de santé. Qu'ils trouvent ici l'expression de mon éternelle reconnaissance et de ma profonde affection.*

❖ *A Mes frères.*

❖ *A Mes sœurs.*

*A toute ma famille.*

*Sans oublier mon binôme **SADDAM**, sa famille et tous mes Amis(e)*

*SEGHIER Abdelbasset*



# Remerciements

*Nous remercions le DIEU le tout puissant de nous avoir donné la force et le courage afin d'accomplir ce modeste travail*

*Nos remerciements vont à Notre encadrant **Dr Bourguig Kada** pour nous avoir orientés et donnés de précieux conseils .Nous le prions de bien vouloir agréer le témoignage de notre plus vive reconnaissance*

*Nous apportons aussi nos vifs remerciements aux personnels enseignants de l'Université  
Ibn KHalldoun -Tiaret-*

*Nous remercions chaleureusement les membres du jury pour leur regard critique et plus que pertinent sur l'ensemble de notre travail.*

*A toute la promotion de **2021/2022***

# Table des matières

Table des matières .....	i
Liste des figures .....	vi
Liste des tableaux .....	viii
Liste des abréviations .....	ix
Introduction générale .....	1
<b>Chapitre I : Généralités sur les énergies renouvelables</b>	
I.1 Introduction.....	3
I.2 Energie renouvelable.....	3
I.3 Différents types d'énergies renouvelables.....	3
I.3.1 Energie éolienne .....	3
I.3.1.1 Avantage et inconvénients de l'énergie éolienne .....	4
I.3.2 Energie de biomasse .....	5
I.3.2.1 Avantage et inconvénients de l'énergie biomasse.....	6
I.3.3 Energie hydraulique .....	8
I.3.3.1 Avantage et inconvénients de l'énergie hydraulique .....	8
I.3.4 Pile à combustible.....	10
I.3.4.1 Avantages et inconvénients de la pile à combustible .....	10
I.3.5 Géothermie.....	11
I.3.5.1 Avantage et inconvénients de la géothermie .....	11
I.3.6 Energies marines .....	13
I.3.6.1 Avantage et inconvénients de l'énergie marémotrice ou marine.....	13
I.3.7 Energie Solaire .....	14
I.3.7.1 Energie solaire photovoltaïque.....	15
I.3.7.1.1 Définition .....	15
I.3.7.1.2 Histoire de photovoltaïque .....	15
I.3.7.1.3 Avantage et inconvénients de l'énergie photovoltaïques.....	17
I.3.7.1.4 Contexte énergétique .....	17
I.3.7.1.5 Rayonnement solaire .....	20
I.3.7.1.6 Orientation et inclinaison .....	21
I.3.7.1.7 Spectre du rayonnement.....	21
I.3.7.1.8 Effet photovoltaïque .....	22

I.3.7.1.9 Principe de conversion .....	22
I.4 Conclusion .....	23
<b>Chapitre II : Systèmes photovoltaïques</b>	
II.1 Introduction .....	24
II.2 Systèmes photovoltaïque.....	24
II.3 Classification des systèmes PV .....	24
II.3.1 Systèmes autonomes .....	24
II.3.2 Systèmes couplés au réseau .....	25
II.3.3 Systèmes hybrides.....	26
II.4 Constitution d'un générateur PV .....	26
II.4.1 Cellule photovoltaïque .....	28
II.4.2 Structure de la cellule photovoltaïque .....	28
II.4.3 Principales technologies solaires .....	29
II.4.3.1 Cellules au silicium cristallin.....	29
II.4.3.2 Silicium monocristallin .....	29
II.4.3.3 Silicium polycristallin .....	30
II.4.3.4 Cellules photovoltaïques amorphes.....	30
II.4.3.5 Nouvelle technologie.....	30
II.4.3.5.1 Silicium noir .....	30
II.4.3.5.2 Cellule organique .....	31
II.4.3.5.3 Cellule sans silicium en couche mince .....	32
II.4.4 Avantages et les inconvénients des cellules photovoltaïques.....	32
II.4.5 Caractéristiques de cellules PV.....	33
II.4.6 Associations des cellules PV .....	34
II.4.6.1 Branchement série .....	34
II.4.6.2 Branchement parallèle .....	35
II.4.6.3 Branchement mixte .....	36
II.4.7 Protection d'un générateur photovoltaïque.....	36
II.4.7.1 Protection d'un générateur photovoltaïque contre les chocs électriques.....	36
II.4.7.1.1 Protection contre les contacts directs .....	37
II.4.7.1.2 Protection contre les contacts indirects .....	37
II.4.7.2 Protection d'un générateur photovoltaïque contre les surtensions.....	37
II.4.7.3 Protection d'un générateur photovoltaïque contre les surintensités .....	37
II.4.7.3.1 Ombrage d'un générateur.....	37

II.4.7.3.2	Nécessité de protection contre les courants inverses.....	39
II.5	Système de régulation .....	40
II.5.1	Régulation de décharge .....	41
II.5.2	Régulation de la charge .....	41
II.6	Onduleurs .....	41
II.6.1	Principe de fonctionnement d'un onduleur .....	41
II.6.2	Commande de l'onduleur .....	42
II.7	Batteries.....	42
II.7.1	Fonctions principales d'une batterie .....	42
II.7.2	Caractéristiques principales d'une batterie.....	43
II.7.3	Principaux types de batterie.....	43
II.7.4	Comparaison entre les différents types de batteries.....	44
II.8	Boîtier dérivation .....	44
II.9	Câblage.....	45
II.10	Charge .....	45
II.11	Conclusion.....	46

**Chapitre III : Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque**

III.1	Introduction .....	47
III.2	Modélisation du système photovoltaïque.....	47
III.2.1	Générateur photovoltaïque .....	47
III.2.2	Modélisation électrique d'une cellule photovoltaïque .....	48
III.2.2.1	Modèle simplifié .....	48
III.2.2.2	Modèle à une diode .....	49
III.2.2.3	Modèle à deux diodes.....	50
III.2.3	Convertisseur DC/DC .....	51
III.2.3.1	Convertisseur Boost .....	52
III.2.4	Commandes de poursuite du point de puissance maximale .....	54
III.2.4.1	Principe du MPPT.....	54
III.2.4.2	Méthode de perturbation et observation .....	55
III.3	Simulation du générateur photovoltaïque .....	56
III.3.1	Choix et caractérisation du module photovoltaïque .....	56
III.3.2	Simulation du module PV .....	57
III.3.3	Effet de l'éclairement sur les caractéristiques $I = f(V)$ et $P = f(V)$ .....	58
III.3.4	Effet de la température sur les caractéristiques $I = f(V)$ et $P = f(V)$ .....	60

III.3.5 Simulation du système PV globale (GPV, convertisseur, MPPT, charge) .....	61
III.3.5.1 Résultat et discussion .....	61
III.4 Conclusion.....	65
<b>Chapitre IV : Défauts d'un système photovoltaïque</b>	
IV.1 Introduction .....	66
IV.2 Terminologies et concepts .....	66
IV.3 Défauts d'un système photovoltaïque.....	67
IV.3.1 Types de défauts du module PV .....	67
IV.3.1.1 Défaut de point chaud .....	67
IV.3.1.2 Corrosion.....	68
IV.3.1.3 Décoloration de cellules .....	68
IV.3.1.4 Défaut d'encapsulation .....	69
IV.3.1.5 Perte d'adhérence de back-sheet.....	69
IV.3.1.6 Fissuration des cellules .....	69
IV.3.1.6 Interconnexion endommagée .....	70
IV.3.1.7 Ombrage et des salissures .....	70
IV.3.2 Défauts au niveau de convertisseur DC/DC.....	70
IV.3.3 Pannes au niveau de la boîte de jonction .....	71
IV.3.3.1 Défauts de diodes bypass .....	71
III.3.3.2 Défaut d'arc .....	71
IV.3.3.3 Défaut de terre .....	71
IV.4 Diagnostic des défauts dans un système photovoltaïque .....	72
IV.4.1 Etape de diagnostic .....	72
IV.4.2 Méthodes de diagnostic d'un générateur PV.....	73
IV.4.2.1 Méthodes de diagnostic courantes industrialisées .....	73
IV.4.2.1.1 Méthodes non-électriques .....	73
IV.4.2.1.2 Méthodes électriques.....	74
IV.4.2.2 Méthodes dans la littérature .....	74
IV.4.2.2.1 Méthode de réflectométrie.....	75
IV.4.2.2.2 Analyse de la puissance et de l'énergie produite.....	75
IV.4.2.2.3 Analyse du point de fonctionnement .....	75
IV.4.2.2.4 Analyse de la caractéristique statique .....	76
IV.5 Operations de maintenance .....	76
IV.5.1 Maintenance préventive .....	77

IV.5.1.1 Inspection visuelle .....	77
IV.5.1.2 Nettoyage .....	80
IV.5.2 Maintenance corrective .....	81
IV.6 Conclusion .....	81
Conclusion générale .....	82
Bibliographie.....	84
Résumé .....	88

# Liste des figures

## *Chapitre I : Généralités sur les énergies renouvelables*

Figure I.1 : Energie éolienne .....	03
Figure I.2 : Energie de biomasse .....	06
Figure I.3 : Un moulin à eau.....	08
Figure I.4: Schéma de principe de la pile à combustible .....	10
Figure I.5 : Système solaire photovoltaïque .....	14
Figure I.6 : Système photovoltaïque .....	15
Figure I.7 : Production mondiale de l'énergie photovoltaïque en 2015 .....	18
Figure I8 : Programme ERS Algérien : allocation de l'objectif de 22 GW à atteindre de 2030.....	19
Figure I.9 : Types du rayonnement solaire.....	20
Figure I.10 : Spectre d'irradiation solaire .....	22
Figure I.11 : Principe de la conversion photovoltaïque .....	23

## *Chapitre II : systèmes photovoltaïques*

FigureII.1 : Système PV autonome .....	25
Figure II.2 : Système PV raccordé au réseau.....	25
Figure II.3 : Système PV hybride.....	26
Figure II.4 :Module de 36 cellules connectées en séries et protégé par deux diodes de by-pass ....	27
Figure II.5 : Constituants d'un générateur PV.....	27
Figure II.6 : Cellule photovoltaïque .....	28
Figure II.7 : Schéma d'une cellule photovoltaïque .....	29
Figure II.8 : Cellule monocristalline.....	28
Figure II.9:Cellule poly cristalline.....	30
Figure II.10 : Cellule photovoltaïque amorphe.....	30
Figure II.11 : Cellule photovoltaïque noir.....	31
Figure II.12 : Cellule organique.....	31
Figure II.13 : Schéma équivalent d'une cellule PV.....	33
Figure II.14 : Cellules associées en série.....	35
Figure II.15 : Cellules associées en parallèle.....	35
Figure II.16 : Cellules associées en mixte.....	36

Figure II.17 : (a) ombrage des panneaux par un cheminé de la maison, (b) fonctionnement de la cellule dans le 3ème quadrant de la caractéristique I-V, à cause de l'ombre.....	38
Figure II.18 : Système photovoltaïque en: (a) fonctionnement normale, (b) présence d'une ombre: échauffement de la cellule, (c) protection par la mise en place d'une diode de by- pass.....	38
Figure II.19: Module de 36 cellules protégé par deux diodes de by-pass.....	39
Figure II.20: Diode anti-retour placée à la sortie du string et avant la charge et la connexion des autres strings.....	40
Figure II.21: Régulateur MPPT Western WRM20 20A 12V /24V.....	42
Figure II.22 : Onduleur Victron multiplus 12-1200va-50-16.....	42
Figure II.23 : Boite de dérivation.....	45
Figure II.24 : Les composants d'un système PV autonome.....	46

### ***Chapitre III : Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque***

Figure III.1 : Composantes principales du système photovoltaïque.....	48
Figure III.2 : Modèle simplifié d'une cellule PV.....	48
Figure III.3 : Modèle à une diode d'une cellule PV.....	49
Figure III.4 : Modèle à deux diodes d'une cellule PV.....	51
Figure III.5 : La représentation symbolique d'un convertisseur DC/DC.....	52
Figure III.6 : Schéma de principe du Convertisseur Boost.....	52
Figure III.7 : Chronogrammes de courant et tension d'un hacheur (boost).....	54
Figure III.8 : Le principe de fonctionnement de la méthode P&O.....	55
Figure III.9 : Organigramme de la méthode P&O.....	56
Figure III.10 : Simulation de la caractéristique (I-V) du module PV.....	57
Figure III.11 : Simulation de la caractéristique (P-V) du module PV.....	58
Figure III.12 : Résultats de simulation des caractéristiques Courant-Tension du module PV.....	59
Figure III.13 : Résultats de simulation des caractéristiques Puissance-Tension du module PV.....	59
Figure III.14 : Résultats de simulation des caractéristiques Courant-Tension du module PV.....	60
Figure III.15 : Résultats de simulation des caractéristiques Puissance-Tension du module PV.....	60
Figure III.16 : Schéma MATLAB SIMULINK d'un système photovoltaïque.....	61
Figure III.17: Variation d'éclairement a la température $T = 25^{\circ}\text{C}$ .....	62
Figure III.18 : Variation de la puissance à la sortie du système PV avec MPPT.....	62
Figure III.19 : Erreur entre la puissance à la sortie du système PV avec MPPT et la puissance référence.....	62

Figure III.20 : Variation de la puissance à la sortie du convertisseur statique sans MPPT.....	63
Figure III.21 : Erreur entre la puissance à la sortie du système PV sans MPPT et la puissance référence.....	63
Figure III.22 : Variation de tension à la sortie du système PV avec et sans MPPT .....	64
Figure III.23 : Variation de tension à la sortie du panneau PV avec et sans MPPT .....	64
Figure III.24 : Variation du rapport cyclique.....	64

### ***Chapitre IV : Défaits d'un système photovoltaïque***

Figure IV.1 : Défaut de point chaud.....	67
Figure IV.2 : Module PV atteint par la corrosion.....	68
Figure IV.3 : Modules photovoltaïques avec des cellules décolorées .....	68
Figure IV.4 : Fissure de la cellule.....	69
Figure IV.5 : Défaut d'ombrage partiel.....	70
Figure IV.6 : Organigramme de les étapes de diagnostic les défauts. ....	72
Figure IV.7 : Quelques exemples de la localisation de défauts par la caméra thermique .....	73
Figure IV.8 : Principe de la réflectométrie pour localiser le défaut dans un string PV .....	75
Figure IV.9 : Allure d'une caractéristique I-V d'un champ PV en fonctionnement défaillant.....	76
Figure IV.10 : Inspection visuelle de modules.....	77
Figure IV.11 : Inspection visuelle de structure de support des modules .....	78
Figure IV.12 : Inspection visuelle de l'onduleur.....	78
Figure IV.13 : Inspection visuelle de Boîtes de jonction .....	79
Figure IV.14 : Inspection visuelle d'équipements de protection .....	80
Figure IV.15 : Nettoyage de modules .....	80

# *Liste des tableaux*

Tableau I.8 : Indique le potentiel solaire Algérien.....	19
Tableau II.1 : Avantage et inconvénient des cellules PV.....	32
Tableau II.2 : Tableau comparatif des différents types de batterie.....	44
Tableau III.1 : Caractéristiques du module PV Sun power SPR-305E-WHT-D.....	57

# Liste des abréviations

IEA : Agence internationale de l'énergie.

DC= CC : Courant Continu.

AC=CA : Courant alternatif.

PV : Photovoltaïque

CIS : Cuivre, Indium, Sélénium.

CIGS : Cuivre, Indium, Gallium et Sélénium.

G : Eclairage.

$G_i$  : Source de courant parfaite.

$T_c$  : Température ambiante.

$R_{sh}$ : Résistance shunt.

$R_{se}$ : Résistance série.

$I_{ph}$  : Le photo-courant.

$I_d$ : Le courant traversant la diode.

$I_{Rsh}$ : courant circulant dans la résistance shunt.

$I_{cc}$  : Le courant de court-circuit.

$V_{co}$ : La tension en circuit ouvert.

FF : Le facteur de forme.

$V_t$ : Tension thermique à la température T.

$P_{max}$  : Puissance maximale.

$P_i$  : Puissance du rayonnement solaire incident.

$N_s$ : Nombre des cellules en série.

$N_p$ : Nombre des cellules en parallèle.

PT : Puissance totale.

NMS : Nombre de module par string.

NSP : Nombre string branché en parelle.

PM : Puissance par module.

SPF : Système extérieur de Protection contre la Foudre.

SPD : Dispositif de protection contre les surtensions.

$I_{sc}$  : Significative du courant.

IRM : Courant inverse maximum PV.

MPPT : Suivi du point de puissance maximale.

MLI : Modulation de Largeur d'Impulsion.

VDR : Voltage dépendance résistance

GPV : Générateur photovoltaïque.

a : Facteur d'idéalité de la diode.

I : Courant générer par la cellule photovoltaïque.

$I_{phn}$ : Courant photopile généré par la cellule dans les conditions de test standard (STC).

$I_{sh}$ : Le courant circulant dans la résistance.

q : Charge de l'électron ( $1.6 * 10^{-19}$  C).

K : Constante de Boltzmann ( $1.3854 * 10^{-23}$  J/K).

T : Température effective de la cellule en degré Kelvin [ $^{\circ}$ K].

$I_L$  : Le courant circulant dans l'inductance.

L : Inductance.

D : Rapport cyclique.

PPM : Point de puissance maximale.

P&O : Méthode de Perturbation et observation.

eV : électron-volt.

$\eta$ : Rendement.

$V_O$  : Tension de sortie.

$V_I$ : Tension de entré.

AM : Air Masse.

c-Si : Silicium Cristallin.

EVA : Ethylène Vinyle Acétate.

IGBT : Transistor bipolaire a grillé isolée.

RCD : Dispositifs à courant résiduel.

# *Introduction générale*

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

Les seules ressources permanentes sont les énergies renouvelables qui vont résoudre de nombreux problèmes environnementaux liés aux sources d'énergie non renouvelables et à l'énergie nucléaire. 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 non renouvelables, les énergies renouvelables sont des énergies à ressource illimitée. Les énergies renouvelables regroupent un certain nombre de filières technologiques selon la source d'énergie valorisée et l'énergie utile obtenue

L'énergie solaire photovoltaïque (PV) est une énergie durable, non polluante et inépuisable qui peut être une énergie alternative aux énergies fossiles. Elle occupe une importante place dans le domaine de la recherche afin de faire face aux besoins futurs en matière d'énergie. Actuellement, la technologie de fabrication du module PV a considérablement évolué en qualité et en coût de production.

Aujourd'hui l'énergie solaire fournit un bon rendement de conversion énergétique, alors que le rendement d'un système fondé sur la combustion d'un minerai fossile est au mieux de 30 à 35%

L'exploitation directe de l'énergie solaire au moyen des capteurs relève de deux technologies bien distinctes : l'une produit des calories, c'est l'énergie solaire thermique, et l'autre produit de l'électricité, et c'est cette dernière énergie solaire photovoltaïque qui fait l'objet de ce mémoire.

Le générateur photovoltaïque est le seul convertisseur direct pour transformer la lumière en énergie électrique, et offre la possibilité de produire de l'électricité directement à partir d'une ressource renouvelable et largement disponible. Leurs développements constituent de ce fait, un enjeu majeur dans la perspective d'un approvisionnement énergétique compatible avec la contrainte d'environnement local et global. Le champ d'utilisation des systèmes photovoltaïques est large avec beaucoup de configurations autonomes et reliées au réseau de distribution. Les applications de l'énergie solaire incluent le pompage d'eau, réfrigération, climatisation, sources lumineuses,

véhicules électriques, centrales photovoltaïques, utilisation militaire, domaine spatial, et dans les systèmes hybrides.

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. 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. Plusieurs algorithmes sont proposés dans la littérature, une attention particulièrement a été portée sur la méthode des perturbations et observations.

Les défauts que l'on peut retrouver sur une installation photovoltaïque, surviennent autant lors de sa conception, de son installation, que lors de son exploitation. Ces défauts réduisent les performances de système photovoltaïque, ce qui affecte la production photovoltaïque.

Ce mémoire est organisé autour quatre chapitres qu'on décrit comme suit:

- Dans le premier chapitre nous fait une présentation sur les différents sources d'énergies renouvelable, nous présenterons également la production mondiale et locale (Algérie) d'énergie photovoltaïque. Ensuite introduire et détailler sur l'énergie solaire et le rayonnement solaire ainsi que le phénomène physique exploité pour générer une énergie électrique tout en passant par la fabrication des cellules et module photovoltaïques,
- Dans le deuxième chapitre a étudié la structure d'exploitation des systèmes photovoltaïques et leur type et leur composant avec explication et description.
- Le troisième chapitre sera consacré à la modélisation de la cellule PV ainsi le convertisseur DC-DC de type hacheur Boost contrôlé par un algorithme PPM qui permettent d'extraire le maximum d'énergie des modules PV, en cas des différents facteurs climatiques tels que la température, et variation d'éclairement.  
On termine ce chapitre par une simulation numérique réalisée par un programme développé en vertu du logiciel MATLAB Simulink,
- Le quatrième chapitre étudie les principaux défauts associés à un système photovoltaïque et un aperçu sur les différentes méthodes de diagnostic des systèmes photovoltaïques sera démontré.

Enfin, on terminera par une conclusion générale discutant les résultats obtenus et les perspectives à entreprendre dans les futurs travaux.

# *Chapitre I*

## *Généralités sur les énergies renouvelables*

**I.1 Introduction**

Il existe différentes sources d'énergies renouvelables disponibles sur le plan été dont les principales sont : l'énergie solaire, l'énergie éolienne, l'énergie hydraulique, la biomasse et la géothermie. Elles peuvent être converties, selon les besoins, en électricité ou en chaleur. La cogénération d'électricité et de chaleur est possible dans le cas de la géothermie, de la biomasse et de l'énergie solaire. Dans le cadre de notre étude, nous nous sommes concentrés sur la production d'électricité partir de l'énergie photovoltaïque. Nous détaillons dans les paragraphes suivants les énergies renouvelables et précisément l'énergie solaire et sa situation dans le monde.

**I.2 Energie renouvelable**

Les énergies renouvelables sont issues de phénomènes naturels provoqués principalement par le soleil (l'énergie solaire mais aussi hydraulique, éolienne et biomasse...), la lune (énergie marémotrice...) et la terre (géothermique profonde...), à l'échelle de la durée de vie de l'humanité. Ce n'est pas le cas pour les combustibles fossiles et nucléaire.

**I.3 Différents types d'énergies renouvelables****I.3.1 Energie éolienne**

Les énergies éoliennes sont notamment caractérisées par des déplacements de masse d'air à l'intérieur de l'atmosphère. C'est l'énergie mécanique de ces déplacements de masse d'air qui est à la base de l'énergie éolienne. L'énergie éolienne consiste ainsi à utiliser cette énergie mécanique par l'intermédiaire d'un rotor et de pales (Figure I.1). Cette source est non polluante. Né an moins l'énergie éolienne est intermittente, et l'installation de parc éolien engendre des impacts paysagés et sonores [1].



**Figure I.1 :** Energie éolienne.

### I.3.1.1 Avantage et inconvénients de l'énergie éolienne

#### ➤ Avantages de l'énergie éolienne

Commençons par voir quels sont les principaux avantages de l'énergie éolienne [2].

- **Inépuisable** : un des premiers avantages de l'énergie éolienne est que c'est une énergie renouvelable car le vent est une ressource inépuisable. Ça veut dire qu'il est toujours possible de compter sur la source originale qui produit l'énergie, ce qui garantit son utilisation.
- **Propre** : il s'agit d'une énergie totalement propre. En fait, c'est peut-être son principal avantage par rapport aux autres types d'énergie. L'énergie éolienne ne produit aucun type de déchets, ce qui signifie que son utilisation ne contribue pas à la destruction des écosystèmes ni au réchauffement de la planète.
- **Sûre** : un autre des avantages de l'énergie éolienne est que c'est une des énergies les plus sûres qui existent. Comme elle ne produit pas de déchets polluants et qu'elle n'est pas dangereuse en cas d'accident, c'est une énergie complètement sûre.
- **C'est une énergie autochtone** : elle permet de favoriser l'indépendance énergétique car tous les pays au monde ont du vent.
- **Facilité d'installation et de désinstallation des parcs éoliens** : la technologie nécessaire à la mise en œuvre d'un parc éolien permet de les monter facilement et efficacement. En fait, si aujourd'hui il faut plus de temps que souhaité pour les construire, c'est généralement dû à des problèmes bureaucratiques et administratifs.
- **Faible impact sur le sol** : les parcs éoliens ont un très faible impact sur le sol et l'érosion du sol. Cela est dû à la fois à l'absence de déchets polluants et au fait qu'elles occupent peu d'espace par rapport aux autres types d'installations énergétiques.
- **Énergie respectueuse des aquifères** : en raison de l'absence de tout type de déchets polluants, elles n'altèrent pas la composition de l'eau dans la zone où elles sont installées.
- **C'est une énergie très bon marché** : de fait, elle coûte parfois autant que du charbon ou du nucléaire.
- **Démontable** : Quand une éolienne ne fonctionne plus, elle est démontée sans laisser d'impact considérable sur l'environnement car elle n'occupe que très peu d'espace.
- **Elle est compatible avec d'autres activités** : l'énergie éolienne est complètement compatible avec d'autres activités comme l'agriculture et l'élevage, ce qui fait qu'elle n'a pas d'impact négatif sur l'économie locale. Par conséquent, les endroits où sont installées des éoliennes peuvent continuer le développement de leur activité traditionnelle tout en augmentant leur activité grâce à l'énergie éolienne.

### ➤ Inconvénients de l'énergie éolienne

Après avoir connu les avantages de l'éolien, il nous a semblé important de présenter les principaux inconvénients de l'éolien [2].

- Un des premiers inconvénients de l'énergie éolienne est qu'il n'y a pas toujours du vent, ce qui fait qu'elle a besoin d'un soutien d'un autre type d'énergie pour la substituer.
- Difficulté dans la planification à cause de l'imprévisibilité du vent. Grâce aux modèles météorologiques, cet aspect s'est amélioré, mais l'intermittence de l'énergie éolienne est son inconvénient principal.
- Un autre inconvénient de l'énergie éolienne est qu'il s'agit d'une énergie qui ne peut pas être stockée, mais qui doit être consommée dès qu'elle est produite. Cela signifie qu'elle ne peut pas offrir une alternative complète à l'utilisation d'autres types d'énergie.
- Les éoliennes fonctionnent juste avec des rafales de vent compris entre 10 et 40 km/h. Si le vent souffle moins, la production énergétique ne vaut pas le coup et s'il souffle plus fort, il risque de casser la structure de l'éolienne.
- Comme les parcs éoliens sont généralement installés loin des points de consommation, ils requièrent une infrastructure de transport énergétique, ce qui entraîne une perte d'énergie et la nécessité d'installer une infrastructure de transport.
- La densité énergétique du vent est faible, ce qui exige que la quantité d'éoliennes soit élevée pour qu'elles soient utiles. En d'autres mots, bien qu'il s'agisse d'une énergie bon marché et facile à obtenir, il faut que beaucoup d'éoliennes fonctionnent en même pour que le parc soit rentable.
- La construction de parcs éoliens a un impact esthétique sur le paysage qui, parfois, génère des frustrations chez les populations locales.
- Les éoliennes font du bruit. Néanmoins, il est certain que cet inconvénient a été réduit au minimum grâce aux progrès en ingénierie qui ont été fait et appliqué au niveau des nouvelles turbines.
- Un autre des inconvénients de l'énergie éolienne qui s'avère être grave est que, quand elles fonctionnent, les pales des éoliennes représentent un danger pour la faune aviaire de la région.

### I.3.2 Energie de biomasse

La biomasse désigne toute la matière vivante d'origine végétale ou animale de la surface terrestre. Généralement, les dérivés ou déchets sont également classés dans la biomasse. Des différents types sont à considérer : le bois énergie, les biocarburants et le biogaz. Le bois énergie est une ressource très abondante, c'est la ressource la plus utilisée au monde. Il s'agit aussi d'énergie solaire

stockée sous forme organique grâce à la photo synthèse ce qui est bien montré par la Figure I.2. Elle est exploitée par combustion. Cette énergie est renouvelable à condition que les quantités brûlées n'excèdent pas les quantités produites. Le problème plus important est que la biomasse n'est pas inépuisable [1].

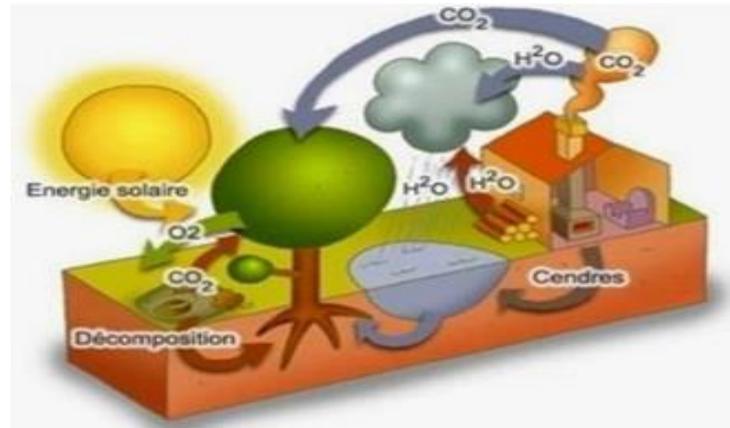


Figure I.2 : Energie de biomasse.

### I.3.2.1 Avantage et inconvénients de l'énergie biomasse

#### ➤ Avantages de l'énergie biomasse

Les applications de l'énergie biomasse sont nombreuses, car elle peut être utilisée pour la production thermique et électrique, le transport, etc... Les principaux avantages de l'énergie biomasse [3].

- C'est une source d'énergie renouvelable, car, l'énergie sur laquelle elle compte, vient directement du soleil et du cycle de vie, ce qui la rend pratiquement inépuisable parce que la biomasse se produit constamment comme conséquence des activités végétales et animales.
- Ce qu'elle pollue en comparaison à la combustion de combustibles fossiles est bien plus faible, de sorte que son utilisation réduit les émissions de CO<sub>2</sub> et a moins d'impact sur la couche d'ozone.
- La biomasse est présente à n'importe quel endroit de la planète et elle est bien plus économique.
- Elle offre une nouvelle opportunité au secteur agricole, car l'agriculture énergétique substituerait les champs agricoles qui ont été abandonnés ou qu'on ne peut plus utiliser pour leur activité initiale, évitant ainsi l'érosion et la dégradation du sol.
- Il y a une très grande variété de types de biomasse.
- Cette énergie génère presque pas d'émissions de particules solides, ni de polluants tels que les substances azotées ou sulfureuses.
- Bien sûr, il est vrai que pour utiliser ce type d'énergie renouvelable de la biomasse qui est issu

des cultures énergétiques, une combustion est nécessaire et elle a pour conséquence une émission de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère. Néanmoins, dans les champs agricoles énergétiques, la croissance des plantes capturent le CO<sub>2</sub>, compensant ainsi les émissions dérivées de la combustion.

- L'utilisation de déchets provenant d'autres activités, ce que nous appelons la biomasse résiduelle, contribue au recyclage et à la réduction des déchets. En fin de compte, les déchets organiques et inorganiques sont éliminés, ce qui permet de les utiliser à d'autres fins.
- L'utilisation de cette énergie diminue la dépendance aux énergies fossiles.

➤ **Inconvénients de l'énergie biomasse**

Maintenant que vous connaissez tous les avantages environnementaux et socioéconomiques de la biomasse, nous allons voir dans ce paragraphe tous les inconvénients de l'énergie biomasse, ainsi que leur impact environnemental [3].

- Parfois, la biomasse est humide et il faut la sécher pour pouvoir la brûler, ce qui provoque une augmentation du coût énergétique.
- En comparaison au combustible fossile, on a besoin de bien plus de biocombustible pour produire la même quantité d'énergie, c'est d'ailleurs aussi la raison pour laquelle on a besoin de plus grands espaces pour la stocker.
- Si la biomasse est obtenue par le biais d'une mauvaise procédure, c'est-à-dire d'une manière abusive et mal ciblée, son obtention entraîne la destruction d'habitats naturels et la déforestation des forêts.
- Nous sommes face à une ressource plutôt récente et qui ne dispose pas d'une technologie avancée pour en tirer profit au maximum, comme c'est le cas avec les combustibles liquides et solides.
- Les coûts d'utilisation de la biomasse augmentent quand se produisent des difficultés au niveau du transport et du stockage.
- Si la combustion de biomasse produit des substances toxiques, elle doit être faite à une température majeure de 900°C.
- Bien qu'on puisse trouver de la biomasse sur toute la planète, il n'y a pas vraiment d'endroits adéquats pour en tirer profit pleinement car elle requiert des grands espaces.

### I.3.3 Energie hydraulique

L'énergie électrique est produite par la transformation de l'énergie cinétique de l'eau en énergie électrique par l'intermédiaire d'un rotor alternateur relié à un ensemble mécanique situé autour de la roue motrice (figure I.3). La quantité d'énergie extraite de l'eau retenue derrière un barrage dépend du volume d'eau et de la hauteur de chute. Cette source a l'avantage de ne pas être polluante. On peut maîtriser le stockage de l'énergie d'une manière assez simple afin de débarrasser les cours d'eau des déchets grâce aux différents filtres des barrages, la technologie nécessaire pour son utilisation est maîtrisée. Le bruit, l'impact sur la vie aquatique, des installations complexées, et des sites limités pour l'exploitation ont ses principaux inconvénients [1].



Figure I.3 : Un moulin à eau.

#### I.3.3.1 Avantage et inconvénients de l'énergie hydraulique

##### ➤ Avantages de l'énergie hydraulique

Les avantages de l'hydraulique sont nombreux. Cette énergie verte est la plus utilisée au monde, voyons quels sont ses principaux atouts [4].

##### 1. Energie hydraulique est renouvelable

L'énergie hydroélectrique est renouvelable, nous ne pouvons pas épuiser nos ressources. Cependant, il n'y a qu'un nombre limité d'endroits dans le monde où l'on peut construire des centrales hydroélectriques et encore moins d'endroits où de tels projets sont rentables. Pour des raisons techniques, climatiques, esthétiques, logistiques, écologiques... on ne peut pas implanter autant de centrales hydroélectriques que l'on pourrait le souhaiter. Lire notre article sur le fonctionnement d'une centrale hydroélectrique.

## 2. Energie hydraulique est verte et non polluante

La production d'électricité à partir de l'énergie hydraulique ne pollue pas d'elle-même. La production d'énergie se fait grâce au passage de l'eau mais aucun produit additif n'est ajouté et rien ne change la composition de l'eau. La seule pollution se produit lors de la construction de ces centrales électriques massives.

## 3. Energie hydraulique est fiable

L'hydroélectricité est une énergie très fiable. Il y a très peu de fluctuations en ce qui concerne l'énergie électrique fournie par les centrales. Les pays qui disposent d'importantes ressources hydroélectriques utilisent l'hydroélectricité comme source d'énergie de base. Tant qu'il y a de l'eau dans les rivières, l'électricité peut être produite.

## 4. Energie hydraulique est flexible

Il est facile d'ajuster le débit d'eau et la production d'électricité. Lorsque la consommation d'énergie est faible, le débit d'eau est réduit et les niveaux du réservoir sont conservés pour les périodes où la consommation d'énergie est élevée.

Le barrage se pilote à distance et l'exploitant joue avec ses vannes pour optimiser sa production.

## 5. Energie hydraulique est sûre

Comparée entre autres aux combustibles fossiles et à l'énergie nucléaire, l'hydroélectricité est beaucoup plus sûre. Il n'y a pas de carburant en jeu.

### ➤ Inconvénients de l'énergie hydraulique

Bien que l'hydraulique soit propre et locale, elle présente de nombreux inconvénients [4].

#### 1. Conséquences environnementales de l'énergie hydraulique

- Les conséquences environnementales de l'hydroélectricité sont liées aux interventions dans la nature dues à la construction de barrages, à la modification du débit d'eau et à la construction de routes et de lignes électriques.
- Les centrales hydroélectriques peuvent affecter les poissons et leur comportement, notamment pour ce qui concerne leur reproduction. Il s'établit une interaction complexe entre de nombreux facteurs physiques et biologiques.
- Les habitats du poisson sont façonnés par des facteurs physiques tels que le niveau d'eau, la vitesse de l'eau, les possibilités d'abri et l'accès à la nourriture. L'assèchement le temps de la construction est complètement dévastateur pour les poissons. En outre, la quantité d'eau peut avoir des effets différents sur les poissons d'une rivière, selon le type et le stade du cycle de vie.

## 2. Energie hydraulique est coûteuse

- La construction de centrales électriques en général coûte cher. Les centrales hydroélectriques ne font pas exception à cette règle. Cependant, ces usines ne nécessitent pas beaucoup de main-d'œuvre et les coûts d'entretien sont généralement faibles.

## 3. Impact de la météo sur l'énergie hydraulique

- La production d'électricité et les prix de l'énergie sont directement liés à la quantité d'eau disponible. En cas de sécheresse, il n'y a absolument rien à faire que d'attendre qu'il pleuve en amont.
- Si l'énergie hydraulique est la principale source d'énergie, il demeure donc obligatoire de toujours conserver une énergie de secours.

## 4. Réservoirs pour produire l'énergie hydraulique sont limités

- Il y a beaucoup à faire pour le développement de l'énergie hydraulique. En-dehors des grandes centrales, il faut également développer les petites centrales hydrauliques sur les rivières

### I.3.4 Pile à combustible

Une pile à combustible est un système où l'énergie chimique d'un composé-stocké de façon indépendante et renouvelable-est convertie directement en énergie électrique (Figure I.4). Ce composé, ou combustible, ne fait pas partie du système [5].

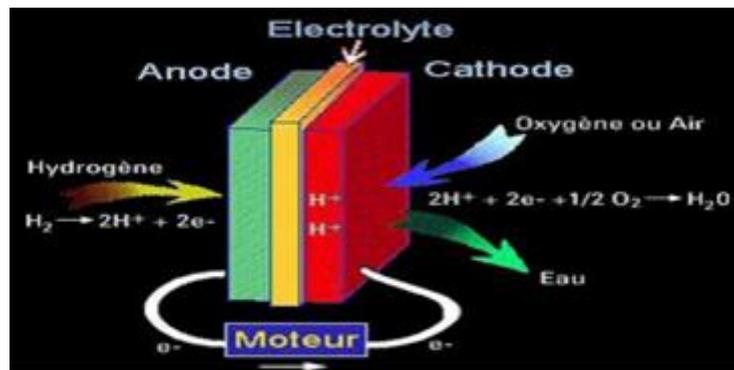


Figure I.4: Schéma de principe de la pile à combustible.

#### I.3.4.1 Avantages et inconvénients de la pile à combustible

##### ➤ Avantages de la pile à combustible

Les piles à combustibles sont souvent présentées comme la solution du futur dans les domaines de production d'énergie électrique, de l'automobile. Cet attrait est justifié par leurs nombreux avantages [6].

- De hauts rendements énergétiques.
- De faibles émissions sonores.
- Peu d'émissions (elles dépendent cependant du combustible utilisé).
- Elles sont de construction modulaire.
- Diverses températures de fonctionnement.
- Pas de parties rotatives.

➤ **Inconvénients de la pile à combustible**

Si les piles sont si intéressantes, pourquoi ne les trouve-t-on pas sur le marché? En fait, il reste de nombreux points faibles qui sont à régler [6].

- Le coût est le principal inconvénient d'une pile à combustible. L'utilisation de matériaux coûteux et le volume de production limité ne permettent pas de réduire suffisamment les prix.
- A cela s'ajoute la question de la durée de vie, encore jugée insuffisante pour les grosses applications.
- Le poids et volume.
- La gestion thermique de l'unité.

### I.3.5 Géothermie

L'énergie géothermique provient de la chaleur accumulée dans le sous-sol. Elle est perpétuellement réapprovisionnée par la radioactivité des roches et la proximité du magma en dessous de la croûte terrestre. L'exploitation par l'homme de cette énergie renouvelable porte le nom de géothermie. [1]

#### I.3.5.1 Avantage et inconvénients de la géothermie

➤ **Avantages de la géothermie**

En général, les avantages de l'énergie géothermique l'emportent sur les inconvénients. Nous énumérons ci-dessous les principaux avantages [7].

- Haute efficacité. C'est l'énergie la plus efficace de toutes les énergies renouvelables.
- Production constante. À la différence de l'énergie solaire, ce système peut obtenir la même énergie au cours des différentes saisons de l'année. La température dans les couches internes de la terre est presque invariable.
- Cela existe partout. C'est une source que l'on trouve n'importe où sur Terre, contrairement à celles qui dépendent des gisements. Cependant, il existe des sites plus favorables que d'autres.

- Cela ne dépend pas de la météo. Il est indépendant des variations météorologiques. C'est une différence importante avec l'énergie solaire.
- Utile été comme hiver. Les pompes à chaleur géothermiques sont capables de fournir du chauffage en hiver et du refroidissement en été.
- C'est viable pour les particuliers. Il peut être mise en place sur la surface habitable des maisons isolées où l'électricité n'arrive pas. Dans ce cas, il le captage horizontal est possible.
- C'est une énergie renouvelable. Il ne nécessite pas de carburant. Par conséquent, les réserves ne sont pas épuisées ni épuisées avec les réserves de cela.
- Génère très peu de déchets. Les déchets qu'il produit sont minimes. Il n'y a pas d'émission de CO<sub>2</sub> ou d'autres gaz à effet de serre. Ils ont moins d'impact environnemental que ceux provoqués par l'énergie de combustion.
- Entretien facile. Un avantage important est la facilité d'entretien.
- Bonnes performances et faible consommation.
- Économies économiques. Par exemple, dans une maison d'environ 150 à 180 mètres carrés, l'économie économique qu'elle représente est de 70%.
- Temps de retour réduit. Une installation d'énergie géothermique est rentabilisée en quatre à six ans environ.
- L'impact visuel est minime, car il s'agit d'une installation souterraine. Dans le cas de la climatisation, cela se fait généralement avec un chauffage par le sol.

#### ➤ Inconvénients de la géothermie

Les principaux inconvénients de la géothermie sont [7].

- Coût initial élevé. Il doit être retiré du sous-sol. Pour cette raison, les premières étapes du processus sont longues et coûteuses. Donc, le crédit d'impôt pour le financement peut être très élevé.
- Dans certaines régions, ce n'est pas rentable. L'énergie géothermique n'est pas viable dans les terrains rocheux et instables en raison de la difficulté de construire des puits.
- Inviable dans les grandes villes. Il est plus difficile de l'installer d'une manière particulière dans les grandes villes. Il est normalement occupé par d'autres services tels que les égouts, les conduites de gaz naturel et d'électricité, etc.
- Cela nécessite des études préliminaires coûteuses. Pour réaliser un projet, il est nécessaire de réaliser des études préalables. Ces études nécessitent des équipements spécifiques et des investissements importants dans la phase initiale du projet.

- Émissions toxiques possibles. En cas d'accident ou de fuite, du sulfure d'hydrogène peut être libéré.
- Impact environnemental. Il est nécessaire de forer la surface terrestre du gisement géothermique avec la détérioration conséquente du paysage. Dans les maisons unifamiliales, l'impact environnemental est pratiquement imperceptible.
- Seule l'exploitation locale. Il ne peut pas être transporté comme source principale de chaleur. Sauf dans les centrales géothermiques puisque l'électricité peut être transportée.

### I.3.6 Energies marines

L'énergie marine ou des mers est extraite du milieu marin. Il y a notamment l'énergie marémotrice (issue du mouvement de l'eau créé par les marées), l'énergie des vagues (utilise la puissance du mouvement des vagues), l'énergie thermique des mers (produite en exploitant la différence de température entre les eaux superficielles et les eaux profondes des océans), les éoliennes offshore, et l'énergie osmotique (diffusion ionique provoquée par l'arrivée d'eau douce dans l'eau salée de la mer). Tout comme les autres sources renouvelables, elle est non polluante lors de la production. On note également que l'énergie potentiellement disponible est énorme et que cette technologie a un bel avenir [1].

#### I.3.6.1 Avantage et inconvénients de l'énergie marémotrice ou marine

##### ➤ Avantages de l'énergie marémotrice ou marine

L'énergie marémotrice présente les avantages suivants [8].

- C'est une énergie renouvelable : ce type de centrale électrique profite de l'énergie des marées. Les marées sont une conséquence de l'interaction gravitationnelle de la Lune, du Soleil et de la Terre, c'est-à-dire une ressource qui ne peut pas être épuisée.
- C'est une énergie propre, ce type d'énergie n'émet pas de gaz à effet de serre et ne contribue donc pas au réchauffement climatique de la Terre.
- Les centrales marémotrices ne génèrent pas de nuisances sonores.
- On peut dire qu'il prédit le mouvement des marées et donc effectue une planification énergétique.
- Il est également économe en énergie grâce à la densité de l'eau, donc de l'énergie peut être obtenue en faisant tourner les turbines à basse vitesse.
- Une fois les installations construites, elles sont faciles à entretenir et la production d'électricité est économiquement abordable.

### ➤ Inconvénients de l'énergie marémotrice

Les principales limites de ces plantes sont [8].

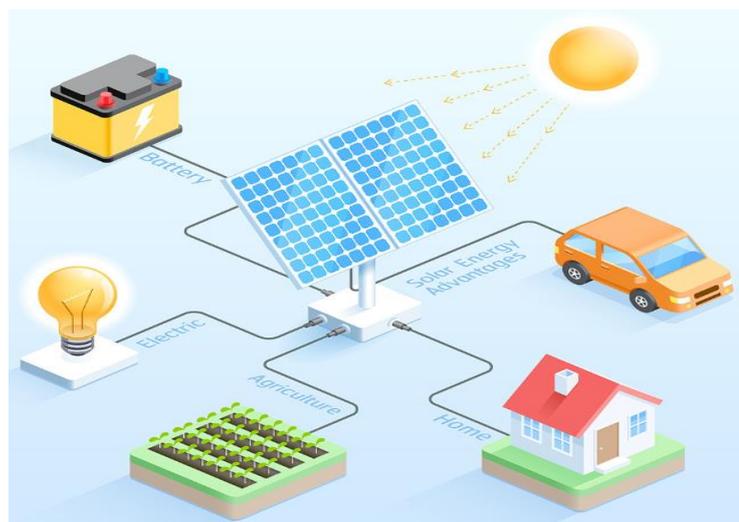
- Le coût élevé de l'installation par rapport à la quantité d'énergie qui peut être obtenue.
- La difficulté de l'installation (les sites idéaux doivent avoir des amplitudes de marée supérieures à 3 mètres et une topographie favorable à l'installation).
- Discontinuité de production.
- Érosion côtière créée par les centrales électriques qui modifient les courants de marée.
- La tendance à la sédimentation au sein du bassin (surtout s'il est placé à l'embouchure des rivières).
- La perturbation de l'écosystème, en particulier pour la faune.

### I.3.7 Énergie Solaire

Le soleil est une source quasiment inépuisable d'énergie qui envoie à la surface de la terre un rayonnement qui représente chaque année environ 8400 fois la consommation énergétique de l'humanité. Cela correspond à une puissance instantanée reçue de 1 kilowatt crête par mètre carré (KWc/m<sup>2</sup>) répartie sur tout le spectre, de l'ultraviolet à l'infrarouge. Les déserts de notre planète reçoivent en 6 heures plus d'énergie du soleil que n'en consomme l'humanité en une année [9].

L'énergie solaire est produite et utilisée selon plusieurs procédés:

- L'énergie solaire thermique.
- L'énergie solaire photovoltaïque.



**Figure I.5 :** Système solaire photovoltaïque.

### I.3.7.1 Energie solaire photovoltaïque

#### I.3.7.1.1 Définition

L'énergie solaire photovoltaïque (PV) provient de la conversion directe de l'énergie provenant de photons, compris dans le rayonnement lumineux (solaire ou autre) en énergie électrique. Elle utilise pour ce faire des modules photovoltaïques composés de cellules ou de photopiles fabriqués avec des matériaux sensibles aux longueurs d'ondes du visible qui réalisent cette transformation d'énergie. L'association de plusieurs cellules PV en série/parallèle donne lieu à un générateur photovoltaïque (GPV) qui a une caractéristique statique courant-tension  $I(V)$  non linéaire et présentant un point de puissance maximale (PPM). Cette caractéristique dépend du niveau de rayonnement et de la température de la cellule ainsi que du vieillissement de l'ensemble [10].

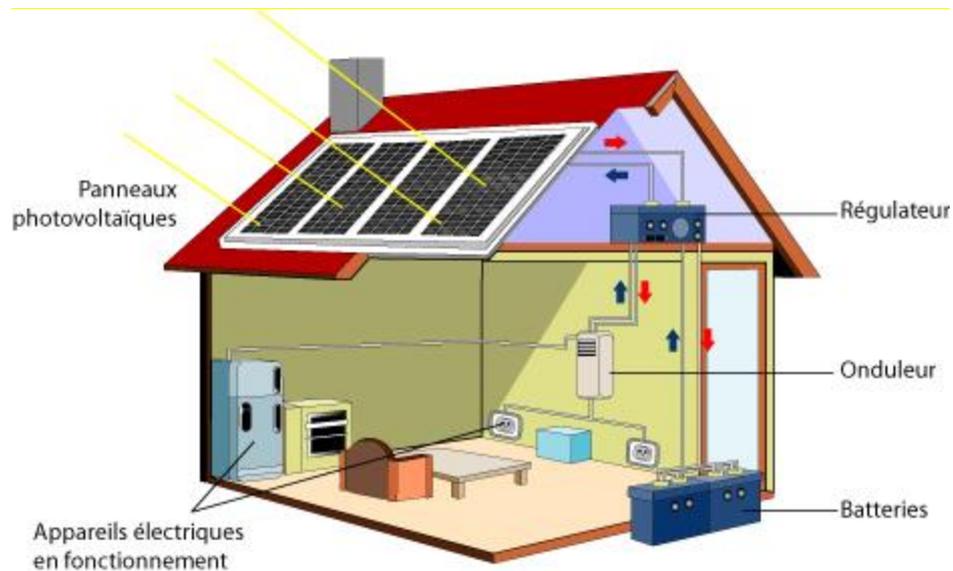


Figure I.6 : Système photovoltaïque.

#### I.3.7.1.2 Histoire de photovoltaïque

L'effet photovoltaïque a été mis en évidence par Antoine Becquerel en 1839 mais c'est seulement à partir de la 2ème moitié du 20ème siècle que l'on a réellement commencé à développer cette découverte.

En 1954, les laboratoires Bell présentent la première cellule photovoltaïque qui alimente des appareils électriques domestiques.

Dès 1958, Vanguard I est le premier satellite alimenté en énergie par des panneaux photovoltaïques.

Durant les années 1960, l'usage du photovoltaïque pour les satellites se généralise. Embarqués à bord des lanceurs puis déployés en orbite autour de la terre, les panneaux photovoltaïques démontrent leur robustesse et leur fiabilité.

A partir des années 1970, les panneaux photovoltaïques se développent sur des applications terrestres et maritimes. Ils permettent de fournir de l'énergie à des sites isolés qui ne sont pas desservis par un réseau électrique comme les balises en pleine mer ou les relais de télécommunication en plein désert. Les panneaux photovoltaïques sont utilisés dans les conditions les plus extrêmes. En mer, ils sont exposés aux tempêtes et à la corrosion saline. Dans les déserts, ils subissent des températures extrêmes et des cycles thermiques très exigeants avec des nuits très froides suivies de fortes chaleurs le jour.

Le premier bâtiment alimenté uniquement par l'énergie solaire voit le jour à Albuquerque au Nouveau Mexique en 1974. Ce qui semblait impensable est devenu une réalité : l'énergie solaire peut répondre à l'intégralité des besoins énergétiques d'un bâtiment.

Après la signature des accords de Kyoto en 1997, des réflexions sont menées dans les grands pays développés pour trouver des solutions concrètes au problème d'émission de gaz à effet de serre. Il s'agit notamment de réduire notre consommation aux énergies fossiles. Le solaire photovoltaïque est identifié comme l'une des technologies les plus prometteuses. Afin de compenser son coût encore élevé, des mécanismes d'incitations financières sont mis en place au Japon et en Allemagne dès l'année 2000 puis progressivement dans la plupart des grands pays développés.

Ces incitations passent souvent par le principe du « tarif d'achat » : l'électricité produite par des panneaux photovoltaïques est achetée à un prix fixe et supérieur à celui du marché pendant une durée suffisante pour assurer la rentabilité de l'investissement. C'est le début du développement du solaire raccordé au réseau. En France, après un premier dispositif insuffisamment incitatif, les « tarifs d'achat » sont revalorisés en 2006 à un niveau qui permet le décollage du marché.

Les mécanismes d'incitation ont permis d'accélérer la croissance de l'industrie photovoltaïque. Le nombre de panneaux solaires en production dans le monde a été multiplié par 2500 entre 1996 et 2016. Cette croissance exponentielle du marché mondial a favorisé l'apparition de nouveaux fabricants et a conduit à des investissements massifs en recherche et développement. Ces efforts ont permis d'améliorer le rendement des panneaux et d'optimiser les procédés de fabrication. En parallèle, la taille moyenne des unités de fabrication de panneaux photovoltaïques a été multipliée par 1000. Les économies d'échelle obtenues ont été considérables. Cette phase intensive d'industrialisation a permis de diviser par 8 le coût de production des panneaux photovoltaïques entre 2000 et 2012 [11].

### I.3.7.1.3 Avantage et inconvénients de l'énergie photovoltaïques

L'énergie photovoltaïque a plusieurs avantages, néanmoins elle présente aussi quelques inconvénients, ils seront présentés ci-dessous [12].

#### ➤ **Avantage de l'énergie photovoltaïque**

- L'énergie du soleil est la source la plus renouvelable parmi toutes les autres.
- Sur les sites isolés, l'énergie photovoltaïque offre une solution pratique pour obtenir de l'électricité à moindre coût.
- La revente du surplus de production permet d'amortir les investissements voir de générer des revenus.
- L'énergie photovoltaïque est totalement modulable et peut donc répondre à un large éventail de besoins. La taille des installations peut aussi être augmentée par la suite poursuivre les besoins de la charge.
- L'énergie photovoltaïque est une énergie propre et non-polluante qui ne dégage pas de gaz à effet de serre et ne génère pas de déchets.

#### ➤ **Inconvénients de l'énergie photovoltaïque**

- Le coût d'investissement des panneaux photovoltaïques qui reviennent cher.
- La fabrication des panneaux photovoltaïques relève de la haute technologie, demandant énormément de recherche, de développement et donc des investissements coûteux. Ce qui se traduit avec un prix d'installation qui, aujourd'hui reste assez chère.
- Les rendements des panneaux photovoltaïques sont encore faibles.
- Dans le cas d'une installation photovoltaïque autonome qui ne revend pas son surplus d'électricité au réseau, il faut inclure des batteries dont le coût reste très élevé.
- Le niveau de production d'électricité n'est pas stable et pas prévisible mais dépend du niveau d'ensoleillement. De plus, il n'y a aucune production d'électricité le soir et la nuit.

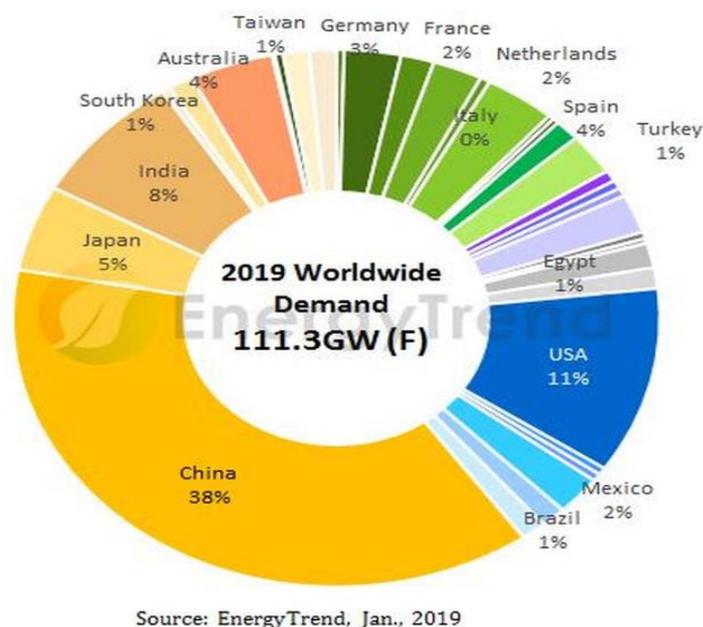
### I.3.7.1.4 Contexte énergétique

#### ❖ **Production mondiale de l'énergie photovoltaïque**

La croissance mondiale du photovoltaïque est extrêmement dynamique et varie fortement selon les pays. D'après les statistiques IEA (International Energy Agency), en 2020, il y avait au moins 37 pays dans le monde avec une capacité photovoltaïque cumulée de plus d'un gigawatt.

À la fin de 2019, une quantité cumulée de 629 GW d'énergie solaire avait été installée dans le monde. Début 2020, le principal pays de l'énergie solaire était la Chine avec 208 GW, représentant un tiers de la capacité solaire installée mondiale. À la fin de 2016, la capacité photovoltaïque cumulée a augmenté de plus de 75 gigawatts (GW) et atteint au moins 303 GW, suffisante pour fournir environ 1,8% de la consommation mondiale totale d'électricité. Les principaux installateurs de 2016 à 2019 étaient la Chine, les États-Unis et l'Inde.

La capacité solaire photovoltaïque disponible au Honduras est maintenant suffisante pour fournir 12,5% de l'énergie électrique du pays, tandis que l'Italie, l'Allemagne et la Grèce peuvent produire entre 7% et 8% de leur consommation d'électricité domestique respective [13].



**Figure I.7** : Production mondiale de l'énergie photovoltaïque en 2019 [51].

### ❖ Energies solaire en Algérie

L'étude de gisement solaire est le point de départ de toute investigation dans le domaine de l'énergie solaire. Le gisement solaire est un ensemble de données décrivant l'évolution du rayonnement solaire disponible dans un lieu donné et au cours d'une période donnée. Son évolution peut se faire à partir des données de l'irradiation solaire globale. L'Algérie dispose d'un des gisements solaires les plus élevés au monde.

La durée d'insolation moyenne nationale dépasse les 2000 heures annuellement. Cette valeur peut atteindre les 3900 heures dans les hauts plateaux et le Sahara. Ainsi, l'énergie moyenne reçue quotidiennement sur une surface inclinée à la latitude est d'environ 7 KWh/m<sup>2</sup>/jour. Elle est répartie comme suit : Au Nord : 5,6kWh/m<sup>2</sup>/jour ; Au sud : 7,2kWh/m<sup>2</sup>/jour [14].

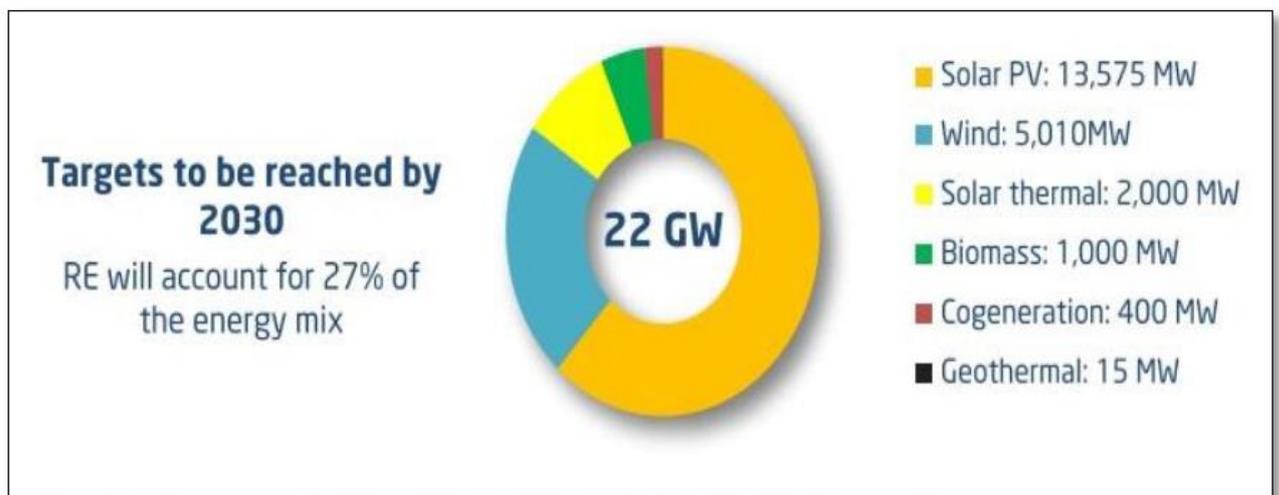
**Le Tableau I.8** : le potentiel solaire en Algérie

Superficie	Région côtière	Hauts plateaux	Sahara
Superficie(%)	4	10	86
Durée moyenne d'insolation (Heures/an)	2650	3000	3500
Energies moyenne reçue (kWh/m <sup>2</sup> /an)	1700	1900	2650

❖ **Développement des systèmes photovoltaïques en Algérie**

La révision du programme énergétique national se concentre sur le développement du photovoltaïque à grande échelle. La première phase du programme a été consacrée à la réalisation de projets pilotes et de tests sur les diverses technologies existantes. Le programme national pour le développement des énergies renouvelables et de l'efficacité énergétique vise la mise en service d'une capacité de production d'énergie renouvelable de 22 000 MW d'ici 2030 (Figure I. 9), dont plus de 4 500 MW seront réalisés d'ici 2020 [15].

La deuxième phase vient d'être lancée par l'appel d'offres national et international du projet algérien dénommé « Atlas 1 », d'une capacité globale de 4.050 mégawatts, réparti en trois lots de 1.350 mégawatts chacun en énergie d'origine solaire de type photovoltaïque. Cela confirme la volonté politique de l'état d'investir de plus en plus dans les énergies renouvelables et en particulier énergie photovoltaïque [15].



**Figure I.8** : Programme ERS Algérien : allocation de l'objectif de 22 GW à atteindre de 2030 [15].

### I.3.7.1.5 Rayonnement solaire

Le rayonnement solaire est la matière première de l'énergie solaire. C'est une propagation d'une onde de longueur qui varie entre 0.2 et  $4 \cdot 10^{-6} \text{m}$ . sans la nécessité d'un support physique pour se déplacer, il arrive au sol après la perte d'une grande partie de son intensité, à cause d'une partie de l'ultraviolet, qui s'absorbent, on distingue plusieurs différents types de rayonnement [16] :

- Le rayonnement direct est reçu directement du soleil, sans diffusion par l'atmosphère. Ses rayons sont parallèles entre eux, il forme donc des ombres et peut être concentré par des miroirs. Il peut être mesuré par un pyrhéliomètre.
- Le rayonnement diffus est constitué par la lumière diffusée par l'atmosphère (air, nébulosité, aérosols). la diffusion est le phénomène qui répartit un faisceau parallèle en une multitude de faisceaux partant dans toutes les directions. dans le ciel, ce sont à la fois les molécules d'air, les gouttelettes d'eau (nuages) et les poussières qui produisent ce (éclatement) des rayons du soleil. Cela dépend donc avant tout des conditions météorologiques.
- Le rayonnement solaire réfléchi ou l'albédo du sol est le rayonnement qui est réfléchi par le sol ou par des objets se trouvant à sa surface. cet albédo peut être important lorsque le sol est particulièrement réfléchissant (eau, neige)
- Le rayonnement global : est la somme de tous les rayonnements reçus, y compris le rayonnement réfléchi par le sol et les objets qui se trouvent à sa surface. Il est mesuré par un pyranomètre ou un solarimètre sans écran. Les stations météorologiques généralement mesurer le rayonnement global horizontal par un Pyranomètre placé horizontalement à l'endroit requis.

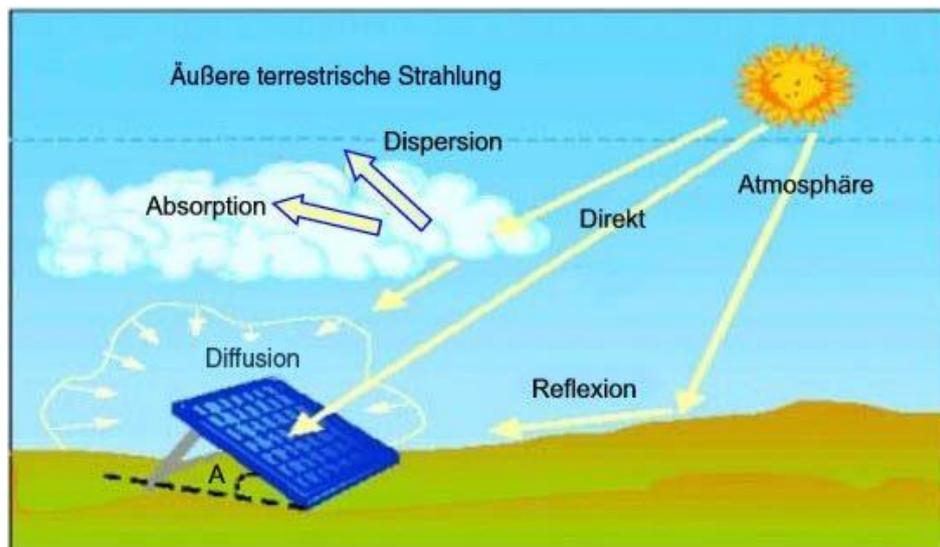


Figure I.9 : Les types du rayonnement solaire.

### I.3.7.1.6 Orientation et inclinaison

La question qui vient immédiatement à l'esprit est: comment placer les panneaux solaires pour récupérer un maximum de rayonnement solaire et comment savoir quelle énergie on va récupérer ? Pour installer un panneau solaire on doit se préoccuper à la fois de l'orientation et de l'inclinaison. L'orientation indique tout simplement vers quel point cardinal un panneau est exposé il peut faire face au Sud, au Nord, à l'Est, à l'Ouest... tout comme la façade d'une maison.

L'inclinaison, quant à elle, est l'angle que fait le panneau avec le plan horizontal. Etant donné que la position du soleil dans le ciel varie constamment, il faudrait idéalement que le panneau suive le soleil. Il existe de tels dispositifs «suiveurs», mais ils consomment une part de l'énergie et sont souvent assez onéreux (pour supporter tous les climats) et demandent de l'entretien. Ils sont surtout justifiés pour de gros systèmes avec concentration et pour des rayonnements directs uniquement. En pratique, l'inclinaison optimale pour une utilisation annuelle, est déterminée par la règle suivante:

Cet emplacement idéal se justifie, encore une fois, surtout pour les rayonnements directs et les panneaux qui convertissent le mieux ce rayonnement, en l'occurrence les panneaux au silicium cristallin. Les panneaux au silicium amorphe, quant à eux, convertissent très bien le rayonnement diffus, et pourront être placés par exemple à l'horizontale sans perdre trop d'énergie solaire dans les climats où il y a beaucoup de rayonnement diffus [17].

### I.3.7.1.7 Spectre du rayonnement

Le rayonnement électromagnétique est composé de «grains» de lumière appelés photons. L'énergie de chaque photon est directement liée à la longueur d'onde : Le spectre du rayonnement extraterrestre correspond environ à l'émission d'un corps noir porté à 5800° K. Une courbe standard, compilée selon les données recueillies par les satellites, est désignée sous le nom d'AM0. Sa distribution en énergie est répartie en [18]:

Ultraviolet UV	$0.20 < \lambda < 0.38 \text{ mm}$	6.4%
Visible	$0.38 < \lambda < 0.78 \text{ mm}$	48.0%
Infrarouge IR	$0.78 < \lambda < 10 \text{ mm}$	45.6%

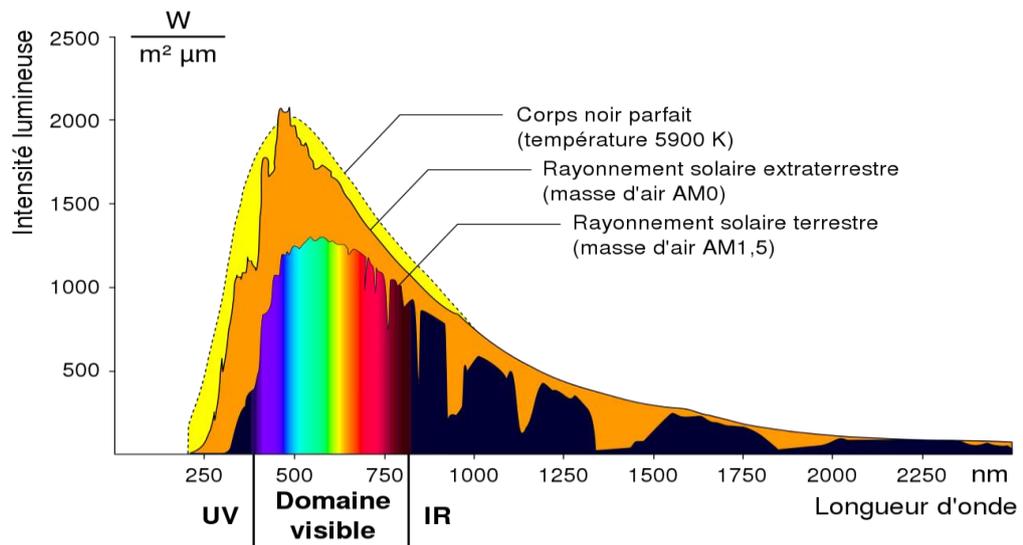


Figure I.10 : Spectre d'irradiation solaire [50].

### I.3.7.1.8 Effet photovoltaïque

L'énergie photovoltaïque (PV) est la transformation directe de la lumière en électricité. a l'encontre de l'énergie solaire passive, qui utilise les éléments structuraux d'un bâtiment pour mieux le chauffer (ou le refroidir), et de l'énergie solaire active, qui utilise un caloporteur (liquide ou gazeux) pour transporter et stocker la chaleur du soleil (on pense au chauffe-eau), l'énergie photovoltaïque n'est pas une forme d'énergie thermique. Elle utilise une photopile pour transformer directement l'énergie solaire en électricité. L'effet photovoltaïque, c'est-à-dire la production d'électricité directement de la lumière, fut observée la première fois, en 1839, par le physicien français Edmond Becquerel. Toutefois, ce n'est qu'au cours des années 1950 que les chercheurs de la compagnie Bell-Lab, aux États-Unis, parvinrent à fabriquer la première photopile, l'élément primaire d'un système photovoltaïque.

### I.3.7.1.9 Principe de conversion

Ce matériau comporte deux parties, l'une présentant un surplus d'électrons et l'autre un manque d'électrons, dites respectivement dopée de type n et dopée de type p. Lorsque la première est mise en contact avec la seconde, les électrons en excès dans le matériau n se diffusent dans le matériau p. La zone initialement dopée n devient chargée positivement, et la zone initialement dopée p chargée négativement. Il se crée donc entre elles un champ électrique qui tend à repousser les électrons dans la zone n et les trous vers la zone p. Actuellement, la production photovoltaïque est à base de silicium (parce que, c'est un matériau stable et abondant sur terre) [19].

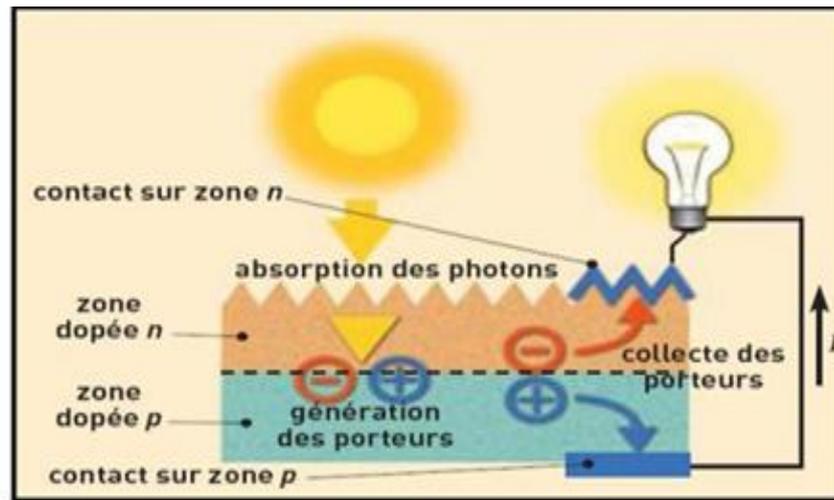


Figure I.11 : Principe de la conversion photovoltaïque.

#### I.4 Conclusion

Dans la première partie de ce chapitre nous avons donné une présentation sur les différentes sources d'énergies renouvelables qui existent, tel que l'énergie hydraulique, solaire, éolienne, biomasse et géothermique...etc. Dans la seconde partie nous avons étalé la définition et le principe de fonctionnement de l'énergie solaire et leur situation global ainsi que une explication sur le gisement solaire et leurs notions fondamentales

Vrai semblablement promises sur le moyen et long termes à un développement important, les technologies des énergies renouvelables n'ont pour la plupart pas encore atteint une maturité suffisante pour entrer en compétition avec les énergies classiques sur une grande échelle. Il existe bien sûr une exception qui est l'énergie photovoltaïque, ainsi que certaines formes d'énergies renouvelables qui commencent à être économiquement viables.

# *Chapitre II*

## *Systemes photovoltaïques*

## **II.1 Introduction**

Le générateur photovoltaïque convertit la radiation solaire incidente en puissance électrique et en général, on distingue deux types d'installations :

Non autonomes ou «grid connected » i.e. rattachées au réseau de distribution électrique. Dans Les systèmes reliés aux réseaux, les consommateurs standards de puissance AC sont connectés au générateur via un onduleur (convertisseur DC/AC) parfois bidirectionnel (redresseur/onduleur). Le plus d'énergie du générateur photovoltaïque est injecté au réseau public et les demandes de puissance qui existent la capacité de production du générateur sont attachées sur le réseau. Autonomes ou «stand-alone», qui sont le propose de cette étude, ces installations isolées ne sont pas connectées au réseau, mais elles doivent assurer la couverture de la demande de la charge en tout temps. La puissance à la sortie du générateur photovoltaïque n'est pas suffisante pour satisfaire la demande de charge, aussi l'autonomie du système est-elle assurée par un système de stockage d'énergie.

## **II.2 Systèmes photovoltaïque**

Un système (photovoltaïque) PV est un ensemble d'éléments (constituants) de production d'électricité, en utilisant une source solaire. Ces constituants sont essentiellement les composantes suivant :

- Générateur photovoltaïque.
- Un système de régulation.
- Onduleur.
- Système de stockage.
- Boite à jonction.
- La charge.

## **II.3 Classification des systèmes PV**

Les systèmes PV sont classés en trois types: autonomes, hybrides et reliés au réseau. Le type choisi dépendra des besoins énergétiques et de l'emplacement.

### **II.3.1 Systèmes autonomes**

C'est un système photovoltaïque complètement indépendant d'autre source d'énergie et qui alimente l'utilisateur en électricité sans être connecté au réseau électrique. Dans la majorité des cas, un système autonome exigera des batteries pour stocker l'énergie. Ils servent habituellement à alimenter les maisons en site isolé, sur des îles, en montagne ainsi qu'à des applications comme la

surveillance à distance et le pompage de l'eau. En règle générale, les systèmes PV autonomes sont installés là où ils constituent la source d'énergie électrique la plus économique [20].

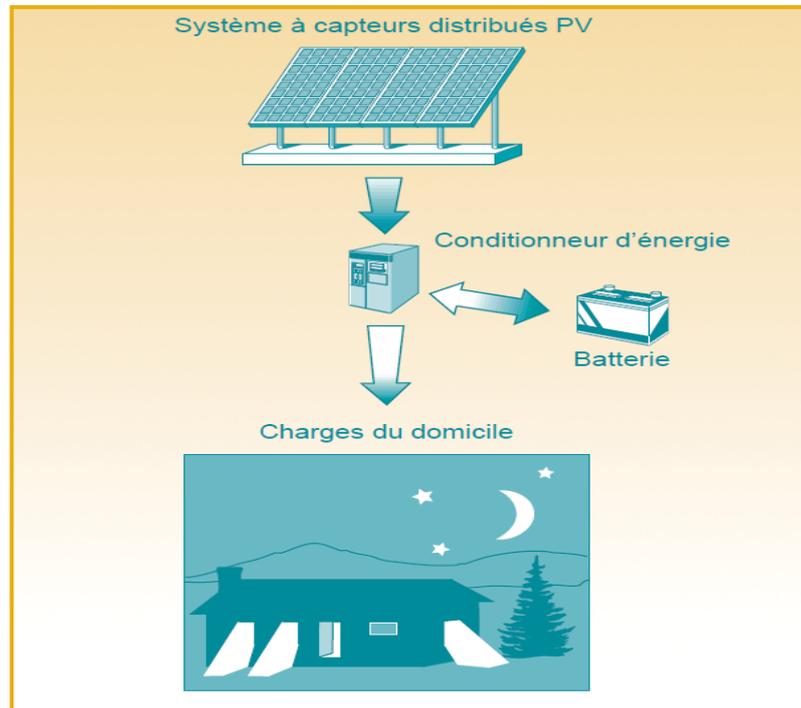


Figure II.1 : Système PV autonome.

### II.3.2 Systèmes couplés au réseau

Les systèmes photovoltaïques connectés au réseau ou interactifs avec le service public sont conçus pour fonctionner en parallèle et être interconnectés avec le réseau électrique. Le composant principal des systèmes photovoltaïques connectés au réseau est l'onduleur. L'onduleur convertit le courant continu produit par l'installation photovoltaïque en courant alternatif conforme aux exigences de tension et de qualité de l'énergie du réseau électrique, et cesse automatiquement de fournir de l'énergie au réseau lorsque celui-ci n'est pas alimenté [21].

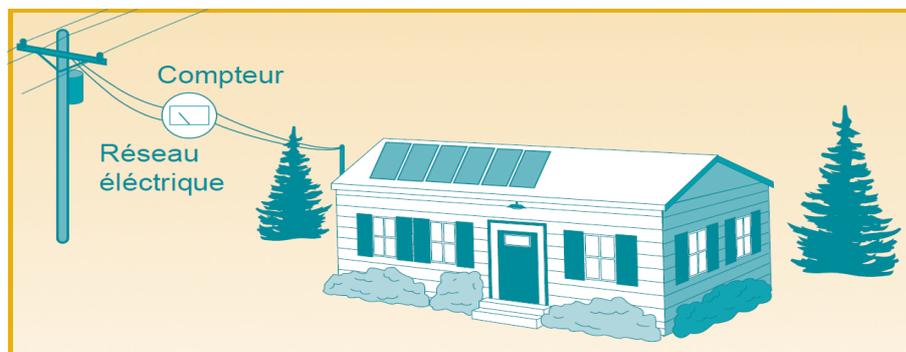


Figure II.2 : Système PV raccordé au réseau.

### II.3.3 Systèmes hybrides

Les systèmes d'énergie solaire hybride sont des systèmes d'énergie hybride qui combinent l'énergie solaire d'un système photovoltaïque avec une autre source d'énergie génératrice [22]. Les systèmes hybrides solaires comprennent les systèmes éoliens-solaires. La combinaison de l'éolien et du solaire a l'avantage que les deux sources se complètent, car les pics de fonctionnement de chaque système se produisent à des moments différents de la journée et de l'année. La production d'électricité d'un tel système hybride est plus constante et fluctue moins que celle de chacun des deux sous-systèmes composants [21].

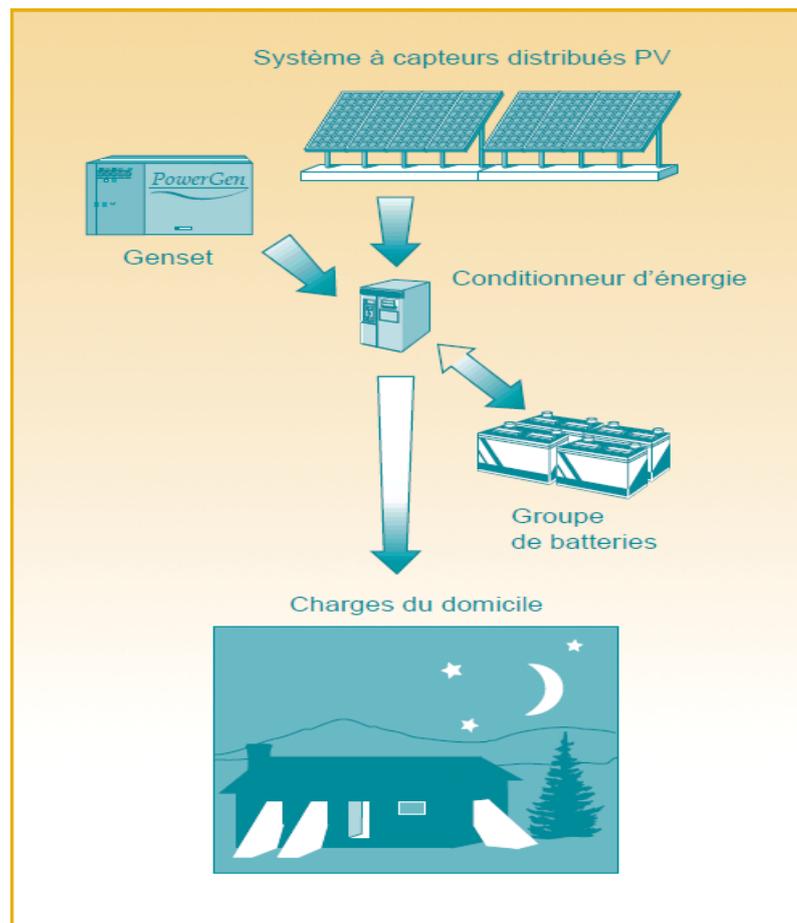


Figure II.3 : Système PV hybride.

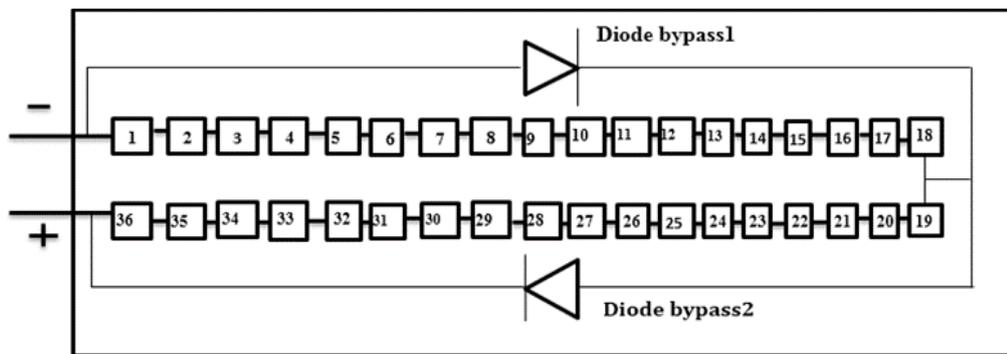
### II.4 Constitution d'un générateur PV

Le Générateur PV se compose de modules photovoltaïques interconnectés en série et/ou en parallèle afin de produire la puissance requise. Ces modules sont montés sur une armature métallique qui permet de supporter le champ solaire avec un angle d'inclinaison spécifique. Pour chaque panneau on peut avoir autant de sorties que de modules, ce que fait qu'on aura besoin de boîte de dérivation qui regroupe le tous.

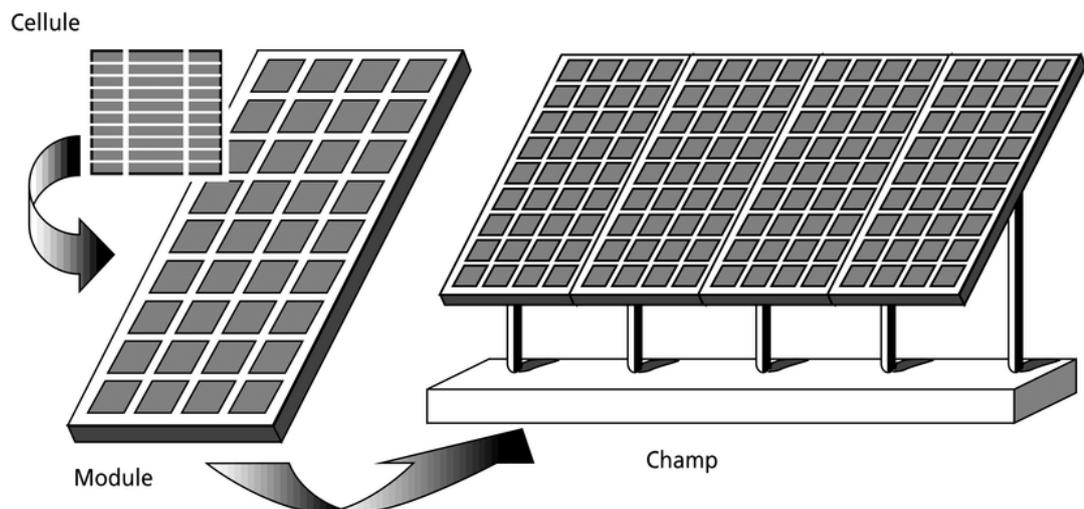
- **Champ PV** : Est la source d'énergie électrique en courant continu. Il est constitué d'un ensemble de modules rangés sous forme de panneaux montés en série et en parallèle pour atteindre une tension et un courant plus grands. (Voir Figure II.5).

- **Module** : Le module est un ensemble de photopiles (cellules) assemblés pour générer une puissance électrique exploitable lors de son exposition à la lumière.

En pratique, le projet devra définir le type de modules par ses dimensions ou par le nombre de cellules qu'il comporte. Les modules mono- et polycristallins les plus courants sont composés de 36 cellules disposées en 3 x 12 ou en 4 x 9 (Voir Figure II.4). Les dimensions des modules dépendent de celles des cellules; de l'ordre de 100 x 100 mm, avec une tendance vers des cellules plus grandes pour les polycristallines. Avec l'augmentation de la dimension des centrales photovoltaïques, les constructeurs proposent maintenant des modules composés de plus de cellules, souvent 72 cellules, soit l'équivalent d'un module double [23].



**Figure II.4** : Module de 36 cellules connectées en séries et protégé par deux diodes de bypass [24].



**Figure II.5** : Constituants d'un générateur PV.

### II.4.1 Cellule photovoltaïque

La cellule PV ou photopile est le plus petit élément d'une installation photovoltaïque (Figure II.6). Elle est composée d'un matériau semi-conducteur qui absorbe l'énergie lumineuse et la transforme directement en courant électrique. Un semi-conducteur est un matériau dont la concentration en charges libres est très faible par rapport aux métaux. Pour qu'un électron lié à son atome (bande de valence) devienne libre dans un semi-conducteur et participe à la conduction du courant, il faut lui fournir une énergie minimum pour qu'il puisse atteindre les niveaux énergétiques supérieurs (bande de conduction).

C'est l'énergie du " bande gap ",  $E_g$  en électron-volt (eV). Cette valeur seuil est propre à chaque matériau semi-conducteur et va de 1.0 à 1.8 eV pour les applications photovoltaïques.

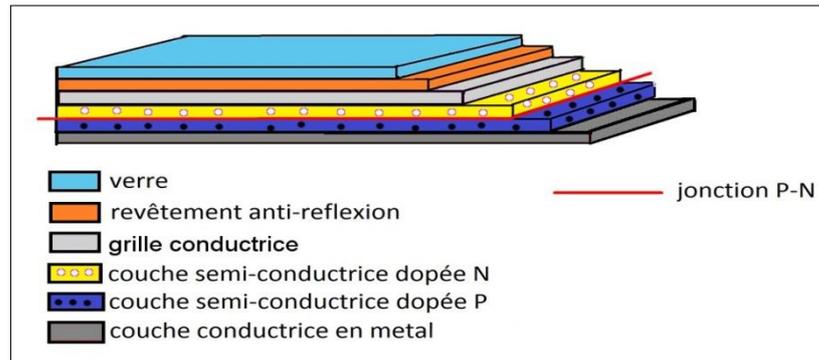
Elle est de 1.1 eV pour le silicium cristallin, et de 1.7 eV pour le silicium amorphe.



**Figure II.6 :** Cellule photovoltaïque.

### II.4.2 Structure de la cellule photovoltaïque

Une cellule photovoltaïque est constituée de plusieurs couches. On trouve au centre de cette cellule, une couche avec porteurs de charges libres négative (N) en contact avec une autre couche avec porteurs de charges libres positives (P). De part et d'autre du cœur de la cellule, on a une couche conductrice (K) autrement dit une grille métallique, puisqu'il faut que cette couche soit conductrice et ne subisse pas des phénomènes de corrosion. On a donc une couche qui sert de cathode (pôle +) recouvrant la couche semi-conductrice dopée N et une couche qui joue le rôle de l'anode (pôle -) en dessous la couche semi-conductrice P. Aussi le silicium est très réflecteur, on place donc un revêtement anti-réflexion sur le dessus de la cellule. Enfin on trouve une couche de verre qui protège la cellule. Ces couvertures de protections sont indispensables car la cellule est très fragile. L'épaisseur totale de la cellule est de l'ordre du millimètre. Pour finir, on relie les cellules entre elles, panneau solaire, afin d'obtenir une puissance suffisante [25].



**Figure II.7** : Schéma d'une cellule photovoltaïque.

### II.4.3 Principales technologies solaires

Une cellule photovoltaïque peut être réalisée avec de nombreux semi-conducteurs. En réalité il existe aujourd'hui trois principales filières technologiques : le silicium cristallin, les couches minces et les cellules organiques [26].

#### II.4.3.1 Cellules au silicium cristallin

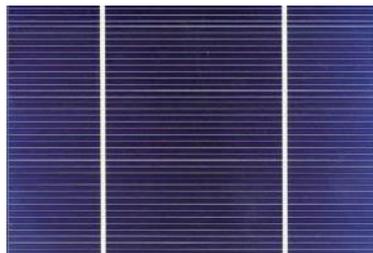
Le silicium est un composant largement utilisé dans les panneaux photovoltaïques. Pourquoi ? La raison est simple : les cellules cristallines présentent les meilleurs rendements et sont produits aujourd'hui à de bas coûts.

Le silicium cristallin domine le marché à plus de 80%. Cette filière comporte deux technologies : le silicium monocristallin et le silicium multi cristallin.

#### II.4.3.2 Silicium monocristallin

Les cellules sont fabriquées avec du silicium parfaitement cristallisé découpé dans des barres. C'est le matériau le plus répandu, et de plus il a l'avantage d'avoir un très bon rendement, entre 12 % et 16 %.

L'inconvénient en est le prix, du fait d'un procédé de fabrication long et énergivore. Il est utilisé en extérieur pour les fortes et moyennes puissances (habitations, relais, télécommunications...).



**Figure II.8** : Cellule monocristalline.

### II.4.3.3 Silicium polycristallin

Les cellules de silicium polycristallin sont découpées dans des barres de silicium reconstitué ; les atomes ne sont pas tous cristallisés. Le rendement est moins bon, entre 11 % et 14 %. L'avantage de ces cellules par rapport à celles en silicium monocristallin réside dans leur prix, puisque leur fabrication, produisant peu de déchets, nécessite de 2 à 3 fois moins d'énergie et est plus rapide. Elles ont les mêmes applications que les cellules en silicium monocristallin.



Figure II.9 : Cellule polycristallin.

### II.4.3.4 Cellules photovoltaïques amorphes

Les cellules photovoltaïques amorphes sont produites à partir d'un « gaz de silicium », qui est projeté sur du verre, du plastique souple ou du métal, par un procédé de vaporisation sous vide. Cette technique permet d'utiliser des couches très minces de silicium.

Les cellules photovoltaïques amorphes, figure II.10 sont moins coûteuses à produire que les précédentes, mais leur rendement n'est que de 5 à 9%. Ils ont un grand potentiel pour un usage domestique, ils sont de plus en plus en demande [26].



Figure II.10 : Cellule photovoltaïque amorphe.

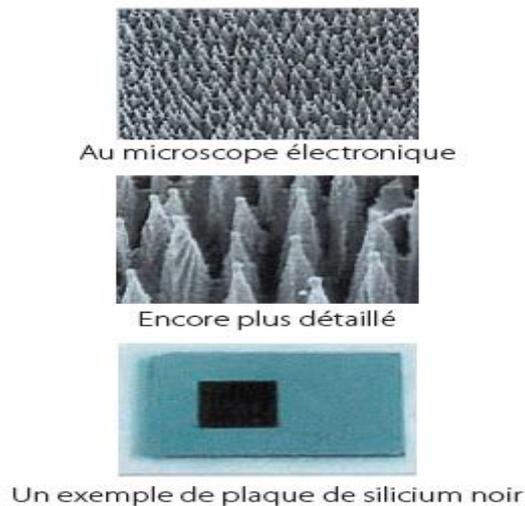
### II.4.3.5 Nouvelle technologie

#### II.4.3.5.1 Silicium noir

Ce sont des chercheurs de l'université de Harvard qui en ont fait la découverte. Lorsqu'une plaquette de silicium est éclairée et que simultanément elle est en contact avec certains gaz halogènes, le silicium forme des cônes qui piègent la lumière et donne à la plaquette une

couleur noire. Cette absorption permet d'obtenir un rendement plus élevé, qui pourrait être d'au moins 30 % et même atteindre les 60 %.

Il existe d'autres matériaux utilisés pour la réalisation de cellules photovoltaïques, comme l'arséniure de gallium, qui possède un très haut rendement, entre 20 % et 25 %, mais que son prix extrêmement élevé réserve à une utilisation marginale, presque exclusivement pour les satellites [26].



**Figure II.11** : Cellule photovoltaïque noire.

#### II.4.3.5.2 Cellule organique

Les matériaux organiques, moléculaires ou polymériques, à base de carbone, d'hydrogène et d'azote, sont particulièrement intéressants en termes d'abondance, de coût, de poids et de mise en œuvre [26].

Les cellules organiques sont aujourd'hui un sujet d'étude très actif et restent actuellement un sujet de laboratoire. Ces cellules comprennent deux voies : la voie des cellules « humides » et la voie des cellules polymères organiques dites aussi cellules « plastiques ». Le principal avantage à ces technologies est actuellement la stabilité de leurs performances ainsi que leur durée de vie (actuellement environ 1000 heures)



**Figure II.12** : Cellule organique.

### II.4.3.5.3 Cellule sans silicium en couche mince CIS / CIGS

Les cellules CIS représentent une nouvelle génération de cellules solaires sous forme de films minces, de type CIS (cuivre, indium, sélénium) ou CIGS (cuivre, indium, gallium et sélénium). Les matières premières nécessaires à la fabrication de ces cellules sont plus faciles à se procurer que le silicium utilisé dans les cellules photovoltaïques classiques (bien que ce dernier soit déjà très abondant sur terre). De plus, leur efficacité de conversion énergétique est la plus élevée à ce jour pour des cellules photovoltaïques en couche mince [26].

### II.4.4 Avantages et inconvénients des cellules photovoltaïques

Le tableau II.1 présente les avantages et les inconvénients pour les technologies les plus utilisées d'une cellule photovoltaïque [25].

**Tableau II.1** : Avantage et inconvénient des cellules PV

Type	Silicium mono Cristallin	Silicium poly Cristallin	Amorphe
Durée de vie	35ans	35ans	≤10ans
Avantage	Bon rendement en soleil direct	Bon rendement en soleil direct (moins que le mono cristallin mais plus que l'amorphe)	Souplesse prix moins élevé que les cristallins Bon rendement en diffus
Inconvénient	Mauvais rendement en soleil diffus (temps nuageux) Prix élevé	Mauvais rendement en soleil diffus (temps nuageux) Prix élevé	Mauvais rendement en plein soleil

## II.4.5 Caractéristiques de cellules PV

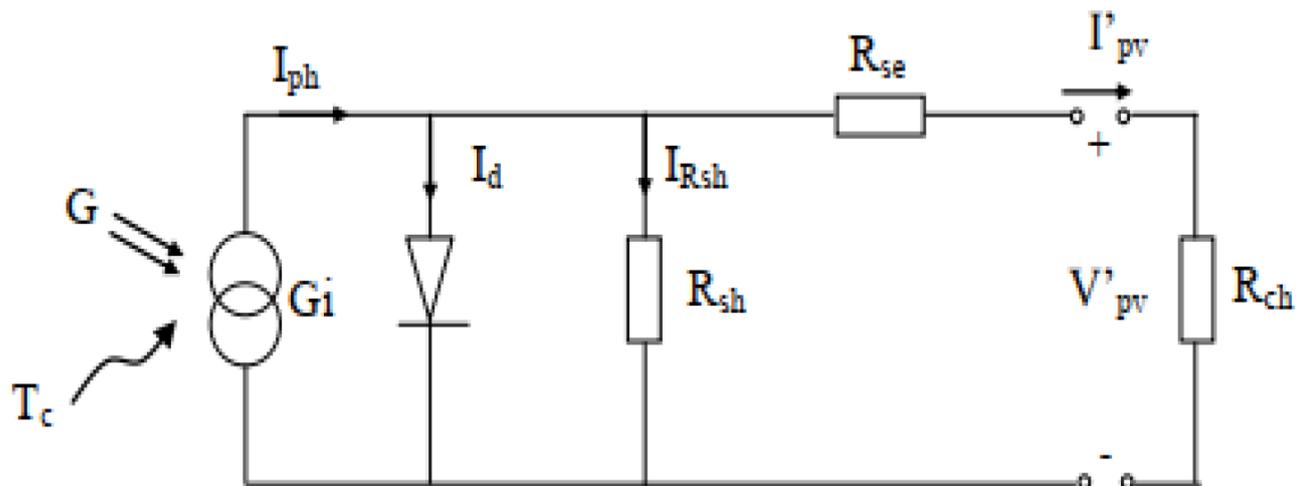


Figure II.13 : Schéma équivalent d'une cellule PV.

Avec :

$G_i$  : Source de courant parfaite

$R_{sh}$  : Résistance shunt qui prend en compte les fuites inévitables de courant qui intervient entre les bornes opposées positive et négative d'une cellule.

$R_{se}$  : Résistance série qui est due aux différentes résistances électriques que le courant rencontre sur son par court (résistance de contact)

Une cellule solaire est caractérisée par les paramètres fondamentaux suivants :

- Le courant de court-circuit  $I_{cc}$ .
- La tension en circuit ouvert  $V_{co}$ .
- Le facteur de forme FF.
- Le rendement de conversion d'énergie.

#### a. Courant de court-circuit ( $I_{cc}$ )

Il correspond au courant pour lequel la tension aux bornes de la cellule PV est nulle et il dépend de l'éclairement et de la température. Dans le cas idéal ;  $R_{se}$  est nulle et  $R_{sh}$  tend vers infinie), ce qui fait que ce courant se confond avec le photo-courant  $I_{ph}$ .

#### b. Tension du circuit ouvert ( $V_{co}$ )

C'est la tension  $V_{co}$  pour laquelle le courant débité par la cellule est nul, c'est-à-dire cellule non connectée à une charge.

Elle est exprimée comme suite :

$$V_{co} = V_t * \ln\left(\frac{I_{ph}}{r_0 + 1}\right) \quad (II. 1)$$

Avec :

$$V_t = \frac{\alpha + K + T}{e} \quad (II. 2)$$

$\alpha$ : Facteur d'idéalité.

$e$ : la charge de l'électron  $e=1.6021 \cdot 10^{-19}$  C

$T$ : température de cellule.

$K$ : Constante de Boltzmann ( $1.3854 \cdot 10^{-23}$  J/K).

### c. Facteur de forme (FF)

Le facteur de forme d'une cellule solaire dépend d'un ensemble de paramètres, il est défini comme le rapport d'une puissance maximale ( $P_{max}$ ) à la puissance calculée en multipliant la tension de circuit-ouvert ( $V_{co}$ ) par le courant de court-circuit ( $I_{cc}$ ).

Le facteur de forme détermine la qualité électrique de la cellule ; il est obtenu par l'équation

$$FF = \frac{P_{max}}{I_{cc} + V_{co}} \quad (II. 3)$$

### d. Rendement

Le rendement de conversion d'énergie est le rapport de la puissance générée ( $P_{max}$ ) et de la puissance du rayonnement solaire incident ( $P_i$ ) reçu en surface de la cellule :

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_i} \quad (II. 4)$$

## II.4.6 Associations des cellules PV

### II.4.6.1 Branchement série

Une association de ( $N_s$ ) cellule en série (Figure II.14) 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 [27].

$$V_{co}N_s = V_{co} * N_s \quad (II. 5)$$

$$I_{cc} = I_c \quad (II. 6)$$

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

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

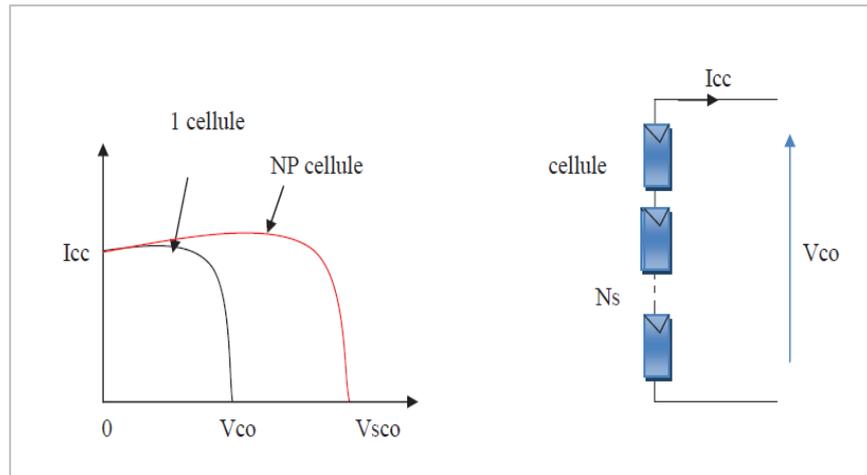


Figure II.14 : Cellules associées en série.

**II.4.6.2 Branchement parallèle**

Une association parallèle de ( $N_p$ ) cellule (Figure II.15) 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 [24].

Avec:

$$I_{cc} = N_p \cdot I_{sc} \tag{II. 7}$$

$$V_{co} = V_{co} N_p \tag{II. 8}$$

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

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

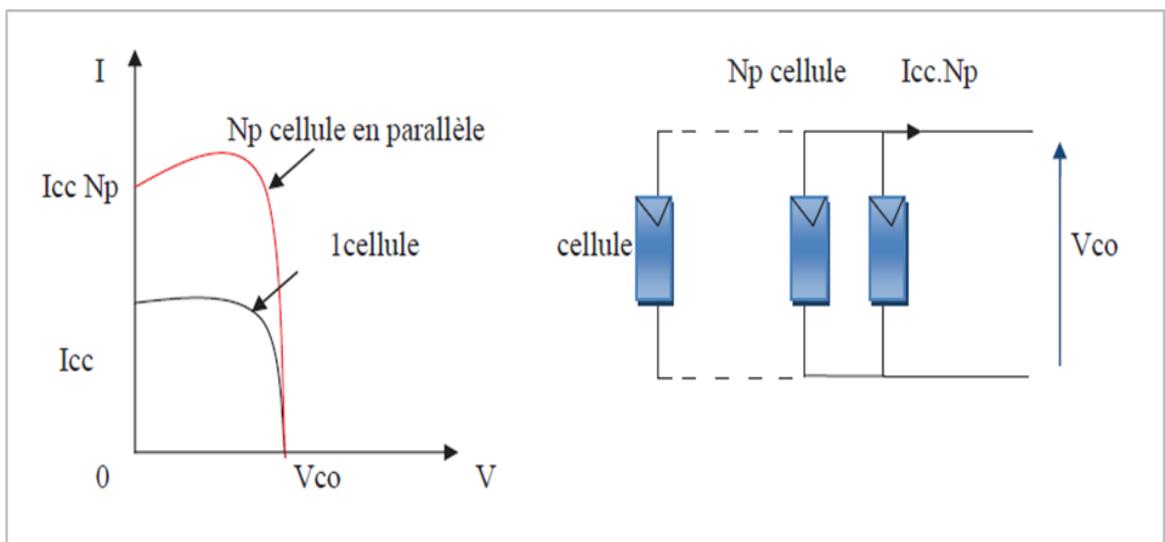


Figure II.15 : Cellules associées en parallèle.

**II.4.6.3 Branchement mixte**

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

Afin d'obtenir des puissances de quelques kW, sous une tension convenable, il est nécessaire d'associer les modules en panneaux et de monter les panneaux en rangées de panneaux série et parallèle pour former ce que l'on appelle un générateur photovoltaïque [28].

$$PT = NMS * NSP * PM \tag{II.9}$$

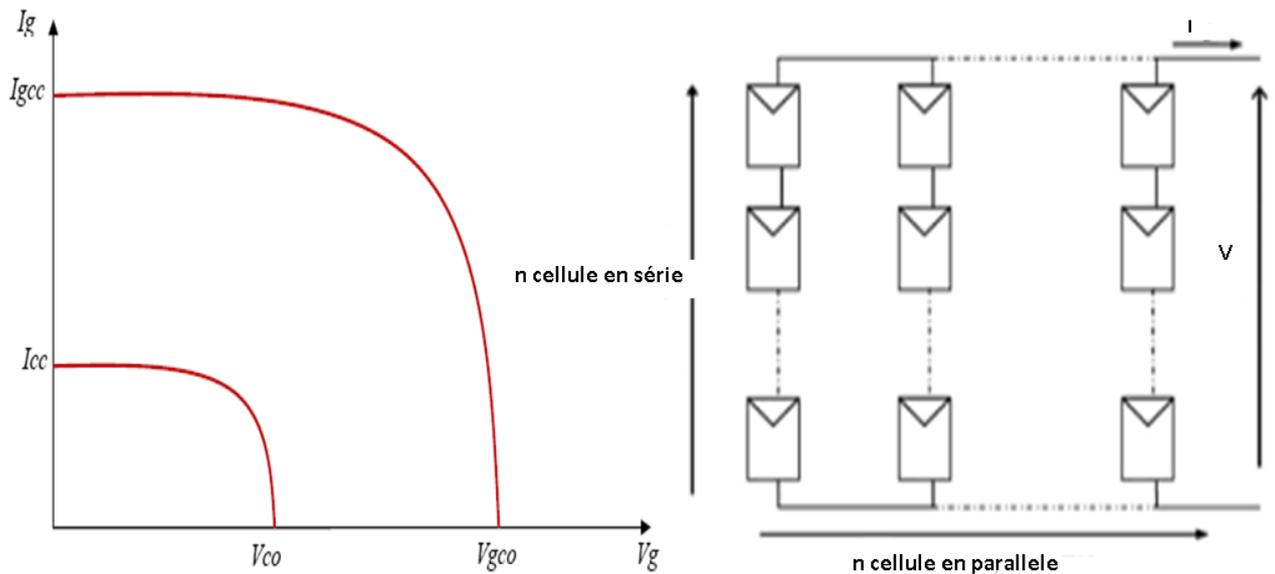


Figure II.16 : Cellules associées en mixte.

**II.4.7 Protection d'un générateur photovoltaïque**

Comme pour les autres centrales électriques, il existe plusieurs sortes de protection pour une installation photovoltaïque : protection des intervenants, protection contre la foudre, protection du générateur PV [29].

**II.4.7.1 Protection d'un générateur photovoltaïque contre les chocs électriques**

Ce type de protection inclue la protection contre les contacts directs, la protection contre les contacts indirects, comme il est expliqué dans les deux paragraphes suivants :

#### II.4.7.1.1 Protection contre les contacts directs

Les matériels PV partie courant continu doivent toujours être considérés comme sous tension et disposer de protection par isolation des parties actives ou par enveloppe [30].

#### II.4.7.1.2 Protection contre les contacts indirects

Les modes de protection doivent intégrer les dispositions mises en œuvre côté D.C et A.C ainsi que la présence ou non d'une séparation galvanique par transformateur entre les parties D.C et A.C [30].

#### II.4.7.2 Protection d'un générateur photovoltaïque contre les surtensions

Les surtensions sont présentes de plusieurs manières dans une installation PV. Elles peuvent être :

1. Transmises par le réseau de distribution et être d'origine atmosphérique (foudre) et/ou dues à des manœuvres.
2. Générées par des coups de foudre à proximité des bâtiments et des installations PV, ou sur les paratonnerres des bâtiments.
3. Générées par les variations de champ électrique dues à la foudre.

En règle générale, un système de protection contre la foudre destiné à un générateur PV se compose des éléments suivants [31]:

1. Système extérieur de Protection contre la Foudre (SPF).
2. Installation de mise à la terre et équilibrage de potentiel.
3. Blindage magnétique et câblage.
4. Protection SPD (Surge Protection Device) coordonnée.

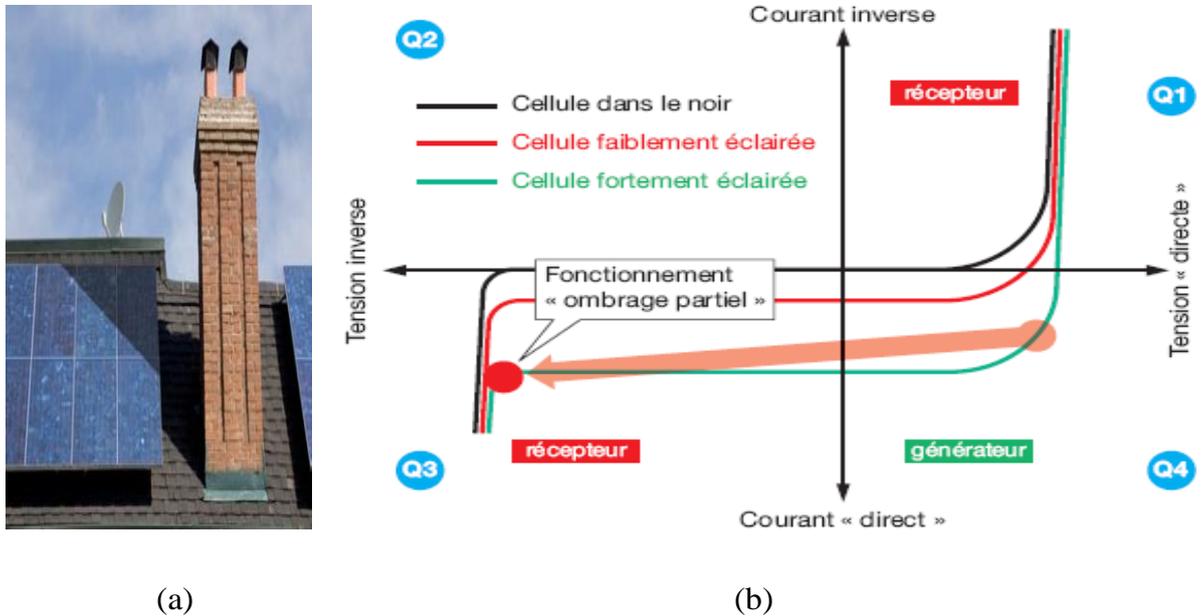
#### II.4.7.3 Protection d'un générateur photovoltaïque contre les surintensités

Le générateur PV comme toutes autre générateur d'énergie électrique doit être protégé contre les surintensités, et autre types de problèmes.

##### II.4.7.3.1 Ombrage d'un générateur

L'ombrage partiel d'une cellule va forcer cette dernière à travailler dans le quadrant Q3 (voir Figure II.17), c'est-à-dire d'inverser la polarité de la tension de l'élément et de l'élever au seuil tension inverse de la jonction ( $U_C \approx -15 \text{ V}$  à  $-25 \text{ V}$ ). La puissance absorbée par les cellules à l'ombre dépasse très nettement la puissance normalement dissipée et provoque des points chauds.

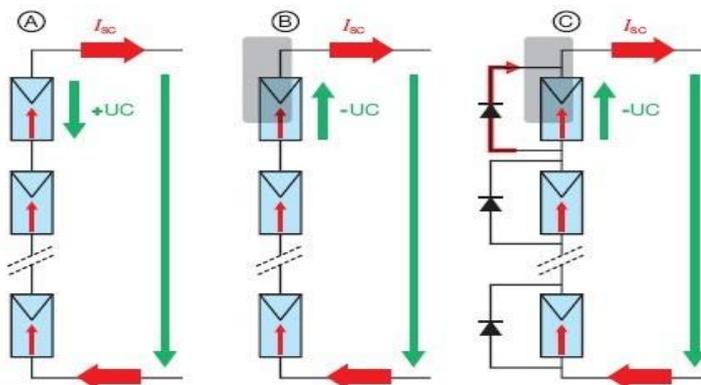
Les points chauds peuvent endommager définitivement le module PV. Une protection contre les surintensités est sans effet, car l'augmentation de la puissance à dissiper est liée à l'apparition d'une tension inverse dans la cellule affectée et non à une augmentation significative du courant  $I_{sc}$ .



**Figure II.17 :** (a) Ombrage des panneaux par un cheminé de la maison, (b) Fonctionnement de la cellule dans le 3<sup>ème</sup> quadrant de la caractéristique I-V, à cause de l'ombre.

Une diode By-pass va, en permettant au courant des autres éléments en série de contourner la cellule « ombrée » Figure II.18 :

1. éviter la surtension inverse ainsi que les points chauds liés à cet ombrage,
2. laisser les autres cellules non ombragées de la chaîne générer leur courant normal, à la place du courant sensiblement égal au courant réduit fourni par la cellule ombragée.



**Figure II.18 :** Système photovoltaïque en: (a) fonctionnement normale, (b) présence d'une ombre: échauffement de la cellule, (c) protection par la mise en place d'une diode de by-pass.

### II.4.7.3.2 Nécessité de protection contre les courants inverses

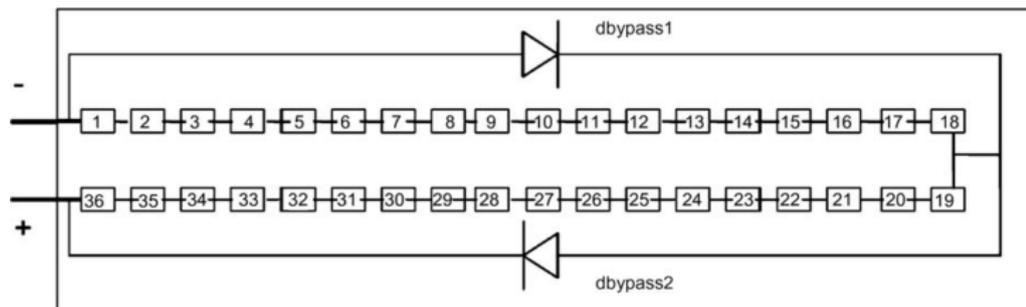
Le dimensionnement des câbles de chaînes dépend fortement des chutes de tension ; les notions de courants admissibles pour la protection des canalisations contre les surcharges sont généralement automatiquement satisfaites et ne nécessitent pas la mise en place de protection pour assurer cette fonction.

Le principal critère de sélection des fusibles est la valeur d'IRM (courant inverse maximum PV) que le module peut supporter temporairement jusqu'à ce que le fusible de protection choisi interrompe le courant de défaut généré suite à un défaut.

Du fait que notre travail porte uniquement sur des défauts conduisant à une baisse de production, nous ne nous intéressons donc qu'aux composants servant à la protection du générateur PV [29]:

#### a) Diode de by-pass

La diode de by-pass est connectée en antiparallèle avec un groupe de cellules pour protéger les cellules les plus faibles contre la polarisation inverse.



**Figure II.19:** Module de 36 cellules protégé par deux diodes de by-pass. [24]

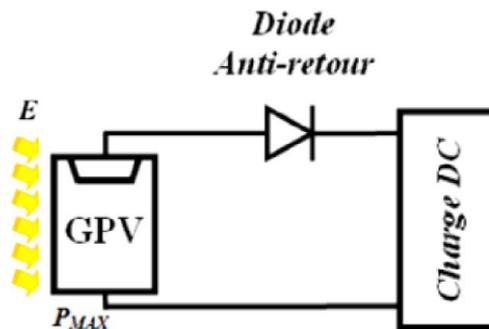
La plupart des modules PV commerciaux sont constitués par association de cellules solaire en série incluant une ou deux diodes de by-pass (Figure II.19). L'une des configurations les plus populaires que nous pouvons trouver sur le marché des modules PV. Quelques modules PV sont offerts sans diodes de by-pass. Ceci peut être compris parce que dans des applications autonomes, où le rangé (le string) PV est constituée juste par association des modules PV en parallèle, chargeant une batterie de 12 ou 24 V, l'inclusion des diodes de by-pass n'est pas du tout nécessaire.

D'autre part, dans de grands modules PV, ayant par exemple 72 cellules en série, quelques fabricants incluent six diodes de by-pass, une pour chaque 12 cellules.

A conception de rangée PV et la configuration des diodes de by-pass dans Les modules PV constituant la rangée, a un grand influence sur la probabilité et la sévérité de l'apparition de points chauds le long du string PV[24].

### b) Diode anti-retour

La tension produite par chaque string peut être différente. Lors de la mise en parallèle de ces strings pour former un champ, le string avec la tension la plus faible peut absorber un courant inverse provenant des autres strings. Cela conduit donc à une baisse de production et les modules du string traversés par le courant inverse pourraient être également susceptibles de la défaillance. Pour éviter ces courants inverses, une diode anti-retour est placée au bout de chaque string (voir Figure II.20).



**Figure II.20** : Diode anti-retour placée à la sortie du string et avant la charge et la connexion des autres strings.

## II.5 Système de régulation

Les systèmes de régulation de charge sont des éléments d'un système photovoltaïque qui ont pour but de contrôler la charge et la décharge d'une batterie afin d'en maximiser la durée de vie. Son rôle principal est de réduire le courant lorsque la batterie est presque entièrement chargée. Lorsqu'une batterie se rapproche d'un état de charge complète, de petites bulles commencent à se former sur les électrodes positives. A partir de ce moment, il vaut mieux réduire le courant de charge non seulement pour éviter des dégâts mais aussi afin de mieux atteindre l'état de charge complète. Un courant trop élevé peut provoquer une déformation des électrodes à l'intérieur, ce qui pourrait créer un court-circuit.

Le régulateur de charge assure deux fonctions principales [32].

- la protection des batteries contre les surcharges et les décharges profondes.
- L'optimisation du transfert d'énergie du champ PV à l'utilisation

La tension aux bornes de la batterie est l'indication sur laquelle s'appliquera le régulateur pour assurer sa fonction. Le régulateur mesure en permanence cette tension et la compare à deux seuils de tension pré-régler : seuil haut et seuil bas. Il existe plusieurs types de régulateurs :

### II.5.1 Régulation de décharge

La régulation de décharge s'effectue par un comparateur qui compare la tension de la batterie à un seuil de tension préréglé bas et transmet l'information à un circuit de commande. Ce dernier arrête la décharge lorsque la tension par élément dépasse la tension de seuil [32].

### II.5.2 Régulation de la charge

La régulation de la charge est effectuée par une réduction de courant lorsque la batterie est chargée, on évite la charge lorsque la tension par élément dépasse la tension de surcharge. Il existe plusieurs types de montage de régulation de charge pour les batteries au plomb [32].



Figure II.21: Régulateur MPPT Western WRM20 20A 12V /24V.

## II.6 Onduleurs

L'onduleur est un convertisseur statique DC/AC de haute performance il convertit la tension continue, en tension alternative contrôlée de façon très précise. La source de tension continue soit un aérogénérateur ou des panneaux solaires. La commande de l'onduleur est basée sur la prédiction de la tension de sortie d'un pas en avant que nous appellerons « Dead beat control » par cette commande, la tension de sortie de l'onduleur est forcée de suivre une référence sinusoïdale échantillonnée pour la production à la sortie du filtre une onde proche d'une sinusoïde avec un taux de distorsion harmonique très réduit [33].

### II.6.1 Principe de fonctionnement d'un onduleur

Un onduleur est un dispositif électronique assurant la conversion statique d'une tension/courant continu en tension /courant alternatif. Il est dit autonome s'il assure de lui-même sa fréquence et sa forme d'onde. Deux types d'onduleurs sont donc utilisés pour assurer une telle conversion [33].

- Onduleur Monophasé.
- Onduleur Triphasé.

### II.6.2 Commande de l'onduleur

L'objectif de la commande est de générer les ordres 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. Deux méthodes de commande peuvent être utilisées [33].

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



Figure II.22 : Onduleur Victron multiplus12-1200va-50-16.

## II.7 Batteries

Une batterie électrique est un composant électrochimique, elle comporte des électrodes positives et négatives composées d'alliages dissemblables plongées dans un électrolyte (acide). L'ensemble est encapsulé dans un bac scellé ou muni d'un bouchon de remplissage et d'un évent.

### II.7.1 Fonctions principales d'une batterie

Dans un système photovoltaïque, la batterie remplit trois fonctions importantes [34].

- **Autonomie** : Une batterie permet de répondre aux besoins de la charge en tout temps, même la nuit ou par temps nuageux.
- **Courant de surcharge** : Une batterie permet de fournir un courant de surcharge pendant quelques instants, c'est-à-dire un courant plus élevé que celui que peut fournir le champ PV.
- Ceci est nécessaire pour faire démarrer les moteurs et les autres appareils requérant un courant de démarrage 3 à 5 fois supérieur au courant d'utilisation.

- **Stabilisation de la tension** : Une batterie permet de fournir une tension constante, en éliminant les écarts de tension du champ PV et en permettant aux appareils un fonctionnement à une tension optimisée.

### II.7.2 Caractéristiques principales d'une batterie

La batterie doit satisfaire la ou les charges pendant les jours les plus défavorables, non ensoleillés et la nuit. Ses principales caractéristiques sont [34]:

- **Capacité (Ampère-heure)** : Les Ampères heures d'une batterie sont simplement le nombre d'Ampères qu'elle fournit multiplié par le nombre d'heures pendant lesquelles circule ce courant.
- **Profondeur de décharge** : La profondeur de décharge est le pourcentage de la capacité totale de la batterie qui est utilisé pendant un cycle de charge/décharge. Plus la décharge est grande plus la durée de vie de la batterie est réduite.
- **Tension d'utilisation** : C'est la tension à laquelle l'énergie stockée est restituée normalement à la charge.
- **Rendement** : C'est le rapport entre l'énergie électrique restituée par l'accumulateur et l'énergie fournie l'accumulateur.
- **Taux d'autodécharge** : L'autodécharge est la perte de capacité en laissant l'accumulateur au repos (sans charge) pendant un temps donné.
- **Durée de vie** : Un accumulateur peut être chargé puis déchargé complètement un certain nombre de fois avant que ses caractéristiques ne se détériorent. Par ailleurs, quel que soit le mode d'utilisation de l'accumulateur, il y'a une durée de vie totale exprimée en année (ou en nombre de cycles).

### II.7.3 Principaux types de batterie

Il existe plusieurs types de batteries dans les systèmes photovoltaïques. Deux d'entre eux et qui sont les plus utilisées actuellement sont les batteries au plomb-acide et au nickel-cadmium, en raison de leur coût qui est relativement faible et ayant une large disponibilité.

### II.7.4 Comparaison entre les différents types de batteries

**Tableau II.2** : Tableau comparatif des différents types de batterie [52].

Type	Energie massique (Wh/kg)	Tension d'un élément (V)	Durée de vie (Nbre de recharge)	Temps de charge (h)	Auto décharge par mois (%)
Plomb	30-50	2	200-300	8-16	5
Ni-Cd	48-80	1.25	1500	1	20
Ni-Mh	60-120	1.25	300-500	2-4	30
Li-ion	110-160	3.7	500-1000	2-4	10
Li-Po	100-130	3.7	300-500	2-4	10

### II.8 Boitier dérivation

Pour chaque panneau on peut avoir autant de sorties que de modules, ce que fait qu'on aura besoin de boite de dérivation qui regroupe le tous, comme l'illustre la Figure II.23, Alors cette boite de dérivation fixée sur une structure du montage a comme rôle d'effectuer les connections entre les modules pour obtenir une puissance optimale en sortie.

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

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

Le câblage de ces boites permet d'avoir une sortie en 12,24 ou 48 volts selon les modules, elles sont équipées de deux à douze entrées, selon les tensions de sortie.



Figure II.23 : Boite de dérivation.

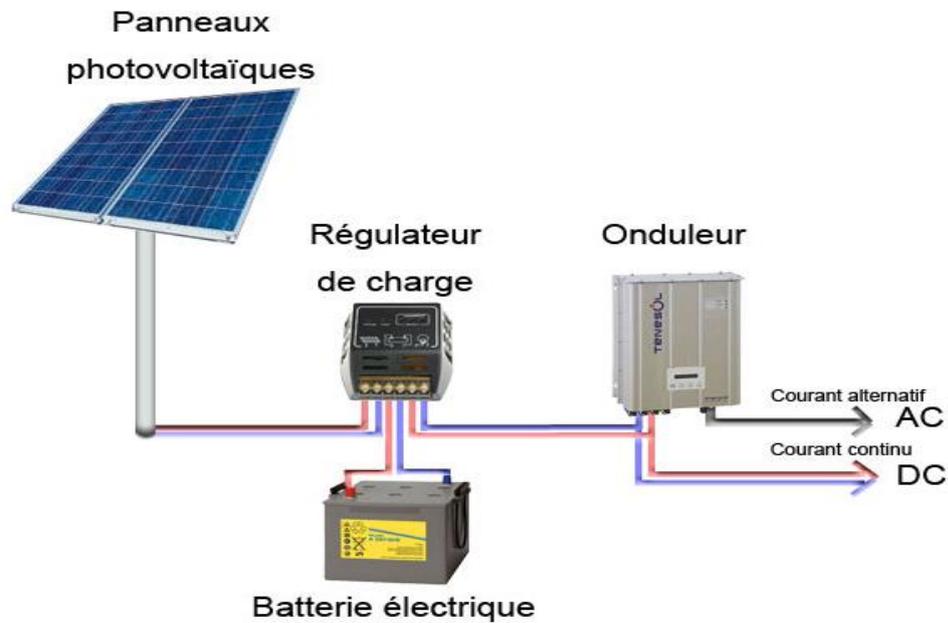
## II.9 Câblage

Toute installation solaire photovoltaïque comporte des câbles permettant le passage de l'électricité du panneau à la batterie, puis aux charges.

Généralement, les câbles recommandés coté cc sont en cuivre souple, le cuivre présentant le meilleur rapport prix / conductivité et le caractère multibrin permet d'assurer des connexions de qualité optimale donc de minimiser les pertes d'énergie par chute de tension.

## II.10 Charge

La charge et l'équipement électrique alimenté par le système peut être de type continue comme des équipements de télécommunications, le pompage d'eau, ou de type alternative dans les cas d'usage domestique (maison solaire), ce cas nécessite un onduleur [32].



**Figure II.24** : Les composants d'un système PV autonome.

## II.11 Conclusion

Un système photovoltaïque (PV) autonome est un système générateur d'électricité destiné à effectuer une tâche bien déterminée. Autrement dit à couvrir les besoins énergétiques dans divers application. Ce système se compose de plusieurs éléments principalement les modules PV qui représentent le champ de captage des rayons solaires ; les batteries qui constituent le champ de stockage c'est là où nous stockons de l'énergie produite par les modules ; le régulateur qui protège la batterie contre la surcharge ainsi il règle la valeur de la tension nominale ; l'onduleur qui assure la conversion du courant continu en courant alternatif dont les utilisateurs ont besoin ; le câblage qui relie les différents composants du système entre eux. Afin de réussir une installation photovoltaïque autonome, nous avons mentionné une étude détaillée concernant la méthode de conception et de dimensionnement du système PV autonome.

# *Chapitre III*

## *Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque*

### **III.1 Introduction**

La modélisation mathématique des cellules solaire est indispensable pour toute opération d'étude du fonctionnement, d'optimisation du rendement ou de diagnostic du générateur photovoltaïque. L'objectif principal de ce chapitre est la modélisation d'un système photovoltaïque et la présentation de principe du fonctionnement de chaque élément le qui il constituant : la cellule photovoltaïque, le convertisseur statique, le contrôleur MPPT, et nous présentons les modèles relatifs à chaque partie du system PV.

On suppose que toutes les cellules du système PV sont identiques et soumises aux mêmes conditions de fonctionnement d'ensoleillement et de température. Par ailleurs, la variation des paramètres de la cellule PV et les conditions météorologiques ayant un impact considérable sur le fonctionnement des modules PV, l'influence de l'ensoleillement et de la température de la cellule PV sur sa production électrique sera également menée dans ce chapitre.

### **III.2 Modélisation du système photovoltaïque**

#### **III.2.1 Générateur photovoltaïque (GPV)**

L'énergie en sortie d'un générateur photovoltaïque n'est pas automatiquement adaptée à la charge. Donc, il est nécessaire d'introduire des convertisseurs statiques comme un étage intermédiaire entre le générateur PV et la charge, assurons à leur sortie une énergie convenable pour la charge.

En générale, cet étage est contrôlé par une technique MPPT qui permet de faire fonctionner GPV de façon à produire en permanence le maximum de sa puissance (a comme objectif de tiré le maximum de puissance du GPV relativement aux conditions météorologiques (température et irradiation)) [22].

Dans ce chapitre nous décrivons la conception d'un système de conversion photovoltaïque autonome et le principe de fonctionnement de chaque élément le constituant, et nous présentons les modèles relatifs à chaque partie du système de conversion. La structure du système de conversion photovoltaïque et sa commande MPPT, est présenté à la figure III.1.

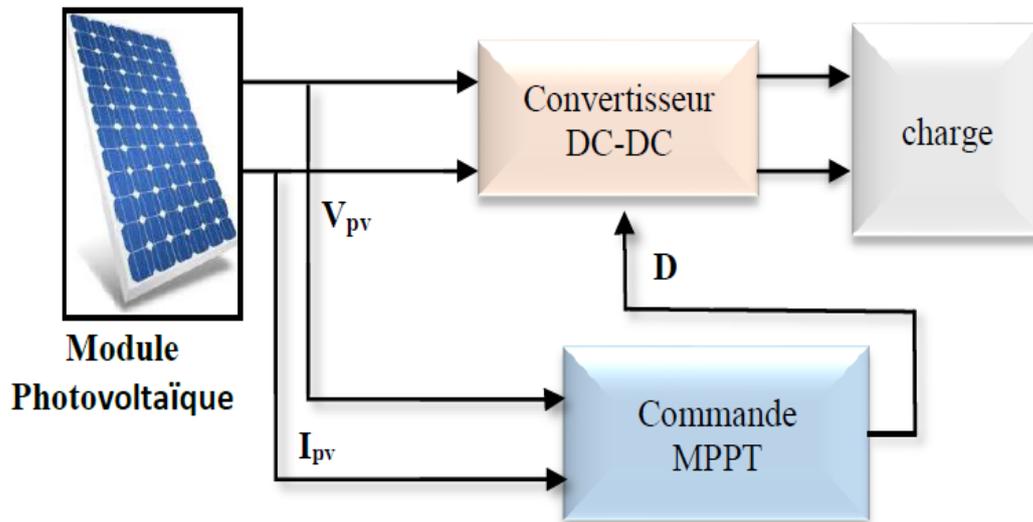


Figure III.1 : Composantes principales du système photovoltaïque.

### III.2.2 Modélisation électrique d'une cellule photovoltaïque

Afin de simuler le comportement de la cellule photovoltaïque il est indispensable de développer un modèle mathématique à partir du circuit électrique équivalent. Dans la littérature trois modèles électriques principales ont largement utilisé, un enjeu de configuration physique de la cellule est les paramètres inclus fait la différence entre ces modèles [35].

#### III.2.2.1 Modèle simplifié

La cellule sera modélisée par une source du courant  $I_{ph}$  en parallèle avec une diode. La résistance série  $R_s$  présenté dans la figure III.2 est introduite comme des pertes ohmique justifiant quelques phénomènes au niveau de la cellule [36].

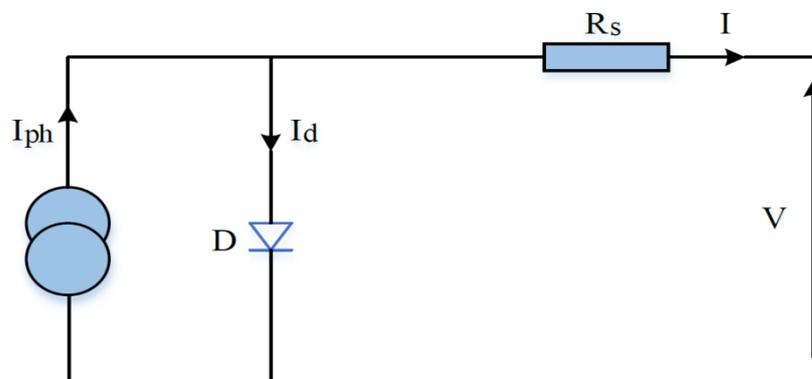


Figure III.2 : Modèle simplifié d'une cellule PV.

Ce modèle électrique modélise la cellule en un générateur du courant idéal, selon la loi des nœuds, le courant à la sortie su cellule I est donné par :

$$I = I_{ph} - I_d \tag{III.1}$$

Avec :

$I_{ph}$ : Le photo-courant qui est constant pour un ensoleillement donné.

$I_d$ : Le courant traversant la diode donnée par l'équation III.2.

$$I_d = I_s \left[ \exp \left( \frac{V + R_s I}{a V_t} \right) - 1 \right] \tag{III.2}$$

$I_s$  :courant de saturation de diode.

$a$  : Facteur d'idéalité de la diode.

$V_t$ : Tension thermique à la température T.

Le courant fourni par ce modèle est donc donné par :

$$I = I_{ph} - I_s \left[ \exp \left( \frac{V + R_s I}{a V_t} \right) - 1 \right] \tag{III.3}$$

### III.2.2.2 Modèle à une diode

L'un des modèles de cellules solaires les plus utilisés est le modèle à une diode également connu sous le nom de modèle à cinq paramètres. Ce modèle comprend une combinaison d'une source de courant  $I_{ph}$ , une diode, et une résistance de shunt  $R_{sh}$  et une résistance série  $R_s$  modélisant les pertes de puissance [36]. Le circuit équivalent pour ce modèle est donné par la Figure III.3.

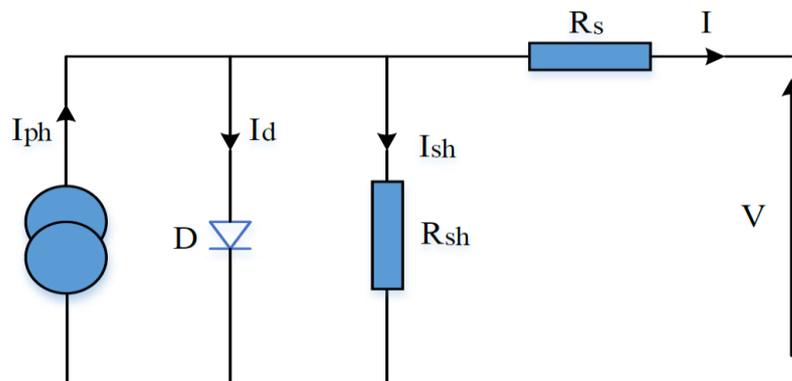


Figure III.3 : Modèle à une diode d'une cellule PV.

Le courant de sortie de la cellule PV est calculé en appliquant la loi de Kirchhoff sur le circuit équivalent représentée sur la figure précédente :

$$I_{ph} = I_d + I_{sh} + I \tag{III.4}$$

Tel-que

$I_{ph}$ : Courant photonique.

$I_d$ : Le courant circulant dans la diode.

$I_{sh}$ : Le courant circulant dans la résistance.

$I$  : Courant générer par la cellule photovoltaïque.

$I_{phn}$ : Courant photopile généré par la cellule dans les conditions de test standard (STC).

Le courant dans la diode est donné par :

$$I_d = I_0 \left[ \exp \left( \frac{V + R_s I}{a V_t} \right) - 1 \right] \quad (\text{III. 5})$$

Le courant qui passe dans la résistance  $R_{sh}$  est donné par :

$$I_{sh} = \left[ \left( \frac{V + R_s I}{R_{sh}} \right) \right] \quad (\text{III. 6})$$

De l'équation II-4, nous obtenons l'expression du courant  $I$  :

$$I = I_{ph} - I_d - I_{sh} \quad (\text{III. 7})$$

Remplaçant les équations III-5 et III-6 dans III.7, l'équation caractéristique devient :

$$I = I_{ph} - I_0 \left[ \exp \left( \frac{V + R_s I}{a V_t} \right) - 1 \right] - \left( \frac{V + R_s I}{R_{sh}} \right) \quad (\text{III. 8})$$

Le photo-courant qui est généré par le module dépend linéairement de l'éclairement solaire et influencé par la température :

$$I_{ph} = I_{phn} + K_i * [(T_c - T_{cref})] * \left( \frac{G}{G_n} \right) \quad (\text{III. 9})$$

Où :

$V_t = \frac{N_s K T}{q}$ : Tension thermique à la température  $T$ .

$q$  : Charge de l'électron ( $1.6 * 10^{-19}$  C)

$K$  : Constante de Boltzmann ( $1.3854 * 10^{-23}$  J/K)

$a$  : Facteur d'idéalité de la diode

$T$  : Température effective de la cellule en degré Kelvin [ $^{\circ}$ K]

$N_s$  : Nombre de cellule en série par module.

### III.2.2.3 Modèle à deux diodes

Actuellement le modèle électrique le plus proche d'une cellule photovoltaïque est celui à deux diodes (double exponentiel), où la cellule est bien sûr présentée comme un générateur de courant électrique dont le comportement est équivalent à une source de courant avec deux diodes en parallèle. Et pour tenir compte des phénomènes physiques au niveau de la cellule, comme les

modèles précédents, ce modèle est complété par les deux résistances série  $R_s$  et parallèle  $R_{sh}$  comme le montre le schéma électrique équivalent de la figure III.4 [37].

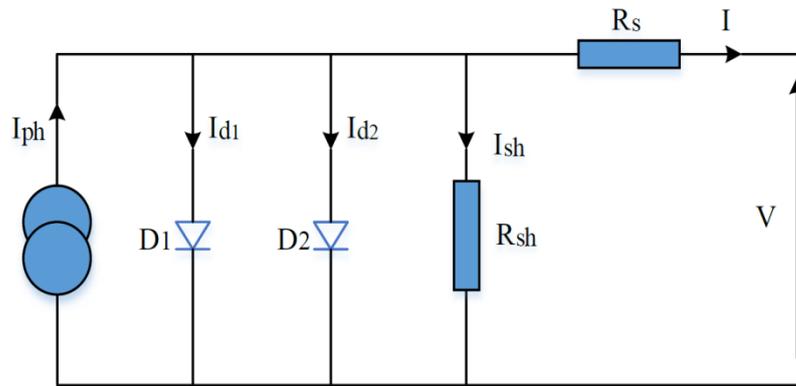


Figure III.4 : Modèle à deux diodes d'une cellule PV.

Avec quelques, étape de calcul et développement mathématique, ce modèle donne un courant presque semblable au courant d'une cellule PV réel selon la relation :

$$I = I_{ph} - I_{d1} - I_{d2} - I_{sh} \tag{III. 10}$$

Donc :

$$I = I_{ph} - I_{s1} \left[ \exp \left( \frac{V + R_s I}{a_1 V_t} \right) - 1 \right] - I_{s2} \left[ \exp \left( \frac{V + R_s I}{a_2 V_t} \right) - 1 \right] - \left( \frac{V + R_s I}{R_{sh}} \right) \tag{III. 11}$$

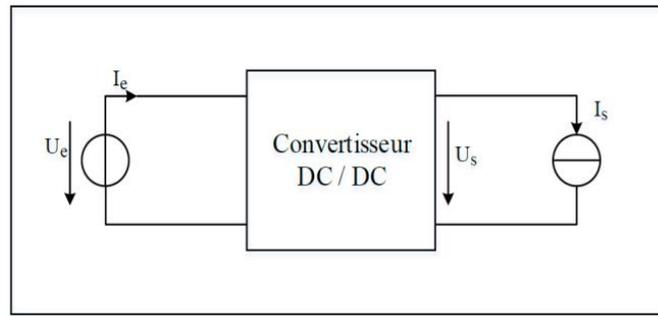
Avec :

$a_1$  et  $a_2$  : Facteurs d'idéalité des diodes D1 et D2 respectivement.

### III.2.3 Convertisseur DC/DC

Les convertisseurs DC/DC sont des convertisseurs linéaires et à découpage utilisés pour transformer la tension d'une source de courant continu d'un niveau à un autre. Son utilisation s'avère nécessaire pour stocker l'énergie photovoltaïque dans des batteries, ou pour alimenter une charge continue [37]. Les convertisseurs linéaires maintiennent un flux de courant continu de l'entrée à la charge tandis que les convertisseurs à commutation régulent le même flux de courant en hachant la tension d'entrée et en contrôlant le flux de courant moyen en faisant varier le rapport cyclique du système.

La représentation symbolique la plus couramment utilisée d'un convertisseur DC-DC est donnée par la figure suivante :



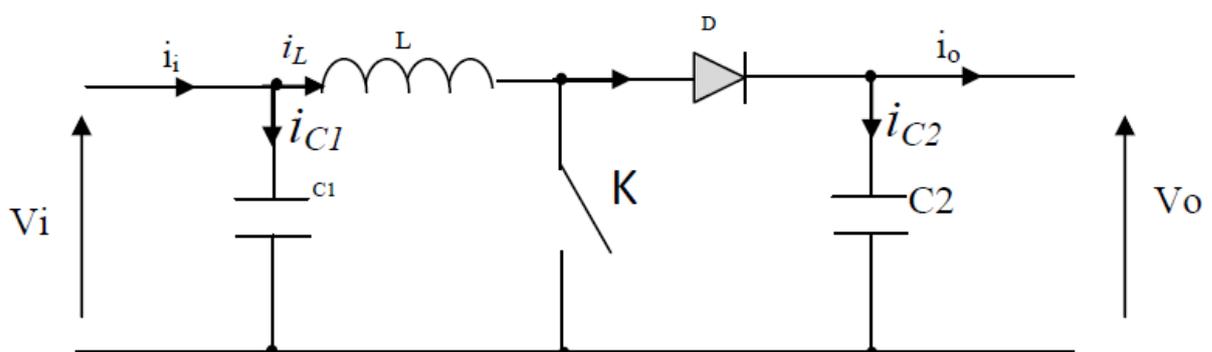
**Figure III.5 :** La représentation symbolique d'un convertisseur DC/DC.

Les types de convertisseurs DC-DC généralement utilisés sont : le convertisseur élévateur de tension (boost), abaisseur de tension (buck) et élévateur-abaisseur de tension (buck-boost). Dans ce qui suit nous rappelons brièvement le principe de fonctionnement du convertisseur élévateur.

### III.2.3.1 Convertisseur Boost

Le convertisseur Boost est un élévateur de tension, la tension de sortie est toujours supérieure à la tension d'entrée, peut être souvent trouvé dans la littérature sous le nom hacheur parallèle ou survolteur [38]. Le schéma de principe est représenté par la figure III.6.

Quand le semi-conducteur (K) est passant, la diode est polarisée en inverse, l'alimentation d'énergie (rangée de cellule solaire) alimentant de ce fait l'inductance. En même temps, la charge reçoit sa puissance du condensateur. Quand (K) est bloqué, le courant circule de l'alimentation à la charge à travers l'inductance et la diode.



**Figure III.6 :** Schéma de principe du Convertisseur (Boost).

Le principe de fonctionnement d'un convertisseur boost est divisé en deux phases distinctes selon l'état de l'interrupteur K :

- Lorsque l'interrupteur K est fermé (état passant), le courant dans l'inductance va augmenter, et une énergie sous forme d'énergie magnétique est stockée. La diode est donc bloquée, et la charge sera déconnectée de la source. L'expression de  $V_i$  est donc :

$$V_i = L \cdot \frac{dI_L}{dt} \quad (\text{III. 12})$$

A la fin de l'état passant, le courant  $I_L$  a augmenté de la valeur  $\Delta I_L$  on exprimée par :

$$\Delta I_{L\text{on}} = \int_0^{D \cdot T} dI_L = \int_0^{D \cdot T} \frac{V_i \cdot dt}{L} = \frac{V_i \cdot D \cdot T}{L} \quad (\text{III. 13})$$

$D$  est le rapport cyclique qui représente la fraction de la période  $T$  lorsque l'interrupteur  $S$  est passant  $0 < D < 1$ .

- Lorsque l'interrupteur K est ouvert, l'inductance est alors en série avec le générateur et sa tension va s'ajouter à celle du générateur : c'est l'effet survolteur. L'énergie cumulée dans l'inductance va être donc transférée vers la capacité et la charge.

L'expression de  $V_i$  est alors :

$$V_i - V_o = L \cdot \frac{dI_L}{dt} \quad (\text{III. 14})$$

La variation de  $I_L$  durant l'état bloqué sera donc égale à :

$$\Delta I_{L\text{off}} = \int_0^{(1-D)T} dI_L = \int_0^{(1-D)T} \frac{(V_i - V_o) dt}{L} = \frac{(V_i - V_o)(1 - D) \cdot T}{L} \quad (\text{III. 15})$$

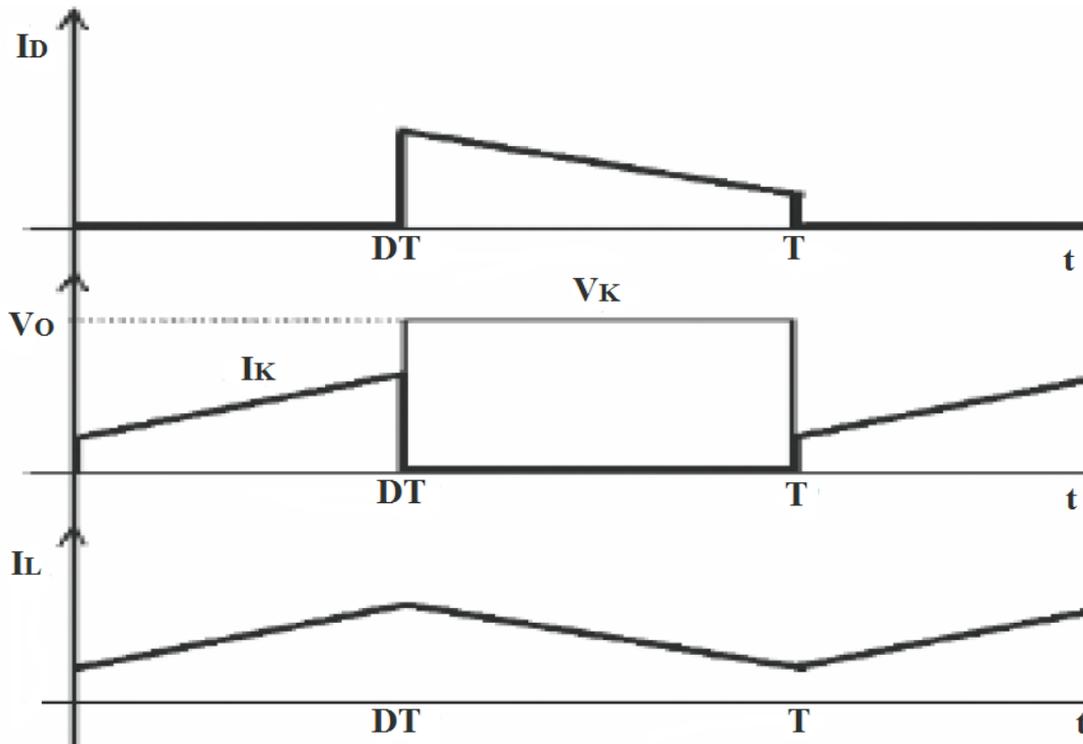
La quantité d'énergie emmagasinée dans chacun de ces composants est la même au début et à la fin d'un cycle de fonctionnement. Par conséquent, la valeur du courant  $I_L$  est le même au début et à la fin de chaque cycle de commutation. Ce qui permet d'écrire :

$$\Delta I_{L\text{on}} + \Delta I_{L\text{off}} = \frac{V_i \cdot D \cdot T}{L} + \frac{(V_i - V_o)(1 - D) \cdot T}{L} \quad (\text{III. 16})$$

Le rapport entre  $V_i$  et  $V_o$  sera donc :

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{1}{1 - D} \quad (\text{III. 17})$$

$D$  : c'est le rapport cyclique.



**Figure III.7 :** Chronogrammes de courant et tension d'un hacheur (boost).

### III.2.4 Commandes de poursuite du point de puissance maximale MPPT

Les cellules photovoltaïques sont utilisées pour fournir de l'énergie dans de nombreuses applications électriques. Pour obtenir la puissance maximale du panneau solaire, un suiveur du point de puissance maximum est utilisé pour la commande du convertisseur [39]. La technique de suivi du point à puissance maximal a été développée depuis 1968, cette commande est essentielle pour un fonctionnement optimal du système photovoltaïque.

#### III.2.4.1 Principe du MPPT

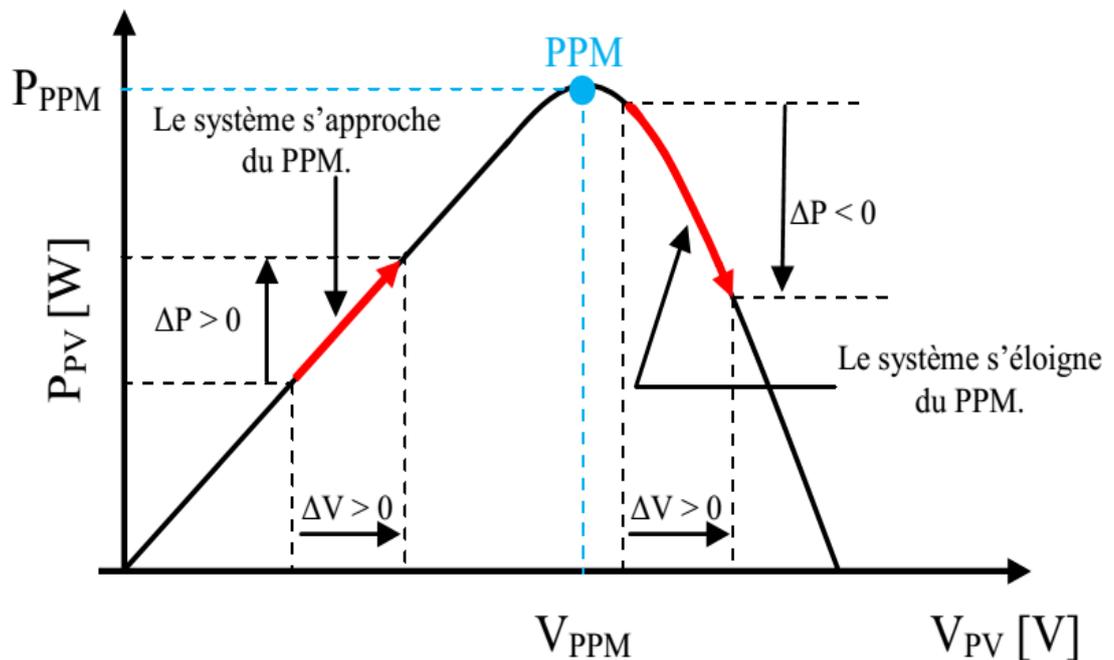
Le principe du MPPT repose sur l'utilisation d'un algorithme de commande pour tirer l'énergie au point de puissance maximale appuyé sur la mesure de la tension et le courant du module PV. Ceci permet de garantir que le maximum d'énergie est fourni à la sortie.

Le PPM varie avec les conditions changeantes telles que les niveaux d'éclairement et de la température. Pour tirer en permanence du champ photovoltaïque sa puissance maximale, il est essentiel de fonctionner toujours au PPM [39]. On va présenter et étudier par la suite la méthode MPPT dite perturbation et observation (perturbe and observe P and O) Qui fait partie des méthodes les plus fréquentes dans la littérature.

### III.2.4.2 Méthode de perturbation et observation (P&O)

La méthode de perturbation et observation (P&O) est la méthode la plus simple du MPPT qui nécessite la mesure d'un nombre réduite de paramètre, il consiste à perturber l'un des paramètres d'entrées du convertisseur statique (généralement la tension  $V_{pv}$ ) puis d'observer l'impact de ce changement sur la puissance de sortie du système, Elle permet d'extraire la puissance maximale même si l'éclairement et la température varient.

Le principe de cette méthode est qu'à partir d'un rapport cyclique initialement petit, on mesure  $V_{pv}$  et  $I_{pv}$  et on calcule  $P(k)$ . La valeur obtenue est comparée avec la valeur  $P(k-1)$  calculée au cycle précédent, et selon le résultat de comparaison,  $V_{pv}$  est ajustée soit dans le même sens que dans le cycle précédent soit dans une direction opposée. Ainsi, la puissance va augmenter, repasser par le maximum, puis diminuer et dès la détection d'une diminution de la puissance, le sens de la commande est à nouveau inversé, ...etc. Cependant, l'oscillation du système autour du maximum permet de suivre le maximum de puissance [40]. La figure III.8 résume le principe de fonctionnement de cette méthode.



**Figure III.8** : Le principe de fonctionnement de la méthode P&O.

La figure III.8 Montre l'organigramme de l'algorithme de la méthode "P&O", tel qu'il doit être implémenté dans un microprocesseur de contrôle [40].

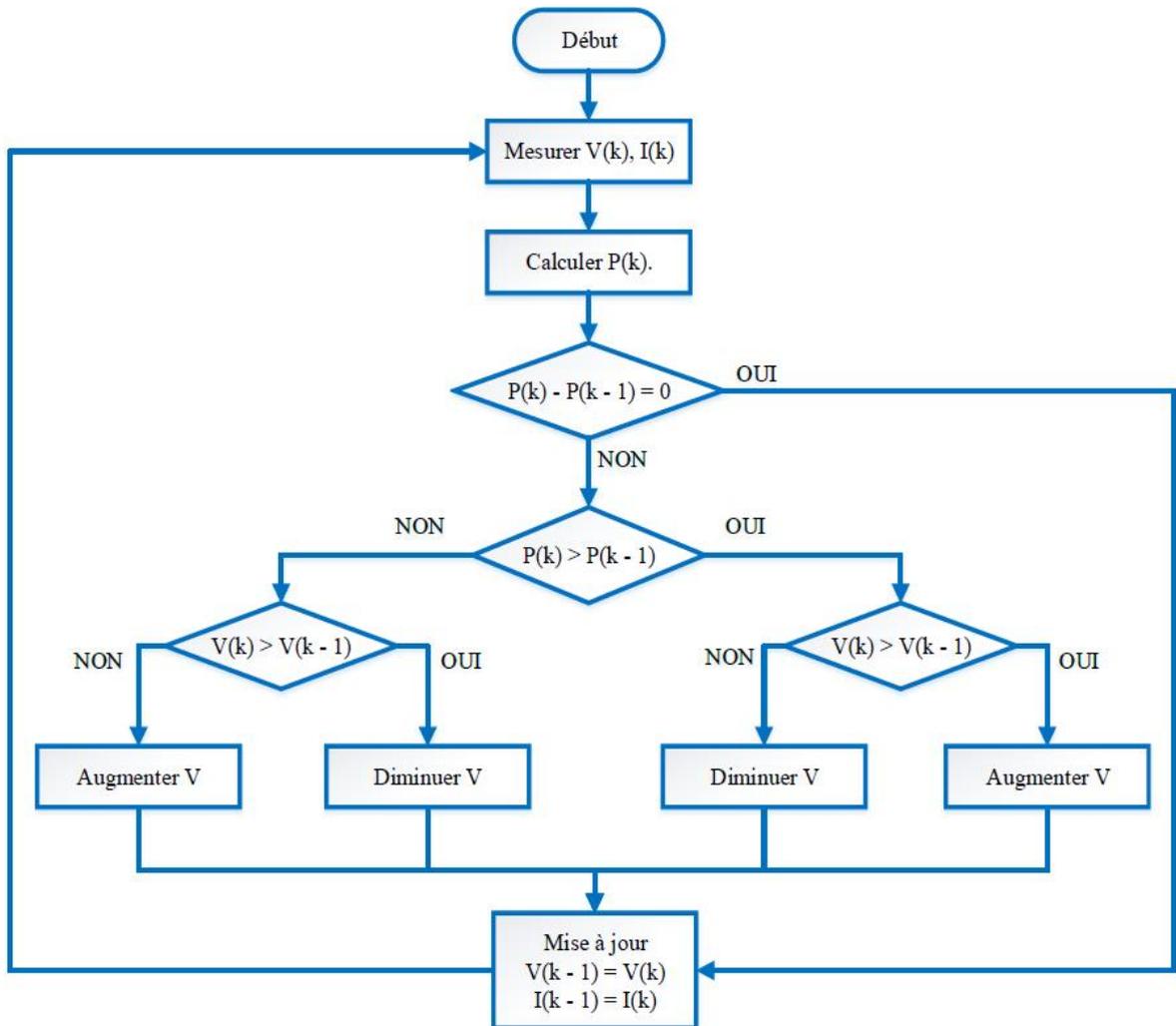


Figure III.9 : Organigramme de la méthode P&O.

### III.3 Simulation du générateur photovoltaïque

#### III.3.1 Choix et caractérisation du module photovoltaïque

Pour faire la modélisation et la simulation de notre système PV, et ensuite le diagnostic de certains défauts considérés comme fréquents et important à détecter et à localiser dans la suite de cette thèse, le module PV a tombé sur le module photovoltaïque Sun power SPR-305E-WHT-D qui comporte 96 cellules solaires de silicium monocristalline de  $156 \times 156$  mm connectées en série a été sélectionner. [41]

Le module PV Sun power SPR-305E-WHT-D peut produire une puissance maximale de 305 watts à 54,7 volts. Ceci nous a permis de déterminer la puissance en fonction de la tension et le courant en fonction de la tension du module étudié pour un éclairage de  $1000 \text{ W/m}^2$  [42].

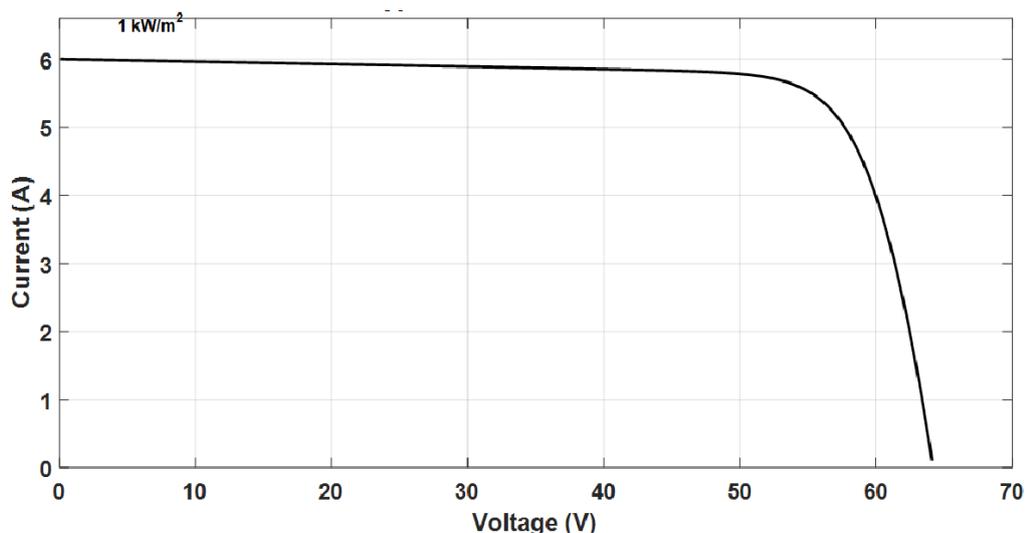
Les caractéristiques électriques du module Photovoltaïque Sun power SPR-305E-WHT-D en conditions de test standards sont représentées sur le Tableau III.1.

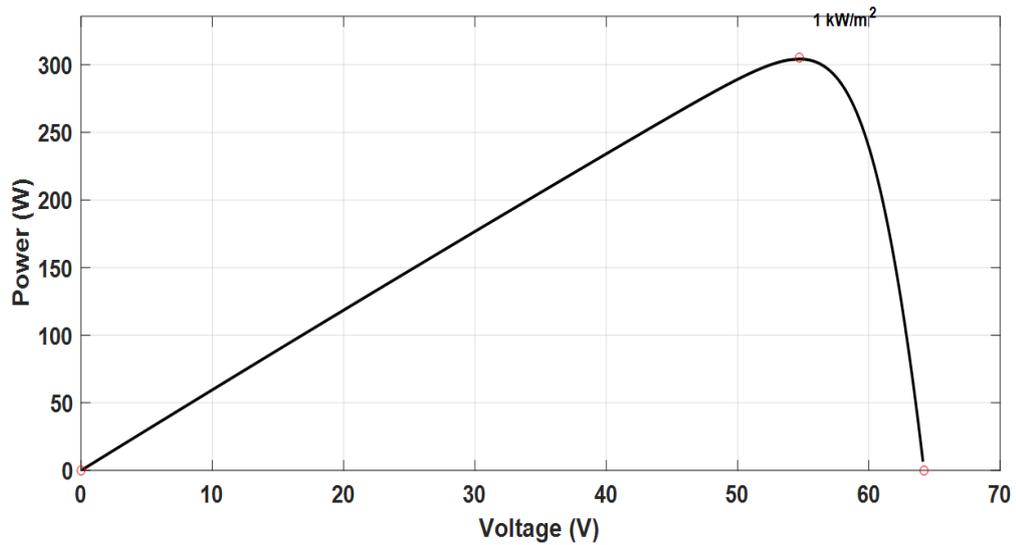
**Tableau III.1** : Caractéristiques du module PV Sun power SPR-305E-WHT-D [8].

Caractéristiques électriques	
Puissance nominale STC $P_{\max}$ (W)	305
Tension en circuit ouvert $V_{co}$ (V)	64.2
Courant de court-circuit $I_{cc}$ (A)	5,96
Tension à la puissance maximale $V_{p_{\max}}$ (V)	54,7
Courant à la puissance maximale $I_{p_{\max}}$ (A)	5.58
Efficacité du panneau	18,7 %
Facteur de remplissage	0,8 %
Tolérance de puissance	-3,00 % ~ 3,00 %
Tension maximale du système $V_{\max}$ (V)	600
Calibre maximum du fusible série (A)	15
Coefficients de température	
Coefficient de température de $I_{sc}$	0,057 % /°C
Coefficient de température de $V_{co}$	-0,27 % /°C
Coefficient de température de $P_{\max}$	-0,38 % /°C

### III.3.2 Simulation du module PV

Premièrement on a simulé le comportement électrique module photovoltaïque Sun power SPR-305E-WHT-D, ce module fournit une puissance maximum 305 W. Cela nous a permet de déterminer les caractéristiques (I-V) et (P-V) du module PV montré dans les figure III.10 et III.11.

**Figure III.10** : Simulation de la caractéristique (I-V) du module PV .



**Figure III.11** : Simulation de la caractéristique (P-V) du module PV.

Les figure III.10 et III.11 présente :

- La variation du courant du module en fonction de la tension à une température et un éclairement fixe, On note que le courant reste pratiquement constant jusqu'à  $V=54.7$  V puis il diminue exponentiellement jusqu'à son annulation.
- L'évolution de la puissance du module en fonction de la tension à température et éclairement fixe, on note que la courbe de puissance présente un point crête environs  $P=305$  W. la courbe ne cesse pas d'augmenter jusque ce point puis elle chute vers une puissance nulle.

### II.3.3 Effet de l'éclairement sur les caractéristiques $I= f(V)$ et $P=f(V)$

On fixe la température ambiante ( $T = 25^{\circ}\text{C}$ ) et on fait varier l'éclairement de (400 à  $1000\text{W}/\text{m}^2$ ), les courbes de variation du courant par rapport la tension pour chaque éclairement sont montré dans la figure III.12.

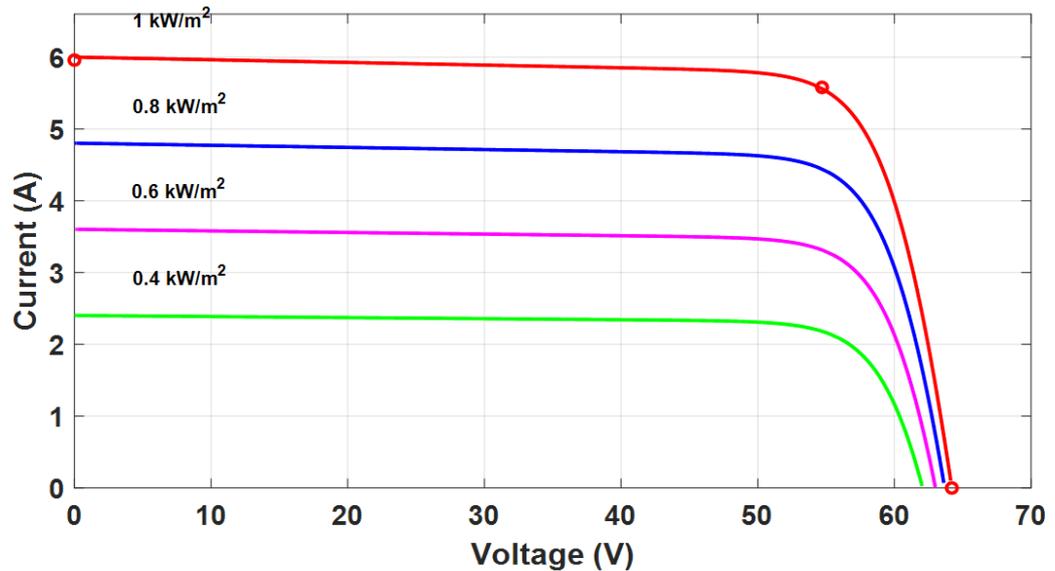


Figure III.12 : Résultats de simulation des caractéristiques Courant-Tension du module PV.

D'après la figure III.12 on constate que le changement de l'éclairement n'a pas un grand impacte sure la tension du circuit ouvert (pratiquement 2V pour notre plage de variation de l'éclairement). Par contre le courant varie de 2.4A pour un éclairement 400 W/m<sup>2</sup> à 6A pour un éclairement 1000 W/m<sup>2</sup>.

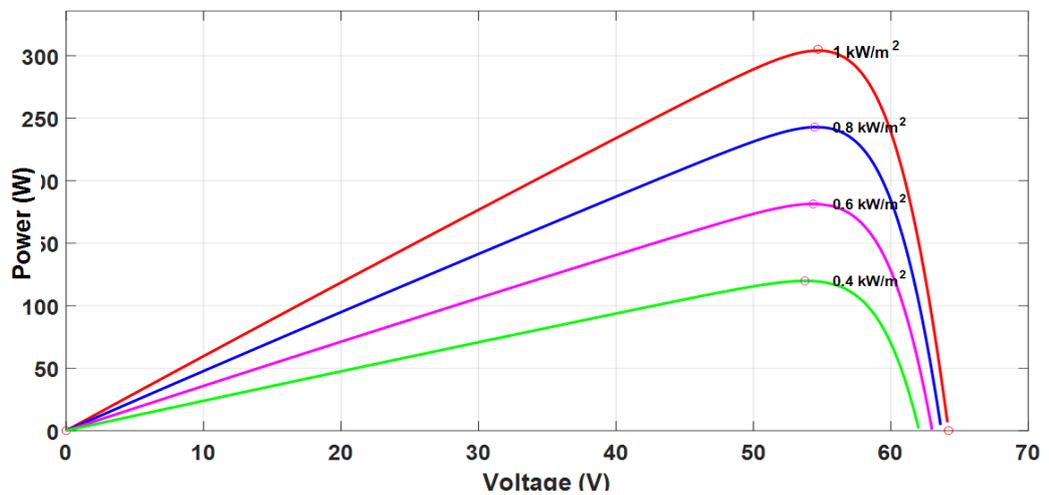


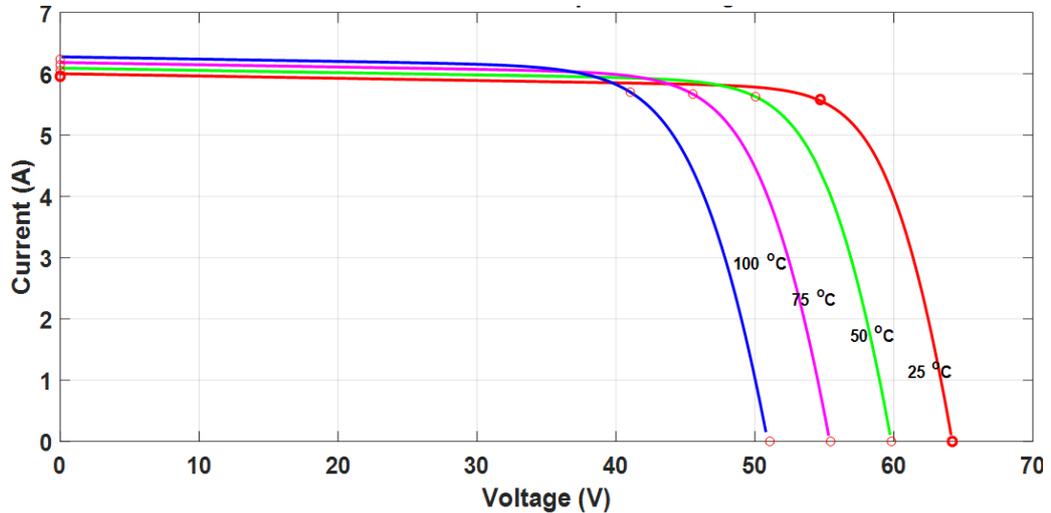
Figure III.13 : Résultats de simulation des caractéristiques Puissance-Tension du module PV.

La figure III.13 illustre les courbes de la variation de puissance par apport la tension pour chaque éclairement. On remarque que l'éclairement a un effet proportionnel sur la puissance ; dans notre cas le point crête de la puissance augmente de 120W pour un éclairement 400 W/m<sup>2</sup> à 305W

pour un éclairement  $1000 \text{ W/m}^2$ . La tension du court-circuit est pratiquement inchangée vis-à-vis le changement de l'éclairement.

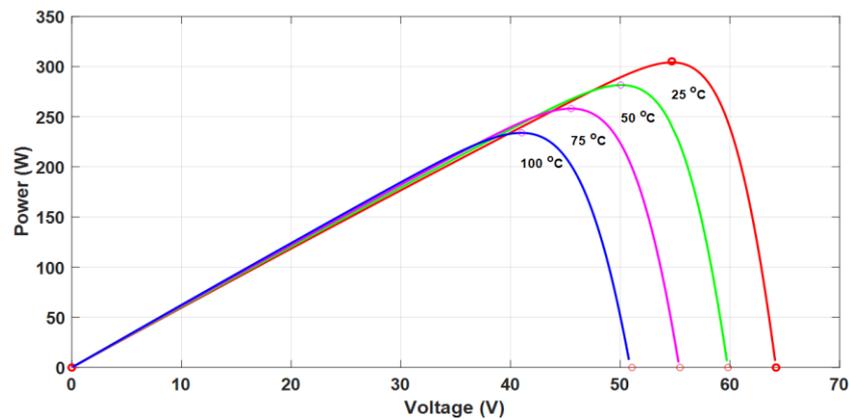
### III.3.4 Effet de la température sur les caractéristiques $I=f(V)$ et $P=f(V)$

On fixe l'éclairement ( $G = 1000 \text{ W/m}^2$ ) et on fait varier la température de  $25^\circ\text{C}$  à  $100^\circ\text{C}$ .



**Figure III.14** : Résultats de simulation des caractéristiques I-V du module PV.

D'après la figure III.14 que l'effet de l'augmentation de la température fait diminuer la tension du circuit ouvert du GPV, contrairement au courant de court-circuit qui augmente légèrement avec la température du module PV.

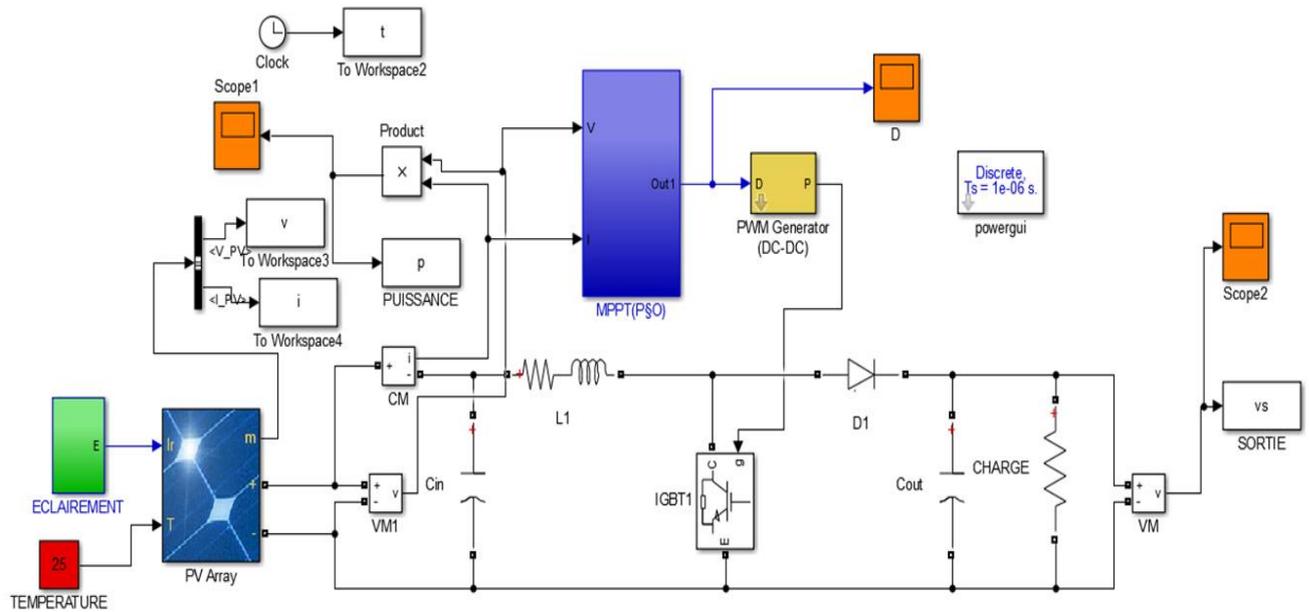


**Figure III.15** : Résultats de simulation des caractéristiques P-V du module PV.

D'après la figure III.15 l'effet de l'augmentation de la température sur la caractéristique  $P = f(V)$  fait diminuer la puissance maximale et la tension du circuit ouvert du GPV.

**III.3.5 Simulation du système PV globale (GPV, convertisseur, MPPT, charge)**

Le système photovoltaïque étudié est composé de 66 strings connectés en parallèle, chaque string constituée de 5 modules PV en série, d'un convertisseur DC-DC de type boost doté de sa commande MPPT basée sur l'algorithme P&O, Le schéma synoptique de SIMULINK est donné par la figure III.16 :



**Figure III.16 :** Modèle simulink de la commande MPPT P&O avec un convertisseur DC/DC boost sous Matlab/Simulink.

**III.3.5.1 Résultat et discussion**

Le but de ces simulations est de visualiser les différentes allures de puissance P (à la sortie du panneau et la sortie du convertisseur statique), des rapports cycliques D des tensions délivrées par le panneau photovoltaïque et du convertisseur statique avec la méthode de poursuite de la puissance maximal (MPP) par méthode P&O (Perturbation & Observation).

Dans cette partie, nous avons fait la simulation avec Matlab-Simulink, pour un ensoleillement variables (1000 ; 800 ; 600 W/m<sup>2</sup>) et de température constante (25°C).

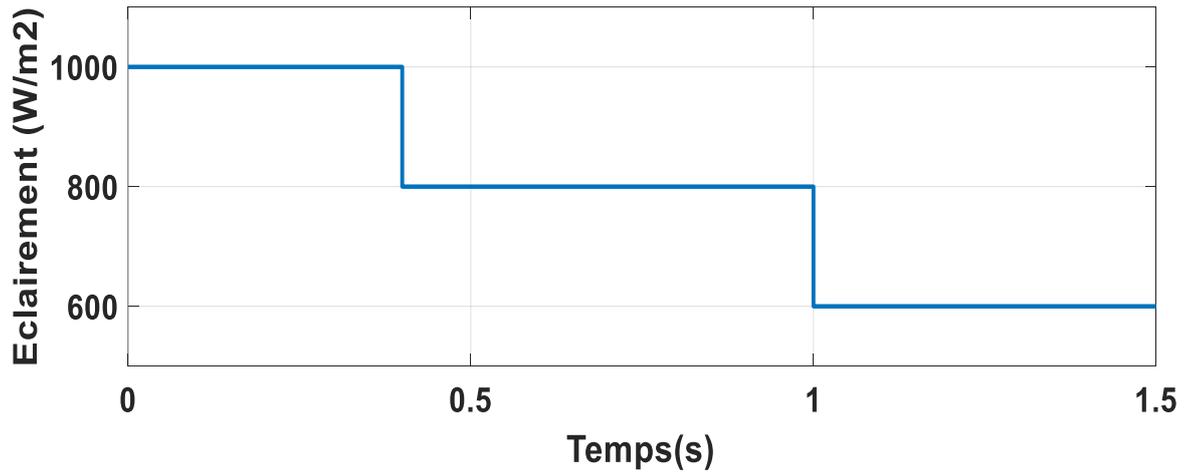


Figure III.17: Variation d'éclairement a la température  $T = 25^{\circ}\text{C}$ .

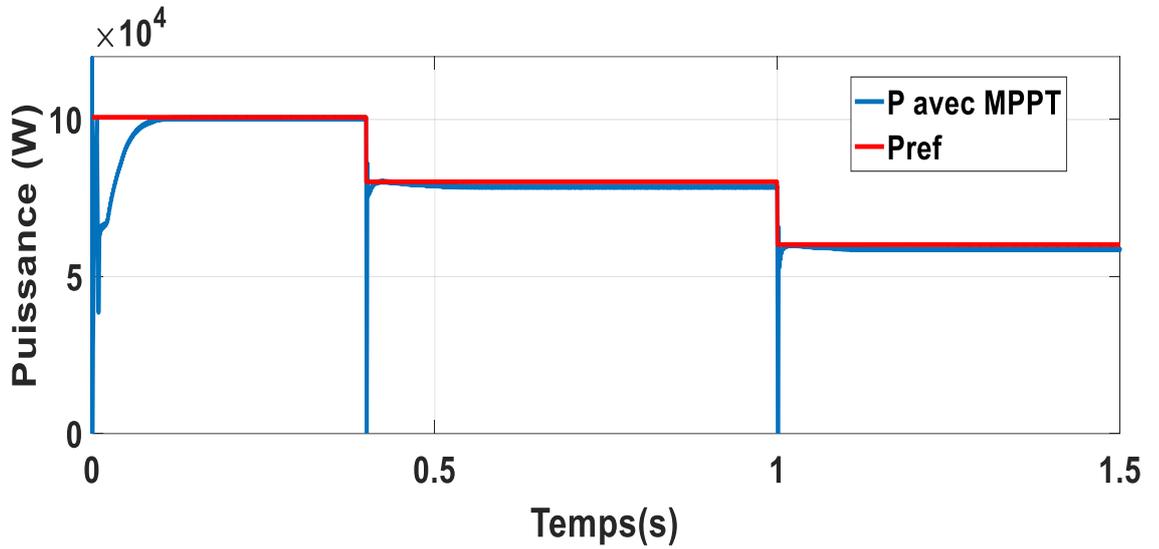


Figure III.18 : Variation de la puissance à la sortie du système PV avec MPPT.

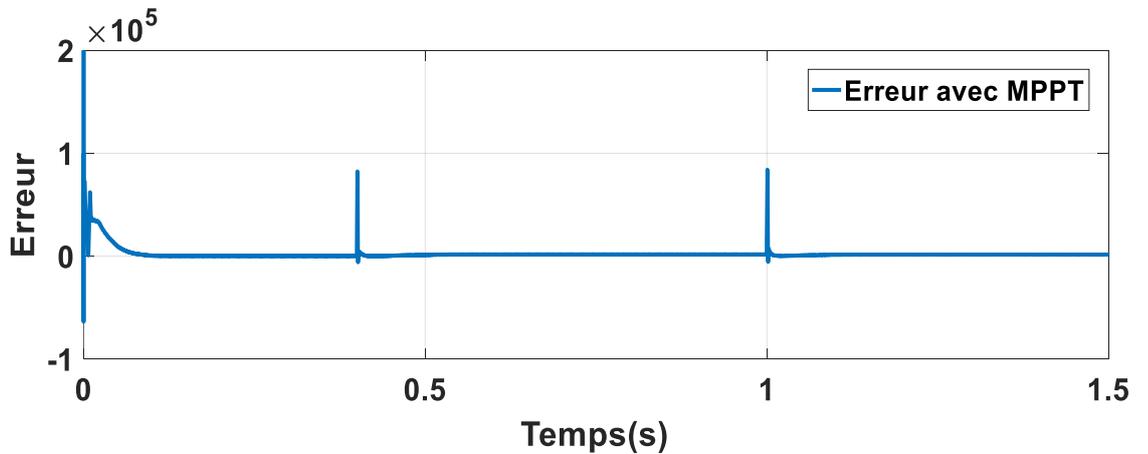
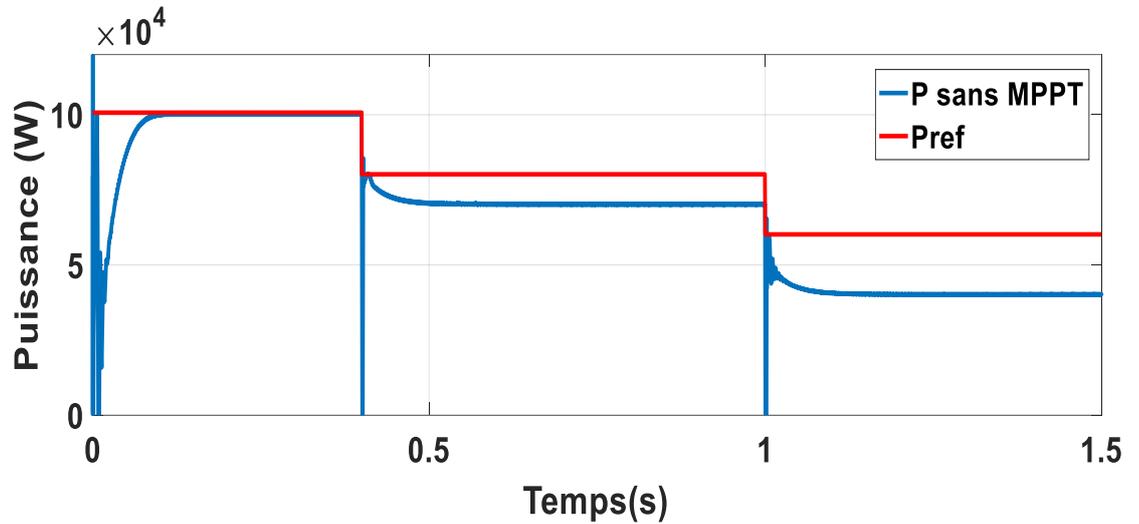
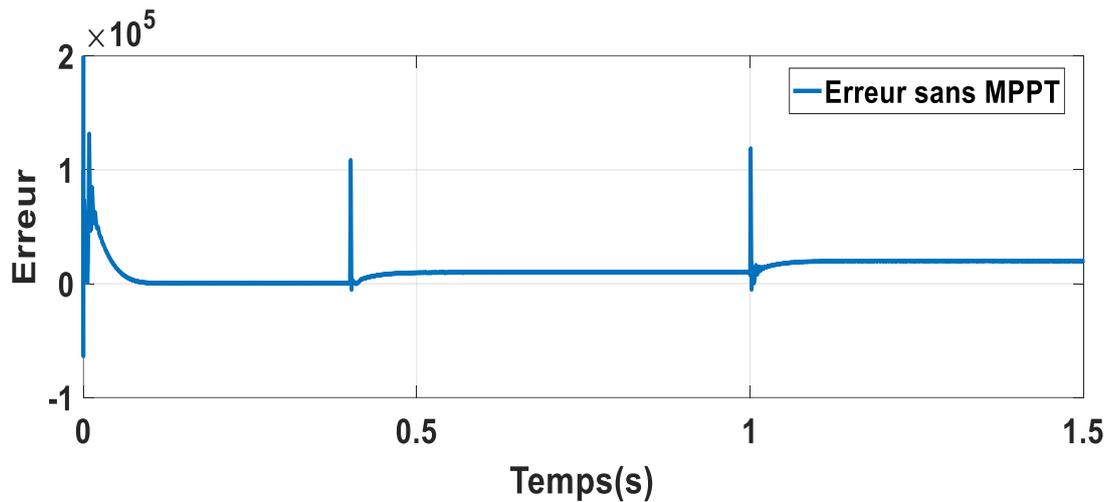


Figure III.19 : Erreur entre la puissance à la sortie du système PV avec MPPT et la puissance référence.

Les Figures (III.18et III.19) illustrent que la valeur de la puissance produite par le système photovoltaïque commandé par l'algorithme MPPT est très proche de la valeur de puissance référence et que la différence entre elle est quasi nulle.



**Figure III.20** : Variation de la puissance à la sortie du convertisseur statique sans MPPT.



**Figure III.21** : Erreur entre la puissance à la sortie du système PV sans MPPT et la puissance référence.

Les Figures (III.20 et III.21) illustrent que la valeur de la puissance produite par le système photovoltaïque non commande n'est pas identique à la valeur de référence de la puissance et que la différence entre elle est significative.

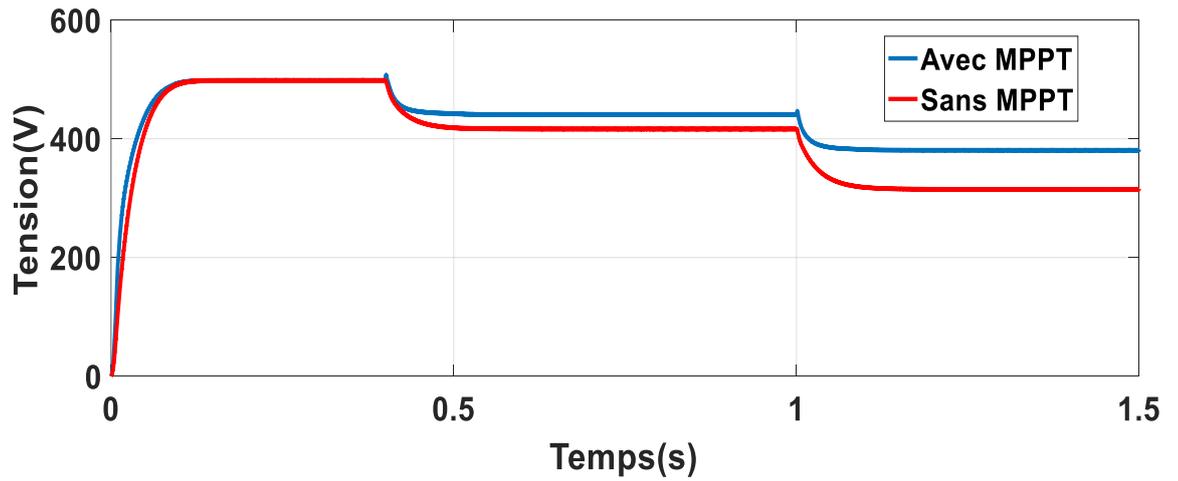


Figure III.22 : Variation de tension à la sortie du système PV avec et sans MPPT.

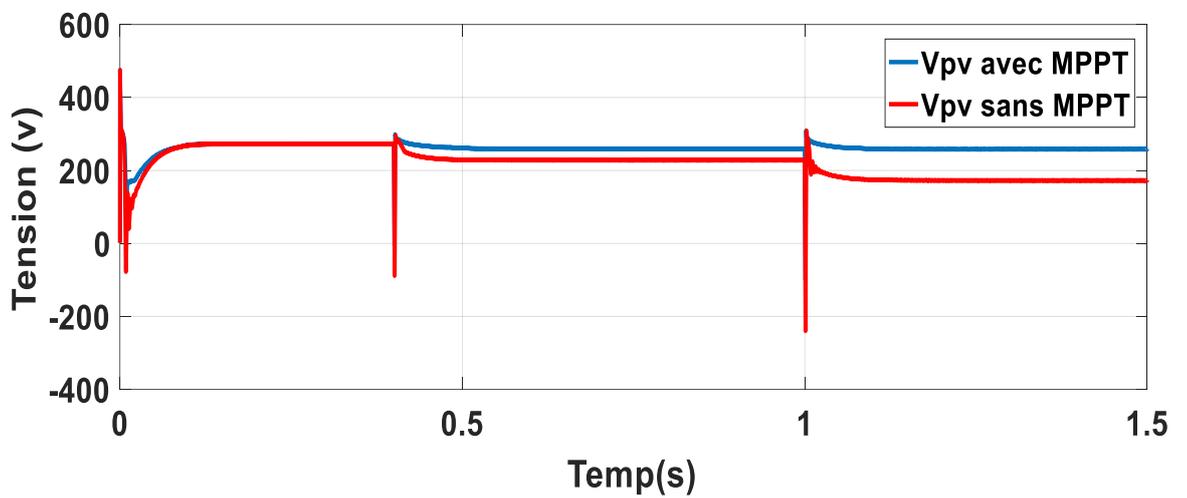


Figure III.23 : Variation de tension à la sortie du panneau PV avec et sans MPPT.

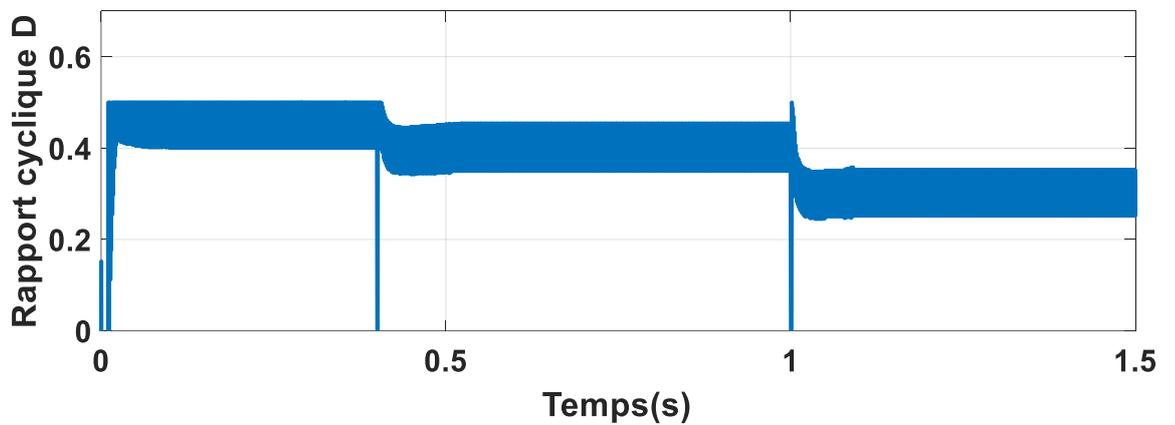


Figure III.24 : Variation du rapport cyclique.

Les figures III.22, III.23 et III.24 montrent que l'algorithme MPPT augmente la valeur de la tension entrant dans le convertisseur statique en fonction de la variation de la valeur de rapport cyclique  $D$ .

Cette simulation, nous a permis de conclure que le convertisseur DC/DC et la commande MPPT effectuent correctement leurs rôles.

### **III.4 Conclusion**

Dans ce chapitre, la modélisation du système photovoltaïque composé de : générateur photovoltaïque, hacheur survolteur et la commande MPPT « perturbation et observation » est présentée. Les modèles SIMULINK sont construits pour les différentes composantes du système photovoltaïque. D'après les résultats obtenus à partir de la simulation, nous avons montré :

- Les performances du générateur PV se dégradent avec l'augmentation de la température, et la diminution de l'éclairement.
- Le convertisseur DC-DC et la commande MPPT effectuent correctement leurs rôles. Le convertisseur fournit dans les conditions optimales une tension à sa sortie supérieure à celle fournie par le générateur PV.
- La commande MPPT adapte le générateur PV à la charge : transfert de la puissance maximale fournie par le générateur PV.

# *Chapitre IV*

## *Défauts d'un système photovoltaïque*

## IV.1 Introduction

Les défauts qui subit les installations photovoltaïques est la pertinentes major qui a fait la casse-tête des chercheurs, car la présence de ces défauts abaisse exponentiellement les kilowatts produit par les centrales. Plusieurs solutions ont été proposées dans littérature mais reste timide devant la complexité des problèmes.

Dans ce chapitre, dans une première partie, une présentation des principaux défauts associés à un système photovoltaïque. Ensuite détaille les différentes méthodes de diagnostic des systèmes photovoltaïques .Comme avec n'importe quel équipement, effectuer l'entretien et l'inspection régulière des composants aidera à assurer des bonnes performances au système et à réduire au minimum la défaillance des composants.

La deuxième partie de ce chapitre est consacrée a donné un aperçu sur la maintenance de système photovoltaïque.

## IV.2 Terminologies et concepts

La terminologie est une discipline qui a pour objet l'étude théorique des dénominations des objets ou des concepts utilisés par tel ou tel domaine du savoir ce qui rend parfois difficile l'appréhension des contributions. Les principales définitions sont .

- **Maintenance**: l'ensemble des actions permettant de maintenir ou de rétablir un bien dans un état spécifié ou en mesure d'assurer un service déterminé
- **Défaut**: est défini comme une déviation des paramètres du système par rapport à ses valeurs nominales.
- **Défaillance** : est un passage d'une entité d'un état de fonctionnement normal à un état de fonctionnement anormal ou de panne.
- **Détérioration** : est une perte de performance altérant partiellement le fonctionnement du système.
- **Panne** : est une interruption permanente de la capacité du système à réaliser sa fonction requise.
- **Anomalie** : Caractérise un comportement du système physique, non conforme à une référence [43].
- **Symptôme** : Représente un signe distinctif permettant de détecter un dysfonctionnement du système surveillé [43].
- **Fonctionnement normal** : un système est en fonctionnement normal lorsque ses paramètres sont très proches de leur valeur nominale.

- **Système de surveillance** : La surveillance est une tâche continue, réalisée en temps réel, de détermination de l'état d'un système physique. Le système de surveillance doit détecter rapidement l'occurrence d'un défaut et le discriminer d'autres phénomènes : perturbations, bruits, incertitudes. La fonction de surveillance fait intervenir les techniques de génération de résidus et de diagnostic de défauts.
- **Diagnostic** : la détermination du type, de la taille, de la localisation et de l'instant d'occurrence d'un défaut (complète la détection par l'isolation et l'identification).

### IV.3 Défauts d'un système photovoltaïque

#### IV.3.1 Types de défauts du module PV

Le générateur PV est le principal composant de l'installation PV. Toute rupture liée au module PV affectera les performances du système PV. Les défauts sont classés selon leurs effets et leurs conséquences. Dans ce qui suit, on citera quelques défauts qui se produisent au niveau de générateur PV [44].

##### IV.3.1.1 Défaut de point chaud

Les points chauds des modules peuvent se produire lorsque des cellules individuelles sont ombragées ou brisées. Ces cellules produisent beaucoup moins de courant que les autres cellules de la chaîne et peuvent être polarisées en sens inverse, ce qui entraîne une dissipation de puissance au lieu d'une production. Ce phénomène affecte les cellules en silicium cristallin (c-Si) et est généralement le résultat de l'encrassement, de l'ombrage, des cellules endommagées ou des diodes de dérivation endommagées. Les cellules des points chauds dissipent de l'énergie, ce qui entraîne une augmentation de la température de surface et, par conséquent, les défauts des points chauds sont principalement diagnostiqués à l'aide d'analyses infrarouges et thermiques. Les points chauds persistants peuvent endommager les cellules solaires, les diodes de dérivation et provoquer des défauts de circuit ouvert [43].

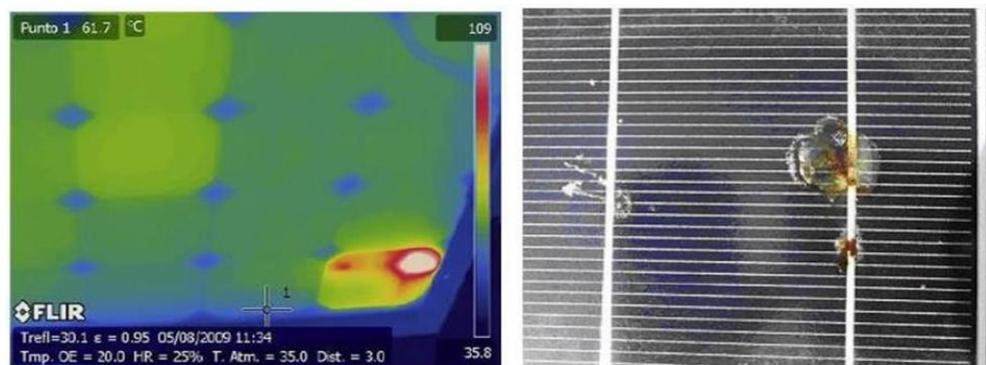
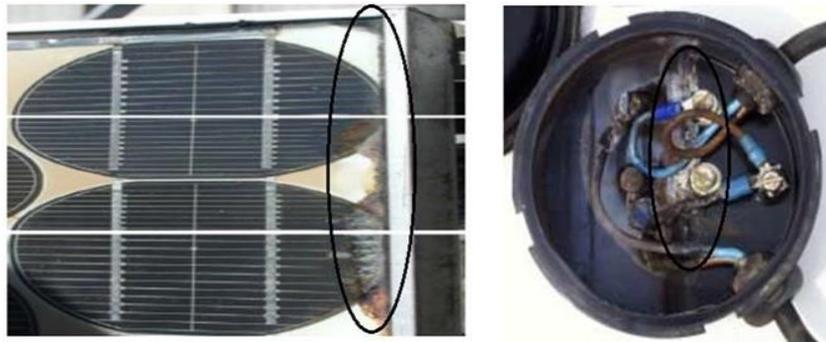


Figure IV.1 : Défaut de point chaud.

### IV.3.1.2 Corrosion

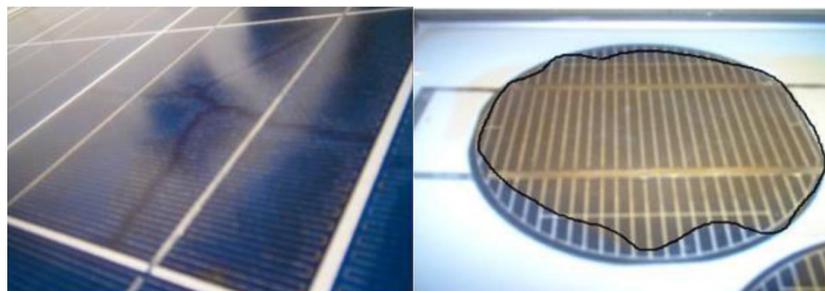
L'humidité pénétrant dans le module photovoltaïque à travers les bords stratifiés provoque la corrosion. La rétention de l'humidité dans l'enveloppe du module augmente la conductivité électrique du matériau. La corrosion attaque les connexions métalliques des cellules du module PV provoquant une augmentation des courants de fuite et ainsi une perte de performance. La corrosion dégrade aussi l'adhérence entre les cellules et le cadre métallique. La Figure IV.2 montre un module PV atteint par la corrosion au niveau de la bordure et de la boîte de jonction [49].



**Figure IV.2:** Module PV atteint par la corrosion [49].

### IV.3.1.3 Décoloration de cellules

La décoloration du module photovoltaïque se traduit par un changement de couleur du matériau utilisé pour son encapsulation qui est généralement en Ethylène Vinyl Acetate (EVA) ou du matériau adhésif entre le verre et les cellules. Ce changement de couleur peut se traduire soit par un jaunissement soit par un brunissement du matériau encapsulant. Elle provoque une modification de la transmittance de l'encapsulant des cellules et par conséquent la puissance générée par le module est diminuée. La décoloration peut apparaître dans des zones différentes et non adjacentes d'un même module. Ceci peut être dû d'une part, à des polymères encapsulant d'origine ou de caractéristiques différentes et d'autre part à l'EVA qui n'est pas déployée dans les mêmes zones du module de la même manière [45].



**Figure IV.3 :** Modules photovoltaïques avec des cellules décolorées [45].

#### IV.3.1.4 Défaut d'encapsulation

Ce défaut est causé notamment par délamination et les taches qui apparaissent fréquemment dans des conditions humides et chaudes. Ce défaut se trouve entre l'encapsulation et les cellules actives. Le défaut d'encapsulation peut se produire à cause de l'accumulation de sel, des contaminations, l'infiltration d'humidité ou d'autres facteurs externes.

Parmi les techniques recommandées pour la détection de la délamination, on peut citer, la thermographie, le scanner à ultrasons et la tomographie à rayons X. L'irrégularité peut être quantifiée par un réflectomètre. Quant à la décoloration, c'est un autre défaut d'encapsulation qui engendre la corrosion la diminution de la résistance en série, ce problème est considéré comme le type de dégradation plus fréquent des panneaux PV [44].

#### IV.3.1.5 Perte d'adhérence de back-sheet

Une back-sheet d'un panneau est une protection des composants électroniques de facteurs externes et une sécurité de hautes tensions continues. Cette anomalie être causée par la délamination. Si elle se produit, les composants électriques actifs seront exposés. Cela se traduirait par un défaut d'isolement qui présente des problèmes de sécurité. La forme et la composition des matériaux en de back-sheet peuvent être la cause de ce défaut [44].

#### IV.3.1.6 Fissuration des cellules

La fissure peut survenir à n'importe quel moment. Elle peut être causée au cours de processus de fabrication ou au cours de l'emballage et le transport par une mauvaise manipulation et vibration. Processus d'installation est autre cause de ce défaut [44].



**Figure IV.4:** Fissure de la cellule [44].

### IV.3.1.6 Interconnexion endommagée

Une mauvaise soudure entre ruban d'interconnexion de la branche avec celui de la cellule est la principale raison de ce débranchement. Les contraintes dues au transport, les points chauds, le cycle thermique ou les contraintes mécaniques répétées affaiblissent le ruban d'interconnexion jusqu'à la rupture. La courte distance entre les cellules développe ce type de défaillance. Il peut en résulter des cellules court-circuitées [44].

### IV.3.1.7 Ombrage et des salissures

Deux types d'ombrage existent. Le premier, c'est l'ombrage dur, qui se produit si les panneaux PV sont ombragés par un matériau solide, par exemple des bâtiments ou de la poussière. Le deuxième type est doux ombrage léger qui peut être causé par les nuages.

Le premier type entraîne une baisse de tension et le deuxième affecte le courant et mais non pas la tension. Les deux influent négativement sur les performances du module PV.

Les performances et la perte de puissance sont liées aux surfaces très sales ou ombragés.

En effet, les cellules ombrées se comportent comme une résistance au courant généré. Elles chauffent et le phénomène de hot spot se produit [44].



Figure IV.5 : Défaut d'ombrage partiel [44].

### IV.3.2 Défauts au niveau de convertisseur DC/DC

Le convertisseur DC/DC est considéré comme un élément crucial dans le système PV. Des études ont démontré qu'il est l'un des composants les plus vulnérables. Parmi les pannes qu'on peut trouver au niveau du hacheur DC/DC, il y a,

- Problèmes de conception et de fabrication- Le rendement du hacheur dépend des conditions de fonctionnement qui sont basées sur la gestion thermique et des mécanismes de dissipation de la chaleur due à la commutation des interrupteurs et des condensateurs.

- Problèmes de contrôle- Ils sont liés à l'interaction de l'onduleur avec la nature de la charge à alimenter.

- Les défaillances des composants électriques- Elles se produisent lorsque des composants du convertisseur sont exposés à des contraintes thermique et électrique lors de fonctionnement. Le cycle de vie du convertisseur PV dépend essentiellement de l'interrupteur de commutation.

Kaplar et al. Ont étudié les interrupteurs 'IGBT' (Insulated Gate Bipolar Transistor) et ont montré qu'il est considéré comme la cause première des pannes de convertisseurs DC/DC. C'est pourquoi, l'IGBT est considéré comme la partie principale du hacheur [44].

### IV.3.3 Pannes au niveau de la boîte de jonction

Une boîte de jonction est une protection pour le câblage qui lie le module PV aux bornes extérieures des autres dispositifs de système PV. Ce défaut est causé par une mauvaise fixation de la boîte à la backsheet, la pénétration de l'humidité, la corrosion des raccordements, le mauvais câblage menant à l'arc interne, le mauvais montage ou à cause de dégradation thermique [44].

#### IV.3.3.1 Défauts de diodes bypass

Une diode bypass compense les pertes de puissance et la réduction de performances qui résulte du phénomène de l'ombrage de module PV. Elle évite la polarisation inverse, le hot spot et destruction du module. Leur détection est difficile car ils n'apparaissent que lorsque le problème de mismatche dans la courbe I-V de la cellule se produit. Ces défauts peuvent être apparaitre suite à la rupture de la connexion de la diode ou le montage inverse de la diode bypass [44].

#### III.3.3.2 Défaut d'arc

Il se produit en raison de la discontinuité et de rupture d'isolation en courants conducteurs ou adjacents. Les défauts d'arc produisent le bruit de haute fréquence dans le signal du courant continu de la branche PV [45]. Ce type de rupture est très dangereux pour les plantes et peut produire des incendies.

#### IV.3.3.3 Défaut de terre

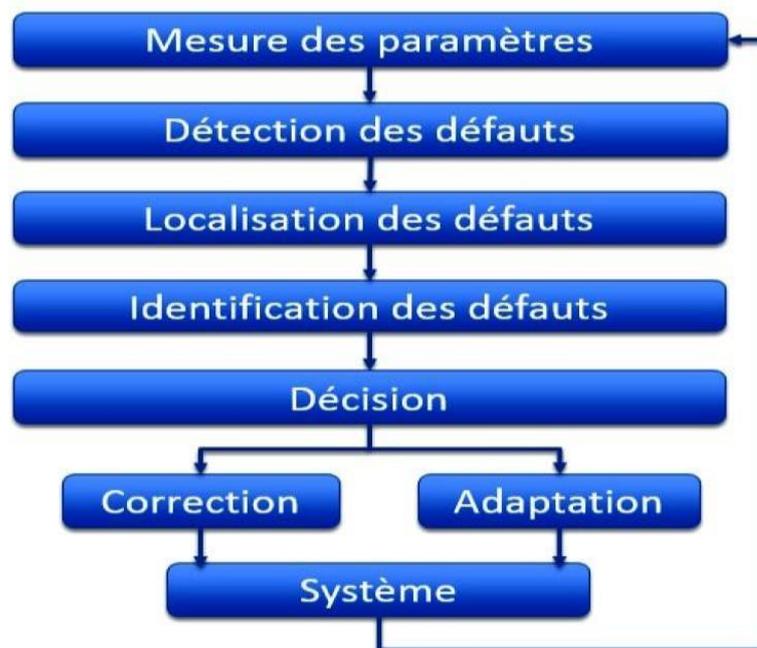
Il se produit accidentellement par un court-circuit électrique .La majorité des systèmes PV sont équipés de dispositif de détection de défaut de terre et de courant de défaut [45].

## IV.4 Diagnostic des défauts dans un système photovoltaïque

### IV.4.1 Etape de diagnostic

Tout système est susceptible de présenter des symptômes révélateurs de défauts. Le défi est de pouvoir détecter et localiser ces défauts d'une manière automatique. Le principe général de surveillance d'un système autonome peut être décrit par la Figure IV.6, les étapes sont détaillées comme suit :

- **Prise de mesures**- La mesure que l'on fait sur le système est la seule information pour connaître l'évolution du système. Elle se fait à l'aide d'un capteur approprié et nécessite souvent d'une étape de filtrage [44].
- **Détection de défauts**- Souvent, il s'agit d'un test statistique traitant un signal susceptible de contenir des informations sur l'état du système à surveiller.
- **Localisation de défauts**- C'est souvent une tâche liée aux caractéristiques du système. Il s'agit d'un test qui traite l'information sur l'origine de la provenance du défaut.
- **Identification de défauts**- Il s'agit de caractériser le défaut, d'estimer son importance et son comportement dans le temps.
- **Décision**- C'est une décision sur le type d'action à prendre pour rétablir de système.
- **Correction**- C'est l'action d'arrêter le système et de procéder à une maintenance corrective.
- **Adaptation**- C'est l'action de reconfiguration et d'adaptation de la consigne à injecter dans le système [44].



**Figure IV.6:** Organigramme de les étapes de diagnostic les défauts [44].

#### IV.4.2 Méthodes de diagnostic d'un générateur PV

On peut distinguer deux grandes catégories de méthodes de diagnostic d'un générateur PV, ceux qui sont utilisés dans l'industrie, et ceux qui sont utilisés dans la littérature, les deux paragraphes qui suivent dans une description simple de ces derniers [45].

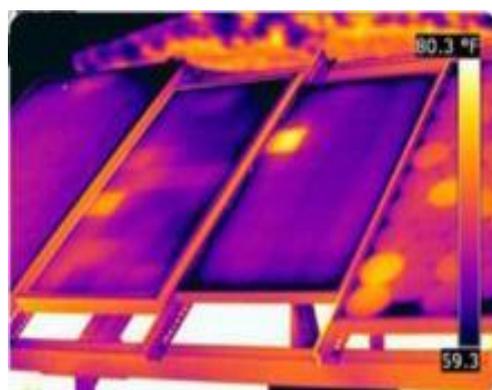
##### IV.4.2.1 Méthodes de diagnostic courantes industrialisées

On peut distinguer deux catégories de méthodes de diagnostic courantes industrialisées : des méthodes reposant sur l'analyse du courant et de la tension (que nous appellerons méthodes électriques) et des méthodes reposant sur l'analyse d'autres grandeurs que I et V (que nous appellerons méthodes non-électriques) [45].

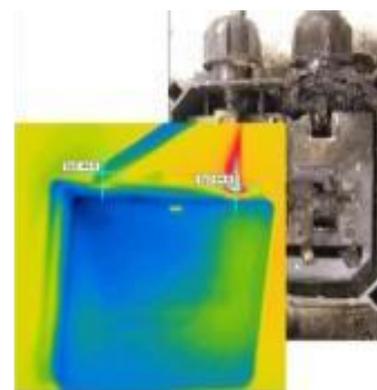
###### IV.4.2.1.1 Méthodes non-électriques

Il existe plusieurs méthodes non-électriques, destructives ou non destructives, pour diagnostiquer le défaut au niveau de cellule PV. Le défaut principal qui peut avoir lieu à ce niveau est la fissure de la cellule. On peut citer comme méthodes : les essais mécaniques de flexion, l'imagerie par photoluminescence et électroluminescence, tests de thermographie [46].

Au niveau du module PV, la méthode de l'imagerie d'infrarouge (caméra thermique) est largement appliquée. Cette méthode repose sur le fait que tous les matériaux émettent un rayonnement infrarouge sur une plage de longueur d'onde qui dépend de la température du matériau. En examinant la distribution de la température au niveau du module, des anomalies (si elles ont lieu) peuvent être localisées [46].



(a) cellule court-circuitée



(b) corrosion dans la boîte de jonction

**Figure IV.7** : Quelques exemples de la localisation de défauts par la caméra thermique [45].

Quelques succès de la localisation de défauts utilisant la caméra thermique ont été reportés : courant de fuite dans la cellule, augmentation de la résistance de la connectique entre les cellules, échauffement anormal des cellules, conduction de la diode de bypass. Cette méthode peut être également appliquée pour les connectiques dans la boîte de jonction, la fonctionnalité de la diode anti-retour [46].

#### IV.4.2.1.2 Méthodes électriques

Dans ces méthodes les grandeurs mesurées les plus courantes sont .

- Le courant débité par le GPV.
- La tension aux bornes du GPV.
- La résistance d'isolement entre les bornes positive et négative du GPV.

Il est aussi possible d'ajouter les grandeurs complémentaires que sont la température ambiante du site et l'ensoleillement aux mesures électriques [47].

Les mesures du côté AC sont plus importantes en nombre car directement liées à l'énergie qui sera vendue. Il est courant de relever [46].

- Le courant AC.
- La tension AC.
- La fréquence.
- L'impédance du réseau vue par l'onduleur.

Des mesures écrites dans les deux paragraphes précédents, il est aisé de déduire :

- La puissance instantanée DC
- La puissance instantanée AC
- L'énergie produite sur différentes périodes (suivant la capacité de stockage des données) côtés DC et AC.

On y ajoute souvent .

- La durée de fonctionnement de l'onduleur
- La date de mise en service
- Le CO2 non rejeté dans l'atmosphère (économisé)
- Les alertes de défaillance du système (principalement les défauts d'isolement)

#### IV.4.2.2 Méthodes dans la littérature

Les différentes méthodes proposées dans la littérature pour la détection et la localisation des défauts ou l'une des deux fonctions (détection ou localisation), sont les suivantes [45]

#### IV.4.2.2.1 Méthode de réflectométrie

La méthode de réflectométrie est une méthode de diagnostic qui consiste à envoyer un signal dans le système ou le milieu à diagnostiqué. Ce signal se propage selon la loi de propagation du milieu étudié et lorsqu'il rencontre une discontinuité, une partie de son énergie est renvoyée vers le point d'injection. L'analyse du signal réfléchi permet de déduire des informations sur le système ou le milieu considéré [45].

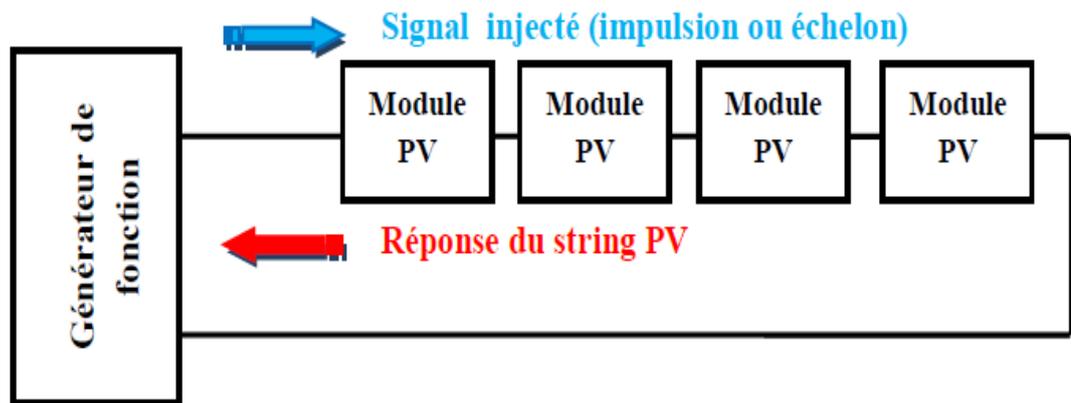


Figure IV.8 : Principe de la réflectométrie pour localiser le défaut dans un string PV [45].

#### IV.4.2.2.2 Analyse de la puissance et de l'énergie produite

La puissance ou l'énergie mesurée est comparée à celle attendue et lorsqu'une déviation importante a lieu, on considère qu'il y a un défaut [46].

L'analyse mentionnée consiste à générer des attributs supplémentaires de la chute de la puissance ou de l'énergie produite telles que : la durée, l'amplitude, la fréquence et les instants de la chute. Ces mêmes attributs sont également prédéterminés pour les différents défauts considérés. Lors de leur comparaison, le défaut dont la valeur des attributs considérés est la plus proche de celle déduite des grandeurs mesurées est considéré comme le défaut responsable de la chute [46].

#### IV.4.2.2.3 Analyse du point de fonctionnement

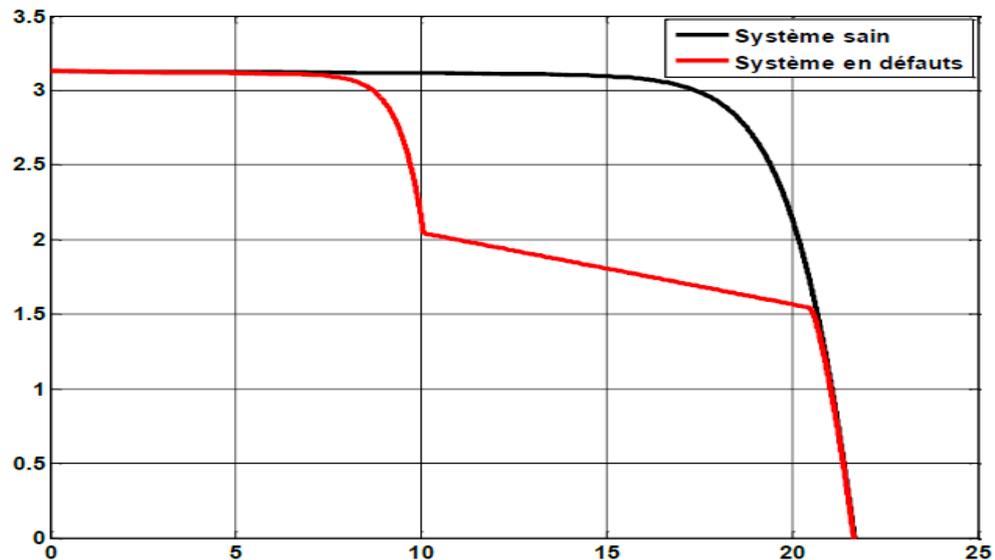
Outre la comparaison de la puissance ou de l'énergie produite actuelle et celle attendue, la comparaison du point de la puissance maximale actuel (courant et tension correspondant à la puissance maximale) et celui attendu peut apporter plus d'information sur l'état du système PV [46].

La comparaison relationnelle entre ces courants et entre ces tensions donne deux couples de valeur binaire (0 ou 1). Suivant la combinaison de ces deux couples, la nature des problèmes du champ PV peut être identifiée. Les quatre familles de problèmes sont les suivantes :

- Modules défectueux dans un string.
- String défectueux.
- Famille de défauts non discriminables : ombrage, erreur de MPPT, vieillissement.
- Fausses alarmes

#### IV.4.2.2.4 Analyse de la caractéristique statique

La déformation de la caractéristique courant-tension peut être provoquée par le changement de la condition de fonctionnement (ensoleillement ou température) ou par l'apparition d'un ou des défauts dans le système PV [47]. La Figure IV.9 montre l'allure de la caractéristique I-V en mode défaillant (ombrage d'un module de 36 cellules à 50%) comparée à celle du mode normal.



**Figure IV.9** : Allure d'une caractéristique I-V d'un champ PV en fonctionnement défaillant.

En exploitant des informations de la caractéristique I-V du champ PV (en défaut), la détection et la localisation de défauts peuvent être réalisées.

L'analyse de la caractéristique I-V consiste à étudier l'impact des différents défauts (dans la cellule, module, string et champ) sur la performance du champ PV, donc sur la caractéristique I-V elle-même [47].

## IV.5 Operations de maintenance

Une installation photovoltaïque a une durée de vie minimum généralement comprise entre 25 et 30 ans si elle est bien entretenue. Ce document décrit quelques une des précautions qui doivent être prises pour que les temps d'immobilisation soient minimisés et que la performance soit

maximale. Certaines tâches sont préventives et seront à réaliser de façon régulière. D'autres sont correctives et ne seront pas nécessairement planifiés à l'avance. La fréquence des inspections visuelles dépend fortement du type d'installation (modules au sol ou en toiture, angle d'inclinaison, système de « tracking », etc.), de la localisation (précipitations et conditions météorologiques attendues) et de l'environnement immédiat (industriel, agricole, urbain, etc.) [48].

#### IV.5.1 Maintenance préventive

La maintenance préventive commence dès que l'installation est mise en route. Il est recommandé de procéder à une réception technique de l'installation, afin de s'assurer de sa conformité au design prévu et de s'assurer de la bonne installation de tous ses composants. La maintenance préventive devrait idéalement commencer par une inspection visuelle complète de l'installation et devra être fréquemment répétée. Les mécanismes installés à l'extérieur doivent toujours être vérifiés afin de prévenir les problèmes quelle qu'en soit la nature. L'installateur peut conseiller au particulier d'effectuer régulièrement toutes une série d'actions pour s'assurer du bon fonctionnement de l'installation. Pour ce faire, il peut s'appuyer sur le guide de maintenance des installations PV [48].

##### IV.5.1.1 Inspection visuelle

###### ➤ Modules

- Salissure et/ou dégradation à la surface des modules.
- Vérifier les boîtes de jonction.
- Présence de bris de glace.
- Effectuer des mesures sur-site (tension, courant).
- Contrôler les connexions du mise à la terre.



**Figure IV.10** : Inspection visuelle de modules.

**➤ Structure de support des modules**

- Contrôler la présence de corrosion sur les poutres.
- Chercher les déformations potentielles.
- Si la structure est lestée, vérifier la position du lestage.
- Si la structure est fixée en toiture, vérifier l'étanchéité à l'eau aux points de fixation.
- Vérifier les connections à la terre (et les éventuelles fuites à travers les défauts d'isolation).
- Si la structure est intégrée en toiture, vérifier l'étanchéité à l'eau de la couverture.
- Si présence d'un tracker, contrôler les parties mécaniques, le mécanisme d'orientation (corrosion, usure, etc.).
- Contrôle de la rigidité des poutres.



**Figure IV.11** : Inspection visuelle de structure de support des modules [48].

**➤ Onduleurs**

- Vérifier que les travaux de maintenance sont effectués avec la fréquence et les exigences demandées par le constructeur.
- Si les onduleurs sont installés dans une salle spécifique, contrôler le bon fonctionnement de la ventilation (et procéder à une maintenance sur cette dernière si nécessaire – filtres, etc.).



**Figure IV.12** : Inspection visuelle de l'onduleur.

- Vérifier que les travaux de maintenance sont effectués avec la fréquence et les exigences demandées par le constructeur.
- Contrôler la présence éventuelle d'humidité pour les onduleurs installés à l'extérieur.
- Si les onduleurs sont installés dans une salle spécifique, contrôler le bon fonctionnement de la ventilation (et procéder à une maintenance sur cette dernière si nécessaire – filtres, etc.).

➤ **Boîtes de jonction**

- Contrôler la présence éventuelle d'insectes, de poussière et/ou d'humidité à l'intérieur des boîtes
- Vérifier les fusibles de chaque chaîne de module
- Vérifier l'état général et l'imperméabilité de la boîte
- Contrôler le verrouillage du mécanisme de découplage
- Tester le bon fonctionnement des éléments de déconnexion



**Figure IV.13** : Inspection visuelle de Boîtes de jonction [48].

➤ **Câblage**

- Vérifier la bonne pose des câbles et des chemins de câble.
- Contrôler l'élasticité des câbles (bonne tenue de l'isolation).
- Chercher la présence de rupture d'isolation.
- Contrôler les lieux pouvant entraîner une déformation ou une coupure des câbles.
- Contrôler les points de fixation.

➤ **Équipements de protection**

Inspection visuelle des connections, des fusibles et disjoncteurs AC, RCD (« Residual Current Devices » pour dispositifs de protection contre les courants résiduels) [48].



**Figure IV.14** : Inspection visuelle d'équipements de protection [48].

- Vérifier la mise à la terre
- Rechercher la présence de dommages sur le paratonnerre (surtout après les impacts de foudre)
- Contrôler les points de connexion

#### IV.5.1.2 Nettoyage

##### ➤ Modules

- La fréquence de nettoyage des modules dépend du type de précipitation (pluie, neige,, etc.) et de l'angle d'inclinaison des modules ainsi que de l'environnement dans lequel il est installé.
- Dans un environnement urbain ou industriel, la fréquence de nettoyage devra être plus élevée que dans un environnement dégagé.
- Utiliser une quantité abondante d'eau propre et sans détergent, ainsi qu'une éponge mouillée pour le lavage des expériences ont montré une différence de 4 % de production.
- Les nettoyeurs haute-pression ne doivent pas être utilisés afin de ne pas endommager la surface photovoltaïque [48].



**Figure IV.15** : Nettoyage de modules [48].

**➤ Onduleurs**

- Enlever poussière/insecte/salissure des filtres à air (suivre les recommandations du constructeur)
- Nettoyer les filtres utilisés pour la ventilation dans le cas d'onduleurs installés dans une salle spécifique

**IV.5.2 Maintenance corrective**

La maintenance corrective apparaît quand la performance du système décroît de façon inattendue ou après qu'un événement imprévu ait entraîné un fonctionnement difficile ou non sécurisé de l'installation (p.e.: modules ou onduleurs défectueux, tempête, chute de neige exceptionnelle, tracker bloqué, etc.) [47]. Les actions correctives dépendent du type de défaut. Quelques exemples sont donnés ici .

- Organiser une inspection visuelle après chaque tempête ou catastrophe climatique.
- Contrôler les protections contre les surtensions après chaque orage.
- Réagir de façon efficace face aux erreurs du système de monitoring.

**IV.6 Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons d'abord donné quelques définitions et termes utilisés dans le domaine du diagnostic. Les méthodes de diagnostic traitées dans la littérature consistent à Il comporte trois étapes de base, la découverte, la localisation et l'identification. Puis nous avons présenté la majorité des défauts et anomalies qui peuvent y apparaître Systèmes photovoltaïques. Il a été établi que ces défauts peuvent être largement divisés en défauts fabrication et les défauts dus aux conditions météorologiques et de fonctionnement.

Nous avons également fourni l'état de l'art dans diverses méthodes de diagnostic Systèmes photovoltaïques. Son rôle est de surveiller le fonctionnement du photovoltaïque en vue de Détecter, localiser et diagnostiquer les dysfonctionnements affectant ces performances et leur sécurité Emploi.

Comme tout système photovoltaïque, il a besoin d'une maintenance préventive ou corrective pour maintenir son état de de préparation et sa rentabilité notamment en raison du facteur climatique, qui sont à l'origine de la majorité des défauts.

# *Conclusion générale*

Le travail présenté dans ce mémoire concerne une application des plus actuelles des énergies renouvelables, celle de l'utilisation de l'énergie solaire photovoltaïque. Qui est considérée comme l'une des énergies les plus productives et les moins chères.

Avant d'aborder la problématique de conversion, nous avons tout d'abord étudié le contexte et la problématique de l'énergie solaire photovoltaïque. Ceci s'avérer nécessaire pour acquérir une connaissance approfondie du comportement d'un générateur photovoltaïque. Nous avons établi des programmes de calculs sous l'environnement Matlab permettant de tracer la caractéristique I-V pour différents éclairagements et températures solaires et de calculer la puissance maximale délivrée par la cellule photovoltaïque correspondante.

De ce qui précède, on peut conclure que l'énergie produite par le photovoltaïque est difficile à exploiter, cela est dû à la non linéarité de la caractéristique statique, de plus cette caractéristique change, si la température ou l'éclairagement varient. Ce dernier changement entraîne une variation du point de fonctionnement, d'où la nécessité de concevoir des régulateurs pour le suivi du point de puissance maximale par commande MPPT et la méthode P&O, quel que soit la valeur de l'éclairagement ou de la température.

Ce mémoire est consacré qui est destiné à modéliser et à simuler un système photovoltaïque comporte un générateur photovoltaïque, associé à un hacheur boost contrôlé par la commande MPPT, méthode P&O afin d'entraîner un charge (réseau électricité.....)

Dans la première partie, nous avons examiné les différentes énergies renouvelables avec les avantages et les inconvénients de chacune. . Et nous avons détaillé l'énergie photovoltaïque et leur effet et principe de conversion

En deuxième partie, nous avons étudié différents système photovoltaïque et on a présenté en détail des différents composants d'un système PV (module, générateur, convertisseur, batterie.....)

La troisième partie traite la modélisation du système photovoltaïque. Commencant par les différents modèles électriques de la cellule ainsi du convertisseur boost avec la commande MPPT , on a intéressé seulement à l'application de l'algorithme basé sur la perturbation et l'observation P&O, et en fin des résultats de simulation du système de conversion en été présenté dans le cas de variation d'éclairagement le température fixe .

La quatrième partie est réservée à l'étude des différents défauts qui peut subir un système Photovoltaïque et les méthodes de diagnostic, Et nous avons abordé certaines méthodes de maintenance pour maintenir la disponibilité du système.

# *Bibliographie*

- [1] FEDDAOUI OMAR / Contribution à l'Etude des Systèmes Hybrides de Génération: Application aux Energies Renouvelables / Mémoire de magister / Université Mohamed Cherif Messaadia de Souk-Ahras / 2014/ Pages 4-7.
- [2] <https://www.projetecolo.com/avantages-et-inconvenients-de-l-energie-eolienne-119.html> / 13.04.2022.
- [3] <https://www.projetecolo.com/l-energie-biomasse-definition-avantages-et-inconvenients-139.html> / 15.04.2022.
- [4] <https://www.controle-electrique.be/actu/avantages-et-desavantages-de-lenergie-hydroelectrique> / 20.04.2022.
- [5] MATALLAH Sorya / Dimensionnement et simulation d'un système photovoltaïque pour alimenter un habitat dans la wilaya d'Ouargla / Mémoire de magister / Université Kasdi Merbah –Ouargla / 2015 / page 7
- [6] [https://www.memoireonline.com/01/13/6842/m\\_Etude-dun-systeme-energetique--pile-combustible-destine--une-application-residentielle11.html](https://www.memoireonline.com/01/13/6842/m_Etude-dun-systeme-energetique--pile-combustible-destine--une-application-residentielle11.html) / 20.04.2022.
- [7] <https://lenergie-solaire.net/energies-renouvelables/energie-geothermique/avantages-inconvénients> /23.04.2022.
- [8] <https://lenergie-solaire.net/energies-renouvelables/energie-maremotrice> /27.04.2022.
- [9] « La cellule photovoltaïque »/Document technique / Centre de recherche de Développement De l'ECAM.
- [10] C. DARRAS / Modélisation de Systèmes Hybrides Photovoltaïque Hydrogène : Applications site isolé, micro-réseau, et connexion au réseau électrique dans le cadre du projet PEPITE / Thèse de Doctorat / Université de Corse-Pascal Paoli/ May 2011.
- [11] <https://terresolaire.com/comprendre-le-solaire/photovoltaique/histoire-du-photovoltaique/> 7/04/2022
- [12] BOUDEHOUCHE.M. D, OUEENNOUGHI.M / gestion d'un système photovoltaïque avec stockage / mémoires de master / université Abderrahmane Mira de Bejaïa /2015-2016
- [13] [https://en.wikipedia.org/wiki/Solar\\_power\\_by\\_country](https://en.wikipedia.org/wiki/Solar_power_by_country) / 18/04/2022
- [14] BOUSSAADIA F.BOUAFIA / Modélisation et simulation système photovoltaïque / mémoire de master / Université Mohamed Boudiaf de M'sila / 2020 - 2021.
- [15] S. RUSTEMLI,F. J. DINCE / Modeling of photovoltaic panel and examining effects of temperature in Matlab/Simulink. / Elektronika ir Elektrotechnika. /Vol 109, pp. 35-40 / 2011.

- [16] <http://www.solarserver.de/gclid=CJWA1ruS-K4CFS4NtAodSzY7xw>. / 20/04/2022
- [17] BELLALA DJAMEL / Contribution à l'Optimisation des Systèmes de conversion d'Energie. Application aux Systèmes Photovoltaïques / Thèse Doctorat / Université de Batna /2009
- [18] M. DAHBI / Etude et optimisation d'une installation Hybride PV-Eolienne / Thèse de Doctorat /Université de Bechar / 2007.
- [19] DR. BELAID LALOUNI SOFIA / Cours Energie Solaire Photovoltaïque / Université A. Mira de Bejaia / 2015-2016
- [20] R. MAOUEDJ / Application de l'énergie photovoltaïque au pompage hydraulique sur les sites de Tlemcen et de Bouzareah / mémoire de magister / université Aboubekr Belkaid, Tlemcen, Algérie / 2005.
- [21] H. BOUZERIA / Modélisation et commande d'une chaine de conversion photovoltaïque. / Thèse de Doctorat / Université de Batna 2 -Batna / 2016.
- [22] A. DJALAB, A. REZAOUI, M. MAZOUZ, L. TETA, A. SABRI, N. ROBUST / Method for Diagnosis and Detection of Faults in Photovoltaic Systems Using Artificial Neural Networks. / Periodica Polytechnica Electrical Engineering and Computer Science / 2020.
- [23] Centrales photovoltaïques / Guide pour le dimensionnement et la réalisation de projets/A l'usage des bureaux d'ingénieurs
- [24] S. SILVESTRE, A. BORONAT, A. CHOUDER. / Study of bypass diodes configuration on PV modules / applied energy. / 2009 /Vol 86, pp. 1632-1640.
- [25] AMARA KARIMA / contribution à l'étude de conception d'une centrale photovoltaïque de puissance (IMW) interconnectée au réseau de distribution électrique moyenne tension/ Mémoire de Magister / UMMTO / 2014-2015
- [26] <https://www.ecosources.org/types-de-cellules-photovoltaïques> /17/04/2022
- [27] DR. BELAID LALOUNI SOFIA / Cours Energie Solaire Photovoltaïque /Université A.Mira de Bejaia / 2015-2016
- [28] <https://portail.cder.dz/spip.php?article3354>.
- [29] L.BUN / Détection et Localisation de Défauts pour un Système PV / thèse de doctorat / université de Grenoble / 2011.
- [30] Cahier Technique, photovoltaïque 2010 / Socomec SA, Strasbour / 2010.
- [31] J. BIRKL, P. ZAHLMANN / protection contre des installations photovoltaïques : Exigences, procédures de test et applications pratiques / L'Artisan Electricien Electronicien N°439 / Avril/Mai 2010.

- [32] S.LHLAH / Etude comparative des techniques MPPT Perturbation and Observation (P&O), Incremental Conductance (Inc.CoN) et Hill climbing (H.C) / Mémoire Magister / université El hadj Lakhdar Batna / 2007
- [33] BOUKAROURA ABDELKADER / Modélisation et Diagnostic d'un Onduleur Triphasé Par l'Approche Bond Graph / Mémoire de Magister / université Ferhat Abbas de Sétif / 2009.
- [34] M.BEHADJ / Modélisation D'un Système De Captage Photovoltaïque Autonome / Thèse Magister / Université Bechar / 2008.
- [35] H.-L. TSAI, C.-S. TU, Y.-J. SU, /Development of generalized photovoltaic model using MATLAB/SIMULINK. in Proceedings of the world congress on Engineering and computer science. / San Francisco, USA. / 2008
- [36] D. SERA / Real-time modeling, diagnostics and optimized MPPT for residential PV systems / Doctoral Thesis / Institute of energy technology-Alborg university, Denmark / 2009.
- [37] V. TAMRAKAR, S. GUPTA, Y. SAWLE / Single-diode and two-diode PV cell modeling using Matlab for studying characteristics of solar cell under varying conditions / Electrical & Computer Engineering: An International Journal / 2015 / Vol 4, pp. 67-77,
- [38] A. KHENFER / Etude et conception d'une architecture en vue de la détection de défauts dans une installation photovoltaïque / Mémoire de Magister / Université Ferhat Abbas Sétif 1 – Sétif / 2015.
- [39] H. ABBES, H. ABID, K. LOUKIL, A. TOUMI, M. Abid / Etude comparative de cinq algorithmes de commande MPPT pour un système photovoltaïque / Revue des Energies renouvelables, Vol 17, pp. 435-445 / 2014
- [40] V. SALAS, E. OLIAS, A. BARRADO, A. LAZARO / Review of the maximum power point tracking algorithms for stand-alone photovoltaic systems / Solar energy materials solar cells, Vol 90 /2006 /
- [41] [https://www.pvchange.com/Solar-Modules/Sunpower/SPR-305-WHT-D\\_12108250](https://www.pvchange.com/Solar-Modules/Sunpower/SPR-305-WHT-D_12108250)  
/20/04/2022
- [42] [http://www.posharp.com/spr-305e-wht-d-solar-panel-from-sunpower\\_p1621616600d.aspx](http://www.posharp.com/spr-305e-wht-d-solar-panel-from-sunpower_p1621616600d.aspx)
- [43] AICHA DJALAB/ Diagnosis of faults in a renewable energy system based on artificial intelligence techniques / thèse de doctorat / Ziane Achour University of Djelfa/page56/2019 2020
- [44] N. AOUCHICHE /Défauts liés aux systèmes photovoltaïques autonomes et techniques de diagnostic - Etat de l'art/Centre de Développement des Energies Renouvelables, CDER/page 1-18/2018

- [45] BACHA MARAH ET BELAHBIBE IMANE/ Diagnostic d'un panneau photovoltaïque/ mémoire de master / Université Mohamed Khider Biskra/ page20-28/ 2019 2020
- [46] MR. BELAOUT ABDESSLAM/Etude et diagnostic des défauts fréquents aux systèmes photovoltaïques (PV) / mémoire de magister/ Université – Setif-1/page 51-55/2014
- [47] OUALID MOKHTAR/Elaboration d'un programme d'aide au diagnostic pour un système photovoltaïque autonome/ mémoire de master / Université de Mohamed Boudiaf M'sila/page 33-36/2016
- [48] Bruxelles Environnement/Le photovoltaïque: entretien et suivis des installations/IBGE-Institut Bruxellois pour la Gestion de l'environnement /page 1-10/ 2010
- [49] ABABACAR NDIAYE/Étude de la dégradation et de la fiabilité des modules photovoltaïques/ thèse de doctorat / Université Cheikh Anta Diop de Dakar/ page 43/2013
- [50] [https://fr.wikipedia.org/wiki/Rayonnement\\_solaire](https://fr.wikipedia.org/wiki/Rayonnement_solaire) / 20.04.2022.
- [51] <https://www.lechodusolaire.fr/marche-mondial-des-installations-pv-de-1033-gwc-en-2018-a-1113-gwc-en-2019/> /20/05/2022
- [52] IBERRAKEN Fairouz et MAOUCHE Cherif /Analyse des Modes de Défaillance des Systèmes Photovoltaïques installés dans le sud Algérien/Mémoire de master /Université Abderrahmane Mira Bejaia / 2012.

## Résumé

La puissance de sortie d'un GPV dépend d'un certain nombre de paramètres parmi lesquels l'intensité du rayonnement solaire, la température des cellules, etc. En raison des caractéristiques électriques fortement non linéaires des cellules PV et de leurs associations, le rendement des systèmes PV peut être amélioré par des solutions à base des techniques MPPT. Il existe des méthodes MPPT conventionnelles souvent utilisées, à savoir la méthode de perturbation et d'observation (P&O). Dans ce travail nous avons traité la simulation et l'implémentation d'un algorithme MPPT par la méthode de perturbation et observation (P&O) afin d'analyser, simuler, et évaluer le système global d'alimentation PV sous des conditions de fonctionnement variables. Pour ce faire les modèles mathématiques des composants du système PV (GPV, convertisseur DC/DC, MPPT, charge) ont été développés. Les résultats de simulation, ont été présentés à l'aide de l'outil Matlab Simulink.

**Mots clés :** Simulation. Convertisseur DC/DC. Algorithme MPPT (P&O), Générateur photovoltaïque (GPV).

## Abstract

The output power of a GPV depends on a number of parameters including the intensity of solar radiation, cell temperature, etc. Due to the highly non-linear electrical characteristics of PV cells and their associations, the efficiency of PV systems can be improved by solutions based on MPPT techniques. There are conventional MPPT methods often used, namely the perturbation and observation method (P&O). In this work we have treated the simulation and the implementation of an mppt algorithm by the perturbation and observation method (P&O) in order to analyze, simulate, and evaluate the global PV power system under operating variable conditions. To do this, the mathematical models of the components of the PV system (GPV, DC / DC converter, MPPT, load) have been developed. The simulation results were presented using the Matlab Simulink tool.

**Keywords:** Simulation, DC/DC converter, MPPT algorithm (P&O), Photovoltaic generator (GPV).

## ملخص

تعتمد الطاقة الناتجة من الألواح الشمسية على عدد من المعلمات بما في ذلك كثافة الإشعاع الشمسي ، ودرجة حرارة الخلية ، إلخ . نظرًا للخصائص الكهربائية غير الخطية للغاية للخلايا الكهروضوئية وارتباطاتها ، يمكن تحسين كفاءة الأنظمة الكهروضوئية عن طريق حلول تعتمد على تقنيات . MPPT هناك طرق MPPT التقليدية المستخدمة في كثير من الأحيان ، وهي طريقة الاضطراب والملاحظة (P&O) . في هذا العمل ، عالجتنا محاكاة وتنفيذ خوارزمية MPPT بواسطة طريقة الاضطراب والمراقبة (P&O) من أجل تحليل ومحاكاة وتقييم نظام الطاقة الكهروضوئية العالمي في ظل ظروف تشغيل متغيرة . للقيام بذلك ، تم تطوير النماذج الرياضية لمكونات النظام الكهروضوئي GPV ( ، محول DC / DC ، MPPT ، الحمل ) . نتائج المحاكاة تم الحصول عليها باستخدام أداة . Matlab Simulink

**الكلمات المفتاحية:** النظام الكهروضوئي ، المحول DC/DC ، آلية التحكم MPPT (P & O) ، مولد (GPV) ، اشعاع.