

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

UNIVERSITY BADJI MOKHTAR - ANNABA
BADJI MOKHTAR – ANNABA UNIVERSITY



جامعة باجي مختار – عنابة

Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Electrotechnique
Spécialité : Electrotechnique industriel

Mémoire

Présenté en vue de l'obtention du Diplôme de Master

Thème :

Energie photovoltaïque

Présenté par :

- BAHLOULI NOR EL ISLAM
- ALLAGUI SALIM

Encadrant : Adjabi Mohamed *Grade prof Université Badji Mokhtar Annaba*

Jury de Soutenance :

Nom et prénom	Grade	Université	Président / Encadrant
Mm.Guoudebouk Sihem	MCA	Université Badji Mokhtar Annaba	Président
Mr.Adjabi Mohamed	PROF	Université Badji Mokhtar Annaba	Encadrant
Mr.Chelli Seif elislam	MCB	Université Badji Mokhtar Annaba	Examineur

Année Universitaire : 2023 / 2024





Remerciements

Avant tout on remercie ALLAH

Qui nous a éclairé le chemin
du savoir.

Ainsi que tous ceux qui ont contribué
de près ou de loin à l'élaboration de
ce présent Mémoire trouve ici.

Au terme de ce projet, nous tenons à exprimer notre gratitude à
Monsieur Adjabi Mohamed, notre encadreur de mémoire.

Et puisque qu'on n'avance pas seul, nos sincères remerciements à
Monsieur Belghich Faycel (chef de service du protection Sider EL
Hadjar), pour ses conseils précieux, le support qu'il nous a fourni,
et sa disponibilité durant toute la
période de STAGE ainsi que tous le groupe de
Sider EL Hadjar (service du protection).

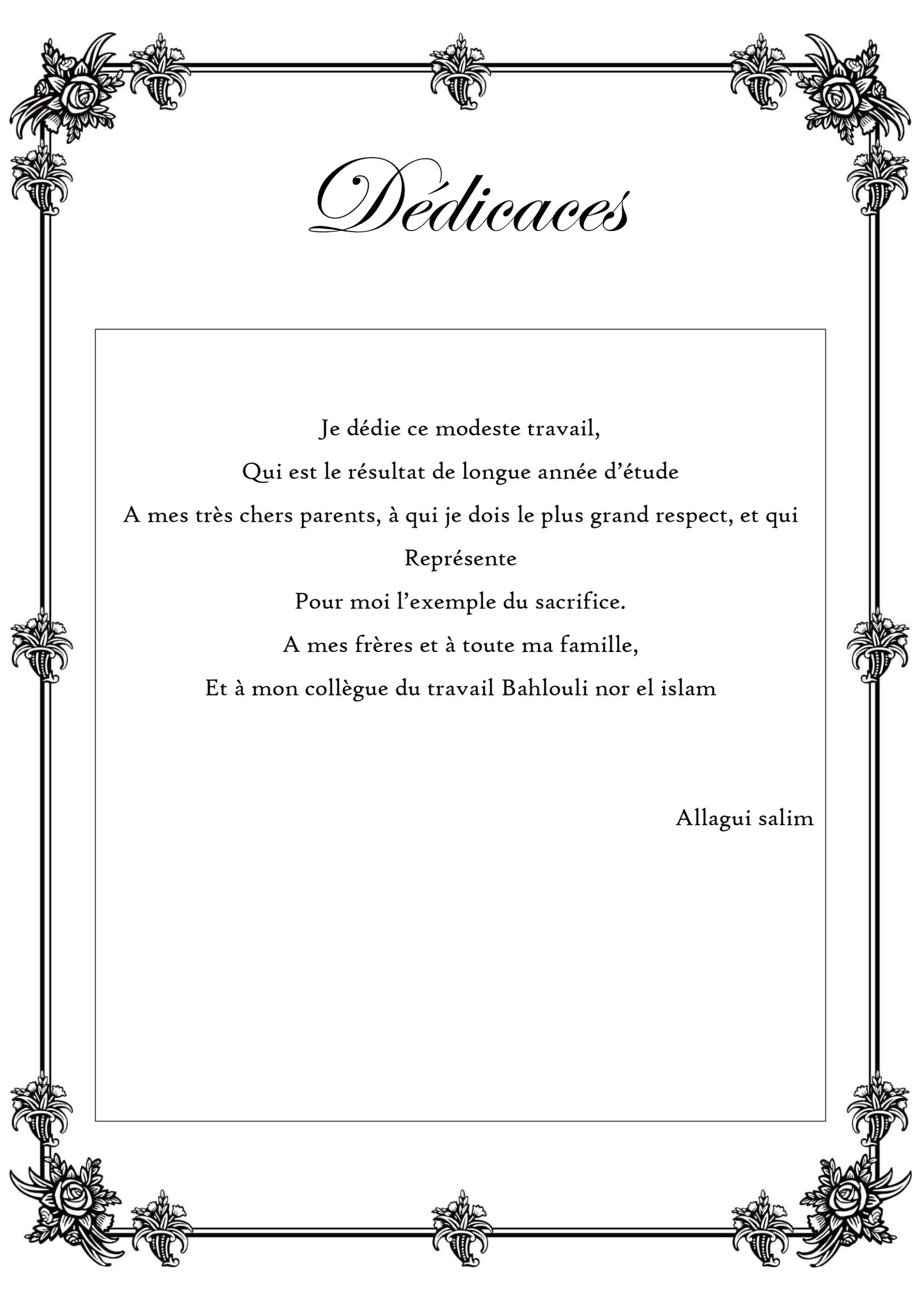
Dédicaces

Merci mon dieu de m'avoir donné la capacité d'écrire et de réfléchir
la force d'y croire, la patience d'aller jusqu'au bout du rêve

Je dédie ce modeste travail :

- ✚ A mon Père
- ✚ A ma chère Mère,
- ✚ A mes frères et sœurs (Sirin, Maram, Kosai et Alla)
- ✚ A toute ma famille,
- ✚ A tous mes amis(es)
- ✚ A mon très cher binôme Allagui salim
- ✚ A la promo Electrotechnique industriel 2023/2024

BAHLOULI NOR EL ISLAM



Dédicaces

Je dédie ce modeste travail,
Qui est le résultat de longue année d'étude
A mes très chers parents, à qui je dois le plus grand respect, et qui
Représente
Pour moi l'exemple du sacrifice.
A mes frères et à toute ma famille,
Et à mon collègue du travail Bahlouli nor el islam

Allagui salim

Liste des figures :

Figure (I.1) : les consommations des différentes énergies dans le monde en 2023.....	3
Figure (I.2) : Ressources annuelles d'origine renouvelable disponibles à la surface de la terre.....	3
Figure (I.3) : le système d'une centrale hydraulique.....	4
Figure (I.4) : la géothermie de haute énergie.....	4
Figure (I.5) : énergie biomasse.....	5
Figure (I.6) : système éolien offshore.....	6
Figure (I.7) : les types d'énergie solaire.....	6
Figure (I.8) : la constitution d'un système PV connecté au réseau.....	7
Figure (I.9) : Géométrie schématique des rapports terre-soleil.....	8
Figure (I.10) : position du soleil d'après l'origine O.....	9
Figure (I.11) : Rayonnement solaire transmis à la terre.....	10
Figure (I.12) : le spectre du rayonnement solaire.....	10
Figure (I.13) : Types de rayonnement solaire reçus au sol.....	11
Figure (I.14) : Rayonnement solaire capté par un plan horizontal et incliné.....	12
Figure (I.15) : Intensité de l'ensoleillement reçu sur un plan horizontal et incliné.....	12
Figure (I.16) : Ensoleillement global annuel dans le monde KWh/m ² /an.....	13
Figure (I.17) : Cartes de l'irradiation globale en Algérie.....	14
Figure (II.1) : Système de conversion de l'énergie solaire en électricité.....	16
Figure (II.2) : Présentation générale d'un système photovoltaïque autonome.....	17
Figure (II.3) : Système autonome avec stockage (batterie).....	18
Figure (II.4) : Système autonome sans stockage.....	18
Figure (II.5) : Système photovoltaïque raccordé au réseau.....	19
Figure (II.6) : Système photovoltaïque raccordé à un générateur électrogène.....	19
Figure (II.7) : Systèmes d'alimentation autonome hybride Photovoltaïque.....	20
Figure (II.8) : Cellule photovoltaïque montrant l'effet photovoltaïque.....	20
Figure (II.9) : Principe de fonctionnement d'une cellule PV.....	21
Figure (II.10) : Types de cellules photovoltaïque.....	22
Figure (II.11) : Cellule au silicium amorphe.....	22
Figure (II.12) : Cellule au silicium monocristallin.....	23
Figure (II.13) : Cellule au silicium poly cristallin.....	23
Figure (II.14) : Cellules identiques en série.....	24
Figure (II.15) : Cellules identiques en parallèles.....	24
Figure (II.16) : Constitution d'un module photovoltaïque.....	25
Figure (II.17) : Panneau photovoltaïque.....	26

Figure (II.18) : Schéma hacheur série.....	29
Figure (II.19) : Schéma hacheur parallèle.....	30
Figure (II.20) : Schéma hacheur série-parallèle.....	30
Figure (III.1) : schéma électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque idéale.....	34
Figure (III.2) : schéma électrique équivalent du modèle à une diode.....	35
Figure (III.3) : Schéma du modèle équivalent à deux diodes d'une cellule photovoltaïque.....	36
Figure (III.4) : Exemple de caractéristique courant-tension d'un module.....	37
Figure (III.5) : Influence de l'éclairement sur la caractéristique P(V) à T=25°C.....	38
Figure (III.6) : Influence de l'éclairement sur la caractéristique I(V) à T=25°C.....	38
Figure (III.7) : Influence de la température sur la caractéristique P(V) à E=1000 W/m ²	38
Figure (III.8) : Influence de la température sur la caractéristique I(V) à E=1000 W/m ²	38
Figure (III.9) : Schéma électrique d'un hacheur survolteur ou booster.....	39
Figure (III.10) : Schéma équivalent de <i>nb</i> élément en série.....	39
Figure (III.11) : Caractéristique P (V) d'un panneau solaire.....	40
Figure (III.12) : Organigramme de l'algorithme perturbation et observation.....	41
Figure (IV.1) : Courbe caractéristique PV.....	44
Figure (IV.2) : Schéma électrique d'une cellule PV.....	45
Figure (IV.3) : Schéma d'un générateur PV sous Matlab Simulink.....	49
Figure (IV.4) : Schéma de courant de module PV.....	49
Figure (IV.5) : Schéma de photo-courant.....	50
Figure (IV.6) : Schéma de courant de saturation.....	50
Figure (IV.7) : Schéma de courant de résistance shunt.....	50
Figure (IV.8) : Schéma de courant de saturation inverse de la diode.....	51
Figure (IV.9) : Les caractéristiques I(V) d'une cellule PV (T=25C, G=1000W/m ²)	51
Figure (IV.10) : Les caractéristiques P(V) de la cellule PV (T=25C°, G=1000W/m ²)	52
Figure (IV.11) : Les caractéristiques I(V) pour différents températures (G=1000W/m ²)	52
Figure (IV.12) : Les caractéristiques P(V) pour différent températures (G=1000W/m ²)	52
Figure (IV.13) : Les caractéristiques I(V) pour différents éclairements(T=25C°)	53
Figure (IV.14) : Les caractéristiques P(V) pour différents éclairements(T=25C°)	53

Liste des Tableaux :

Tableau (I.1) : Le rapport réserve prouvée / production annuelle des différentes ressources non renouvelable.....	2
Tableau (I.2) : Potentiel d'Energie solaire en Algérie.....	13
Tableau (IV.1) : Caractéristique électrique d'une photopile (cellule PV)	48
Tableau (IV.2) : Caractéristique électrique de la cellule PV dans les conditions standards<CST> T=25°C, G=1000W /m ²	48

Résumé

Le travail présenté dans ce mémoire a été effectué au sein du département d'électrotechnique faculté de technologie de l'université de BADJI MOKHTAR -ANNABA, sous la direction de Monsieur Adjabi Mohamed, à qui on présente l'expression de nos profondes gratitude pour tous les conseils et les encouragements qu'ils nous ont prodigué pendant toute la durée de ce travail.

Dans ce mémoire nous avons comme objectif : Traités un sujet très intéressant et très touchant, nouveau dans le domaine électrotechnique. C'est l'énergie verte ou renouvelable, d'après notre recherche des différents types de production de l'énergie électrique par des ressources terrestres comme : le pétrole, Gaz, Uranium, etc...., nous avons trouvé que ces ressources sont de plus en plus éphémères et épuisables et il n'y a pas de remplacement sauf par l'énergie renouvelable.

L'énergie renouvelable consiste l'énergie éolienne, l'énergie hydraulique, l'énergie biomasse, l'énergie géométrique enfin l'énergie solaire. En utilisant les panneaux solaires qui sont considères dans l'avenir comme meilleur solution pour le consommateur de l'électricité et pour sécuriser la planète des produits toxique qui générés la pollution.

Les systèmes photovoltaïques appartiennent à la dynamique des énergies vertes qui est un programme ambitieux basé sur l'efficacité énergétique et le développement durable. Le photovoltaïque est l'un des meilleurs moyens de produire de l'électricité.

Finalement, une étude générale sera menée sur l'installation photovoltaïque autonome. Nous présenterons les différents éléments constitutifs de cette installation.

Mots-clés :

Cellule photovoltaïque, Installation autonome, Énergie renouvelable

Sommaire

Remerciement	0
Dédicaces	0
Liste des figures	0
Liste des Tableaux	0
Résumé	0
Introduction général	0
Chapitre I : État de l'art du système photovoltaïque	1
Introduction.....	1
I.1.1 Ressources énergétiques.....	1
I.1.1.1 Ressources non renouvelables (Épuisables).....	1
I.1.1.2 Ressources renouvelables (Non épuisables)	2
I.1.2 Les différents types d'énergies renouvelables.....	4
a) L'énergie hydraulique.....	4
b) L'énergie Géothermique.....	4
c) L'énergie de la Biomasse.....	5
d) L'énergie Éolienne.....	5
e) L'énergie Solaire.....	6
➤ L'énergie solaire Thermique.....	6
➤ L'énergie solaire Photovoltaïque.....	7
I.2 Le potentiel solaire.....	7
I.2.1 Potentiel solaire extraterrestre.....	7
I.2.1.1 Rayonnement solaire extraterrestre.....	7
I.2.1.2 Temps solaire vrai (TSV).....	8
I.2.1.3 Position du soleil.....	9
I.2.2 Rayonnement solaire.....	10
➤ Le rayonnement direct.....	11
➤ Le rayonnement diffus.....	11
➤ Le rayonnement réfléchi ou l'albédo du sol.....	11
I.3 Le gisement solaire.....	12
I.3.1 Cartes d'irradiation globale et de l'ensoleillement en Algérie.....	13
Conclusion.....	14
Chapitre II : Généralité sur l'énergie photovoltaïque	15
II.1 Introduction.....	16
II.2 Généralités sur l'énergie photovoltaïque.....	16
II.3 Mode de fonctionnement d'un système photovoltaïque.....	16
II.3.1 Mode autonome.....	17
II.3.1.1 Système autonome avec stockage (batterie).....	17
II.3.1.2 Système autonome sans stockage.....	18

II.3.2 Mode connecté au réseaux.....	18
II.3.3 Mode connecté à un générateur électrogène.....	19
II.3.4 Mode hybride.....	19
II.4 Effet photovoltaïque.....	20
II.5 Cellule photovoltaïque.....	21
a) Cellule au silicium amorphe.....	22
b) Cellule au silicium monocristallin.....	23
c) Cellule au silicium poly cristallin.....	23
II.5.1 Groupement des cellules photovoltaïque.....	24
a) Groupement en série.....	24
b) Groupement en parallèle.....	24
II.6 Module photovoltaïque.....	25
II.6.1 Caractéristiques d'un module photovoltaïque.....	26
II.7 Panneau photovoltaïque.....	26
II.8 Champ photovoltaïque.....	27
II.9 Avantages et inconvénients de l'énergie solaire photovoltaïque.....	27
II.9.1 Avantages.....	27
II.9.2 Inconvénients.....	27
II.10 Domaines d'application de l'énergie photovoltaïque.....	28
II.10.1 L'avenir du photovoltaïque.....	28
II.11 Les convertisseurs statiques.....	28
II.11.1 Onduleur.....	29
II.11.2 Hacheur.....	29
a) Hacheur dévolteur (série).....	29
b) Hacheur survolteur (parallèle).....	29
c) Hacheur série-parallèle.....	30
II.12 Systèmes de stockage.....	31
II.12.1 Batteries d'accumulateurs.....	31
a) Batteries au plomb.....	31
b) Batteries au Cadmium-Nickel.....	31
c) Batteries au Nickel-Zinc.....	31
d) Batteries au Lithium.....	32
II.12.2 Caractéristiques principales d'un accumulateur.....	32
Conclusion.....	32
Chapitre III : Modélisation du système photovoltaïque.....	33
III.1 Introduction.....	34
III.2 Modélisation du générateur photovoltaïque.....	34
III.2.1. Les modèles mathématiques.....	34

a) Cellule idéale.....	34
b) Modèle à une diode.....	35
c) Modèle à deux diodes.....	36
III.2.2 Caractéristique courant-tension d'un module.....	37
III.2.3 Influence de l'irradiation.....	37
III.2.4 Influence de la température.....	38
III.3 Modélisation de l'hacheur survolteur.....	38
III.4 Modélisation de la batterie.....	39
III.5 Commande MPPT P&O.....	40
Conclusion.....	41
Chapitre IV : modélisation et simulation d'un panneau PV sur Matlab.....	42
IV.1. Introduction.....	43
IV.2. Les paramètres caractéristiques d'un panneau photovoltaïque.....	43
a) Courant de court-circuit.....	43
b) Tension de circuit ouvert.....	43
c) Puissances maximale.....	44
d) Le facteur de forme.....	44
e) Le rendement de la conversion.....	45
IV.2. Modélisation d'une cellule PV.....	45
a) Résistance séries.....	45
b) Résistance shunt.....	45
IV.3.1. Les différentes équations de la cellule PV.....	46
a) Le photo-courant.....	46
b) Le courant de saturation.....	47
c) Le courant de saturation inverse de la diode.....	47
d) Courant de résistance shunt.....	47
e) Le courant de panneau.....	47
IV.4. La simulation d'un panneau PV.....	49
IV.4.1. Définition de simulink.....	49
IV.4.2. La simulation de chaque équation d'un module PV.....	50
IV.4.3. Les résultats de simulation sur matlabsimulink.....	51
IV.4.4. Les caractéristiques I(V) et P(V) sous les conditions standard.....	51
IV.5. L'effet climatique sur la cellule PV.....	52
IV.5.1. L'influence de la température sur la cellule.....	52
a) Les caractéristiques I(V).....	52
b) Les caractéristiques P(V).....	52
IV.5.2. L'influence de l'éclairement sur la cellule PV.....	53
a) Les caractéristiques I(V).....	53
b) Les caractéristiques P(V).....	53
Conclusion.....	54
Conclusion générale.....	54

Introduction Générale

Introduction générale :

Depuis les crises successives du pétrole des dernières décennies et face aux prévisions d'épuisement inéluctable des ressources mondiales en énergie fossile (Pétrole, gaz, charbon...) d'un côté, et face aux débats sur l'énergie nucléaire et le réchauffement climatique d'un autre côté ; la nécessité de la diversification énergétique, de la sécurisation des approvisionnements et de la protection de l'environnement est devenue une urgence mondiale. Cette situation a conduit à la recherche d'autres ressources d'énergies de remplacement.

Les énergies renouvelables et notamment l'énergie solaire photovoltaïque représente une solution de remplacement par excellence et elle est de plus en plus utilisée dans nos jours. Pour cela Le rôle de ce système est de la production d'électricité sans interruption dans les régions isolées n'est pas seulement d'apporter « une puissance énergétique », mais un outil de développement social et économique des zones rurales. Le nombre de kilowattheures produit peut paraître insignifiant devant la capacité de production énergétique du pays, mais ces quelques dizaines ou centaines de kilowattheures peuvent ranimer tout l'espoir d'un village ou d'une communauté.

L'énergie photovoltaïque est obtenue directement à partir du rayonnement du soleil. Elle peut même se transformer en énergie électrique grâce à l'effet photovoltaïque. Les panneaux photovoltaïques composés des cellules photovoltaïques ont la capacité de transformer les photons en électrons. L'énergie sous forme de courant continu est ainsi directement utilisable. Le rendement des systèmes photovoltaïques peut être amélioré par des solutions utilisant les techniques de recherche du point de puissance maximale (dites techniques MPPT «Maximum Power Point Tracking»).

Le but de ce travail est l'étude d'un système d'énergie photovoltaïque autonome. Notre mémoire est structurée en quatre chapitres en plus de l'introduction générale, la conclusion générale et perspective.

Le premier chapitre, est consacré à l'état de l'art des systèmes photovoltaïques et en particulier le potentiel solaire (Le rayonnement, la position du soleil ...etc.) avec les différents modes d'exploitation de cette technologie ainsi que ses domaines d'application.

Au second chapitres, nous allons d'abord donner des généralités sur les systèmes photovoltaïques, donc nous allons non seulement les définir, mais aussi expliqué le fonctionnement des cellules photovoltaïques et les éléments dont nous aurons besoin dans l'installation globale, et aussi donner quelque avantages et inconvénients de ce types d'énergies.

Le troisième chapitre, nous allons présenter la modélisation de chaque élément de notre système. Cette modélisation nous permettra de poursuivre notre étude dans les chapitres qui vont suivre, et de trouver une meilleure stratégie pour pouvoir bien utiliser nos éléments du système. Pour une utilisation optimale de la source d'énergie photovoltaïque, différentes méthodes de la poursuite du point de puissance maximale (MPPT) des panneaux photovoltaïques seront présentés.

Dans le dernier chapitre, nous avons étudié la modélisation et simulation d'un panneau Photovoltaïque de type poly cristallin (composé de 54 cellules connectées en série) dans les conditions standard ($E=1000W/m^2$, $T=25^{\circ}C$), nous allons traiter l'effet de la température et l'éclairement sur l'énergie produite de la cellule PV.

On utilise l'outil MATLAB pour faire la Modélisation et la simulation d'un module PV. Nous terminerons ce travail par une conclusion générale qui résume notre étude.

Chapitre I : **État de l'art du système** **photovoltaïque**

Introduction

La consommation mondiale en matière d'énergie est assurée essentiellement par les énergies non renouvelables dû au fait que celles-ci sont épuisables, des stratégies énergétiques sont mises en œuvre, visant à augmenter l'efficacité des systèmes électriques, à éviter le gaspillage mais également à se tourner vers les énergies renouvelables (hydraulique, vent, solaire, houle, biomasse, géothermie, marée).

Les énergies renouvelables sont des sources d'énergies dont le renouvellement est assez rapide pour qu'elles puissent être considérées comme inépuisables à l'échelle de temps humaine.

Les systèmes photovoltaïques permettent d'exploiter l'énergie du soleil à diverses fins, ils sont très fiables et constituent une source non polluante d'électricité qui peut convenir à toute une gamme d'applications.

Les énergies renouvelables constituent donc une alternative aux énergies fossiles à plusieurs titres :

- Elles sont généralement moins perturbatrices de l'environnement, elles n'émettent pas de gaz à effet de serre et ne produisent pas de déchets.
- Elles sont inépuisables.
- Elles autorisent une production décentralisée adaptée à la fois aux ressources et aux besoins locaux.
- Elles offrent une importante indépendance énergétique.

I.1 Contexte énergétique mondial :

Dans cette partie, nous allons comparer les ressources et les besoins énergétiques au niveau mondial.

La distinction sera faite entre ressources non renouvelables (fossiles et fissiles) et ressources renouvelables. Une attention particulière sera portée sur l'énergie électrique [1].

I.1.1 Ressources énergétiques :

I.1.1.1 Ressources non renouvelables (Epuisables) :

Une ressource est dite non renouvelable lorsque sa consommation aboutit à sa diminution notable à l'échelle des temps humains.

Les principales sources d'énergies non-renouvelables sont dérivées des hydrocarbures, tels que le pétrole, le gaz naturel, et les huiles.

On peut classer les énergies non-renouvelables en deux grandes familles :

1. **Énergie fossile** : notamment le charbon, le gaz naturel et le pétrole. Leur vitesse de régénération est extrêmement lente à l'échelle humaine, et la consommation intensive, d'où les risques d'épuisement actuels.
2. **Énergie nucléaire** : les gisements d'uranium étant limités, et son stock ne se reconstitue pas à l'échelle de la vie du système solaire. Seule la fusion nucléaire pourrait,

à condition d'être industriellement maîtrisée, produire de l'énergie sur le très long terme [1].

Ces ressources sont donc définies comme non renouvelables car leur épuisement au rythme de leur consommation actuelle est inévitable.

Ressource réserve prouvée	Production annuelle
Pétrole	40 ans
Gaz	57 ans
Charbon	220 ans
Uranium	77 ans

Tableau (I.1) : Le rapport réserve prouvée / production annuelle des différentes ressources non renouvelables [1].

Les réserves prouvées en énergie fossile et fissile sont aujourd'hui assez correctement estimées, il est alors possible de déterminer le rapport entre réserve prouvée et production annuelle correspondant à la période d'exploitation de la ressource avant extinction de celle-ci (Tableau (1.1)). Bien entendu, ces données étant issues de travaux de prospections géologiques bien qu'une certaine incertitude plane autour de leur valeur, cependant, il est hautement probable que nous nous trouvons actuellement autour du "peak oil" ou pic de Hubbert correspondant au maximum de la production mondiale de pétrole, date à partir de laquelle la production mondiale de pétrole commencera à diminuer du fait du déclin des capacités de production.

Bien que ce pic concernant les autres énergies fossiles et fissiles ne soit pas encore atteint, ces ressources ne représentent qu'une solution à court terme (Probablement moins d'un siècle) pour répondre aux besoins énergétiques mondiaux [1].

I.1.1.2 Ressources renouvelables (Non épuisables) :

Une source d'énergie est dite renouvelable si le fait d'en consommer ne limite pas son utilisation future. C'est le cas de l'énergie du soleil, du vent, des cours d'eau, de la terre et généralement de la biomasse humide ou sèche, à l'échelle de la durée de vie de l'humanité, qui n'est pas le cas pour les combustibles fossiles et nucléaires.

L'utilisation des énergies renouvelables n'est pas nouvelle. Autrefois, les moulins à eau, à vent, bois de feu, traction animale, bateaux à voile ont largement contribué au développement de l'humanité, elles constituaient une activité économique à part entière, notamment en milieu rural où elles étaient aussi importantes et aussi diversifiées que la production alimentaire, mais dans les pays industrialisés, dès le 19^{ème} siècle, elles furent progressivement marginalisées aux profits d'autres sources d'énergie que l'on pensait plus prometteuses.

Une grande partie du monde ne sera sans doute jamais raccordée aux réseaux électriques dont l'extension s'avère trop coûteuse pour les territoires isolés, peu peuplés ou difficilement accessibles [1].

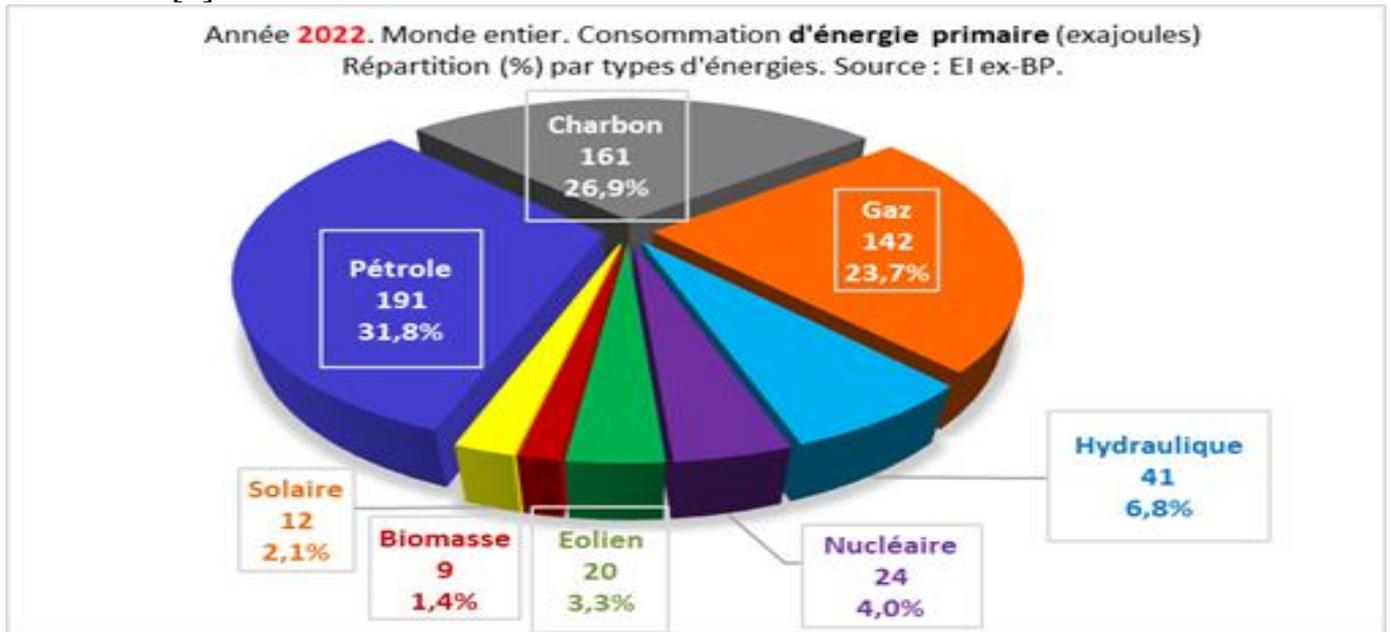


Figure (I-1) : Les consommations des différentes énergies dans le monde en 2023.

La Figure (I.1) représente les différentes ressources renouvelables disponibles à la surface de la terre. Selon l'origine de l'énergie, il est possible de distinguer :

- ✓ L'énergie solaire : La terre est en permanence soumise à un rayonnement solaire fluctuant avec une période majeure annuelle. En moyenne annuelle, la terre intercepte environ $1600 \times 10^{15} \text{ kWh}$, qu'on peut le départager (Suivant les recherches établies dans le monde) à :
 - ✓ Environ 30% sont directement réfléchis par les couches hautes de l'atmosphère terrestre et sont renvoyés dans l'espace.
 - ✓ 45% sont transformés en chaleur puis rayonnés sous forme d'infrarouge dans l'espace.
 - ✓ 25% sont convertis en surface et dans l'atmosphère, donnant naissance aux phénomènes de houle et de vent.
 - ✓ 0,06% sont exploités par la photosynthèse.

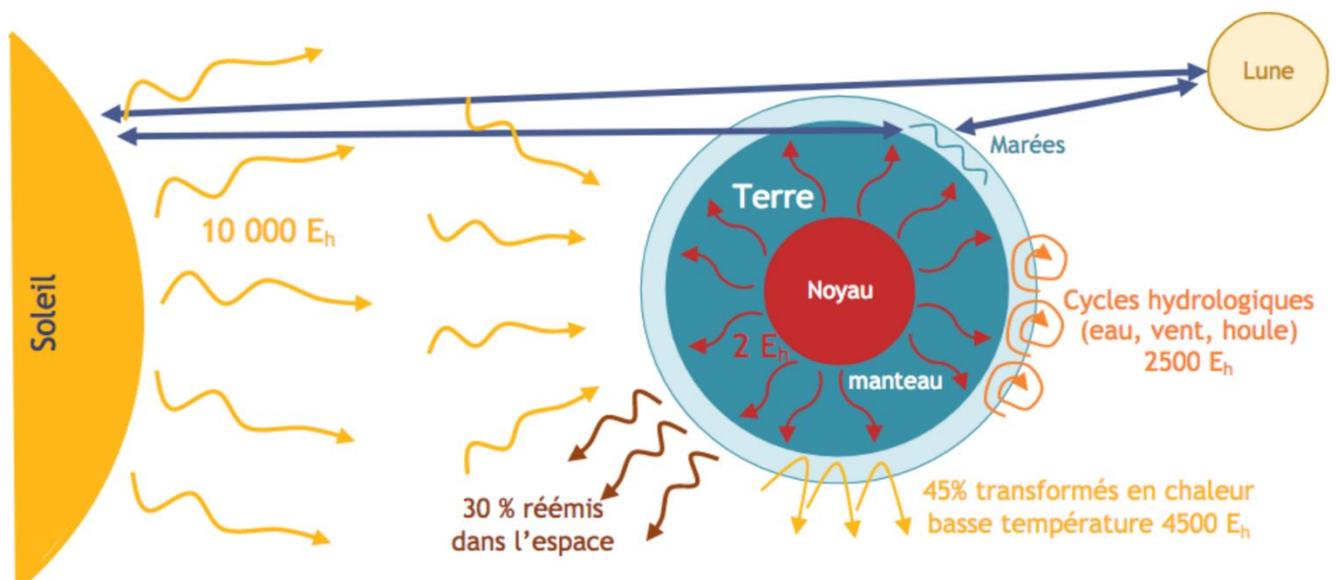


Figure (I.2) : Les ressources annuelles d'énergie renouvelable disponibles à la surface de la terre

I.1.2 Les différents types d'énergies renouvelables :

a) L'énergie hydraulique :

L'énergie hydraulique permet de fabriquer de l'électricité, dans les centrales hydroélectriques, grâce à la force de l'eau, cette force dépend soit de la hauteur de la chute d'eau (Centrales de haute ou moyenne chute), soit des débits des fleuves et des rivières (Centrales qui fonctionnent au fil de l'eau).

L'énergie hydraulique dépend du cycle de l'eau, elle est la plus importante source d'énergie renouvelable. Sous l'action du soleil, l'eau des océans et de la terre s'évapore, elle se condense en nuages qui se déplacent avec le vent. La baisse de température au-dessus des continents provoque des précipitations qui alimentent l'eau des lacs, des rivières et des océans [2].

Une centrale hydraulique est composée de 3 parties :

- ✓ Le barrage qui retient l'eau
- ✓ La centrale qui produit l'électricité
- ✓ Les lignes électriques qui évacuent et transportent l'énergie électrique.

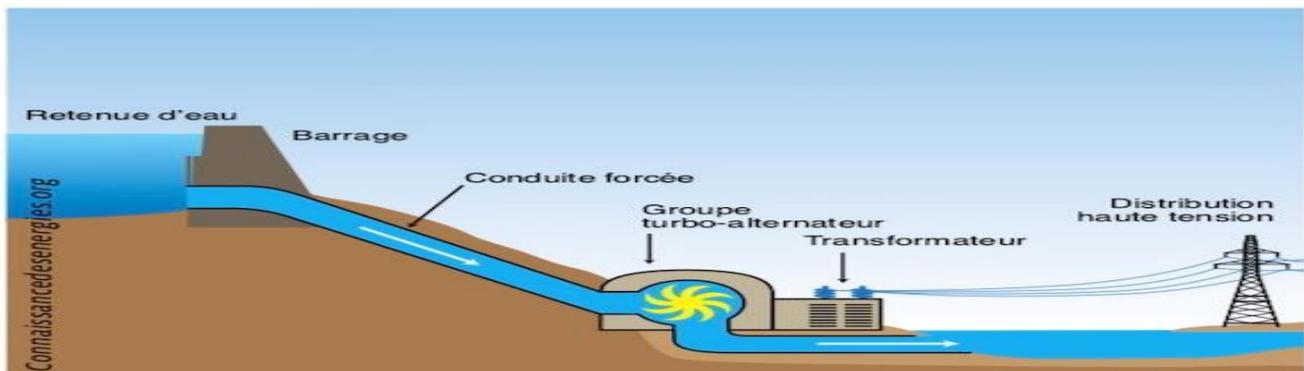


Figure (I.3) : Le système d'une centrale hydraulique [2].

b) L'énergie Géothermique :

La géothermie consiste à capter la chaleur contenue dans la croûte terrestre pour produire du chauffage ou de l'électricité.

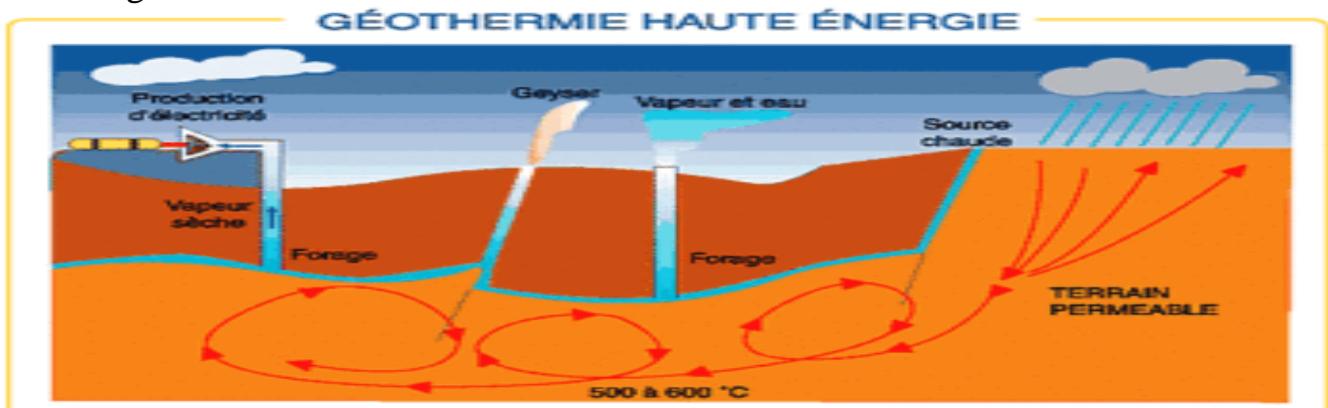


Figure (I.4) : La géothermie de haute énergie [2].

On considère 3 types d'énergies :

1. La géothermie à haute énergie.
2. La géothermie à basse énergie.
3. La géothermie à très basse énergie.

c) L'énergie de la Biomasse :

L'énergie issue de la biomasse est une source d'énergie renouvelable qui dépend du cycle de la matière vivante végétale et animale.

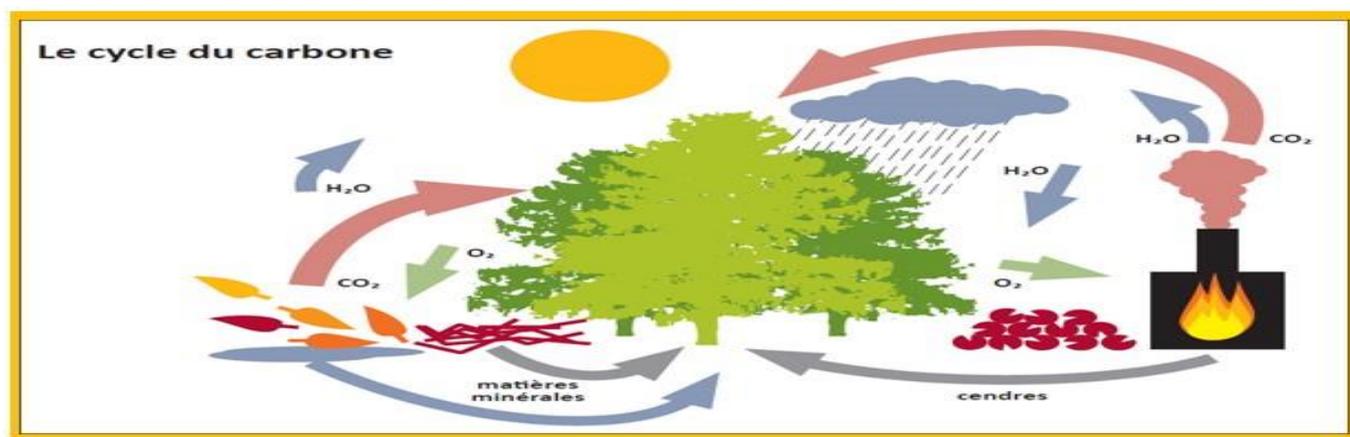


Figure (I.5) : L'énergie Biomasse [2].

Elle est la forme d'énergie la plus ancienne utilisée par l'homme depuis la découverte du feu à la préhistoire. Cette énergie permet de fabriquer de l'électricité grâce à la chaleur dégagée par la combustion de ces matières ou du biogaz issu de la fermentation de ces matières, dans des centrales biomasses.

d) L'énergie Eolienne :

L'énergie éolienne est l'énergie cinétique des masses d'air en mouvement autour du globe. La racine étymologique du terme « Eolien » provient du nom du personnage mythologique Éole, connu en Grèce antique comme le maître des vents.

L'énergie éolienne est une forme indirecte de l'énergie solaire : les rayons solaires absorbés dans l'atmosphère entraînent des différences de température et de pression.

De ce fait les masses d'air se mettent en mouvement et accumulent de l'énergie cinétique, celle-ci peut être transformée et utilisée à plusieurs fins :

- ✓ La transformation en énergie mécanique
- ✓ La production d'énergie électrique.

Donc on peut dire que l'énergie éolienne est une énergie renouvelable qui ne produit pas directement de gaz à effet de serre en phase d'exploitation [2].

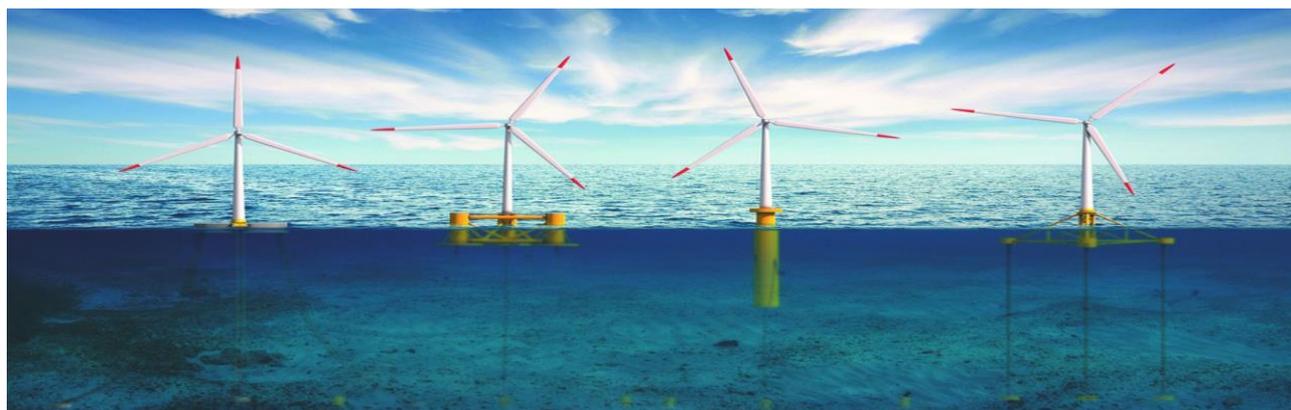


Figure (I.6) : Le système éolien offshore [2].

e) L'énergie Solaire :

L'énergie solaire est une source d'énergie qui dépend du soleil. Cette énergie permet de fabriquer de l'électricité à partir de panneaux photovoltaïques ou des centrales solaires thermiques, grâce à la lumière du soleil captée par des panneaux solaires.

Le soleil, bien que distant de plus de 150 millions de kilomètres de nous, demeure notre plus grande source d'énergie même si elle est intermittente, C'est une énergie propre qui n'émet aucun gaz à effet de serre et sa matière première, le soleil, est disponible partout dans le monde, gratuitement et inépuisable.

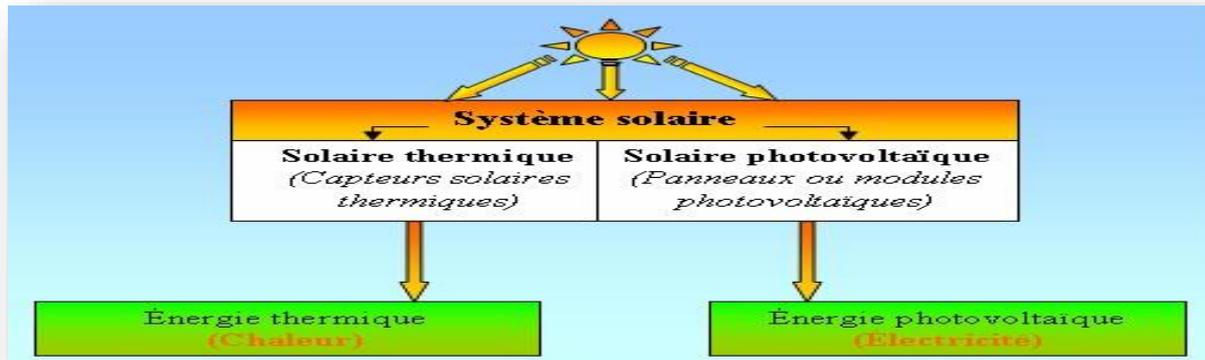


Figure (I.7) : Les types d'énergie solaire [2].

➤ L'énergie solaire Thermique :

L'énergie solaire thermique est une forme d'énergie solaire, elle désigne l'utilisation de l'énergie thermique du rayonnement solaire dans le but d'échauffer un fluide (Liquide ou gaz). L'énergie reçue par le fluide peut être ensuite utilisée directement (Eau, chauffage, etc.) ou indirectement (Production de vapeur d'eau pour entraîner des alternateurs et ainsi obtenir de l'énergie électrique, production de froid, etc.).

L'énergie solaire thermique provient de la chaleur transmise par le soleil par rayonnement, elle ne doit pas être confondue avec d'autres formes d'énergie solaire et notamment l'énergie solaire photovoltaïque qui utilise l'effet photoélectrique afin de transformer les photons émis par le soleil en électricité.

➤ L'énergie solaire Photovoltaïque :

L'énergie solaire photovoltaïque est une énergie électrique produite à partir du rayonnement solaire.

L'énergie produite par une centrale solaire photovoltaïque est dite renouvelable, car sa source est considérée comme inépuisable à l'échelle de temps humaine.

Cette énergie n'est cependant pas totalement renouvelable, car la fabrication des panneaux photovoltaïques, leur installation et leur exploitation consomment de l'énergie issue en grande partie de sources non renouvelables ; mais un système photovoltaïque produit entre 20 et 40 fois plus d'énergie que ce qui a été utilisé pour le fabriquer figure (I.8) [2].

$$EsAs = E(0) A(0) T \quad (I.3)$$

Avec :

ES : éclairement de la surface du soleil.

E0 : éclairement en dehors de l'atmosphère terrestre, appelé constante solaire.

AS : Surface du soleil.

A0T : Surface de la sphère dont le rayon est l'orbite de la terre/soleil.

La figure (I-9) montre la géométrie schématique des rapports terre-soleil. En substituant ES par l'équation (1.2) et T par 5762°K, on obtient : $E_0=1360 \text{ W/m}^2$ Puisque l'orbite de la terre ROT n'est pas entièrement constant, E_0 change légèrement tout au long de l'année, on peut déduire que $1300 \text{ W/m}^2 < E_0 < 1390 \text{ W/m}^2$. Les mesures, par satellite, indiquent que la valeur moyenne de l'année E_0 est de 1367 W/m^2 ; qui est dans la gamme précédente.

En raison de l'orbite elliptique de la terre, l'ensoleillement extraterrestre E_0 sur une surface perpendiculaire au faisceau du soleil dans le jour n de l'année est donné (n variant de 1 à 365 et ce du 01/01 au 31/12 de l'année) par l'équation suivante :

$$E_0(n) = 1 + 0.033 \left(\frac{2\pi n}{365} \right) E_0 \quad (I.4)$$

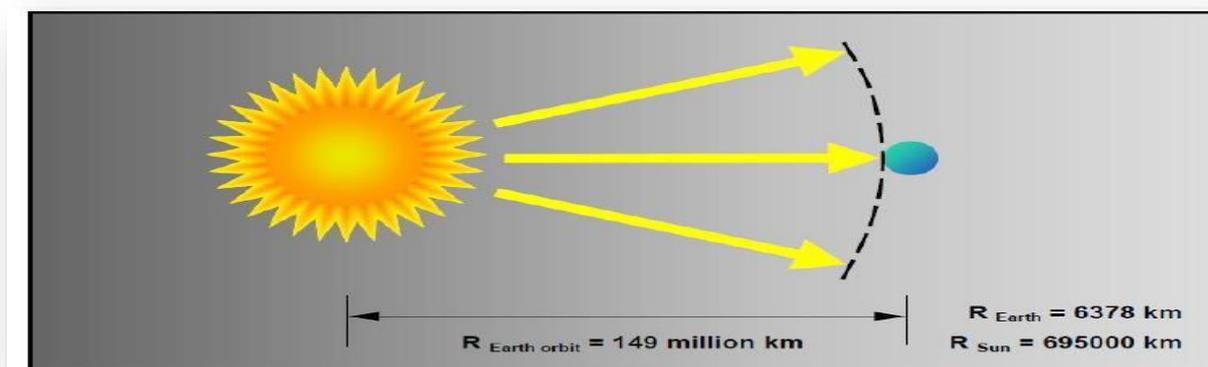


Figure (I.9) : La géométrie schématique des rapports terre-soleil [4].

I 2.1.2 Temps solaire vrai (TSV) :

Le temps (En heures) appliqué dans les calculs d'énergie solaire est nommé : le temps solaires vrai, là où le soleil croise le méridien de l'observateur à 12:00. La conversion du temps standard local (TSL) au TSV est faite par l'équation (I.5) [3]:

$$TTsv = TTsl + \frac{12h}{\pi} (\Lambda_{ref} - \Lambda) + Bt(n) \quad (I.5)$$

Avec :

Λ : longitude géographique du site.

Λ_{ref} : longitude de référence du TSL.

$Bt(n)$: facteur additionnel qui compte pour les perturbations de rotation de la terre en heure

I.2.1.3 Position du soleil :

La position du soleil sur la sphère céleste est donnée par l'angle d'altitude γ et l'angle d'azimut ψ **figure (I.10)**. Elle dépend de la date, la période du jour, et de la position géographique de l'observateur [3].

La date, en nombre de jours n , détermine l'angle solaire de déclinaison δ de la terre, qui est au point O en radian. Elle est exprimée par l'équation suivante :

$$\delta = 23.45 \frac{\pi}{180} - \sin\left(2\pi \frac{284+n}{365}\right) \quad (\text{I.6})$$

Le temps de la journée, en heures, est le reflet d'un angle nommé angle horaire du soleil, en radian équivalant à l'heure, qui est donné par l'équation suivante [5] :

$$\omega = (\text{TSV} - 12\text{h})\pi/12\text{h} \quad (\text{I.7})$$

L'altitude γ et l'azimut ψ à un certain temps et date, à longitude Λ et à latitude φ , sont alors calculés à partir des équations **(I.8)** et **(I.9)** :

$$\sin(\gamma) = \sin(\varphi)\sin(\delta) + \cos(\delta)\cos(\varphi)\cos(\omega) \quad (\text{I.8})$$

$$\cos(\omega) = \frac{\sin(\varphi)\sin(\gamma) - \sin(\delta)\cos(\varphi)\cos(\gamma)}{\cos(\delta)\cos(\gamma)} \quad (\text{I.9})$$

A noter que l'azimut solaire ψ est négatif le matin et positif l'après-midi. Pour des positions sur l'hémisphère nordique, l'angle d'altitude γ est positif entre le lever et le coucher du soleil ; tandis que sur l'hémisphère méridional, il est négatif. L'angle de déclinaison δ est défini positif pendant l'été sur l'hémisphère nordique. L'angle de latitude géographique φ est positif sur l'hémisphère nord et négatif sur l'hémisphère sud.

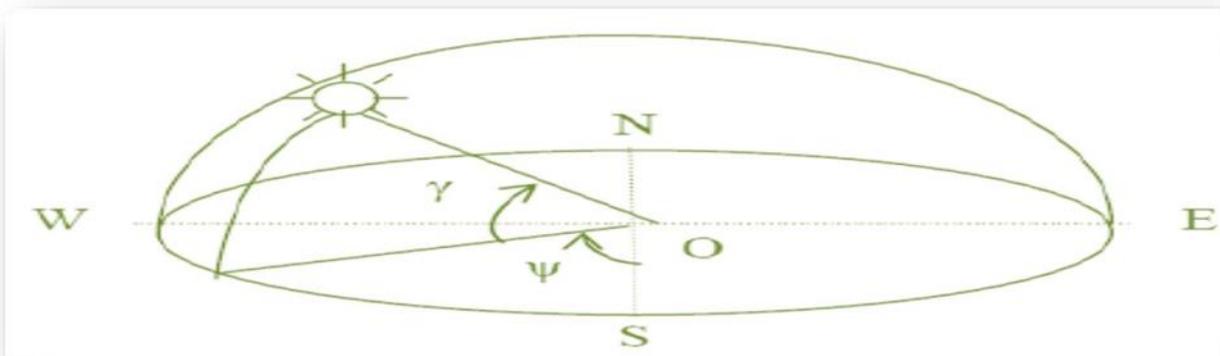


Figure (I.10) : La position du soleil d'après l'origine O [4].

I.2.2 Rayonnement solaire :

Le rayonnement émis par le soleil est constitué d'ondes électromagnétiques dont une partie parvient constamment à la limite supérieure de l'atmosphère terrestre. Ce rayonnement électromagnétique se situe dans la gamme de longueur d'onde de la lumière visible (entre 0,4 et 0,75 μm) et dans le proche infrarouge (au-delà de 0,75 et jusqu'à 4 μm). Le rayonnement électromagnétique est composé de « grains » de lumière appelés photons.

L'énergie de chaque photon est directement liée à la longueur d'onde. L'énergie véhiculée par ce rayonnement, correspond à un éclairage de 340 W/m^2 . Un bilan énergétique montre que sur cette quantité d'éclairage environ 100 W/m^2 sont réfléchis vers l'espace, seul le reste est absorbé, pour un tiers par atmosphère et pour les deux tiers par la surface de la terre.

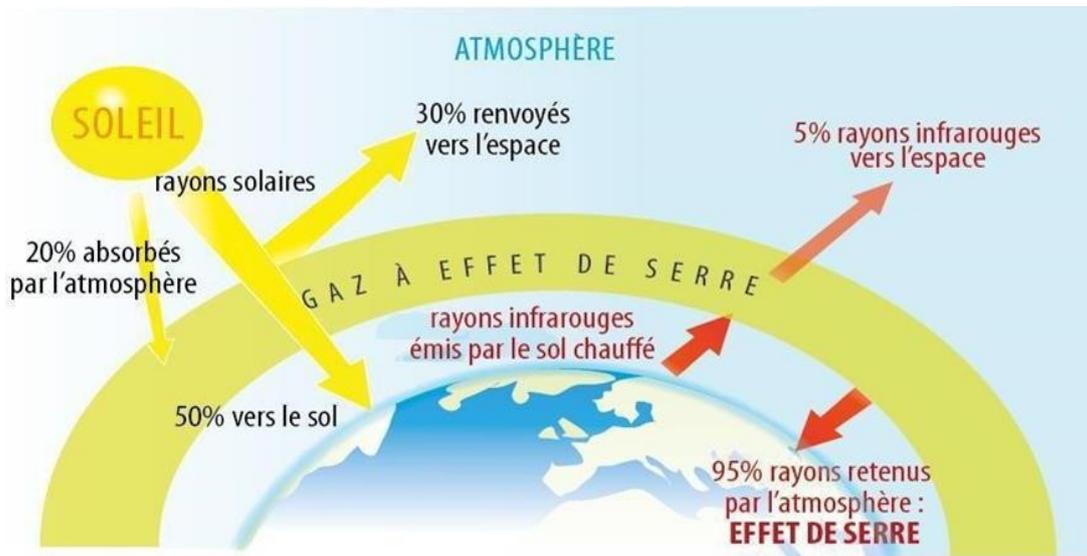


Figure (I.11) : Rayonnement solaire transmis à la terre [6].

Afin de quantifier l'énergie développée par le générateur photovoltaïque dans une application donnée, il est nécessaire de connaître le spectre du rayonnement solaire reçu par le sol.

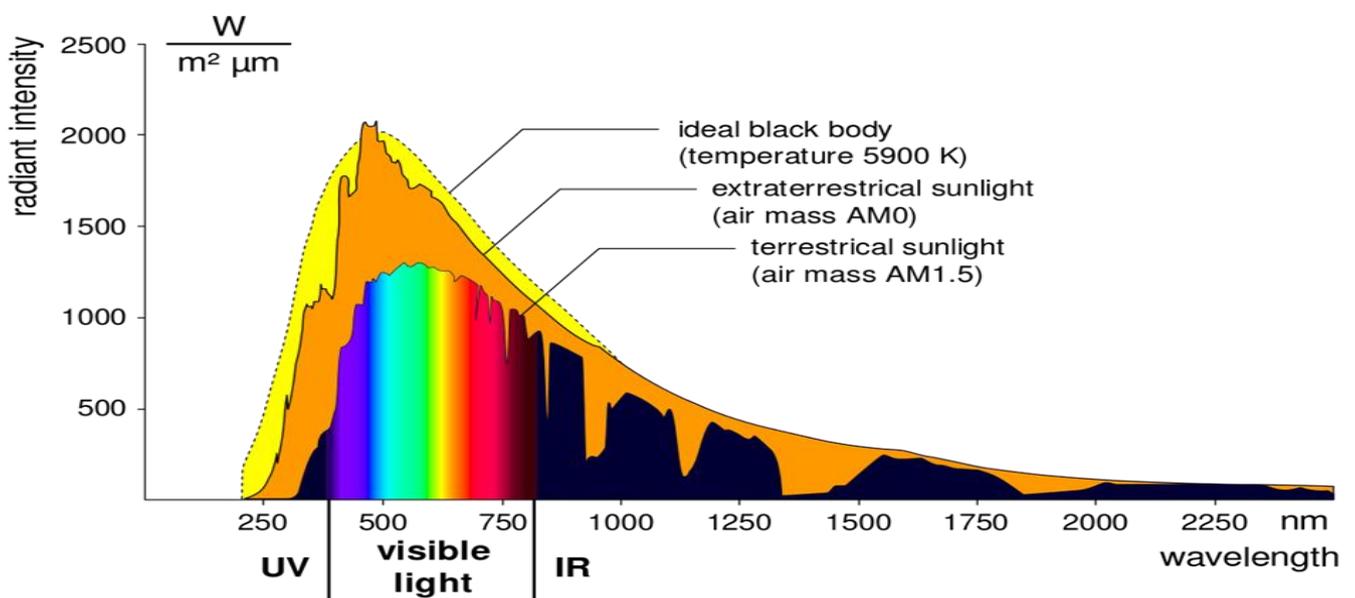


Figure (I.12) : le spectre du rayonnement solaire [6].

En effet, quatre types de rayonnement ont été répertoriés dans la littérature :

➤ **Le rayonnement direct :**

La conversion du rayonnement direct ED est une question trigonométrique. Le rayonnement direct, sur le plan horizontal, est la différence entre le rayonnement global et le rayonnement diffus.

Le rayonnement direct est converti pour un plan avec un angle d'azimut α et d'inclinaison β selon l'équation suivante [4] :

$$ED_{\alpha\beta} = \frac{E D \cos(\theta_i)}{\sin(\gamma)} \quad (\text{I.10})$$

Avec γ et θ_i sont donnés selon l'équation (I.8).

A noter que le paramètre $E D_{\alpha\beta}$ peut être mesuré par un instrument nommé «Pyroheliometer», qui doit être monté sur la monture du générateur PV.

➤ Le rayonnement diffus :

C'est dû à l'absorption et à la diffusion d'une partie du rayonnement solaire global par l'atmosphère et à sa réflexion par les nuages et les aérosols [4].

➤ Le rayonnement réfléchi ou l'albédo du sol :

C'est le rayonnement qui est réfléchi par le sol ou par des objets se trouvant à sa surface du sol, Cet albédo peut être important lorsque le sol est Particulièrement réfléchissant (Eau, neige, etc....) [4].

➤ Le rayonnement global

Le rayonnement global est subdivisé en rayonnements directs, diffus et reflété par le sol. Dans la figure ci-dessous figure (I-13) est schématisé l'ensemble des rayonnements solaires reçu sur une surface terrestre [5].

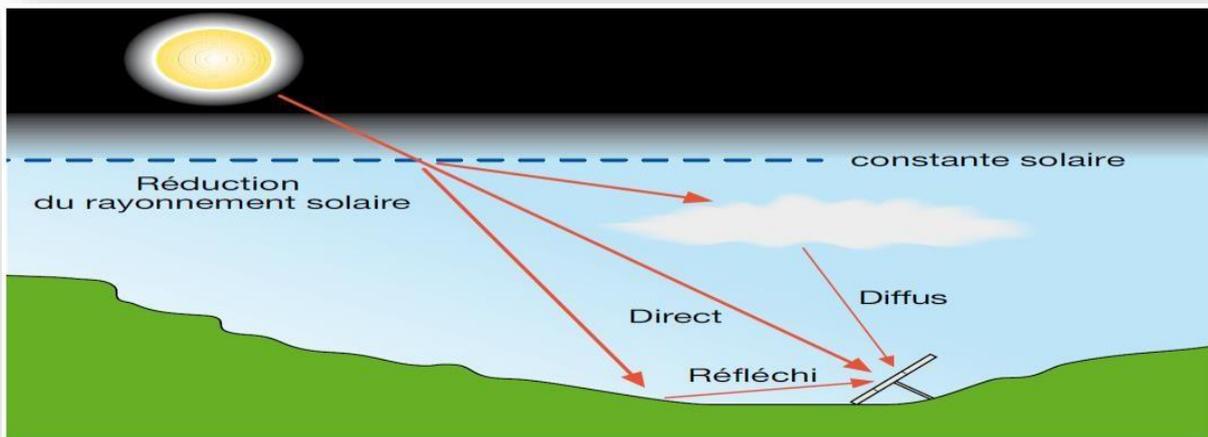


Figure (I-13) : Les types de rayonnement solaire reçus au sol [5].

L'intensité du rayonnement solaire reçu sur un plan quelconque à un moment donné est appelée irradiation ou éclairement (Noté généralement par la lettre G), il s'exprime en Watts par mètre carré (W/m^2).

La valeur du rayonnement reçu par la surface du module photovoltaïque varie selon la position de ce dernier.

Le rayonnement solaire atteint son intensité maximale lorsque le plan du module photovoltaïque est perpendiculaire aux rayons :

Dans la figure (I-14) ci-après est illustré l'effet de l'inclinaison des modules photovoltaïques sur l'intensité de l'éclairement reçu sur leurs surfaces du lever au coucher du soleil.

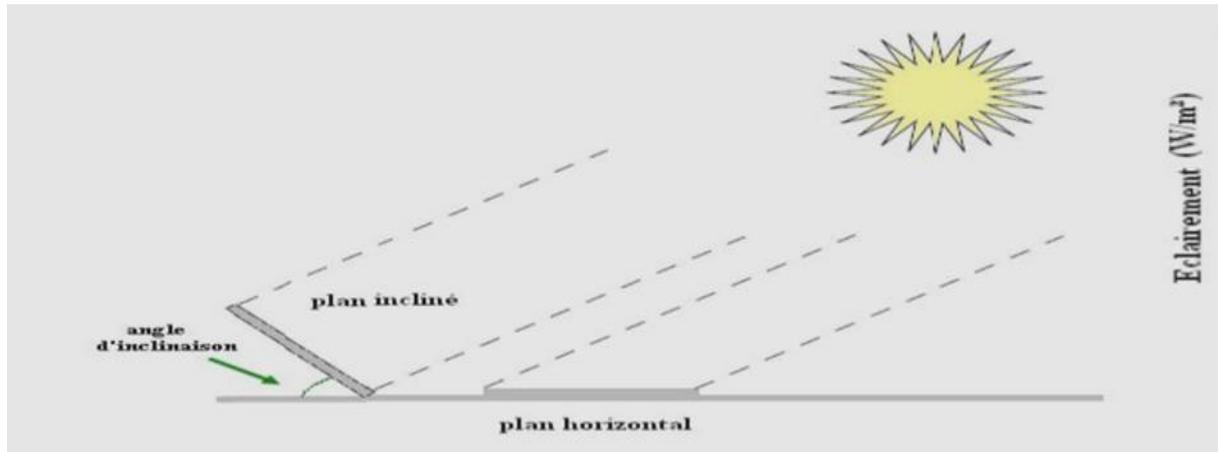


Figure (I.14) : Le rayonnement solaire capté par un plan horizontal et incliné [4].

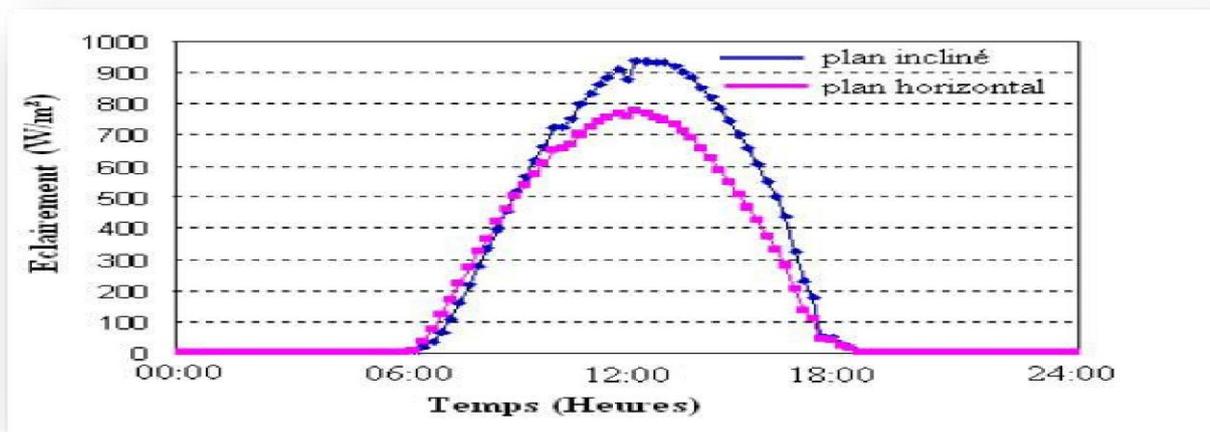


Figure (I.15) : L'intensité de l'ensoleillement reçu sur un plan horizontal et incliné [4].

I.3 Le gisement solaire :

La connaissance du gisement solaire d'un site donné est primordiale pour la confection et dimensionnement d'un système énergétique solaire, en effet le gisement solaire est un ensemble de données décrivant l'évolution du rayonnement solaire dans un lieu au cours d'une période donnée grâce aux stations météorologiques, son évolution peut se faire à partir des données de l'irradiation solaire globale. Elle est utilisée pour simuler le fonctionnement probable d'un système énergétique solaire et donc d'effectuer son dimensionnement le plus exact possible compte tenu des demandes en énergie à satisfaire.

Les pays du sud de la méditerranée notamment l'Algérie disposent d'un des gisements solaires les plus élevés au monde comme le montre la figure ci-dessous :

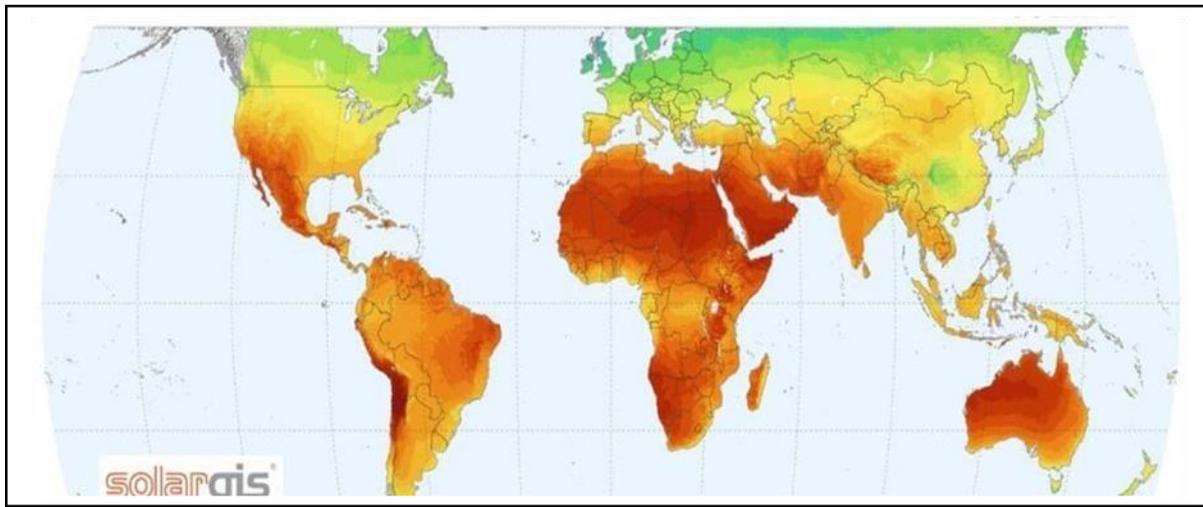


Figure (I.16) : Ensoleillement global annuel dans le monde KWh/m²/an.

L'Algérie est un pays potentiellement intéressant pour l'exploitation de l'énergie solaire, de par sa situation géographique il dispose d'un gisement solaire très important compte tenu des valeurs de la durée d'insolation enregistrée sur la quasi-totalité du territoire national dépassant les 2000 heures annuellement et pouvant atteindre les 3900 heures sur les hauts plateaux du Sahara. Par conséquent, la quantité d'énergie reçue au sol quotidiennement sur une surface horizontale de 1 m² est de l'ordre de 5 KW/h sur la majeure partie du territoire national, soit près de 1700 KWh/m² au nord et 2263 KWh/m² au sud du pays. La répartition du potentiel solaire par région climatique au niveau du territoire algérien est représentée dans le tableau suivant [7] :

Région	Région côtière	Hauts plateaux	Sahara
Superficie	4%	10%	86%
Durée moyenne d'ensoleillement (Heure/an)	2650	3000	3500
Energie moyenne reçue (KWh/m ² /an)	1700	1900	2650

Tableau I.2 : Potentiel d'Energie solaire en Algérie [7].

I.3.1 Cartes d'irradiation globale et de l'ensoleillement en Algérie :

L'énergie solaire participe pour une très faible part dans le bilan énergétique national, soit seulement 0,02% de la consommation nationale d'électricité (5 GWh). Le pays est qualifié de très en retard en matière d'investissement dans le domaine des énergies renouvelables.

Pourtant, l'Algérie dispose de l'un des gisements solaires les plus importants au monde figure (I.17) Lors d'un séminaire organisé à Alger, par la Chambre algéro-allemande de

l'industrie et du commerce, l'intention de concrétiser le vœu algérien a été clairement affichée par les Allemands. « Vu qu'à l'horizon 2030, environ 10% de l'électricité en Algérie

sera produite par l'énergie solaire ». le projet consiste à ramener le taux de l'énergie renouvelable à 15% d'ici à 2030 [7].

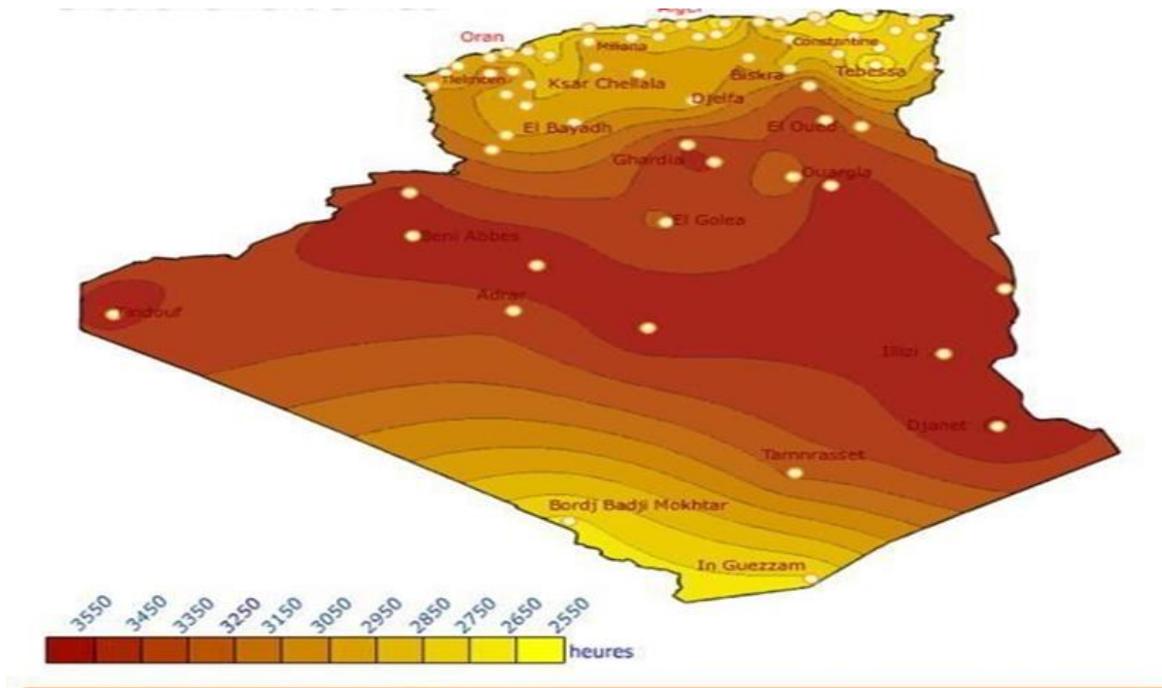


Figure (L.17) Cartes de l'irradiation globale en Algérie [7].

Conclusion :

Après avoir établi un état de l'art sur les ressources et des besoins énergétiques mondiaux, il apparaît clairement que le recours de plus en plus prononcé aux ressources énergétiques renouvelables semble être une solution très rationnelle pour répondre aux besoins énergétiques de l'humanité.

L'utilisation d'une très faible part de ces ressources, disponibles gratuitement et inépuisables à nos échelles temporelles, permettrait de répondre au défi et aux besoins énergétiques actuels avec un moindre impact sur l'écosystème.

Parmi ces ressources renouvelables, l'énergie solaire convertie par effet photovoltaïque qui représente un gisement d'énergie inépuisable et sans commune mesure. L'exploitation de cette ressource se heurte encore à un coût de l'énergie produite relativement élevé par rapport aux solutions conventionnelles, mais celui-ci décroît rapidement. Avec l'avance de la science et les recherches dans la technologie industrielle, dans l'avenir le coût pourrait devenir extrêmement compétitif.

Chapitre II :

Généralité sur l'énergie photovoltaïque

II. Généralité sur l'énergie photovoltaïque :

II.1 Introduction

L'énergie photovoltaïque résulte de la transformation direct de la lumière du soleil en énergie électrique aux moyens des cellules généralement à base de silicium cristallin qui reste la filière la plus avancées sur le plan technologiques et industriel, en effet le silicium et l'un des éléments les plus abondants sur terre sous forme de silice non toxique.

En effet le mot photovoltaïque vient du grec « photo » qui signifie lumière et de « Voltaïque » qui tire son origine du nom d'un physicien italien Alessandro Volta (1754 - 1827) qui a beaucoup contribué à la découverte de l'électricité, alors le photovoltaïque signifie littérairement la « lumière électricité ».

II.2 Généralités sur l'énergie photovoltaïque :

L'énergie solaire photovoltaïque provient de la conversion de la lumière du soleil en électricité au sein de matériaux semi-conducteurs comme le silicium ou recouverts d'une mince couche métallique. Ces matériaux photosensibles ont la propriété de libérer leurs électrons sous l'influence d'une énergie extérieure. C'est l'effet photovoltaïque. L'énergie est apportée par les photons, (composants de la lumière) qui heurtent les électrons et les libèrent, induisant un courant électrique. Ce courant continu de micro puissance calculé en watt crête (Wc) peut être transformé en courant alternatif grâce à un onduleur [8].

L'énergie produite est disponible sous forme d'électricité directe ou stockée en batteries (énergie électrique décentralisée) ou en électricité injectée dans le réseau [8].



Figure. II.1: Système de conversion de l'énergie solaire en électricité.

II.3 Mode de fonctionnement d'un système photovoltaïque :

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

II.3.1 Mode autonome :

En mode autonome, le générateur photovoltaïque représente la seule source d'énergie électrique pour alimenter des récepteurs comme les maisons, les chalets ou les camps dans les régions éloignées ainsi qu'à des applications comme la surveillance et le pompage d'eau.

En mode autonome, le système est constitué généralement des éléments suivants.

- Le champ de modules PV charge la batterie en période d'ensoleillement.
- La batterie alimente la charge et assure un stockage de l'énergie électrique.
- Le régulateur de charge protège la batterie contre la surcharge de l'énergie produite par le champ de modules PV et inclut habituellement une protection contre les décharges profondes de la batterie.
- Un convertisseur de charge permet l'utilisation d'appareil à courant continu ou à courant Alternatif [9].

Il existe deux types de systèmes photovoltaïques autonomes avec stockage et sans stockage, le schéma général d'un système PV autonome est représenté sur la figure (II.2).

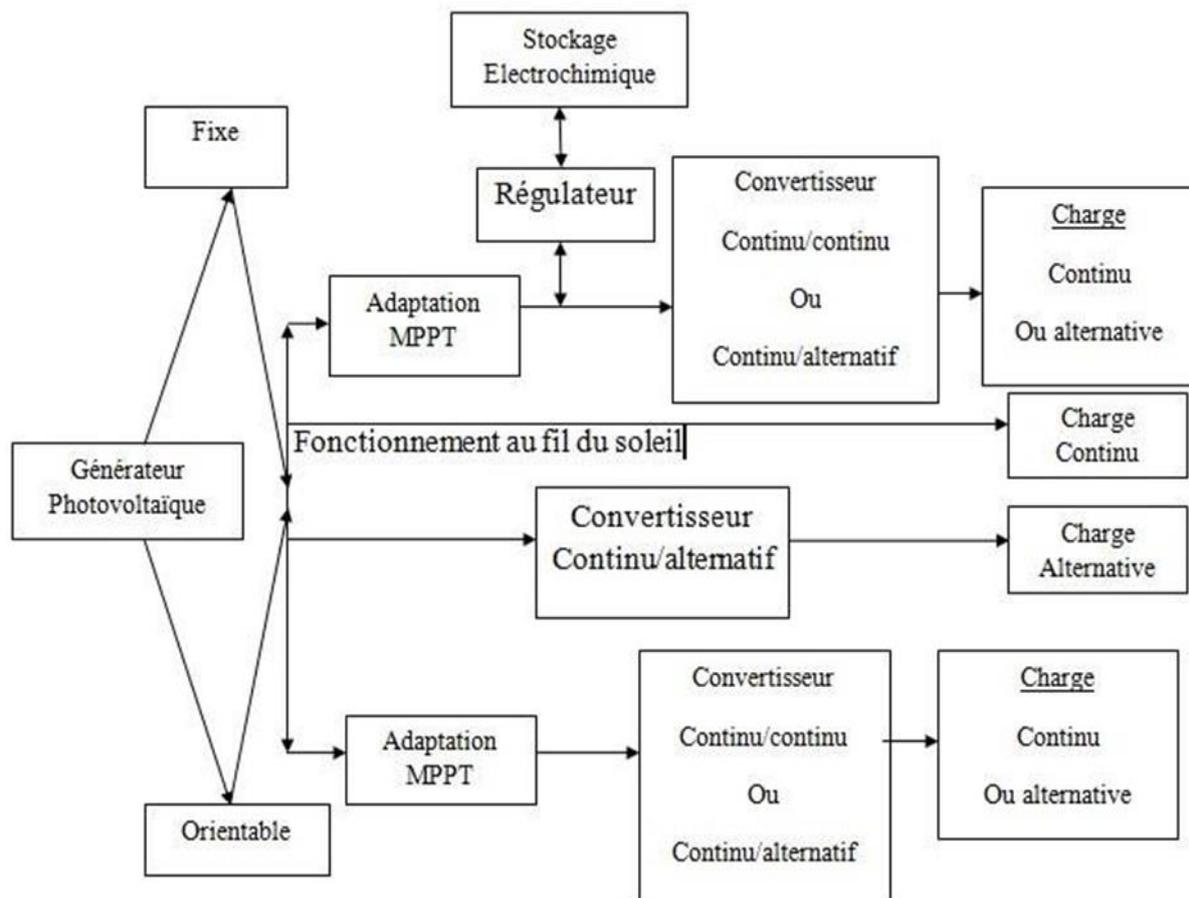


Figure II.2 : Présentation générale d'un système photovoltaïque autonome

II.3.1.1 Système autonome avec stockage (batterie) :

C'est le système photovoltaïque le plus commun. Le champ PV sert de chargeur pour la batterie. L'électricité peut alors être utilisée en tout temps. Par exemple, ce système est bien adapté pour l'éclairage d'une maison où il faut de l'électricité lorsqu'il ne fait plus jour.

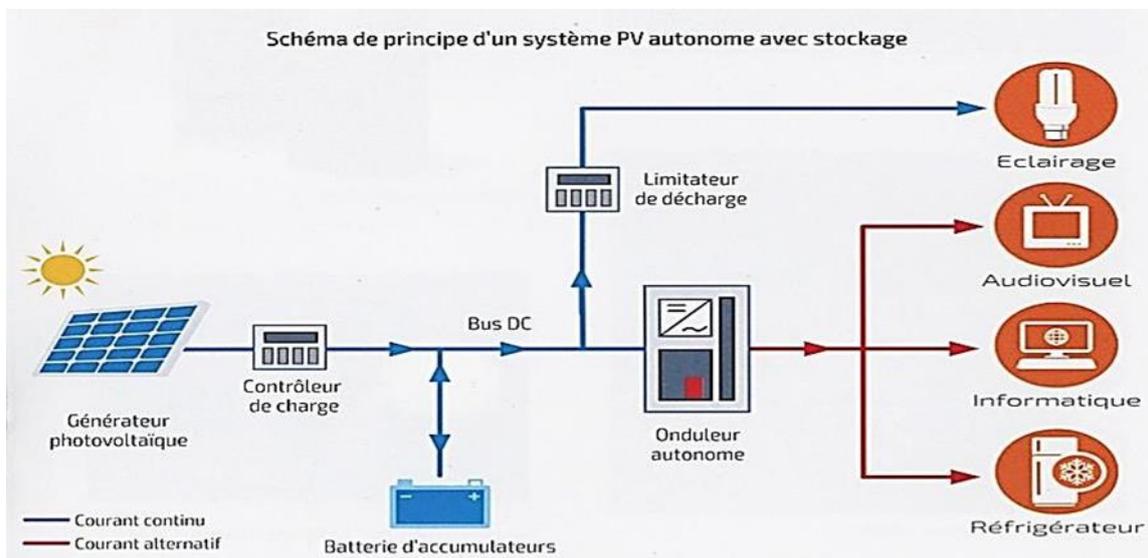


Figure II.3 Système autonome avec stockage (batterie)

II.3.1.2 Système autonome sans stockage :

Ce type de système ne requiert pas de stockage d'électricité, soit parce que la production d'énergie des cellules est suffisante sous un faible éclairage (ex : calculatrice), soit que le temps de fonctionnement de charge n'est pas critique (ex : pompe à eau).

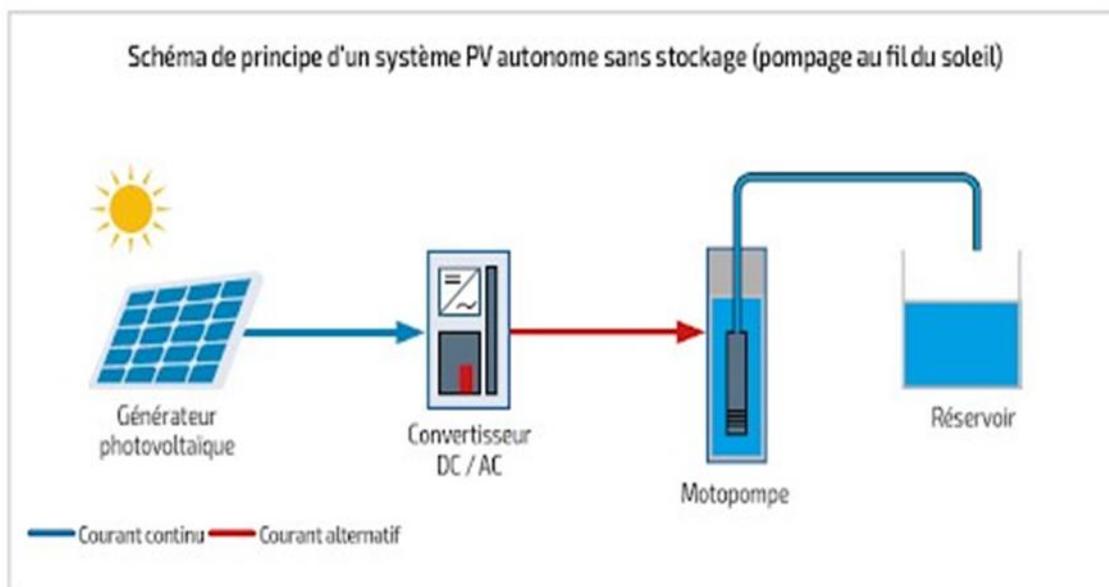


Figure II.4 Système autonome sans stockage

II.3.2 Mode connecté au réseaux :

Ce système photovoltaïque est branché directement sur un réseau électrique, mais il est installé près de la demande (voir figure (II.5)). Il peut être installé, par exemple, sur une résidence individuelle ou sur un centre commercial, de telle sorte qu'il alimente cette charge et fournit l'excédent de sa production sur le réseau durant le jour. Durant la nuit, la charge puise l'énergie requise sur le réseau. Ce système permet d'éliminer les frais de stockage d'électricité, particulièrement en ce qui a trait aux charges adaptées à la production photovoltaïque tels les systèmes d'air conditionné (gestion de la demande). Ce système permet aussi d'éviter le stockage classique sur batteries (d'où réduction du coût global).

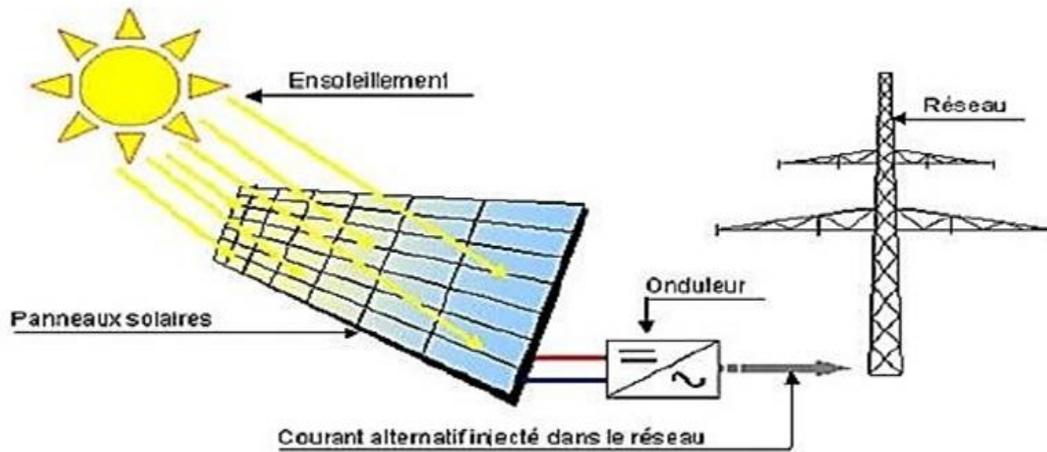


Figure II.5 Système photovoltaïque raccordé au réseau

II.3.3 Mode connecté à un générateur électrogène :

Ce système est utilisé principalement dans les communautés ou les villages éloignés. Le générateur PV est branché en parallèle avec les génératrices au diesel du réseau villageois et fournit l'électricité sur ce réseau lorsque l'ensoleillement le permet. Il permet de réduire la consommation d'un carburant diesel très coûteux en régions éloignées et diminue les temps de fonctionnement des génératrices.

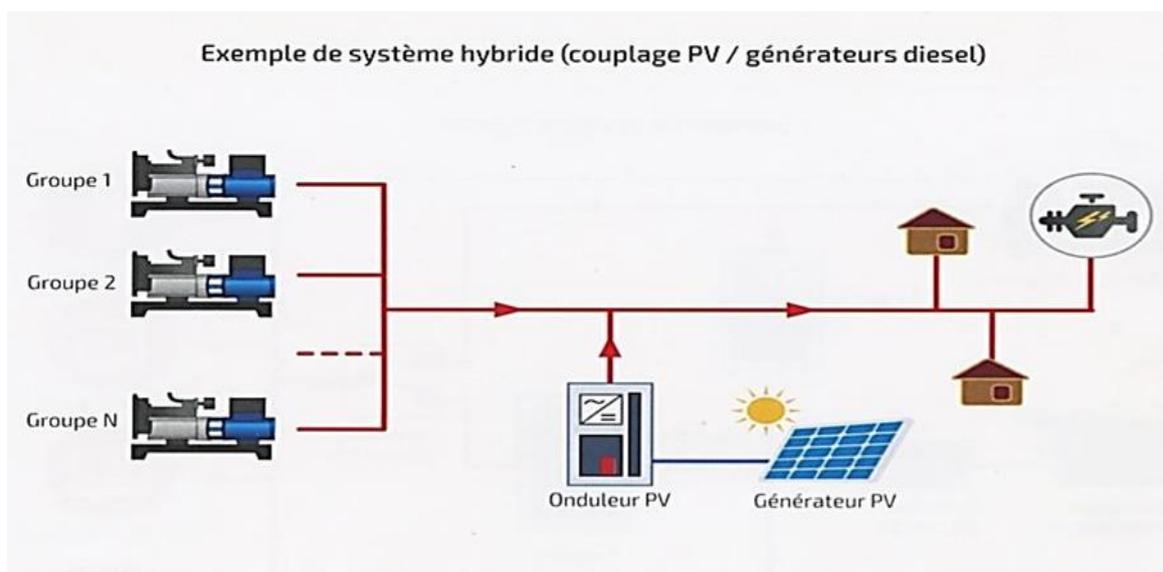


Figure II .6 Système photovoltaïque raccordé à un générateur électrogène

II.3.4 Mode hybride :

Un système d'énergie hybride comporte plus qu'une source d'électricité tel que les panneaux photovoltaïques, les cellules à combustible, les générateurs éoliens, les batteries de stockage, les groupes électrogènes, etc. Ce type d'installation est utilisé pour l'électrification des régions loin du réseau. Il existe plusieurs configurations de ces systèmes : PV/thermique, PV/batterie, PV/cellules à combustible, PV/éolienne/batterie, PV/éolienne, PV/groupe électrogène. Le choix se base essentiellement selon les caractéristiques météorologiques du site d'implantation. Un exemple d'un système hybride est représenté sur la figure (I.7) [10].

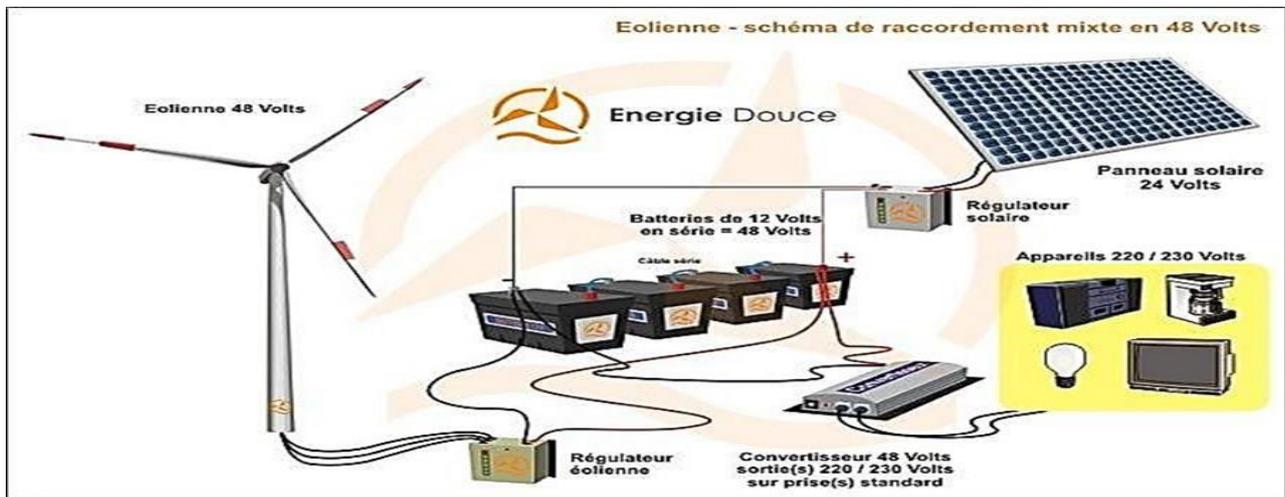


Figure II.7 Systèmes d'alimentation autonome hybride Photovoltaïque

II.4 Effet photovoltaïque :

L'effet photovoltaïque utilisé dans les cellules solaires permet de convertir directement l'énergie lumineuse des rayons solaires en électricité par le biais de la production et du transport dans un matériau semi-conducteur de charges électriques positives et négatives sous l'effet de la lumière

Les semi-conducteurs comportent deux parties, l'une présentant un excès d'électrons et l'autre un déficit en électrons, dites respectivement dopée de type N et dopée de type P. Lorsque la première est mise en contact avec la seconde, les électrons en excès dans le matériau N diffusent dans le matériau P. La zone initialement dopée N devient chargée positivement, et la zone initialement dopée P chargée négativement [11].

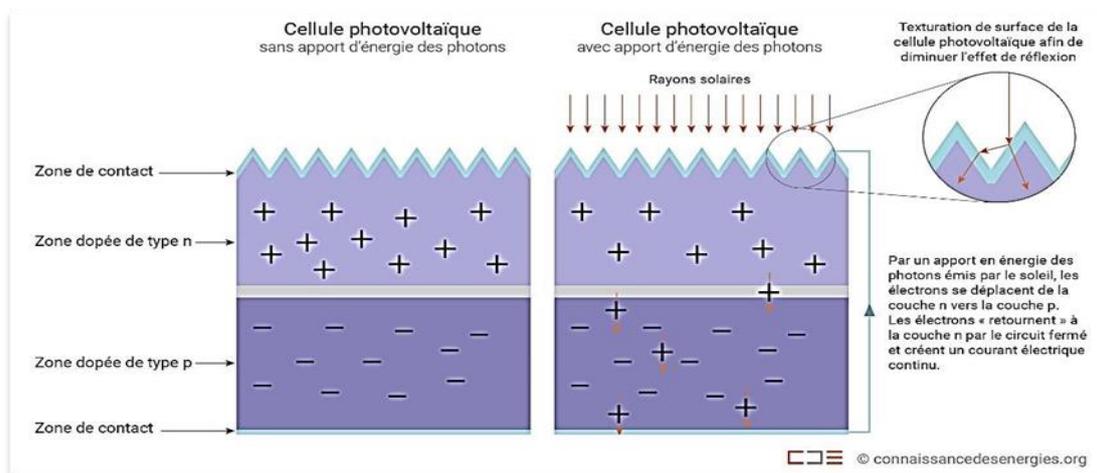


Figure II.8 Cellule photovoltaïque montrant l'effet photovoltaïque [11].

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. Une jonction (dite P-N) a été formée. En ajoutant des contacts métalliques sur les zones N et P, une diode est obtenue. Lorsque la jonction est éclairée, les photons d'énergie égale ou supérieure à la largeur de la bande interdite communiquent leur énergie aux atomes, chacun fait passer un électron de la bande de valence dans la bande de conduction et laisse aussi un trou capable de se mouvoir, engendrant ainsi une paire électron-trou [11].

Si une charge est placée aux bornes de la cellule, les électrons de la zone N rejoignent les trous de la zone P via la connexion extérieure, donnant naissance à une différence de potentiel: le courant électrique circule (figure (II.8)). L'effet repose donc à la base sur les propriétés semi-conductrices du matériau et son dopage afin d'en améliorer la conductivité [11].

Le silicium employé aujourd'hui dans la plupart des cellules a été choisi pour la présence de quatre électrons de valence sur sa couche périphérique (colonne IV du tableau de Mendeleïev).

Dans le silicium solide, chaque atome – dit tétravalent – est lié à quatre voisins, et tous les électrons de la couche périphérique participent aux liaisons [11].

Si un atome de silicium est remplacé par un atome de la colonne V (phosphore par exemple), un de ses cinq électrons de valence ne participe pas aux liaisons ; par agitation thermique, il va très vite passer dans la bande de conduction et ainsi devenir libre de se déplacer dans le cristal, laissant derrière lui un trou fixe lié à l'atome de dopant. Il y a conduction par un électron, et le semi-conducteur dit dopé de type N. Si au contraire un atome de silicium est remplacé par un atome de la colonne III (bore par exemple) à trois électrons de valence, il en manque un pour réaliser toutes les liaisons, et un électron peut rapidement venir combler ce manque et occuper l'orbitale vacante par agitation thermique. Il en résulte un trou dans la bande de valence, qui va contribuer à la conduction, et le semi-conducteur est dit dopé de type P. Les atomes tels que le bore ou le phosphore sont donc des dopants du silicium. Les cellules photovoltaïques sont assemblées pour former des panneaux photovoltaïques [11].

II.5 Cellule photovoltaïque :

➤ Définition de la cellule photovoltaïque

Une cellule photovoltaïque, ou cellule solaire, est un composant électronique qui, exposé à la lumière, produit de l'électricité grâce à l'effet photovoltaïque. La puissance obtenue est proportionnelle à la puissance lumineuse incidente et dépend du rendement de la cellule. Celle-ci délivre une tension continue et un courant la traverse dès qu'elle est connectée à une charge électrique (en général un onduleur, parfois une simple batterie électrique).

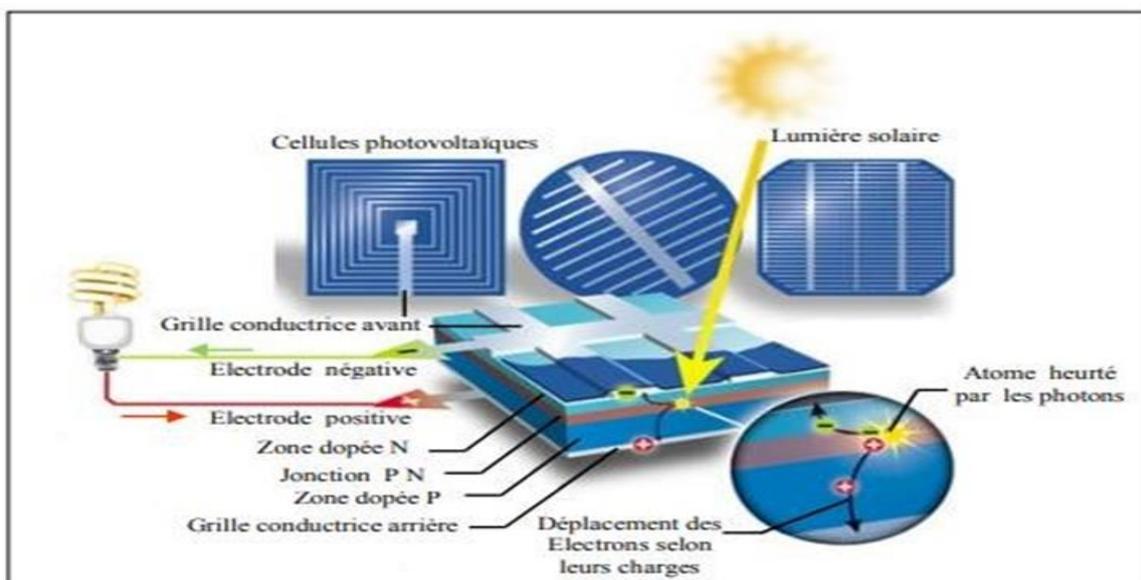


Figure II.9 : Principe de fonctionnement d'une cellule PV

Il existe différents types de cellules et de procédés de fabrication. Le semi-conducteur le plus utilisé est le silicium. La performance se mesure d'abord par le rendement : pourcentage de l'énergie lumineuse effectivement transformée en électricité. Dans les panneaux vendus dans le commerce, on trouve, du moins cher au plus cher :

- La cellule au silicium amorphe (rendement : 6 à 10%).
- La cellule au silicium monocristallin (rendement : 13 à 17%).
- La cellule au silicium poly cristallin (rendement : 11 à 15%).



Figure II.10 Types de cellules photovoltaïque

a) Cellule au silicium amorphe :

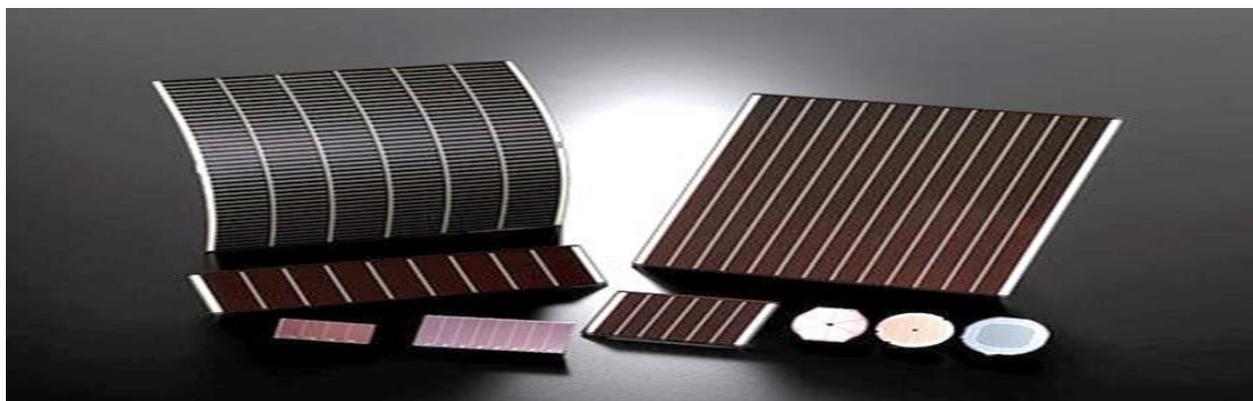


Figure II.11 Cellule au silicium amorphe

Les panneaux photovoltaïques en Silicium Amorphe sont bien adaptés pour l'alimentation électrique des équipements de faibles puissances installées dans des zones à faible éclairage (à l'intérieur, sous éclairage artificiel) et sous ensoleillement diffus (à l'extérieur, soumis à un ombrage important).

Le panneau solaire amorphe présente un rendement plus faible, en revanche le silicium amorphe est l'une des technologies photovoltaïques couches minces les plus respectueuses de l'environnement, puisqu'elle n'utilise pas de métaux toxiques.

La sensibilité spectrale des cellules solaires de silicium amorphe aux spectres de lumière des éclairages fluorescents et des LED blanches, en fait un matériau attrayant pour les applications intérieures.

Contrairement au panneau cristallin traditionnel, les panneaux solaires amorphe continu à fournir de l'énergie même si une partie du panneau est ombragée.

b) Cellule au silicium monocristallin :



Figure II.12 Cellule au silicium monocristallin

Les cellules au silicium monocristallin offrent le meilleur rendement parmi les panneaux solaires disponibles dans le commerce : entre 13 à 15%. Il faudra donc moins de cellules pour atteindre la puissance désirée, mais comme le silicium monocristallin est aussi le plus cher, son seul avantage est finalement d'utiliser une surface réduite : il faut environ 7m² pour obtenir 1 kilowatt Crète (kWc) [12].

Ces cellules sont en général octogonales et d'une couleur uniforme foncée (bleu marine ou gris).

Ces cellules sont les plus performantes, elles permettent donc de constituer des panneaux qui sont très performants : ceux qui produisent le plus d'énergie avec le moins de surface.

c) Cellule au silicium poly cristallin :



Figure II.13 Cellule au silicium poly cristallin

Les cellules poly cristallines sont élaborées à partir d'un bloc de silicium cristallisé en forme de cristaux multiples. Vues de près, on peut voir les orientations différentes des cristaux. Elles ont un rendement de 11 à 15%, mais leur coût de production est moins élevé que les cellules monocristallines. Elles sont en général de forme rectangulaire et sont couleur bleu nuit avec des reflets.

II.5.1 Groupement des cellules photovoltaïques :

a) Groupement en série :

Une association de N_S cellule en série 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

VOC N: Somme des tensions en circuit ouvert de N_S cellules en série ;

ICC : Courant de court-circuit.

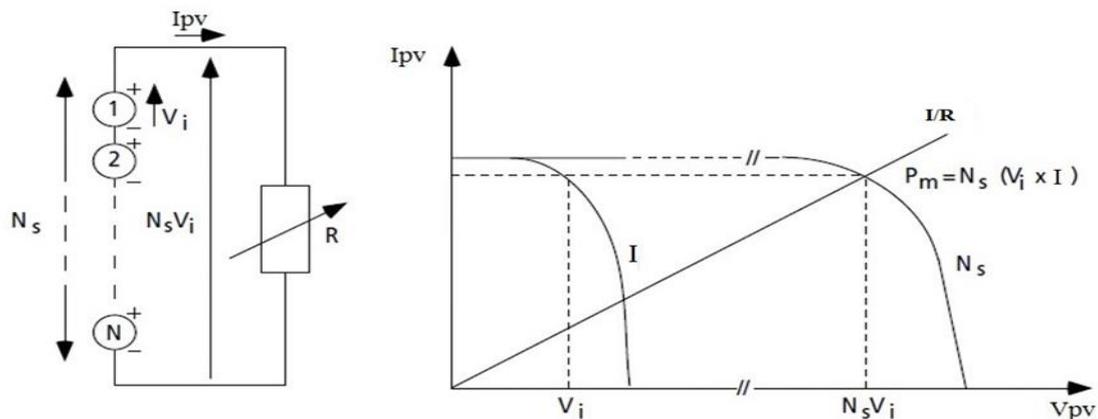


Figure II.14 Cellules identiques en série [9].

b) Groupement en parallèle :

Une association parallèle de N_P cellule 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 [13].

ICC N: Somme des courants de court-circuit de N_P cellule en parallèle ;

VOC : Tension du circuit ouvert.

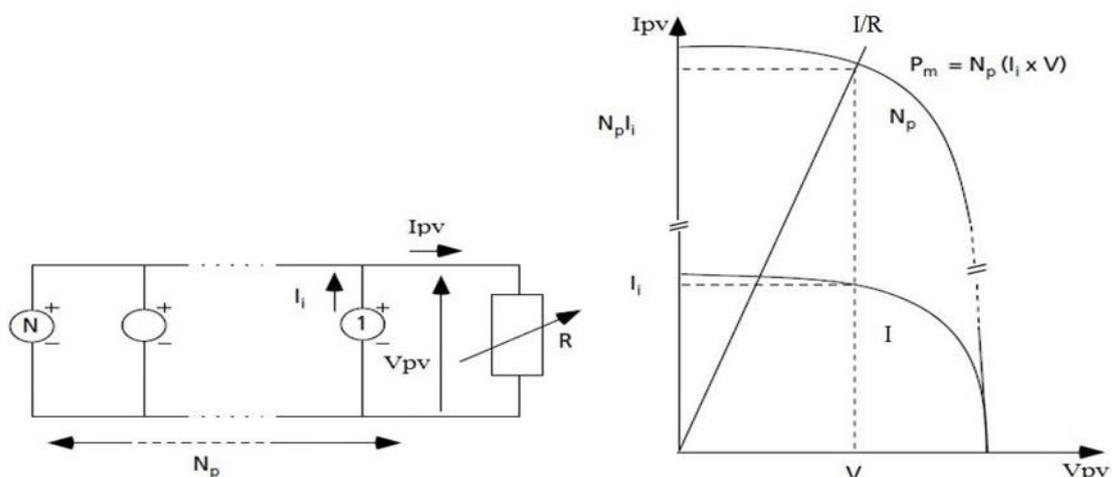


Figure II.15 Cellules identiques en parallèles [9].

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

La diode anti-retour empêchant un courant négatif dans les GPV. Ce phénomène peut apparaître lorsque plusieurs modules sont connectés en parallèle, ou bien quand une charge en connexion directe peut basculer du mode récepteur au mode générateur, par exemple une batterie durant la nuit.

Les diodes by-pass peuvent isoler un sous-réseau de cellules lorsque l'éclairement n'est pas homogène évitant l'échauffement de la cellule, ce qui est susceptible de la détruire par claquage. Il convient donc de limiter la tension inverse maximale susceptible de se développer aux bornes d'une cellule en plaçant une diode parallèle (by-pass) au niveau de chaque module la diode parallèle limite la tension inverse par sa tension directe puisqu'elle devient passante [14].

II.6 Module photovoltaïque :

Pour obtenir une tension électrique générée qui soit utilisable, on raccorde plusieurs cellules en série qui forment alors un module. Ce raccordement permet d'augmenter la tension pour un même courant, tandis que la mise en parallèle accroît le courant en gardant la même tension.

L'association des cellules en modules permet :

- D'obtenir une tension suffisante ;
- De protéger les cellules et leurs contacts métalliques de l'ambiance extérieure (humidité...) ;
- De protéger mécaniquement les cellules (chocs...).

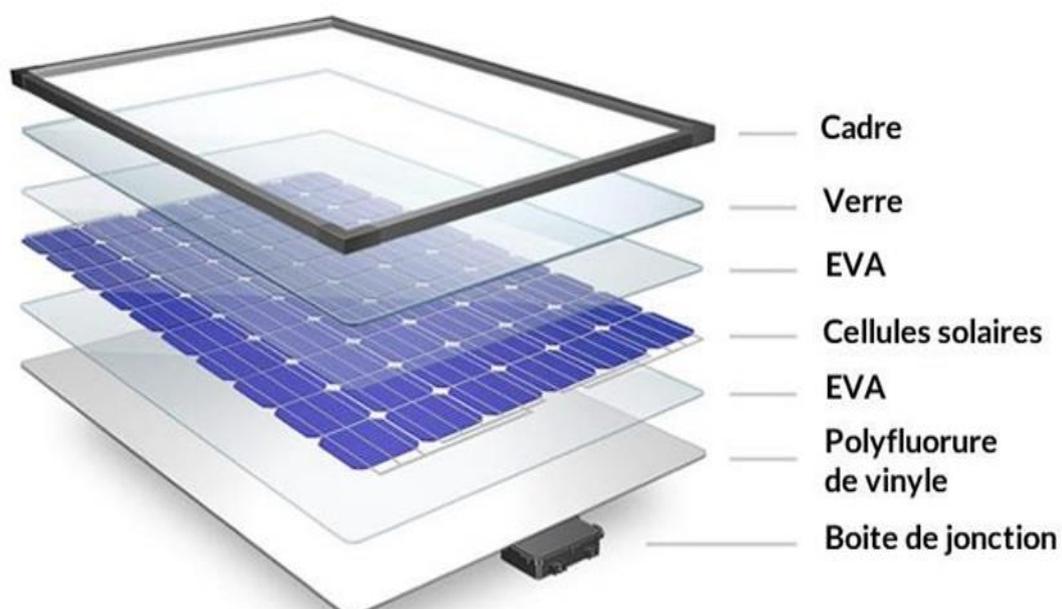


Figure II.16 Constitution d'un module photovoltaïque

II.6.1 Caractéristiques d'un module photovoltaïque :

- **La puissance de crête P_c** : Puissance électrique maximum que peut fournir le module dans les conditions standards (25°C et un éclairement de 1000 W/m^2) ;
- **Tension à vide V_{OC}** : Tension aux bornes du module en l'absence de tout courant, pour un éclairement " plein soleil " ;
- **Courant de court-circuit I_{cc}** : Courant débité par un module en court-circuit pour un éclairement " plein soleil ". C'est la plus grande valeur de courant généré par un module pour une tension nulle $V_{pv} = 0$;
- **Point de fonctionnement optimum $(U_{m,m})$** : Lorsque la puissance de crête est maximum en plein soleil, $P_m = U_m \cdot I_m$;
- **Rendement** : Rapport de la puissance électrique optimale à la puissance de radiation incidente ;
- **Facteur de forme** : Rapport entre la puissance optimale P_m et la puissance maximale que peut avoir la cellule : $V_{oc} \cdot I_{cc}$ [14].

II.7 Panneau photovoltaïque :

Le panneau photovoltaïque 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.

Le composant le plus crucial de toute installation PV est le module PV, qui se compose de piles solaires interconnectées. Ces modules sont raccordés entre eux pour former des panneaux et des ensembles (champs) de manière à pouvoir satisfaire différents niveaux de besoins en énergie, comme le montre la figure (II.17) [15].

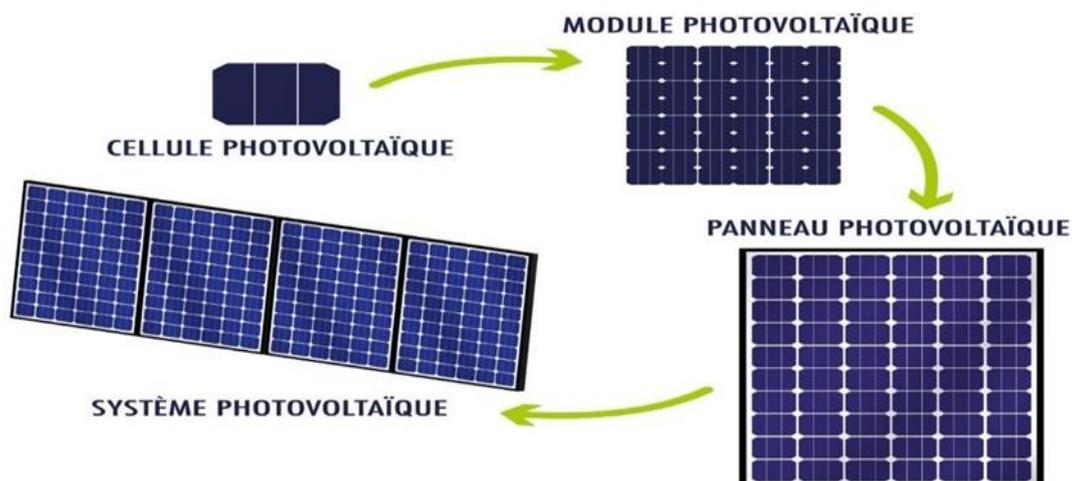


Figure II.17 Panneau photovoltaïque

II.8 Champ photovoltaïque :

Le champ photovoltaïque est l'ensemble des panneaux montés en série et en parallèle pour atteindre une tension et un courant plus grands. Pour déterminer le nombre de panneaux à utiliser en série et en parallèle, on part de la tension nominale à atteindre que l'on divise par la tension au point de puissance maximale d'un panneau [17].

II.9 Avantages et inconvénients de l'énergie solaire photovoltaïque :

En général, l'énergie solaire photovoltaïque est très bien acceptée dans la société. Cependant, le mieux est de connaître les avantages et les inconvénients de l'énergie solaire pour renforcer ou contraster notre opinion.

II.9.1 Avantages :

Les avantages de l'énergie solaire dépendent de différents facteurs. Selon les caractéristiques de l'installation solaire, certains avantages seront observés par rapport à d'autres sources d'énergie.

- L'énergie solaire est une énergie renouvelable et, par conséquent, elle est inépuisable ;
- Faible pollution et respect l'environnement ;
- Installation et maintenance avec un cout réduit ;
- Favorable pour les sites isolés ;
- 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 pour suivre les besoins de son propriétaire ;
- Dans les cas de l'énergie solaire photovoltaïque connectée au réseau, la surproduction de panneaux solaires peut être vendue à des moments où il n'est pas nécessaire de consommer toute l'énergie produite.

II.9.2 Inconvénients :

Selon les caractéristiques de l'installation solaire, les inconvénients de l'énergie solaire seront plus ou moins important. Malgré tous les avantages, les inconvénients doivent être soigneusement analysés. Certains inconvénients de l'énergie solaire peuvent rendre une installation solaire irréalisable. Les aspects à considérer seront les suivants :

- L'efficacité énergétique est médiocre par rapport à d'autres sources d'énergie. Le rapport entre la qualité d'énergie reçue dans un panneau solaire et la quantité d'énergie produite est faible par rapport à d'autre sources d'énergie telle que l'énergie nucléaire.
- Le cout économique par rapport aux autres options et surtout dans les grandes centrales solaires. Surtout dans l'énergie solaire thermique, profitant des propriétés de température et de thermodynamique, les performances sont supérieures à l'énergie photovoltaïque. Dans certains cas, l'investissement initial peut également être important
- La performance dépend de la météo. La dépendance à la météo fait de cette source d'énergie une option peu probable dans les zones ou le ciel est principalement nuageux
- La limitation du temps solaire. Gardez à l'esprit que dans certaines régions, le temps solaire est plus court. Les pays nordiques, par exemple, pendant les jours d'hiver, les

heures solaires pendant lesquelles l'énergie peut être utilisée sont très rares. De plus, l'inclinaison du soleil par rapport à la surface varie au cours des différents jours de l'année. La variation de l'inclinaison du rayonnement influence à elle seule les performances des panneaux solaires ;

- Limites de stockage de l'énergie générée. Parce que les heures où l'énergie électrique peut être obtenue ne coïncident pas toujours avec les heures où elle est nécessaire, il est pratique de stocker l'énergie. Pour cela, il existe des batteries solaires et des réservoirs d'eau chaude, mais le rendement est encore très faible ;
- Impact environnemental. Bien que l'énergie solaire soit considérée comme une énergie propre, elle contient également des éléments nocifs pour l'environnement.

II.10 Domaines d'application de l'énergie photovoltaïque :

L'énergie photovoltaïque est exploitée dans une large gamme d'applications :

- ✓ Électrification rurale (Éclairage, réfrigération...).
- ✓ Télécommunications (Relais hertzien, relais T.V., relais radiotéléphone...).
- ✓ Pompage.
- ✓ Signalisation (Routière, aérienne, maritime...), détection.
- ✓ Protection (Commandes de vannes de sécurité, système d'alarme...).
- ✓ Stations de mesures (Stations automatiques météorologiques, mesures de débit, de Niveau, comptage de trafic), ...etc.

II.10.1 L'avenir du photovoltaïque :

Source d'énergie presque à **100%** propre et fiable pour des usages très variés, elle figurera à l'avenir parmi les principales sources mondiales. Son handicap majeur reste un coût encore élevé comparé par rapport aux autres sources conventionnelles et aux filières renouvelables. Ce coût présente un amortissement de **10%** par an, pour baisser les coûts, les autorités dans le monde ont engagé une politique de soutien à long terme de la filière photovoltaïque. C'est précisément l'objectif des programmes lancés depuis quelques années dans plusieurs pays industrialisés.

Dans notre pays, l'application du PV reste encore modeste. La première utilisation a été dans le domaine des télécommunications, après, certains puits dans les hauts plateaux ont été équipés par des systèmes de pompes PV. Jusqu'à nos jours, plusieurs projets d'alimentation en sources PV sont en cours de réalisation et qui entrent dans le grand projet d'intégrer dans le réseau électrique national plus de 22000 MW d'énergie renouvelable jusqu'aux horizons de l'année 2030.

II.11 Les convertisseurs statiques :

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

II.11.1 Onduleur :

La fonction principale de l'onduleur est de transformer le courant continu, produit par le générateur solaire, en courant alternatif monophasé ou triphasé. Un onduleur est habituellement conçu pour fonctionner sur une plage assez réduite. Il est très efficace pour des caractéristiques d'entrée et de sortie fixe. Son coût assez élevé et la nature variable de l'ensoleillement et du couple résistant des pompes en général ont longtemps exclu l'emploi des moteurs à courant alternatif pour le pompage solaire.

II.10.2 Hacheur :

Les hacheurs sont des convertisseurs statiques continu-continu, permettant de fabriquer une source de tension continue variable à partir d'une source continue fixe, qui peut être un panneau photovoltaïque ou une batterie.

a) Hacheur dévolteur (série) :

Ce nom est lié au fait que la tension moyenne de sortie est inférieure à celle de l'entrée. L'hacheur série est un convertisseur direct DC-DC, La source d'entrée est de type tension continue et la charge de sortie continue de type source de courant. L'interrupteur K2 peut être remplacé par un transistor puisque le courant est toujours positif et que les commutations doivent être commandées (au blocage et à l'amorçage) [18].

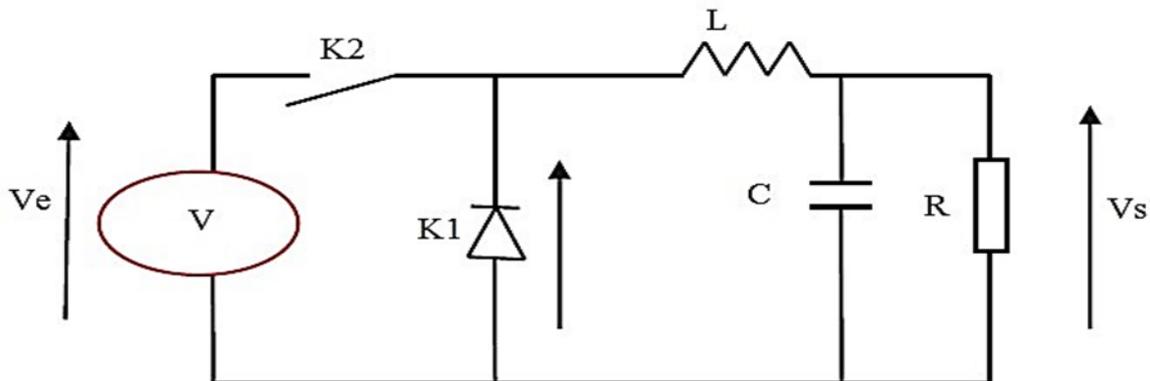


Figure II.18 Schéma hacheur série [18].

➤ Fonctionnement

Le cycle de fonctionnement, de période de hachage T ($T=1/f$), comporte deux étapes :

- Lors de la première étape, le transistor passant et la diode, polarisée en inverse, est bloquée. Cette phase dure de 0 à αT , avec α compris entre 0 et 1 . α est appelé rapport cyclique.
- Lors de la seconde étape, le transistor est bloqué. La diode devient passante. Cette phase dure de αT à T [18].

b) Hacheur survolteur (parallèle) :

Dans ce hacheur, la tension moyenne de sortie est supérieure à la tension d'entrée, d'où son nom. C'est un convertisseur direct DC-DC. La source d'entrée est de type courant continu (inductance en série avec une source de tension) et la charge de sortie est de type tension continue (condensateur en parallèle avec la charge résistive).

L'interrupteur K1 peut être remplacé par un transistor puisque le courant est toujours positif et que les commutations doivent être commandées (au blocage et à l'amorçage) [18].

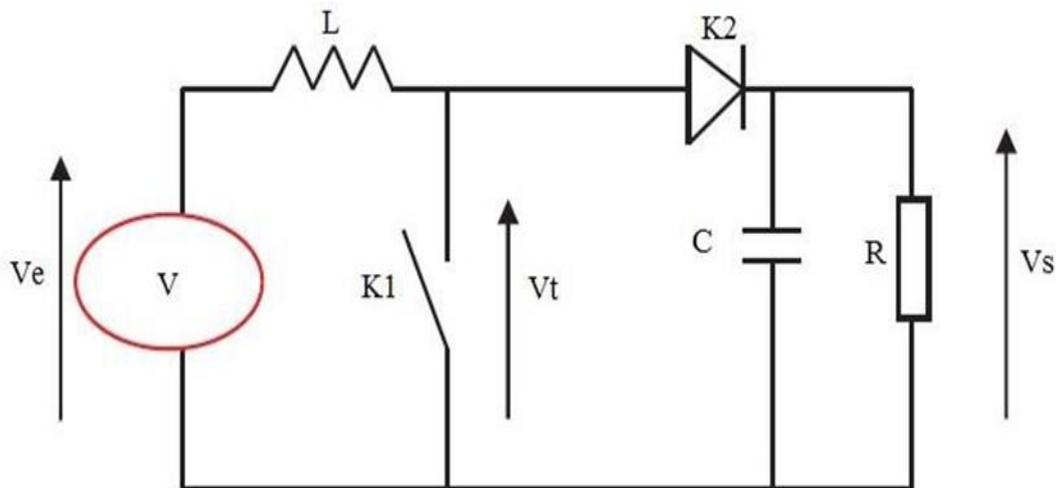


Figure II.19 Schéma hacheur parallèle [18].

➤ Fonctionnement

- Lors de la première partie du cycle de fonctionnement, de 0 à $\alpha.T$, l'interrupteur commandé est fermé (passant). Cette fois, la source et la charge ne sont pas en contact durant cette phase. La diode est alors bloquée.
- Lors de la seconde partie du cycle, de $\alpha.T$ à T , on ouvre l'interrupteur commandé et la diode devient passante. C'est alors que la source et la charge sont reliées [18].

c) Hacheur série-parallèle :

Dans ce dispositif, la tension peut être augmentée ou diminuée selon le mode de commutation. Cependant, la tension de sortie est de signe opposé à la tension d'entrée.

Tandis que, lorsque le transistor est sur la position (on) le courant dans l'inductance augmente, l'énergie est stockée ; et quand le commutateur tourne sur la position (off). La tension à travers l'inductance est renversée et l'énergie stockée se transfère vers la charge via la diode.

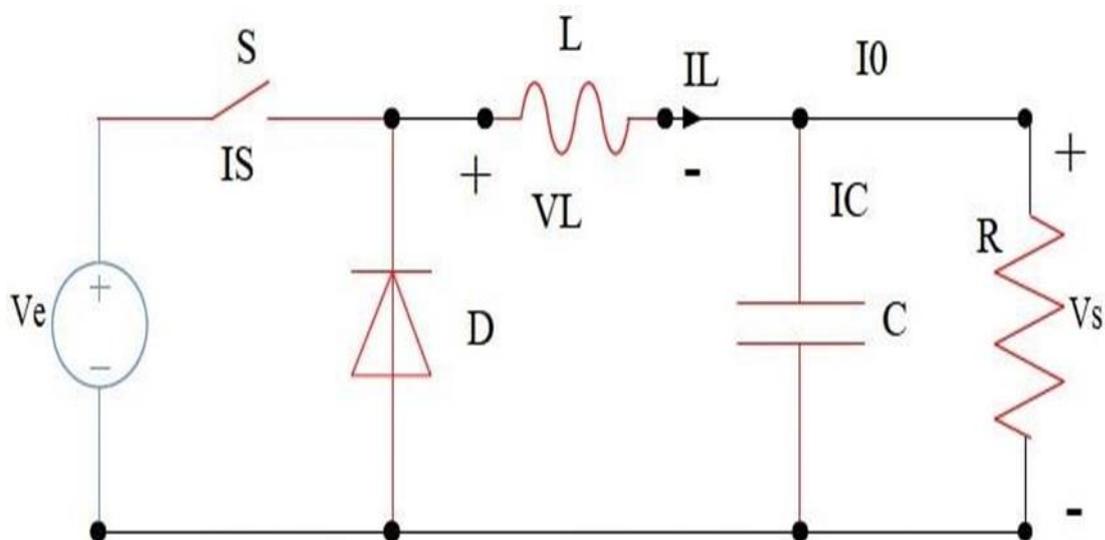


Figure II.20 Schéma hacheur série-parallèle

II.11 Systèmes de stockage :

La production d'énergie par les systèmes photovoltaïques est très fluctuante et dépend énormément des conditions météorologiques. C'est pourquoi, il faudra penser à stocker cette énergie pour la restituer pendant la nuit et les jours sans soleil et pour mieux adapter le générateur PV en fixant la tension du système [19].

II.11.1 Batteries d'accumulateurs :

La batterie sert à stocker l'énergie produite par le champ de modules PV, elle est nécessaire pour faire face aux heures de non production. Le fait que l'énergie solaire ne soit pas disponible sur l'ensemble d'une période de fonctionnement du système alimenté, impose l'utilisation de batteries dans les installations autonomes pour stocker l'énergie [19].

Dans les systèmes solaires autonomes, on utilise principalement :

a) Batteries au plomb

Une batterie au plomb acide est un ensemble d'éléments de 2 volts connectés en série pour obtenir la tension d'utilisation désirée. Ces éléments sont constitués de plaques positives et négatives, assemblées en alternance, ces plaques sont recouvertes de matières actives, bioxyde de plomb pour la positive et plomb spongieux pour la négative, ces électrodes plongent dans une solution d'acide sulfurique, la quantité de matières formées donne une capacité plus ou moins grande.

La tension varie entre 1.7 Volts et 2.4 Volts par élément suivant l'état de charge en conditions normales de fonctionnement. Ces accumulateurs ont un rendement énergétique de l'ordre 70 à 85 %.

En raison de leur maintenance nécessaire, ils sont réservés aux systèmes photovoltaïques de puissance [19].

b) Batteries au Cadmium-Nickel

La tension de ce type d'accumulateurs varie entre 1.15 et 1.45 Volts par élément suivant l'état de charge. Le rendement énergétique est de l'ordre de 70%.

En dépit d'un prix encore prohibitif, ce type d'accumulateur présente beaucoup d'avantages :

- ✓ Très bonne résistance mécanique ;
- ✓ Possibilité de supporter des décharges profondes ;
- ✓ Pas d'émanations toxiques à partir de l'électrolyte ;
- ✓ Ne craint pas de gel.

c) Batteries au Nickel-Zinc :

Ces accumulateurs sont encore dans le domaine de la recherche mais ils ont l'intérêt d'utiliser des matériaux moins coûteux est moins toxiques, leur tension varie entre 1.6 et 1.8 volts et leur inconvénient principal lié à la durée de vie qui reste limitée par un nombre de cycles [19].

d) Batteries au Lithium :

Ces nouveaux accumulateurs utilisent un électrolyte liquide organique, leur intérêt réside dans une forte capacité par unité de masse, une très bonne étanchéité et une stabilité importante vis-à-vis de la température. Leur développement est subordonné à une augmentation du nombre de cycles qu'ils peuvent accepter [19].

II.11.2 Caractéristiques principales d'un accumulateur :

Les caractéristiques principal d'un accumulateur sont comme suit :

- **Une batterie** : Est constituée d'un certain nombre d'éléments (cellules) connectés en série le plus souvent et parfois en parallèle ;
- **Tension nominale** : U (unité : le volt, V) : tension moyenne d'une batterie observée sur la plus grande partie de sa courbe de décharge ;
- **Tension à vide** : Tension mesurée aux bornes d'une batterie non connectée à une charge ;
- **Tension en charge** : Tension mesurée aux bornes d'une batterie connectée à sa charge (Récepteur, déchargeur, résistance...). C'est-à-dire délivrant un courant ;
- **Courant** : I (Unité l'ampère, A ou le mA) : Courant circulant dans les câbles et résultant de la connexion d'une charge a une batterie ;
- **Capacité** : C (Unité l'ampère-heure, Ah ou le mAh) Capacité énergétique d'une batterie à délivrer un certain courant pendant un certain temps, (Des ampères fois des heures $A \times h$) ;
- **Energie massique ou densité énergétique** : D (Unité le wattheure par kilogramme, Wh/kg)

C'est le rapport entre la capacité d'une batterie à délivrer une certaine puissance pendant un certain temps et son poids

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté des généralités sur les éléments existants dans le système photovoltaïque dont on va utiliser. Nous avons présenté les différents types de système photovoltaïque et le principe de fonctionnement de chaque élément ce qui permet d'introduire la modélisation et l'analyse de ce système. Nous avons montré comment augmenter le courant ou la tension d'un générateur photovoltaïque et on a cité les avantages et les inconvénients de l'énergie photovoltaïque.

L'énergie produite est continu et pour son utilisation il faut des convertisseurs. Alors nous avons présenté les types existant pour notre système photovoltaïque, ainsi les différents types de batteries, vu que notre système de stockage est basé sur les batterie. Pour un bon fonctionnement de notre système, on a défini un système de gestion d'énergie photovoltaïque nécessaire pour superviser de façon optimale le flux d'énergie entre les différents composants générateurs photovoltaïque, les batteries, réseau électrique et la charge (consommateur).

Chapitre III :

Modélisation du système photovoltaïque

III. Modélisation du système photovoltaïque :

III.1 Introduction :

Après avoir généralement définir et citer les différentes composantes du système photovoltaïque, nous allons concentrer sur la partie modélisation du système à étudier.

Dans ce chapitre, nous présenterons le nécessaire pour une meilleure modélisation. On va présenter les équations caractérisant le fonctionnement et les modèles mathématiques bien détaillés qui seront utilisés pour modéliser les différentes parties du système, afin de prévoir son comportement. En commençant par les modèles électrique d'un générateur photovoltaïque et les équations qui régissant son fonctionnement, le modèle de l'hacheur et de l'onduleur, le modèle de la batterie et aussi, présenter la commande MPPT.

III.2 Modélisation du générateur photovoltaïque :

Une cellule solaire est représentée par plusieurs modèles, chacun d'eux est régi par une expression mathématique (analytique) en fonction des paramètres technologiques de la cellule tels que le courant et la tension. Le schéma qui est largement utilisé pour la représentation d'un circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque [20].

III.2.1. Les modèles mathématiques :

On rencontre dans la littérature plusieurs modèles du générateur photovoltaïque qui diffèrent entre eux par la procédure et le nombre de paramètres intervenants dans le calcul de la tension et du courant finals du générateur photovoltaïque.

a) Cellule idéale :

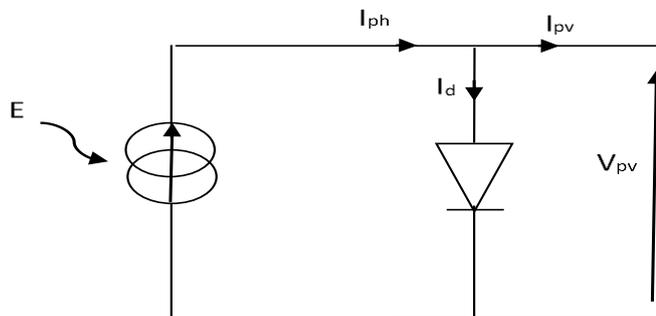


Figure III.1 : schéma électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque idéale

$$I = I_{ph} + I_d \quad (III.1)$$

$$I_d = I_{se} \left(\frac{V_{pv}}{AKTc} - 1 \right) \quad (III.2)$$

I: Courant disponible.

I_{ph}: Courant produit par la photopile.

V: Tension aux bornes de la cellule.

$\frac{KT}{q} = 26\text{mV}$ à $T_c = 300 \text{ °K}$ pour le silicium poly-cristallin.

I : Courant de polarisation de la diode ou courant de saturation.

b) Modèle à une diode :

Le modèle à une diode est le plus utilisé et il donne de très bonnes précisions.

La conversion de l'énergie de la lumière en énergie électrique est modélisée par un générateur de courant.

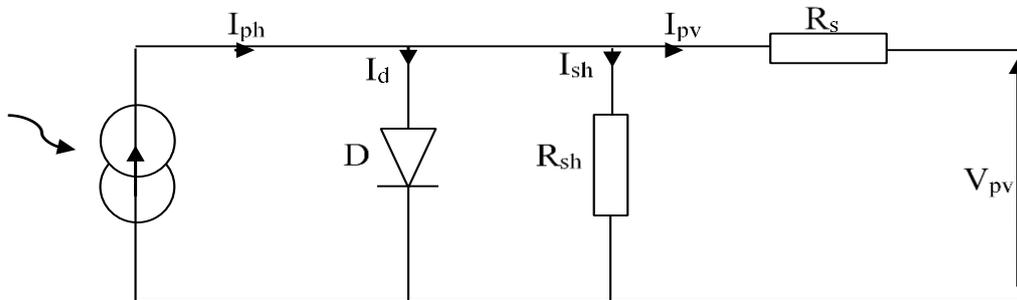


Figure III.2 : schéma électrique équivalent du modèle à une diode

➤ Le courant généré par le module est donné par la loi de Kirchhoff :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_d - I_{sh} \quad (III.3)$$

Tel que :

I_{pv} : Le courant délivré par le module.

I_{ph} : Photo courant.

I_d : Courant de diode.

I_{sh} : Le courant shunt.

➤ Le courant produit par la photopile est donné par :

$$I_{ph} = P_1 E \left[1 + P_2 (E - E_{ref}) + P_3 (T_c - T_{cref}) \right] \quad (III.4)$$

Tel que :

E_{ref} : Ensoleillement de référence

T_c : Température absolue de la cellule

T_{cref} : Température de référence

➤ Le courant de la diode est donné par :

$$I_d = I_s e^{\frac{q(V + R_s I_{pv})}{A n_s K T_j} - 1} \quad (III.5)$$

Avec :

$$I_s = P_4 T_c^3 e^{\left(-\frac{E_g}{K T_c} \right)} \quad (III.6)$$

Avec :

$$E_g = 1.1 \text{ eV}$$

E_g : L'énergie de gap (paramètre caractéristique du matériau, pour le Silicium).

I_s : Courant de saturation de la diode ou courant à l'obscurité.

➤ Le courant de la résistance shunt est donné par :

$$I_{sh} = \frac{(v + R_s I_{pv})}{R_{sh}} \quad (III.7)$$

Tel que :

Rs: Résistance série qui est due aux différentes résistances électriques que le courant rencontre sur son parcours (résistance de contact).

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

D'où l'expression de la caractéristique courant-tension (I-V) qui est donnée par l'équation suivante :

$$I_{pv} = P_1 E \left[1 + P_2 (E - E_{ref}) + P_3 (T_c - T_{cref}) \right] - \frac{V + R_s I}{R_{sh}} - P_4 T_c^3 e^{\left(\frac{E_g}{KT_c} \right)} e^{\left(\frac{q(V + R_s I)}{AKT_c} - 1 \right)} \quad (III.8)$$

c) **Modèle à deux diodes :**

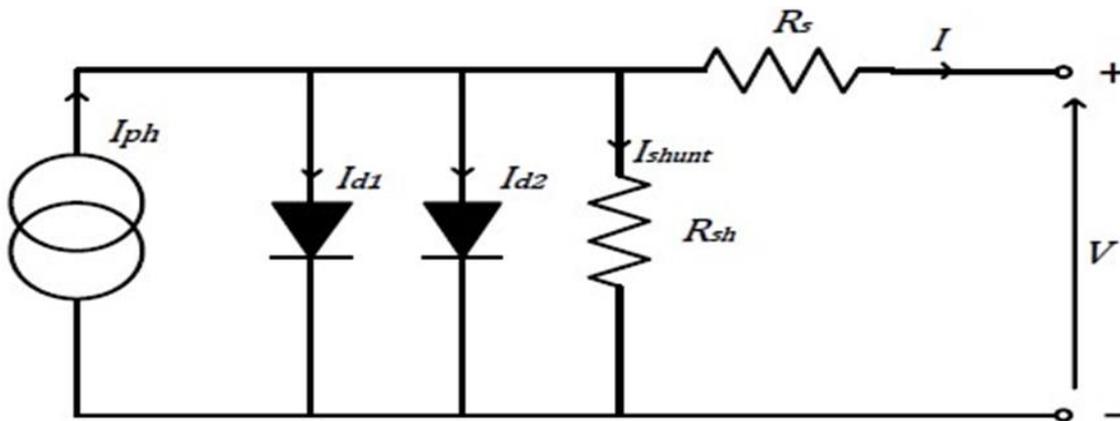


Figure III.3 Schéma du modèle équivalent à deux diodes d'une cellule photovoltaïque [20].

Comme le montre le schéma de la figure (III.3), une photopile comporte une résistance série R_s et une résistance en dérivation ou shunt R_p . Ces résistances auront une certaine influence sur la caractéristique (I-V) de la photopile. D'après la figure (III.3), le modèle mathématique pour la caractéristique courant – tension est donnée par :

$$I = I_{ph} - I_{s1} \cdot \left(e^{\frac{q(V + IR_s)}{n_1 \cdot K \cdot T}} - 1 \right) - I_{s2} \cdot \left(e^{\frac{q(V + IR_s)}{n_2 \cdot K \cdot T}} - 1 \right) - \frac{V + I \cdot R_s}{R_p} \quad (III.9)$$

Où :

- **I** et **V** : Courant et tension de sortie de la cellule photovoltaïque ;
- **I_{ph}** : Photo-courant produit ;
- **I_{s1}** et **I_{s2}** : Courant de saturation diodes ;
- **I_{d1}** et **I_{d2}** : Respectivement les courants qui traversent la première et la deuxième diode
- **n₁** et **n₂** : Facteurs de pureté de la diode ;
- **R_s** et **R_p** : Respectivement la résistance série et la résistance parallèle ;
- **T** : Température absolue en degré Kelvin (°K) ;
- **q** : Charge élémentaire de l'électron (1,602. 10⁻¹⁹ C) ;
- **K** : Constante de Boltzmann (1,38. 10⁻²³ J/°K) ;
- Le photo-courant **I_{phmax}** est atteint à une insolation maximum, souvent on a (**I_{ph} = s · I_{phmax}**), avec **s** : pourcentage d'insolation.

L'équation (III.9), montre que la caractéristique courant-tension dépend fortement de l'insolation et de la température. La dépendance de la température est encore amplifiée par les propriétés du photo-courant et les courant de saturation inverse des diodes qui sont donnés par :

$$I_{ph}(T) = I_{ph}(T = 298). (1 + (T - k.K). (5. 10^{-4})) \quad (III.10)$$

$$I_{s1} = K1. T^3. e^{\frac{-E_g}{K.T}} \quad (III.11)$$

$$I_{s2} = K2. T^{\frac{5}{2}}. e^{\frac{-E_g}{K.T}} \quad (III.12)$$

E_g : Bande d'énergie du semi-conducteur, $K1=1,2 \text{ A/}^\circ\text{K}^3$, $K2=2,9.10^5 \text{ A/}^\circ\text{K}^{5/2}$ et $k=298 \text{ }^\circ\text{K/J}$.

III.2.2 Caractéristique courant-tension d'un module :

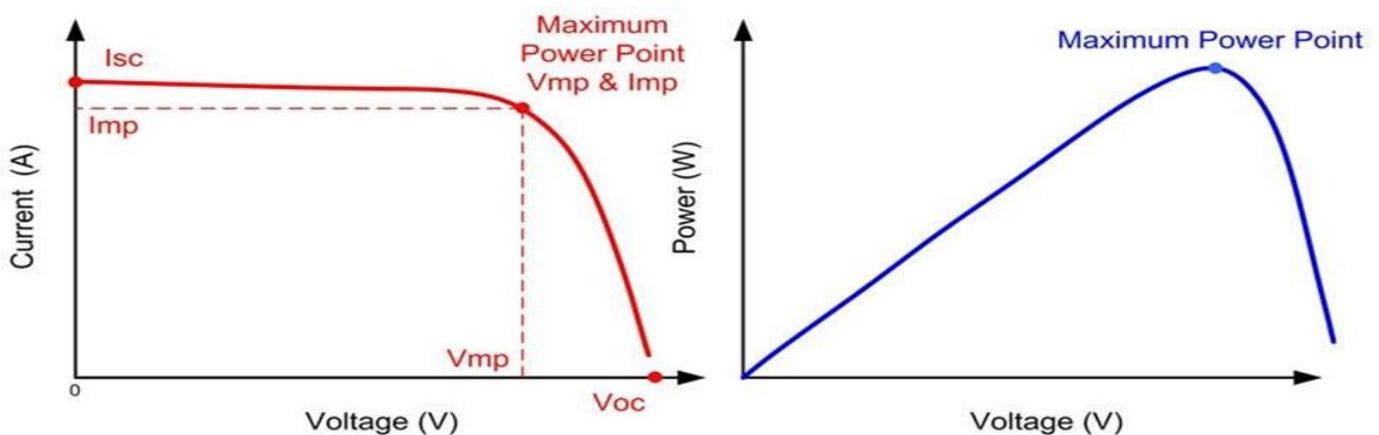


Figure III.4 Exemple de caractéristique courant-tension d'un module PV.

III.2.3 Influence de l'irradiation :

Les figures (III.5) et (III.6) montrent la variation du courant et de la puissance en fonction de la tension du module photovoltaïque pour les différents niveaux d'éclairement. On peut voir aussi sur les graphs, l'existence de maximum sur les courbes de puissance. Ces points correspondent aux points de puissances maximales lorsque l'irradiation varie pour une température donnée. On peut voir que le courant de court-circuit I_{sc} varie proportionnellement à l'irradiation. De même, la tension de circuit ouvert V_{oc} (à vide) varie très peu.

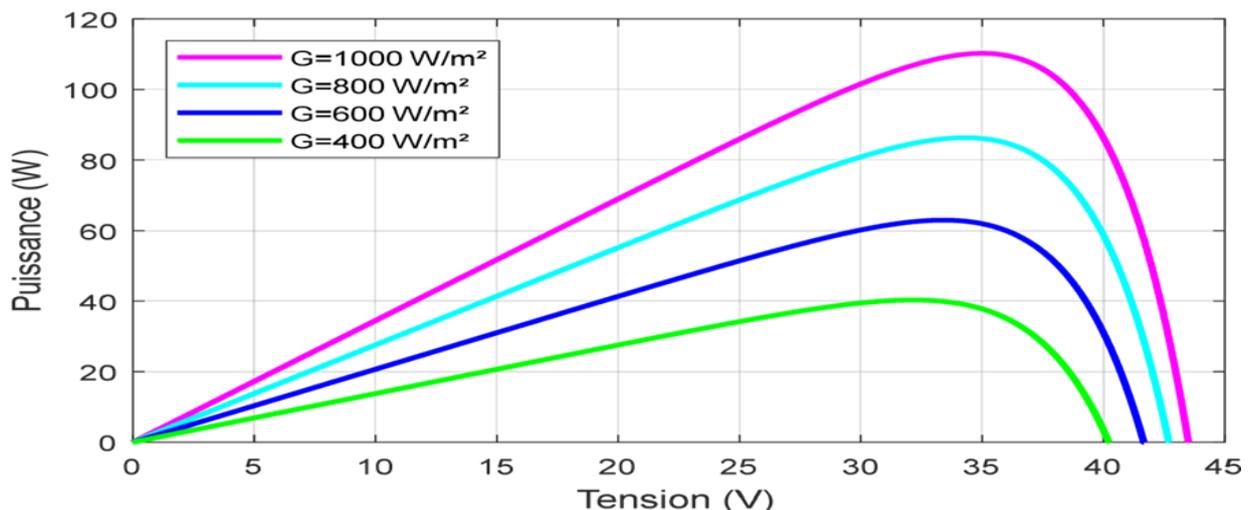


Figure III.5 Influence de l'éclairement sur la caractéristique P(V) à $T=25^\circ\text{C}$.

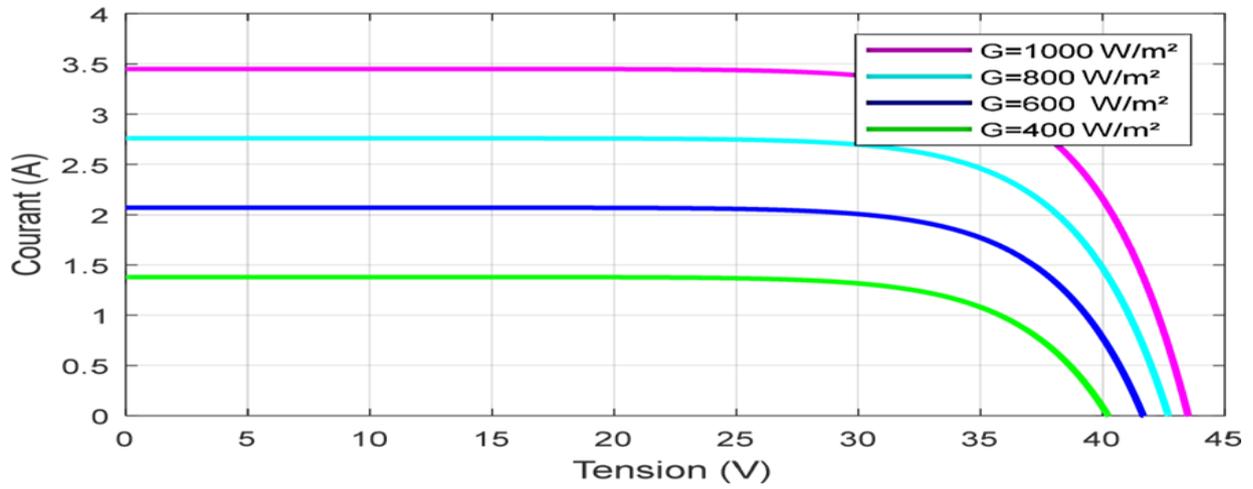


Figure III.6 Influence de l'éclairement sur la caractéristique I(V) à T=25°C.

III.2.4 Influence de la température :

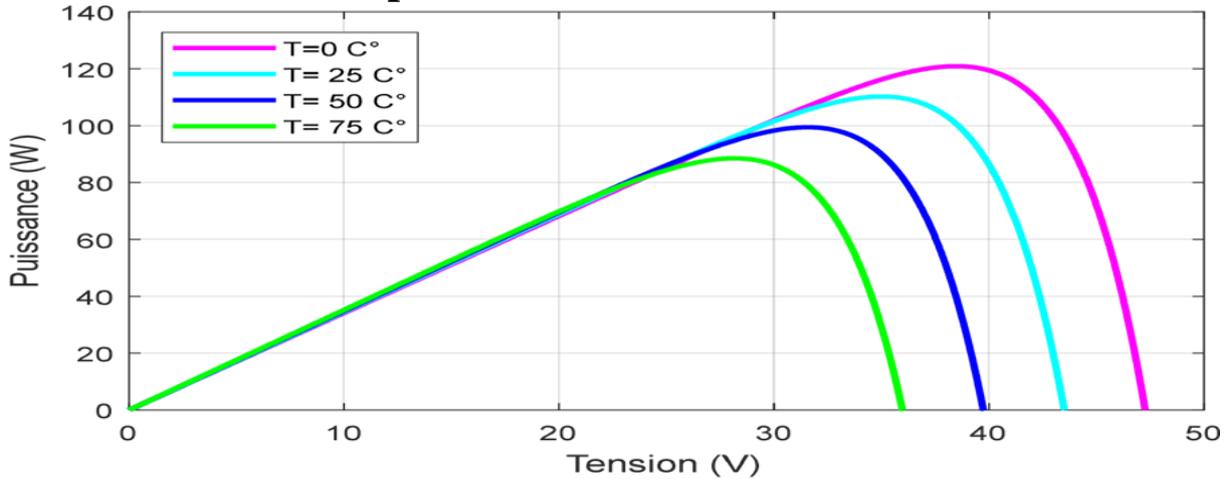


Figure III.7 Influence de la température sur la caractéristique P(V) à E=1000 W/m².

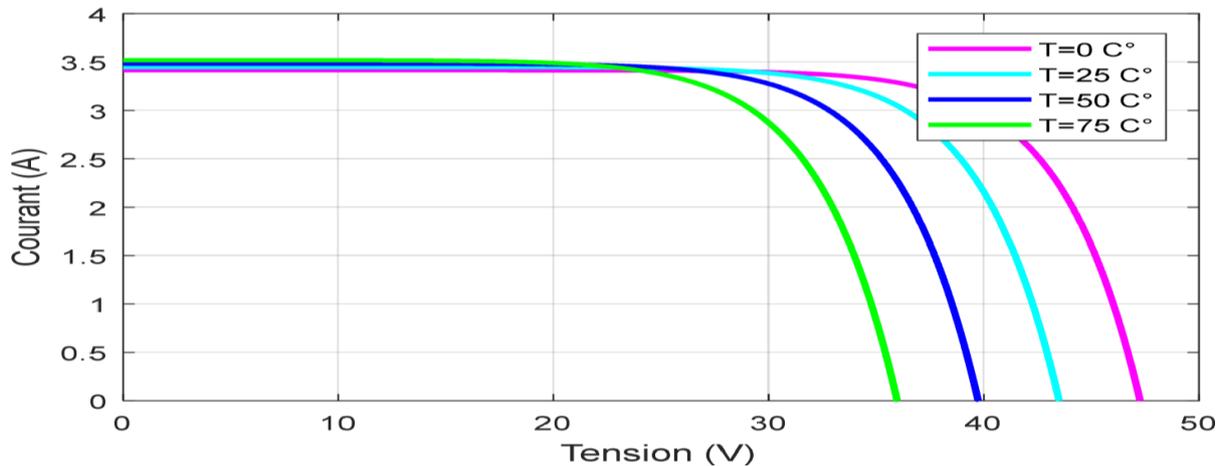


Figure III.8 Influence de la température sur la caractéristique I(V) à E=1000 W/m².

Les figures (III.7) et (III.8) montrent que de l'augmentation la température à irradiation constante fait décroître la tension de circuit ouvert V_{oc} fortement, et le courant de court-circuit I_{sc} augmente légèrement.

III.3 Modélisation de l'hacheur survolteur :

Ce dernier est un convertisseur survolteur, connu aussi sous le nom de BOOST ou hacheur parallèle ; Ce nom est lié au fait que la tension moyenne de sortie est supérieure à celle de l'entrée.

Son circuit de base est celui de la figure si dessous.

$$V_s = \frac{1}{1 - \alpha} \cdot V \quad (\text{III.13})$$

$$I_s = (1 - \alpha) \cdot I \quad (\text{III.14})$$

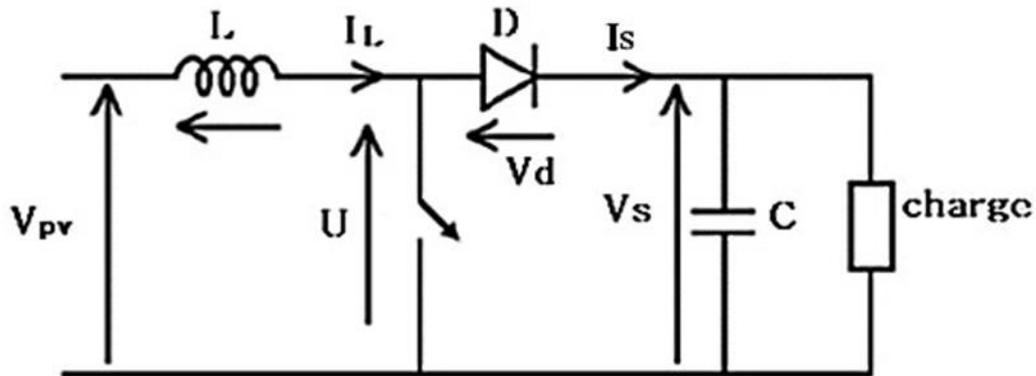


Figure III.9 Schéma électrique d'un hacheur survolteur ou booster

III.4 Modélisation de la batterie :

La modélisation de l'élément de stockage de l'énergie produite par les panneaux photovoltaïques est importante dans la simulation des systèmes photovoltaïques. Dans notre cas, l'accent est mis sur la technologie de stockage qui est actuellement utilisée, c'est à dire la technologie électrochimique Plomb-Acide. Nous avons opté pour un stockage par batterie au plomb. Notre choix s'est porté sur le modèle dit « CIEMAT » qui est basé sur le schéma suivant (Figure III.10) où la batterie est décrite par une source de tension E_b et la résistance interne R_i dépendant de la température et l'état de charge de la batterie.

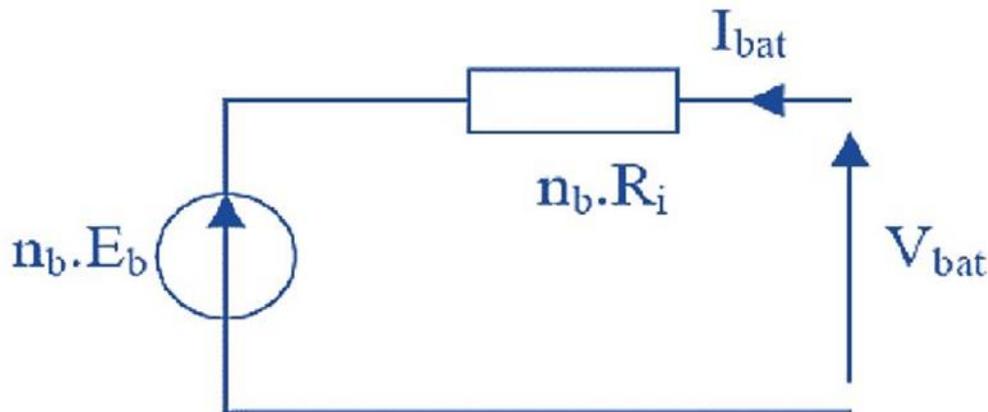


Figure II.10 Schéma équivalent de nb élément en série

Pour un nombre de cellule nb l'équation de la tension est :

$$V_{bat} = nb \cdot E_b - nb \cdot R_i \cdot I_{bat} \quad (\text{III.15})$$

V_{bat} : Tension de batterie ;

I_{bat} : Courant de la batterie ;

E_b : Force électromotrice fonction de l'état de charge de la batterie ;

R_i : Résistance interne.

L'expression de l'état de charge :

$$Edc = 1 - \frac{Qd}{Cbat} \quad (III.16)$$

C_{bat} : la capacité nominale de la batterie (Ah) ;

Qd : la quantité de charge manquante par rapport à C_{bat} .

III.5 Commande MPPT P&O :

L'algorithme de poursuite du point de puissance maximale par la méthode P&O (perturbation and observe) est le plus utilisé, car il est relativement simple à implémenter et généralement nécessite deux capteurs pour mesurer la tension et le courant à partir desquels la puissance est calculée. Parfois, le courant est estimé à partir de la tension mesurée, éliminant ainsi le besoin du capteur de courant.

Son principe consiste à perturber la tension V ou le courant I d'une faible amplitude autour de sa valeur initiale et d'analyser le comportement de la variation de puissance P qui en résulte. Cependant, la variable idéale qui caractérise le PPM est celle qui varie peu lors d'un changement climatique. Et d'après ce qu'on a remarqué dans le début de chapitre III, la variation du rayonnement affecte davantage le courant que la tension photovoltaïque. Par contre, la variation de la température modifie plus la tension du GPV. Néanmoins, la dynamique de la température est lente et varie sur une plage réduite. Par conséquent, il est préférable de contrôler la tension du GPV.

Ainsi, comme l'illustre la figure (III.11), on peut déduire que si une incrémentation positive de la tension V engendre un accroissement de la puissance P , cela signifie que le point de fonctionnement se trouve à gauche du PPM. Si au contraire, la puissance décroît, cela implique que le système a dépassé le PPM.

Un raisonnement similaire peut être effectué lorsque la tension décroît [20].

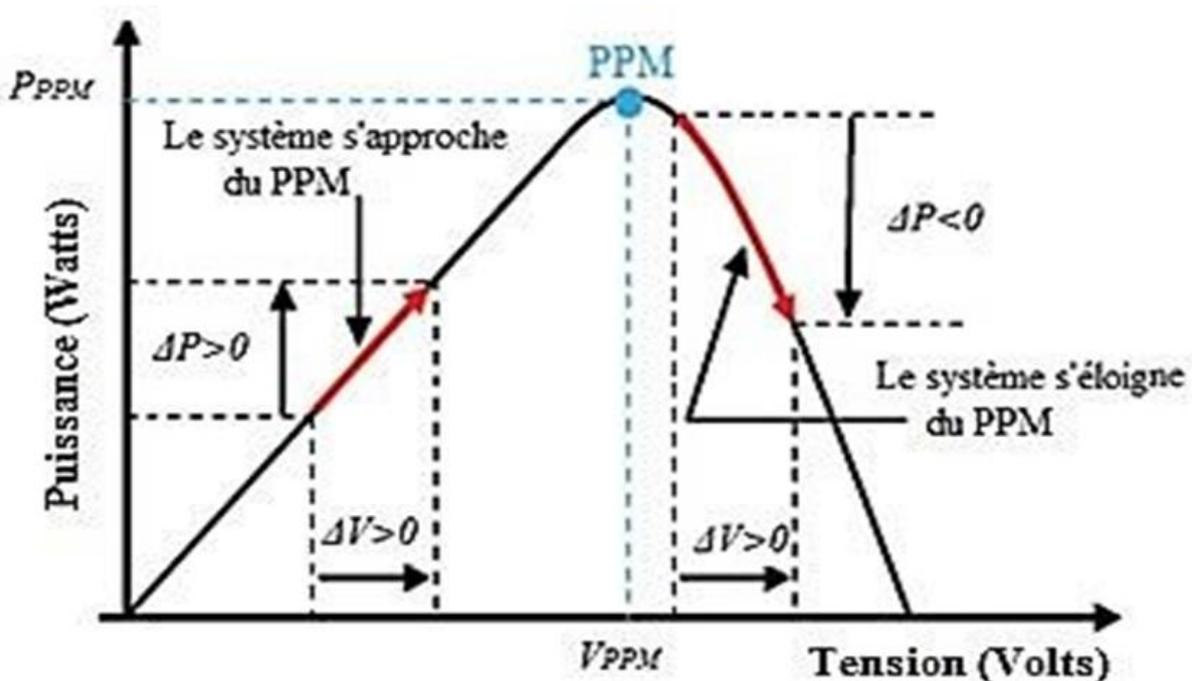


Figure III.11 Caractéristique P (V) d'un panneau solaire.

La figure (III.12) montre l'organigramme de l'algorithme de P&O tel qu'il doit être implémenté dans le microprocesseur de contrôle.

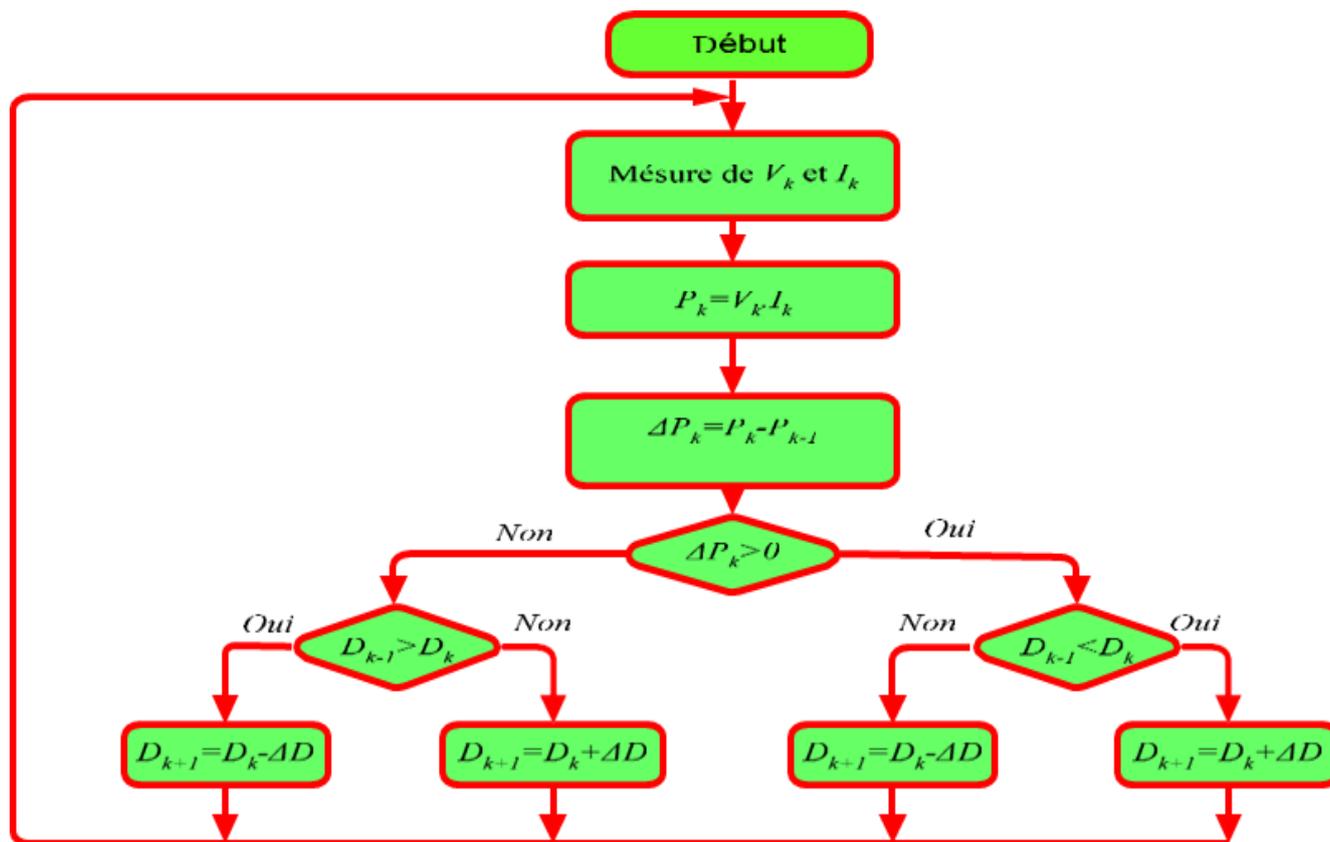


Figure (III.12) Organigramme de l'algorithme perturbation et observation [20].

L'inconvénient de la méthode de P&O est que, si une augmentation brutale de l'ensoleillement est produite on aura une augmentation de la puissance du panneau, l'algorithme précédent réagit comme si cette augmentation est produite par l'effet de perturbation précédente, alors il continue dans la même direction qui est une mauvaise direction, ce qui fait qu'il s'éloigne du vrai point de puissance maximale. Cela se traduit par une gigue autour du PPM ce qui diminue légèrement la puissance moyenne de quelques %, suivant la valeur de la perturbation. Ce processus continue jusqu'à la stabilité de l'ensoleillement, moment où il revient vers le vrai point de puissance maximale. Ceci cause un retard de réponse lors des changements soudains des conditions de fonctionnement et des pertes de puissance.

Certains algorithmes procèdent aussi à des incréments variables permettant d'accélérer la recherche dans certaines parties de la courbe. Il faut donc trouver un compromis entre précision et rapidité, ce qui rend cette commande difficile à optimiser [20].

Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté les différents modèles utilisés pour la modélisation du système photovoltaïque, celui des panneaux PV, des batteries et des convertisseurs. Nous avons défini, les caractéristiques du générateur PV avec ses performances, ainsi que l'influence de quelques paramètres sur ses caractéristiques. En outre, pour un fonctionnement dans des conditions optimales, un algorithme de recherche de puissance maximum (MPPT P&O pour Maximum Power Point Tracking Perturbation and Observe) a été décrit.

Chapitre IV :

Modélisation et simulation d'un panneau PV sur Matlab

IV.1. Introduction :

Dans ce chapitre, nous avons étudié la modélisation et simulation d'un panneau Photovoltaïque de type poly cristallin (composé de 54 cellules connectées en série) dans les conditions standard ($E=1000\text{W/m}^2$, $T=25^\circ\text{C}$), nous allons traiter l'effet de la température et l'éclairement sur l'énergie produite de la cellule PV.

On utilise l'outil MATLAB pour faire la Modélisation et la simulation d'un module PV.

IV.2. Paramètres caractéristiques d'un panneau photovoltaïque :

Les paramètres des cellules photovoltaïques (I_{cc} , V_{co} , FF, η) extraits des caractéristiques courant-tension, permettent de comparer différentes cellules éclairées dans des conditions identiques [21].

a) Courant de court-circuit I_{cc} :

Il s'agit du courant obtenu en court-circuitant les bornes de la cellule ($V=0$). Ce courant croît linéairement avec l'intensité d'illumination de la cellule, il dépend de la surface éclairée, de la longueur d'onde du rayonnement, de la mobilité des porteurs et de la température [22].

b) Tension de circuit ouvert V_{co} :

Comme son nom l'indique, c'est la tension aux bornes de la cellule lorsqu'elle n'est pas connectée à une charge de résistance infinie.

Elle dépend essentiellement du type de cellule solaire (jonction PN, jonction Schottky), des matériaux de la couche active et de la nature des contacts de la couche active-électrode. Elle dépend de plus de l'éclairement de la cellule [22].

$$V_{CO} = \ln \left(\frac{nkt}{q} \right) \quad (\text{IV.1})$$

Avec

n : Facteur d'idéalité de la diode.

K : constante de Boltzmann ($1,381.10^{-23}$ Joule/Kelvin).

T : Température de la jonction p-n des cellules.

q : Charge d'électron ($1,602.10^{-19}$ C).

E : Eclairement reçu.

E₀ : Eclairement de référence.

Il peut aussi être calculé par :

$$V_{OC} = \frac{nkt}{q \cdot \ln \left(\frac{I_{cc}}{I_{S+1}} \right)} \quad (\text{IV.2})$$

I_{cc} : Courant continu de la cellule.

I_s : Courant de saturation de la diode.

c) Puissance maximale :

Dans des conditions ambiantes de fonctionnement fixes (éclairage, température, etc..), la puissance électrique (P) disponible aux bornes d'une cellule PV est égale au produit du courant continu fourni (I) par une tension continue donnée (V) :

$$P = I \times V$$

P : Puissance mesurée aux bornes de la cellule PV (Watt).

V : Tension mesurée aux bornes de la cellule PV (Volt).

I : Intensité mesurée aux bornes de la cellule PV (Ampère).

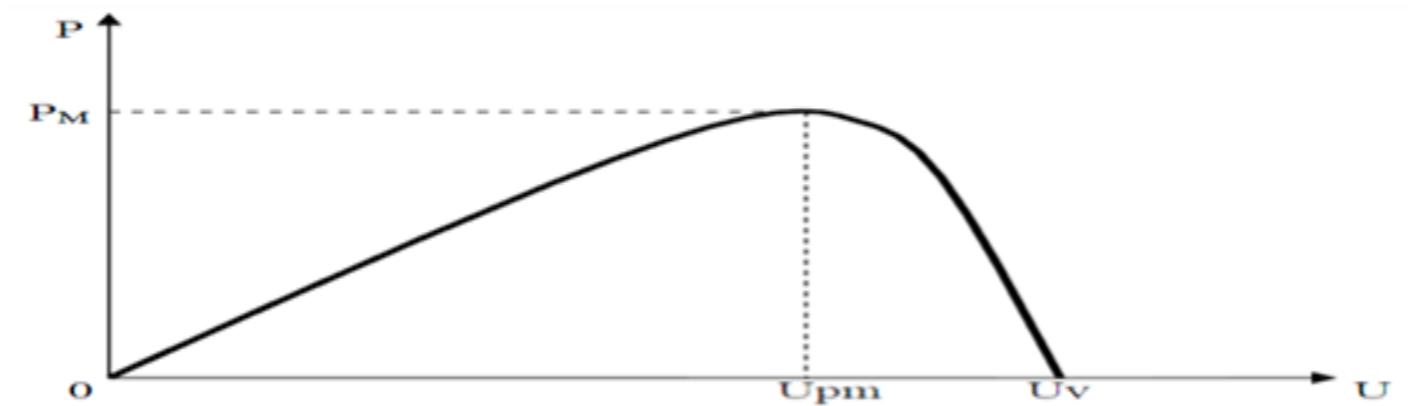


Figure IV.1 : Courbe caractéristique P-V [21]

Pour une cellule solaire idéale, la puissance maximum $P_{\text{max-idéale}}$ correspondrait donc à la tension de circuit ouvert V_{co} multipliée par le courant de court-circuit I_{cc} :

$$P_{\text{max idéale}} = V_C \times I_{CC} \quad (\text{IV.3})$$

P_{max idéale} : Puissance mesurée aux bornes de la cellule PV idéale (Watt).

V_{co} : Tension de circuit ouvert mesurée aux bornes de la cellule PV (Volt).

I_{cc} : Intensité de court-circuit mesurée aux bornes de la cellule PV (Ampère).

Par simplification, les professionnels caractérisent un module PV par sa puissance Nominale aux conditions de fonctionnement standard (STC).

Ce paramètre n'est autre que la puissance maximale mesurée sous ces conditions (en général un ensoleillement de 1000W/m^2 et une température de 25°C) [21].

d) Le facteur de forme FF :

On appelle facteur de forme FF le rapport entre la puissance maximum fournie par la Cellule P_{max} , et le produit du courant de court-circuit (I_{cc}) par la tension de circuit ouvert (V_{co}) (c'est à dire la puissance maximale d'une cellule idéale) :

$$FF = \frac{P_{\text{max}}}{(V_{co} \times I_{cc})} \quad (\text{IV.4})$$

FF : Facteur de forme.

e) Rendement de conversion :

Le rendement des cellules PV désigne le rendement de conversion en puissance.

Il est défini comme étant le rapport entre la puissance maximale délivrée par la cellule et la puissance lumineuse incidente P_{in} [21].

$$\mathbf{n} = \frac{P_{max}}{P_{in}} \quad (\text{IV.4})$$

P_{in} : Puissance incidente.

Ce rendement peut être amélioré en augmentant le facteur de forme, le courant de court-circuit et la tension de circuit ouvert [22].

IV.3. Modélisation d'une cellule photovoltaïque :

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

a) La résistance série :

Elle représente la résistance interne de la cellule, elle dépend Principalement de la résistance du semi-conducteur utilisé, de la résistance de contact Des grilles collectrices et de la résistivité de ces grilles [22].

b) La résistance shunt :

Elle est due à un courant de fuite au niveau de la jonction, elle Dépend de la façon dont celle-ci a été réalisée [22].

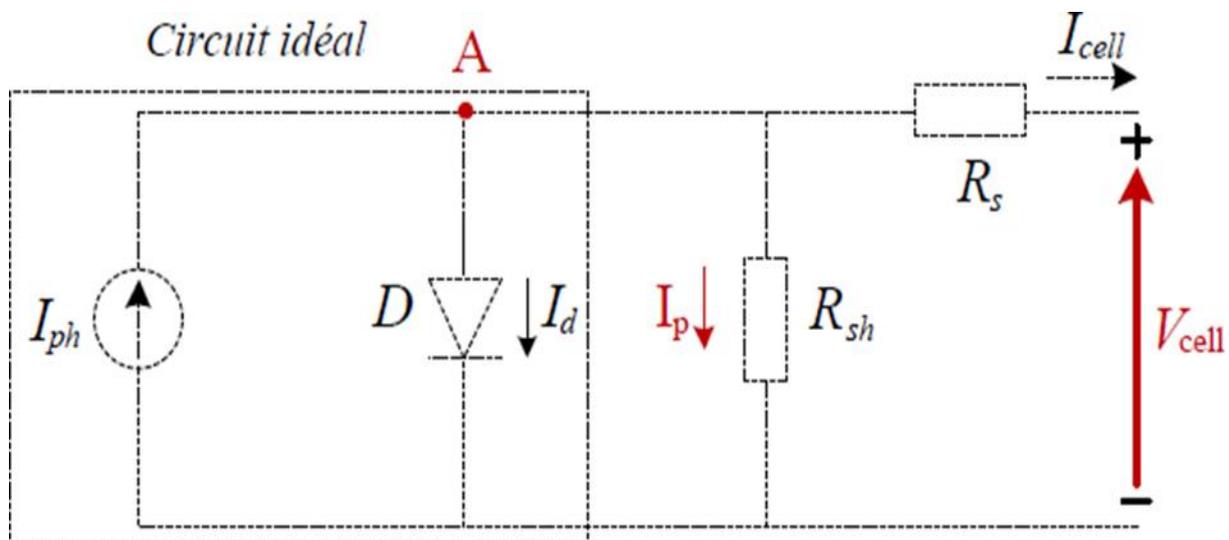


Figure IV.2: Schéma électrique d'une cellule photovoltaïque [22].

Ce modèle fait intervenir un générateur de courant pour modéliser le flux lumineux incident, Une diode pour les phénomènes de polarisation de la cellule et deux résistances (série et shunt) pour les pertes [22].

Ce modèle est dit à cinq paramètres, ces paramètres sont :

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

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

Et si en plus, on néglige la résistance série, on retrouvera alors le modèle à 3 paramètres.

Le choix du modèle se fait en fonction des besoins de l'étude même le modèle a cinq Paramètres offre un bon compromis entre simplicité et précision [22].

Ces équations permettent de décrire la caractéristique I-V de la cellule et du module en Donnant les expressions des d'efférent courants :

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

$$I_{cel} = I_{ph} - I_d - I_{rs} \quad (IV.6)$$

Avec :

I_{cell} : Courant délivré par la photopile.

I_{ph} : Photo courant.

I_d : Courant de la diode.

I_{Rsh} : Courant shunt.

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

$$I_{cel} = I_{ph} - I_d \quad (IV.7)$$

IV.3.1. Les différentes équations de la cellule PV :

a) Le photo-courant I_{ph} :

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

Avec :

$$I_{ph} = I_{sc} - K_i (T - 298) \frac{G}{1000} \quad (IV.8)$$

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

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

T [K] : Température ambiante

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

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

b) Le courant de saturation I_0 :

Ce courant varie avec la température et est donné p

$$I_0 = I_{rs} \left(\frac{T}{T_n} \right)^3 \cdot \exp \left[\frac{q \cdot E_{g0} \left(\frac{1}{T_n} - \frac{1}{T} \right)}{nk} \right] \quad (\text{IV.9})$$

Avec :

E_g [eV] : Énergie de gap du semi-conducteur (1.1 eV pour le silicium poly cristallin à 25°C).

c) Le courant de saturation inverse de la diode (courant de fuite) I_{rs} :

Son expression est donnée par l'équation :

$$I_{rs} = \frac{I_{sc}}{\exp \left(\frac{q \cdot V_{OC}}{n \cdot N_s \cdot K \cdot T} \right) - 1} \quad (\text{IV.10})$$

Où :

V_{oc} [V] : Tension de circuit ouvert du module (donnée par le constructeur).

q [°C] : Charge de l'électron ($1.602 \cdot 10^{-19}$ °c).

N_s : Nombre de cellules connectées en série.

n : Constante d'idéalité de la jonction ($1 < n < 2$).

K [J/K] : Constante de Boltzmann ($1.3805 \cdot 10^{-23}$ J/K).

d) Le courant de résistance shunt :

$$I_{sh} = \left(\frac{V + I \cdot R_s}{R_{sh}} \right) \quad (\text{IV.11})$$

e) Le courant du panneau :

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

$$I_{pv} = I_{ph} - I_0 \left[\exp \left(\frac{q(V + I \cdot R_s)}{n \cdot K N_s \cdot T} \right) - 1 \right] - I_{sh} \quad (\text{IV.12})$$

Où :

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

N_p : Nombre de cellules connectées en parallèle dans un module [22].

Isc	8,32A en 25c° et 1000W/m2
T	T=298 k
Tn	T =25C°
G	G=1000W/ m2
Q	(1,6 .10-19)
Vos	32,9V
N	1,3
K	(1,38.10-23 j/k)
Eg0	(1,1eV)
N _s	54 Cellule
N _p	1
R _s	221
Rsh	415,405

Tableau IV.1 : Caractéristique électrique d'une photopile (cellule PV)

Puissance nominal	200 W
Tension a puissance maximal	26.4 V
Courant a puissance maximal	7.58 A
Tension de circuit ouvert	32.9 V
Courant de court-circuit	8.21 A
Nombre des cellules en série N _s	54
Nombre des cellules en parallèle N _p	1

Tableau IV.2 : Caractéristique électrique de la cellule PV dans les conditions standards<CST> T=25°C, G=1000W /m²

IV.4. Simulation d'un panneau photovoltaïque sous Matlab-Simulink :

III.4.1. Définition de SIMULINK :

Est une plate-forme de simulation multi-domaine et de modélisation des systèmes dynamiques. Il fournit un environnement graphique et un ensemble de bibliothèques Contenant des blocs de modélisation qui permettent le design précis, la Simulation, L'implémentation et le contrôle de systèmes de communications et de traitement du signal [22].

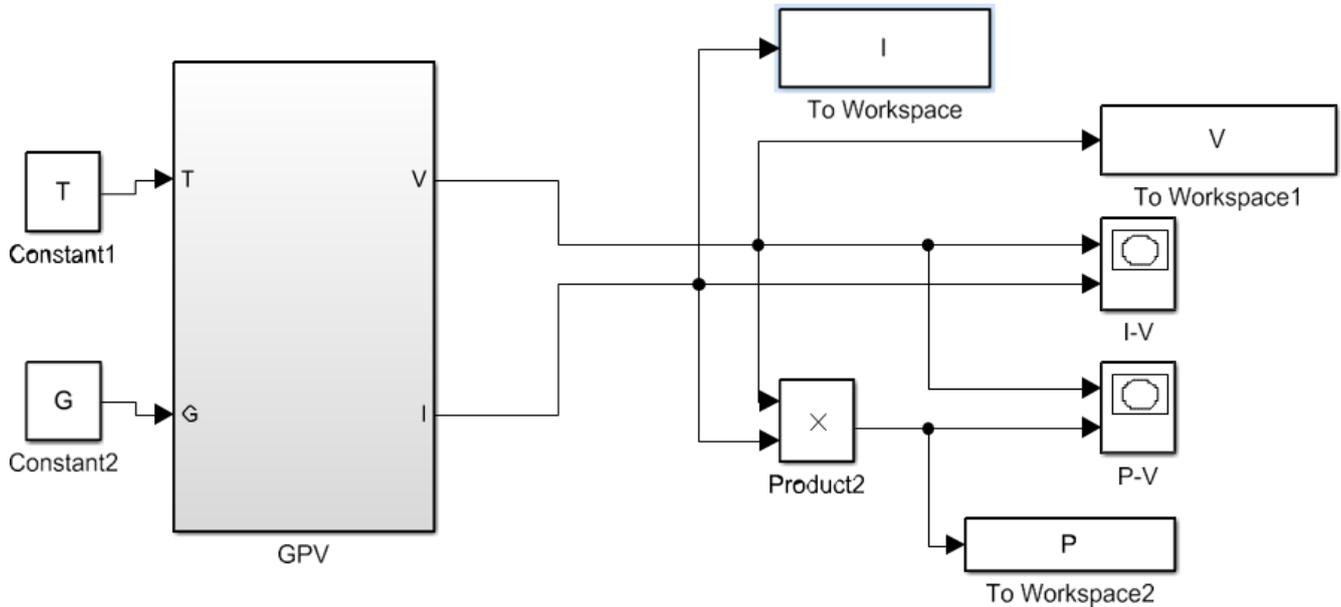


Figure IV.3: schéma d'un générateur PV sous MATLAB SIMULINK

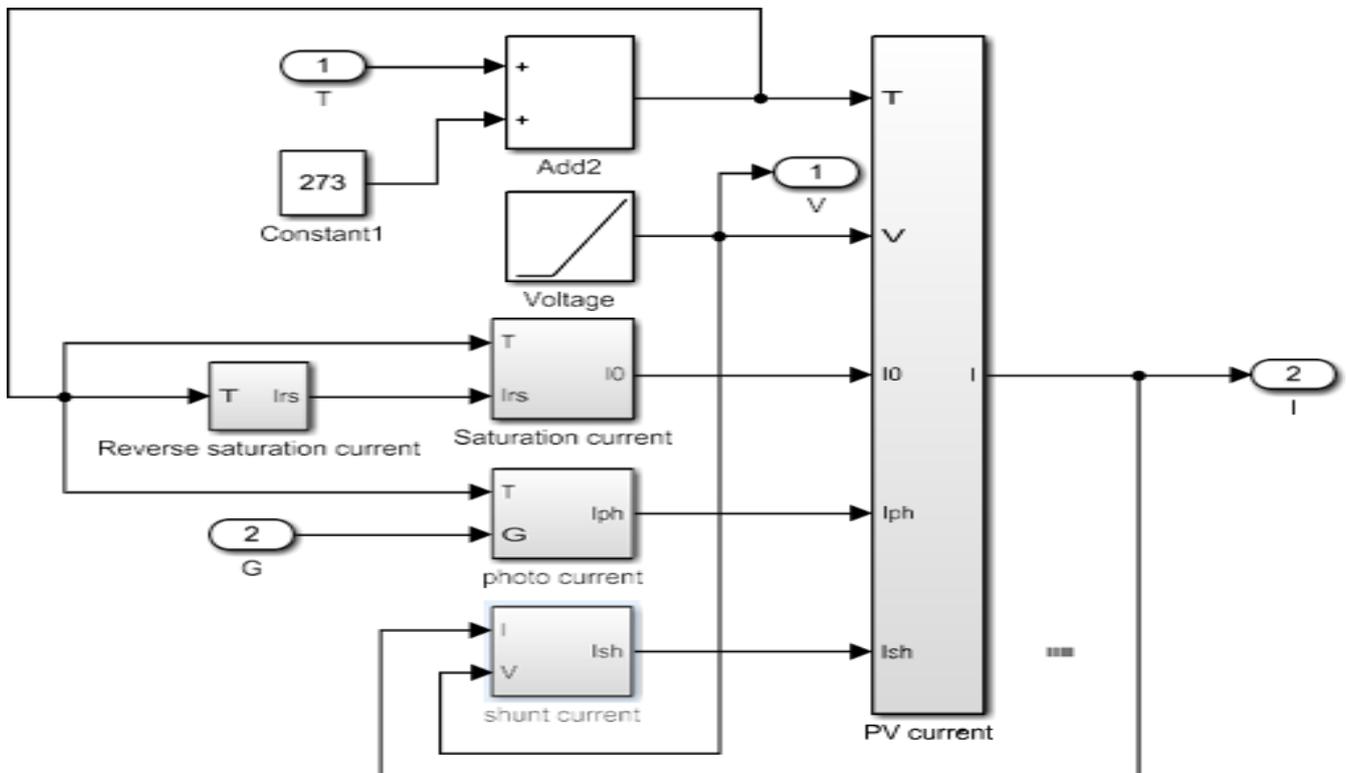
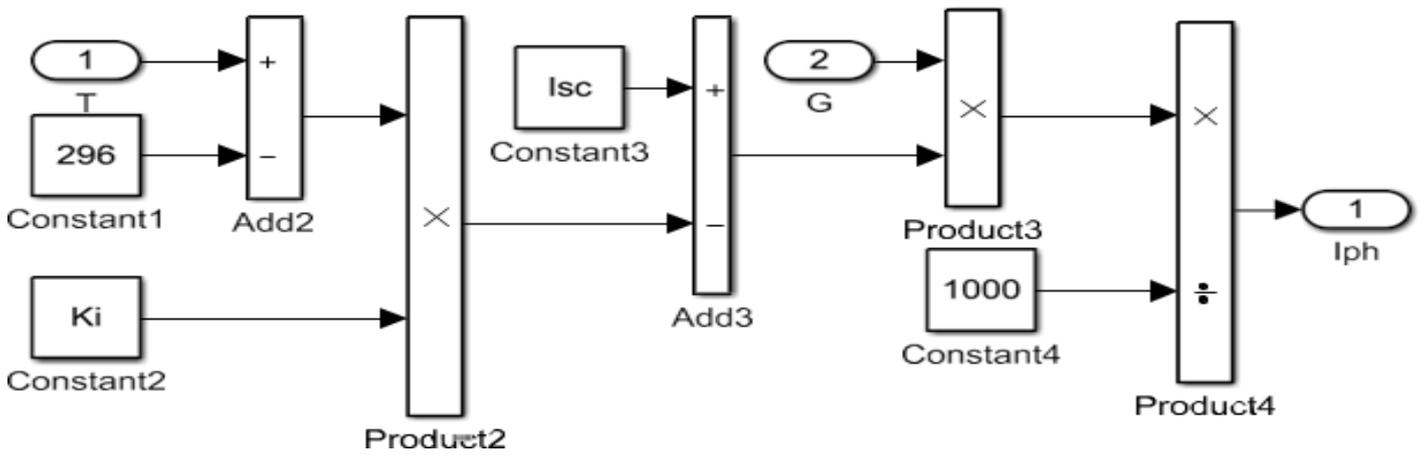
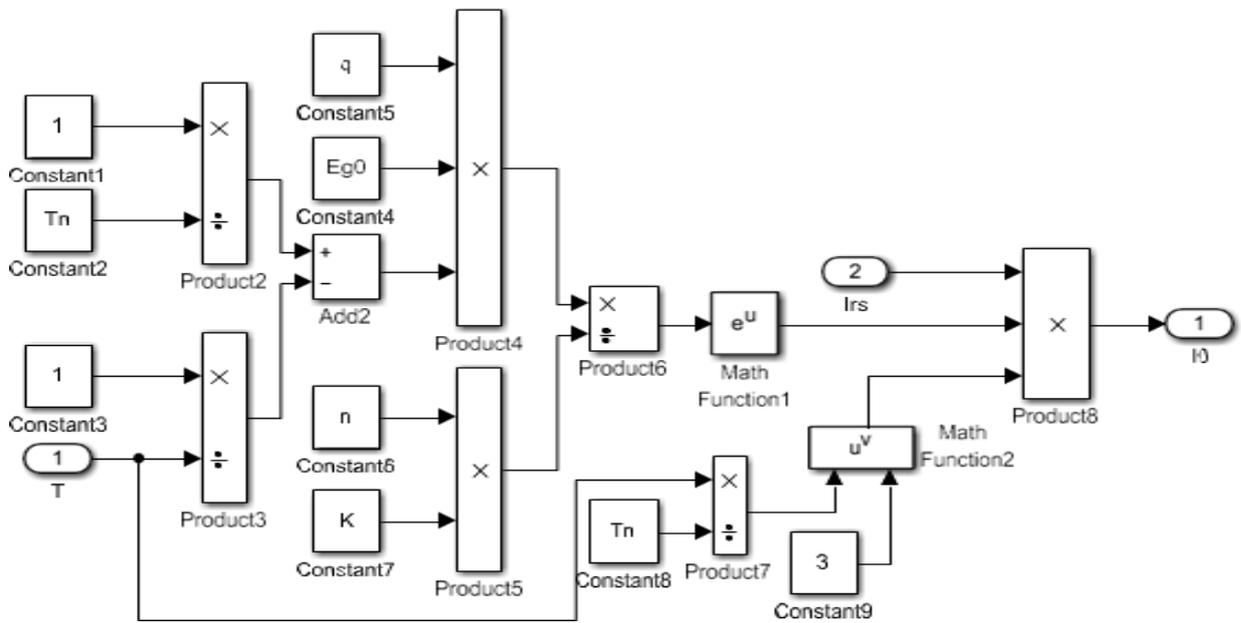


Figure IV.4: Schéma d'un courant de module PV



$$I_{ph} = [I_{sc} + \{k_i \cdot (T - 298)\}] \cdot G / 1000$$

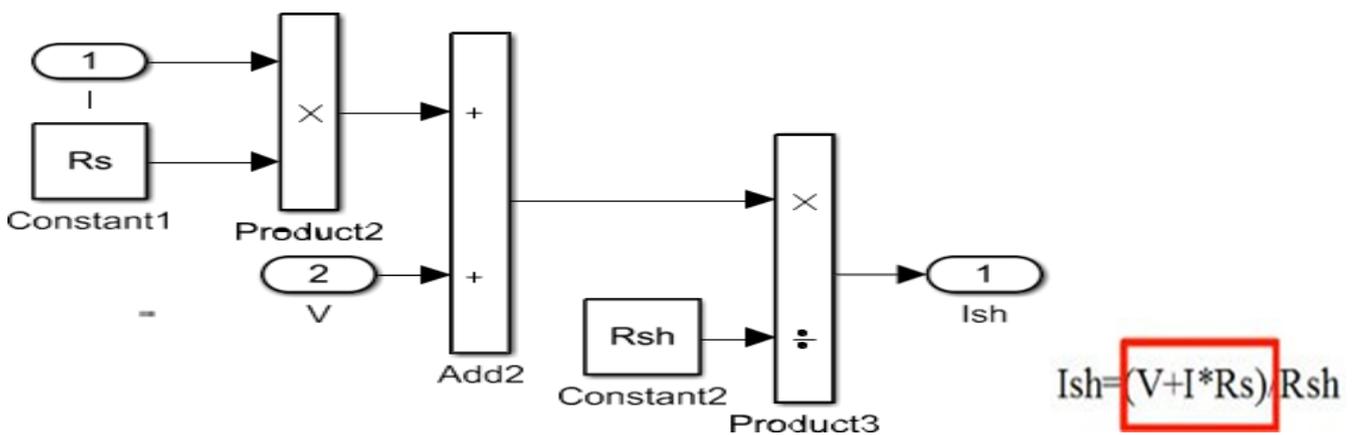
Figure IV.5 : Schéma d'un photo-courant



Saturation current

$$I_0 = I_{rs} \cdot \left(\frac{T}{T_n}\right)^3 \cdot \exp\left[\frac{q \cdot E_{g0} \cdot (1/T_n - 1/T)}{n \cdot K}\right]$$

Figure IV.6: Schéma d'un courant de saturation



$$I_{sh} = (V + I \cdot R_s) / R_{sh}$$

Figure IV.7 : Schéma d'un courant de résistance shunt

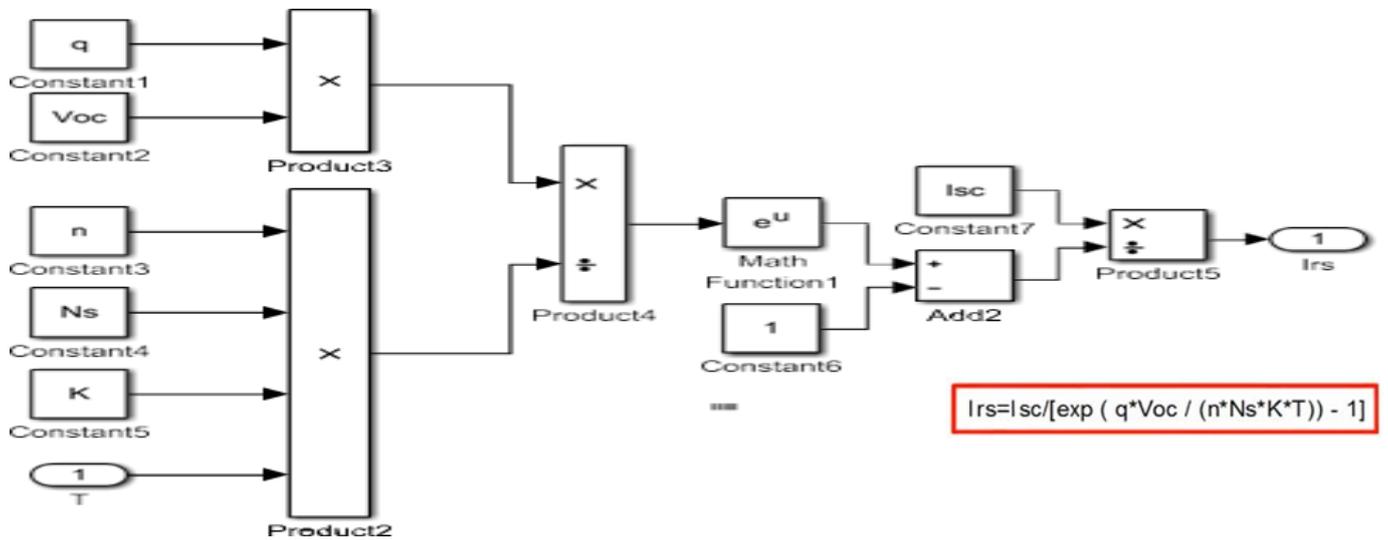


Figure IV.8 : Schéma d'un courant de saturation inverse de la diode.

IV.4.3. Les résultats de simulation sous matlab-simulink :

IV.4.4. Les Caractéristiques I(V) et P(V) sous les conditions standard (T=25°C, E=1000 W/m²) :

Les résultats obtenus de la simulation (programmation en utilisant le logiciel MATLAB) d'un Caractéristiques courant –tension I(V) et puissance -tension P(V) de la cellule photovoltaïque Dans les conditions standards (T=25°C, E=1000 W/m²) sont représentés dans les figures suivant :

La figure suivant représente la caractéristique courant – tension d'une cellule solaire dans les Conditions de E=1000 W/m² et T=25°C.

Le courant de court-circuit est égal 8.2A et la tension de circuit ouvert est 33V.

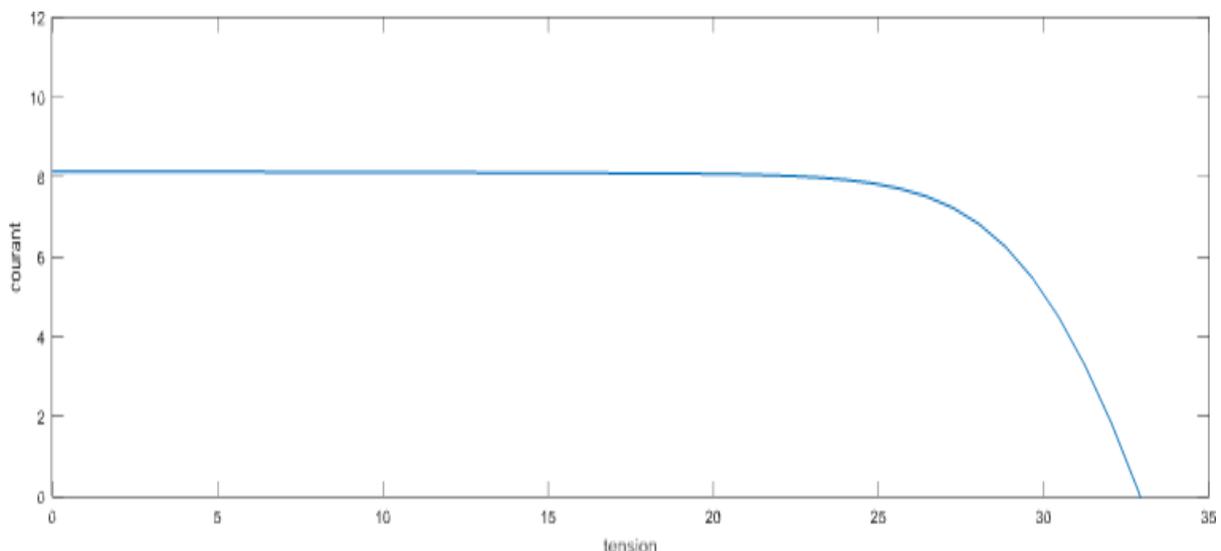


Figure IV.9 : Caractéristique I(V) d'une cellule (T=25°C, G=1000W/m²).

La figure suivant représente la caractéristique puissance – tension d'une cellule solaire dans les conditions de E=1000 W/m² et T=25°C. La puissance maximale est P max=180W.

On remarque que, quand la tension augmente la puissance augmente jusqu'à atteindre la valeur optimale (P max) ensuite elle décroît.

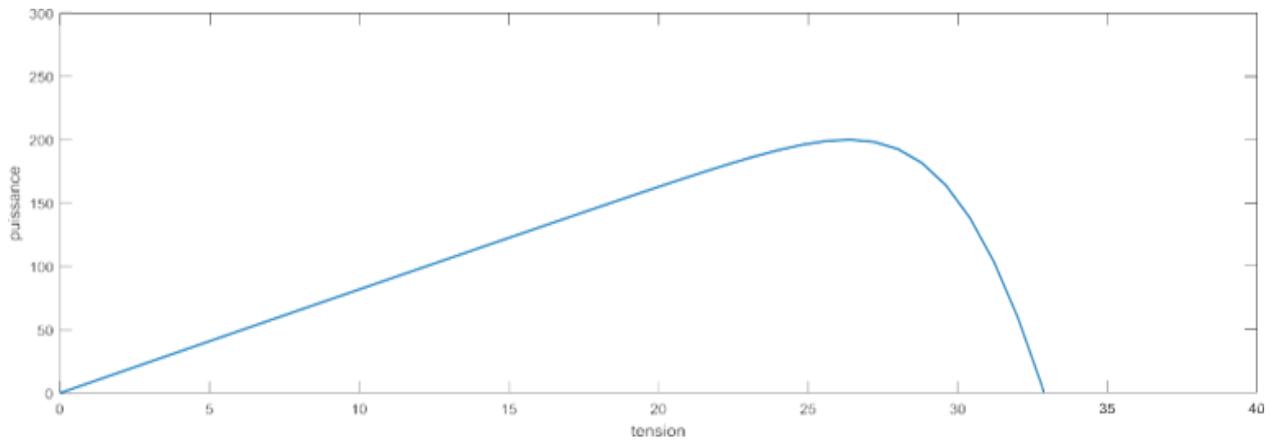


Figure IV.10 : Caractéristique P(V) d'une cellule ($T=25^{\circ}\text{C}$, $G=1000\text{W}/\text{m}^2$).

IV.5. Effets climatiques sur la cellule PV :

IV.5.1. Influence de la température sur la cellule :

Les figures suivantes représentent la caractéristique courant – tension I(V) et puissance Tension P(V) dans la même condition de l'éclairement ($E=1000\text{ W}/\text{m}^2$) et pour différentes Température ($T= 25, 30,40$) :

La tension de circuit ouvert est diminuée avec l'augmentation de la température, par Contre le courant de court-circuit augmente légèrement avec l'augmentation de la température Et la puissance maximale diminue. On constate que la température influence négativement sur la Tension de circuit ouvert.

a) Caractéristique (I-V) :

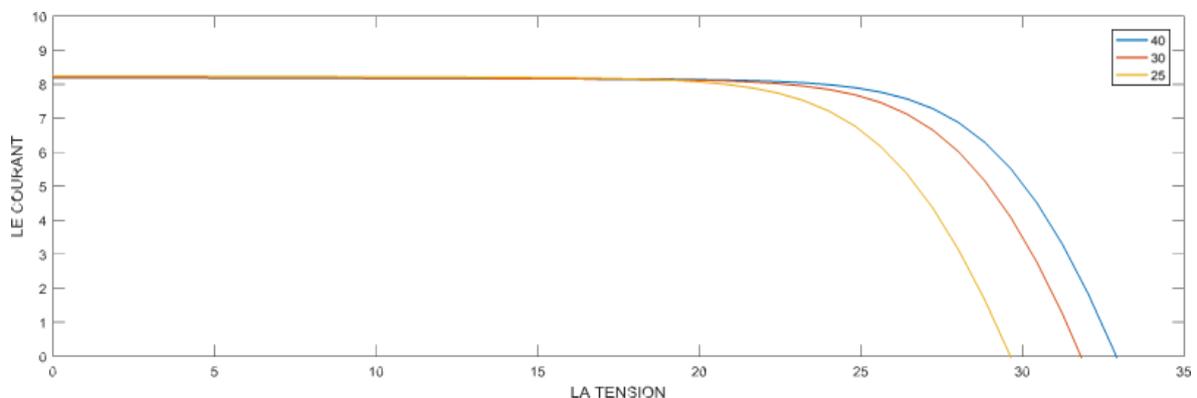


Figure IV.11 : Caractéristique I(V) pour différentes températures ($G=1000\text{W}/\text{m}^2$).

b) Caractéristique (P-V) :

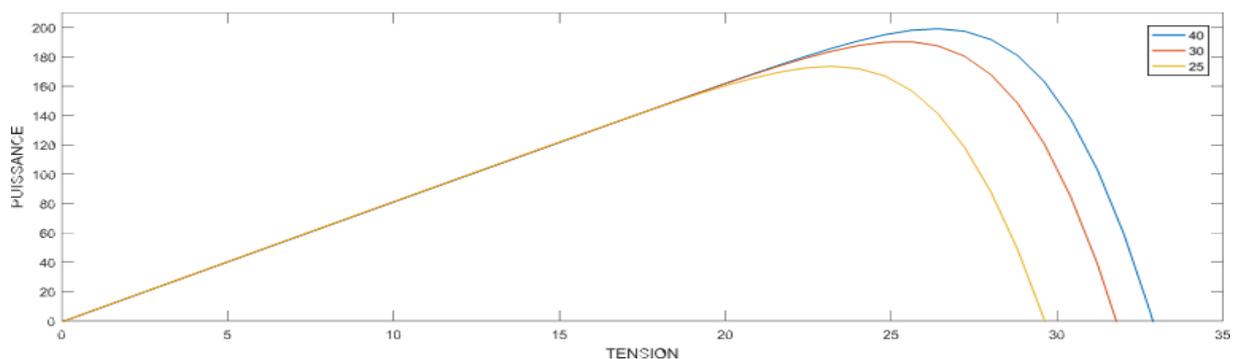


Figure IV.12 : caractéristique P(V) pour différentes températures ($G=1000\text{W}/\text{m}^2$).

On peut donc tirer la conclusion suivante : les cellules PV ont de meilleure performance dans Un environnement froid avec ciel dégagé.

IV.5.2. Influence de l'éclairement sur la cellule :

Les figures suivant représentent la caractéristique (I-V) et (P-V) d'une cellule en fonction de La variation de l'éclairement ($E=600.800.1000 \text{ W/m}^2$) à température constants($T=25^\circ\text{C}$). Le courant de court-circuit est directement proportionnel au rayonnement incident.

Par contre, la tension de circuit ouvert augmente rapidement pour de faibles niveaux d'éclairement, puis lentement pour des niveaux plus élevés.

a) Caractéristique (I-V) :

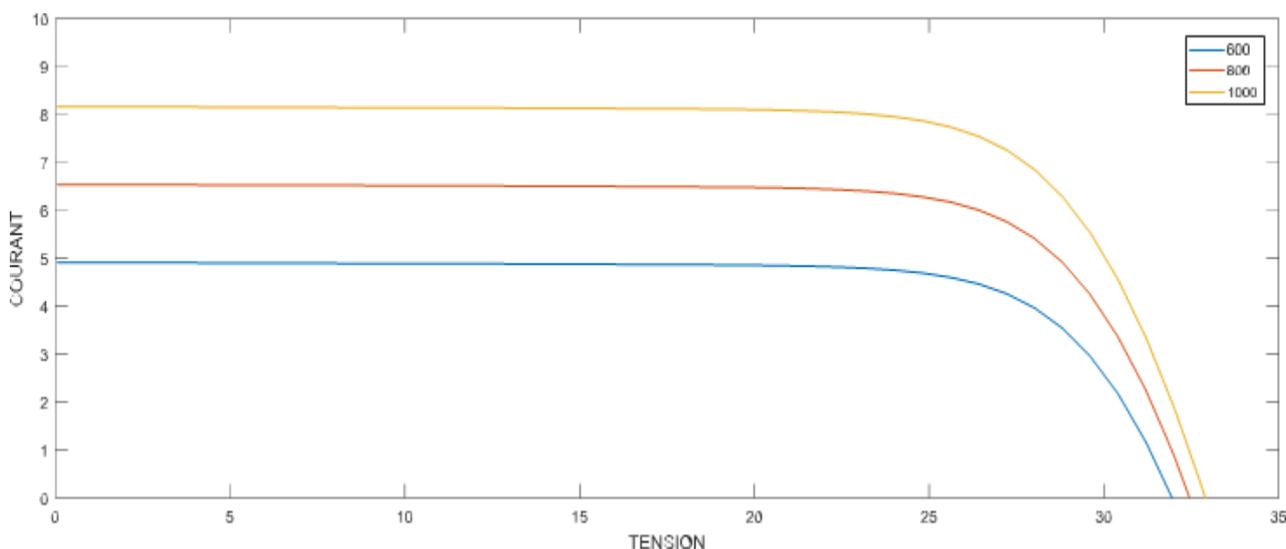


Figure IV.13 : Caractéristique I(V) pour différentes niveaux d'éclairement ($T=25^\circ\text{C}$).

b) Caractéristique (P-V) :

La figure illustre la variation de la puissance délivrée par la cellule en fonction de la Tension pour différentes valeurs d'éclairement, ce qui nous permet de déduire l'influence de L'éclairement sur la caractéristique P(V).

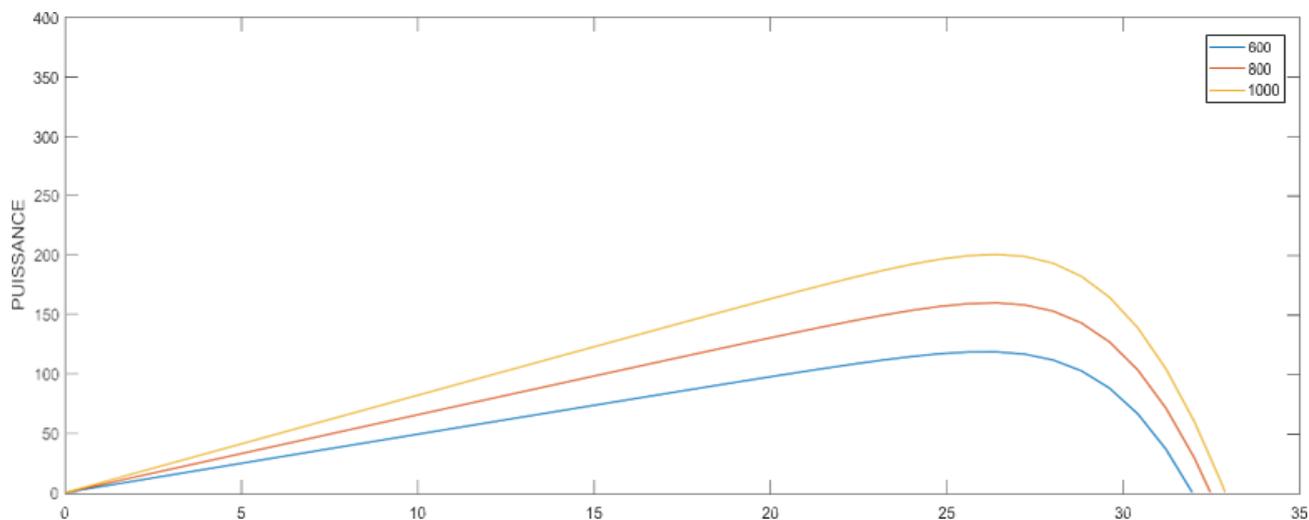


Figure IV.14: Caractéristique P(V) pour différentes niveaux d'éclairement ($T=25^\circ\text{C}$)

Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons présenté la modélisation mathématique de la cellule photovoltaïque.

Ensuite Nous avons utilisé le logiciel MATLAB SIMULINK pour faire une simulation numérique sur le module photovoltaïque (composé de 54 cellules connectées en série) dans les conditions standard ($G=1000 \text{ W/m}^2$, $T=25^\circ\text{C}$).

Nous avons étudié l'influence de la température et l'éclairement sur le fonctionnement de la cellule PV.

On conclut que les cellules PV ont de meilleure performance dans un environnement froid avec ciel dégagé et L'énergie électrique produite par une cellule dépend de l'éclairement qu'elle reçoit sur sa surface.

Conclusion générale

Aujourd'hui, la demande mondiale en énergie évolue rapidement et les ressources naturelles diminuent à cause du développement démographique et du développement de l'industrie. Pour résoudre ce problème, les chercheurs se sont intéressés à l'exploitation des énergies renouvelables. Parmi celles-ci, on trouve l'énergie solaire qui se trouve dans la plupart des régions du monde, dont le renouvellement naturel est assez rapide et inépuisables à l'échelle du temps humain.

Dans notre projet l'étude est basée sur la modélisation et simulation numérique d'un panneau photovoltaïque (PV).

Au premier lieu nous avons vu des modes de production de l'électricité et l'énergie solaire, nous avons vu aussi les notions nécessaires sur le rayonnement solaire, nous avons abordé aussi la différente technologie de la cellule PV, le principe de Fonctionnement d'une cellule photovoltaïque au silicium.

Ensuite, nous avons présenté la modélisation mathématique de la cellule et La simulation d'un générateur photovoltaïque, Nous avons utilisé le logiciel MATLAB pour étudier l'effet Climatique sur le générateur photovoltaïque PV (composé de 54 cellules connectées en série) dans les conditions standard ($G=1000 \text{ W/m}^2$ $T=25^\circ\text{C}$).

En perspective, de cette étude reste bien évidemment la confrontation avec des résultats issus de simulation numérique sur le module photovoltaïque, pour valider la rugosité des résultats obtenus par simulation.

On peut donc tirer la conclusion suivante :

Les cellules PV ont de meilleure performance dans un environnement froid avec ciel dégagé et L'énergie électrique produite par une cellule dépend de l'éclairement qu'elle reçoit sur sa surface.

Bibliographie :

- [1] MAKHELOUF MESSAOUD. Modélisation et optimisation de système de production d'énergies renouvelables couple au réseau, Mémoire de magister 2012 _ université MENTOURI de CONSTANTINE.
- [2] Chenissa hossin, étude comparative de l'alimentation en électricité d'un site isolé par voie classique et système photovoltaïque, cas de willaya de Biskra, tôlage, 2013-2014, Algérie.
- [3] M.Krimi , le gisement solaire (présentation sur power point), Institut de formation en électricité et gaz (IFFEG) ,13 mai Blida, Algérie.
- [4] Haroubia mohammed, étude simulation d'un panneau photovoltaïque, université d'Annaba, année2019, Algérie.
- [5] David funk, l'énergie solaire circonstances et condition d'exploitation au québec, centre universitaire de formation, université de Sherbrooke, 2010, canada.
- [6] <http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/>
- [7] M. Boukli-Hacene omar, “ Conception et réalisation d'un générateur photovoltaïque muni d'un convertisseur MPPT pour une meilleure gestion énergétique”, mémoire de master, département de génie électrique, Université Abou-Bekr Belkaid de Tlemcen ,2011.
- [8] http://www.energies-renouvelables.org/solaire_photovoltaïque.asp
- [9] J. Royer, T. Djiako, E. Schiller et B. S. Sy, « Le pompage photovoltaïque manuel de cours à l'intention des ingénieurs et des techniciens », université d'Ottawa, 1998.
- [10] M. Chaabene, « Gestion énergétique des panneaux photovoltaïques », mémoire de magister, université de Sfax, 2008.
- [11] <https://photovoltaïque-energie.fr/1-effet-photovoltaïque.html>
- [12] <http://energie-developpement.blogspot.com/2012/01/cellulesphotovoltaïque-technologies.html>
- [13] Alain Ricaud, « Les convertisseurs photovoltaïques, Gisement solaire, cellules, modules et champs de module », European Master in Renewable Energy, Valbonne, 2011.
- [14] D. Bouchers, « Optimisation d'un système d'énergie photovoltaïque application au Pompage », mémoire de magister, université Mentouri Constantine, 2007.
- [15] A. T. Singo, « Système d'alimentation photovoltaïque avec stockage hybride pour l'habitat.
- [16] Bendjamâa Ibrahim « Modélisation et commande d'un système de stockage photovoltaïque », mémoire de magister, université Abou-Bakr Belkaid –Tlemcen, 2012.
- [17] M Merad-Boudia « Injection de l'électricité produite par les énergies renouvelables dans le réseau électrique », mémoire de magister, université de Tlemcen, 2010.
- [18] Otman Benseddik, « Etude et optimisation du fonctionnement d'un système photovoltaïque », mémoire de master2, université Kasdi Merbah- Ouargla, 2012.
- [19] B. Mohamed, A. Taha Yacine, « étude technico-économique d'une installation photovoltaïque autonome », mémoire de master, université Belhadj Bouchaïb d'Ain-Temouchent, 2017.
- [20] K. Djermouni « Application des techniques d'intelligence artificielle pour la gestion optimale de l'énergie des sources photovoltaïques », thèse doctorat, université de Bejaia, 2015.
- [21] haloune assia, modélisation de transfert radiatif dans strates supérieur d'un module photovoltaïque, université de Boumerdass, 2016, Algérie.
- [22] Haroubia mohammed, étude simulation d'un panneau photovoltaïque, université d'Annaba, année2019, Algérie.