

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

BADJI MOKHTAR- ANNABA UNIVERSITY

UNIVERSITE BADJI MOKHTAR- ANNABA



جامعة باجي مختار - عنابة

Année : 2019

Faculté : Sciences de L'ingéniorat
Département d'Electrotechnique

MEMOIRE

Présenté en vue de l'obtention du diplôme de MASTER

Intitulé

ETUDE PAR SIMULATION DE LA METHODE P&O POUR UN PANNEAU PHOTOVOLTAÏQUE

Domaine : Sciences et Technologie

Filière : Electrotechnique

Spécialité : Commande électrique

Présentée par : Mounya Zennou
: Guamit Fouzia

Encadrée par : M^{me} Merabet

MCA Université d'Annaba

Devant le jury :

Président par : M^r Mohammedi.

MCB Université d'Annaba

Examineurs : M^r Chine.A

MCA Université d'Annaba

: M^{me} SOLTANI.F

MCB Université d'Annaba

Remerciements

Je remercie premièrement le bon Dieu pour son bien fait.
J'adresse aussi et chaleureusement toute ma gratitude à mon respecté encadreur *Madame Mirabet Leila* pour son aide et son précieux concours.

Mon vif remerciements vont aussi à mes parents qui nous ont donné la lumière et guidés et à tous mes professeurs qui m'ont orientés, assistés et aidés à concevoir ce mémoire ainsi qu'à tous ceux qui, durant ma vie scolaire et universitaire m'ont apporté leurs précieux conseils et m'ont permis d'être ce que je suis aujourd'hui.

Finalement je remercie l'université de Badji Mokhtar Annaba et le département de l'électrotechnique.

Dédicace

Je dédie ce Modest travail :

A mes parents qui mon soutenue tout au long du mon parcours

A MES SŒURS Yassa et Mina

Mon chère frère Barhouma

SPECIALEMENT : A tata zahia et tata warda

Et a toute la famille Guarmit

A mon binôme zennou Mounia

A mes amis iman ben, imen djeddid, roukhaya

Et tout le groupe de commande électrique

Je dédie ce Modest travail :

A ma mère qui ma soutenue tout au long du mon parcours

A MA SŒUR

Mes chers frères

SPECIALEMENT : A

Et a toute la famille zennou

A mon binôme zennou Mounia

A mes amis iman ben, imen djeddid,

Et tout le groupe de commande électrique

Dédicaces

Avec un énorme plaisir, un cœur ouvert et une immense joie, que je dédie mon travail à ma très chère mère, qui m'ont soutenu tout au long de ma vie, à mon père, la miséricorde de Dieu et de repos âme de paradis.

Ainsi à ma sœur : Amel (Aridj, Tasnim, Tawba),

Mes frères : Slimen, Abd errazek (chouchou)

Mes cousines : Ferielle, Lamia et Ahlem,

Mes cousins : Salah, Abd erraouf

Mes meilleurs ami(e)s : Kawther, Amira

Pour tous mes amis et mes collègues de l'étude

En particulier à mon binôme Fouzia

A toute personne qui m'a encouragé ou aidé tout au long de mes études.

Mayrou

Dédicaces

Avec un énorme plaisir, un cœur ouvert et une immense joie, que je dédie mon travail à mes très chers respectueux et magnifiques parents qui m'ont soutenu tout au long de ma vie.

Mon frère : Barhouma

A mes sœur : yassa et mina

Spécialement a tata zahia et tata warda et tout la famille guarmit

Mes meilleurs ami(e)s : imen ben, imen djedid, roukhaya

Pour tout le groupe de commande électrique.

En particulier à mon binôme Mounya.

A toute personne qui m'a encouragé ou aidé tout au long de mes études.

fouzi

Sommaire

Introduction Général	03
<u>Chapitre 1 : les énergies renouvelable</u>	
I.1. Introduction	06
I.2. Définition d'énergie renouvelable	06
I.3. Les familles de l'énergie renouvelable	07
I.3.1. L'énergie éolienne	07
I.3.2. La biomasse	08
I.3.3. L'énergie hydraulique	09
I.3.4. L'énergie géothermique	10
I.3.5. L'énergie des mers ou énergie marine	11
I.3.6. Energie solaire	12
I.3.6.1. l'énergie solaire thermique	13
I.3.6.2. l'énergie photovoltaïque	13
I.3.6.3. l'énergie thermodynamique	14
I.4. Les énergies renouvelables en Algérie	14
I.4.1. Energie photovoltaïque en Algérie	14
I.4.2. Gisement solaire en Algérie	15
I.4.3. Potentiel solaire en Algérie	15

I.4.4. Potentiel énergétique en Algérie	17
I.5. Bilan des réalisations	17
I.5.1. Réalisation au sud	17
I.5.2. Réalisation au nord	20
I.6. Projet du CDER	20
I.6.1. Programme solaire de Batna	20
I.6.2. Programme solaire d'Oum-El-Bouaghi	21
I.6.3. Programme solaire de Tiaret	21
I.6.4. Projets en cours de réalisations	21
I.7. Programme national des énergies renouvelables	22
I.8. Principales sociétés intervenant au secteur	23
I.8.1 New Energy Algeria	23
I.8.2. Agence de Promotion et de Rationalisation de l'Utilisation de l'Energie	23
I.8.3. Centre de Développement des Energies Renouvelables	23
I.9. conclusion	24

CHAPITRE II

LES SYSTEMES PHOTOVOLTAIQUE SOLAIRE

II.1. Introduction	26
II.2. Soleil	26
II.2.1. Constante solaire	28
II.2.2. Trajectoire du soleil	29
II.2.3. Masse d'air	29

II.3.rayonnement solaire	30
II.3.1.composantes du rayonnement solaire	31
II.3.2.Rayonnement direct	32
II.3.3.Rayonnement diffus	32
II.3.4.Rayonnement réfléchi	32
II.3.5.Le rayonnement global	32
II.4.Historique	33
II.5.La conversion de la lumière en électricité	35
II.6.Cellule photovoltaïque	36
II.6.1.Les semi-conducteurs	37
II.6.2.Les matériaux semi-conducteurs	37
II.6.2.1.Semi-conducteur intrinsèque	38
II.6.2.2.Semi-conducteur extrinsèque	38
II.6.3.Dopage de type N	38
II.6.3.Dopage de type P	39
II.7.Principe de fonctionnement d'une cellule solaire photovoltaïque	41
II.8.TÉCHNOLOGIES DES CELLULES PHOTOVOLTAIQUES	42
II.9.Caractéristique électrique	44
II.9.1.Circuit électrique équivalent	44
II.9.2.Les grandeurs caractéristiques d'une cellule solaire	46
II.10.Les zones de caractéristique I-V d'un générateur photovoltaïque	49

II.11.Module photovoltaïque	50
II.11.1.Panneau photovoltaïque	51
II.11.2.La constitution d'un module photovoltaïque	53
II.11.3.Les principales caractéristiques d'un module	54
II.12.Influence de l'Éclairement	55
II.13.Influence de la Température	56
II.14.Association des cellules	57
II.14.1.Connexion en série	58
II.14.2.Connexion en parallèle	58
II.14.3.Connexion mixte	59
II.15.Déséquilibre dans un générateur PV	60
II.15.1.Protection par diode anti-retour	60
II.15.2.Protection par diode by-pass	61
II.16.Avantages et inconvénients d'une installation PV	62

CHAPITRE III

ALGORITHMES MPPT POUR UN PANNEAU PHOTOVOLTAÏQUE

III.1.Introduction	64
III.2.Les Hacheurs	65
III.2.1.Type des hacheurs	65
III.2.2.Hacheur Buck	66
a)-Fonctionnement	66
b) Modèle mathématique équivalent	67

III.2.3.Hacheur boost	68
a) Fonctionnement	69
b) Modèle mathématique équivalent	69
III.3.La commande MPPT	71
III.3.1.Suivi de la puissance maximale du générateur photovoltaïque	71
III.3.2.Principe du MPPT	71
III.3.3.Classification des techniques MPPT	74
III.3.4.Les premiers types de technique MPPT	74
III.3.5. Evolution du point d'opération du générateur PV	75
III.4.Les méthodes de poursuite de MPP	77
III.4.1.Méthodes à contre réaction de tension	77
III.4.2.Méthodes à contre réaction de courant	78
III.4.3.Méthodes à contre réaction de puissance	78
III.4.3.1.Algorithme perturbation et observation	79
III.4.3.2.Algorithme incrémentation de la conductance	79
III.5. Conclusion	81

CHAPITE IV

SIMULATION DE LA METHODE P&O POUR LA POURSUITE du MPP

IV.1 Simulation des caractéristiques du générateur photovoltaïque à température et éclairage constant	82
IV.2 Simulation de l'influence des variations climatique sur les caractéristiques du Générateur	85
IV.2.1 Variation de l'éclairage	85
IV.2.2 Variation de la température	86

IV.3 Simulation de l'algorithme MPPT (Perturbe and Observe) d'un générateur PV associé à un hacheur survolteur	87
IV.3.1 Maximisation de la puissance du générateur pour un éclairement constant ($G=1000W /m^2$)	87
IV.3.1 Maximisation de la puissance du générateur pour un éclairement variable de $1000W /m^2$ à $400w/ m^2$	92
Conclusion générale	95

LISTE DES FIGURES

CHAPITRE I

Figure (I.1) : Une éolienne

Figure (I.2) : une biomasse

Figure (I.3) : un barrage

Figure (I.4) : une centrale géothermique

Figure (I.5) : mer

Figure (I.6) : Types d'énergie solaire

Figure (I.7) : Les énergies renouvelables en Algérie

**Figure (I.8) : Irradiation globale journalière moyenne reçue sur un plan horizontal
au mois de juillet**

Figure (I.9) : Programme d'électrification de 20 villages du sud

Figure (I.10) : Programme complémentaire de soutien à la croissance

Figure (I.11) : Programme de développement des wilayas des hauts plateaux

CHAPITRE II

Figure (II.1) : Coupe schématique du soleil.

Figure (II.2) : Course du soleil

Figure(II.3) : Représentation graphique des spectres AM0 et AM1, 5

Figure (II.4) : Analyse spectrale du rayonnement solaire

Figure (II.5) : Composante du rayonnement global sur un plan horizontal

Figure(II.6) : Conversion de l'énergie solaire en électricité

Figure (II.7) : Structure basique d'une cellule solaire.

Figure (II.8) : dopage de type N

Figure (II.9) : dopage de type P

Figure (II.10) : jonction PN

Figure (II.11) : la zone de transition

Figure(II.12) : Principe de la conversion photovoltaïque

Figure(II.13) : Caractéristique I-V d'une cellule solaire; à l'obscurité et sous éclairement

Figure(II.14) : Circuit électrique équivalent d'une cellule solaire a jonction P-N

Figure (II.15) : Les différentes zones de Caractéristique I-V entre générateur et module Photovoltaïque

Figure(II.16) : Module photovoltaïque

Figure(II.17) : Câblage des cellules dans un module

Figure(II.18) : Panneau photovoltaïque

Figure(II.19) : Boite de dérivation

Figure (II.20) : Ruban métallique d'une cellule

Figure (II.21) : Encapsulation des cellules

Figure (II.22) : Exemple de caractéristique courant-tension d'un module

Figure (II.23) : La caractéristique $I=f(v)$ en fonction de l'éclairement

Figure (II.24) : La caractéristique $P=f(v)$ en fonction de l'éclairement

Figure (II.25) : La caractéristique de $I=f(V)$ en fonction de température

Figure (II.26) : La caractéristique de $P= f(V)$ en fonction de température

Figure (II.27) : Association des cellules

Figure (II.28) : Connexion en série

Figure (II.29) : Connexion en parallèle

Figure (II.30) : Connexion mixte

Figure (II.31) : Protection par diode anti –retour

Figure (II.32) : Protection par diode by-pass

CHAPITRE III

Figure (III.1) : les différents types de convertisseurs statiques

Figure (III.2) : Symbole d'un convertisseur DC-DC

Figure (III.3) : Schéma électrique d'un hacheur Buck

Figure (III.4) : Chronogrammes de courant et tension d'un hacheur Buck

Figure (III.5) : Schéma électrique d'un hacheur Buck fermé

Figure (III.6) : Schéma électrique d'un hacheur Buck

Figure (III.7) : Schéma électrique d'un hacheur boost

Figure (III.8) : Chronogrammes de courant et tension d'un hacheur boost

Figure (III.9) : Schéma électrique d'un hacheur boost fermé

Figure (III.10) : Schéma électrique d'un hacheur boost ouvert.

**Figure (III.11) : Chaîne de conversion d'énergie solaire comprenant une commande
MPPT**

**Figure (III.12) : Recherche et recouvrement du Point de Puissance Maximale a) suite à
une variation d'éclairement, b) suite à une variation de charge, c) suite à
Une variation de température**

Figure (III.13) : Principe classique d'une MPPT pouvant être implantée en numérique

Figure (III.14) : Principe de fonctionnement d'une commande MPPT

**Figure (III.15) : Changement d'éclairement et conséquence sur les courbes de puissance
d'un générateur PV ainsi que sur l'adaptation source-charge**

**Figure (III.16) : Principe de la méthode à contre réaction de tension avec tension de
Référence**

Figure (III.17) : Principe de la méthode MPPT à courant de référence en fonction d'Isc

Figure (III.18) : Algorithme de perturbation et de l'observation (P et O).

Figure (III.19) : Algorithme incrémental conductance

CHAPITE IV

Figure IV.1 Schéma de montage pour la simulation des caractéristiques du générateur

Photovoltaïque

Figure. (IV. 2.)a : Caractéristique $I=f(V)$ du générateur photovoltaïque pour

($G=1000\text{w/m}^2$ et $T=25^\circ$)

Figure (IV.2.)b : Caractéristique $P=f(V)$ du générateur photovoltaïque pour

($G=1000\text{w/m}^2$ et $T=25^\circ$)

Figure (IV.3) : Caractéristiques $I=f(V)$, $P=f(V)$ du générateur photovoltaïque pour

différents éclairement à température constante ($T=25^\circ$)

Figure (IV. 4) : Caractéristiques $I=f(V)$, $P=f(V)$ du générateur photovoltaïque pour

différents températures é éclairement constant ($G=1000\text{w/m}^2$)

Figure (IV.5) : Caractéristique $P=f(t)$ du générateur photovoltaïque sans MPPT

($G=1000\text{w/m}^2$ et $T=25^\circ$)

Figure (IV.6) : Schéma pour l'optimisation du point maximale de puissance par

l'algorithme P&O

Figure (IV. 7) : schéma du hacheur boost

Figure (IV.8) : Caractéristique $P=f(t)$ du générateur photovoltaïque avec MPPT

($G=1000\text{w/m}^2$ et $T=25^\circ$), $D=0.5$

Figure (IV.9) : Caractéristique $V=f(t)$ du générateur photovoltaïque avec MPPT

($G=1000\text{w/m}^2$ et $T=25^\circ$), $D=0.5$

Figure (IV. 13) : Schéma pour l'optimisation du point maximale de puissance par l'algorithme P&O pour un affaiblissement de l'éclairement

Figure (IV. 14) : Variation de l'éclairement

Figure (IV. 16) : Caractéristique $P=f(t)$ du générateur photovoltaïque par MPPT lors de diminution de l'éclairement

LISTE DES TABLEAUX

CHAPITRE I

Tableau (I.1) : comparaison entre les différentes énergies renouvelables

Tableau (I.2) : différents types de géothermie

Tableau (I.3) : Potentiel solaire en Algérie

Tableau (I.4) : Puissance photovoltaïque installée dans le grand sud

CHAPITRE III

Tableau(II.1) : Caractéristiques principales du soleil

Tableau (II.2) : Evénements notables dans l'histoire du photovoltaïques

Tableau(II.3) : Rendement énergétique des différents types de cellules photovoltaïques.

CHAPITRE IV

Tableau IV. 1 Caractéristiques du panneau photovoltaïque

LISTE DES SYMBOLES

E : Eclairage (w.m^{-2})

H : Hauteur du soleil (Deg)

I_{obs} : Courant d'obscurité (A)

I_s : Courant de saturation d'Ampère(A)

n : facteur de qualité de la diode ; sans dimension

V_{th} : le potentiel thermique en Volt(V)

K : coefficient de Boltzman ($1,38.10^{-23} \text{ J.K}^{-1}$)

T : la température absolue en Kelvin(K)

q : la charge absolue d'un électron en coulomb ($1,60281. 10^{-19}$)

I_{ph} : le photon-courant (A)

R_p : Résistance parallèle shunt(Ohm)

R_s : Résistance série (Ohm)

G_{sh} : la conductance shunt

V : la tension électrique en Volt(V)

V_j : aux bornes de la jonction pn en Volt(V)

V_s : tension de seuil en volt(V)

I_{cc} : Courant de court-circuit(A)

V_{co} : Tension a circuit ouvert en Volt(V)

I_m : courant du point de fonctionnement (A)

V_m : tension du point de fonctionnement en Volt(V)

V₀ : la tension moyenne aux bornes de l'inductance Volt(V)

V_i : la source fournie de l'énergie a la charge et a l'inductance en Volt(V)

P_m : puissance maximale (W)

S : surface totale de la cellule (m^2)

P₀ : puissance optimal (W)

G : l'éclairage de référence (1000 W.m^{-2})

I_{sc} : courant de court-circuit (A)

P_{pv} : la puissance disponible en sortie du GPV (W)

V_{pn} : la tension a la sortie du GPV en Volt (V)

I_{pv} : le courant de sortie du GPV (A)

N : nombre de cellules en série

N_p : nombre de cellules en parallèle

M : nombre de branche en séries

N : nombre de branches en parallèle

Abréviation utilisée

ENR : Energie renouvelable

Kwc : Kilo Watt crête

CDER : Centre de développement des énergies renouvelable

NEAL: new energy Algeria

APRUE : agence de promotion et de rationalisation de l'utilisation de l'Energie

PV : photovoltaïque

GPV : générateur photovoltaïques

AMx : Air mass

Photo : un mot grec signifiant lumière

Volta : nom de physicien italien Alessandro volta

Si : silicium

Ge : germanium

Cdte : Tellure de Cadmium

CIS : Cuivre indium Sélénium

GaAs: arseniuret de gallium

FF: facteur de forme

EVA: Ethylene Acétate de Vinyle

I-V : caractéristique courant-tension de la photopile

DC : courant continue (Direct Current)

AC : Courant Alternatif (Alternative current)

MPPT: Maximum Power Point Tracking

P&O: perturb and observe

Introduction général

La production d'énergie est un défi de grande importance pour les années à venir effet, les besoin énergétique des sociétés industrialisées ne cessent d'augmenter. Par ailleurs, les pays en voie de développement, un grand partie de la production mondiale d'énergie est assurer à partir des sources fossiles.

La consommation mondiale de l'électricité observée durant ces dernières décennies est fortement liée au développement de l'industrie, du transport et des moyens de communications. De nos jours, une grande partie de la production électrique est produite à partir de ressources non renouvelables comme le charbon, le gaz naturel, le pétrole et l'uranium. Leur vitesse de régénération est extrêmes lente à l'échelle humaine. Ce qui entrainera a plus ou moins courte échéance un ne risque non nul d'épuisement de ces ressources. D'autant plus que la demande ne cesse de croitre et dès à présent à être supérieure à l'offre, se traduisant par exemple par une forte fluctuation du prix mondial du pétrole.

On distingue plusieurs types de sources d'énergies renouvelables : l'énergie hydroélectrique, l'énergie géothermique, l'énergie éolienne, l'énergie de la biomasse et l'énergie photovoltaïque. Aujourd'hui, les énergies renouvelable deviennent progressivement des énergies a part entière, rivalisant avec des énergies fossiles du point de vue cout et performance de production. Cependant, leur système de conversion de l'énergie en électricité souffre souvent d'un manque d'optimisation qui en fait encore des systèmes trop chers, et présentant des déficiences importantes en rendement et en fiabilité. Pour cela, bien qu'il existe de plus en plus de travaux de recherches prouvant la fiabilité de sources comme, par exemple, l'énergie photovoltaïque (PV) ou l'énergie éolienne, beaucoup de réticentes existent encore pour installer ces systèmes à grande échelle, autant en production de masse que chez des particuliers.

Bien que l'énergie photovoltaïque soit encore depuis de nombreuses années comme source pouvant produire de l'énergie électrique allant de quelques milliwatts au mégawatt, il est solution attrayante comme remplacement ou complément des sources conventionnelles d'approvisionnement en électricité e raison de ces nombreux avantages :

- ✚ La production de cette électricité renouvelable n'émet pas de gaz à effet de serre, il fait cependant réduire l'impact environnemental de la fabrication du système.
- ✚ La lumière du soleil étant disponible partout et quasi-inépuisable, l'énergie photovoltaïque est exploitable aussi bien en montagne, dans un village isolé que dans le centre d'une grande ville, et aussi bien au sud que dans le nord.
- ✚ L'électricité photovoltaïque peut être produire au plus près de son lieu de consommation, de manière décentralisée, directement chez l'utilisateur, ce qui la rend accessible a une grand partie de la population mondial.

Le but dans ce travail est d'établir un model permettant de simuler la diminution de l'efficacité de puissance électrique produits par un panneau cause par l'altération des matériaux dans le temps.

La rédaction de notre mémoire se compose de quatre chapitres

:

- ✚ Dans le premier chapitre, nous avons présenté généralité sur l'énergie renouvelable et aussi l'impact des énergies renouvelables et aussi l'impact de l'énergie renouvelable sur l'environnement. En particulier, nous avons décrit le photovoltaïque en Algérie, le potentiel solaire, le potentiel énergétique et les projets réalisés mis en service. Puis, nous avons procédé à la présentation des projets en cour de réalisation sur le territoire national qui couvrent différents domaine.
- ✚ Dans le deuxième chapitre, nous avons présenté généralité sur les systèmes photovoltaïques, composantes du rayonnement solaire et la conversion de la lumière en électricité, construction des cellules photovoltaïque et l'effet photovoltaïque, principe de fonctionnement, technologies des cellules photovoltaïque et les avantages et les inconvénients d'une installation photovoltaïque.
- ✚ Dans le troisième chapitre, on a étudié le convertisseur (DC-DC) et utilisés les méthodes de la commande MPPT.
- ✚ Dans le quatrième chapitre, on a étudié une modalisation et simulation par MATLAB SIMULINK de chaque élément du système (PV) réalisé, convertisseur, boost et commande MPPT « perturbe and observe ». nous terminerons ce travail par une conclusion général.

CHAPITRE I

LES ENERGIES RENOUVELABLES

CHAPITRE 1 : Les énergies renouvelables

I.1. Introduction :

Les énergies renouvelables connaissent depuis le milieu de l'année 1990 une vogue qui semble se renforcer d'année en année. Ces énergies sont les plus anciennement utilisées par l'humanité, elles sont essentiellement tirées des cinq éléments : la terre, l'eau, l'air et le feu et du soleil. Les énergies renouvelables sont inépuisables et d'un usage immémorial. On désigne aujourd'hui par énergies renouvelables un ensemble de filières diversifiées dont la mise en œuvre n'entraîne en aucune façon l'extinction de la ressource initiale. Les sources d'énergie renouvelables sont celles qui produisent de l'électricité ou de l'énergie thermique sans épuiser nos ressources. En font partie les énergies solaire, éolienne, hydraulique et géothermique, et celles que l'on tire de la biomasse et des déchets. Tirées du vent, l'énergie éolienne permet la production d'électricité. Provenant du soleil, le solaire photovoltaïque permet la production d'électricité, de même que le solaire thermodynamique, tandis que le solaire thermique permet la production de chaleur ou de froid. Extrayant la chaleur de la terre, la géothermie conduit à l'obtention de chaleur, de froid ou d'électricité.

I.2. Définition d'énergie renouvelable :

On considère qu'une énergie est renouvelable, toute source d'énergie qui se renouvelle assez rapidement pour être considérée comme inépuisable (d'où son nom) c'est-à-dire, sa vitesse de formation doit être plus grande que sa vitesse d'utilisation [5], [7].

Les énergies renouvelables sont issues de phénomènes naturels réguliers ou constants provoqués principalement par le Soleil (l'énergie solaire mais aussi hydraulique, éolienne et biomasse...), la Lune (énergie marémotrice, certains courants : énergie hydrolienne...) et la Terre (géothermique profonde...), à l'échelle de la durée de vie de l'humanité. Ce n'est pas le cas pour les combustibles fossiles et nucléaires [5], [8], [4].

CHAPITRE 1 : Les énergies renouvelables

I.3. Les familles de l'énergie renouvelable :

ENERGIES	COUT	ENCOMBREMENT	RENDEMENT	INTEGRATION DANS LE PAYSAGE	RESPECT DE L'ENVIRONNEMENT
SOLAIRE	Moins de 1000€ le m ²	Faible pour une installation à domicile	De 11% à 25%	Facile à la ville et à la campagne	Pas de production de déchets
EOLIENNE	Environ 100000 € pour une de 25 à 80 m ²	Conséquent pour les grandes tailles	En fonction du vent, environ 10000€ pour une d'1kwatt	Pas d'installation en ville et difficile à la campagne	Pas de production de déchets et recyclage des installations
BIOMASSE	Plafond des dépenses éligibles de 40 000 € HT	Permettre de dimensionner la taille de l'installation	45 à 65 % de chaleur 15 à 45 % d'électricité	Dans des centrales biomasses. Une technique utilisée par l'industrie	Fraction biodégradable des produits, déchets et résidus provenant de l'agriculture
HYDRAULIQUE	Cout d'investissement : 1400 à 2000 €/kW Cout de production : 2 à 8 €/kWh	Moins encombrante que la transmission mécanique	Peut développer des forces importantes	Le barrage Centrale produit l'électricité Les lignes électriques	N'émet pas de gaz à effet de serre Une digestion anaérobie et dégage du méthane.
GÉOTHERMIQUE	Forages : de 10 à 15 m us \$ Construction : 60 m us \$ Fonctionnement : 30 m us \$	Peut-être employée dans un but domestique	Le rendement est de l'ordre de 33%	Centrale géothermique	N'émet aucun gaz à effet de serre

Tableau (I.1) : comparaison entre les différentes énergies renouvelables

I.3.1.L'énergie éolienne :

L'énergie éolienne est une source d'énergie qui dépend du vent. Le soleil chauffe inégalement la Terre, ce qui crée des zones de températures et de pression atmosphérique différentes tout autour du globe. De ces différences de pression naissent des mouvements d'air, appelés vent. Cette énergie permet de fabriquer de l'électricité dans des éoliennes, appelées aussi aérogénérateurs, grâce à la force du vent.

Une éolienne est composée de 4 parties :

- le mât
- l'hélice

CHAPITRE 1 : Les énergies renouvelables

- la nacelle qui contient l'alternateur producteur d'électricité
- Les lignes électriques qui évacuent et transportent l'énergie électrique (lorsqu'elle est raccordée au réseau)
- C'est une énergie qui n'émet aucun gaz à effet de serre et sa matière première, le vent, est disponible partout dans le monde et totalement gratuite.



Figure (I.1) : Une éolienne

I.3.2.La biomasse :

L'utilisation de la biomasse remonte au temps où l'homme découvrait le feu et se servait encore du bois pour se chauffer et cuire ses aliments ! Il s'agit de l'énergie contenue dans les plantes et les matières organiques. La biomasse des plantes provient du soleil, quand la plante, grâce à la photosynthèse, absorbe l'énergie solaire. Ensuite, les animaux absorbent à leur tour ces plantes ! La biomasse provient de divers secteurs et matières comme le bois, les récoltes (cultivées spécialement pour la production d'énergie), les résidus agricoles et forestiers, les déchets alimentaires et les matières organiques issues des déchets municipaux et industriels. Il existe toute une variété de technologies pour convertir l'énergie de la biomasse en une forme réutilisable. Ces technologies changent l'énergie en formes utilisables directement (chaleur ou électricité) ou en d'autres formes telles que le biocarburant ou le biogaz.



I.3.3.L'énergie hydraulique :

L'eau est également une source renouvelable puisqu'elle se régénère grâce au cycle d'évaporation et des précipitations 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. Sa force est connue et exploitée depuis des milliers d'années au travers des barrages, des moulins à eau et des systèmes d'irrigation. Plusieurs technologies permettent d'exploiter l'énergie produite par la chute ou le mouvement de l'eau. Les roues à aubes peuvent la transformer directement en énergie mécanique (moulin à eau), tandis que les turbines et les générateurs électriques la transforment en électricité.

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

C'est une énergie qui n'émet pas de gaz à effet de serre, elle est utilisable rapidement grâce aux grandes quantités d'eau stockée et c'est une énergie renouvelable très économique à long terme.



Figure (I.3) : un barrage

I.3.4. L'énergie géothermique :

L'énergie géothermique désigne l'énergie créée et emmagasinée dans la terre sous forme thermique.

Elle est parfois libérée à la surface par des volcans ou des geysers, mais elle peut aussi être accessible à tout moment, comme dans les sources d'eau chaude. La géothermie peut servir à produire de l'électricité ou à chauffer et refroidir. L'énergie est extraite de réservoirs souterrains enfouis très profondément et accessibles grâce au forage, ou de réservoirs plus proches de la surface. L'énergie géothermique peut également être employée dans un but domestique, grâce aux petites pompes à chaleur, par exemple.

Une centrale géothermique est composée de 3 parties :

- la pompe
- l'usine qui produit l'électricité
- les lignes électriques qui la transportent

C'est une énergie qui n'émet aucun gaz à effet de serre et sa matière première, la chaleur de la Terre, est totalement gratuite.

CHAPITRE 1 : Les énergies renouvelables



Figure (I.4) : une centrale géothermique

Type de géothermie	Caractéristiques du réservoir de chaleur	Utilisation
Géothermie de surface	Sol entre 10 et 15 °C (le sol est principalement chauffé par le soleil)	Chauffage et rafraîchissement de locaux avec pompe à chaleur
Très basse énergie	Nappe à moins de 100m température 30° C	Chauffage et rafraîchissement de locaux avec pompe à chaleur
Basse énergie	30 °C < <i>température</i> < 150°C	Chauffage urbain utilisation industrielle thermalisme balnéothérapie
Moyenne et haute énergie	180°C < <i>température</i> < 350°C	Production d'électricité

Tableau (I.2) : différents types de géothermie

I.3.5. L'énergie des mers ou énergie marine :

C'est une énergie renouvelable très peu exploitée jusqu'ici. Elle désigne l'énergie produite par les vagues et les marées, ainsi que l'énergie thermique de l'océan chauffé par les rayons du soleil. Les océans, qui couvrent presque 70 % de la surface du globe, pourraient constituer la source d'énergie renouvelable du futur, même si, pour l'instant, leur exploitation pour produire de l'électricité n'est pas rentable



Figure (I.5) : mer

I.3.6. Energie solaire :

Énergie produite à partir de la conversion du rayonnement solaire, c'est une énergie renouvelable. C'est également une source d'énergie intermittente (pas d'énergie solaire la nuit). L'énergie solaire, peut être convertie en chaleur ou en électricité.

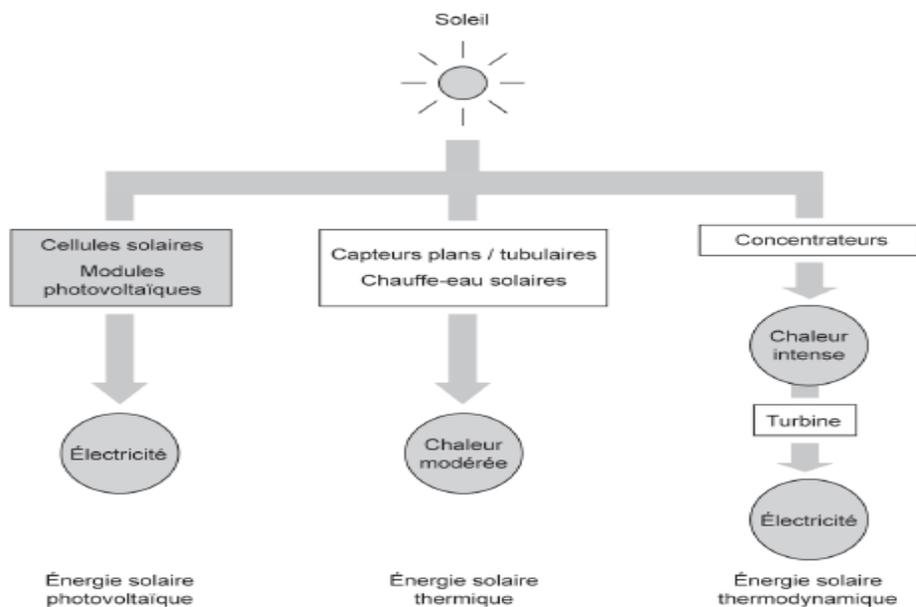


Figure (I.6) : Types d'énergie solaire.

CHAPITRE 1 : Les énergies renouvelables

Il existe différents types d'énergies solaires tout d'abord nous allons les citer et ensuite les expliquer :

- L'énergie thermique
- L'énergie photovoltaïque
- L'énergie thermodynamique

I.3.6.1. l'énergie solaire thermique :

Cette énergie est la transformation des rayons du soleil en énergie thermique c'est-à-dire en chaleur. Cette énergie peut être utilisée directement soit pour le chauffage mais aussi pour obtenir de l'eau chaude.

Le principe général est de concentrer les rayons solaires en un seul endroit. Ceux-ci sont alors piégés par des capteurs solaires thermiques vitrés qui transmettent l'énergie solaire à des absorbeurs métalliques. Ces mêmes absorbeurs réchauffent alors un réseau de tuyaux où circule un fluide caloporteur (c'est-à-dire un fluide qui reçoit de la chaleur en un point de son circuit et qui la cède en un autre point). Cet échangeur va ensuite chauffer à son tour de l'eau stockée dans un cumulus, cette même eau ira alimenter chauffe-eau (pour l'eau sanitaire) et systèmes de chauffages solaires.

I.3.6.2. l'énergie photovoltaïque :

Cet effet photovoltaïque a été découvert par Alexandre Edmond Becquerel en 1839. Cette forme d'énergie reste aujourd'hui quantitativement négligeable mais on lui prédit un grand avenir, son coût baissera fortement dans les années à venir. Cette énergie sera durable et ne devra nécessiter d'aucun entretien. Elle peut répondre aux besoins en énergie électrique d'une maison, contrairement aux autres formes d'énergies solaires qui ne produisent que de la chaleur grâce aux capteurs du panneau qui transforment les rayonnements du soleil en cellule photovoltaïque. Une cellule photovoltaïque est un composant électronique qui exposé à la lumière, génère une tension électrique, ces cellules se présentent sous la forme de deux fines plaques. Le courant qui en ressort est continu donc cette énergie produit de l'électricité.

CHAPITRE 1 : Les énergies renouvelables

I.3.6.3. l'énergie thermodynamique :

L'énergie solaire thermodynamique est un moyen de produire de l'électricité et d'accumuler l'énergie thermique nécessaire à cette production pendant plusieurs heures après le coucher du soleil, dans des centrales solaires à concentration. Le principe est de concentrer la chaleur du soleil par des miroirs pour chauffer une fluide haute température (plusieurs centaines de degrés) afin de générer de la vapeur par échange thermique pour ensuite produire de l'électricité au moyen d'une turbine. Le fluide utilisé peut conserver sa chaleur pendant plusieurs heures après le coucher du soleil, cela permet de produire de l'électricité en début de soirée, au moment où la consommation est la plus importante.

I.4. Les énergies renouvelables en Algérie :

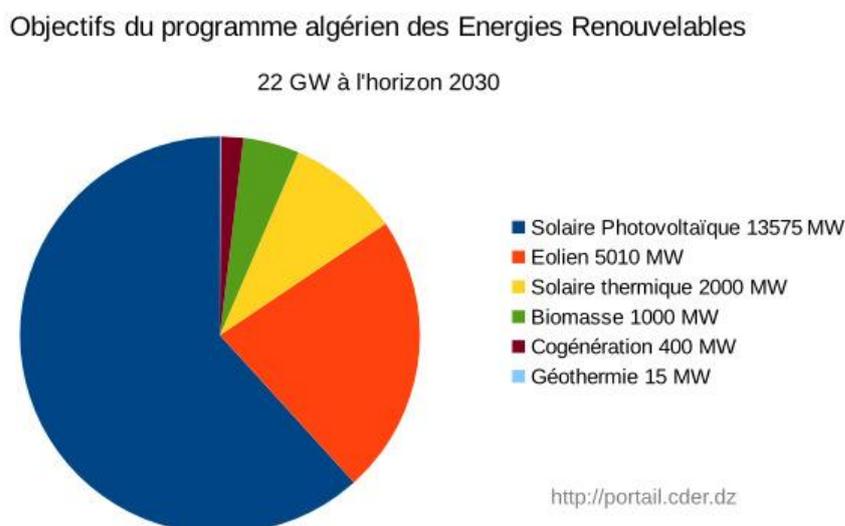


Figure (I.7) : Les énergies renouvelables en Algérie

I.4.1. Energie photovoltaïque en Algérie :

L'énergie solaire photovoltaïque est l'un des axes de la politique énergétique, économique et financière en l'Algérie comme dans le monde. L'objectif de la stratégie de développement des énergies renouvelables en Algérie est d'arriver à atteindre, à l'horizon 2017, à une part de ces énergies dans le bilan électrique national qui serait de 5% [7].

L'introduction des énergies renouvelables, en particulier l'énergie solaire photovoltaïque aura pour conséquence :

- Une plus grande exploitation du potentiel disponible,

CHAPITRE 1 : Les énergies renouvelables

- Une meilleure contribution à la réduction de CO₂
- Une réduction de la part des énergies fossiles dans le bilan énergétique national,
- Un développement de l'industrie nationale,
- La création de l'emploi

I.4.2. Gisement solaire en Algérie :

Le gisement solaire est un ensemble de données décrivant l'évolution du rayonnement solaire disponible dans un lieu donné et au cours d'une période donnée. Son évaluation peut se faire à partir des données de l'irradiation solaire globale.

L'étude du gisement solaire est le point de départ de toute investigation dans le domaine de l'énergie solaire.

I.4.3. Potentiel solaire en Algérie :

L'Algérie est un pays de vaste superficie, elle occupe une situation géographique qui favorise le développement et l'épanouissement de l'utilisation de l'énergie solaire, en particulier dans les régions désertiques. Ces régions Sahariennes sont caractérisées par un taux d'ensoleillement très important.

De part sa situation géographique, l'Algérie dispose d'un des gisements solaires les plus importants du monde. La durée d'insolation sur la quasi-totalité du territoire national dépasse les 2000 heures annuellement et atteint les 3900 heures (hauts plateaux et Sahara) La figure (I.8) illustre l'irradiation globale journalière moyenne reçue au moins de juillet.

L'énergie reçue quotidiennement sur une surface horizontale de 1m^2 est de l'ordre de 5 kWh sur la majeure partie du territoire national soit près de $1700\text{ KWh/m}^2/\text{an}$ au nord et $2263\text{ KWh/m}^2/\text{an}$ au sud du pays. Le total d'énergie reçue est estimé à $169400\text{ TWh}/\text{an}$, soit 5000 fois la consommation d'électricité annuelle du pays [8]. Le tableau (I.3) résume le potentiel solaire en Algérie

CHAPITRE 1 : Les énergies renouvelables

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

Tableau (I.3) : Potentiel solaire en Algérie

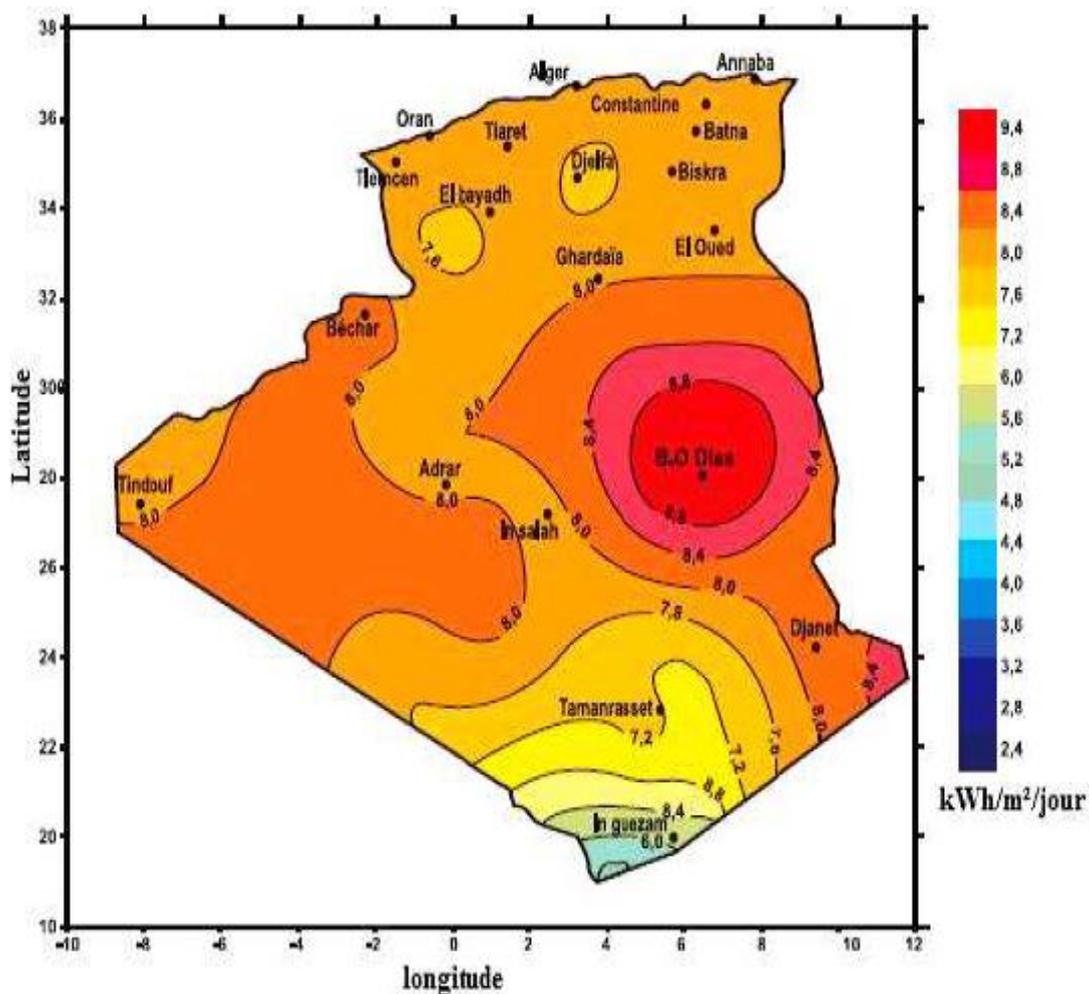


Figure (I.8) : Irradiation globale journalière moyenne reçue sur un plan horizontal au mois de juillet [10]

I.4.4. Potentiel énergétique en Algérie :

La consommation d'électricité en Algérie a augmenté durant les dernières années de 4% par an et la demande en électricité devrait à long terme croître de 7% par année [11].

Le potentiel énergétique solaire permet de palier à certaines lacunes, quant à l'amélioration des conditions de vie des citoyens par le biais de la voie solaire d'origine photovoltaïque. Cette voie permet d'assurer entre autres [12], [14] :

- L'électrification des sites isolés
- L'éclairage domestique et éventuellement public
- L'alimentation en eau potable et l'irrigation des surfaces agricoles
- L'alimentation énergétique des moyens de télécommunications
- Le dessalement des eaux de mer

Dans notre pays, les premières expériences sont apparues avec le programme d'électrification rurale solaire durant la période 1995-2002 qui a concerné 20 villages répartis dans 4 wilayas du grand sud de l'Algérie : Tamanrasset (9 villages), Tindouf (3 villages), Illizi (6 villages) et Adrar (2 villages), comme le montre la figure (I.9) Ces villages étaient caractérisés par leur isolement et leur éloignement de tout réseau de communication.

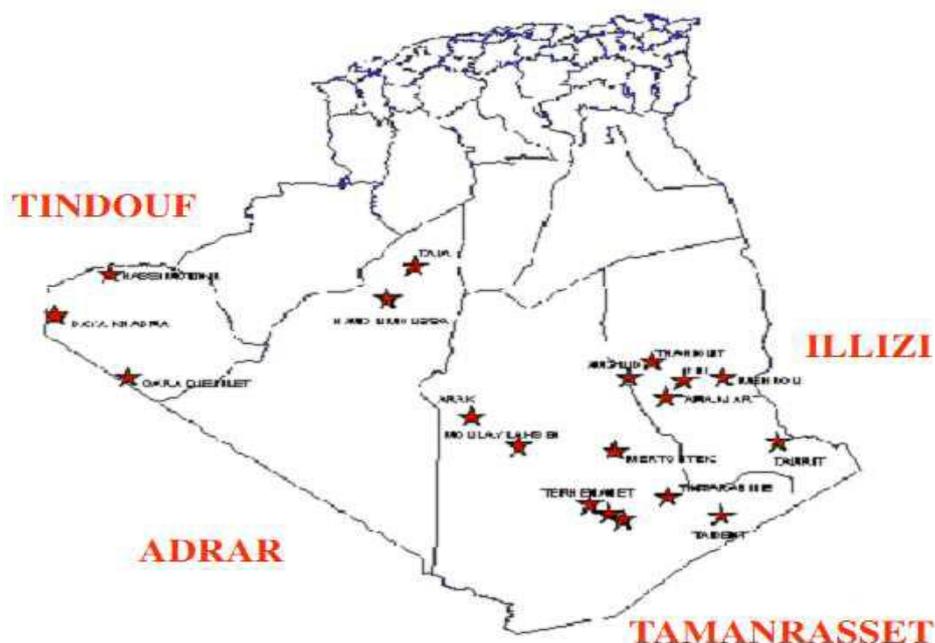


Figure (I.9) : Programme d'électrification de 20 villages du sud

CHAPITRE 1 : Les énergies renouvelables

Leur alimentation par les filières classiques (diesel, réseau électrique), en plus des coûts de réalisation excessifs, auraient posé le problème de l'acheminement du combustible, et dans le cas du réseau, des difficultés certaines pour les travaux et la maintenance des lignes aériennes. Le solaire photovoltaïque pourrait également constituer une alternative pour un programme ultérieur.

Le tableau (I.4) indique la puissance installée pour chaque wilaya [3].

Wilaya	Puissance (kW)
Tamanrasset	149 703
Illizi	23 813
Tindouf	85 882
Adrar	25 145
Total	284 543

Tableau (I.4) : Puissance photovoltaïque installée dans le grand sud

L'Algérie enregistre un taux faible en matière d'énergie renouvelable dans le bilan énergétique national qui ne représente que 0,02 % de la consommation nationale d'électricité

I.5. Bilan des réalisations :

I.5.1. Réalisation au sud :

Suite aux plusieurs applications qui ont été réalisées, comme les installations pour les systèmes de télécommunications, l'éclairage public et le pompage de l'eau.... D'autres programmes ont été engagés, tel que :

CHAPITRE 1 : Les énergies renouvelables

Le programme complémentaire de soutien à la croissance qui concerne l'électrification de 16 villages du sud de l'Algérie à l'énergie photovoltaïque, comme le montre la figure (I.10)

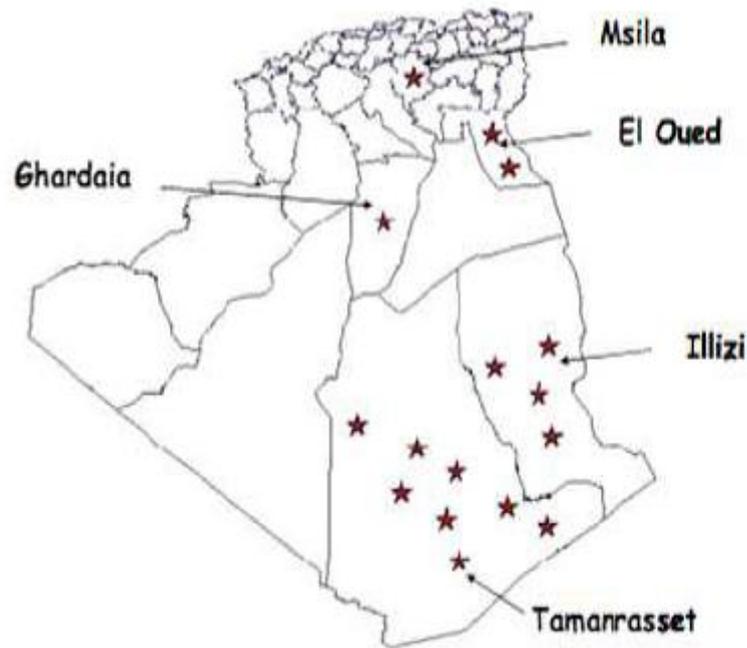


Figure (I.10) : Programme complémentaire de soutien à la croissance

Le programme de développement des wilayas des hauts plateaux qui permettra d'électrifier une soixante de localités au niveau de la région steppique, illustré par la figure (I.11)

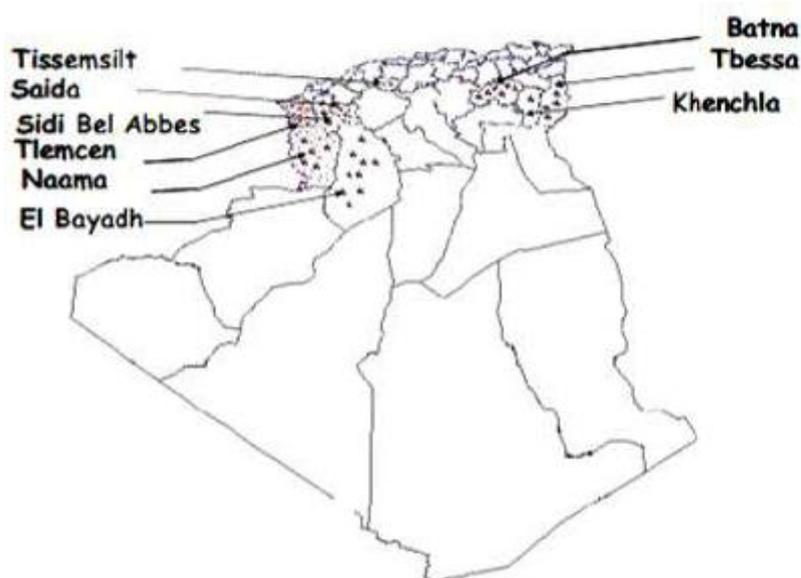


Figure (I.11) : Programme de développement des wilayas des hauts plateaux

CHAPITRE 1 : Les énergies renouvelables

- l'alimentation de plus de 100 sites de télécommunication d'une puissance de 650 KWc.
- la fourniture de 160 pompes solaires pour une puissance de 240 KWc.

I.5.2. Réalisation au nord :

- Dans le cadre de la coopération Algéro-Espagnole, la construction d'une centrale photovoltaïque de 10 KWc connectée au réseau national électrique est programmée
- Une station de services de Nafta alimentée en énergie solaire, est prévue à Staoueli d'une puissance de 7KWc.
- Des installations pilotent au profit de la gendarmerie nationale : alimentation en énergie photovoltaïque des postes de surveillances routières.

I.6. Projet du CDER :

Dans le cadre de développement de l'énergie solaire photovoltaïque, plusieurs projets et programmes ont été ainsi initiés et développés par la Division Energie Solaire Photovoltaïque du Centre de Développement des Energies Renouvelables, pour de nombreuses applications dans le but de répondre aux besoins énergétiques des citoyens et des usagers vivants dans les zones isolées et où l'énergie conventionnelle n'est point disponible.

En effet, les activités effectuées ont porté essentiellement sur une participation très active de la division à l'ensemble de ces projets. Il s'agit de l'élaboration des études de projets, du dimensionnement des équipements PV, du choix des architectures des installations et de l'ingénierie des systèmes PV, des visites des sites d'implantation, de l'acquisition des équipements spécialisés et de matériels, de la réalisation et de la mise en place des installations photovoltaïques, de l'entretien et de la maintenance de ces équipements .

I.6.1. Programme solaire de Batna :

- Etude, fourniture et installation de 08 systèmes photovoltaïques, destinées à l'électrification des logements d'enseignants au niveau des écoles inscrites dans le programme de la Wilaya. La puissance installée totale a été de 10 kWc.

CHAPITRE 1 : Les énergies renouvelables

- Etude de dimensionnement, fourniture des équipements et installation du mini central photovoltaïque de 5 kWc sous 96 volts avec un stockage électrochimique de 2400 Ah à Guelfe (W. Batna).
- Etude de dimensionnement, fourniture et installation de 03 minis centraux de 2,5 KWc sous 48 volts avec un stockage d'énergie par le parc de batteries de 1200 Ah
Pour trois sites ponctuels

I.6.2. Programme solaire d'Oum-El-Bouaghi :

Suivi du programme relatif à l'électrification de deux (02) sites à l'aide de systèmes photovoltaïques de puissance variant de 1 à 1,5 KWc.

I.6.3. Programme solaire de Tiaret :

La Wilaya de Tiaret a sollicité le CDER pour la fourniture, et l'installation de systèmes photovoltaïques pour des besoins de l'électrification rurale. Des visites de sites ont été alors effectuées pour l'implantation future de ces équipements solaires (kits d'éclairage). Les équipements ont été fournis et installés

I.6.4. Projets en cours de réalisations :

- Le groupe Sonelgaz en tant que principal acteur dans le domaine de la production de l'électricité s'est engagé pour un programme ambitieux dans le sens de développer l'industrie photovoltaïque, par la construction d'une usine de fabrication de modules photovoltaïques à Rouïba. La technologie retenue est celle du silicium multi cristallin avec une capacité de production de l'ordre de 120 MWc/an.

En effet, le groupe Sonelgaz a chargé sa société d'ingénierie de réaliser un projet de construction d'une usine de fabrication de modules photovoltaïques dans le périmètre de la zone industrielle de Rouïba, par le biais d'un mandat avec le maître de l'ouvrage (Société Rouïba Eclairage). L'usine de fabrication de modules photovoltaïques sera installée à l'intérieur du terrain de cette société, sur une superficie de quatre hectares.

Elle est opérationnelle à partir de septembre 2012 [7], [10], [15] et aura pour conséquences :

- La disponibilité du module photovoltaïque sur le marché national à moindre coût,

CHAPITRE 1 : Les énergies renouvelables

- La mise à disposition de ce produit au niveau du marché régional,
- L'acquisition d'une nouvelle technologie et le développement de l'expertise,
- La réduction de la dépendance vis-à-vis des pays producteurs de modules,
- La création de l'emploi.

Le projet initié par la New Energy Algeria (NEAL) en partenariat avec la société espagnole ABENER, porte sur la construction d'une centrale hybride Solaire/ Gaz de Hassi R'mel, d'une puissance de 150 MWc dont 25 MWc exprime la partie solaire (environ 5 %). La technologie retenue est celle du cylindro-parabolique.

- L'APRUE (Agence de Promotion et de Rationalisation de l'Utilisation de l'Energie) a lancé en 2009 une importante campagne de promotion des ampoules à basses consommations auprès de la clientèle résidentielle dans quatre wilayas du pays.

I.7. Programme national des énergies renouvelables :

Le potentiel national en énergies renouvelables étant fortement dominé par le solaire, l'Algérie considère cette énergie comme une opportunité et un levier de développement économique et social.

L'Algérie projette de lancer un programme ambitieux de développement des énergies renouvelables. Le programme consiste à installer une puissance d'origine renouvelable de près de 22000 MW entre 2011 et 2030 dont 12000 MW seront dédiés à couvrir la demande nationale en électricité et 10000 MW à l'exportation.

A la faveur de ce programme, les énergies renouvelables se placent au cœur des politiques énergétiques et économiques menées par l'Algérie : d'ici 2030, environ 40% de la production d'électricité destinée à la consommation nationale sera d'origine renouvelable.

Le programme des énergies renouvelables est défini ainsi pour les différentes phases [16]:

- D'ici 2013, il est prévu l'installation d'une puissance totale de l'ordre de 110 MW ;
- D'ici 2015, une puissance totale de près de 650 MW serait installée ;
- D'ici 2020, il est attendu l'installation d'une puissance totale d'environ 2600 MW pour le marché national et une possibilité d'exportation de l'ordre de 2000 MW ;
- D'ici 2030, il est prévu l'installation d'une puissance de près de 12000 MW pour le marché national ainsi qu'une possibilité d'exportation allant jusqu'à 10000 MW.

Le développement du solaire photovoltaïque en Algérie entre 2011 et 2030 est subdivisé comme suit :

CHAPITRE 1 : Les énergies renouvelables

- Sur la période 2011-2013, il est prévu d'atteindre un taux d'intégration de l'industrie algérienne de 60%. Cet objectif devrait être atteint grâce à la réalisation d'une usine de fabrication de modules photovoltaïques.
- Sur la période 2014-2020, l'objectif est d'atteindre un taux d'intégration des capacités Algériennes de 80%. Pour ce faire, il est prévu la construction d'une usine de fabrication de silicium.
- Sur la période 2021-2030, l'objectif est d'atteindre un taux d'intégration supérieur à 80%. C'est pourquoi, la capacité de production des modules PV devrait être étendue pour atteindre les 200 MWc/an.

I.8. Principales sociétés intervenant au secteur :

I.8.1 New Energy Algeria :

New Energy Algeria (NEAL) a été créée en 2002 par la société nationale d'hydrocarbures, Sonatrach (45 % du capital) en partenariat avec la société nationale d'électricité, Sonelgaz (45 % du capital) et une société privée algérienne SIM. Elle a pour objet la promotion et le développement des énergies nouvelles et renouvelables [17].

Elle ambitionne de développer l'utilisation des énergies nouvelles et renouvelables des énergies propres ainsi que le burpo (GPL) et sa commercialisation. Elle ambitionne aussi de commercialiser l'électricité sur le marché local à l'export, de produire de l'électricité à partir du solaire et de l'éolien, de promouvoir une industrie locale de fabrication de chauffe-eau solaires et de promouvoir l'énergie issue des piles photovoltaïques.

I.8.2. Agence de Promotion et de Rationalisation de l'Utilisation de l'Energie :

L'Agence de Promotion et de Rationalisation de l'Utilisation de l'Energie (APRUE) est l'instrument institutionnel dont s'est doté le gouvernement algérien pour animer la mise en œuvre de la politique de maîtrise de l'énergie [18].

L'agence a pour rôle principal la coordination et le suivi de la politique de maîtrise de l'énergie et de promotion des énergies renouvelables et la mise en œuvre des programmes concertés dans ce cadre avec l'ensemble des secteurs (industrie, bâtiments, agriculture...).

I.8.3. Centre de Développement des Energies Renouvelables :

Le Centre de Développement des Energies Renouvelables (CDER) est issu de la restructuration du Haut-commissariat à la recherche. Il est chargé d'élaborer et de mettre en œuvre les programmes de recherches et de développement scientifiques et technologiques de l'Algérie en matière d'énergies renouvelables.

Le centre collecte et analyse les données issues des différents gisements du pays, crée et applique les procédés et matériels destinés à l'exploitation et l'utilisation des ENR, élabore les normes de qualification des sites et des équipements entrant dans leur exploitation.

I.9.conclusion :

On a vu dans ce chapitre que l'énergie renouvelable et de plus en plus très répondeuse dans la production mondiale de l'électricité .et aussi l'impact des énergies renouvelable sur l'environnement. En particulier, nous avons décrit le photovoltaïque en Algérie, le potentiel solaire, le potentiel énergétique et les projets réalisés mis en service.

Puis, nous avons procédé à la présentation des projets en cours de réalisation sur le territoire national qui couvrent différents domaines.

Enfin, les entreprises opérant dans le domaine photovoltaïque en Algérie ont été présentées.

CHAPITRE II

LES SYSTEMES

PHOTOVOLTAIQUE SOLAIRE

Chapitre 2 : les systèmes photovoltaïques solaires

II.1. Introduction

L'énergie solaire est la source d'énergie la plus prometteuse parmi les énergies renouvelables. L'électricité photovoltaïque est obtenue par la transformation directe de la lumière du soleil en électricité au moyen de cellules photovoltaïques (PV).

Nous nous intéressons dans ce chapitre à la conversion photovoltaïque ; dans un premier temps nous présenterons brièvement les notions préliminaires du rayonnement solaire, des semi-conducteurs et la jonction PN, ainsi que les technologies existantes de la cellule photovoltaïque. Dans un deuxième temps nous décrirons la structure, le principe de fonctionnement de la cellule solaire et les différents paramètres caractérisant la cellule photovoltaïque.

Nous étudierons ensuite, l'influence des paramètres météorologiques (température et éclairage) sur le comportement d'une cellule PV.

Nous terminons ce chapitre par la présentation des moyens de protection du module photovoltaïque contre le déséquilibre qui peut arriver. et enfin Avantages et inconvénients d'une installation PV.

II.2.Soleil :

Sur le plan cosmogonique, le soleil est une étoile quelconque dont ni les propriétés physiques ni la position ne la distinguent des milliards d'autres étoiles formant la Galaxie. Sur le plan humain cette étoile a une importance primordiale puisque sans elle la vie n'existerait pas sur terre. Le tableau (II.1) montre quelques caractéristiques principales du soleil [2] :

Chapitre 2 : les systèmes photovoltaïques solaires

Caractéristique	Valeur
Masse	$1,989 \times 10^{30}$ kg
Diamètre	$1,392 \times 10^9$ m
Masse volumique moyenne	1410 Kg m^{-3}
Puissance rayonnée	$3,83 \times 10^{26}$ W
Température superficielle	5770 K

Tableau (II.1) : Caractéristiques principales du soleil.

La structure du soleil est schématisée sur la figure (II.1). On distingue quatre zones particulières ; le noyau, la photosphère, la chromosphère et la couronne [2] :

❖ Le noyau : c'est le cœur du soleil, sa température est très élevée (**15×10^6 K**) ainsi que sa pression (**2×10^{11} bars**) et sa densité (**$\sim 105 \text{ Kg.m}^{-3}$**), on note que cette dernière diminue avec l'éloignement au centre. L'énergie produite au sein du noyau se propage par diffusion radiative puis par convection turbulente jusqu'à la photosphère d'où elle s'échappe sous forme de rayonnement électromagnétique vers l'espace.

❖ La photosphère : est une couche d'environ **300 Km** d'épaisseur avec une température de **5770 K**. Elle donne l'image visible du soleil.

❖ La chromosphère : est l'atmosphère du soleil. Elle a une épaisseur d'environ **8 000 Km** et une température de **20 000 K** environ [2].

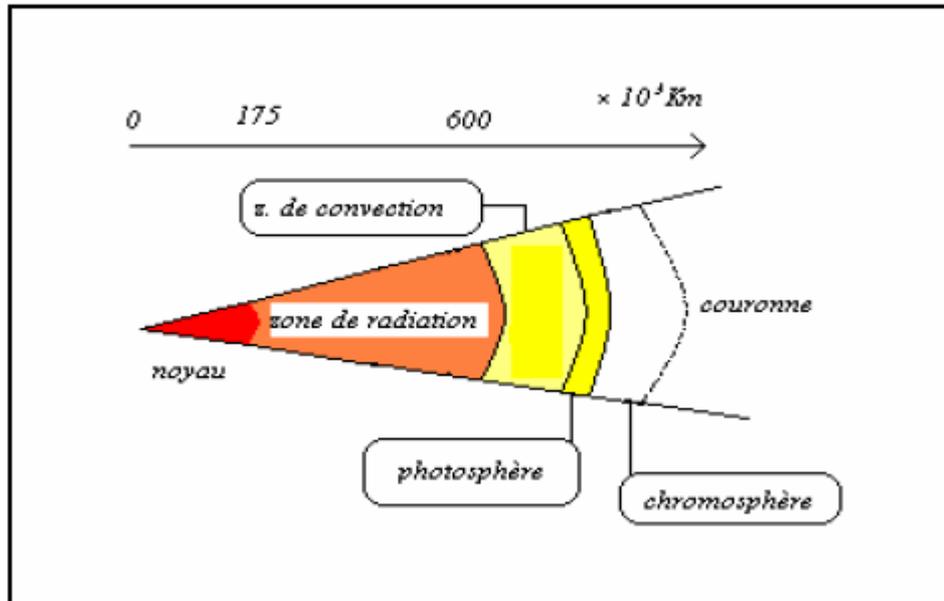


Figure (II.1) : Coupe schématique du soleil.

❖ La couronne : est le prolongement de la photosphère. Sans limite précise, elle est formée de gaz peu denses et ionisés. Invisible depuis la terre, car son éclat (brillance) se confond avec celui du ciel bleu. Elle ne peut être observée que pendant une éclipse solaire. Sa température est très élevée puisqu'elle dépasse le million de degrés.

Le soleil est composé chimiquement [3] de **70 %** d'hydrogène et d'environ **28 %** d'hélium et le **2 %** restant étant mélange de plus de **100** éléments, soit pratiquement tous les éléments chimiques connues. La distance terre-soleil est égale en moyenne et approximativement à [2] **150×10^6 Km** ; cette distance est si grande que sa lumière nous parvient **8** minutes après avoir été émise.

II.2.1. Constante solaire :

Le constant solaire est la densité d'énergie solaire qui atteint la frontière externe de l'atmosphère, sa valeur est communément prise égale à $1\,367$ W/m².

II.2.2. Trajectoire du soleil :

La position du soleil à un instant donné peut être décrite par deux angles qui sont :

- Hauteur du soleil h : si l'on fait face au soleil, on le voit à une certaine hauteur qu'on appelle hauteur apparente ; c'est l'angle h entre le plan horizontal et la direction du soleil. Elle détermine la distance parcourue par le soleil à travers l'atmosphère,

Chapitre 2 : les systèmes photovoltaïques solaires

- L'azimut α : c'est l'angle que fait la projection du soleil sur le plan horizontal et la direction du sud.

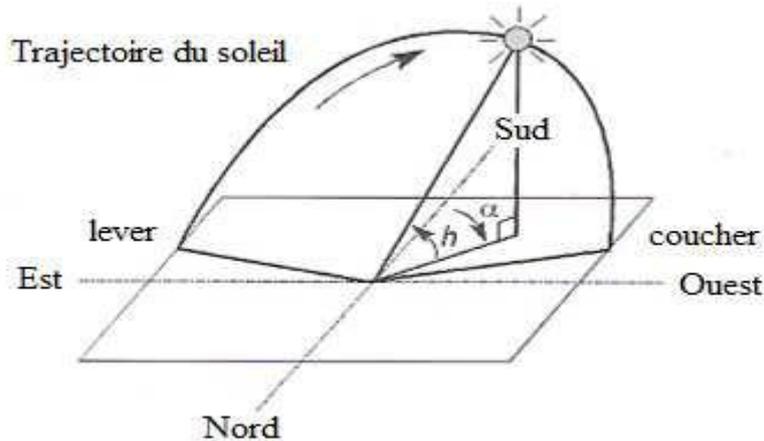


Figure (II.2) : Course du soleil.

II.2.3.Masse d'air :

Pour tenir compte de l'épaisseur d'atmosphère traversée par le rayonnement solaire incident on introduit un coefficient appelé nombre de masse d'air AM (Air Mass en Anglais). Par définition, c'est le rapport entre l'épaisseur d'atmosphère traversée par le rayonnement solaire direct pour atteindre le sol et l'épaisseur traversée à la verticale du lieu [1]. Cela dépend surtout de la hauteur angulaire du soleil h .

À l'aide des points O, A et M et cet angle h représentés à la figure (II.3), on écrit la longueur du trajet du Soleil à travers l'atmosphère :

$$\sin h = \frac{OA}{OM} \Leftrightarrow OM = \frac{OA}{\sin h} \quad (\text{II.1})$$

Donc l'Air Mass (AM) est :

$$\frac{OM}{OA} = \frac{1}{\sin h} \quad (\text{II.2})$$

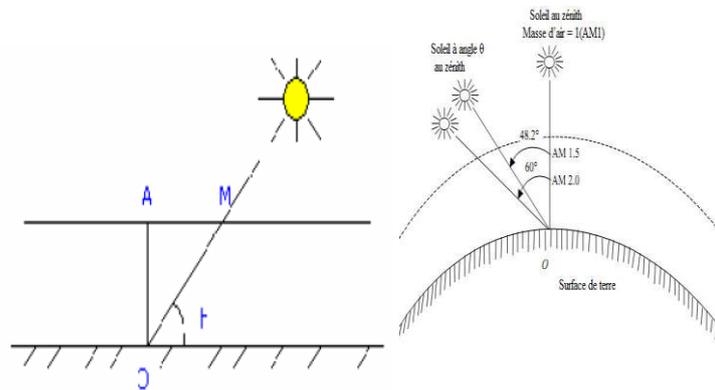
La notation conventionnelle de ce concept est donnée par un nombre sans dimension AM_x , x étant [1] :

$$x = \frac{1}{\sin h} \quad (\text{II.3})$$

Chapitre 2 : les systèmes photovoltaïques solaires

Citons, à titre d'exemple :

- ❖ AM1 : position du Soleil au zénith ; $h=90^\circ$, (au niveau de la mer).
- ❖ AM2 : le Soleil à 30° .
- ❖ AM1,5 : le Soleil à 41.8° .



Figure(II.3) : Représentation graphique des spectres AM0 et AM1,5.

Quand le soleil fait un angle de $48,2^\circ$ par rapport au zénith, le rayonnement incident est dit AM1,5. Et par convention, AM0 désigne le rayonnement solaire hors atmosphère [1].

II.3.rayonnement solaire :

Le soleil émet un rayonnement électromagnétique compris dans une bande de longueur d'onde variant de $0,22 \mu\text{m}$ à $10 \mu\text{m}$. La figure (II.4) représente la variation de la répartition spectrale énergétique.

L'énergie associée à ce rayonnement solaire se décompose approximativement a :

- 9% dans la bande des ultraviolets ($<0,4 \mu\text{m}$),
- 47% dans la bande visible ($0,4$ à $0,8 \mu\text{m}$),
- 44% dans la bande des infrarouges ($>0,8 \mu\text{m}$) [6].

L'atmosphère terrestre reçoit ce rayonnement à une puissance moyenne de $1,37 \text{ kilowatt au mètre carré (kW/m}^2\text{)}$, a plus ou moins 3 %, selon que la terre s'éloigne ou se rapproche du soleil dans sa rotation autour de celui-ci. L'atmosphère en absorbe toutefois une partie, de sorte que la quantité d'énergie atteignant la surface terrestre dépasse rarement 1200 W/m^2 . La rotation et l'inclinaison de la terre font également que l'énergie disponible en un point donné varie selon la latitude, l'heure et la saison. Enfin, les nuages, le brouillard, les particules

Chapitre 2 : les systèmes photovoltaïques solaires

atmosphériques et divers autres phénomènes météorologiques causent des variations horaires et quotidiennes qui tantôt augmentent, tantôt diminuent le rayonnement solaire et le rendent diffus [9].

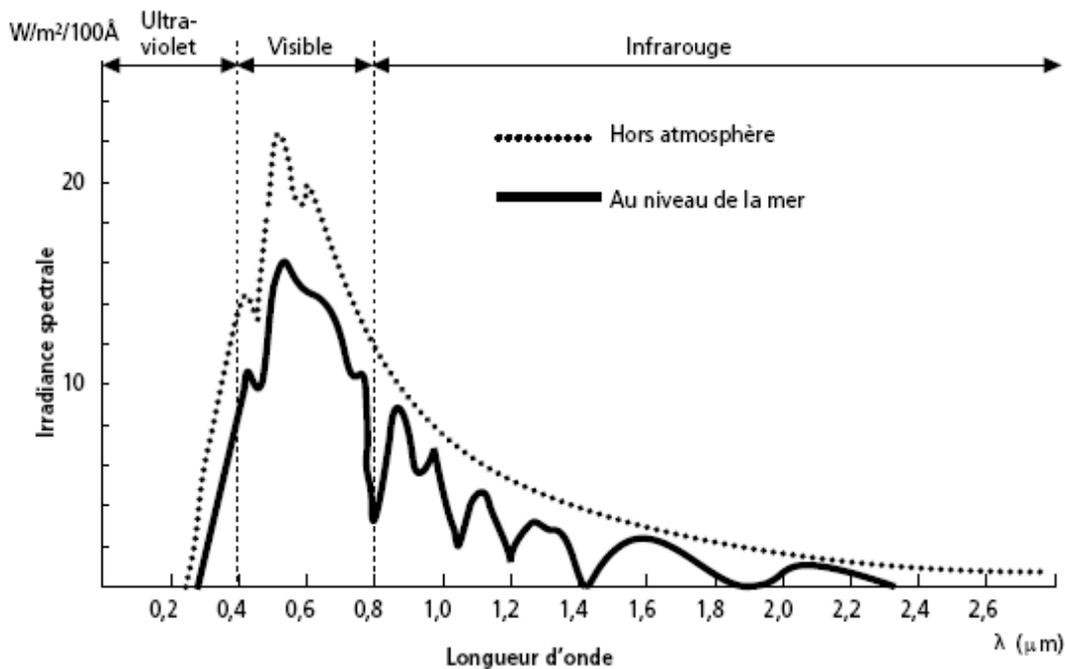


Figure (II.4) : Analyse spectrale du rayonnement solaire [6].

II.3.1.composantes du rayonnement solaire :

Lors de la traversée de l'atmosphère, le rayonnement solaire subit diverses déperditions du fait de son absorption par les gaz atmosphériques et la vapeur d'eau. Donc, on distingue trois composantes :

II.3.2.Rayonnement direct :

Le rayonnement direct c'est le rayonnement reçu directement de soleil sans diffusion par l'atmosphère.

II.3.3.Rayonnement diffus :

Le rayonnement diffus c'est le rayonnement solaire provenant de toute la voûte céleste, le rayonnement est dû à l'absorption et à la diffusion d'une partie du rayonnement solaire par

Chapitre 2 : les systèmes photovoltaïques solaires

l'atmosphère (les molécules d'air, les gouttelettes d'eau, les poussières, ...) et à sa réflexion par les nuages.

II.3.4. Rayonnement réfléchi :

Le rayonnement réfléchi c'est le rayonnement solaire qui est réfléchi par le sol ou par des objets se trouvant sur sa surface. Ce rayonnement dépend de l'albédo du sol (environnement du site), et il peut être important lorsque le sol est particulièrement réfléchissant (neiges, eau, etc.). Il faudra en tenir compte pour évaluer le rayonnement sur des plans inclinés.

Donc, le rayonnement global est la contribution de diverses composantes du rayonnement solaire.

II.3.5. Le rayonnement global :

Est la somme de tous les rayonnements reçus, y compris le rayonnement réfléchi par le sol et les objets qui se trouvent à sa surface. Il est mesuré par un pyromètre ou un Solari mètre sans écran.

Les stations météorologiques généralement mesurer le rayonnement global horizontal par un Pyromètres placé horizontalement à l'endroit requis.

Rayonnement global = rayonnement direct + rayonnement diffus + rayonnement réfléchi

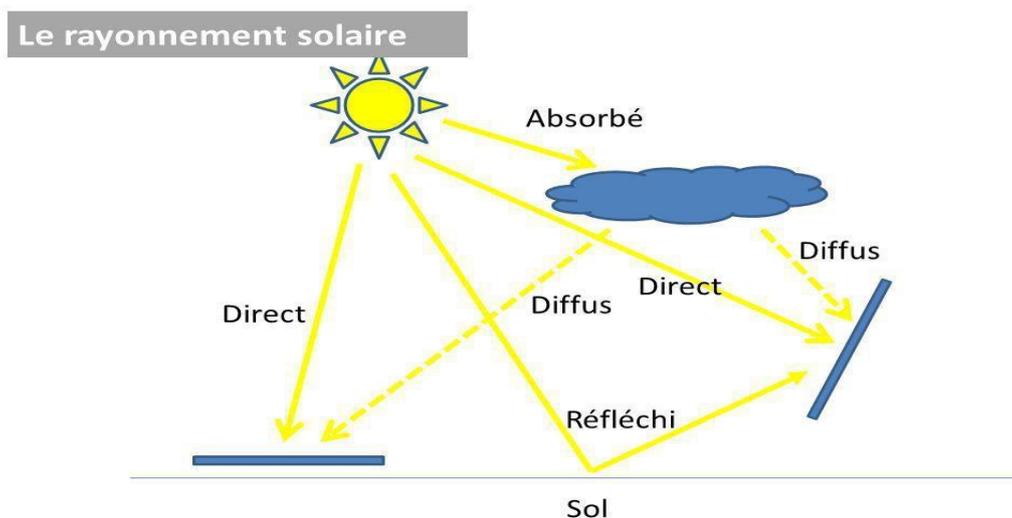
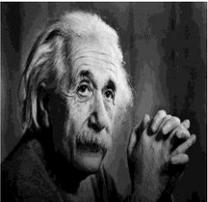


Figure (II.5) : Composante du rayonnement global sur un plan horizontal.

Chapitre 2 : les systèmes photovoltaïques solaires

II.4.Historique :

	<p>L'effet photovoltaïque a été découvert par le physicien Antoine Becquerel (1788-1878) en 1839 constate les effets électriques que produisent les rayons Solaire est dans une pile.</p>
	<p>la première cellule solaire au sélénium fut construite en 1883 par l'américain CHARLES FRITTS enduit le matériau semi-conducteur de sélénium avec une couche extrêmement mince d'or.</p>
	<p>-En 1887 L'effet photovoltaïque en tant que tel a été découvert par le physicien allemand Heinrich Rudolf Hertz.</p>
	<p>-En 1913 William Coblentz dépose le 1er brevet pour la cellule photovoltaïque qui convertie l'énergie solaire en énergie électrique.</p>
	<p>Albert Einstein, (1879-1955) en 1904 découvrit que l'énergie de ces quanta de lumière est proportionnelle à la Fréquence de l'onde électromagnétique. Et reçu le prix Nobel en 1921.</p>
	<p>-les laboratoires BELL (CHARPIN, PEARSON et PRICE) présentent première cellule photovoltaïque avec un rendement de 4% le 25 avril 1954.</p>

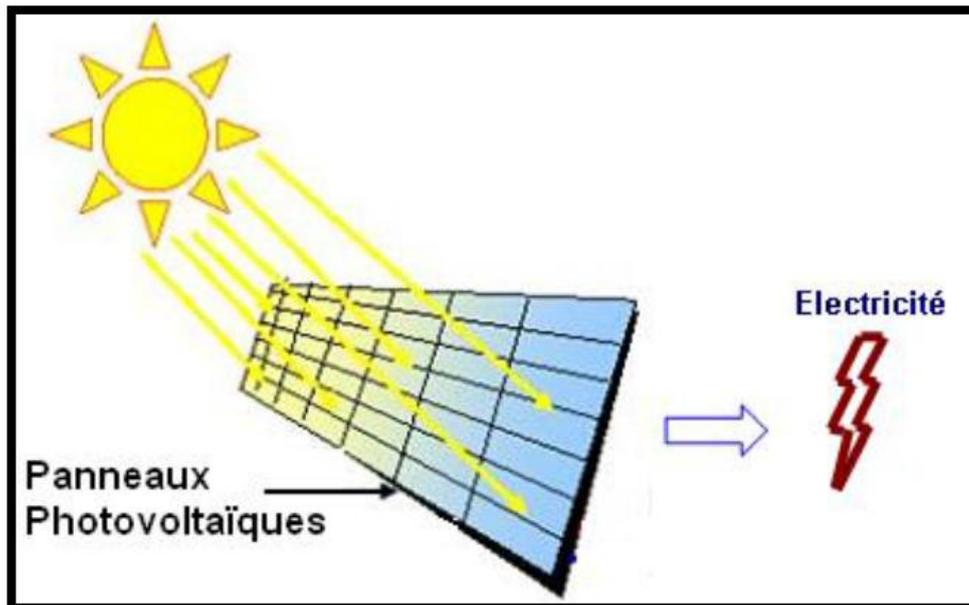
Chapitre 2 : les systèmes photovoltaïques solaires

	<p>-1^{er} installation photovoltaïque dans un satellite artificiel américain Vanguard 1 en 1958 (rendement 9% et 0.1w)</p>
	<p>-1^{er} maison photovoltaïque, Solar One construite à l'université de DELAWARE à l'USA en 1973</p>
	<p>-1^{er} installation photovoltaïque reliée au réseau électrique en Europe (TISO en Suisse) en 1982</p>
	<p>-1^{er} voiture alimentée en énergie photovoltaïque parcourt une distance de 4000 Km en Australie en 1983</p>
	<p>Les 1ers programmes de toits photovoltaïques raccordés au réseau sont lancés au Japon et en Allemagne en 1995.</p>

Tableau (II.2) : Evénements notables dans l'histoire du photovoltaïques.

II.5. La conversion de la lumière en électricité :

Le terme « photovoltaïque » souvent abrégé par le sigle « PV », a été formé à partir des mots « photo » un mot grec signifiant lumière et « Volta » le nom du physicien italien Alessandro Volta qui a inventé la pile électrochimique en 1800. L'effet photovoltaïque est la conversion directe de l'énergie solaire en électricité.



Figure(II.6) : Conversion de l'énergie solaire en électricité.

L'énergie photovoltaïque est obtenue directement à partir du rayonnement du soleil. Les modules photovoltaïques composés des cellules photovoltaïques à base de silicium ont la capacité de transformer les photons en électrons. La conversion photovoltaïque se produit dans des matériaux semi-conducteurs. L'énergie sous forme de courant continu est ainsi directement utilisable.

- Dans un **isolant électrique** : les électrons de la matière sont liés aux atomes et ne peuvent pas se déplacer.
- Dans un **conducteur électrique** (un fil de cuivre par exemple) les électrons sont totalement libres de circuler et permettent le passage d'un courant.
- Dans un **semi-conducteur** : la situation est intermédiaire, les électrons contenus dans la matière ne peuvent circuler que si on leur apporte une énergie pour les libérer de leurs atomes. Quand la lumière pénètre dans un semi-conducteur, ces photons apportent une énergie

Chapitre 2 : les systèmes photovoltaïques solaires

permettant aux électrons de se déplacer, il ya donc courant électrique sous l'exposition à la lumière.

II.6. Cellule photovoltaïque :

La cellule PV ou encore photopile est le plus petit élément d'une installation photovoltaïque. Elle est composée de matériaux semi-conducteurs et transforme directement l'énergie lumineuse en énergie électrique. Les cellules photovoltaïques sont constituées :

- d'une fine couche semi-conductrice (matériau possédant une bande interdite, qui joue le rôle de barrière d'énergie que les électrons ne peuvent franchir sans une excitation extérieure, et dont il est possible de faire varier les propriétés électroniques) tel que le silicium, qui est un matériau présentant une conductivité électrique relativement bonne.
- d'une couche anti-reflet permettant une pénétration maximale des rayons solaires.
- d'une grille conductrice sur le dessus ou cathode et d'un métal conducteur sur le dessous ou anode.
- les plus récentes possèdent même une nouvelle combinaison de multicouches réfléchissants justes en dessous du semi-conducteur, permettant à la lumière de rebondir plus longtemps dans celui-ci pour améliorer le rendement.

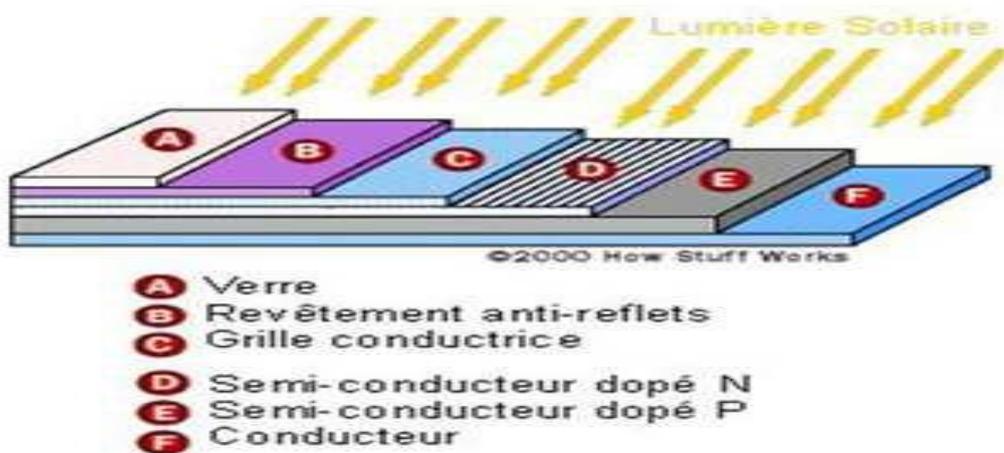


Figure (II.7) : Structure basique d'une cellule solaire.

Chapitre 2 : les systèmes photovoltaïques solaires

Une cellule photovoltaïque est basée sur le phénomène physique appelé effet photovoltaïque qui consiste à établir une force électromotrice lorsque la surface de cette cellule est exposée à la lumière. La tension générée peut varier entre 0.3 V et 0.7 V en fonction du matériau utilisé et de sa disposition ainsi que de la température et du vieillissement de la cellule [4].

II.6.1. Les semi-conducteurs :

Les semi-conducteurs sont des éléments naturels. Sensible à la lumière visible et invisible (rayon ultraviolet, infrarouge...). Ils conduisent le courant nettement moins bien que les métaux, mais que la température est plus élevée (exemple types : silicium Si le germanium Ge) la bonne conductivité électrique des métaux est due à la présence de électrons libres du gaz électronique qui parcourent tout le réseau métallique.

II.6.2. Les matériaux semi-conducteurs :

Les matériaux semi-conducteurs sont des corps dont la résistivité est intermédiaire entre celle des conducteurs et celle de l'isolant les quatre électrons de valence du silicium permettent de former quatre liaisons covalentes avec un atome voisin

Dans ce cas, tous les électrons sont utilisés et aucun n'est disponible pour créer un courant électrique.

II.6.2.1. Semi-conducteur intrinsèque :

Un semi-conducteur intrinsèque est un semi-conducteur dépourvu de toute impureté Susceptible de modifier la densité de porteurs. Les électrons de la bande de conduction ne peuvent résulter que de l'excitation thermique d'électrons liés de la bande de valence. Il en résulte que les électrons et les trous n'existent nécessairement que par paires.

II.6.2.2. Semi-conducteur extrinsèque :

La diffusion des impuretés dans un cristal semi-conducteur, crée des porteurs libres, qui participent à la conduction et cette opération est appelée dopage. Les atomes d'impuretés sont généralement trivalents ou pentavalents.

Un semi-conducteur extrinsèque est un semi-conducteur dopé. Si ce semi-conducteur est dopé par des atomes de la colonne V (phosphore), dont l'atome de phosphore remplace l'atome de silicium dans le réseau cristallin, et établit quatre liaisons de valence avec le silicium, et son

Chapitre 2 : les systèmes photovoltaïques solaires

cinquième électron sera libéré à faible augmentation de température, on dit que le phosphore est un atome donneur ; et le semi-conducteur est de type P.

Dans le cas contraire, où le semi-conducteur est dopé par des atomes de la colonne III (bore), d'où l'établissement de trois liaisons avec les atomes de silicium voisin, et reste un atome de silicium non lié, donc il y a un déficit en électron, on dit que le bore est un atome accepteur ; et le semi-conducteur est de type N.

II.6.3. Dopage de type N :

On remplace un atome de silicium par un atome pentavalent. Quatre d'entre eux assurent les liaisons avec les atomes voisins de silicium et le cinquième resté disponible va être excité vers la bande de conduction très facilement par l'agitation thermique. D'où le nombre d'électron libre qui va fortement augmenter : dans ce cas le nombre de trou est très inférieur au nombre d'électron libre.

On obtient ainsi un cristal dopé N (négatif).

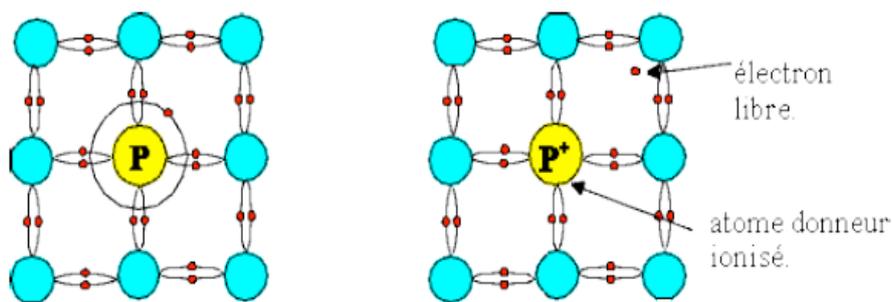
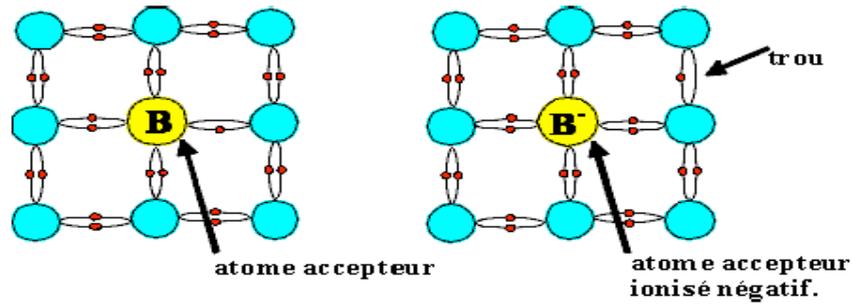


Figure (II.8) : dopage de type N

II.6.3. Dopage de type P :

De la même façon on introduit des atomes trivalents, ses trois électrons vont assurer les liaisons covalentes avec trois atomes voisins mais laisser un trou au quatrième. Ce trou se déplace de proche en proche dans le cristal pour créer un courant.

Ici le nombre de trous est très supérieur au nombre d'électrons libres du cristal intrinsèque, on obtient donc un cristal dopé P (positif), les impuretés utilisées sont souvent du Bore.



II.6.4. La jonction PN :

Une jonction PN est l'accolement d'une région dopée P et d'une région dopée N. Lors de cet assemblage les porteurs de charges libres s'attirent et se recombinent dans la zone de jonction où les porteurs libres disparaissent : c'est la zone de transition.

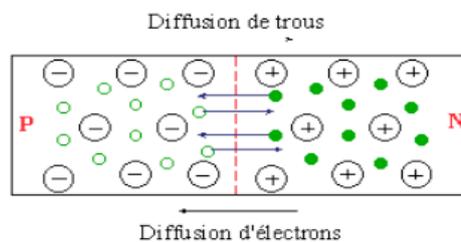


Figure (II.10) : jonction PN

Il ne reste donc plus que les ions dans cette zone qui vont créer un champ électrique interne au niveau de la jonction et qui empêche les charges libres restantes dans chaque zone de traverser la jonction pour se recombiner.

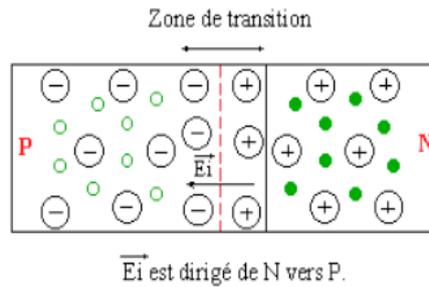
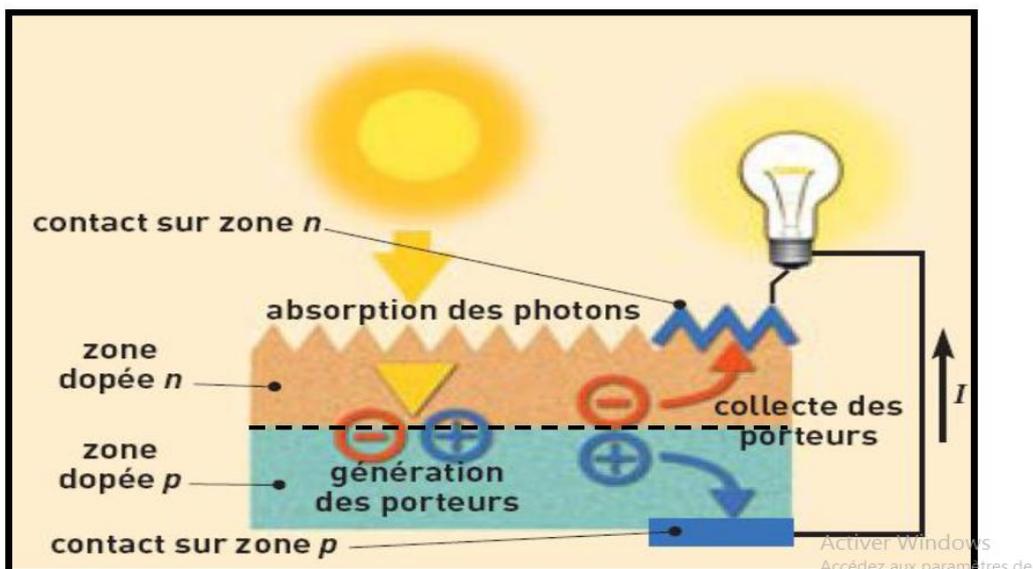


Figure (II.11) : la zone de transition.

II.7.Principe de fonctionnement d'une cellule solaire photovoltaïque :

Le principe de fonctionnement de la cellule repose sur l'effet photovoltaïque qui converti 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.



Figure(II.12) : Principe de la conversion photovoltaïque.

Une cellule photovoltaïque donc est un dispositif qui permet de transformer l'énergie solaire en énergie électrique.

Cette transformation est basée sur les trois mécanismes suivants :

- Absorption des photons (dont l'énergie est supérieure au gap) par le matériau constituant le dispositif

Chapitre 2 : les systèmes photovoltaïques solaires

- Conversion de l'énergie du photon en énergie électrique, ce qui correspond à la création des paires d'électrons/trous dans le matériau semi-conducteur
- Collecte des particules générées dans le dispositif. Le matériau constituant la cellule photovoltaïque doit donc posséder deux niveaux d'énergie et être assez conducteur pour permettre l'écoulement du courant : d'où l'intérêt des semi-conducteurs pour l'industrie photovoltaïque.

Afin de collecter les particules générées, un champ électrique permettant de dissocier les paires électrons / trous créés est nécessaire. Pour cela on utilise le plus souvent une jonction P-N

II.8.TÉCHNOLOGIES DES CELLULES PHOTOVOLTAÏQUES :

Les cellules photovoltaïques sont des composants optoélectroniques qui transforment directement la lumière solaire en électricité, elles sont réalisées à l'aide des matériaux semi-conducteurs.

L'énergie photovoltaïque fait appel généralement à une des technologies suivantes :

- la première technologie photovoltaïque recourt aux cellules de silicium monocristallin ou poly cristallin ont la meilleure efficacité, qui varie généralement de 13 à 18 %. Leur durée de vie est habituellement de plus de 25 à 30 ans et pour le monocristallin l'efficacité est de 12 à 15 %.
- La deuxième technologie fait appel aux cellules de silicium amorphe est la deuxième technologie utilisée. L'efficacité est moindre, variant de 6 à 10 %. Leur durée de vie est généralement inférieure à 20 ans.

Type de cellules	Rendements des cellules (%)			Domaines d'applications
	Théorique	En labo	disponible	

Chapitre 2 : les systèmes photovoltaïques solaires

Silicium monocristallin	27	24.7	14.6	Modules de grandes dimensions pour toits et façades, appareils de faibles puissances, espace (satellites)
Silicium poly cristallin	27	19.8	12-14	Modules de grandes dimensions pour toits et façades, générateurs de toutes tailles (reliés réseau ou sites isolés)
Silicium amorphe	25	13	6-8	Appareils de faible puissance, production d'énergie embarquée (calculatrice, montre, de grandes dimensions (intégration dans le bâtiment)
Arséniure de gallium GaAs	29	27.5	18-20	Système de concentrateur, espace (satellites)
CIS	27.5	18.2	10-12	Appareils de faibles puissances, modules des grandes dimensions (intégration dans le bâtiment)
Tellure de cadmium CdTe	28.5	16	9-11	Modules de grandes dimensions (intégrations dans le bâtiment)

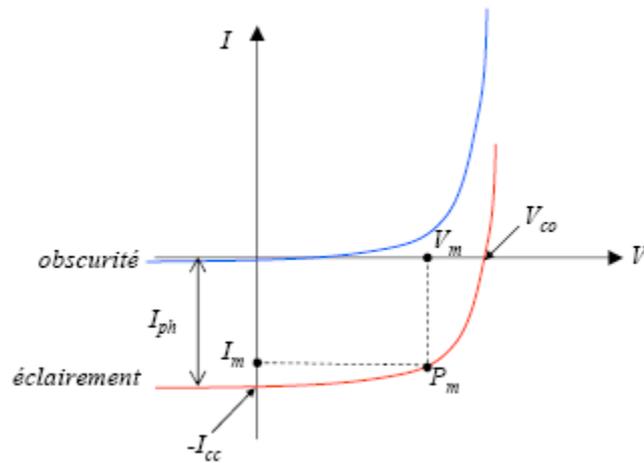
Tableau (II.3) : Rendement énergétique des différents types de cellules photovoltaïques.

La troisième technologie fait appel à d'autres matériaux semi-conducteurs, tels que le Tellure de Cadmium (CdTe), Cuivre Indium Sélénium (CIS) et les jonctions à base D'arséniure de Gallium (GaAs), cette technologies des multicouches est en voie de développement car chacune d'entre elles est sensible à des photons d'énergies différentes.

Nous allons récapituler les différents types de technologie dans le tableau suivant

II.9. Caractéristique électrique :

La variation du courant « A » (ou densité du courant « A/cm² ») en fonction de la tension « V », à l'obscurité et en particulier sous éclairage, permet d'évaluer la performance de la cellule solaire ; la figure (II.13) montre deux exemples de caractéristiques I – V de cellule solaire sans et avec éclairage.



Figure(II.13) : Caractéristique I-V d'une cellule solaire ; à l'obscurité et sous éclairement.

II.9.1.Circuit électrique équivalent :

Le circuit équivalent d'un système électrique est fréquemment utilisé afin de décrire son comportement électrique à l'aide de composants électriques élémentaires (source, résistance, diode, bobine, condensateur, etc.).

L'expérience montre qu'à l'obscurité ; une cellule solaire suit le comportement d'une diode classique, elle commence à conduire lorsque la tension appliquée est supérieure à la tension de seuil V_s . Dans le cas d'une cellule idéale à l'obscurité, la caractéristique I-V peut être représenté par la relation suivante

$$I_{\text{obs}} = I_s \left(\exp\left(\frac{V}{nV_{th}}\right) - 1 \right) \quad (\text{II.4})$$

Ou

I_s : le courant de saturation en Ampère (A).

n : le facteur de qualité de la diode ; sans dimension.

V_{th} : le potentiel thermique en Volt (V) ; il est donné par :

$$V_{th} = \frac{KT}{q} \quad (\text{II.5})$$

Chapitre 2 : les systèmes photovoltaïques solaires

Ou

K : la constante de Boltzmann ($1.38066 \times 10^{-23} \text{ J/K} = 8.61400 \times 10^{-5} \text{ eV/K}$).

T : la température absolue en Kelvin (K).

q : la charge absolue d'un électron en coulomb ($1.60281 \times 10^{-19} \text{ C}$).

Sous éclairement, un terme I_{ph} , tenant compte du photo-courant généré est rajouté, On obtient le circuit électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque idéale sous éclairement qui est représenté par l'équation suivante

$$I = I_{ph} - I_{obs} = I_{ph} - I_s \left(\exp\left(\frac{V}{nV_{th}}\right) - 1 \right) \quad (\text{II.6})$$

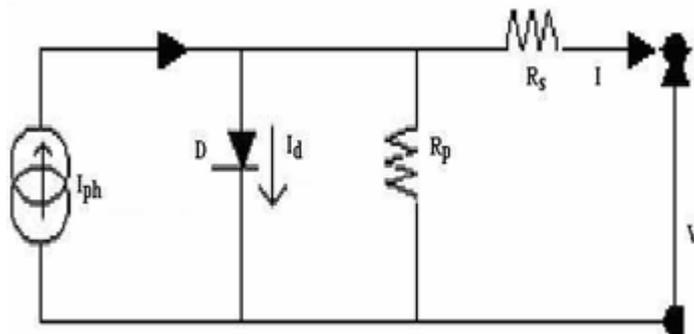
Dans le cas d'une cellule photovoltaïque réelle, d'autres paramètres tenant compte des effets résistifs et des fuites vers les bords ; qu'ils doivent être pris en considération et l'équation de la caractéristique I-V devient alors

$$I = I_{ph} - I_s \left(\exp\left(\frac{V}{nV_{th}}\right) - 1 \right) - \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \quad (\text{II.7})$$

Certains auteurs utilisent la conductance shunt $G_{sh} = \frac{1}{R_{sh}}$ pour écrire l'équation (II.7) sous la forme :

$$I = I_{ph} - I_s \left(\exp\left(\frac{V}{nV_{th}}\right) - 1 \right) - G_{sh} (V + IR_s) \quad (\text{II.8})$$

Et par conséquence le schéma équivalent d'une cellule solaire réelle est représenté sur la figure (II.14) par un générateur de courant (I_{PH}), une diode et deux résistances parasites (R_s) et (R_{sh}).



Figure(II.14) : Circuit électrique équivalent d'une cellule solaire a jonction P-N

Chapitre 2 : les systèmes photovoltaïques solaires

- ❖ Le générateur du courant (I_{ph}) : il délivre le courant I_{ph} correspondant au courant Photo généré.
- ❖ La diode (D) : modélise la jonction P-N.
- ❖ La résistance série R_s : modélise [12] les pertes résistives au sein de la photopile (les métallisations). Elle est liée à l'impédance des électrodes et du matériau ; il en résulte que la tension V aux bornes de la cellule est différente de la tension V_j aux bornes de la jonction pn. Ce terme doit idéalement être le plus faible possible pour limiter son influence sur le courant de la cellule.
- ❖ La résistance parallèle R_p (résistance shunt R_{sh}) : correspond [12] à une résistance de fuite entre les deux zones n et p de la jonction ; il en résulte qu'une partie du courant I_{ph} sera dérivée par cette résistance et ne pourra être délivrée à la charge. Cette résistance devra être la plus élevée possible.

II.9.2. Les grandeurs caractéristiques d'une cellule solaire :

À partir de la caractéristique I-V sous éclairage illustrée au-dessus dans la figure (II.13), on constate que le comportement d'une cellule solaire peut être étudié à travers quatre principales grandeurs [17] ; I_{cc} , V_{co} , I_m et V_m :

❖ Le courant de court-circuit I_{cc} :

Le courant de court-circuit I_{cc} est la valeur du courant lorsque la tension aux bornes de cellule est nulle ($V=0$). D'où, en annulant la tension V dans l'équation (II.7), on obtient :

$$I_{cc} = I_{ph} - I_s \left(\exp \left(\frac{I_{cc} R_s}{n V_{th}} \right) - 1 \right) - \frac{I_{cc} R_s}{R_{sh}} \quad (\text{II.9})$$

Pour la plus part des cellules solaires (dont la résistance série est très faible), on peut négliger le terme

$$I_s \left(\exp \left(\frac{I_{cc} R_s}{n V_{th}} \right) - 1 \right)$$

Devant I_{ph} . L'expression approchée du courant de court-circuit est alors :

$$I_{cc} \approx \frac{I_{ph}}{\left(1 + \frac{R_s}{R_{sh}} \right)} \quad (\text{II.10})$$

Chapitre 2 : les systèmes photovoltaïques solaires

Dans le cas idéal [3] ($R_S \rightarrow 0$ et $R_{Sh} \rightarrow \infty$) ou dans le cas approximatif suivant :

$$R_{sh} = \frac{1}{G_{sh}} \gg R_S \rightarrow \frac{R_S}{R_{sh}} \ll 1 \rightarrow 1 + \frac{R_S}{R_{sh}} \approx 1 \quad (\text{II.11})$$

Le courant de court-circuit I_{cc} se confond avec le photo courant I_{ph} :

$$I_{cc} \approx I_{ph} \quad (\text{II.12})$$

❖ La tension en circuit ouvert V_{co} :

C'est la tension mesurée aux bornes de la cellule et pour laquelle le courant débité par la cellule solaire est nul, elle est donnée par la relation

$$V_{co} = nV_{th} \log \left(1 + \frac{I_{ph}}{I_s} \right) \quad (\text{II.13})$$

❖ Le point du fonctionnement P_m (V_m , I_m) :

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

$$P_m = I_m \times V_m \quad (\text{II.14})$$

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

❖ Le facteur de forme FF :

Le facteur de forme (FF) « en anglais : Fill Factor » est défini [12] comme le rapport entre la puissance maximale et le produit ($I_{cc} \times V_{co}$) ; d'où il est donné par la relation :

$$FF = \frac{P_m}{I_{cc} \times V_{co}} = \frac{I_m \times V_m}{I_{cc} \times V_{co}} \quad (\text{II.15})$$

Chapitre 2 : les systèmes photovoltaïques solaires

Ce paramètre compris entre 0 et 1, on l'exprime en % qualifie la forme plus ou moins rectangulaire de la caractéristique I-V de la cellule solaire.

Si celle-ci était carrée le facteur de forme serait égale à 1, la puissance P_m sera égale à $(I_{cc} \times V_{co})$. Mais, généralement le facteur de forme prend des valeurs entre 0.6 et 0.85.

On note que ces quatre grandeurs caractéristiques sont sommables dans un seul paramètre, s'appelle le rendement η :

Il est défini [12] comme le rapport entre la puissance maximale produite par la cellule et la puissance du rayonnement solaire qui arrive sur la cellule.

Si S est la surface de la cellule (en m^2) et E est l'éclairement -irradiance- (en W/m^2) le rendement énergétique s'écrit :

$$\eta = \frac{P_m}{S \times E} \quad (II.16)$$

Ou d'après (II.15)

$$P_m = FF \times I_{cc} \times V_{co}$$

$$\eta = \frac{FF \times I_{cc} \times V_{co}}{S \times E} \quad (II.17)$$

II.10. Les zones de caractéristique I-V d'un générateur photovoltaïque :

La caractéristique fondamentale du générateur photovoltaïque donnée pour un éclairement et une température donnée, n'impose ni le courant ni la tension de fonctionnement, seule la courbe $I = f(V)$ est fixée. C'est la valeur de la charge aux bornes du générateur qui va déterminer le point de fonctionnement du système photovoltaïque.

La figure (II.15) représente trois zones essentielles [7] :

a) **La zone (1)** : où le courant reste constant quelle que soit la tension, pour cette région,

Le générateur photovoltaïque fonctionne comme un générateur de courant.

b) **La zone (2)** : correspondant au code de la caractéristique, la région intermédiaire

Chapitre 2 : les systèmes photovoltaïques solaires

Entre les deux zones précédentes, représente la région préférée pour le fonctionnement du Générateur, où le point optimal (caractérisé par une puissance maximale) peut être déterminé.

c) **La zone (3) :** qui se distingue par une variation de courant correspondant à une tension presque constante, dans ce cas le générateur est assimilable à un générateur de tension.

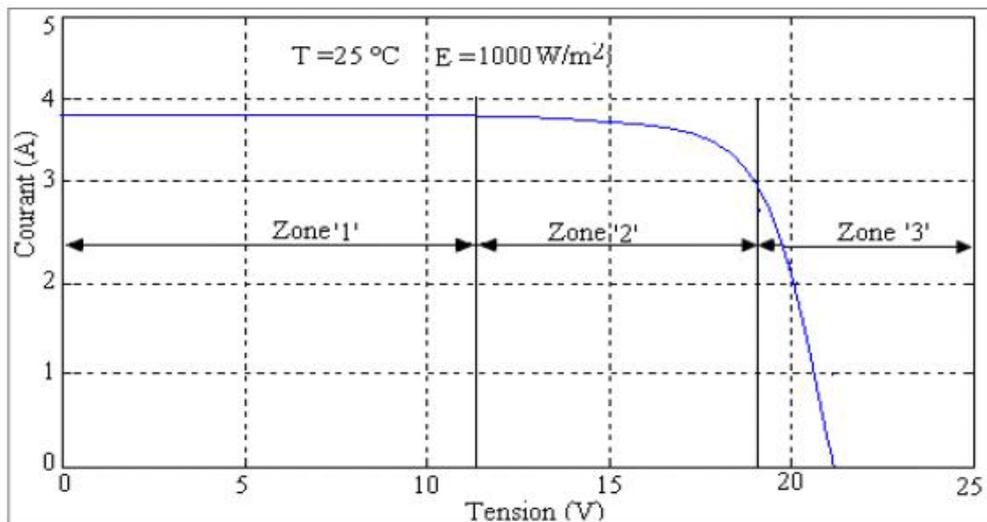


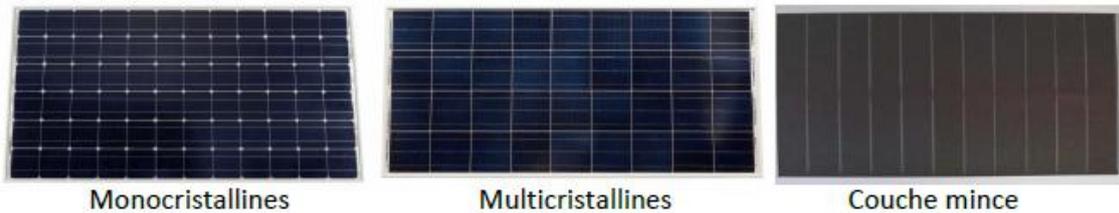
Figure (II.15) : Les différentes zones de Caractéristique I-V entre générateur et module Photovoltaïque

II.11. Module photovoltaïque :

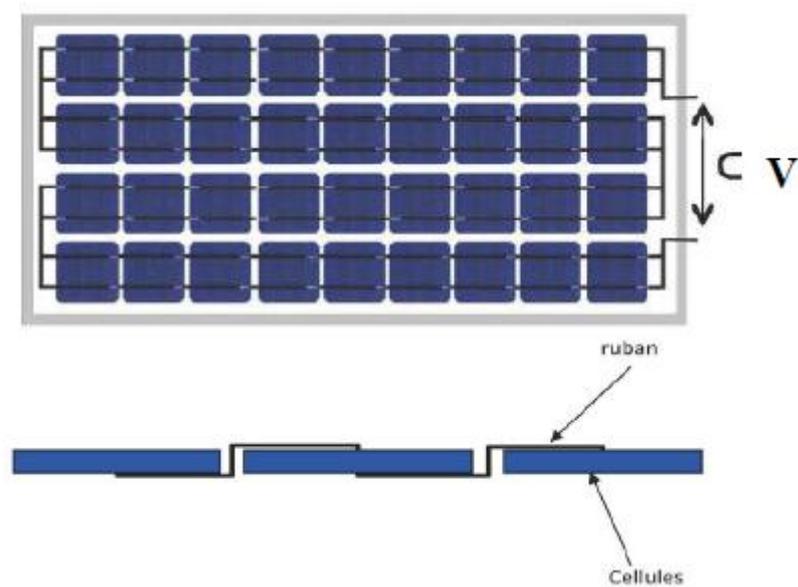
La cellule photovoltaïque élémentaire constitue un générateur de très faible puissance vis-à-vis des besoins de la plupart des applications domestiques ou industrielles. Une cellule élémentaire de quelques dizaines de centimètres carrés, délivre au maximum, quelques watts sous une tension inférieure au volt (tension de jonction PN). Pour produire plus de puissance, plusieurs cellules doivent être assemblées afin de créer un module ou un panneau photovoltaïque. En effet, les modules PV sont composés d'un ensemble de cellules mises en série, réalisant la conversion proprement dite de la lumière du soleil en électricité. Ils sont eux-mêmes associés en série et parallèle pour former un champ photovoltaïque d'une puissance crête définie selon des conditions spécifiques d'éclairement, de température et de

Chapitre 2 : les systèmes photovoltaïques solaires

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



Figure(II.16) : Module photovoltaïque.



Figure(II.17) : Câblage des cellules dans un module.

Les modules photovoltaïques assurent les fonctions suivantes :

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

II.11.1.Panneau photovoltaïque :

Le panneau solaire ou (champ solaire) se compose de modules photovoltaïques interconnectés en série et/ou en parallèle afin de produire la puissance requise. Ces modules

Chapitre 2 : les systèmes photovoltaïques solaires

sont montés sur une armature métallique qui permet de supporter le champ solaire avec un angle d'inclinaison spécifique [5].



Figure(II.18) : Panneau photovoltaïque.

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



Figure(II.19) : Boîte de dérivation.

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

- Des diodes Schottky sériées, placées sur un radiateur, sur chaque entrée, qui empêchent aux batteries de se décharger dans les panneaux.
- Des fusibles de protections qui empêcheront aux batteries de se décharger dans les modules en cas de destruction des diodes antiparallèles.
- Des diodes lumineuses, en parallèle sur chaque fusible de protection. Ces diodes permettent de contrôler individuellement chaque branche de modules. Par exemple une boîte à 4 entrées de 24 Volts sera constituée de deux branches de deux modules, il y aura donc deux diodes qui permettront de constater le fonctionnement de chaque branche.

Chapitre 2 : les systèmes photovoltaïques solaires

- Une protection parafoudre (Transil ou VDR) en sortie de la boîte.

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

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

II.11.2. La constitution d'un module photovoltaïque :

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

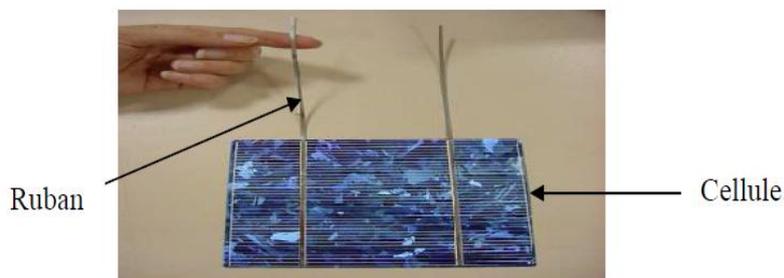


Figure (II.20) : Ruban métallique d'une cellule.

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

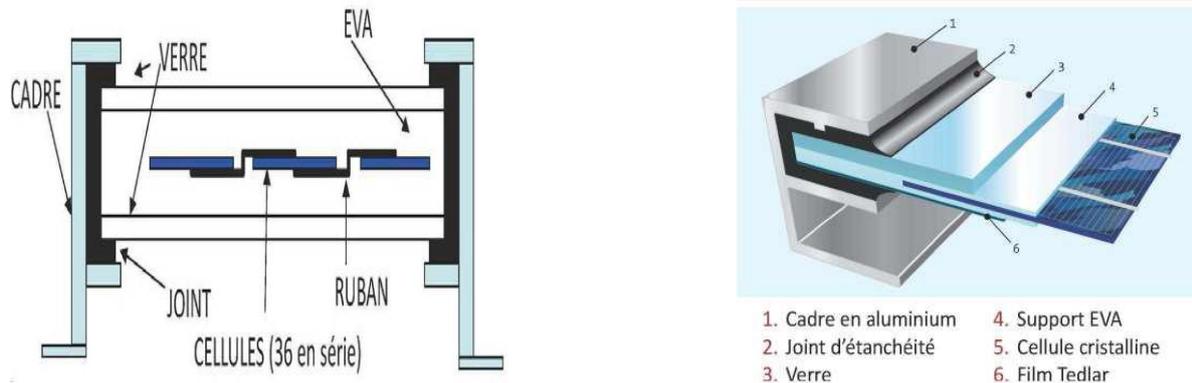


Figure (II.21) : Encapsulation des cellules.

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

II.11.3. Les principales caractéristiques d'un module :

❖ Puissance crête :

La puissance électrique produite par un module varie en fonction de l'ensoleillement. La puissance crête d'un module est la puissance délivrée sous un éclairement de 1000W/m^2 et pour une température de jonction de la cellule de 25°C . En France l'éclairement maximum reçu, la puissance crête correspond donc à une puissance maximum que le module peut fournir.

❖ Rendement :

Le rendement dépend des conditions de fonctionnement électrique (intensité, tension) des cellules. Il passe par un maximum à ce que l'on appelle le point de puissance maximale.

❖ Facteur de forme :

Rapport entre la puissance optimale P_o et la puissance maximale P_m que peut avoir la cellule : V_{co} , I_{cc} .

❖ Caractéristique courant-tension d'un module :

Le courant produit par un module varie conformément aux diagrammes courant/tension. Il dépend de l'éclairement solaire et de la température des cellules [10].

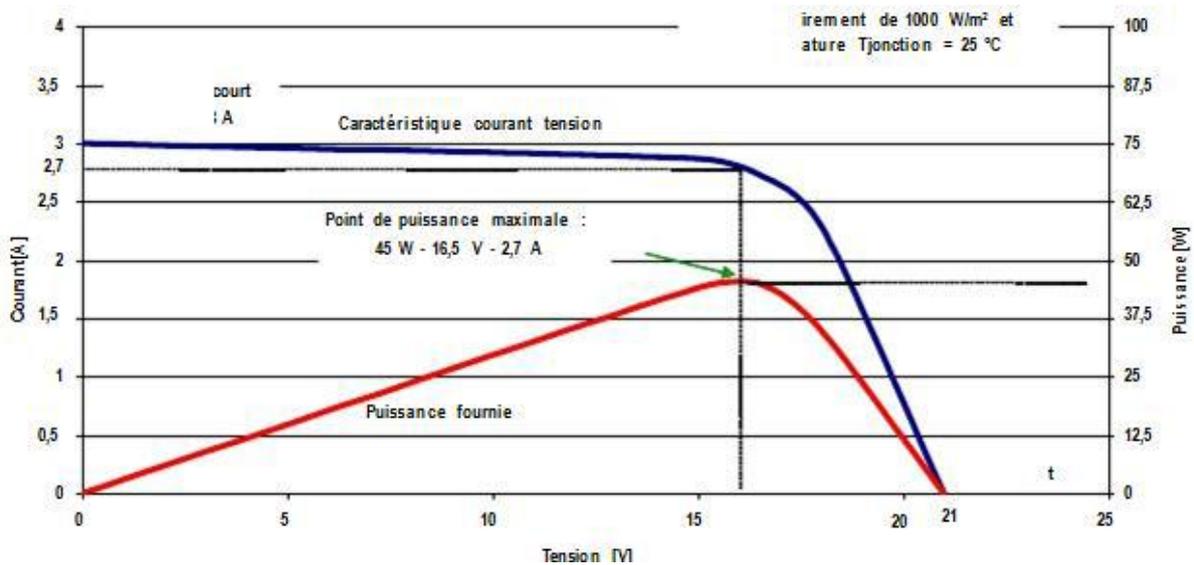


Figure (II.22) : Exemple de caractéristique courant-tension d'un module.

II.12. Influence de l'Éclairement :

Les figures (II.23) et (II.24) présentent un exemple des courbes pour différents niveaux de rayonnement :

Nous avons fixé la température pour différents éclairements.

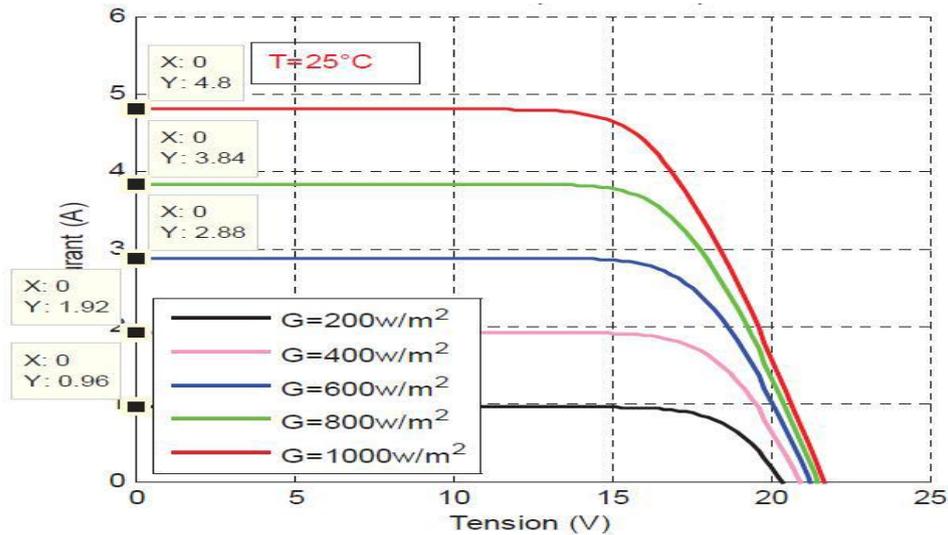


Figure (II.23) : La caractéristique $I=f(v)$ en fonction de l'éclairement [11].

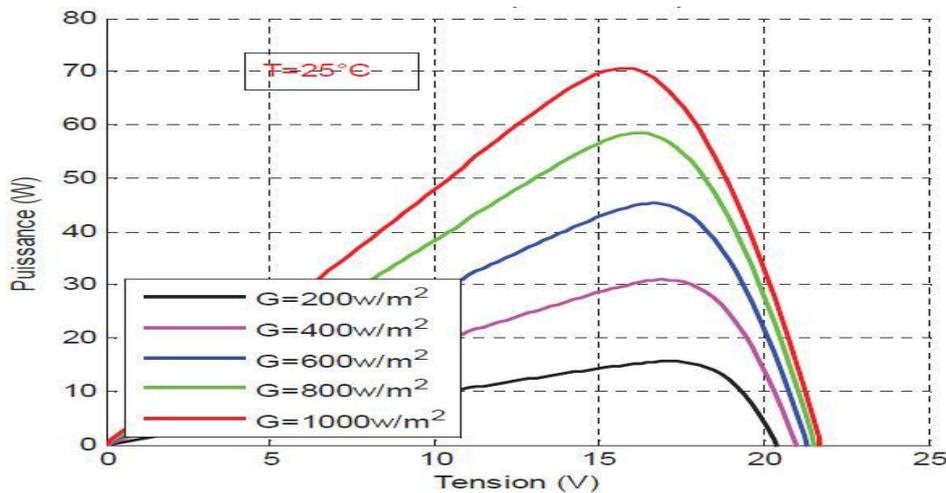


Figure (II.24) : La caractéristique $P=f(v)$ en fonction de l'éclairement [11].

Pour la figure (II.23) on remarque que pour l'éclairement $G=1000 \text{ w/m}^2$ le courant $I_{sc}=4.8\text{A}$ et pour $G=800\text{w/m}^2$ le courant $I_{sc}=3.84\text{A}$ on peut voir que le courant subit une variation importante, quand l'éclairement augmente le courant de court-circuit augmente, mais par contre la tension varie légèrement.

II.13. Influence de la Température :

Nous présentons ci-dessous les caractéristiques I-V et P-V figure (II.25) et (II.26) d'un module photovoltaïque pour un niveau d'ensoleillement G donné et pour différentes températures :

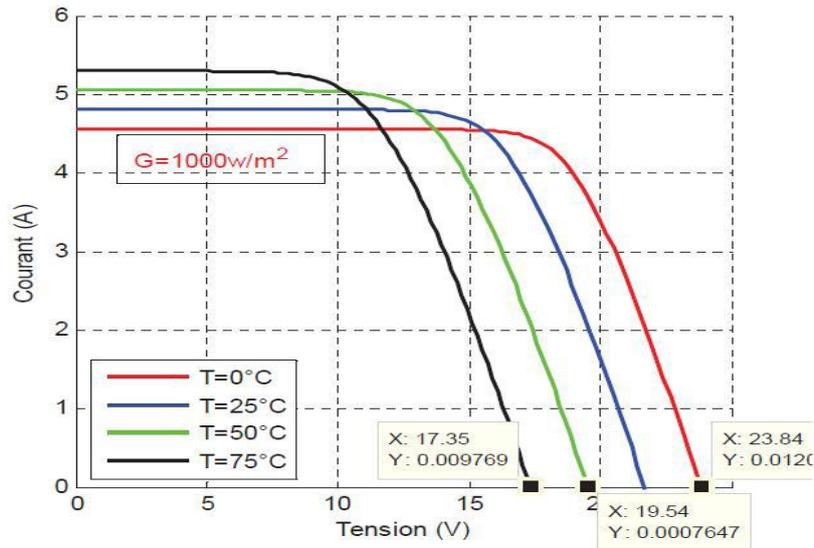


Figure (II.25) : La caractéristique de $I=f(V)$ en fonction de température [11].

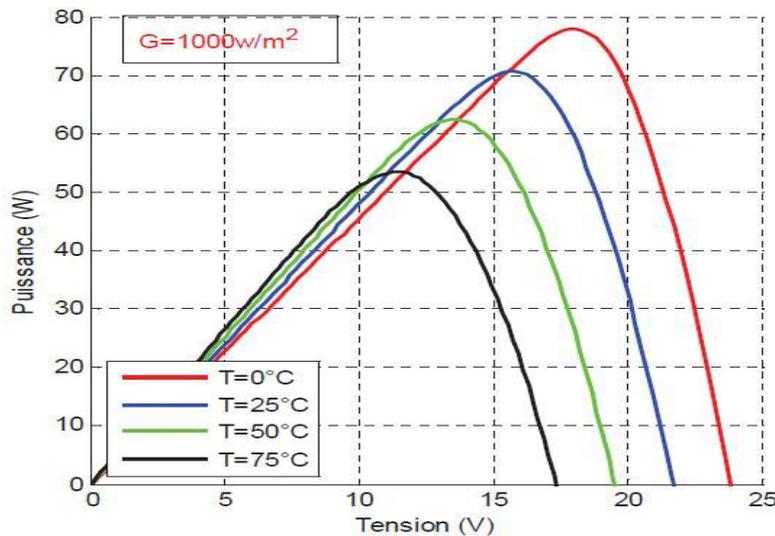


Figure (II.26) : La caractéristique de $P=f(V)$ en fonction de température [11].

Pour la figure (II.25) Nous remarquons que le courant dépend de la température puisque le Courant augmente légèrement à mesure que la température augmente, on constate que la Température influe négativement sur la tension de circuit ouvert. Quand la température augmente la tension de circuit ouvert diminue. Et par contre la puissance maximale du générateur subit une diminution lorsque la température augmente figure (II.26).

II.14.Association des cellules :

Dans la pratique les cellules solaires ne sont pas utilisées seules mais elles sont regroupées entre elle pour former un module photovoltaïque. Ainsi que le regroupement de ces modules

Chapitre 2 : les systèmes photovoltaïques solaires

pour former un panneau solaire. Dans un module les cellules on toujours regroupés en série alors que dans un panneau les modules sont groupés en parallèle ou série parallèle [1]. La figure (II.27) montre une association des cellules [10] :

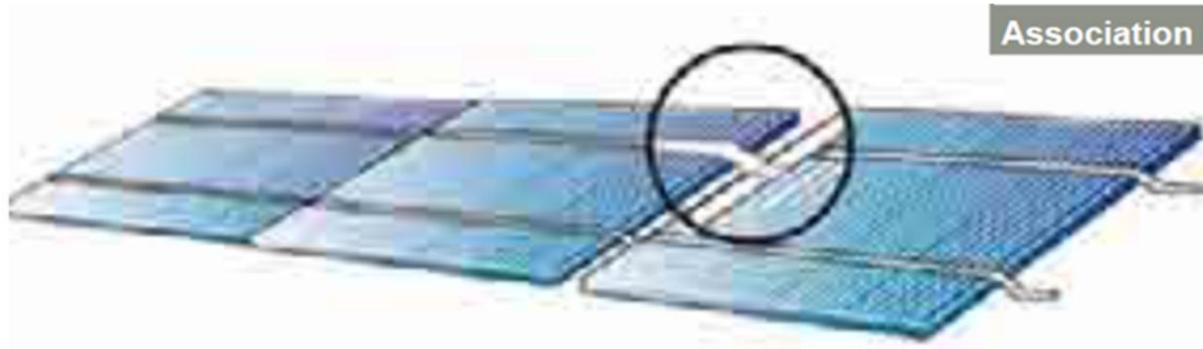


Figure (II.27) : Association des cellules.

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

$$P_{pv} = N_s \cdot V_{pn} \cdot N_p \cdot I_{pv} \quad (\text{II.18})$$

Avec :

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

V_{pn} : la tension à la sortie du GPV

I_{pv} : le courant de sortie du GPV

II.14.1. Connexion en série :

Dans un groupement en série, les cellules produisent le même courant dans toute la branche. On prendra soin de ne pas connecter en série que des cellules de caractéristique identique. La tension du panneau sera l'addition de toutes les tensions des cellules qui le compose. La caractéristique courant tension d'un groupement série sera homothétique de la courbe $I(V)$ d'une cellule de base.

$$V_{co_{tot}} = \sum_{i=1}^{i=N} V_1 = N V_{co} \quad (\text{II.19})$$

$$I_{cc_{tot}} = I_{cc} \tag{II.20}$$

Avec : N : Nombre de cellules en série.

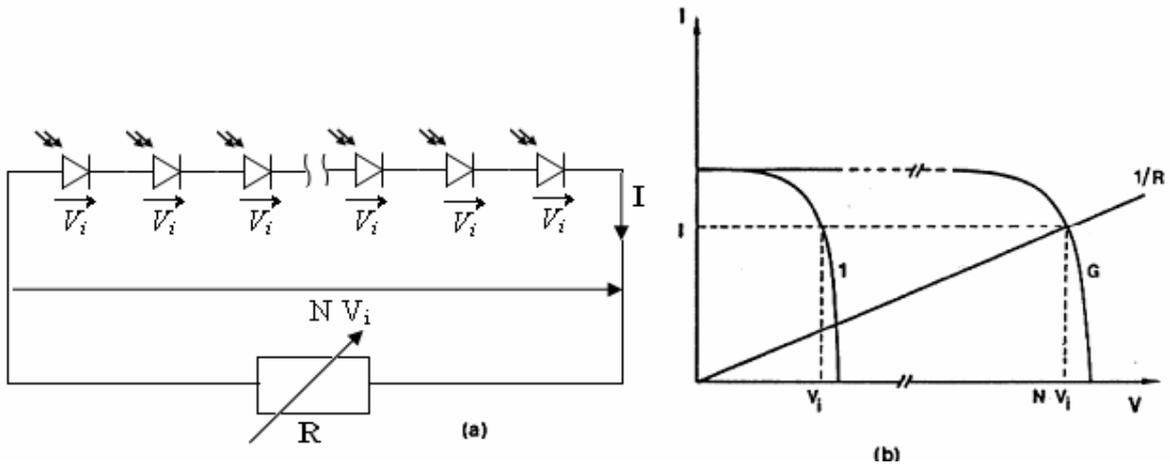


Figure (II.28) : Connexion en série.

II.14.2. Connexion en parallèle :

Pour un groupement en parallèle, les cellules sont soumises à la même tension. Les courants dans ce cas s'ajoutent. La caractéristique du module figure (II.29) est obtenue en multipliant point par point pour chaque valeur de tension, le courant de la cellule élémentaire par N_p . Pour les résistances on additionne les inverses des résistances série et parallèle [7].

$$V_{co_{tot}} = V_{co} \tag{II.21}$$

$$I_{cc_{tot}} = \sum_{i=1}^{i=N_p} I_i = N_p I_{cc} \tag{II.22}$$

Ou : N_p : Nombre de cellules en parallèle.

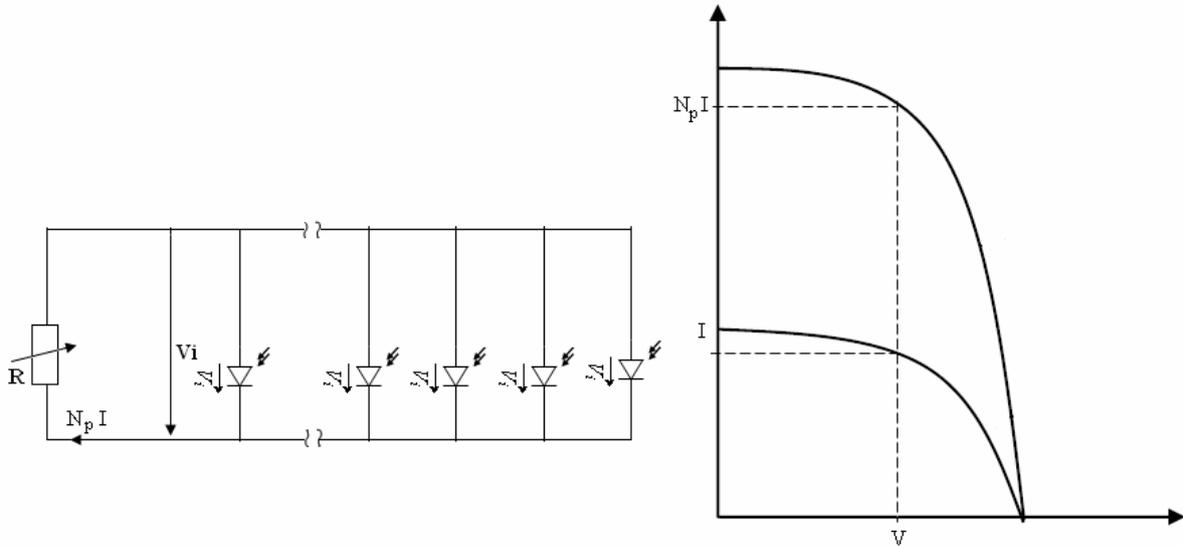


Figure (II.29) : Connexion en parallèle.

II.14.3. Connexion mixte :

Le groupement mixte ou hybride figure (II.29) est un assemblage de N branches de cellules photovoltaïques en parallèles, ou chaque branche est l'association de M cellules en séries. Les valeurs de la tension du circuit ouvert V_{pv} et le courant de court-circuit I_{pv} délivré par ce panneau photovoltaïque sont en fonction des caractéristiques des cellules élémentaires

(V_{co} , I_{cc}), donné par :

$$V_{pv} = MV_{co} \quad (II.23)$$

$$I_{pv} = NI_{cc} \quad (II.24)$$

La puissance fournie par le module est :

$$P_{pv} = MNV_{co}I_{cc} \quad (II.25)$$

Avec : V_{co} , I_{cc} : tension de circuit ouvert et courant de court-circuit de la cellule élémentaire.

M, N : nombre de cellules en séries et nombre de branches en parallèles.

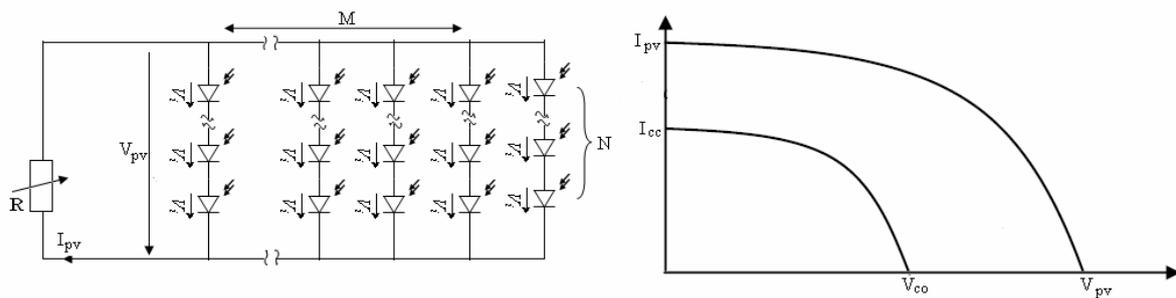


Figure (II.30) : Connexion mixte.

II.15. Déséquilibre dans un générateur PV :

Dans les associations série et parallèle, les modules PV étaient considérés identiques vis-à-vis de l'éclairement et de la température, mais en réalité, ce n'est pas toujours le cas. Les problèmes rencontrés sont liés au fait qu'une cellule peut être amenée à travailler comme récepteur électrique au lieu de générer de l'énergie. Cela se produit notamment si elle est ombragée.

Donc, elle est soumise à une tension inverse égale à la somme des tensions de toutes les autres cellules

Pour cela, il faut assurer une protection contre ces phénomènes de retour de courant qui causent des risques destructifs, comme le montre la figure

II.15.1. Protection par diode anti-retour :

Comme son nom l'indique, cette diode sert à empêcher un ensemble de cellules connectées en série dans une branche d'un générateur PV de recevoir l'énergie électrique provenant d'autres branches mises en parallèle. Elle protège aussi le générateur PV contre le retour de l'énergie stockée dans les batteries lors des conditions atmosphériques défavorables ou durant la nuit

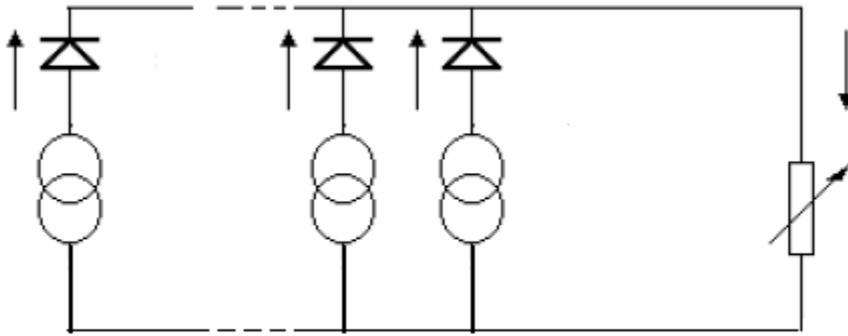


Figure (II.31) : Protection par diode anti –retour.

II.15.2. Protection par diode by-pass

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 direct puisqu'elle devient passante.

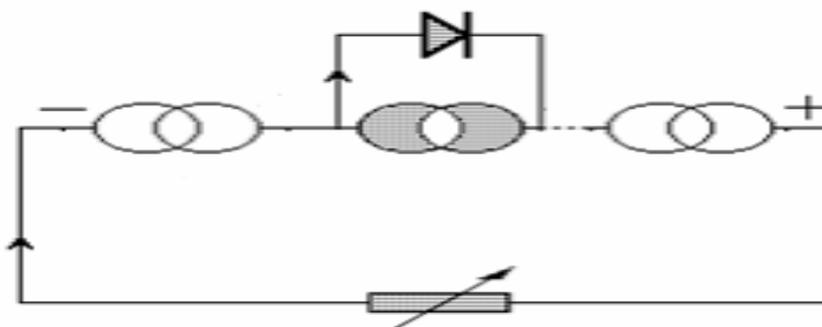


Figure (II.32) : Protection par diode by-pass.

II.16. Avantages et inconvénients d'une installation PV :

❖ **Avantage :**

- D'abord une haute fiabilité. L'installation ne comporte pas de pièces mobiles qui la rendent particulièrement appropriée aux régions isolées. C'est la raison de son utilisation sur les engins spatiaux.

Chapitre 2 : les systèmes photovoltaïques solaires

- Ensuite le caractère modulaire des panneaux photovoltaïques permet un montage Simple et adaptable à des besoins énergétiques divers.

Les systèmes peuvent être dimensionnés pour des applications de puissances allant du milliwatt au Méga Watt

- Le coût de fonctionnement est très faible vu les entretiens réduits et il ne nécessite ni combustible, ni son transport, ni personnel hautement spécialisé.
- La technologie photovoltaïque présente des qualités sur le plan écologique car le produit fini est non polluant, silencieux et n'entraîne aucune perturbation du milieu, si ce n'est par l'occupation de l'espace pour les installations de grandes dimensions [7].

❖ Inconvénients :

- La fabrication du module photovoltaïque relève de la haute technologie et requiert des investissements d'un coût élevé.
- Le rendement réel de conversion d'un module est faible, de l'ordre de 10-15 % (soit entre 10 et 15 MW/km² pour le BENELUX) avec une limite théorique Pour une cellule de 28%. Les générateurs photovoltaïques ne sont pas compétitifs par rapport aux générateurs diesel que pour des faibles demandes d'énergie en régions isolées.
- Tributaire des conditions météorologiques.
- Lorsque le stockage de l'énergie électrique sous forme chimique (batterie) est Nécessaire, le coût du générateur est accru.
- Le stockage de l'énergie électrique pose encore de nombreux Problèmes. Le faible rendement des panneaux photovoltaïques s'explique par le Fonctionnement même des cellules. Pour arriver à déplacer un électron, il faut que l'énergie du rayonnement soit au moins égale à 1 eV. Tous les rayons incidents ayant une énergie plus faible ne seront donc pas transformés en électricité. De même, les rayons lumineux dont l'énergie est supérieure à 1 eV perdront cette énergie, le reste sera dissipé sous forme de chaleur [7].

CHAPITRE III

ALGORITHMES MPPT POUR UN

PANNEAU PHOTOVOLTAÏQUE

Chapitre 3 : algorithmes MPPT pour un panneau photovoltaïque

III.1.Introduction :

Dans un système de conversion des énergies renouvelables, des convertisseurs sont utilisés pour charger des batteries de stockage et pour transformer le courant continu en courant alternatif et inversement. Trois types de convertisseurs sont souvent rencontrés dans les énergies renouvelables : les redresseurs, les onduleurs, les hacheurs.

L'étude du convertisseur est intéressante dans la mesure où il est utilisé dans la plupart des nouveaux types de sources de production d'énergie dispersée connectée au réseau (éolienne, photovoltaïque, pile à combustible...) [12].

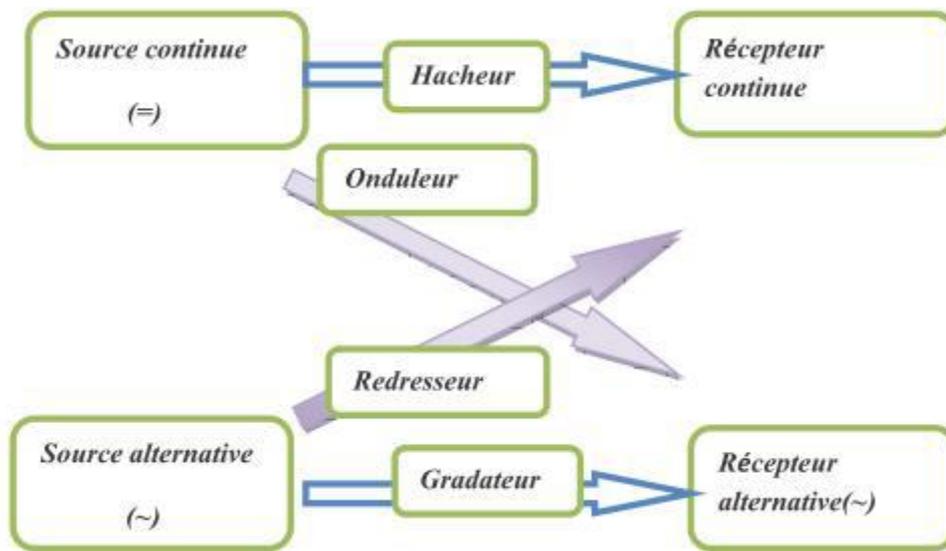


Figure (III.1) : les différents types de convertisseurs statiques.

Dans ce chapitre nous présentons les différents types des convertisseurs statiques qu'on peut utiliser dans le système photovoltaïque. Premièrement on commence par les convertisseurs (DC-DC) et sont différents types, et on termine par les convertisseurs (DCAC).

On présente dans ce chapitre, quelques méthodes MPPT basées sur réaction de puissance, comme l'algorithme d'incrément de l'inductance et méthode de perturbation et observation

III.2.Les Hacheurs :

Le hacheur est un convertisseur continue/continue permettant de convertir une énergie continue à un niveau donné de tension (ou de courant) en une énergie continue à un autre niveau de tension (ou de courant). Son utilisation s'avère nécessaire pour stocker l'énergie photovoltaïque dans des batteries, ou pour alimenter une charge continue [13].

Le hacheur se compose de condensateurs, d'inductance et de commutateurs. Dans le cas idéal, tous ces dispositifs ne consomment aucune puissance active, c'est la raison pour laquelle on a des bons rendements dans les hacheurs [14].

Les hacheurs sont des convertisseurs continu qui procèdent par découpage d'une grandeur d'entrée continue, tension ou courant et dont la grandeur de sortie est également continue ou à faible ondulation [1].

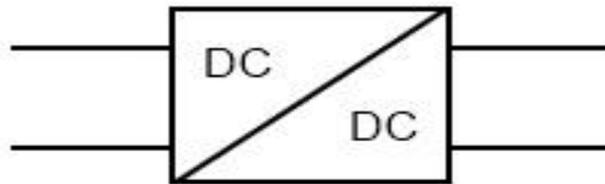


Figure (III.2) : Symbole d'un convertisseur DC-DC.

III.2.1.Type des hacheurs :

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

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

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

- hacheur abaisseur (ou buck).
- hacheur élévateur (ou boost) [3].

III.2.2.Hacheur Buck :

C'est un convertisseur direct DC-DC. Le convertisseur buck dévolteur peut être souvent trouvé dans la littérature sous le nom de hacheur dévolteur ou hacheur série. La source d'entrée est de type tension continue et la charge de sortie continue de type source de courant. L'interrupteur K figure (III.3) 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) [3].

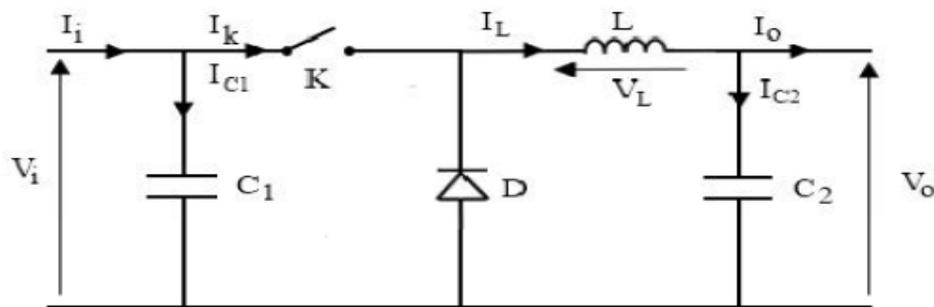


Figure (III.3) : Schéma électrique d'un hacheur buck.

a)-Fonctionnement

On note α : le rapport cyclique des impulsions qui commandent l'interrupteur.

T_e : étant la période des impulsions.

Quand l'interrupteur est fermé pendant la durée αT_e , la tension appliquée aux bornes de la diode. L'interrupteur est commandé à la fréquence de découpage $f_e = \frac{1}{T_e}$. La source V_i fournit de l'énergie à la charge et à l'inductance. Pendant le temps $t \in [\alpha T_e, T_e]$ l'interrupteur s'ouvre et l'énergie emmagasinée dans l'inductance commande la circulation du courant dans la diode de roue libre D. La tension à ses bornes est donc nulle [3].

Les chronogrammes (tracés dans le cas idéal) de la figure (III.4) sont tracés dans le cas d'une conduction continue, c'est-à-dire que le courant ne repasse jamais par zéro. Pour calculer la relation entre la tension d'entrée et celle de sortie, on exprime que la tension moyenne aux bornes de l'inductance est nulle [3].

$$V_0 = \alpha \cdot v_i \quad (III.1)$$

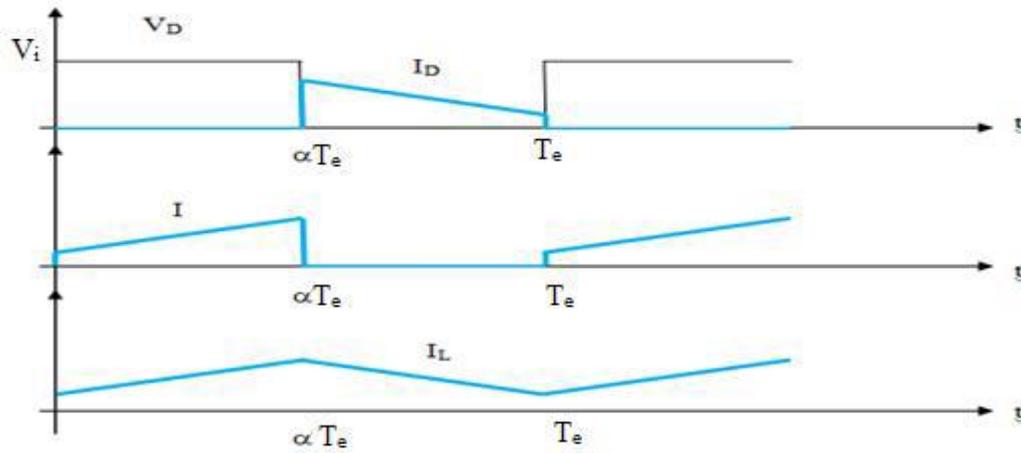


Figure (III.4) : Chronogrammes de courant et tension d'un hacheur buck

b) Modèle mathématique équivalent :

Pour savoir le comportement réel nous devons faire la représentation du circuit équivalent par les deux états du commutateur et de tirer par suite le modèle mathématique reliant les variables d'entrée/sortie. La figure (III.5) montre le schéma du circuit équivalent d'un convertisseur dévolteur avec le commutateur fermé, tandis que la figure (III.6) représente le convertisseur dévolteur avec le commutateur ouvert pendant $(1 - \alpha) T_e$ [3].

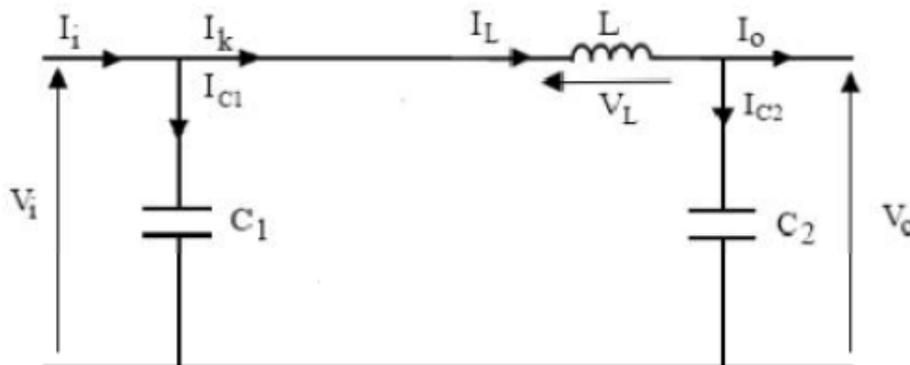


Figure (III.5) : Schéma électrique d'un hacheur buck fermé

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

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

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

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

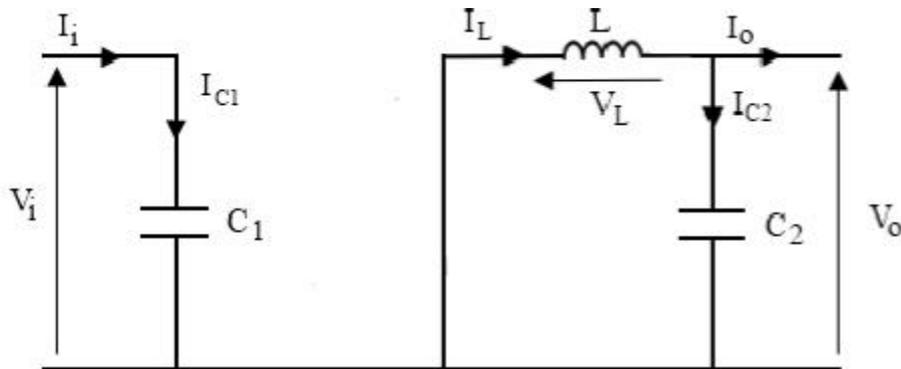


Figure (III.6) : Schéma électrique d'un hacheur buck ouvert.

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

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

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

III.2.3.Hacheur boost:

C'est un convertisseur direct DC-DC. La source d'entrée est de type courant continu (inductance en série avec une source de tension) et la charge de sortie est de type tension continue (condensateur en parallèle avec la charge résistive). L'interrupteur K peut être remplacé par un transistor puisque le courant est toujours positif et que les commutations doivent être commandées (au blocage et à l'amorçage) [3]. Connue aussi sous le nom de « boost » ou hacheur parallèle ; son schéma de principe de base est celui de la figure (III.7). Son application typique est de convertir sa tension d'entrée en une tension de sortie supérieure [14].

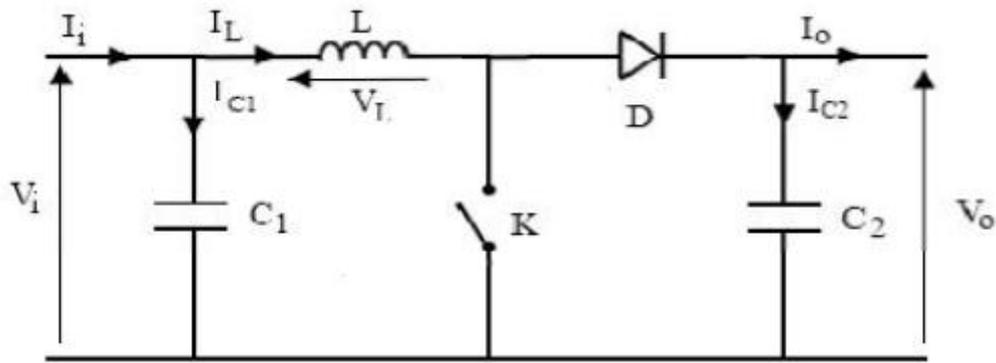


Figure (III.7) : Schéma électrique d'un hacheur boost

a) Fonctionnement :

Quand l'interrupteur est fermé pendant la durée, le courant dans l'inductance croît linéairement. La tension aux bornes de K est nulle. Pendant le temps, l'interrupteur s'ouvre et l'énergie emmagasinée dans l'inductance commande la circulation du courant dans la diode de roue libre D . En écrivant que la tension aux bornes de l'inductance est nulle, on arrive à [3]

$$V_o(1 - \alpha) = V_i \tag{III.8}$$

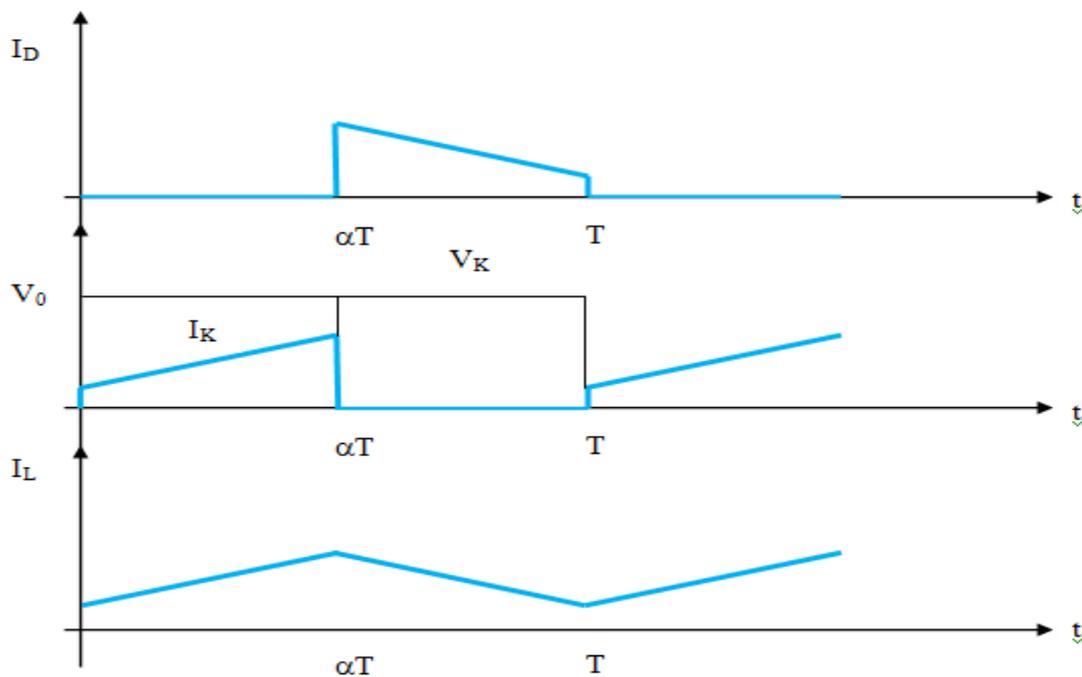


Figure (III.8) : Chronogrammes de courant et tension d'un hacheur boost.

b) Modèle mathématique équivalent :

Afin de pouvoir synthétiser les fonctions du hacheur survolteur à l'état d'équilibre, il est nécessaire de présenter les schémas équivalents du circuit à chaque position de l'interrupteur K. celui de la figure (III.9) présente le circuit équivalent du boost lorsque K est fermé c.-à-d. d'entre $[0, \alpha T_e]$ [3].

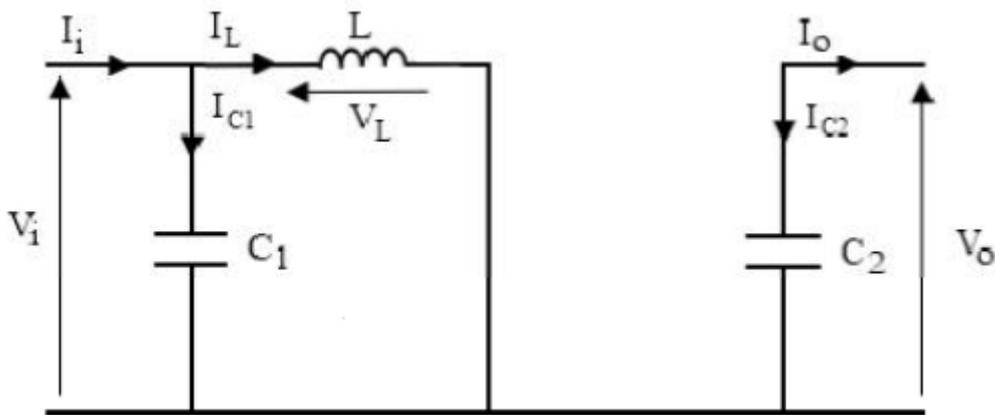


Figure (III.9) : Schéma électrique d'un hacheur boost fermé

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

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

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

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

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

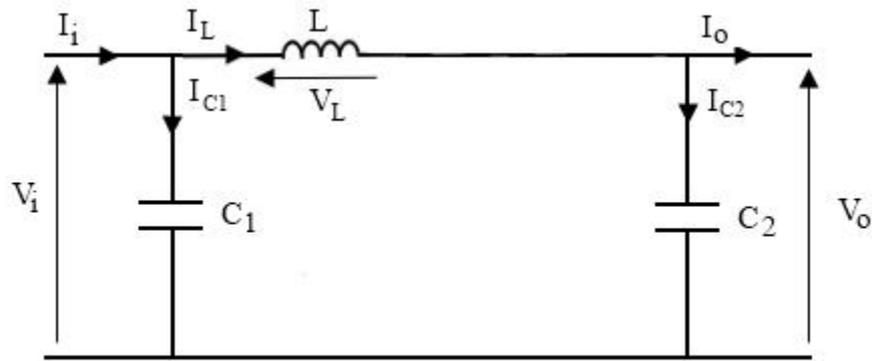


Figure (III.10) : Schéma électrique d'un hacheur boost ouvert.

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

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

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

III.3.La commande MPPT :

Un MPPT, (Maximum Power Point Tracker) est un principe permettant de suivre, comme son nom l'indique, le point de puissance maximale d'un générateur électrique. Les systèmes MPPT sont généralement associés avec les générateurs photovoltaïques ou encore avec les générateurs éoliens [16].

III.3.1.Suivi de la puissance maximale du générateur photovoltaïque :

La poursuite du point maximum de la puissance (MPPT) est une partie essentielle dans les systèmes photovoltaïques. Plusieurs techniques sont développées depuis 1968 date de publication de la première loi de commande de ce type adaptées à une source d'énergie renouvelable de type PV. Ces techniques se différencient entre elles par leur complexité, nombre de capteurs requis, la vitesse de convergence, coût, rendement et domaine d'application [16].

Chapitre 3 : algorithmes MPPT pour un panneau photovoltaïque

III.3.2.Principe du MPPT :

Par définition, une commande MPPT, associée à un étage intermédiaire d'adaptation, permet de faire fonctionner un générateur PV de façon à produire en permanence le maximum de sa puissance. Ainsi, quels que soient les conditions météorologiques (température et l'éclairement), la commande du convertisseur place le système au point de fonctionnement maximum (V_{mpp} , I_{mpp}) [16].

L'adaptation d'impédance est souvent sous forme d'un convertisseur DC – DC comme représenté sur la figure (III.11).

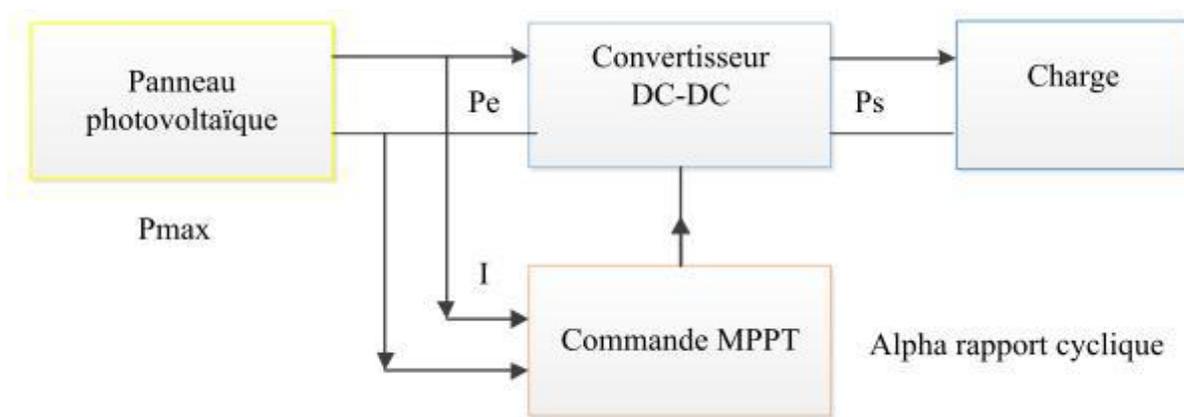


Figure (III.11) : Chaîne de conversion d'énergie solaire comprenant une commande MPPT.

La technique de contrôle communément utilisée consiste à agir sur le rapport cyclique de manière automatique pour amener le générateur à sa valeur optimale de fonctionnement qu'elles que soient les instabilités météorologiques ou variations brutales de charges qui peuvent survenir.

La figure (III.12) illustre trois cas de perturbations. Suivant le type de perturbation, le point de fonctionnement bascule du point de puissance maximal PPM1 vers un nouveau point P1 de fonctionnement plus ou moins éloigné de l'optimum.

- Pour une variation d'ensoleillement (cas a), Il suffit de réajuster la valeur du rapport cyclique pour converger vers le nouveau point de puissance maximum PPM2.
- Variations de température de fonctionnement du GPV (cas c). Bien qu'il faille également agir au niveau de la commande.

Chapitre 3 : algorithmes MPPT pour un panneau photovoltaïque

- Pour une variation de charge (cas b).

On peut également constater une modification du point de fonctionnement qui peut retrouver une nouvelle position optimale grâce à l'action d'une commande.

En résumé, le suivi du PPM réalisé au moyen d'une commande spécifique nommée MPPT agit essentiellement sur le rapport cyclique du convertisseur statique (CS) pour rechercher et atteindre le PPM du GPV. Il existe plusieurs principes de fonctionnement des commandes MPPT plus ou moins performantes basées sur les propriétés du GPV [12].

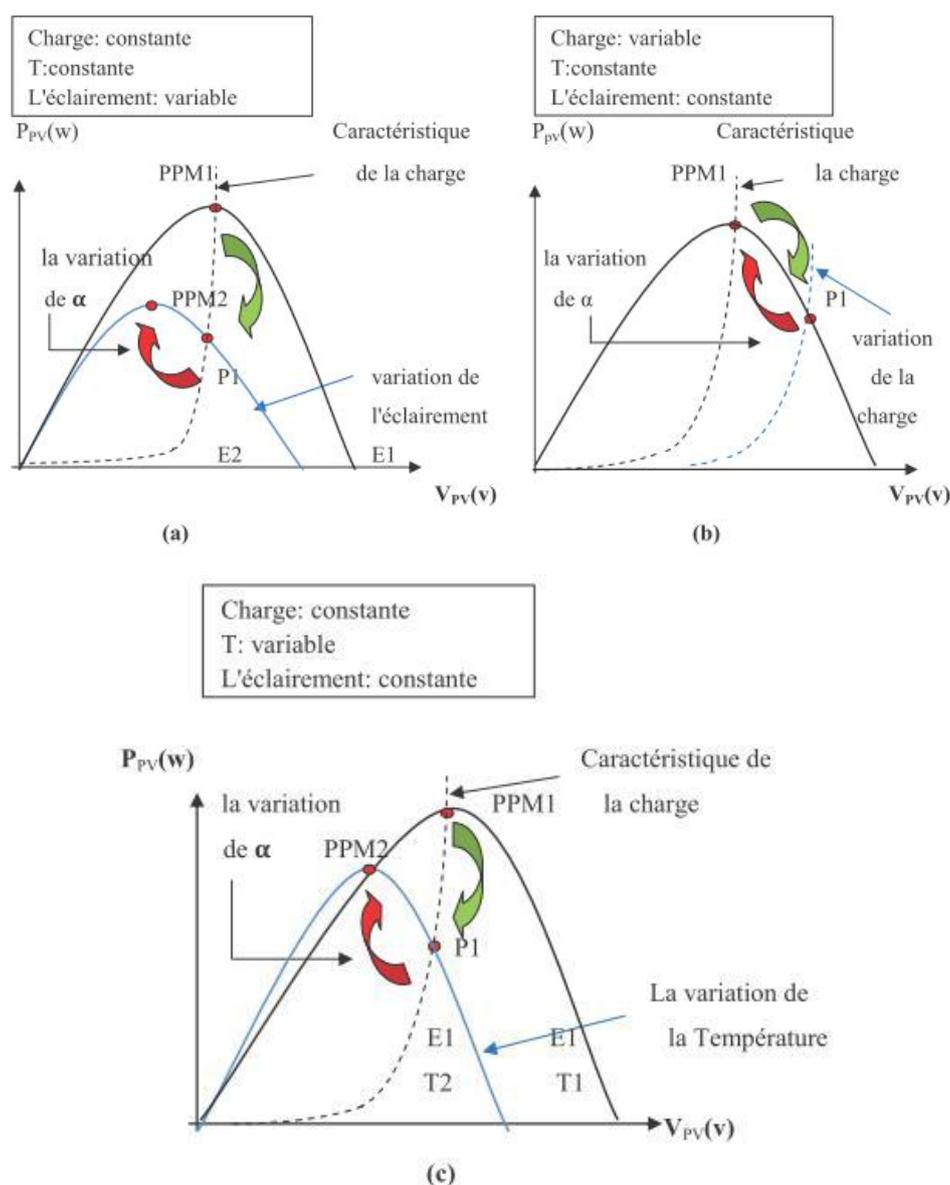


Figure (III.12) : Recherche et recouvrement du Point de Puissance Maximale a) suite à une variation d'éclairement, b) suite à une variation de charge, c) suite à une variation de température.

Chapitre 3 : algorithmes MPPT pour un panneau photovoltaïque

III.3.3. Classification des techniques MPPT :

Diverses publications sur les commandes assurant un fonctionnement de type commande MPPT apparaissent régulièrement dans la littérature depuis 1968, date de publication de la première loi de commande de ce genre, adaptée à une source d'énergie renouvelable de type photovoltaïque. Etant donné le grand nombre de publications dans ce domaine, nous avons fait une classification des différentes MPPT existantes en les regroupant selon leur principe de base. La classification, en plus du principe, s'est effectuée selon des critères comme la précision de la recherche ou sa rapidité pour en faire une évaluation comparative [12].

III.3.4. Les premiers types de technique MPPT :

L'algorithme mis en œuvre dans les premières commandes MPPT était relativement simple. En effet, les capacités des microcontrôleurs disponibles à l'époque étaient faibles et les applications surtout destinées au spatial avaient beaucoup moins de contraintes en variation de température et d'éclairement que les applications terrestres appliquées initialement.

Au photovoltaïque, son principe a d'abord été décrit par A.F. Bohringer. Cette commande est basée sur un algorithme de contrôle adaptatif, permettant de maintenir le système à son point de puissance maximum (PPM) [12].

Ce dernier est décrit en figure (III.13) et peut être implanté entièrement en numérique.

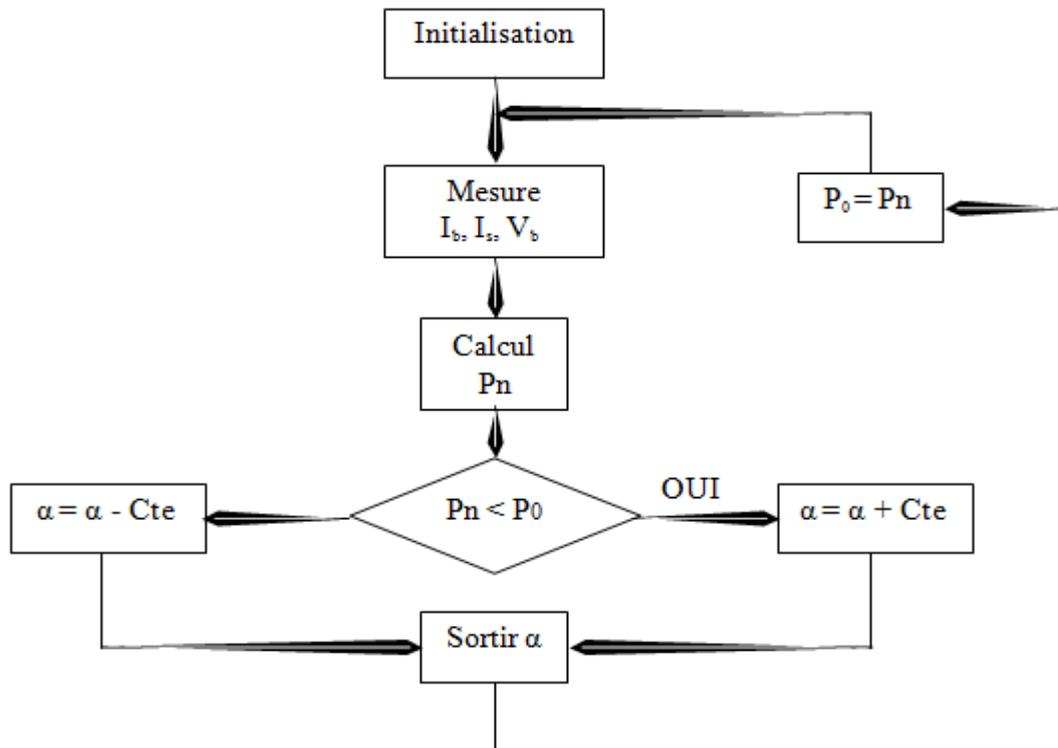


Figure (III.13) : Principe classique d'une MPPT pouvant être implantée en numérique.

Le système démarre d'un rapport cyclique initial α_0 et d'une puissance initiale P_0 après avoir effectué la mesure du courant I_b et de la tension V_b aux bornes de la batterie et du courant de charge I_s , le produit $[(I_b + I_s) \times V_b]$ est calculé. Ce dernier est l'image de la puissance instantanée P_n délivrée par le générateur PV à l'instant où la mesure a été effectuée.

Cette image est alors comparée à la puissance P_0 , si P_n est inférieure à P_0 , alors α est incrémenté, sinon α est réduit. Une fois α modifié, P_0 prend la valeur P_n et on effectue une nouvelle mesure de I_b, V_b et I_s pour calculer la nouvelle puissance P_n .

Ainsi, par un algorithme numérique de recherche, on peut régler la précision de cette commande de façon à obtenir un rendement MPPT proche de 100% en fonction de l'algorithme implanté. De plus, le temps de calcul de la MPPT est directement fonction de l'algorithme implanté ainsi que des performances du microprocesseur [1].

III.3.5. Evolution du point d'opération du générateur PV :

Nous devons chercher le point de puissance maximale, pour cela, nous comparons un point de puissance (P_2) mesuré à l'instant (t) avec un point de puissance (P_1) mesuré à l'instant ($t-1$) (figure III.12).

Chapitre 3 : algorithmes MPPT pour un panneau photovoltaïque

Si $P1 < P2$, la dérivée est positive, cela signifie que nous nous rapprochons du point de puissance maximal.

Si la dérivée de puissance est négative, cela veut dire que nous avons dépassé le point de puissance maximal.

Les commandes MPPT présentant finalement un bon compromis de rendements en statique et dynamique mais aussi de robustesse sont basées sur une continuelle évaluation de la puissance et une comparaison avec l'état à l'instant précédent [1].

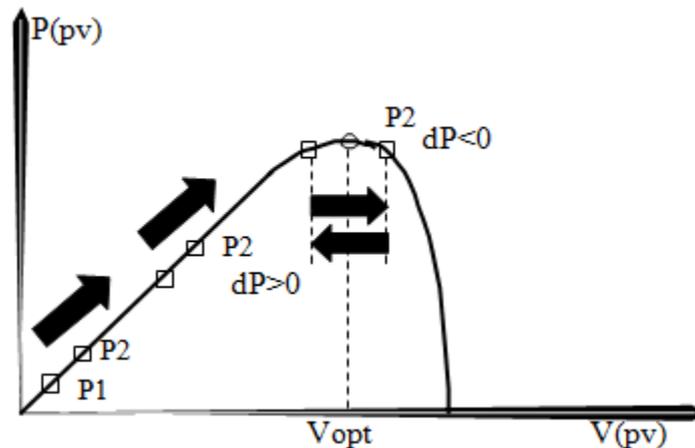


Figure (III.14) : Principe de fonctionnement d'une commande MPPT.

Cependant, pour la plupart des commandes MPPT, pour arriver à converger dans de bonnes conditions, quel que soit l'algorithme, il faut que les courbes de puissance délivrées par le générateur soient constantes ou lentement variables. Si cette hypothèse n'est pas respectée (changements brutaux des conditions de fonctionnement) le système peut diverger.

Nous avons répertorié les différents problèmes qui peuvent survenir [1] :

La puissance délivrée par le générateur peut présenter plusieurs maximums. Cela peut se produire, en particulier, lorsque les diodes de protections (diodes by-pass) des cellules PV associées en série et ou en parallèle se ferment.

Des changements brutaux d'éclairement et de charge peuvent survenir à tout moment sans que la fréquence de ces changements soit prévisible. Ainsi, le générateur peut à tout instant avoir sa courbe de puissance modifiée et donc son PPM comme l'illustre la figure(III.23).Le point de fonctionnement (P1) se trouve sur la partie montante de la courbe de puissance l'avant le changement d'éclairement. Suite à la variation d'éclairement, le point de fonctionnement passe de P1 à P2 qui se trouve sur la courbe de puissance 2. En comparant la puissance P2 et P1, on en déduit une dérivée négative, donc on inverse le sens de poursuite pensant avoir dépassé le point de puissance maximum, ici la commande MPPT perd momentanément le

Chapitre 3 : algorithmes MPPT pour un panneau photovoltaïque

PPM. De plus, le changement du sens de la poursuite fait éloigner encore plus le point d'opération du PPM.

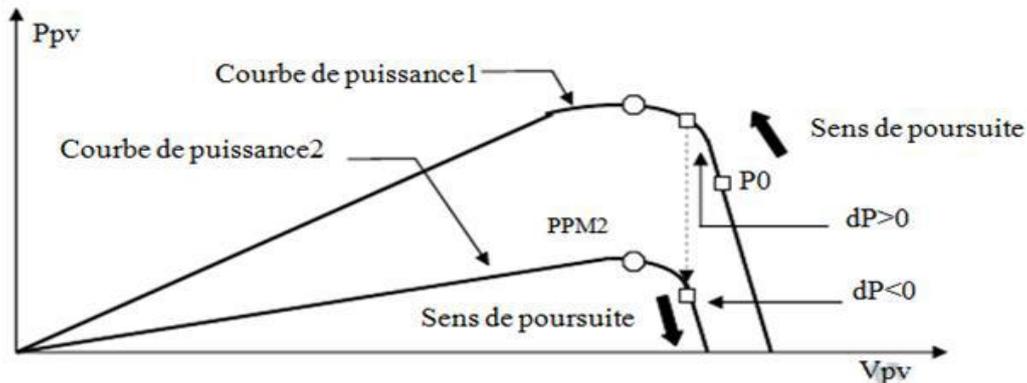


Figure (III.15) : Changement d'éclairement et conséquence sur les courbes de puissance d'un générateur PV ainsi que sur l'adaptation source-charge.

III.4. Les méthodes de poursuite de MPP :

Il existe de nombreux algorithmes utilisés pour trouver le point de puissance maximale. Idéalement, le suivi de la puissance se fait automatiquement pour s'adapter aux conditions météorologiques variables [3].

III.4.1. Méthodes à contre réaction de tension :

Dans ce cas on se repose sur la commande de la tension de fonctionnement des panneaux, par la comparaison de cette tension avec une tension de référence. Cela génère une tension d'erreur qui fait varier le rapport cyclique de la commande PWM afin d'annuler cette erreur [16].

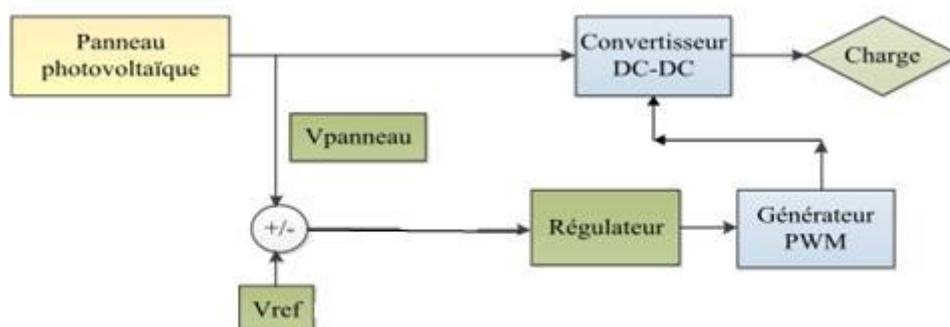


Figure (III. 16) : Principe de la méthode à contre réaction de tension avec tension de référence.

Chapitre 3 : algorithmes MPPT pour un panneau photovoltaïque

On a trois types de cette méthode selon la nature de la tension de référence (fixe ou variable, interne ou externe).

- Référence fixe.
- Référence en fonction de V_{oc} .
- Tension de référence externe (Cellule pilote).

III.4.2.Méthodes à contre réaction de courant :

Par analogie avec les méthodes de contre réaction de tension on a le schéma décrit par la figure (III.17) [16].

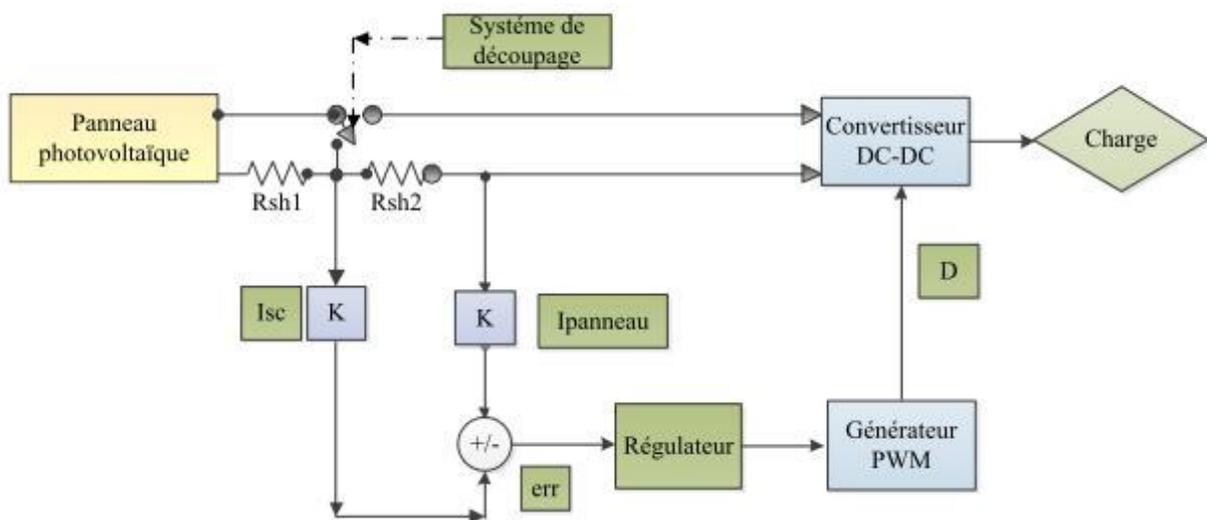


Figure (III. 17) : Principe de la méthode MPPT à courant de référence en fonction d' I_{sc}

❖ Ainsi nous avons présenté les méthodes suivantes :

- Référence en fonction du courant de court-circuit I_{cc} .
- Référence externe (Cellule pilote).

III.4.3.Méthodes à contre réaction de puissance :

Les méthodes à contre réaction de puissance se basent sur des algorithmes de recherche itérative pour trouver le point de fonctionnement du panneau afin que la puissance générée soit maximale sans interruption de fonctionnement du système.

La puissance extraite du panneau est calculée à partir des mesures de courant I et de tension V du panneau et la multiplication de ces deux grandeurs $P = V \times I$ [16].

III.4.3.1. Algorithme perturbation et observation :

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

Si la valeur de la puissance actuelle du générateur est supérieure à la valeur précédente alors on garde la même direction de perturbation précédente sinon on inverse la perturbation du cycle précédent.

L'organigramme de l'algorithme de perturbation et de l'observation (P et O) est donné par la Figure (III.18) [3].

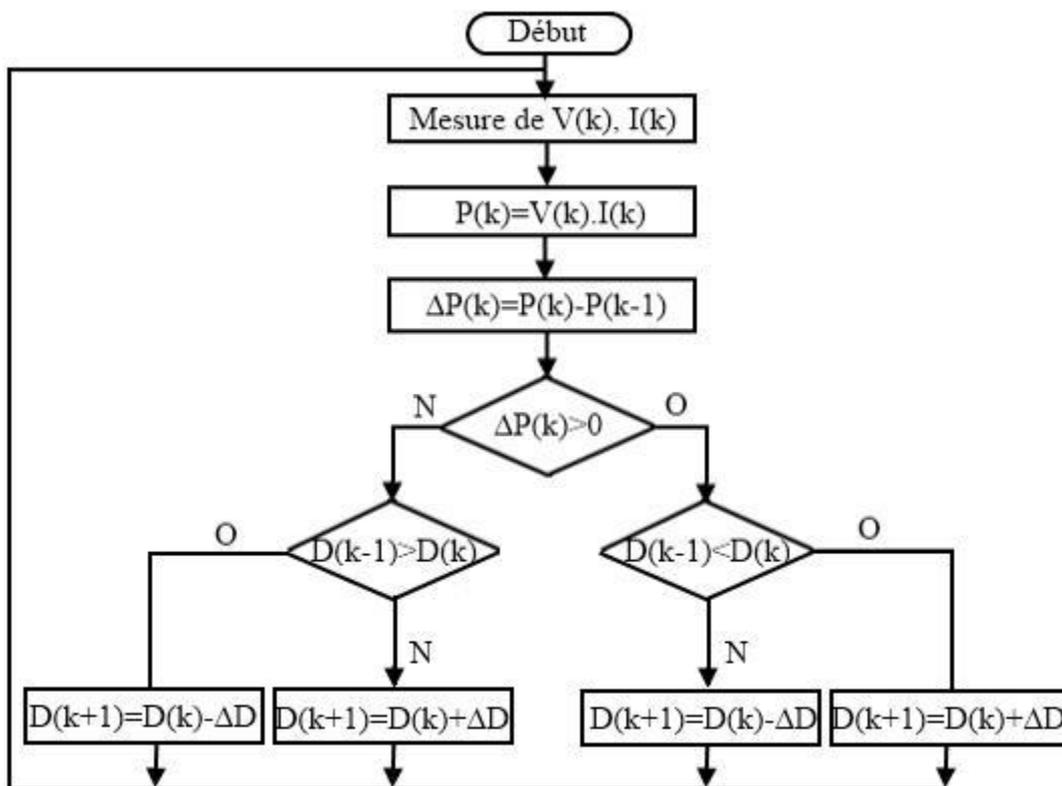


Figure (III.18) : Algorithme de perturbation et de l'observation (P et O).

III.4.3.2. Algorithme incrémentation de la conductance :

L'algorithme par incrémentation de conductance se résulte en dérivant la puissance du panneau photovoltaïque par rapport à la tension et en mettant le résultat égal à zéro. Ceci peut être décrit par les équations suivantes [3]:

Chapitre 3 : algorithmes MPPT pour un panneau photovoltaïque

$$\frac{dp}{dv} = I + V \frac{dI}{dv} \quad (\text{III.15})$$

$$\frac{1}{v} \frac{dp}{dv} = \frac{I}{v} + \frac{dI}{dv} \quad (\text{III.16})$$

On définit la conductance de la source et incrémentation de la conductance puisque la tension V du panneau est toujours positive, la relation (III.8) explique que le point de puissance maximale MPP est atteint si la conductance de la source égale incrémentation de la conductance de la source avec un signe moins, et qu'elle est à gauche de ce point lorsque la conductance est supérieure il l'incrémentale conductance et vice-versa [3], comme suit :

$$\frac{dp}{dv} > 0 \text{ si } \frac{I}{v} > -\frac{dI}{dv} \quad (\text{III.17})$$

$$\frac{dp}{dv} = 0 \text{ si } \frac{I}{v} = -\frac{dI}{dv} \quad (\text{III.18})$$

$$\frac{dp}{dv} < 0 \text{ si } \frac{I}{v} < -\frac{dI}{dv} \quad (\text{III.19})$$

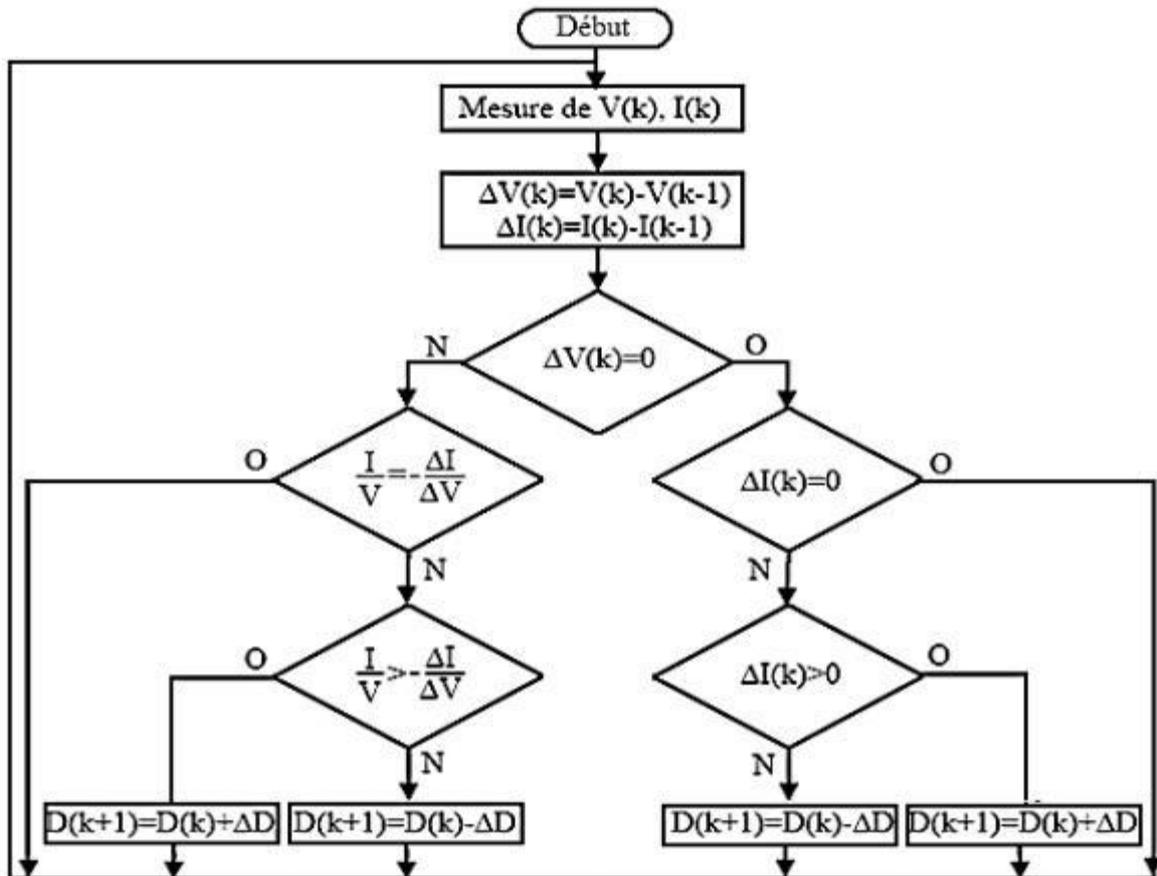


Figure (III.19) : Algorithme incrémental conductance.

III.5. Conclusion

Dans ce chapitre on a détaillé tous les éléments intervenant dans le système PV, modèle de la cellule, hacheur survolteur, méthodes MPPT tel que l'algorithme d'incrémental de l'inductance et méthode de perturbation et observation. Le chapitre IV sera consacré à la validation de la méthode P&O (perturbe and observe) par simulation à l'aide du logiciel Matlab.

CHAPITE IV

SIMULATION DE LA METHODE P&O POUR LA POURSUITE du MPP

Chapitre 4 : simulation de la méthode P&O pour la poursuite du MPP

Afin de valider la modélisation des caractéristique du panneau, l’algorithme MPPT (P&O) pour la maximisation de la puissance lors de diminution de l’éclairement, on a procéder à la simulation par Matlab Simulink.

IV.1 Simulation des caractéristiques du panneau photovoltaïque à température et éclairement constant.

Lors de la simulation on choisit le panneau **Sun power SPR-305E-WHT-D**. Il contient une rangé (string) à un module, chaque module contient 96 cellules en séries.

Les caractéristiques physiques et électriques de ce panneau sont données par le tableau (IV.1)

Les paramètres	symbole	Valeur
Tension de circuit ouvert	Voc	64..2
Courant de court-circuit	Isc	5.96
Tension de puissance maximale	V_{mp}	54.7 V
Courant de puissance maximale	Lmp	5.58 A
Puissance maximale	MPP	305.226 W
Nombre de cellule en série	Ncell	96

Tableau IV. 1 Caractéristiques du panneau photovoltaïque.

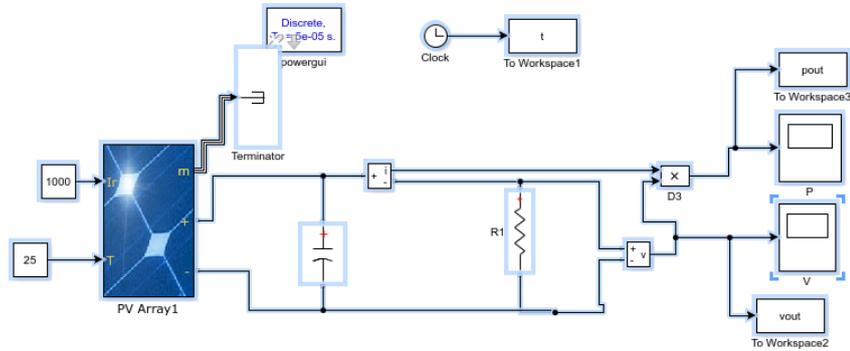


Figure IV.1 Schéma de montage pour la simulation des caractéristiques du panneau photovoltaïque

Lors de la simulation $C=12000\mu\text{F}$

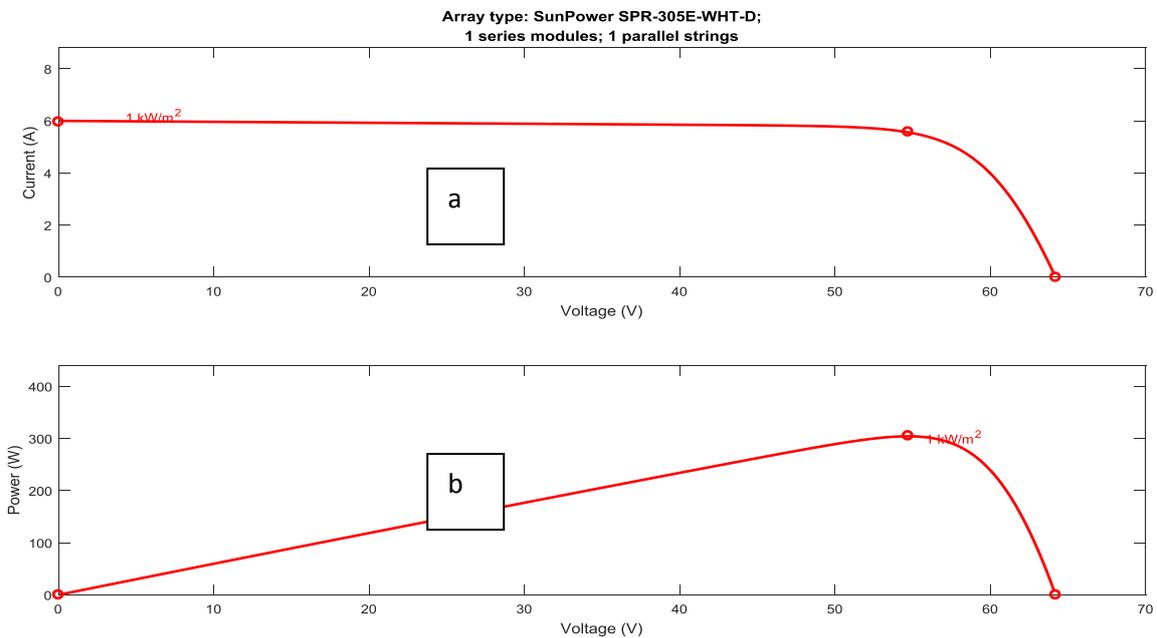


Figure IV. 2.a Caractéristique $I=f(V)$ du panneau photovoltaïque pour ($G=1000\text{w/m}^2$ et $T=25^\circ$)

Figure IV.2.b Caractéristique $P=f(V)$ du panneau photovoltaïque pour ($G=1000\text{w/m}^2$ et $T=25^\circ$)

IV.2 Simulation de l'influence des variations climatique sur les caractéristiques du

panneau : Afin de constater l'influence des conditions climatiques (G, T) sur les caractéristiques, nous avons considéré les deux cas suivants :

- Pour visualiser l'influence de l'éclairement, on fixe la température ($T=25^\circ$) et on fait varier l'éclairement dans une gamme suffisante
- Pour visualiser l'influence de la température, on fixe l'éclairement ($G=1000\text{w}/\text{m}^2$) et on fait varier la température afin de voir l'influence de celle-ci sur les caractéristiques du générateur

IV.2.1 Variation de l'éclairement

En faisant varier l'éclairement (G) entre $400\text{w}/\text{m}^2$ et $1000\text{w}/\text{m}^2$ avec un pas de $200\text{w}/\text{m}^2$, les caractéristiques $I=f(V)$ et $P=f(V)$ sont données par les courbes ci-dessous

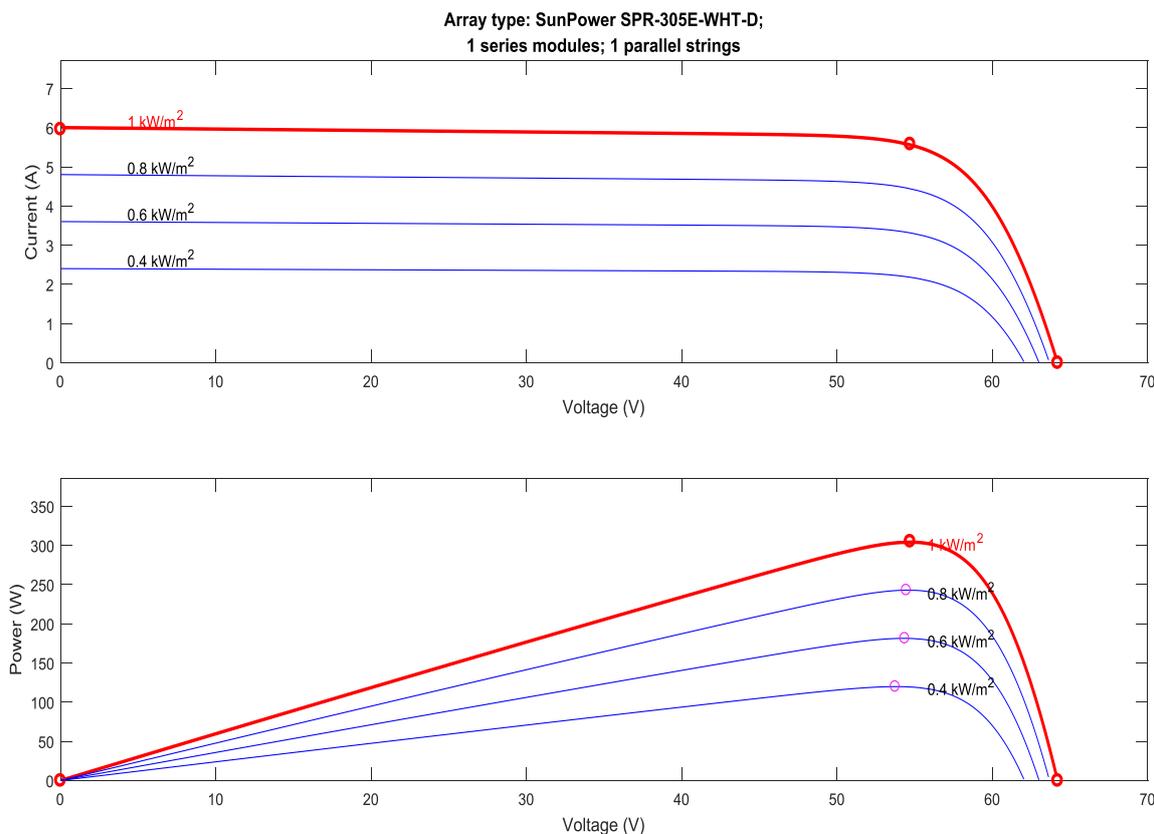


Figure IV.3 Caractéristiques $I=f(V)$, $P=f(V)$ du panneau photovoltaïque pour différents éclairement à température constante ($T=25^\circ$)

D'après les courbes, on remarque une forte diminution du courant de court-circuit par rapport à l'éclairement (G) et une faible diminution de la tension de circuit ouvert.

On remarque aussi sur la courbe $P=f(V)$ que l'affaiblissement de l'éclairement diminue considérablement le point maximale de la puissance.

IV.2.2 Variation de la température

En faisant varier la température (T) entre 10° et 55° , l'influence de celle-ci sur les caractéristiques pour un éclairement ($G=1000\text{w/m}^2$) est donnée par la courbe ci-dessous.

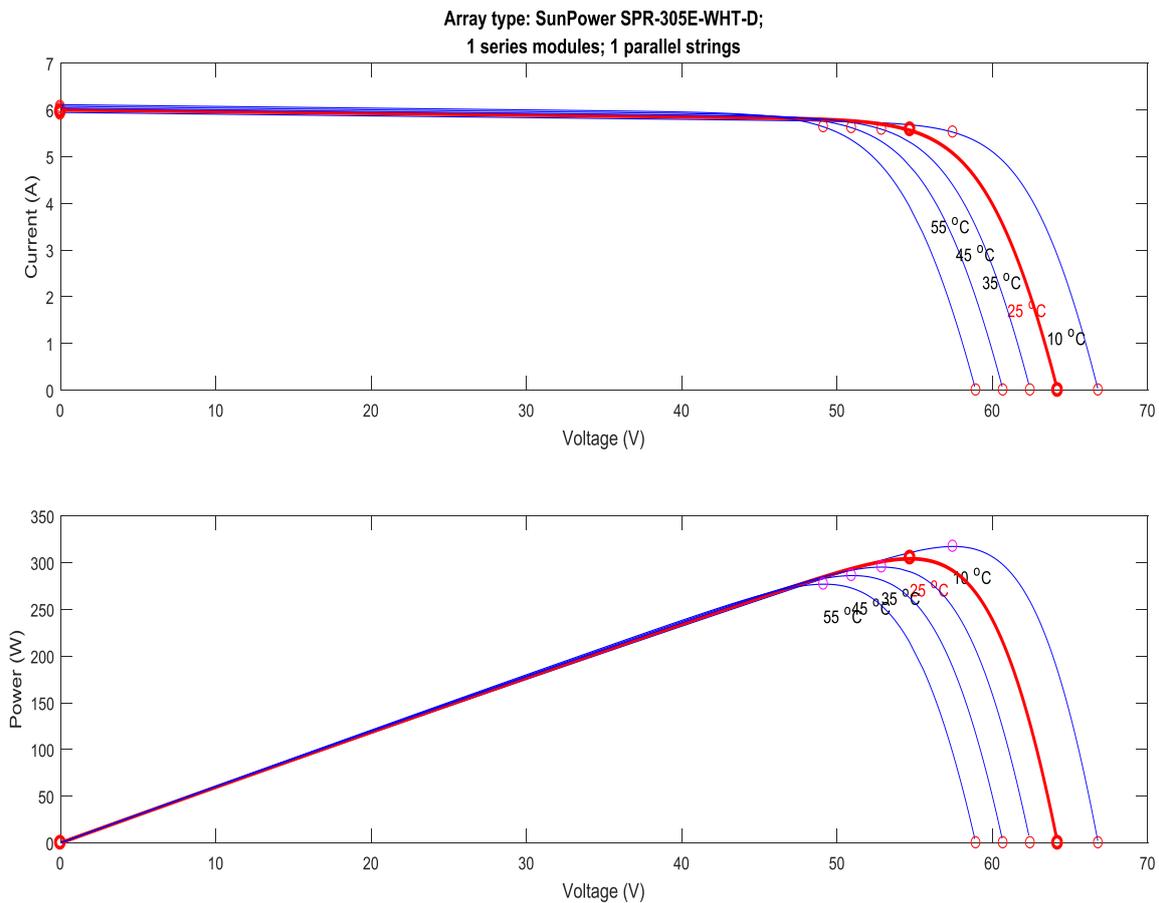


Figure IV. 4 Caractéristiques $I=f(V)$, $P=f(V)$ du panneau photovoltaïque pour différents températures é éclairement constant ($G=1000\text{w/m}^2$)

Chapitre 4 : simulation de la méthode P&O pour la poursuite du MPP

On constate que l'effet de l'augmentation de la température fait diminuer la tension de circuit ouvert du panneau photovoltaïque, contrairement au courant de court-circuit qui reste constant.

IV.3 Simulation de l'algorithme MPPT (Perturbe and Observe) pour un panneau photovoltaïque associé à un hacheur survolteur.

IV.3.1 Maximisation de la puissance du panneau pour un éclairement constant

($G=1000\text{W}/\text{m}^2$)

Avant d'utiliser l'algorithme Perturbe and Observe pour l'optimisation du maximum de puissance ; on simule le panneau (PV) connecté à une charge résistive inductive ($R=10\Omega$, $L=0.1\text{H}$), sans MPPT afin de préciser le point de fonctionnement.

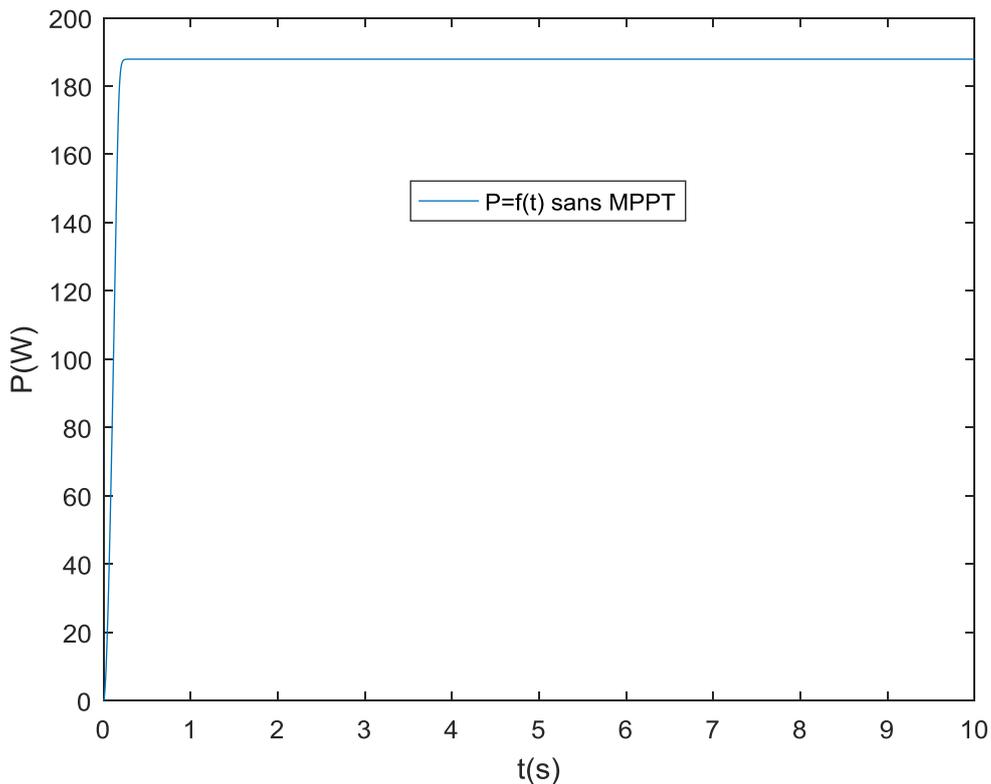


Figure IV.5 Caractéristique $P=f(t)$ du panneau photovoltaïque sans MPPT ($G=1000\text{w}/\text{m}^2$ et $T=25^\circ$)

Chapitre 4 : simulation de la méthode P&O pour la poursuite du MPP

D'après la courbe de puissance on constate que la puissance fournie par le panneau ne dépasse pas 190 W pour un éclairement de 1000 W/m^2 . Cette valeur peut aller jusqu'à 305 W en insérant un hacheur avec une commande MPPT qui agit sur le rapport cyclique de l'impulsion que reçoit le transistor.

Lors de la poursuite du point maximale de puissance on adopte l'algorithme perturbé et observe. Au début on considère un éclairement constant égale à 1000 w/m^2 .

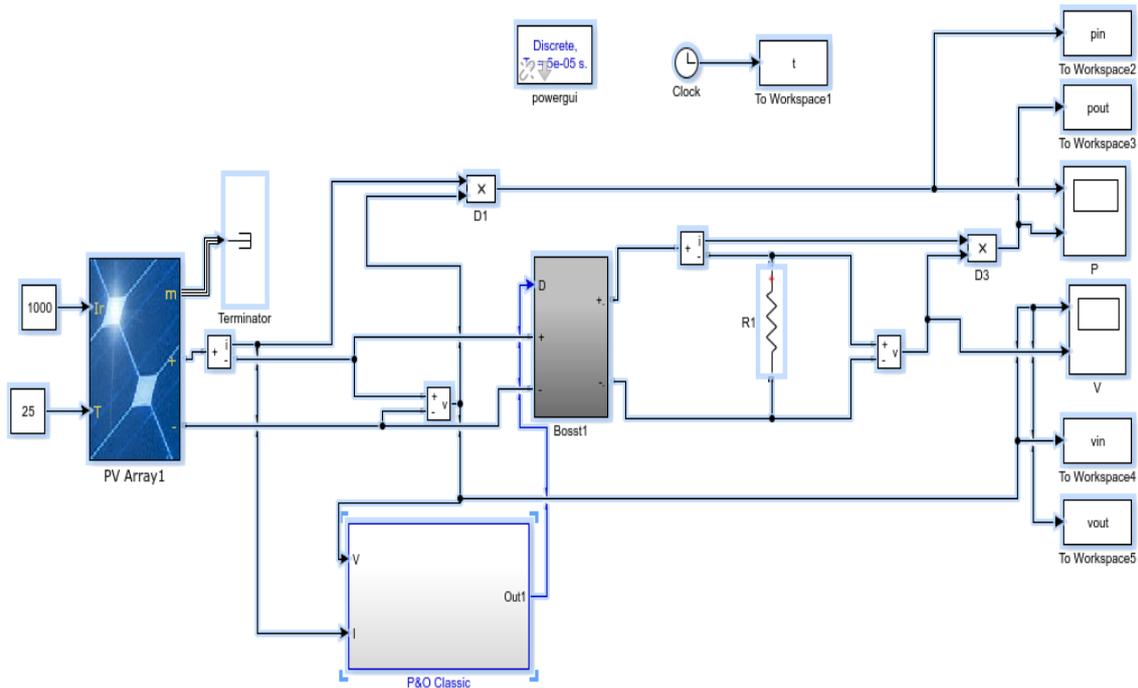


Figure IV.6 Schéma pour l'optimisation du point maximale de puissance par l'algorithme P&O lors d'un éclairement constant

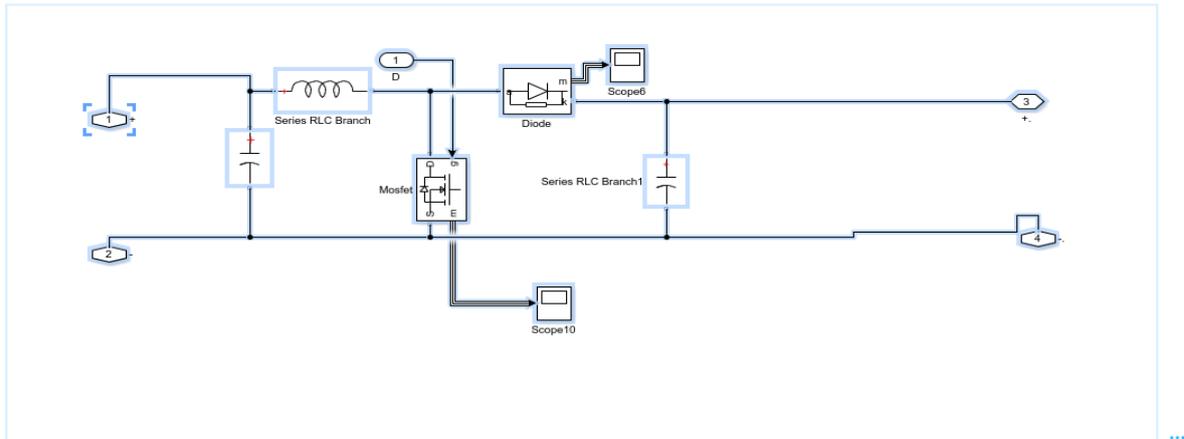


Figure IV. 7 schémas du hacheur boost

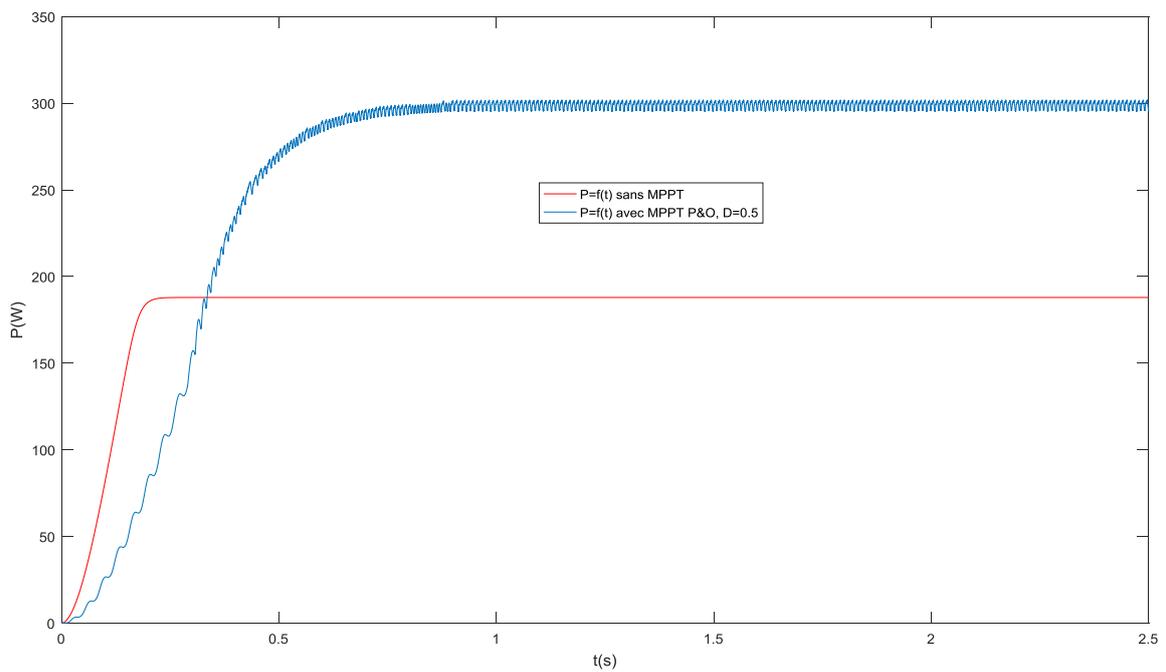


Figure IV.8 Caractéristique $P=f(t)$ du panneau photovoltaïque avec MPPT ($G=1000\text{w/m}^2$ et $T=25^\circ$),
 $D=0.5$

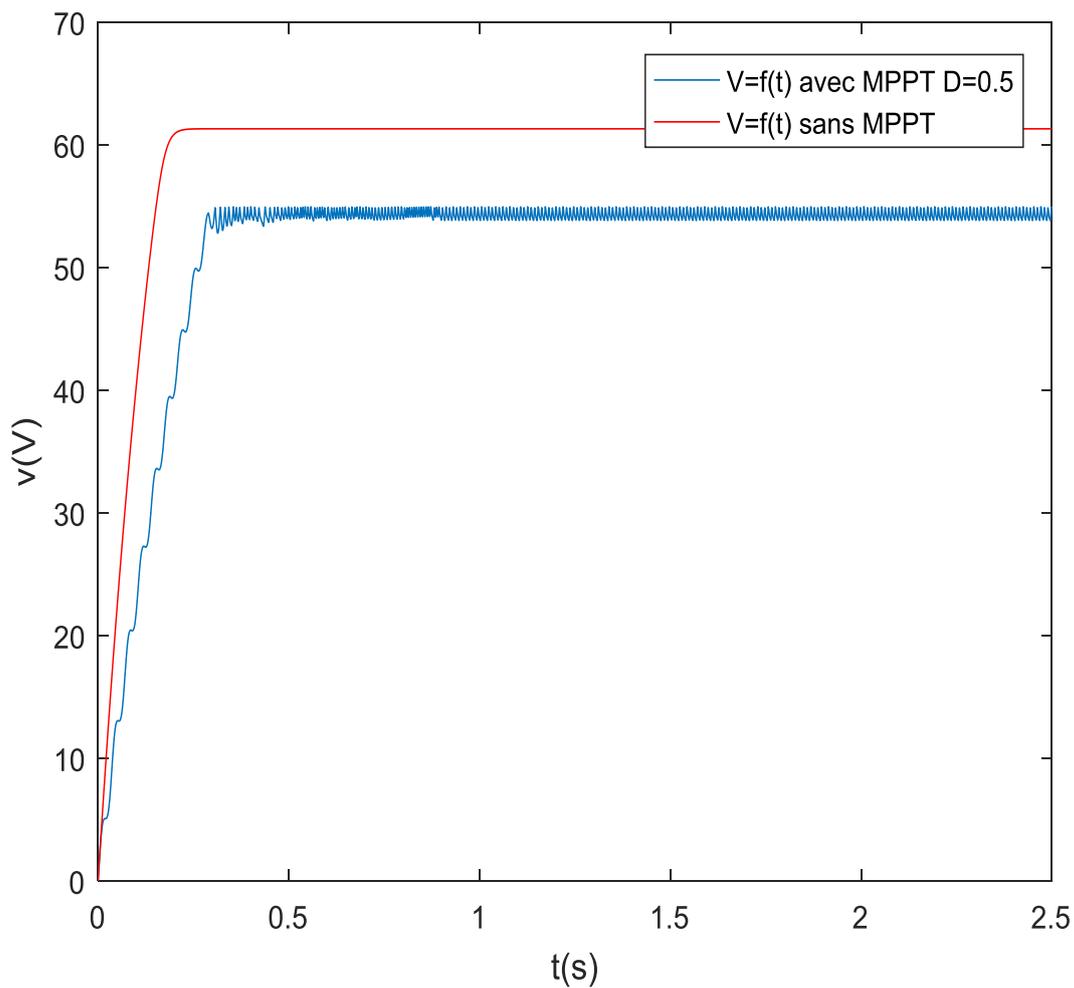


Figure IV.9 Caractéristique $V=f(t)$ du panneau photovoltaïque avec MPPT ($G=1000\text{w/m}^2$ et $T=25^\circ$), $D=0.5$

L'algorithme cherche le point maximal de puissance qui est aux alentours de 305 W. Les résultats de simulation montrent que pour un rapport cyclique grand ; la réponse est moins rapide et les oscillations sont faibles.

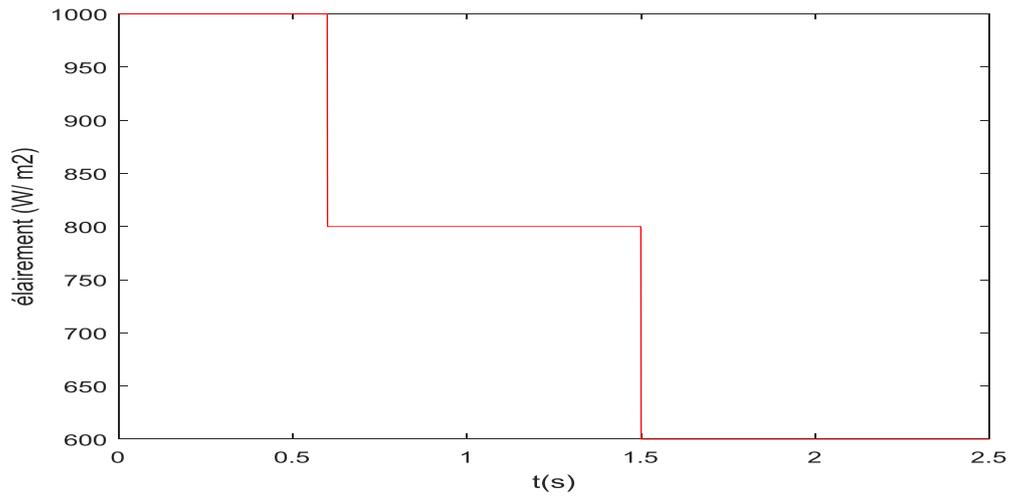


Figure IV. 11 Courbe de variation de l'éclairement

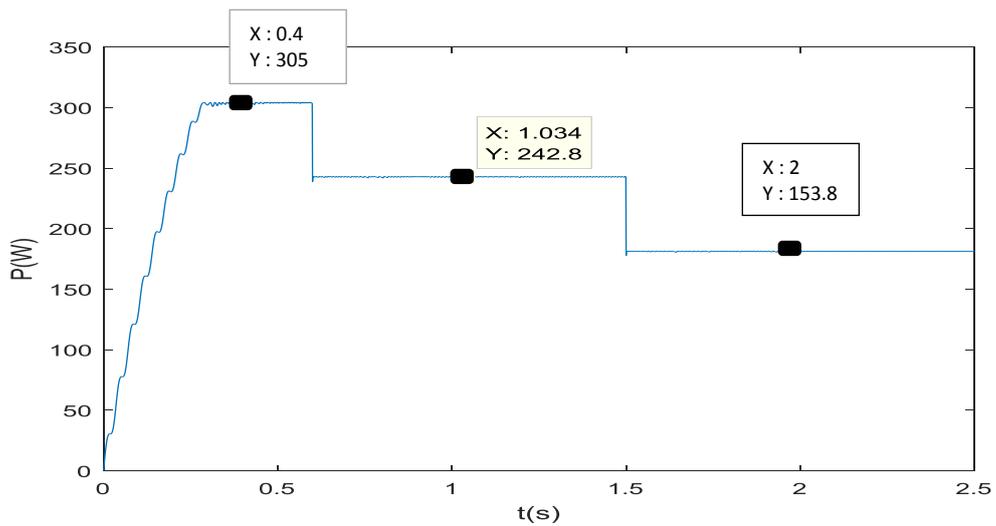


Figure IV. 12 Caractéristique $P=f(t)$ du panneau photovoltaïque par MPPT lors de diminution de l'éclairement

**Array type: SunPower SPR-305E-WHT-D;
1 series modules; 1 parallel strings**

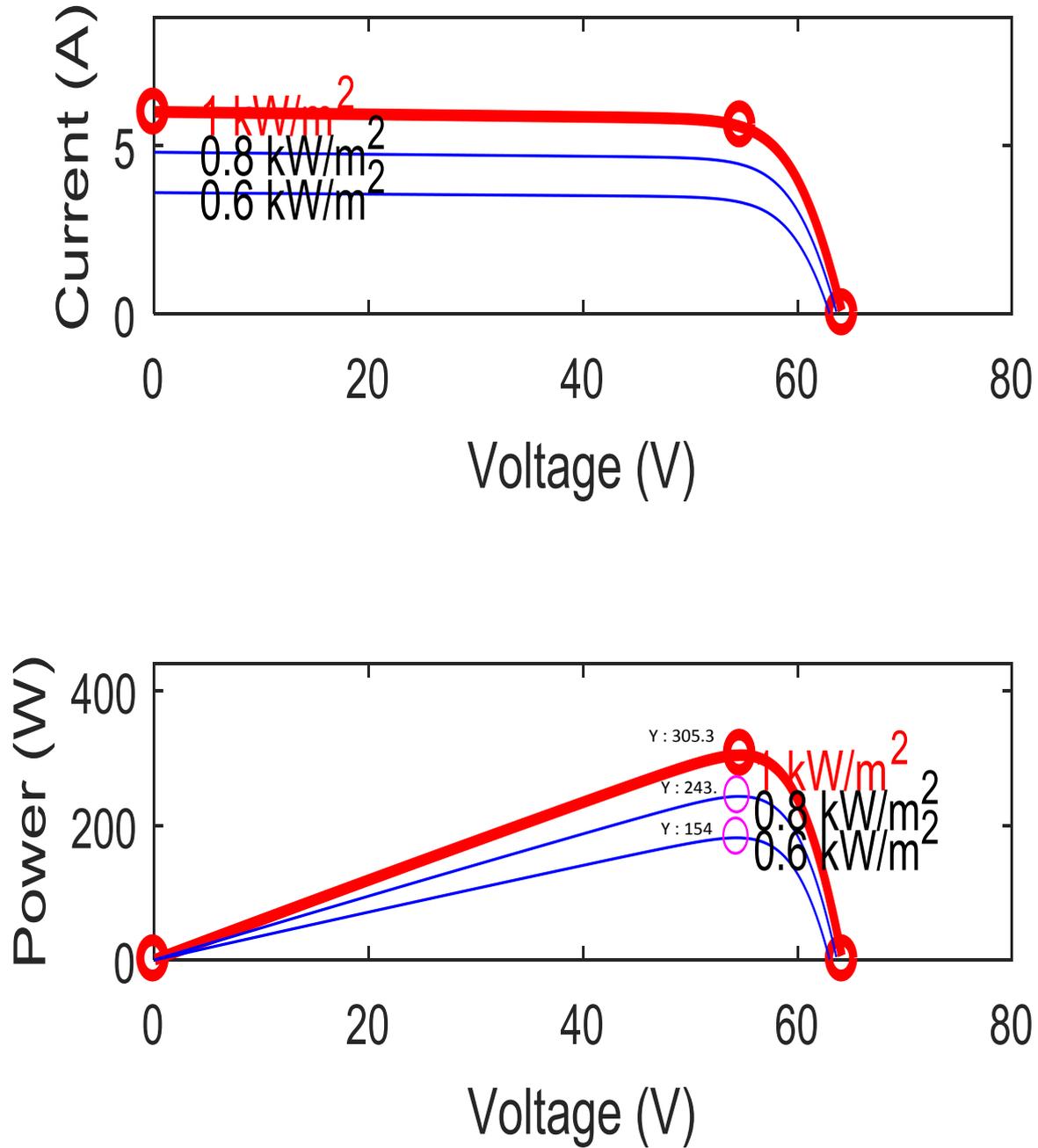


Figure IV. 13 Caractéristique $P=f(t)$ et $v=f(t)$ du panneau photovoltaïque par MPPT lors de diminution de l'éclairement

Conclusion

On constate que l'algorithme P&O poursuit le point optimal pour différentes valeurs d'éclairement en respectant les points maximaux données par les caractéristiques correspondantes (voir figure IV.13 et figure IV.14). L'algorithme P&O est très efficace lors de la recherche du point maximale.

Conclusion générale

- ✓ Ce travail a été consacré à la modélisation d'un générateur photovoltaïque en utilisant le modèle à une diode. On a tracé les caractéristiques courant tension et puissance tension.
- ✓ Les résultats montrent que les performances d'un PV sont fortement influencées par les conditions climatiques, particulièrement l'éclairement solaire et la température.
- ✓ Quand l'ensoleillement augmente, l'intensité du courant croit, ce qui permet au module de produire une puissance électrique plus importante. Par contre, l'augmentation de la température entraîne une diminution de la tension et une légère augmentation du courant par suite une baisse du rendement maximal.
- ✓ Lorsque l'ensoleillement diminue on propose l'algorithme Perturb and Observe pour l'optimisation de la puissance maximale. Les résultats de simulation montrent que cet algorithme est sensible au choix du rapport cyclique initial du hacheur
- ✓ Le choix du type du hacheur influe sur la technique MPPT choisit pour la poursuite du point maximale de puissance; c'est pourquoi on doit penser à utiliser d'autre types de hacheurs tel que le hacheur buck, boost buck, etc...
- ✓ Les résultats concernant la poursuite du point maximale de la puissance montrent un temps de réponse acceptable, par contre des oscillations importantes autour du point maximale de puissance; ainsi afin d'éviter ce problème on propose d'essayer d'autres types de MPPT telle que l'inductance incrémentale MPPT, ou même à base de techniques intelligentes telle que la logique floue et les réseaux neurones.

Bibliographie

- [1] : Olivier Gergaud, « Modélisation énergétique et optimisation économique d'un système de production éolien et photovoltaïque couplé au réseau et associé a un accumulateur », Thèse de doctorat en Electrotechnique de l'Ecole Normale Supérieure de Cachan, 2002.
- [2] : Site Internet, <http://www.scribd.com/doc/4666192/Les-energie-renouvelables>, consulté le 12/06/2013
- [3] : B.Flèche, D. Delagnes, « énergie solaire photovoltaïque », STI ELT, juin 2007, énergies-solaire photovoltaïque.pdf, consulté janv.2014.
- [4] : baroud kendo li, « état de l'art et modélisation des microcentrales », magister en électrotechnique de l'université mentouri de Constantine 2007.
- [5] : A. Khlif, « Expérience, potentiel et marché photovoltaïque algérien », New Energy Alegria, NEAL, 2010.
- [6] : UbiFrance et la mission économiques, « Les énergies renouvelables en Algérie», Fiche de synthèse, Alger, juillet, 2010.
- [7] : Guide « Guide des énergies renouvelables», Publication éditée par le Ministère de l'énergie et des mines,2007.
- [8] : Rapport, « Programme de développement des énergies renouvelables», Sonalgaz, Deuxième congrès Algèro-Allmande sur l'environnement, novembre, 2007.
- [9] : Séminaire, « Potentialités et perspectives pour les énergies renouvelables en Algérie », Séminaire Algèro-Allemand sur le partenariat dans le domaine de l'énergie solaire, Sonalgaz, janvier, 2011.
- [10] : S. Bentouba, A.Slimani et M.S. Boucherit, « Le pompage photovoltaïque : un outil de développement des région du sud d'Algérie », Revue des énergies renouvelables CER'07, Oujda, pp.109-112,2007.
- [11] : B.Chikh-Bled, I. Sari-Ali, B. Benyoucef, « Méthode de dimensionnement optimal d'une installation photovoltaïque », Revue internationale d'héliotechnique,N°41 ?PP. 24-30 ,2010.
- [12] : www.cder.dz.
- [13] : www.memalgeria.org/fr/enr/energie20%solaire/press_20-villages.htm
- [14] : M .Madani, « Réalisation des couches antireflets dans les cellules solaires a couches minces», Mémoire de Magister, Université de Tlemcen, 2006.
- [15] : MEM, « programme des énergies renouvelables et de l'efficacité énergétique», 2011.
- [16] : www.neal-dz.net

[17] : www.aperue.org.dz.

[18] : J.Bernard, Energie solaire calcul et optimisation, 1^{ère} édition, ELLIPES, paris, 2004.

[19] : A. Labouret, p. Cumunel, J-P. Braun, B. Fraggi, « cellules solaires : les bases de l'énergie photovoltaïque » , Dunod, 3^{ème} édition, paris, 2001.

[20] : M.Blhedj « Modélisation d'un système de captage photovoltaïque autonome» Mémoire de Magister Centre Universitaire de Bechar 2007-2008.

[21] : S .M.Sze, K.N.Kwok, physics of Semi-conductor Devices , 3rd edition, WILEY INTERSCIENCE, New Jersey ,2006.

[22] : A. Labouret, M. Viloz, Energie solaire photovoltaïque, 3ème edition, DUNOD, Paris, 2006.

[23] : B .Equer, Energie solaire photovoltaïques (volum1 : physicien et technologie de la conversion photovoltaïques), 1^{ère} édition, ELLIPES, Paris, 1993.

[24] : Z. Djessas, Extraction des paramètres physiques d'une cellule solaire a deux exponentiels par la méthode des algorithmes génétiques, Mémoire de magister , département de physique, faculté des sciences, université de Sétif (Algérie), 2007.

[26] : B. Brousse, Réalisation et caractérisation de cellules photovoltaïques organiques obtenues par dépôt physique, Thèse de doctorat, faculté_ de science et technique, spécialité électronique des hauts fréquences et optoélectronique, université de Limoges(France), 2004.

[27] : I. Bendjamaa « Modélisation et commande d'un système stockage photovoltaïques », Mémoire de Magister Université Abou-Baker Blkair-Tlemcen 2011/2012.

[28] : M.N.Mchalikh et CH. Hamada « Modalisation et simulation d'un système photovoltaïques en fonctionnement autonome et connecté au réseau » Mémoire de Magister Université Kasdi Merbah-Ouregla2013.

[29] : M.Amaud Deves « énergie photovoltaïques (Application au traitement de l'eau potable et des eaux usées en rurales) » document technique reddition 2003 FNDAE n 12.

[30] : O.BENSEDDIK et F.DJALLOUD « étude et optimisation du fonctionnement d'un système photovoltaïque » Mémoire magister Université Kasdi Merbah –Ouregla27/06/2012.

[31] : Alin Ricaurd : Photopiles solaires. Edition presses polytechniques et universitaires romandes, 1997.

[32] : S.Lhlah « Etudie' comparative des techniques MPPT Perturbation et Observation (p&o), Incrémental Conductance (Inc.CoN) et Hill climbing(H.C) » Mémoire Magister université El hadji Lakhder Batna 2007.

[33] : CH.Maher « Gestion Energétique des panneaux photovoltaïque» Mémoire Master Université Sfax 2007-2008.

[34] : K.Sobaihi « Etude et réalisation tracking du point de puissance Maximale (MPPT) a contre réaction » Mémoire de Magister Ecole Nationale polytechnique 10, avenue Hassen Badi El-Harrach Alger.

[35] : Alain Bilbo learreta « Réalisation de commande MPPT Numériques » Rapport de stage Projet Fin d'étude université Rovira Virgili 2006.

[36] : F .Slama « Modalisation d'un système multi-générateurs photovoltaïque inter connectés au réseau électrique » Mémoire de Magister UNIVERSIT7 FERHAT ABAS – SETIF
01/04/2011