

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur Et de La Recherche Scientifique



Université de Ghardaïa

N° d'ordre :
N° de série :

Faculté des Sciences et Technologies
Département des Sciences et Technologie

Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de

MASTER

Domaine : *Sciences et Technologies*

Filière : *Energies Renouvelables*

Spécialité : *Energies Renouvelables En électrotechnique*

Par : BEN HAMIDA Zakaria et DARTAGNAN Ossama

Thème

**Etude et Commande d'un Système
Photovoltaïque**

Soutenu publiquement le : 20/06/2018

Devant le jury :

Mr. BOUREGHDA Skander.	M.A.A	Univ. Ghardaïa	Président
Mr. BAHRI Ahmed.	M.A.A	Univ. Ghardaïa	Examinateur
Mr. FARKOUS khaled.	M.A.A	Univ. Ghardaïa	Examinateur
Mr. BECHOUAT Mohcene.	M.C.B	Univ. Ghardaïa	Encadreur
Mr. BOUARROUDJ Noureddine.	M.R.B	URAER. Ghardaïa	Co-Encadreur

Année universitaire 2017/2018

Remerciements

Avant tout, je remercie ALLAH, le tout puissant, de m'avoir donné le courage et la volonté pour accomplir ce travail

Nous tenons à remercier nos encadreurs Mr. Bechouat Mohcene et Mr. Bouarroudj Noureddine d'avoir posé un sujet très intéressant et pour leurs conseils, leur disponibilité et pour nous avoir fait profiter de leurs connaissances et de leurs qualités tant professionnelles qu'humaines.

Nous tenons à remercier sincèrement les membres du jury qui me font le grand honneur d'évaluer ce travail.

En fin, Nous remercions aussi tout le corps enseignant et administratif qui a contribué à notre formation universitaire.

Dédicaces

Si ce travail Modest doit être dédié à quelqu'un,
Donc le Digne de Ceci premièrement est Ma chère **MÈRE**
et Mon chère **PÈRE**, qui m'ont Prends soin de moi et
donnés tout le soutien, les encouragements tout au long
de ma carrière académique. Que DIEU dans eux la bénis
leurs santé et leurs efforts, et récompensez-les le Bonne
récompense.

A mes chers grands parents

Ensuite à tous ceux qui m'ont appris,
À tous les membres de ma petite famille, chacun dans son
propre nomes.

À toute la famille de **BEN HAMIDA** et **NADJEMI**.

À tous Mes amis, amis proches et camarades de classe,
Surtout Mon binôme **OSSAMA** et sa famille **DARTAGNAN**.
A tous ceux qui ont contribué au succès et à l'achèvement
de ce travail de près Ou de loin.

Zakaria

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à :

A mes parents Aucun hommage ne pourrait être à la hauteur de l'amour Dont ils ne cessent de me combler. Que dieu leur procure
bonne santé et longue vie

A celui que j'aime beaucoup et qui m'a soutenue tout au long de ce projet : Ma fiancée Yousra, et bien sur A mes frères Mohammed et Abdelkader et salah et Mostapha et mes sœurs Aguida et Bouchra

,A toute ma famille, et mes amis

A mon binôme Zakaraia et toute la famille Ben Hamida

A tous mes collègues d'études surtout ceux D'EnRn et Automatique

Et à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin pour que ce projet soit possible, je vous dis merci

Dartagnan Ossama

Merci

Résumé :

En énergie renouvelable, on a trouvé l'énergie solaire est la plus largement utilisée . Les utiles utilisés sont connues sous le nom de panneaux solaires, dans ce mémoire, nous allons étudier et simuler différents modèles représentés par de panneau solaire reposant sur un véritable type. Nous nous référons également à l'utilisation de l'extraction de la puissance maximale et le comparer avec le réel pour différents modèles.

Mots clés: Système PV , Modélisation, Simulation, Suivi maximum du point de puissance.

Abstract:

In renewable energy, solar energy has been found to be the most widely used. the useful ones used are known under the name of solar panels, in this memory, we will study and simulate different models represented by solar panel resting on a true type. We also refer to the use of maximum power extraction and compare it with the real for different models.

Key words: PV system, Modeling, Simulation, Maximum power monitoring..

ملخص :

في الطاقة المتجددة، تم العثور على الطاقة الشمسية لتكون الأكثر استخداما على نطاق واسع. تعرف الأدوات المستخدمة باسم الألواح الشمسية، حيث في هذه الذاكرة، سنقوم بدراسة ومحاكاة نماذج مختلفة ممثلة في ألواح شمسية على أساس نوع حقيقي. كما نشير إلى استخدام الحد الأقصى لاستخراج الطاقة ومقارنتها بالموديلات الحقيقية.

الكلمات المفتاحية: النظام الكهروضوئي ، النمذجة ، المحاكاة ، المحاكاة ، مراقبة القدرة القصوى.

sommaire

Sommaire

Liste des figures.....	I
Liste des tableaux.....	IV
Liste d'Abréviation.....	V
Liste des symboles	VII
Introduction Générale.....	1

Chapitre I : Généralité sur les systèmes photovoltaïques

I.1.Introduction	3
I.2. L'énergie solaire.....	4
I.3. Rayonnement solaire	5
I.4. Notions préliminaires sur le rayonnement solaire	6
I.4.1. Rayonnement direct	6
I.4.2. Rayonnement diffus	6
I.4.3. Rayonnement réfléchi	6
I.4.4. Rayonnement global	6
I-5- Description des éléments d'un système photovoltaïque	7
I.5.1. Définition Cellule photovoltaïque	7
I.5.2.Historique de développement	8
I.5.3. Constitution de la cellule photovoltaïque	9
I.6.Les différents types de cellules solaires (cellules photovoltaïque)	10
I.6.1. Première génération	10
I.6.1.1. Cellule solaire monocristalline	11
I.6.1.2. Cellule solaire poly cristalline	11
I.6.2. Deuxième génération	12

I.6.2.1. Cellules au silicium amorphe (a-Si)	12
I.6.2.2. Cellules au tellure de cadmium (CdTe)	12
I.6.2.3. Cellules au diséléniure de cuivre d'indium (CIS)	12
I.6.3. Troisième génération	12
I.7. Caractéristiques électriques d'une cellule photovoltaïque	13
I.8. Paramètre des cellules photovoltaïques :	14
I.8.1. Courant de court-circuit I_{cc} :.....	14
I.8.2. Tension à circuit ouvert V_{co} :.....	14
I.8. 3. Puissance maximale :	15
I.8.4. Rendement d'une cellule :	15
I.8. 5. Le facteur de remplissage :	15
I.9. Les zones de caractéristique I(V) d'un générateur photovoltaïque :	16
I.10. Module photovoltaïque :	17
I.10.1. Caractéristiques d'un module [17].....	19
I.10.2. Influence de la Température :	19
I.10.3. Influence de l'association série des cellules PV :	21
I.10.4. Influence de l'association parallèle des cellules PV :	21
I.11. Avantages et inconvénients d'une installation PV :	22
I.11.1. Avantages :	22
I.11.2. Inconvénients :	22
I.11 Conclusion:	23
II.1. Introduction.....	24
II.2. L'outil Matlab/Simulink	24
II.3. Modèles Photovoltaïques.....	25

II.4. Les différentes modèles électriques d'une cellule photovoltaïque.....	26
II.4.1. Modèle général	27
II.4.2. Modèle double exponentiel	29
II.4.3. Modèle approprié.....	29
II.4.4. Modèle simplifié.....	30
II.5 Module solaire et modèle de matrice	31
II.6. Choix du module photovoltaïque.....	33
II.7. Résultats de la simulation	34
II.7.1 Résultats de Modèle général.....	34
II.7.2 Résultats de Modèle double exponentiel.....	35
II.7.3 Résultats de Modèle approprié	36
II.7.4. Résultats de Modèle simplifié	37
II.8. Comparaison avec le datasheet de P_{max}	38
II.9. CONCLUSION	39

Chapitre III :
Commande du système PV par les algorithmes
MPPT

III.1. Introduction	41
III.2. Les convertisseurs DC-DC (hacheurs)	41
III.3. Type des hacheurs	42
III.3.1. Convertisseur buck.....	42
III.3.2. Convertisseur boost.....	43
III.3.3. Convertisseur buck-boost.....	44
III.4. Commandes MPPT des convertisseurs DC-DC	44
III.5. Les algorithmes du point de puissance maximale.....	45

III.5.1. Les premiers types de technique MPPT	45
III.5.2 Hill Climbing techniques	46
III.5.2.1 Méthode de perturbation et d'observation (P&O)	47
III.5.2.2. Incrémental conductance (InC) :	49
III.5.2.3. Les inconvénients P&O et INC :	50
III.5.2.4 Solutions suggérées aux problèmes :	51
III.5.2.5. Autres “hill climbing” méthodes de suivi MPPT :	52
III.5.3. La logique floue	52
III.5.4. Les réseaux de neurones.....	54
III.5.5.Relations de proportionnalité	56
III.5.6. Tension de circuit ouvert fractionnaire	56
III.5.7. Courant de court-circuit fractionnel	57
III.6. Résultats de la simulation :	57
III.6.1. Perturber & observer (P&O) :	58
III.6.2. Inductance incrémentale (INC)	59
III.7. CONCLUSION.....	60

Liste des Figures

Liste des figures

Fig.I.1: Le mouvement de la terre autour du soleil	4
Fig.I.2 : Composante du rayonnement global sur un plan horizontal	7
Fig.I.3: Cellule photovoltaïque	7
Fig.I.4 : Représentation schématique d'une cellule solaire	10
Fig.I.5 : Schéma équivalent d'une cellule PV réelle.....	13
Fig.I.6 : Courbe I(V) à T=25 et un éclairement de 1000W/m ²	15
Fig.I.7: Les différentes zones de Caractéristique I(V) d'un générateur photovoltaïque.....	17
Fig.I.8: Module photovoltaïque.....	18
Fig.I.9 : Câblage des cellules dans un module.....	18
Fig.I.10 : La caractéristique de I=f(V) en fonction de température.....	20
Fig.I.11 : La caractéristique de P= f(V) en fonction de température.....	0020
Fig.I.13 : Association de N _p modules solaires en parallèle.....	22
Fig.I.14 : Association mixte N _s *N _p modules solaires.....	22

Chapitre II : La modélisation des systèmes PV

Fig.II.1 : Bibliothèque SIMULINK MATLAB R2010b.....	25
Fig.II.3: schéma équivalent d'une cellule PV Modèle à une diode	27
Fig.II.4 : schéma équivalent d'une cellule PV Modèle à deux diodes	29
Fig.II.5 : Circuit équivalent du modèle à quatre paramètres.	30

Fig.II.6 : Schéma équivalent du modèle à une exponentielle, L3P .	31
Fig.II.7 : Modèle général	32
Fig.II.8 : Modèle généralisé	33
Fig.II.9 : Modèle approprié	33
Fig.II.10 : Caractéristiques I-V et P-V d'un modèle générale a $E= 1000 \text{ w/m}^2$	35
Fig.II.11 : Caractéristiques I-V et P-V d'un modèle générale a 25° C	36
Fig.II.12 : Caractéristiques I-V et P-V d'un modèle générale a $E= 1000 \text{ w/m}^2$	36
Fig.II.13: Caractéristiques I-V et P-V d'un modèle générale a 25° C	37
Fig.II.14 : Caractéristiques I-V et P-V d'un modèle générale a $E= 1000 \text{ w/m}^2$	37
Fig.II.15 : Caractéristiques I-V et P-V d'un modèle générale a 25° C	38
Fig.II.16 : Caractéristiques I-V et P-V d'un modèle générale a $E= 1000 \text{ w/m}^2$	38
Fig.II.17: Caractéristiques I-V et P-V d'un modèle générale a 25° C	39

Chapitre III : Commande du système PV par les algorithmes MPPT

Fig.III.1: Symbole d'un convertisseur DC-DC	42
Fig.III.2 : Circuit de base du convertisseur Buck	43
Fig.III.3 : Circuit de base du convertisseur de type Boost	43
Fig.III.4 : Circuit de base du convertisseur buck-boost	44
Fig.III.5 : Schéma synoptique d'un système photovoltaïque avec MPPT	45
Fig.III.6 : Principe de la première technique MPPT numérique	46
Fig.III.8: Organigramme de la méthode «Perturbation et Observation»	48
Fig.III.9 : Algorithme de la méthode d'incrément de conductance	49
Fig.III.10 : Courbe P(V) et I(V) en fonction de l'irradiation	50
Fig.III.11 : Structure de base de la commande floue	52

Fig.III.12 : exemple d'un réseau de neurones	54
Fig.III.13 : système implémenté sous l'outil Matlab/Simulink	57
Fig.III.14 : Variation d'irradiance.....	58
Fig.III.15 : Puissance du système PV quand appliqué P&O	58
Fig.III.16 : Puissance du système PV quand appliqué INC.....	59

Liste des tableaux

Liste des tableaux

Chapitre I

Tableau I-1: Evénements notables dans l’histoire du photovoltaïques	8
---	---

Chapitre II

Tableau II-1 : Facteur A dépendance à la technologie <i>PV</i>	28
--	----

Tableau II-2 : Performances électriques comparées des modules <i>PV UDT5 50</i>	34
---	----

Tableau II-3 : Comparaison avec le datasheet de <i>Pmax</i>	39
---	----

Chapitre III

Tableau III-1 : Exemple d'une table de vérité pour une commande logique floue.....	53
--	----

Liste d'Abréviation

Liste d'Abréviations

PV: Photovoltaïque.

GPV: Générateur Photovoltaïque.

FF: Facteur de forme.

MPPT: Maximum Power Point Tracking.

P&O: Perturbation et Observation.

INC : Inductance Incrémentale.

DC: Courant Continu (Direct Current).

AC: Courant Alternatif (Alternative Current) .

AM: masse d'air.

MPP: (Maximum Power Point).

DSP : de l'anglais « Digital Signal Processor », qu'on pourrait traduire par « processeur de signal numérique »

Liste des symboles

Liste des symboles

h : la constante de planck.

C : la vitesse de la lumière.

L_{ts} : Distance moyenne soleil_ terre.

ε : coefficient de albédo.

E : Eclairage (W/m^2).

D_s : Diamètre de soleil ($1.39 \cdot 10^9$ m).

D_t : Diamètre de terre ($1.27 \cdot 10^7$ m).

L_{TS} : Distance moyenne soleil_ terre ($1.5 \cdot 10^{11}$ m).

R_{sh} : Résistance shunt (ou parallèle) [Ω] .

R_s : Résistance série (Ω).

I_{ph} : Le photo-courant (A).

I_d(V) : courant d'obscurité de la diode.

I_{sat} : Courant de saturation (A).

q : Charge de l'électron = $1.602 \cdot 10^{-19}$ Coulomb .

A : Facteur de qualité de la diode, normalement compris entre 1 et 2.

T_c : Température effective de la cellule [*Kelvin*].

I_{sc} : courant de court-circuit de la cellule à **25°C and 1kW/m²**.

K_I : coefficient de température du courant de court-circuit de la cellule.

G : L'éclairage de référence (1000 W/m²).

T_{ref}: La température de référence de la cellule (°K).

λ : l'insolation solaire en kW/m^2 .

I_{RS} : courant de saturation inverse de la cellule à un température de référence .

E_G : Energie de Gap de la cellule.

L : l'inductance.

K_I: constante qui dépend des caractéristiques de la matrice PV

I_{cc} : Le courant de court-circuit (A).

V_{co} : La tension de circuit ouvert (V).

N_s : Nombre de modules dans le panneau en série.

N_p : Nombre de modules dans le panneau en parallèle.

P_{max} : La puissance maximale produite PV (W).

V_{\max} : (**V_{mpp}**) Tension qui correspond à la puissance maximale (V).

I_{\max} : (**I_{mpp}**) Courant qui correspond à la puissance maximale (A).

V_{co} : Tension à circuit ouvert (V).

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

K : coefficient de Boltzman ($1.38 \cdot 10^{-23}$ J / K)

T_c : Température de la cellule (C°)

Introduction Générale

INTRODUCTION GENERALE

Les principales sources de production d'énergie dans le monde sont les combustibles fossiles (gaz, pétrole, charbon) et les centrales nucléaires. En raison de l'utilisation de combustibles fossiles, les gaz à effet de serre (CFC, CH₄, O₃ mais principalement CO₂) émettent dans l'atmosphère. De la centrale nucléaire, le carbone est libéré en petite quantité (90 grammes équivalent dioxyde de carbone par kilowatt heure). [1] Mais les déchets radioactifs restent actifs sur des milliers d'années ce qui est une source potentielle de pollution de l'environnement.

Les statistiques montrent que la production d'électricité est la source de la plus forte émission de dioxyde de carbone. Ainsi, la production de cette énergie propre contribue en fait le plus au réchauffement climatique. Le réchauffement de la planète ainsi que la pollution de l'environnement sont de nos jours la plus grande menace environnementale pour l'être humain. D'un autre côté, il y a une crise énergétique alarmante dans le monde entier à mesure que les réserves de combustibles fossiles diminuent et que les centrales électriques vieillissantes vont fermer dans un proche avenir [1]. De l'aspect du réchauffement de la planète et de la pénurie de gaz naturel, les scientifiques et les ingénieurs sont à la recherche d'énergies propres et renouvelables.

Les énergies renouvelables sont des énergies à ressource illimitée. Les énergies renouvelables regroupent un certain nombre de filières technologiques selon la source d'énergie valorisée et l'énergie utile obtenue. Il existe plusieurs types de sources d'énergies renouvelables parmi eux : l'énergie hydroélectrique, l'énergie éolienne, l'énergie de la biomasse et l'énergie photovoltaïque. Les sources d'énergies renouvelables proviennent directement ou indirectement du soleil. Elles sont donc disponibles indéfiniment tant que celui-ci brillera. L'énergie photovoltaïque est la plus jeune des énergies renouvelables, elle a l'avantage d'être non polluante, souple et fiable. Les systèmes photovoltaïques sont utilisés depuis 40 ans. Les applications ont commencé avec le programme spatial pour la transmission radio des satellites.

Le rayonnement solaire est répartie sur toute la surface de la terre, sa densité n'est pas grande et ne cause aucun conflit entre les pays contrairement au pétrole. Les systèmes photovoltaïques semblent bien s'imposer comme moyen de conversion de l'énergie solaire en énergie électrique. Un tel système se compose d'un champ de modules et d'un ensemble

INTRODUCTION GENERALE

de composants qui adaptent l'électricité produite par les modules aux spécifications des récepteurs.

Lors du fonctionnement d'un générateur Photovoltaïque, le *PPM* peut être dégradé suite aux variations des conditions météorologiques ou de la charge, L'introduction d'un étage d'adaptation permettant de fixer le point de fonctionnement du *GPV* indépendamment de celui de la charge .Ainsi il permet l'extraction de la puissance optimale

Dans ce mémoire, on analyse la modélisation et la simulation du fonctionnement électrique d'un système photovoltaïque adapté par une commande numérique (commande MPPT) assurant la poursuite de la puissance maximale fournie par le générateur photovoltaïque.

L'objectif de ce travail consiste à étudier et modéliser différents modèles d'un système PV sous l'outil Matlab/Simulink. Dans ce travail, aussi nous considérons l'application de la théorie de l'MPPT (Maximum Power Point Tracking) présentée par deux méthodes traditionnelle sur les modèles étudiés.

Cette mémoire comporte trois chapitres :

Dans le premier chapitre, on a fait une généralité sur les générateurs photovoltaïques. On présente le principe de l'effet photovoltaïque, la cellule PV et ses paramètres. En suite on fait un rappel sur les générateurs PV et leurs performances.

Dans le deuxième chapitre, on va présenter les différents modèles du module photovoltaïque permettant d'obtenir la caractéristique $I(V)$ et $P(V)$, qui est importante pour l'estimation des performances optimales d'un module photovoltaïque. On utilise les programmes du Matlab pour simuler les quatre modèles, en suite la validation des résultats est marche par la comparaison avec un système réel d'un module PV sur leur datasheet.

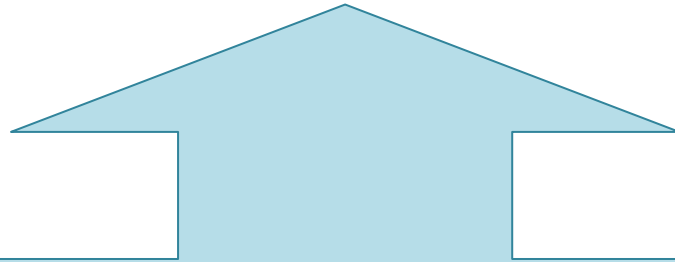
Dans le troisième chapitre on étudie quelques types convertisseurs DC-DC utilisés dans les systèmes photovoltaïques. Aussi on va étudier les différents technique de suivre le point de fonctionnement d'un system PV et on va les analyser par l'application des méthodes traditionnelles présentées par le perturber & observer et l'incrémentale conductance dans l'environnement MATLAB/SIMULINK sur le fonctionnement électrique de quatre

INTRODUCTION GENERALE

modèle PV, adapté par convertisseur DC-DC (hacheur élévateur abrié en anglais boost), régulé par une commande MPPT.

Finalement, nous terminerons ce mémoire par une conclusion générale qui résume notre étude.

Chapitre I



**Généralité sur les
systèmes
photovoltaïques**

I.1.Introduction

Au cours des 25 dernières années, l'utilisation des sources d'énergie a augmenté et nous avons commencé à utiliser nouvelles sources d'énergie renouvelables. Nous avons réalisé que nos combustibles fossiles et atomiques ne dureront pas éternellement, et que leur utilisation contribue à la pollution de l'environnement.

Énergie renouvelable - qui provient essentiellement du soleil d'une manière ou d'une autre - fournit des opportunités pour un approvisionnement énergétique illimité et durable avec un faible impact environnemental. Et l'énergie renouvelable n'est pas seulement quelque chose pour l'avenir, mais quelque chose que nous pouvons utiliser dans nos maisons aujourd'hui [35].

Les vraies sources d'énergie renouvelables sont les sources d'énergie qui sont remplis par des processus naturels au moins aussi vite que nous utilise comme le soleil. Nous pouvons utiliser le soleil directement (comme dans le chauffage solaire systèmes) ou indirectement (comme dans l'énergie hydroélectrique, le vent puissance, et puissance des combustibles de biomasse). Les sources d'énergie peuvent s'épuiser si nous les utilisons plus vite qu'ils ne se reconstituent [35].

L'utilisation de sources d'énergie renouvelables et alternatives peut nous sauver de l'argent, assurer que nos petits-enfants et arrière-petits-enfants auront assez d'énergie, et nous libérer des incertitudes de dépendre de l'approvisionnement en énergies dehors notre pays [35].

Les diverses applications qui découlent de l'exploitation des rayons solaires sont innombrables. Les technologies solaires les plus répandues s'observent majoritairement dans le domaine de l'immobilier : solaire thermique passif, solaire thermique actif, solaire thermodynamique, solaire photovoltaïque et éclairage naturel [35].

Les avantages de l'exploitation à plus grande échelle de l'énergie solaire en Algérie sont nombreux : amélioration de l'efficacité énergétique des bâtiments, diminution de la consommation en énergie fossile et électrique, création d'emplois à travers les régions de tout pays, réduction des émissions des gaz à effet de serre et hausse des exportations d'électricité, etc.

Les énergies renouvelables ont plusieurs ressources. On se limite à cinq ressources fondamentales selon l'importance [34] :

- Énergie solaire.
- Énergie éolienne.

- Energie hydraulique.
- Energie de biomasse.
- Energie géothermique.

Dans ce chapitre, nous allons parler et consacrer l'étude à l'énergie solaire seulement (photovoltaïque).

I.2. L'énergie solaire

La distance de la terre au soleil est environ 150 million de kilomètres et la vitesse de la lumière est d'un peu plus de 300000 km/h , les rayons du soleil mettent donc environ 8minutes à nous parvenir. La constante solaire est la densité d'énergie solaire qui atteint la frontière externe de l'atmosphère faisant face au soleil. Sa valeur est communément prise à $1360 W/m^2$. Au niveau du sol, la densité d'énergie solaire est réduite à $1000 W/m^2$ à cause de l'absorption dans l'atmosphère. Albert Einstein a découvert en travaillant sur l'effet photoélectrique que la lumière n'avait pas qu'un caractère ondulatoire, mais que son énergie est portée par des particules, les photons. L'énergie d'un photon étant donnée par la relation [2].

$$E = \frac{h.c}{\lambda} \quad (I.1)$$

h : la constante de p lanck,

C : la vitesse de la lumière.

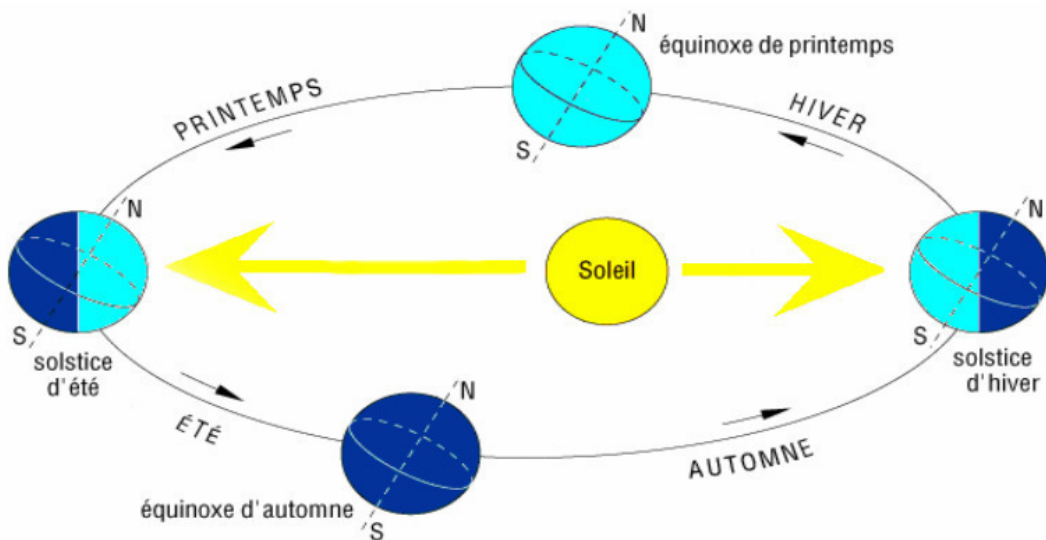


Fig.I.1: Le mouvement de la terre autour du soleil [36]

Ainsi, plus la longueur d'onde est courte, plus l'énergie du photon est grande. Une façon Commode d'exprimer cette énergie est :

$$E = \frac{1.26}{\lambda} \quad (I.2)$$

Le soleil émet un rayonnement électromagnétique compris dans une bande de longueur d'onde variant de 0,22 à 10 microns(μm). L'énergie associée à ce rayonnement solaire se décompose approximativement ainsi :

- 6% dans la bande des ultraviolets($< 0,4\mu m$).
- 46% dans la bande visible (0,4 à 0,8 μm).
- 47% dans la bande des infrarouges($> 0,8\mu m$).

I.3. Rayonnement solaire

Le soleil est une étoile parmi tant d'autres. Il a un diamètre de 1390000 km , soit environ 50 fois celui de la terre. Il est composé à 80% d'hydrogène, 19% d'hélium et 1% d'un mélange de 100 éléments, soit pratiquement tout les éléments chimiques connus depuis que Langevin et Perrin, s'appuyant sur la théorie de la relativité d'Einstein, ont émis l'idée il y a une soixantaine d'années que c'est l'énergie de fusion nucléaire qui fournit au soleil sa puissance, il est aujourd'hui admis que le soleil est une bombe thermonucléaire hydrogène hélium transformant chaque seconde 564 millions de tonnes d'hydrogène en 560 millions tonnes d'hélium, la réaction se faisant dans son noyau à la température d'environ 25 millions de degrés Celsius. Ainsi, à chaque seconde, le soleil est allégé de 4 millions de tonnes dispersées sous forme de rayonnement [4].

Sa lumière, à une vitesse de 300000 km/s , met environ 8 minutes pour parvenir à la terre, sa distribution spectrale de l'atmosphère est présenté un maximum pour une longueur d'onde d'environ 0.5 μm , la température de corps noir à la surface du soleil est d'environ 5780° k [4] :

- Diamètre de soleil $D_s=1.39 * 10^9 m$
- Diamètre de la terre $D_t= 1.27 * 10^7 m$
- Distance moyenne soleil_ terre $L_{ts}=1.5 * 10^{11} m$

I.4. Notions préliminaires sur le rayonnement solaire

Le rayonnement solaire est constitué de photons dont la longueur d'onde s'étend de l'ultraviolet ($0.2\mu m$) à l'infrarouge lointain ($2.5\mu m$). On utilise la notion *AM* pour Air Mass afin de caractériser le spectre solaire en termes d'énergie émise. Pour tenir compte de distance traversée par les rayons, il est nécessaire d'introduire une notion de masse d'air (*AM*) elle correspond à la longueur relative du parcours à travers l'atmosphère terrestre traversée par le rayonnement solaire direct. Au niveau du sol le rayonnement global reçu par une surface plane d'inclinaison quelconque est constitué de trois composantes principales. [5], Nous allons le mentionner comme suit :

I.4.1. Rayonnement direct

Flux solaire sous forme de rayons parallèles provenant de disque soleil sa savoir été dispersé par l'atmosphère.

I.4.2. 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 l'atmosphère (les molécules d'air, les gouttelettes d'eau, les poussières, ...) et à sa réflexion par les nuages.[39]

I.4.3. Rayonnement réfléchi

C'est la partie de l'éclairement solaire réfléchi par le sol, ce rayonnement dépend directement de la nature du sol (nuage, sable...). Il se caractérise par un coefficient propre de la nature de lien appelé Albédo(ϵ) $0 \leq \epsilon \leq 1$.

I.4.4. Rayonnement global

Un plan reçoit de la part du sol un rayonnement global qui est le résultat de la superposition des trois compositions direct, diffus et réfléchi.

Le schéma ci-dessus illustre l'explication des types de rayonnement solaire **Figure (I.2)**

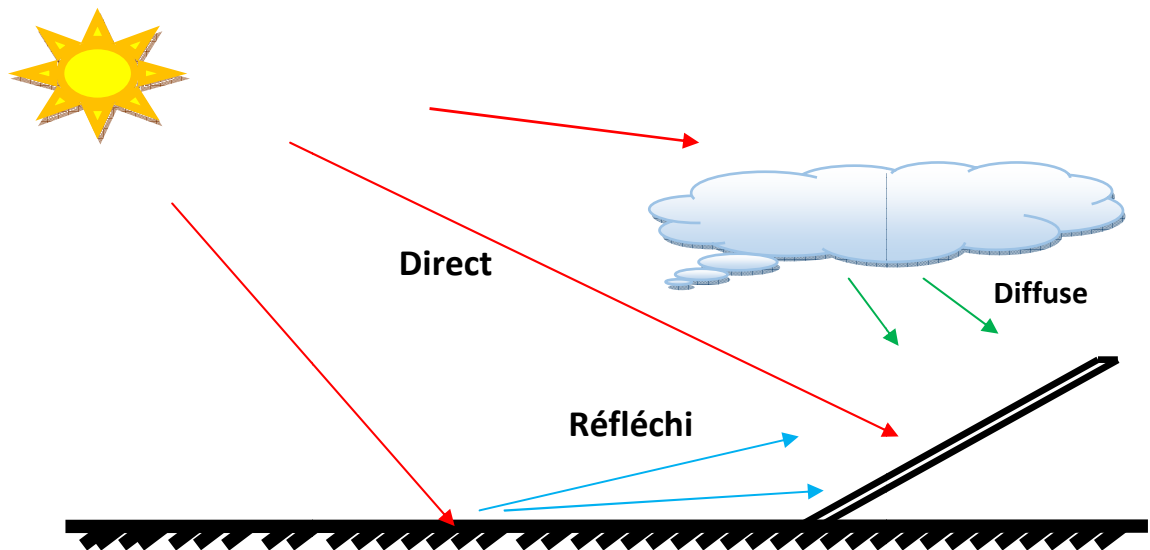


Fig.I.2 : Composante du rayonnement global sur un plan horizontal [33]

I-5- Description des éléments d'un système photovoltaïque

I.5.1. Définition Cellule photovoltaïque

Les photopiles ou cellules photovoltaïques **Figure(I.3)** sont des composants optoélectroniques qui transforment directement la lumière solaire en électricité. Le terme photovoltaïque est formé à partir de deux mots :

- « Phots », qui signifie lumière.
- « Volta », du nom du physicien Alessandro Volta (1745 – 1827, inventeur de la pile électrique).



Fig.I.3: Cellule photovoltaïque [37]

Appelé aussi « module photovoltaïque » ou PV, c'est un panneau solaire qui est destiné à récupérer les rayonnements du soleil pour les transformer en électricité (Courant continu DC).

L'effet photovoltaïque GY constitue la conversion directe de l'énergie du rayonnement solaire en énergie électrique au moyen de cellules généralement à base de silicium. Pour obtenir une puissance suffisante, les cellules sont reliées entre elles et constituent le module solaire [6].

L'ensemble de panneaux photovoltaïques interconnectés forme le générateur. Celui-ci est caractérisé par sa puissance crête exprimée en kilowatt crête (*KWc*) [7].

I.5.2. Historique de développement

Le Tableau ci dessous résume les événements importants de l'histoire du photovoltaïque [4] :

Tableau I-1: Evénements notables dans l'histoire du photovoltaïques [4]

1839	Le physicien français Edmond Becquerel découvre l'effet photovoltaïque
1883	Fritts réalise des cellules solaires de grande surface à base de Se
1954	Des rendements de 6% sont obtenus : Si (Bell Lab, USA) and Cu ₂ S/CdS (Air Force, USA)
1955	Hoffman électroniques (USA) propose des cellules Si à 2 % de rendement à \$1500/W
1958	Kearns et Calvin ont démontré l'effet photovoltaïque d'une cellule à base de MgPh
1970	Première cellule solaire à hétéro structures GaAs élaborée par Alferov, Andrée et al. En URSS
1973	Première maison alimentée par des cellules photovoltaïques est construite à L'université Delaware, USA ; à base de Cu ₂ S
1980	La première cellule à base de Cu ₂ S/CdS délivrant un rendement > 10%
1982	Première unité de production de 1 MW (Californie, USA) avec des cellules Arco Si
1985	Les cellules à base de Si donnent un rendement > 20% sous le rayonnement solaire
1994	Des rendements > 30 % avec des cellules à concentration multi jonctions à

	base de GaInP/GaAs (NREL, USA)
1996	Les cellules solaires hybrides à colorants atteignent un rendement de 11% (EPFL, Switzerland)
1998	Cellules couches minces Cu(InGa) Se ₂ atteignent un rendement de 19% (NREL, US)
2002	Le photovoltaïque installé mondial cumulatif atteint 2000 MW
2007	Cellules solaires organiques en structure tandem avec un rendement de 6,5 % (UCSB, USA)
2008	Un rendement homologué de 5,9% sur une surface active de 2 cm ² obtenu par Heliatek, BASF et l'Institut de photovoltaïque appliquée (IAPP) de l'Université technique de Dresde (Allemagne)
2009	Cellule polymère simple jonction avec un rendement de 6,1 % à base de PCDTBT et PC70BM (UCSB, USA) Cellule polymère simple jonction avec un rendement de 7,4 % à base de PBDTTT-CF et PC70BM (Sol armer Energy Inc., Université de California, Université de Chicago, USA)

I.5.3. Constitution de la cellule photovoltaïque

Le fonctionnement de la photopile est basé sur les propriétés électroniques acquises par le silicium quand des atomes étrangers en petit nombre (des impuretés) sont substitués dans un réseau cristallin. Cette action est appelée dopage. Si l'atome d'impureté contient plus d'électrons que le silicium, le matériau contiendra des électrons libres en excès : il sera dit de type N (exemple: silicium dopé au phosphore). Si au contraire, l'atome d'impureté contient moins d'électrons que le silicium, le matériau sera déficitaire en électrons: il sera dit de type P (exemple: silicium dopé au bore) [8].

La fabrication des cellules s'effectue à partir de lingots de silicium. Ces lingots sont découpés en fines couches de type P ou N en y diffusant du brome ou du phosphore.

Une cellule solaire est alors obtenue en constituant une jonction de deux zones de type opposé (jonction PN).

Au voisinage de la jonction apparaît un champ électrique qui maintient la séparation des charges positives et négatives. Des contacts métalliques en formes de grille, contacts avant et arrière, sont déposés **Figure (I.4)** [8].

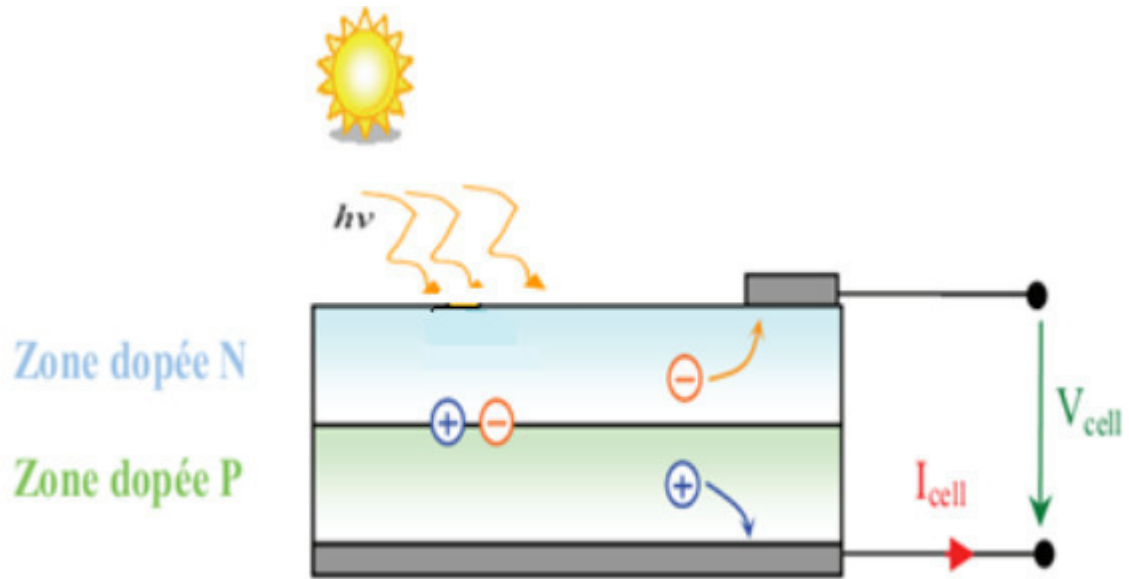


Fig.I.4 : Représentation schématique d'une cellule solaire [8]

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 ; Conversion de l'énergie du photon en énergie électrique, ce qui correspond à la création des paires électrons/trous dans le matériau semi-conducteur ; Collecte des particules générées dans le dispositif [8].

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 [8].

I.6. Les différents types de cellules solaires (cellules photovoltaïque)

Il existe un grand nombre de technologie de fabrication de cellules photovoltaïques, telles que les cellules issues de plaques de silicium cristallin et les cellules obtenues directement par des procédés en couche mince , Généralement, on distingue trois générations de cellules photovoltaïques en fonction du développement technologique [9], [10].

I.6.1. Première génération

Les cellules de la première génération sont basées sur une seule jonction PN et utilisent généralement le silicium sous forme cristalline comme matériau semi-conducteur. La méthode de production basée sur les pastilles de silicium est très énergétivore et donc très chère. Elle nécessite par ailleurs un silicium d'une grande pureté. Cette technologie est subdivisée en deux sous filières : le silicium monocristallin et le silicium poly-cristallin, qui sont différenciés par leur procédé d'obtention du cristal.

L'industrie photovoltaïque est concentrée à plus de 90% [11] sur l'utilisation du silicium comme matériau de base. Les cellules au silicium cristallin sont les plus répandues puisque que le silicium possède un arrangement parfait des atomes, selon une structure ordonnée de type tétraédrique.

Ce semi-conducteur présente en effet, différents avantages : il est abondant à la surface du globe, car facilement extrait à partir du sable ; il n'est pas toxique comme certains semi-conducteurs; il possède un oxyde naturel (SiO_2) présentant d'excellentes propriétés électroniques et il peut se doper facilement (avec le phosphore ou le bore). Son seul véritable inconvénient est son gap indirect à 1,1 eV. Ceci entraîne une absorption du rayonnement plus faible qu'avec un matériau à gap direct : pour absorber 90% du spectre solaire, il faudra utiliser une épaisseur de 100 μm pour le silicium [12].

I.6.1.1. Cellule solaire monocristalline

La cellule monocristalline est constituée d'un seul cristal. Elle est généralement de couleur bleue uniforme et est essentiellement utilisée lorsque les espaces sont restreints. Le coût est plus élevé que celui d'une autre installation de même puissance. Elle possède un meilleur rendement qui varie entre 16 et 18 %.

I.6.1.2. Cellule solaire poly-cristalline

La cellule poly-cristalline se compose de plusieurs cristaux assemblés, et présente l'aspect d'une « mosaïque ». Actuellement c'est le meilleur rapport qualité/prix et la plus utilisée. Elle a un rendement inférieur par rapport aux cellules monocristallines de l'ordre de 13 à 15 % et une bonne durée de vie.

I.6.2. Deuxième génération

Les couches minces (thin film) constituent la seconde génération de technologie photovoltaïque. La couche du semi-conducteur est directement déposée sur un substrat, par exemple le verre. La production de ce type de cellule est moins coûteuse que celui de la première génération puisqu'elle consomme moins de semi-conducteur et ne nécessite pas dépasser par l'étape de transformation du silicium en pastille.

L'inconvénient de ces cellules est leur faible rendement de 6 à 9 % en commerce et 14% en laboratoire. Dans cette technologie nous distinguons :

I.6.2.1. Cellules au silicium amorphe (a-Si)

L'organisation des atomes n'est plus régulière comme dans un cristal, et l'ordre cristallin n'est maintenu qu'à courte distance.

Les modules au silicium amorphe auront un bon avenir car ils peuvent être souples et ont une meilleure production par faible lumière. Le silicium amorphe possède un rendement divisé par deux par rapport à celui du cristallin, ce qui nécessite plus de surface pour la même puissance installée. Le silicium amorphe présente plus de 8 % du marché mondial.

I.6.2.2. Cellules au tellure de cadmium (CdTe)

Ce matériau est intéressant du fait de son gap optique 1.45 eV et de sa forte absorption qui permet en moins de 2 μm d'épaisseur d'absorber la quasi-totalité du spectre visible.

I.6.2.3. Cellules au diséléniure de cuivre d'indium (CIS)

Elles sont encore au stade expérimental, et sont élaborés à bas coût. Mais, malheureusement elles contiennent du cadmium connu par sa toxicité et déjà interdit dans certain pays.

I.6.3. Troisième génération

La troisième génération vise à passer la limite maximale de rendement des cellules actuelles. Les cellules de la troisième génération sont des cellules organiques et plastiques, encore au stade de recherche comprennent la voie des cellules humides dites « Grätzel » ou la voie des polymères organiques dites aussi cellules plastiques.

I.7. Caractéristiques électriques d'une cellule photovoltaïque

La figure suivant **Figure(I.5)** présente le schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque sous éclairement. Il correspond à un générateur de courant I_{ph} monté en parallèle avec une diode. Deux résistances parasites sont introduites dans ce schéma.

Ces résistances ont une certaine influence sur la caractéristique $I = f(V)$ de la cellule [13]:

- La résistance série (R_s) est la résistance interne de la cellule ; elle dépend principalement de la résistance du semi-conducteur utilisé, de la résistance de contact des grilles collectrices et de la résistivité de ces grilles.
- La résistance shunt (R_{sh}) est due à un courant de fuite au niveau de la jonction ; elle dépend de la façon dont celle-ci a été réalisée.

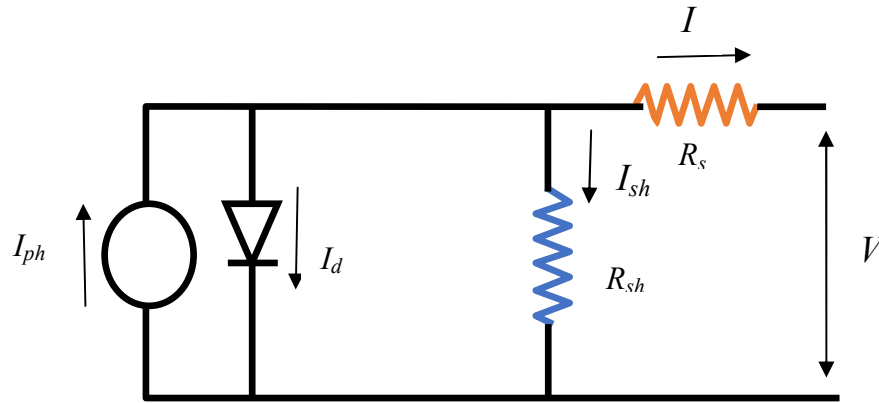


Fig.I.5 : Schéma équivalent d'une cellule PV réelle.

Le modèle mathématique pour la caractéristique courant-tension d'une cellule PV est donné par [5,13]:

$$I_{pv} = I_{ph} - I_{sat} \left[\exp \left(\frac{q(V_{pv} + (I_{pv} * R_s))}{nKT} \right) - 1 \right] - \frac{V_{pv} + (I_{pv} * R_s)}{R_{sh}} \quad (I.3)$$

Où I_{sat} :est le courant de saturation, K est la constante de Boltzmann ($1,381 \times 10^{-23} J/K$), T est la température effective des cellules en Kelvin(K), e est la charge de l'électron ($e = 1,6 \times 10^{-19} C$), n est le facteur d'idéalité de la jonction ($1 < n < 3$), lorsqu'elle fonctionne en générateur, V_{pv} est la tension aux bornes de cette même cellule, I_{ph} est le photo-courant de la cellule dépendant de l'éclaircement et de la température ou bien courant de (court-circuit), R_{sh} est la résistance shunt caractérisant les courants de fuite de la jonction, R_s est la résistance série représentant les diverses résistances de contacts et de connexions.

I.8. Paramètre des cellules photovoltaïques

Les paramètres des cellules photovoltaïques (I_{cc} , V_{co} , P_{max} , A , ff et η), extraits des caractéristiques courant-tension, permettent de comparer différentes cellules éclairées dans des conditions identiques.

I.8.1. Courant de court-circuit I_{cc}

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

On peut écrire :

$$I_{cc}(V = 0) = I_{ph} \quad (I.4)$$

I.8.2. Tension à circuit ouvert V_{co}

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

On peut écrire :

$$V_{co}(I = 0) = AU_T \ln \left(\frac{I_{ph}}{I_s} + 1 \right) \quad (I.5)$$

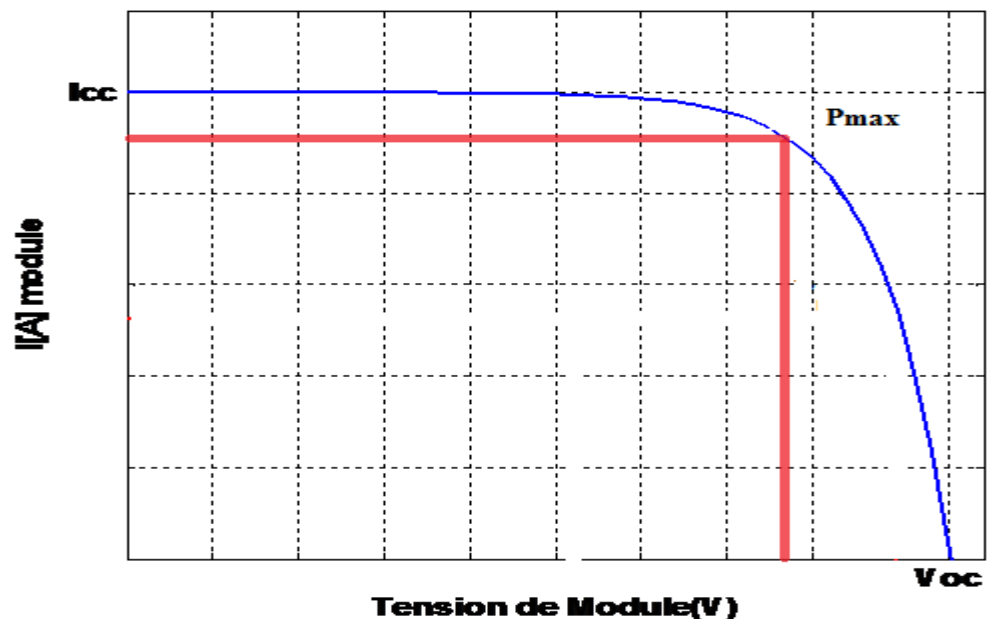


Fig.I.6 : Courbe I(V) à $T=25$ et un éclairement de $1000W/m^2$.

I.8. 3. Puissance maximale

La puissance fournie au circuit extérieur par une cellule photovoltaïque sous éclairage dépend de la résistance de charge (résistance externe placée aux bornes de la cellule). Cette puissance est maximale (notée P_{max}) pour un point de fonctionnement P_{max} (I_{max}, V_{max}) de la courbe courant-tension (courants compris entre 0 et I_{cc} et tension comprise entre 0 et V_{co}).

I.8.4. Rendement d'une cellule

On définit le rendement énergétique d'une cellule par le rapport entre la puissance maximum et la puissance incidente Avec :

$$\eta = \frac{I_{max} \times V_{max}}{P_{solaire}} \quad (I.6)$$

$P_{solaire}$: est la puissance maximum mesurée dans les conditions STC (Standard Test Conditions), c'est-à-dire sous un spectre AM1., une température de 25°C, et un éclairage de 1000W/ m².

I.8. 5. Le facteur de remplissage :

Le facteur de remplissage ou facteur de forme, encore souvent appelé par sa dénomination anglaise (Fill Factor) correspond à la puissance maximum délivrée par la cellule, divisée par le produit ($V_{co} \times I_{cc}$), correspondant à la puissance maximale idéale.

$$ff = \frac{P_{max}}{V_{co} \times I_{cc}} \quad (I.7)$$

Le rendement d'une cellule photovoltaïque est dans le cas général assez faible, de l'ordre de 10 à 20%. Des rendements plus importants ont été obtenus à l'aide de nouveaux matériaux (en laboratoire, l'arséniure de gallium AsGa donne des rendements supérieurs à 25%) ou de techniques expérimentales (technologies multicouches), souvent difficiles et coûteuses à mettre en œuvre. Cependant, le matériau photovoltaïque le plus utilisé est le silicium, qui représente une solution économique. Pour de telles cellules, le rendement énergétique ne dépasse pas les 15%. D'après les caractéristiques courant-tension et puissance-tension, on peut déduire d'autres paramètres :

- Le courant de court circuit I_{cc} , soit le courant débité par la cellule quand la tension à ses bornes est nulle. En pratique ce courant est très proche du photo courant I_{ph} .
- La tension de circuit ouvert V_{co} , soit la tension qui apparaît aux bornes de la cellule quand le courant débité est nul.
- Entre ces deux extrêmes, il existe un optimum donnant la plus grande puissance P_{max} ou MPP (Maximum Power Point).

I.9. 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 suivante représente trois zones essentielles [14] :

- 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 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.

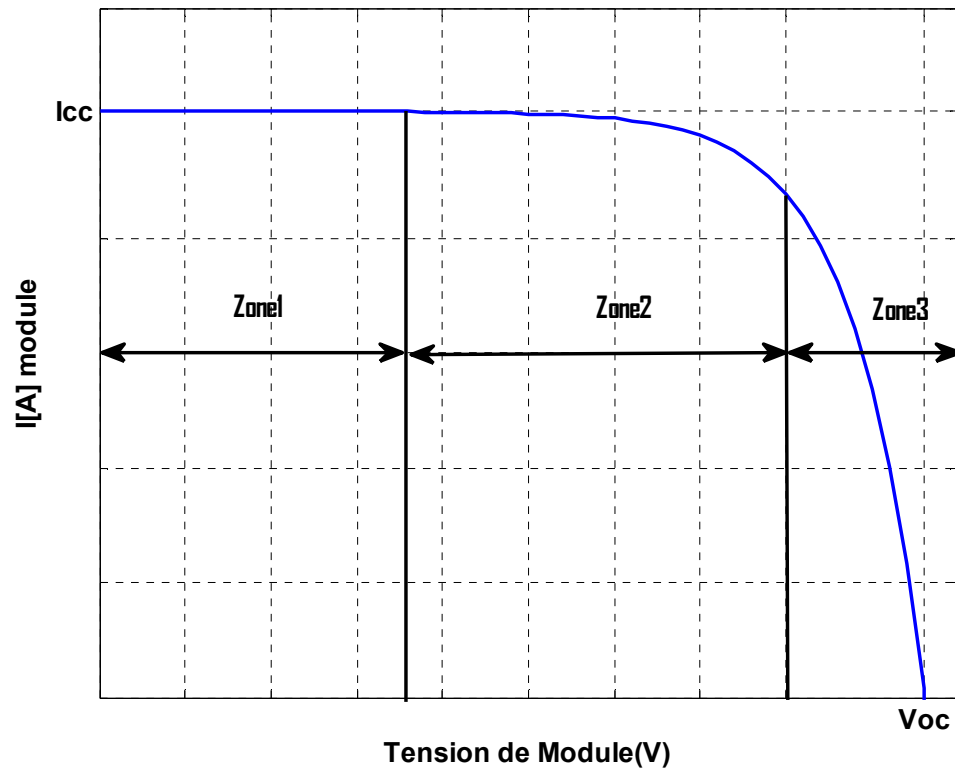


Fig.I.7: Les différentes zones de Caractéristique I(V) d'un générateur photovoltaïque

I.10. Module photovoltaïque

Rappelons tout d'abord que les modules photovoltaïques sont des convertisseurs d'énergie lumineuse en électricité, à ne pas confondre avec les capteurs solaires thermiques ou capteurs plans, qui eux produisent de la chaleur à partir des rayons solaires.

Le module photovoltaïque est par définition un ensemble de photopiles assemblées pour générer une puissance électrique exploitable lors de son exposition à la lumière. en effet, une photopile élémentaire ne génère pas suffisamment de tension entre : 0,5 et 1,5 selon les technologies .Il faut presque toujours plusieurs photopiles en série pour générer une tension utilisable [16] .

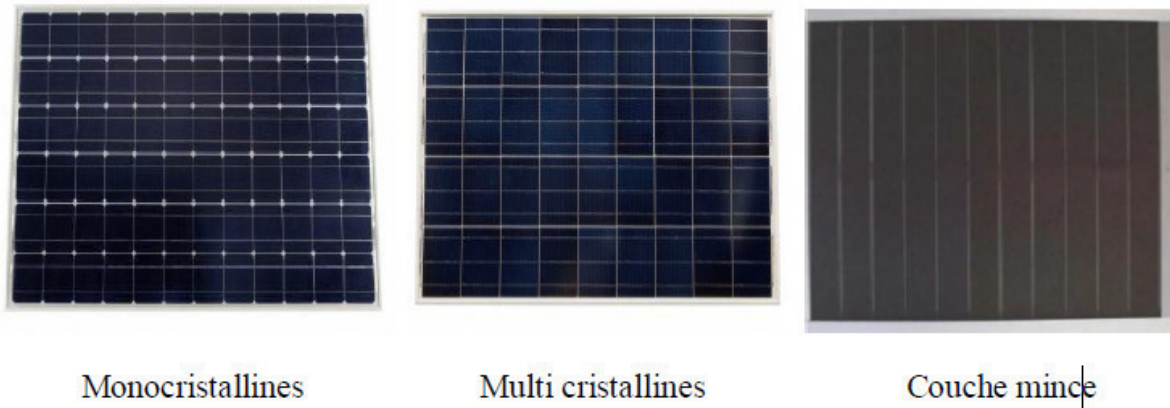


Fig.I.8: Module photovoltaïque.

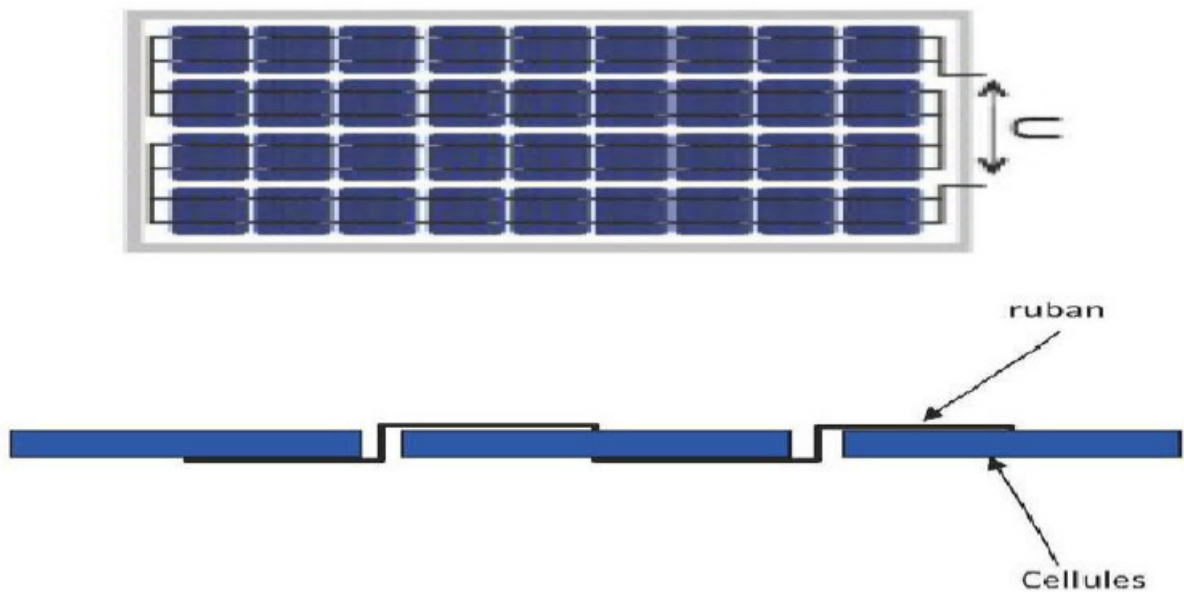


Fig.I.9 : Câblage des cellules dans un module.

Les modules en silicium mono cristallin (64% du marché avec une efficacité de Conversion (énergie électrique produite / énergie solaire incidente) de l'ordre de 15 à 18%), polycristallin (28% du marché avec une efficacité de conversion de l'ordre de 13 à 15 %) ou silicium amorphe (13% du marché avec une efficacité de conversion de l'ordre de 5 à 12 %) délivrent des tensions normalisées (12, 24, 48V) et des puissances comprises entre 10 et 100 W_c (Watt- crête : puissance obtenue pour l'ensoleillement maximal) [17]. 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].

I.10.1. Caractéristiques d'un module [17]

Les modules sont généralement des parallélépipèdes rectangles rigides minces (quelques centimètres d'épaisseur), dont les caractéristiques suivantes :

- **La puissance de crête, P_c** : Puissance électrique maximum que peut fournir le module dans les conditions standards (25°C et un éclairement de 1000 W/m^2).
- **La caractéristique $I = f(V)$** : Courbe représentant le courant I débité par le module en fonction de la tension aux bornes de celui-ci.
- **Tension à vide V_{co}** : Tension aux bornes du module en l'absence de tout courant, pour un Éclairement " plein soleil ".
- **Courant de court-circuit I_{cc}** : Courant débité par un module en court-circuit pour un éclairement " plein soleil ".
- **Point de fonctionnement optimum, $P_m (V_m \times I_m)$** : Lorsque la puissance de crête est maximum en plein soleil, $P_m = V_m \times I_m$
- **Rendement**: Rapport de la puissance électrique optimale à la puissance de radiation incidente.
- **Facteur de forme** : Rapport entre la puissance optimale P_m et la puissance maximale que peut avoir la cellule : $V_{co} \cdot I_{cc}$.

I.10.2. Influence de la Température

Nous présentons ci-dessous les caractéristiques $I(V)$ et $P(V)$ **figure(I.10)** et **figure (I.11)** d'un module photovoltaïque pour un niveau d'ensoleillement G donné et pour différentes températures :

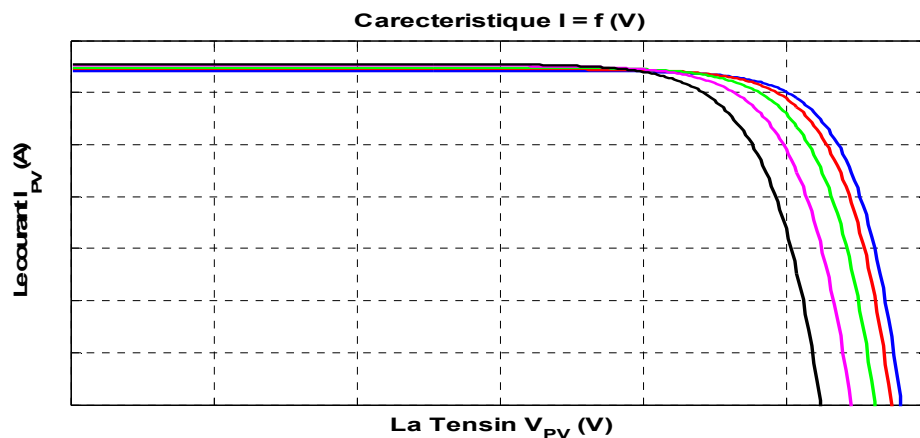
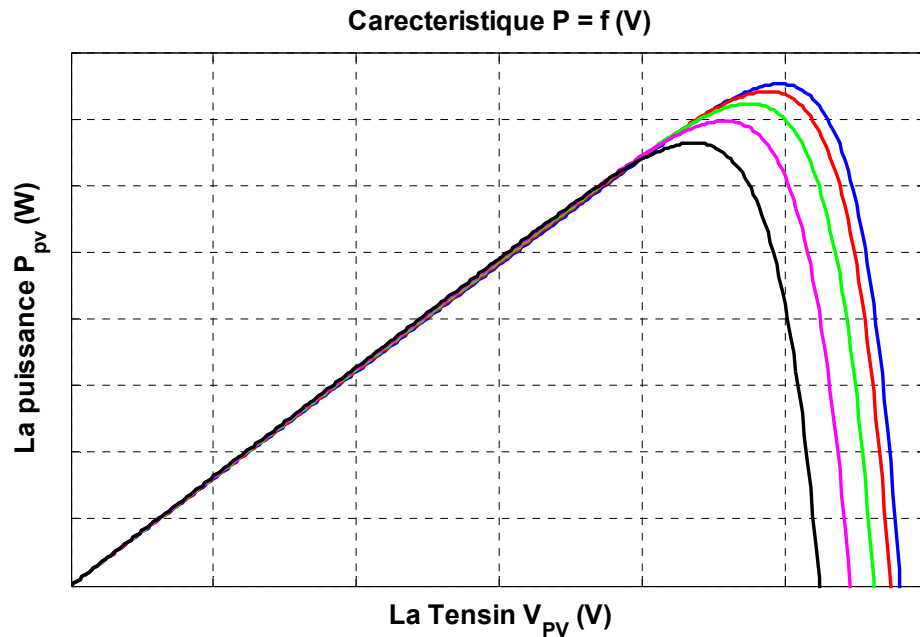


Fig.I.10 : La caractéristique de $I=f(V)$ en fonction de température.**Fig.I.11** : La caractéristique de $P=f(V)$ en fonction de température.

Pour la **Figure(I.10)** 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(I.11)**

I.10.3. Influence de l'association série des cellules PV

La cellule individuelle, unité de base d'un système photovoltaïque, ne produit qu'une très faible puissance électrique, typiquement de 0.5 W avec une tension de moins d'un volt. Pour produire plus de puissance, les cellules sont assemblées pour former un module (ou panneau).

Un module de 36 cellules en série (Type *GTO136 – 80/2*) est suffisant pour obtenir une tension compatible avec la charge. Pour avoir plus de tension, il faut assembler N_s modules en série, par contre pour le courant généré, un nombre N_p de modules en parallèle permet d'en ajouter, les diodes de protection série et parallèles protègent le circuit contre le retour de courant. L'association en série des cellules délivre une tension égale à la somme des tensions individuelles et un courant égal à celui d'une seule cellule [19].

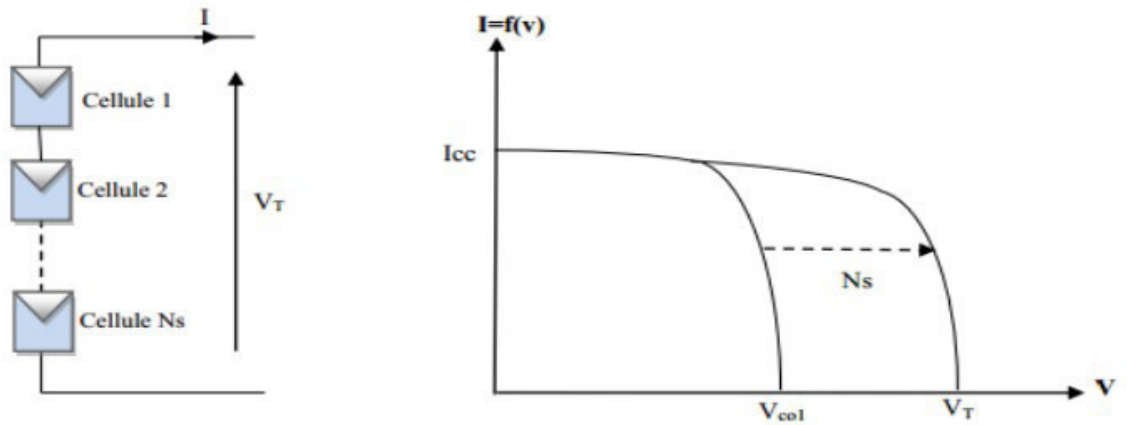


Fig.I.12 : Association de N_s modules solaires en série.[39]

I.10.4. Influence de l'association parallèle des cellules PV

L'association en parallèle des photopiles délivre un courant égal à la somme des courants individuels et une tension égale à celui d'une seule cellule.

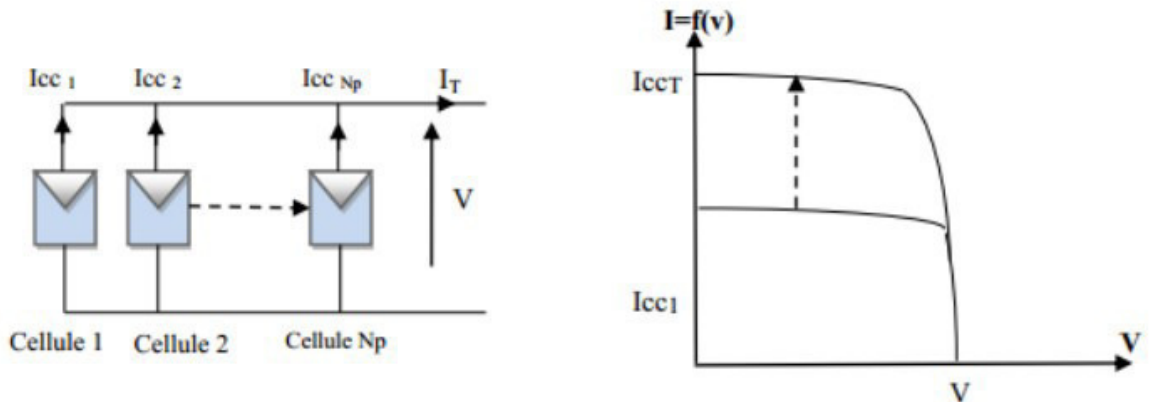


Fig.I.13 : Association de N_p modules solaires en parallèle.

I.10.5. Influence de l'association mixte (Série +Parallèle) des cellules PV :

Pour avoir une satisfaction en courant et en tension, on est obligé d'utiliser un groupement mixte, c'est-à-dire Série-Parallèle [19].

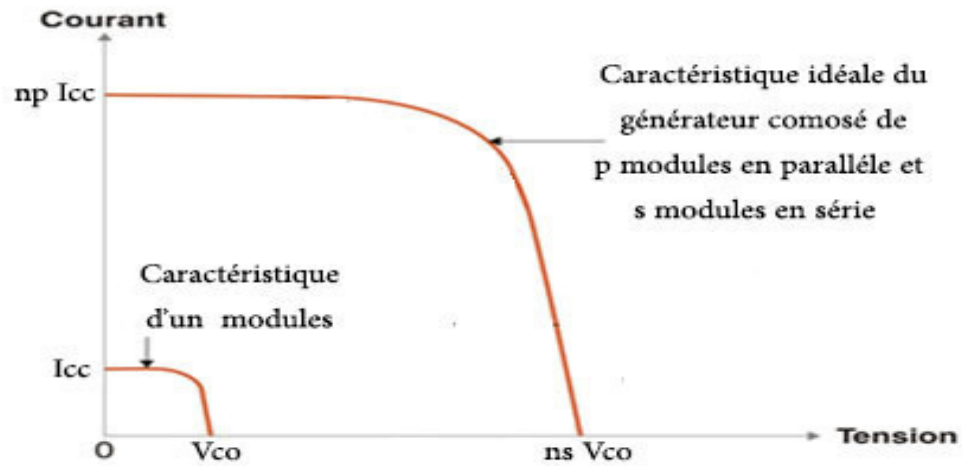


Fig.I.14 : Association mixte $N_s * N_p$ modules solaires.

I.11. Avantages et inconvénients d'une installation PV

I.11.1. Avantages

- 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.
- 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 inflammable, ni son transport, ni personnel hautement spécialisé.
- La technologie photovoltaïque présente des qualités sur le plan écologique car reproduit 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 [14] .

I.11.2. 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 à 15 %

(soit entre 10 et 15 MW/km^2 pour le BENELUX) avec une limite théorique Pour une cellule de 28%. Les générateurs photovoltaïques ne sont pas compétitifs par rap portaux 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 [14].

I.11 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté le monde de la conversion photovoltaïque qui connaît depuis quelques années une évolution profonde associée à l'intérêt croissant pour l'énergie photovoltaïque. On a étudié le principe de l'effet photovoltaïque, la cellule photovoltaïque et les différents types des cellules photovoltaïques.

Dans les prochains chapitres, nous intéresserons à la modélisation et la commande des systèmes photovoltaïques et ces simulations sous l'outil Matlab/Simulink par la comparaison avec un PV réel série UDTS50 où on peut valider le meilleur modèle à choisir.

Chapitre II



**La modélisation des
systèmes PV**

II.1. Introduction

Pour développer un circuit équivalent précis pour une cellule PV, il est nécessaire de comprendre la configuration physique des éléments de la cellule aussi bien que les caractéristiques électriques de chaque élément. Selon cette philosophie plusieurs modèles électriques ont été proposés pour représenter la cellule photovoltaïque.

L'objectif de ce chapitre est de présenter les différents modèles du module photovoltaïque permettant d'obtenir la caractéristique $I(V)$ et $P(V)$, qui est importante pour l'estimation des Performances optimales d'un module photovoltaïque. On utilise les programmes du Matlab pour simuler les quatre modèles. Les résultats obtenus seront confrontés avec des données expérimentales afin de déduire le modèle le plus fiable.

II.2. L'outil Matlab/Simulink

MATLAB est un logiciel scientifique de calcul numérique créé en 1984 qui possède aujourd'hui une position dominante en [32] :

- Recherche
- Enseignement (universités, écoles d'ingénieurs)
- Industrie (automobile, avionique, espace, chimie, finance, ...)

Outre le logiciel de base, MATLAB se décline en une quantité de « boîte à outils » supplémentaires.

MATLAB fait également partie d'un ensemble d'outils intégrés dédiés au Traitement du Signal. En complément du noyau de calcul MATLAB, l'environnement comprend des modules optionnels qui sont parfaitement intégrés à l'ensemble [31] :

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

SIMULINK est une plateforme de modélisation et de simulation de systèmes dynamiques. Il offre un environnement de développement graphique et une bibliothèque de

blocs qui permettent de simuler divers systèmes de contrôle, communication, traitement de signaux. Il est entièrement intégré à MATLAB, ce qui procure une grande souplesse d'utilisation et il permet de créer des modèles de « haut niveau » avec une décomposition hiérarchique en blocs [32].

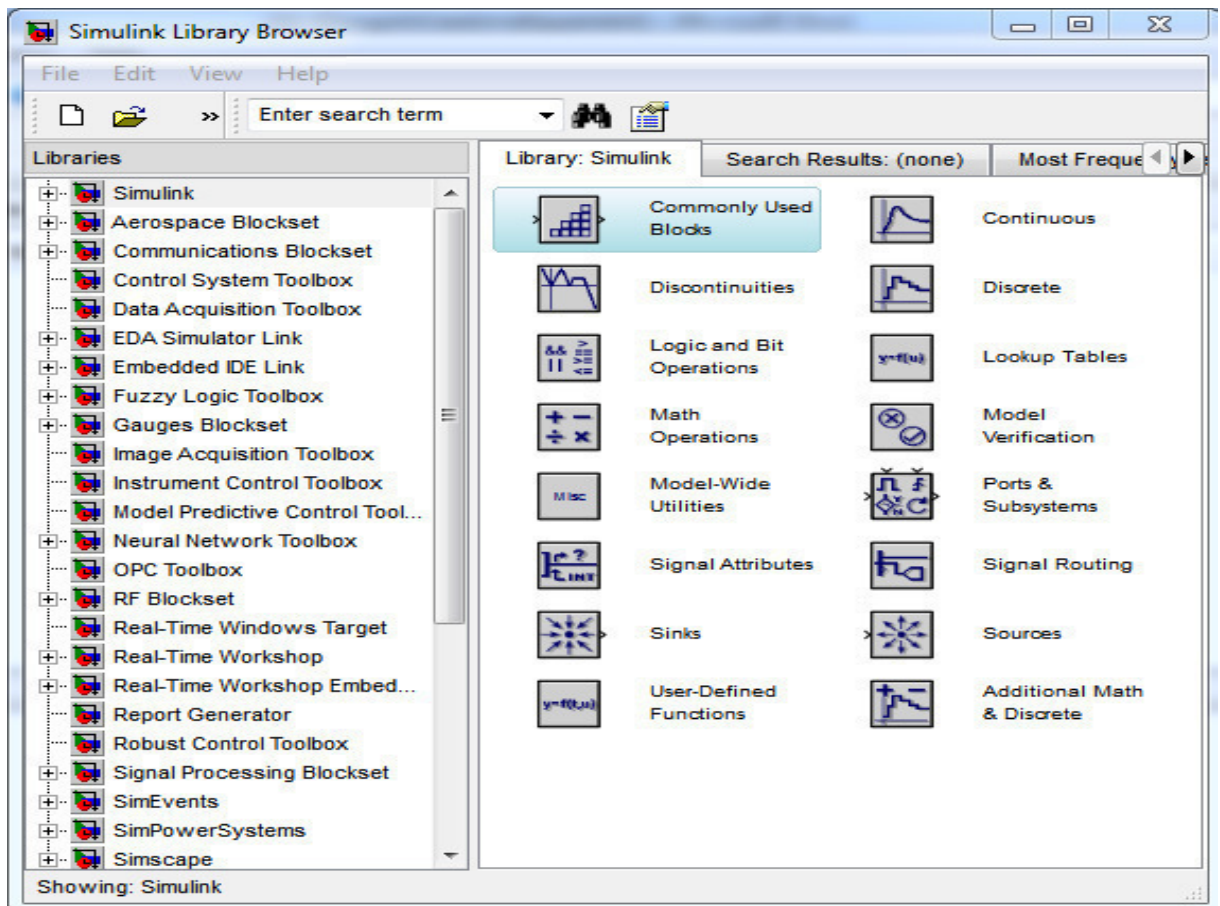


Fig.II.1 : Bibliothèque SIMULINK MATLAB R2010b

II.3. Modèles Photovoltaïques

Une cellule solaire est constituée par une jonction PN , lorsque la surface libre est éclairée les photons d'énergies supérieures à la largeur de la bande interdite (E_g) peuvent exciter des paires électron-trous dans les régions quasi neutres P et N illustrées dans **Figure (II.1)**. Les électrons et les trous créés respectivement dans les régions P et N diffusent et atteignent la zone de charge d'espace, accélérer par le champ électrique interne, ils traversent la zone de transition. La région N reçoit des électrons et se charge négativement, la région P accepte des trous et se charge positivement. Si on relie les cotés de la jonction à une charge (R_c), un courant (I) la parcourt et une différence de potentiel apparaît [19].

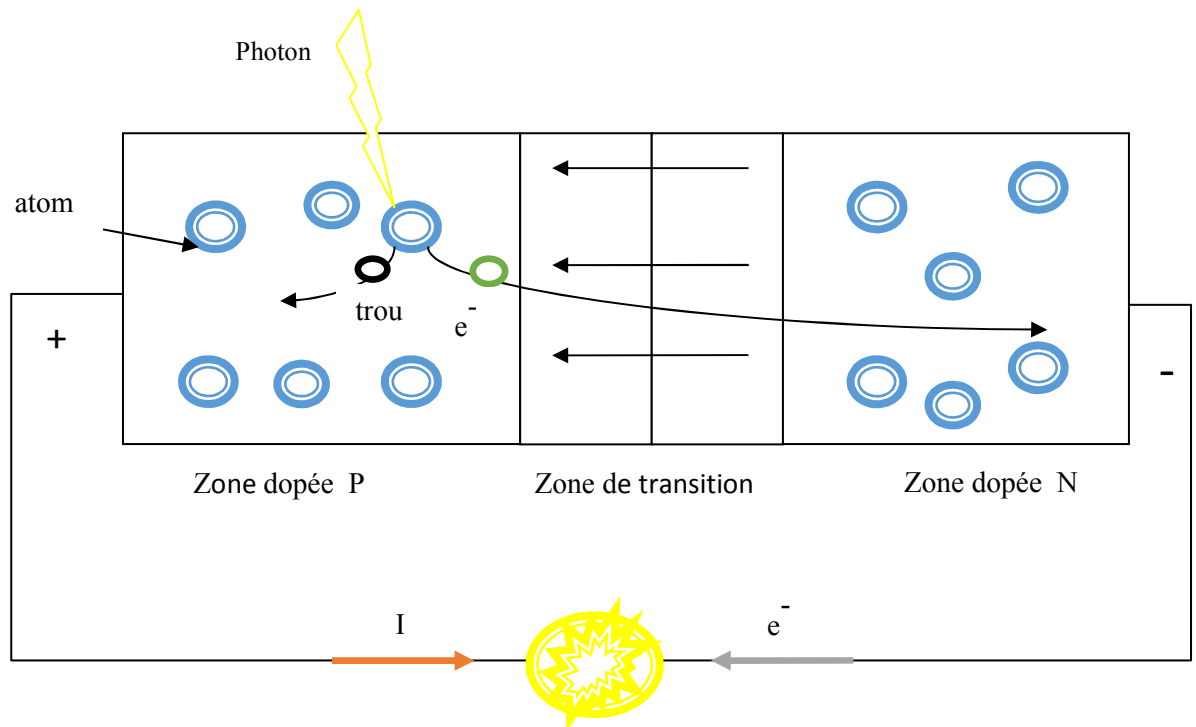


Fig.II.2 : Création de pair électron trous par photo excitation.

Le courant résultant de la jonction est :

$$I = I_{ph} - I_d(V) \quad (\text{II.1})$$

Avec :

- I_{ph} : le photo courant;
- $I_d(V)$: courant d'obscurité de la diode.

Cette relation entre les trois grandeurs I , I_{ph} et $I_d(V)$ représente la caractéristique courant-tension idéale permettant de déterminer quatre grandeurs caractéristiques principales du fonctionnement des cellules solaires:

- Le courant de court-circuit (I_{cc});
- La tension en circuit ouvert (V_{oc});
- Le facteur de forme (ff);
- Le rendement de conversion d'énergie photovoltaïque [19].

II.4. Les différents modèles électriques d'une cellule photovoltaïque

Parmi ces modèles on peut citer les suivants

II.4.1. Modèle général

Le fonctionnement d'un module photovoltaïque est décrit par le modèle « standard » à une diode, établi par Shokley pour une seule cellule PV, est généralisé à un module PV en le considérant comme un ensemble de cellules identiques branchées en série ou en parallèle [18].

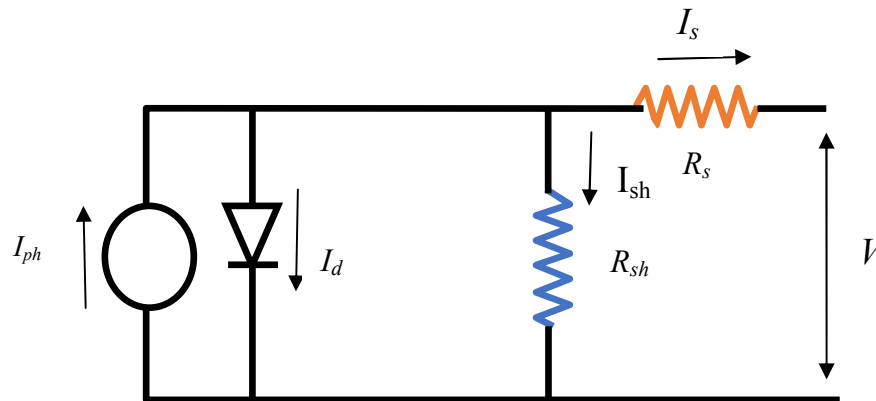


Fig.II.3 : schéma équivalent d'une cellule PV Modèle à une diode [19]

Le courant fourni par la cellule est donné par la relation (II-2) [19],[21]

$$I = I_{ph} - I_s [\exp(q(V + IR_s)/kT_c A) - 1] - (V + IR_s)/R_{sh} \quad (\text{II.2})$$

Avec :

I : Courant fourni par la cellule [A]

V : Tension à la borne de la cellule [V]

I_{ph} : Photo courant [A], proportionnel à l'irradiance , avec correction selon T

I_s : Courant de saturation de la diode [A], dépendant de la température [A]

R_s : Résistance série [Ω].

R_{sh} : Résistance shunt (ou parallèle) [Ω].

q : Charge de l'électron = 1.602×10^{-19} Coulomb

k : Constante de Boltzmann = $1,38 \times 10^{-23}$ J/K

A : Facteur de qualité de la diode, normalement compris entre 1 et 2.

T_c : Température effective de la cellule [Kelvin].

Il faut noter que ces deux résistances sont liées à la technologie d'élaboration des électrodes. Il faut minimiser R_s de telle sorte que R_{sh} soit très important.

Le photocourant dépend principalement de l'énergie solaire l'insolation et la température de fonctionnement des cellules, qui est décrite comme :

$$I_{ph} = [I_{sc} + K_I(T_c - T_{Ref})] \lambda \quad (II.3)$$

Avec :

I_{sc} : est le courant de court-circuit de la cellule à $25^\circ C$ and $1kW/m^2$

K_I : est le coefficient de température du courant de court-circuit de la cellule

T_{Ref} : est la température de référence de la cellule

λ : est l'insolation solaire en kW/m^2

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

$$I_s = I_{RS}(T_c/T_{Ref})^3 * \exp[qE_G(1/T_{Ref} - 1/T_c)/KA] \quad (II.4)$$

Avec :

I_{RS} : est le courant de saturation inverse de la cellule à un température de référence et un rayonnement solaire.

E_G : Energie de Gap de la cellule. (Silicium cristallin $E_G = 1,12 eV$, Silicium amorphe $E_G = 1,7 eV$, CIS = $1,03 eV$, CdTe = $1,5 eV$). [19]

A : Le facteur A idéal dépend de la technologie PV et est listé dans le **Tableau II-1** :

Tableau II-1 : Facteur A dépendance à la technologie PV [22]

La technologie	A
<i>Si – mono</i>	1.2
<i>Si – poly</i>	1.3
<i>a – Si : H</i>	1.8
<i>a – si : H tandem</i>	3.3
<i>a – si : H triple</i>	5
<i>CdTe</i>	1.5
<i>CIS</i>	1.5
<i>AsGa</i>	1.3

II.4.2. Modèle double exponentiel

Nous avons, cette fois-ci, deux diodes pour représenter les phénomènes de polarisation de la jonction PN. Ces diodes symbolisent la recombinaison des porteurs minoritaires, d'une part en surface du matériau et d'autre part dans le volume du matériau. Le schéma du générateur photovoltaïque devient dans le cas de la **Figure(II.4)**. [23] :

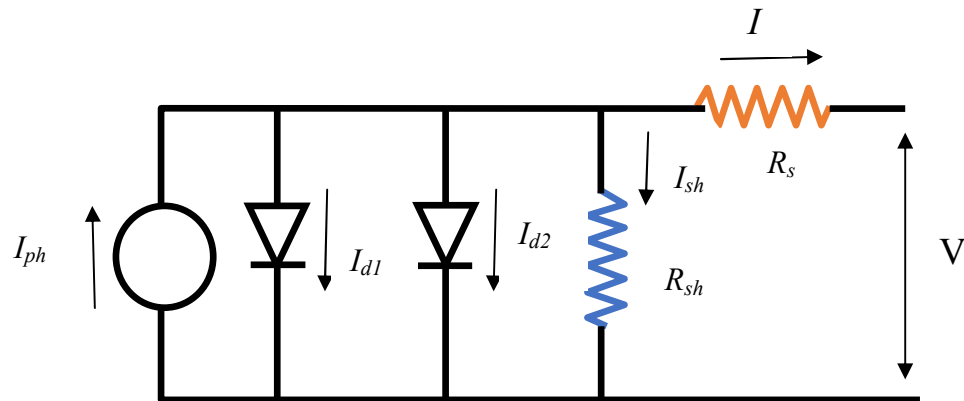


Fig.II.4 : schéma équivalent d'une cellule PV Modèle à deux diodes [24]

Le courant fourni par la cellule est donné par l'équation (II-5) :

$$I = -I_{ph} + \frac{V - R_s I}{R_{sh}} + I_{s1} \left[\exp \left\{ \frac{q(V - R_s I)}{A k T} \right\} - 1 \right] + I_{s2} \left[\exp \left\{ \frac{q(V - R_s I)}{2 A k T} \right\} - 1 \right] \quad (\text{II.5})$$

II.4.3. Modèle approprié

Le modèle à quatre paramètres est un modèle largement utilisé; il a été étudié par Townsend [28]. Ce modèle traite la cellule photovoltaïque comme une source de courant, dépendante de l'éclairement, connectée en parallèle avec une diode et en série avec une résistance série R_s

Les quatre paramètres apparaissant dans l'équation de la caractéristique $I(V)$ sont le courant photonique I_{ph} , la résistance série R_s et deux caractéristiques de la diode I_{s1} et n . Ces paramètres ne sont pas des quantités mesurables et ne sont pas généralement inclus dans les données des fabricants. Par conséquent, ils doivent être déterminés à partir des systèmes des équations $I(V)$ pour différents points de fonctionnement (donnés par les fabricants) [5].

La résistance de shunt R_{sh} est inversement proportionnelle à la fuite de shunt Courant vers le sol. En général, l'efficacité PV est insensible à la variation de R_{sh} et la résistance de fuite de dérivation peut être supposée se rapprocher de l'infini sans courant de fuite à la terre.

D'autre part, une petite variation de R_s affectera significativement la puissance de sortie PV. Le modèle approprié de cellule solaire photovoltaïque avec la complexité appropriée est montré dans la **Figure (II.5)** [23].

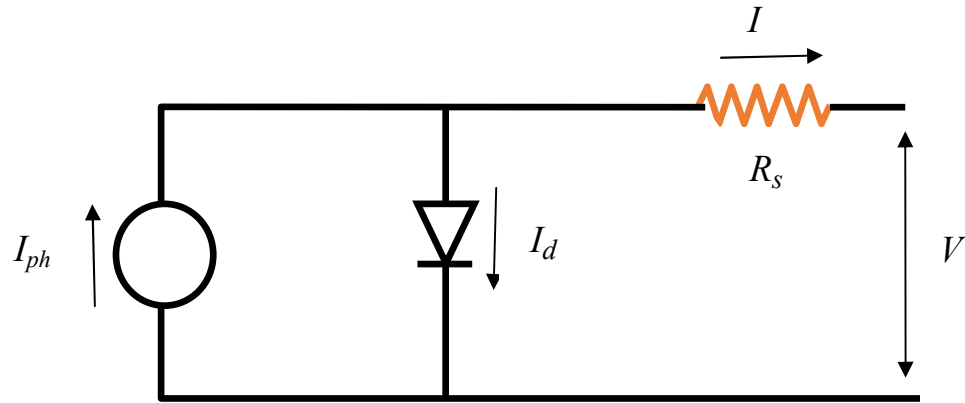


Fig.II.5 : Circuit équivalent du modèle à quatre paramètres. [25]

Le courant électrique produit par la cellule est alors donné par l'expression suivante [5]

:

$$I_{pv} = I_{ph} - I_s \left(\exp\left(\frac{V_{PV} + I_{pv} R_s}{V_t n}\right) \right) \quad (\text{II.6})$$

II.4.4. Modèle simplifié

Les caractéristiques $I - V$ d'une cellule solaire ont une caractéristique exponentielle similaire à celle d'une diode [26]. Le circuit équivalent idéal de la cellule solaire est une source de courant en parallèle avec une seule diode. Ce modèle implique les trois paramètres inconnus suivants: n , I_{ph} et I_s , ce modèle est également appelé *L3P* (Lumped, 1 Mechanism model with 3 Paramètres) [27]. La configuration de la cellule solaire idéale simulée avec une seule diode est représentée à la **Figure (II.6)**

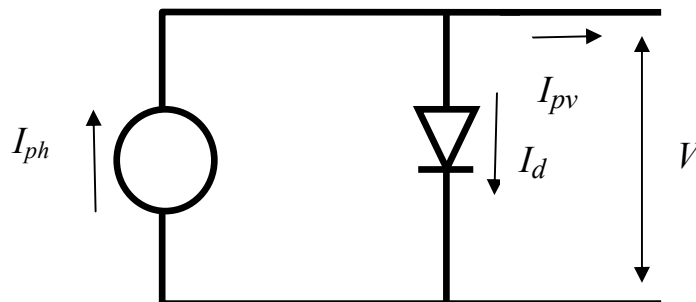


Fig.II.6 : Schéma équivalent du modèle à une exponentielle, L3P [27].

L'équation caractéristique est déduite directement de la loi de Kirchhoff [27]

$$I_{pv} = I_{ph} - I_d \quad (II.7)$$

La diode étant un élément non linéaire, sa caractéristique $I - V$ est donnée par la relation [26]:

$$I_d = I_{S_s} \left(\exp\left(\frac{V_d}{V_t}\right) - 1 \right) \quad (II.8)$$

Le courant débité équivaut à [26] :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_s \left(\exp\left(\frac{V_{pv}}{V_t n}\right) - 1 \right) \quad (II.9)$$

II.5 Module solaire et modèle de matrice

Etant donné qu'une cellule PV typique produit moins de 2W à 0,5V environ, les cellules doivent être connectées en série-parallel sur un module pour produire suffisamment de puissance. Une matrice PV est un groupe de plusieurs modules PV qui sont connectés électriquement dans des circuits en série et en parallel pour générer le courant et la tension requis [29]-[30]. Le circuit équivalent pour le module solaire disposé en série parallel N_p et série N_s est représenté sur la **Figure (II.7)**

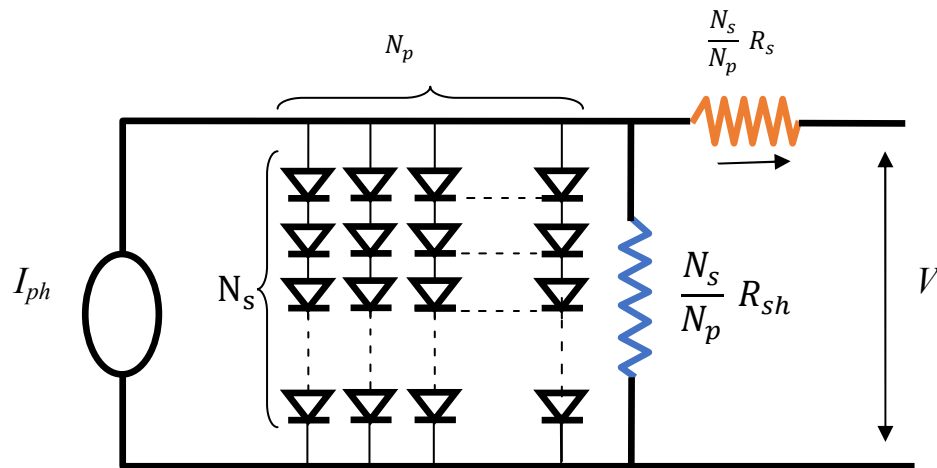


Fig.II.7 : Modèle général [31]

L'équation terminale pour le courant et la tension devient comme suit [31] :

$$I = N_p I_{PH} - N_p I_s \left[\exp\left(\frac{q(V/N_s + IR_s/N_p)}{kTcA}\right) - 1 \right] - (N_p V/N_s + IR_s)/R_{SH} \quad (II.10)$$

En fait, l'efficacité PV est sensible à un faible changement de R_s mais insensible à la variation de R_{SH} . Pour un module ou une matrice PV, la résistance série devient apparemment importante et la résistance de dérivation se rapproche de l'infini supposé ouvert. Dans la plupart des produits PV commerciaux, les cellules photovoltaïques sont généralement connectées en série pour former un module PV afin d'obtenir une tension de fonctionnement adéquate. Les modules PV sont alors disposés en structure série-parallèle pour obtenir la puissance de sortie désirée. Un circuit équivalent approprié pour toutes les cellules, modules et réseaux PV est généralisé et exprimé sur la **Figure (II.8)**. On peut montrer que $N_s = N_p = 1$ pour une cellule PV, $N_p = 1$ et N_s : nombre de cellules en série pour un module PV, et N_s et N_p : nombre en série-parallèle pour un champ PV [31].

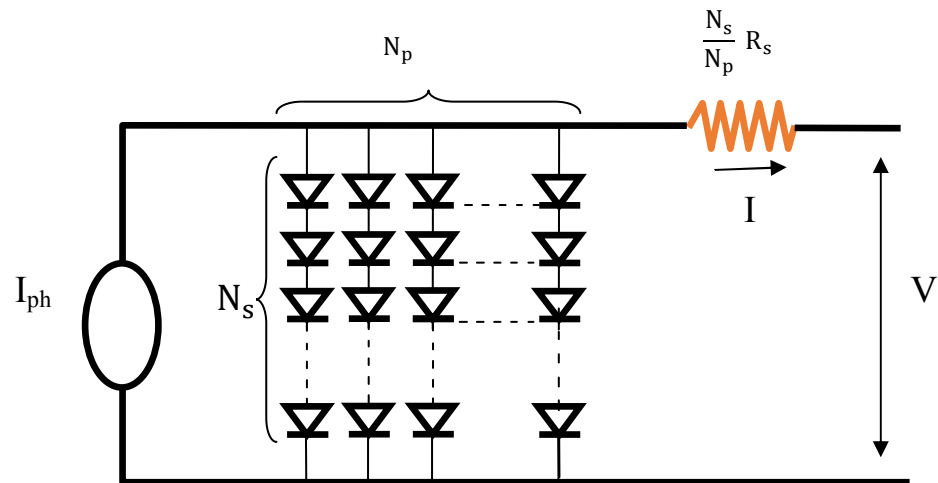


Fig.II.8 : Modèle généralisé [31]

L'équation mathématique du modèle généralisé peut être décrite comme [31] :

$$I = N_p I_{PH} - N_p I_s \left[\exp\left(\frac{q(V/N_s + IR_s/N_p)}{kT_c A}\right) - 1 \right] \quad (II.11)$$

Le modèle le plus simplifié [6], [12] du module PV généralisé est représenté sur la **Figure (II.9)**

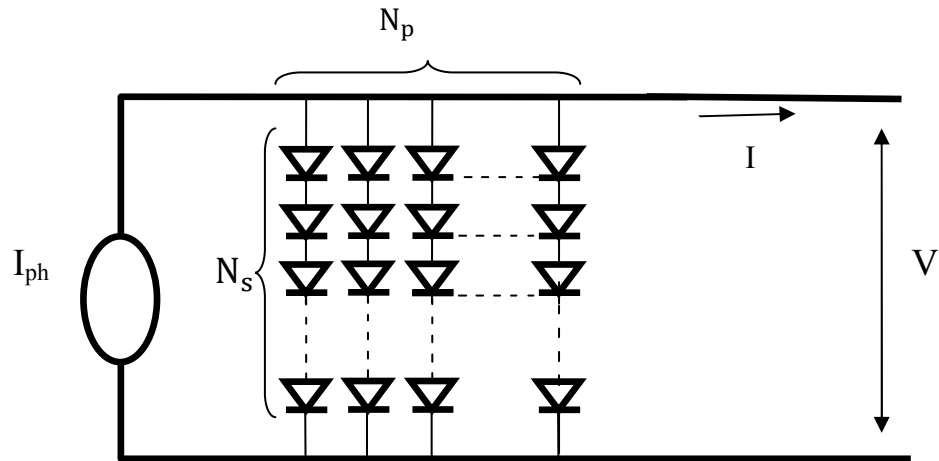


Fig.II.9 : Modèle approprié [31]

Le circuit équivalent est décrit dans l'équation suivante :

$$I = N_p I_{ph} - N_p I_s [\exp(qV/N_s k T_C A) - 1] \quad (\text{II.12})$$

II.6. Choix du module photovoltaïque

Dans notre travail, nous avons choisi le module photovoltaïque du type UDTS 50. Le module solaire UDTS 50 est composé de 36 cellules solaires carrées au silicium monocristallin, de 10 cm de côté, connectées en série.

Ainsi nous donnons les caractéristiques électriques du module photovoltaïque dans le **Tableau (II-2)** :

Tableau II-2 : Performances électriques comparées des modules PV UDTS 50. [58]

Paramètres	Symboles	Valeurs
Température [$^{\circ}\text{C}$]	T	25
Courant de court-circuit [A]	I_{sc}	3.43
Tension de circuit ouvert [V]	V_{oc}	21.28
Tension de puissance maximale [V]	V_{mp}	16.65
Courant de puissance maximale [A]	I_{mp}	3.16
Puissance maximale [W]	P_{max}	52.66
Résistance série [Ω]	R_s	0.9
Facteur de forme [%]	FF	72
Le rendement [%]	η_c	14.63

la surface [cm^2]	S	10 * 10
l'éclairement [w/m^2]	E	1000
Nombre de cellules en série	N_s	36

II.7. Résultats de la simulation

La stratégie de modéliser un module PV n'est aucun différent de modéliser une cellule PV. Les paramètres sont les mêmes de PV UDTS 50 et fixe la température ou fixe l'éclairement.

Dans le programme Matlab que nous avons utilisé dans cette chapitre exécute les calculs itérative quatre fois afin d'assurer la convergence des résultats. La méthode employée ici est appliquée dans des programmes script pour la simulation des différents effets sut la caractéristique $I(V)$ et $P(V)$ telle que l'influence de l'éclairement et température.

Les caractéristiques principales que nous choisisent sont montrées dans le **Tableau II-2**

II.7.1 Résultats de Modèle général

On fixe l'éclairement à $1000 W/m^2$

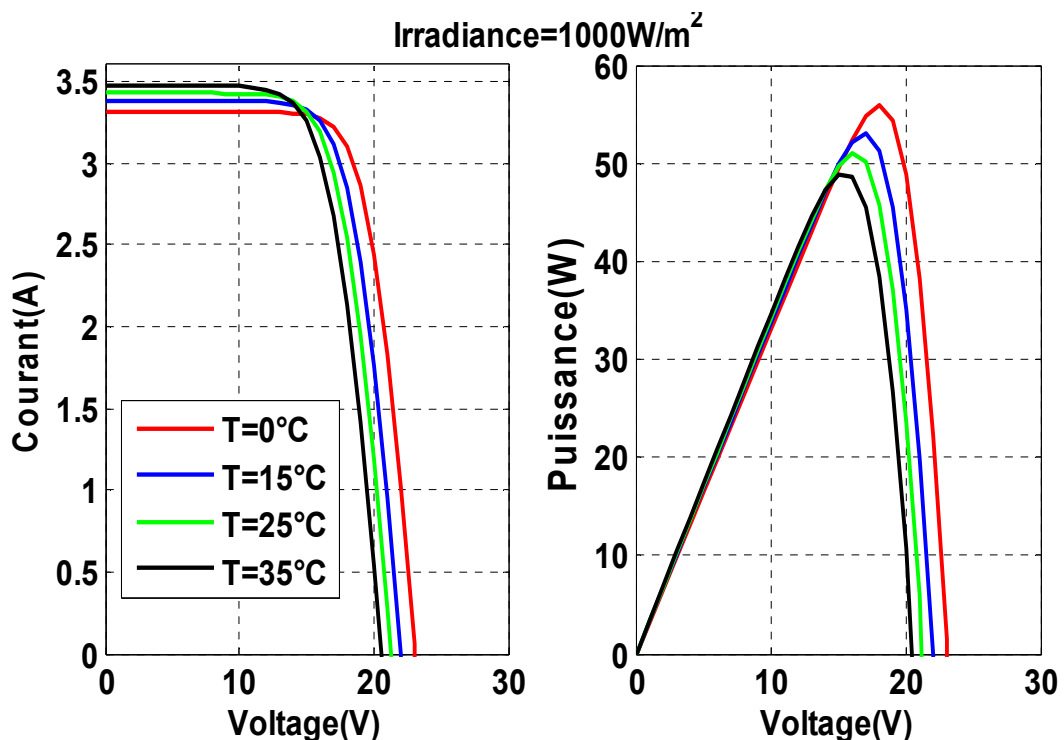


Fig.II.10 : Caractéristiques I-V et P-V d'un modèle générale a $E= 1000 w/m^2$

On fixe la température à $25^{\circ}C$

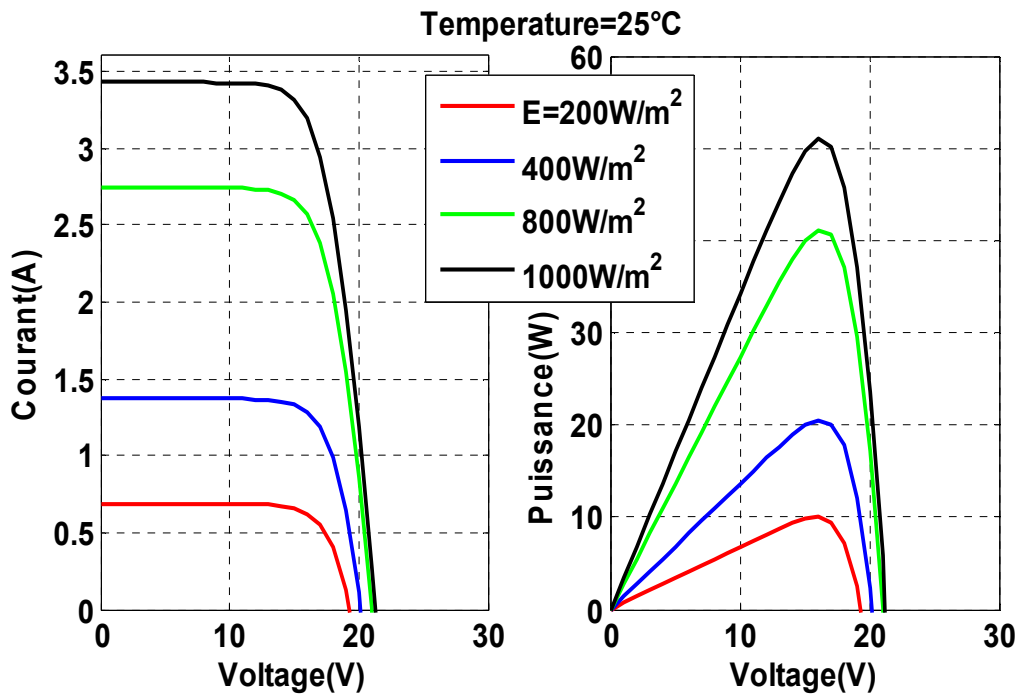


Fig.II.11 : Caractéristiques I-V et P-V d'un modèle générale a 25° C

II.7.2 Résultats de Modèle double exponentiel

On prend : $D1 = D2$

On fixe l'éclairement à $1000 W/m^2$

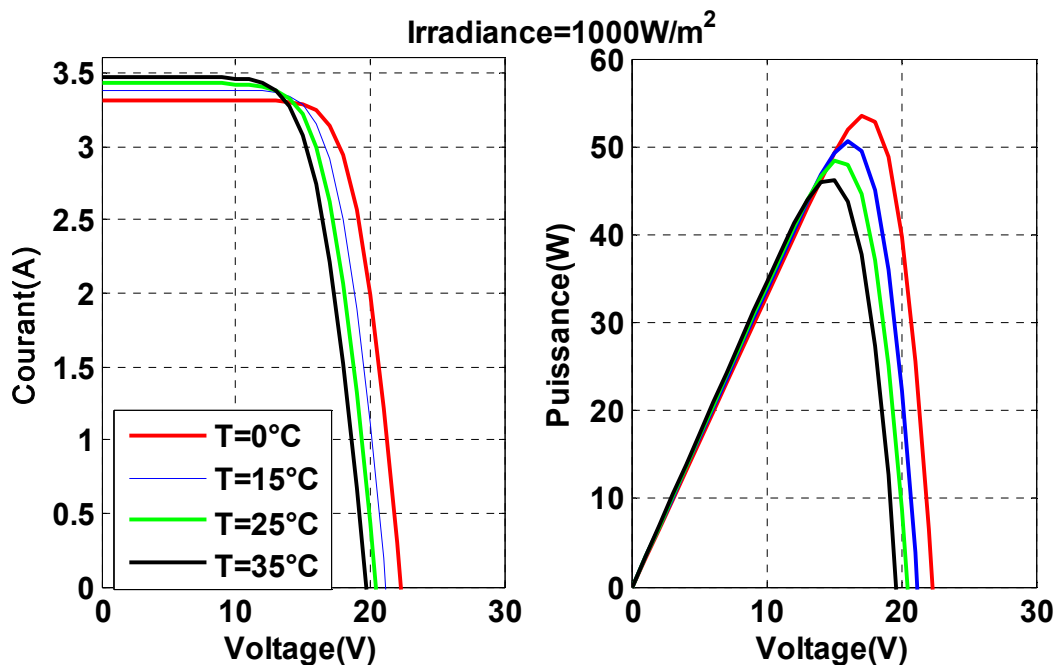


Fig.II.12 : Caractéristiques I-V et P-V d'un modèle double exponentiel a $E= 1000 w/m^2$

On fixe la température à 25° C

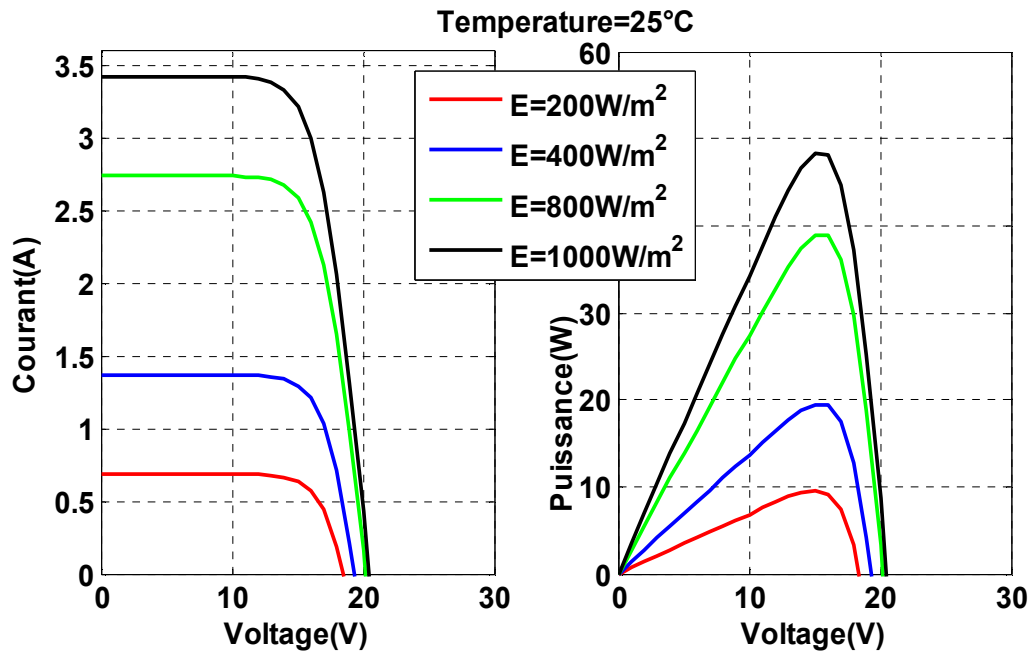


Fig.2.13: Caractéristiques I-V et P-V d'un modèle double exponentiel a 25° C

II.7.3 Résultats de Modèle approprié

On fixe l'éclairement à 1000 W/m²

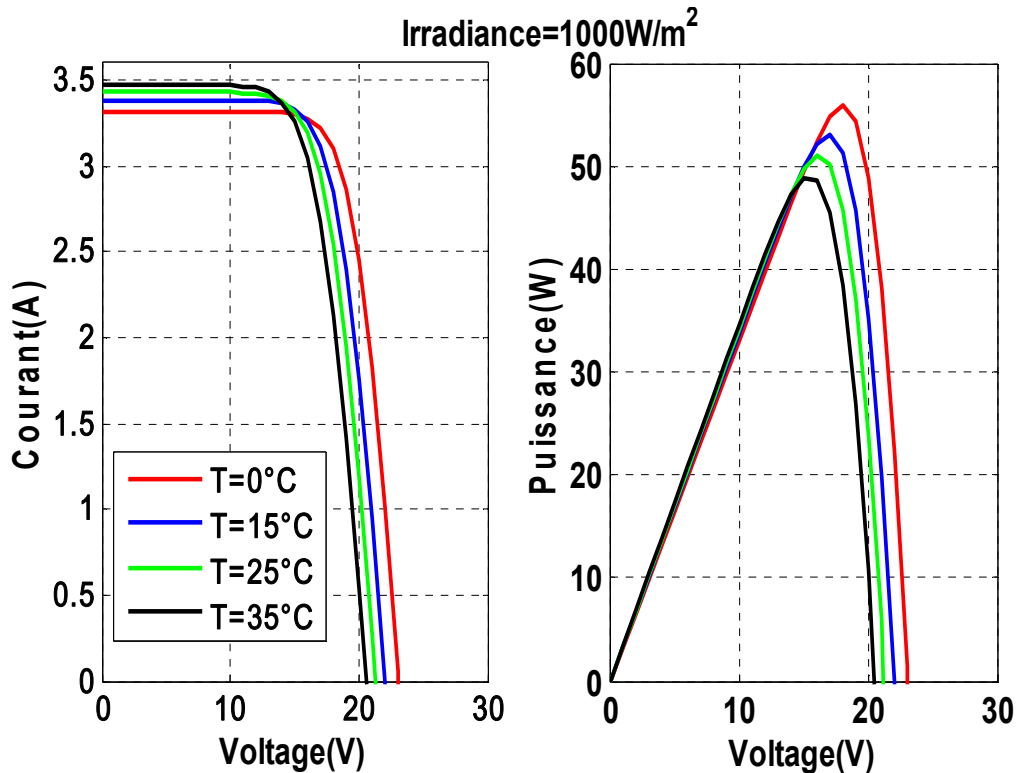


Fig.II.14 : Caractéristiques I-V et P-V d'un modèle approprié a E= 1000 w/m²

On fixe la température à 25° C

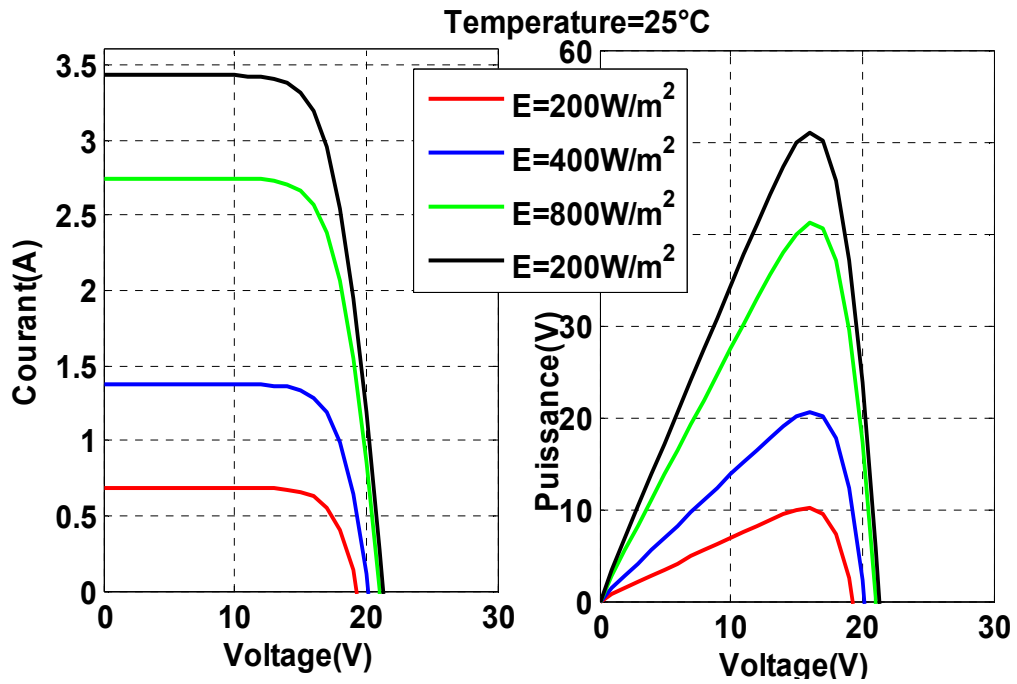


Fig.II.15 : Caractéristiques I-V et P-V d'un modèle approprié a 25° C

II.7.4. Résultats de Modèle simplifié

On fixe l'éclairement à 1000 W/m^2

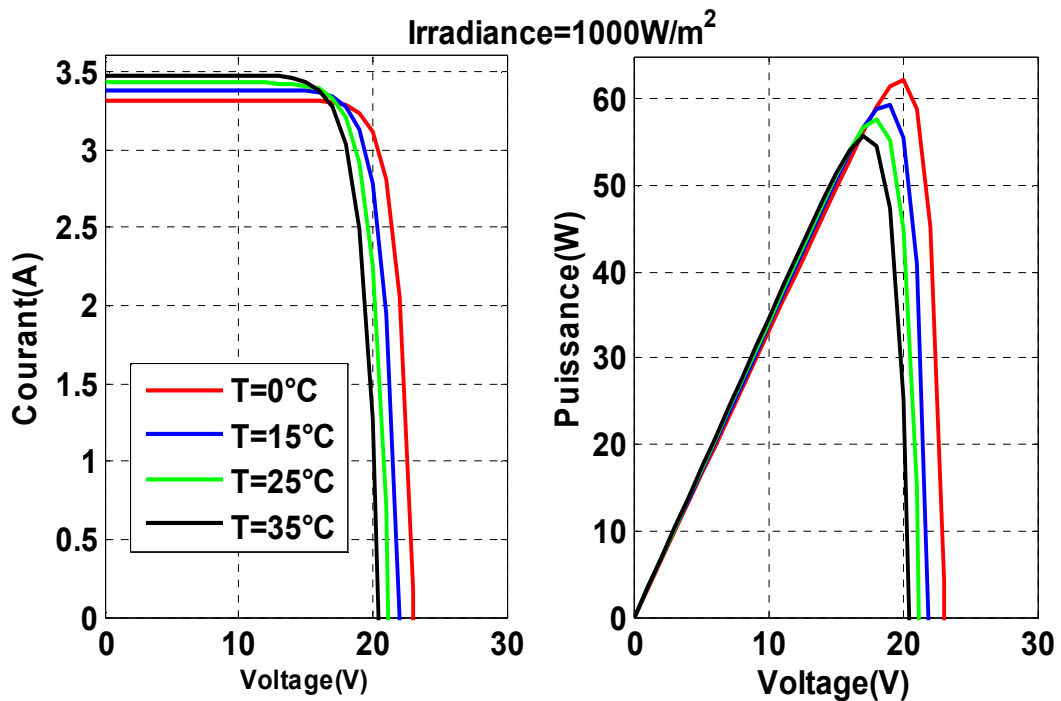


Fig.II.16 : Caractéristiques I-V et P-V d'un modèle simplifié a $E= 1000 \text{ w/m}^2$

On fixe la température à 25° C

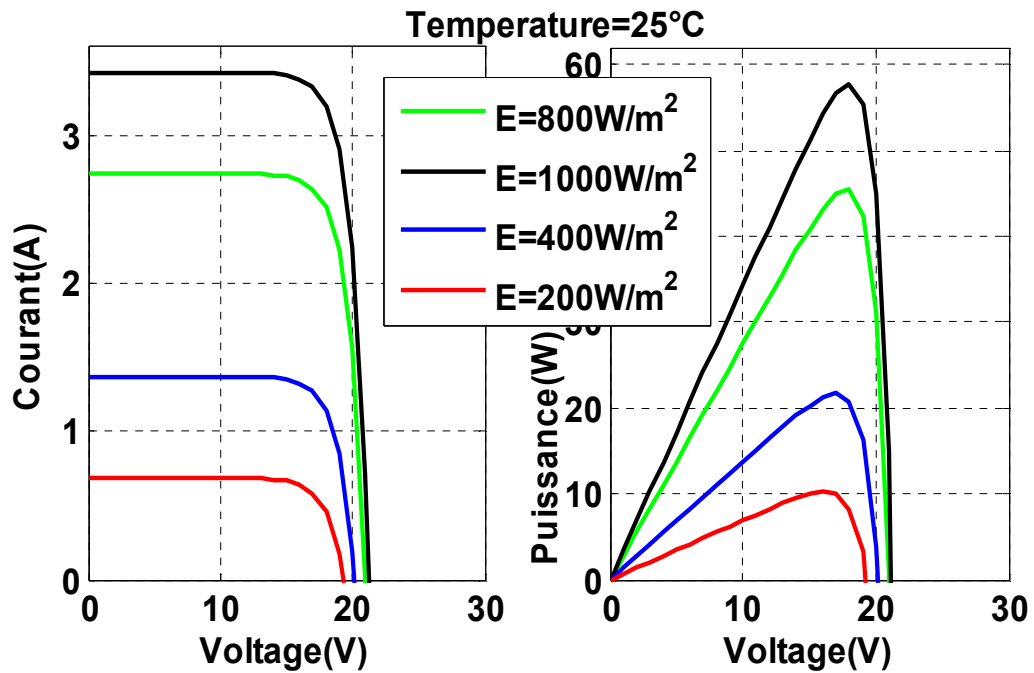


Fig.II.17: Caractéristiques I-V et P-V d'un modèle simplifié à 25° C

II.8. Comparaison avec le datasheet de P_{max}

Les puissances des modèles plus proches à la puissance de datasheet sont mentionnées en gras :

Tableau II-3 : Comparaison avec le datasheet de P_{max}

Modèle	P_{max}	Différence
Général	51.02	1.64
double exponentiel	48.29	4.37
Approprié	51.03	1.63
Simplifié	57.71	5.05
UDTS 50	52.66	

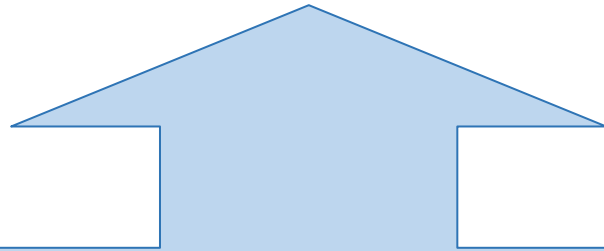
Globalement la simulation a permis d'évaluer le comportement général de l'ensemble des Composants. Un modèle PV généralisé **Figure (II.8)** qui est représentatif de l'ensemble de la cellule PV, du module et de la matrice a été développé avec Matlab / Simulink et vérifié avec une cellule PV et un module commercial. Le modèle proposé prend l'irradiance du soleil et la température de la cellule comme paramètres d'entrée et délivre les caractéristiques $I(V)$ et $P(V)$ dans diverses conditions.

D'après les résultats de la simulation avec Matlab et Comparaison avec le datasheet0 de P_{max} , nous avons constaté que les valeurs délivrées par le modèle 3 (Modèle approprié) sont en très bon accord avec le modèle de référence.

II.9. CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons étudié quatre modèles différents d'un module photovoltaïque. Ces modèles sont utilisés par les chercheurs dans le domaine d'énergies renouvelables, pour savoir qui est le plus proche de la réalité, nous avons pris des mesures réelles « datasheet » d'un système particulier et nous conformés la comparaison par l'utilisation l'outil de simulation Matlab/Simulink, dans le chapitre suivant, nous montrerons la différence entre ces modèles lors de l'application du commande MPPT.

Chapitre III



**Commande du
système PV par les
algorithmes MPPT**

III.1. Introduction

Un MPPT, (Maximum Power Point Tracking) est un principe permettant de suivre, comme son nom l'indique, le point de puissance maximale d'un générateur électrique non linéaire. Les systèmes MPPT sont généralement associés avec les générateurs photovoltaïques (GPV) ou encore avec les générateurs éoliens [40].

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 [40].

Les algorithmes MPPT sont nécessaires dans les applications photovoltaïques car le MPP d'un panneau solaire varie en fonction de l'irradiation et de la température. L'utilisation d'algorithmes MPPT est donc nécessaire pour obtenir la puissance maximale d'un générateur solaire.

Dans ce chapitre on va étudier les différentes techniques de suivre le point de fonctionnement d'un générateur photovoltaïque. Parmi ces techniques, les algorithmes P&O et INC sont les plus courants. Ces techniques ont l'avantage d'une mise en œuvre facile mais elles présentent aussi des inconvénients, Comme nous le verrons plus tard D'autres techniques basées sur des principes différents sont le contrôle de logique floue, réseau de neurones, tension de circuit ouvert fractionnaire ou courant de court-circuit, balayage de courant, etc. La plupart de ces méthodes donnent un maximum local et certains donnent un MPP approximatif, pas l'exact. Dans des conditions normales, la courbe $P(V)$ a un seul maximum, donc ce n'est pas un problème.

III.2. Les convertisseurs DC-DC (hacheurs)

Le hacheur est un convertisseur continu/continu 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 [40].

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 de bons rendements dans les hacheurs [41].

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 [40].

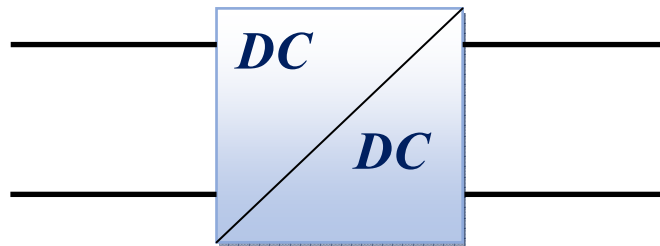


Fig.III.1: Symbole d'un convertisseur DC-DC

III.3. 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 [5] :

- ✓ 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 cadre, on distingue deux familles de convertisseurs statiques (ou hacheurs) [5]

- ✓ hacheur abaisseur (ou buck)
- ✓ hacheur élévateur (ou boost)

Dans la littérature [42] [43] il existe différents types de régulateurs de conversions d'énergie électriques appelés convertisseurs: Buck, boost, buck-boost, flyback, etc. Nous allons représenter ici les principales caractéristiques de quelques types de régulateurs.

III.3.1. Convertisseur buck

Le convertisseur de type Buck, sous sa forme de base, est montré sur la **figure (III.2)**. Les composantes clés sont l'inductance, L , l'interrupteur (switch), K , la diode D et la capacité C . On peut voir sur le timing la largeur du temps ON et OFF en fonction du rapport cyclique α (duty cycle).

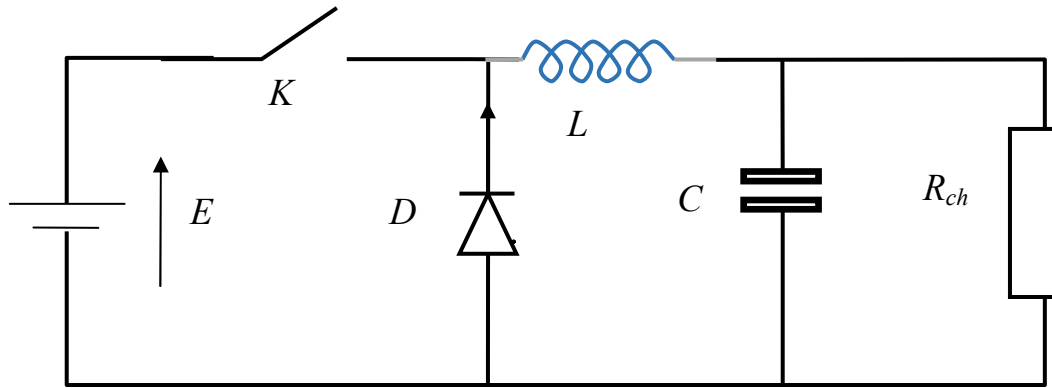


Fig.III.2 : Circuit de base du convertisseur Buck

III.3.2. Convertisseur boost

Le convertisseur de type buck est un dévolteur il réduit la tension. Cependant, une topologie de circuit qui augmente la tension est le convertisseur de type boost comme montré sur la **Figure (III.3)**.

Le convertisseur boost dans la conduction continue dessine une source de courant continu, mais le courant de charge sera discontinu. Cette source de courant continu peut être avantageuse pour des applications photovoltaïques, car il réduit le filtrage exigé entre le module photovoltaïque et le convertisseur.

Le convertisseur peut aussi fonctionner en mode discontinu quand la tension de charge dépend dans les deux cas du rapport cyclique. Avec le convertisseur boost (ou buck-boost), la tension peut monter à une valeur très élevée s'il n'y a aucun courant de charge.

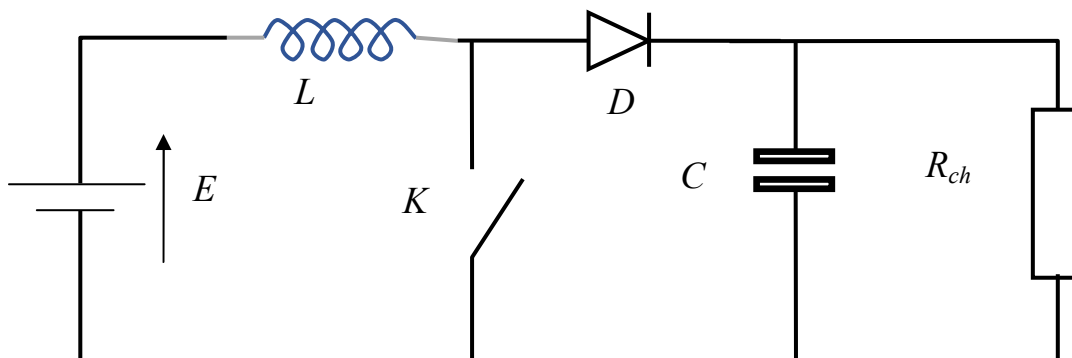


Fig.III.3 : Circuit de base du convertisseur de type Boost

III.3.3. Convertisseur buck-boost

La troisième topologie de base est montrée sur la **figure (III.4)**, c'est le convertisseur buck-boost. Ce convertisseur est utilisé quand on a besoin d'augmenter et de diminuer la tension.

Quand l'interrupteur K est fermé, on charge toujours la self et lorsque cet interrupteur s'ouvre, la tension à travers l'inducteur est renversée et la self tire le courant à travers la diode D

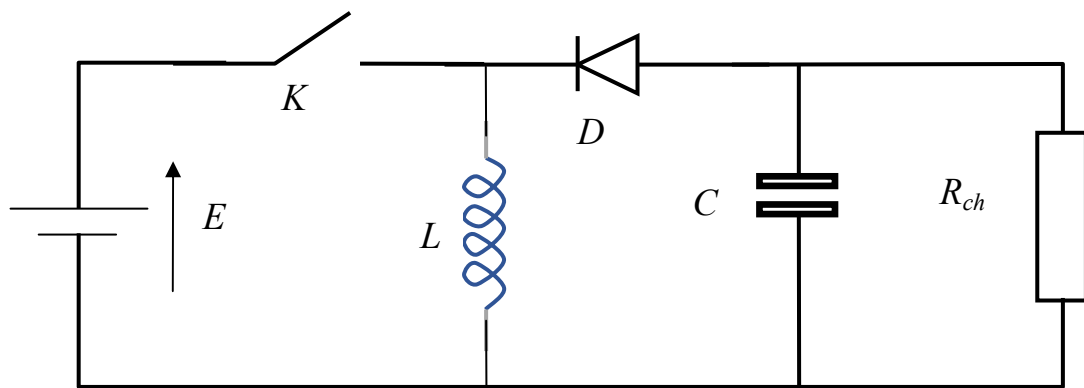


Fig.III.4 : Circuit de base du convertisseur buck-boost

III.4. Commandes MPPT des convertisseurs DC-DC

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}) [40].

Nous pouvons classer d'une manière générale les commandes du MPPT selon le type d'implémentation électronique: analogique, numérique ou mixte. Il est cependant plus intéressant de les classer selon le type de recherche qu'elles effectuent et selon les paramètres d'entrée de la commande du MPPT. Bien qu'il existe un grand nombre de publications scientifiques qui présentent des commandes du MPPT plus ou moins complexes [44]. La **Figure (III.5)** montre le diagramme synoptique d'un système photovoltaïque, avec un module MPPT qui a pour entrées la tension et le courant de sortie du module [44]. Dans la plupart des cas, on fait une maximisation de la puissance fournie par le module solaire.

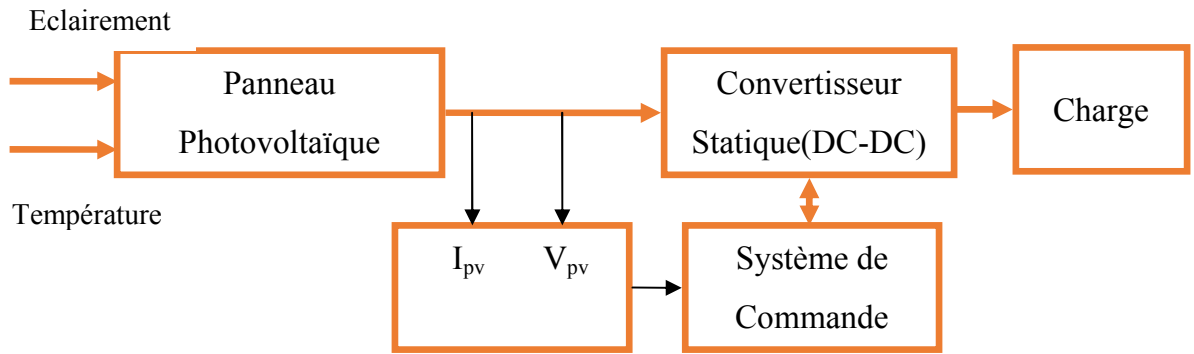


Fig.III.5 : Schéma synoptique d'un système photovoltaïque avec MPPT

Ces méthodes sont basées sur des algorithmes de recherche itérative pour trouver le point de fonctionnement du module solaire pour que la puissance générée soit maximale sans interruption de fonctionnement du système. Elles ne sont pas basées sur des valeurs de références prédéfinies ou à partir des paramètres opérationnels, mais sur la maximisation permanente de la puissance générée par les modules photovoltaïque PV.

La puissance extraite du module est calculée à partir des mesures de courant I et de tension V du module et la multiplication de ces deux grandeurs $P_{pv} = I_{pv} \times V_{pv}$. Ces mesures sont utilisées par diverses méthodes qui poursuivent le MPP réel de la ragée [44]. Pour cette raison, on va présenter et étudier par la suite les algorithmes de commande les plus populaires.

III.5. Les algorithmes du point de puissance maximale

Plusieurs algorithmes ont été proposés pour la réalisation de la commande MPPT :

III.5.1 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) [40]. Ce dernier est décrit en **Figure (3.6)** et peut être implanté entièrement en numérique.

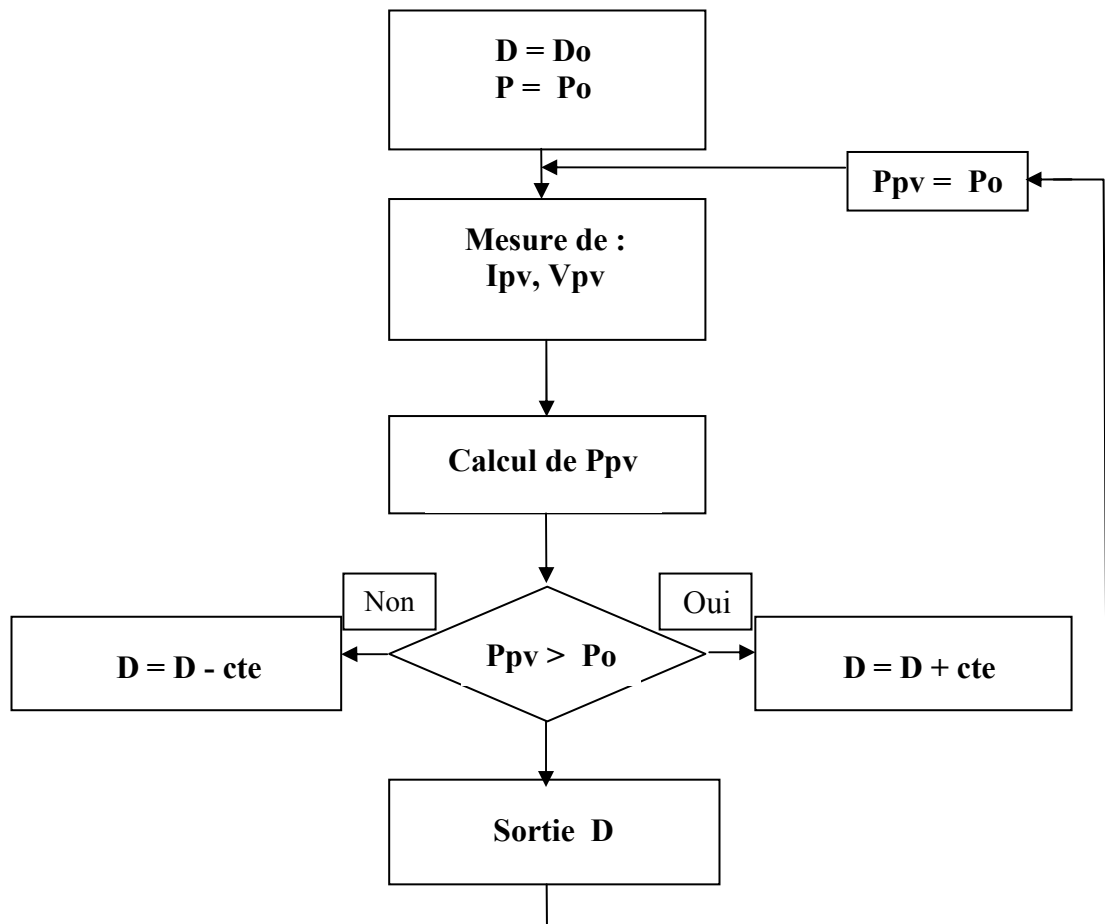


Fig.III.6 : Principe de la première technique MPPT numérique [36]

Il consiste à calculer la puissance à l'instant t à partir des mesures de I_{PV} et V_{PV} , et de la Comparer à celle stockée en mémoire, correspondant à l'instant $t_n - 1$ de là, un nouveau rapport cyclique D est calculé et est appliqué au convertisseur statique. Ce principe est toujours valable du point de vue théorique et appliqué de nos jours sur des algorithmes numériques plus performants.

Cependant, le temps de réaction a été amélioré ainsi que la précision de la recherche du PPM associée à un certain nombre de précautions pour ne pas perdre le PPM même temporairement [45].

III.5.2 Hill Climbing techniques

Les algorithmes P&O et InCond sont tous basés sur le principe de "Hill Climbing " qui consiste à déplacer le point de fonctionnement du générateur photovoltaïque dans la direction où la puissance augmente. Les techniques 'Hill Climbing' sont les méthodes MPPT les plus populaires en raison de leur facilité de mise en œuvre et de leurs bonnes performances lorsque l'irradiation est constante [47]. Les avantages des deux méthodes sont la simplicité et la faible puissance de calcul dont ils ont besoin. Les défauts sont également bien connus: des oscillations autour du MPP et ils peuvent se perdre et suivre le MPP dans la mauvaise direction lors de changements rapides des conditions atmosphériques [46], Ces inconvénients seront expliqués plus tard.

III.5.2.1 Méthode de perturbation et d'observation (P&O)

L'algorithme P&O est également appelé "hill-climbing", mais les deux noms se réfèrent au même algorithme en fonction de la façon dont il est implémenté. hill-climbing implique une perturbation du cycle de fonctionnement du convertisseur de puissance et une perturbation de la tension de fonctionnement du circuit intermédiaire entre le générateur photovoltaïque et le convertisseur de puissance [48]. Dans le cas de hill-climbing, perturber le cycle de fonctionnement du convertisseur de puissance implique de modifier la tension de la liaison CC entre le générateur photovoltaïque et le convertisseur de puissance, de sorte que les deux noms se réfèrent à la même technique.

Dans cette méthode, le signe de la dernière perturbation et le signe du dernier incrément du pouvoir sont utilisés pour décider quelle devrait être la prochaine perturbation. Comme on peut le voir sur la **Figure (III.7)**, à gauche de l'incrément MPP, la tension augmente la puissance alors que sur la droite décrémentant la tension augmente la puissance. [47]

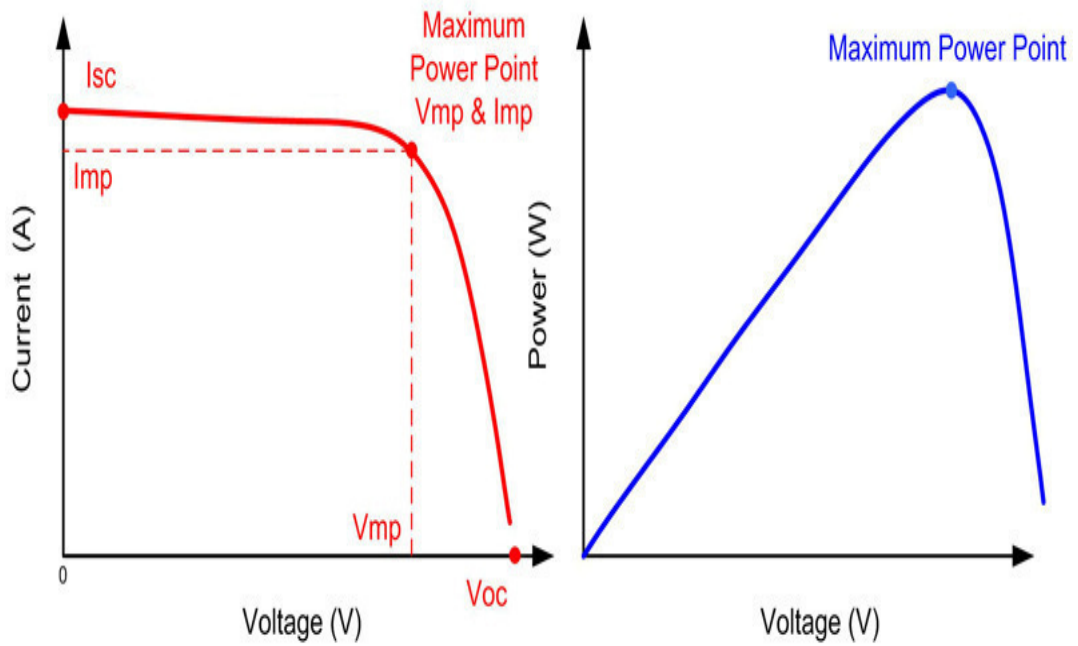


Fig.III.7 : Courbes caractéristiques du panneau PV

S'il y a un accroissement de la puissance, la perturbation doit être maintenue dans la même direction et si la puissance diminue, alors la perturbation suivante devrait être dans la direction opposée. Basé sur ces faits, l'algorithme est implémenté [48]. Le processus est répété jusqu'à ce que le MPP soit atteint. Ensuite, le point de fonctionnement oscille autour du MPP. Ce problème est commun également à la méthode INC, comme mentionné précédemment.

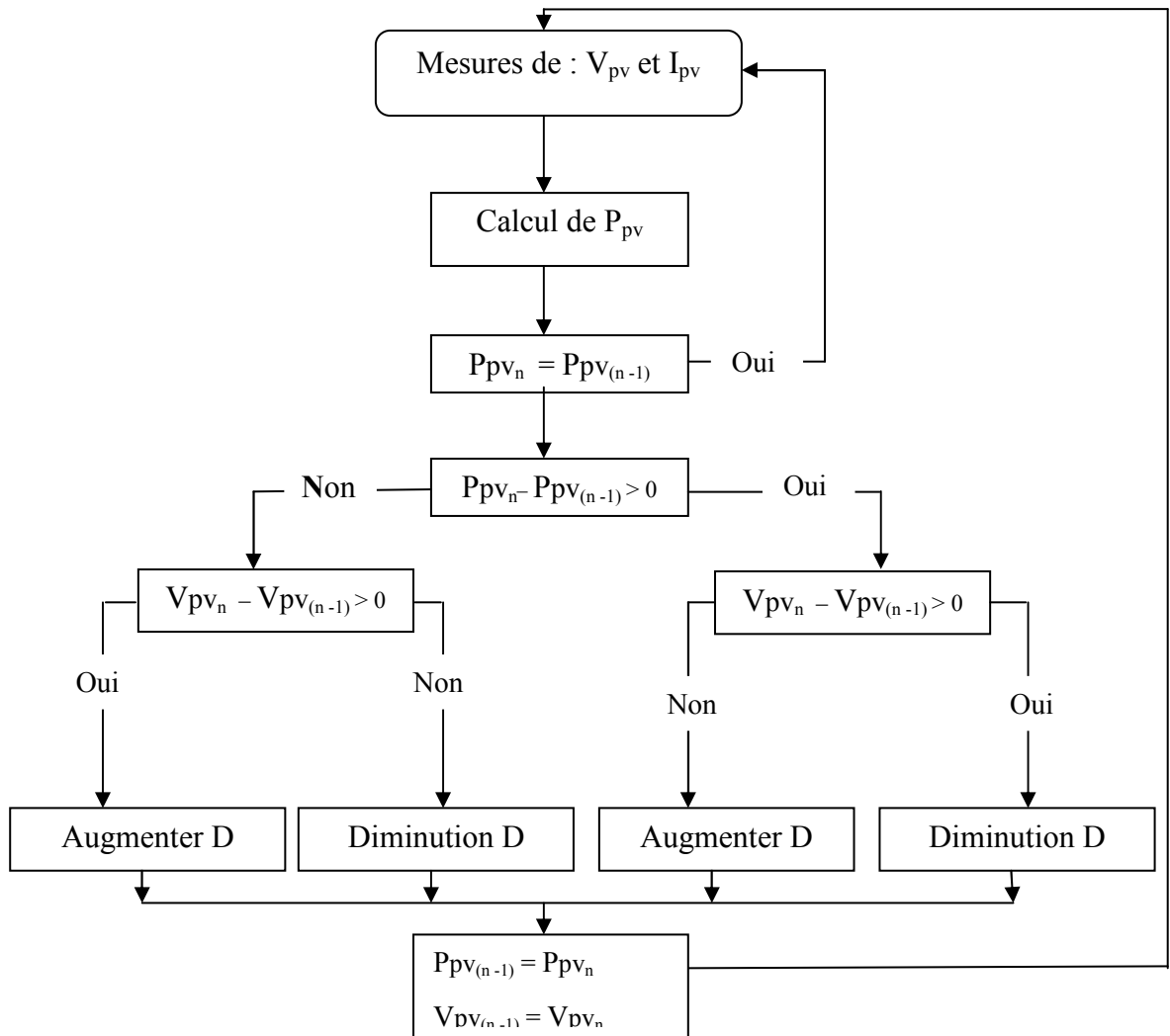


Fig.III.8: Organigramme de la méthode «Perturbation et Observation» [36]

III.5.2.2 Incrémental conductance (INC)

L'algorithme de conductance incrémentale est basé sur le fait que la pente de la courbe puissance vs tension (courant) du module PV est nulle au MPP, positive (négative) à gauche de celle-ci et négative (positive) à droite [47], comme on peut le voir sur la **Figure (3.7)**.

- $\Delta V / \Delta P = 0$ ($\Delta I / \Delta P = 0$) au MPP
- $\Delta V / \Delta P > 0$ ($\Delta I / \Delta P < 0$) sur la gauche
- $\Delta V / \Delta P < 0$ ($\Delta I / \Delta P > 0$) sur la droite

En comparant l'augmentation de la puissance par rapport à l'augmentation de la tension (courant) entre deux échantillons consécutifs, on peut déterminer la variation de la tension MPP. Un schéma de l'algorithme est représenté sur la **Figure (III.9)**.

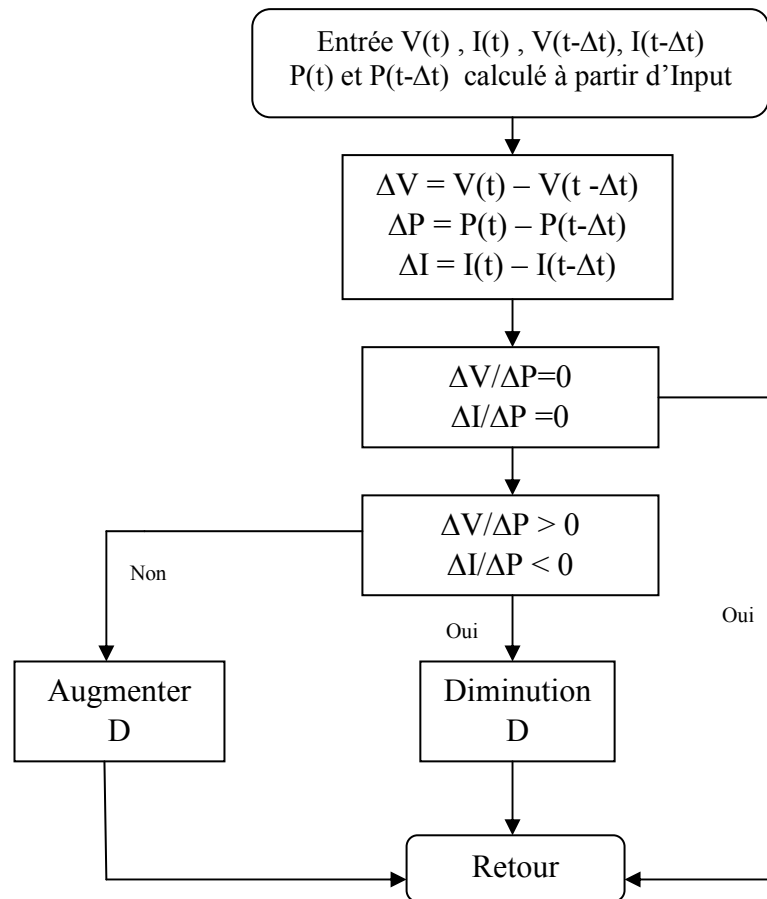


Fig.III.9 : Algorithme de la méthode d'incrément de conductance[36]

Dans les deux systèmes P &O et INC, la vitesse d'atteinte du MPP dépend de la taille de l'incrément de la tension de référence.

III.5.2.3 Les inconvénients P&O et INC

Les inconvénients de ces techniques sont principalement deux. Le premier et le principal est qu'ils peuvent facilement perdre la trace du MPP si l'irradiation change rapidement. En cas de changement d'étape, ils suivent très bien le MPP, car le changement est instantané et la courbe ne change pas. Cependant, quand l'irradiation change suivant une pente, la courbe dans laquelle les algorithmes sont basés change continuellement avec l'irradiation, comme on peut le voir sur la **Figure (III.10)**, donc les changements de tension et de courant ne sont pas seulement dus à la perturbation de la tension. En conséquence, il n'est pas possible pour les algorithmes de déterminer si le changement de puissance est dû à son propre incrément de tension ou à la variation de l'irradiation [49].

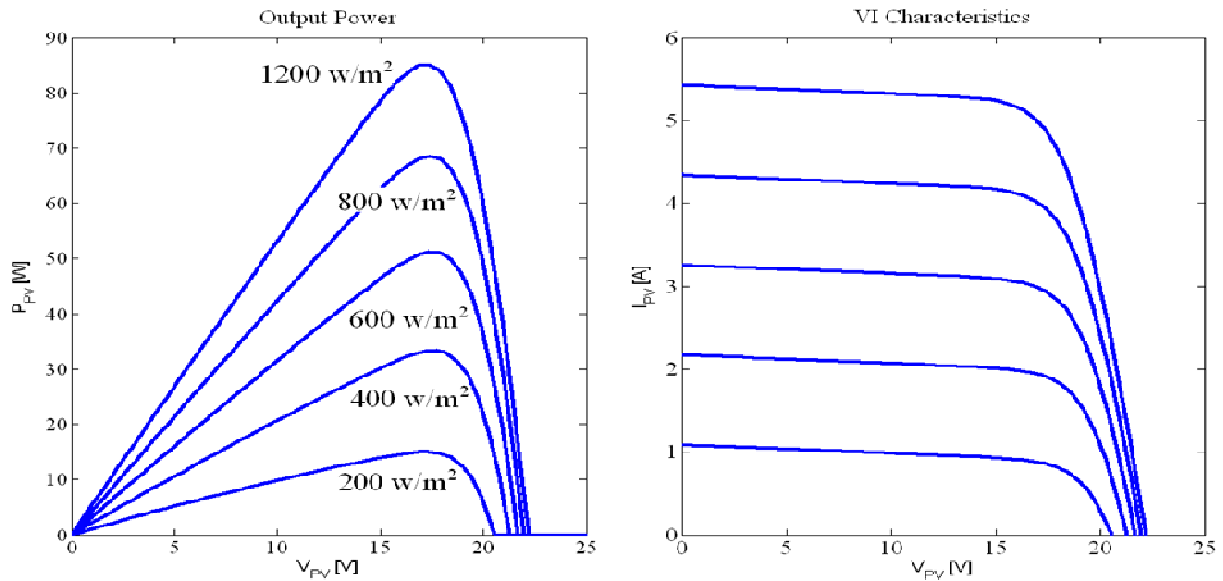


Fig.III.10 : Courbe P(V) et I(V) en fonction de l'irradiation [47]

L'autre inconvénient des deux méthodes est l'oscillation de la tension et du courant autour du MPP à l'état stationnaire. Ceci est dû au fait que le contrôle est discret et que la tension et le courant ne sont pas constamment au MPP mais oscillent autour de celui-ci. La taille des oscillations dépend de la taille du taux de variation de la tension de référence. Plus il est grand, plus l'amplitude des oscillations est élevée. Cependant, la vitesse à laquelle le MPP est atteint dépend également de ce taux de variation et cette dépendance est inversement proportionnelle à la taille des incréments de tension. La solution traditionnelle est un compromis: si l'incrément est faible et que les oscillations diminuent, alors le MPP est atteint lentement et vice versa, donc une solution de compromis doit être trouvée [50].

III.5.2.4 Solutions suggérées aux problèmes

Pour surmonter ces inconvénients, certaines solutions ont été publiées ces dernières années. En ce qui concerne le changement rapide des conditions d'irradiation, Sera et al publie dans [51] et [52] une méthode P & O améliorée, appelée "dP-P & O", dans laquelle une mesure supplémentaire est effectuée sans perturbation de la tension et du courant. De cette manière, tous les trois échantillons consécutifs l'effet de la perturbation dans la tension (courant) et l'effet du changement dans les conditions atmosphériques peuvent être évalués de sorte que l'incrément dans la puissance utilisée dans l'algorithme ne contienne que l'effet l'algorithme MPPT. Ensuite, la décision correcte sur la direction de la prochaine perturbation peut être prise. L'efficacité du suivi est améliorée. Bien que la méthode ait été testée en

utilisant des pentes d'irradiation, elles n'étaient pas celles proposées dans le nouvelle Norme européenne EN 50530 [54]

Une solution différente est suggérée dans [53], qui considère l'algorithme P&O traditionnel, dans lequel l'amplitude de perturbation est constamment ajustée en tenant compte des changements précédents dans la puissance. Il comprend également une étape dans laquelle le dernier incrément de la puissance est comparé à la dernière amplitude de perturbation pour déterminer si l'incrément de puissance était dû à une modification de l'irradiation. Si c'est le cas, la perturbation de tension est réglée dans le même sens que le changement de la condition de puissance.

Dans tous les cas, aucune des solutions examinées auparavant ne résout les problèmes de manière satisfaisante et aucune n'a été testée sous les pentes proposées dans [54] pour tester l'efficacité dynamique des algorithmes MPPT. Ces profils simulent des changements environnementaux rapides tels que les nuages. Il est très important de suivre le MPP dans ces situations pour obtenir la puissance maximale du module PV.

III.5.2.5 Autres “hill climbing” méthodes de suivi MPPT

Il y a trois autres techniques qui peuvent être groupées avec les algorithmes hill climbing: contrôle de corrélation d'ondulation, dP/dV ou dP/dI Contrôle de rétroaction et contrôle de glissière [47]

III.5.3. La logique floue

Les commandes basées sur la logique floue (dans la littérature anglaise Fuzzy Logic Control) sont de plus en plus populaires grâce à l'évolution des microcontrôleurs

L'utilisation du contrôle par logique floue est devenue populaire au cours des dernières années parce qu'elle peut traiter des entrées imprécises, n'a pas besoin d'un modèle mathématique précis et peut gérer la non-linéarité. Les microcontrôleurs ont également contribué à la popularisation du contrôle de la logique floue [48].

En général, la commande logique floue comprend donc trois étapes

- la fuzzification,
- la lecture de la table de vérité
- la defuzzification

Fuzzification comprend le processus de transformation des entrées chiffrées numériques en variables linguistiques en fonction du degré d'appartenance à certains ensembles. Les fonctions d'appartenance, μ , sont utilisées pour associer une note à chaque terme linguistique. Le nombre de fonctions d'appartenance dépend de la précision du contrôleur, mais varie généralement entre 5 et 7 [48].

Dans la **Figure (III.11)**, 7 niveaux flous sont utilisés

- NB (Negative Big)
- NM (Negative Medium)
- NS (Negative Small)
- ZE (Zero)
- PS (Positive Small)
- PM (Positive Medium)
- PB (Positive Big)

Les valeurs a , b et c sont basées sur les valeurs de plage de la variable numérique. Dans certains cas, les fonctions d'appartenance sont choisies moins symétriques ou même optimisées pour l'application pour une meilleure précision [48],

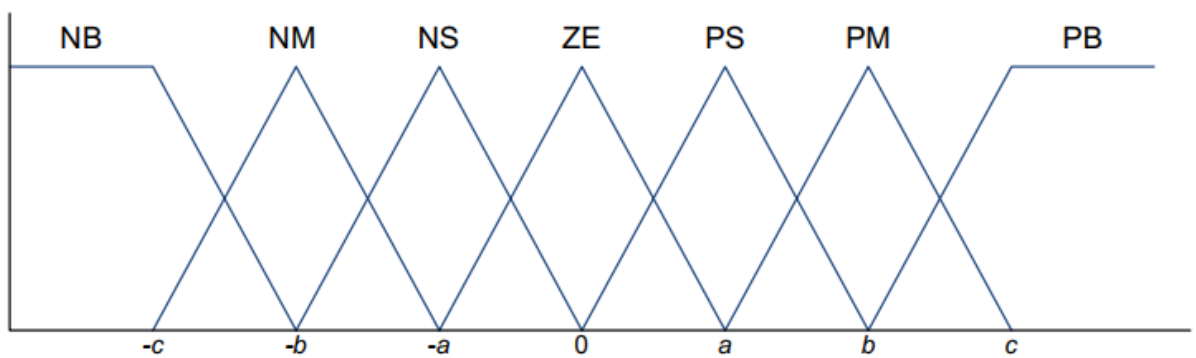


Fig.III.11 : Structure de base de la commande floue [47]

Le principe d'une commande floue se base sur deux variables d'entrées qui sont l'erreur E et le changement d'erreur ΔE et une variable de sortie ΔD (variation du rapport cyclique). Les paramètres d'entrées E et ΔE sont liées aux équations suivantes

$$E = \frac{P(n) - P(n-1)}{V(n) - V(n-1)} \quad (\text{III.1})$$

$$0$$

$$\Delta E = E(n) - E(n-1) \quad (\text{III.2})$$

En fonction de leurs évolutions et d'une table de vérité comme indiquée dans le tableau (III.1), Une valeur est attribuée au paramètre de sortie ΔD .

La variable linguistique assignée à ΔD , dépend des différentes combinaisons entre E et ΔE . Par exemple, si les variables d'entrée (E et ΔE), ont comme valeur PB et ZE correspondant à un point de fonctionnement très éloigné du PPM, d'après la table de vérité la valeur donnée à la variable de sortie ΔD est PB, ce qui implique une forte variation positive du rapport cyclique pour atteindre le PPM [55].

Tableau III-1 : Exemple d'une table de vérité pour une commande logique floue.

E\De	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NB	NB	NM	NS	ZE
NM	NB	NB	NB	NM	NS	ZE	PS
NS	NB	NB	NM	NS	ZE	PS	PM
ZE	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
PS	NM	NS	ZE	PS	PM	PB	PB
PM	NS	ZE	PS	PM	PB	PB	PB
PB	ZE	PS	PM	PB	PB	PB	PB

La dernière étape du contrôle de la logique floue est la defuzzification. Dans cette étape, la sortie est convertie à partir d'une variable linguistique en une variable numérique croquante en utilisant à nouveau les fonctions d'appartenance comme celles de la **Figure (III.11)**. Il existe différentes méthodes pour transformer les variables linguistiques en valeurs nettes. On peut dire que le plus populaire est la méthode du centre de gravité.

Les avantages de ces contrôleurs, outre traiter des entrées imprécises, ne nécessitant pas un modèle mathématique précis et traitant la non-linéarité, sont une convergence rapide et des oscillations minimales autour du MPP [55].

III.5.4. Les réseaux de neurones

La technique de réseaux de neurones est, elle aussi, de plus en plus utilisée, car elle offre une grande alternative pour résoudre des problèmes complexes. Ces dernières années, l'utilisation de cette méthode dans divers domaines d'application ne cesse d'augmenter car elle fonctionne à partir d'une boîte noire qui n'exige pas d'informations détaillées sur le fonctionnement du système. Elle établit des relations entre les variables d'entrée et de sortie

en analysant les précédentes données mémorisées. Un autre avantage est qu'elle peut traiter des problèmes d'une grande complexité grâce à des paramètres interdépendants [55].

Les réseaux de neurones sont composés généralement de trois couches différenciées, nommées :

- Couche d'entrée (Input layer),
- Couche cachée (Hidden layer),
- Couche de sortie (Output layer).

Comme le montre la (Figure.III.12) :

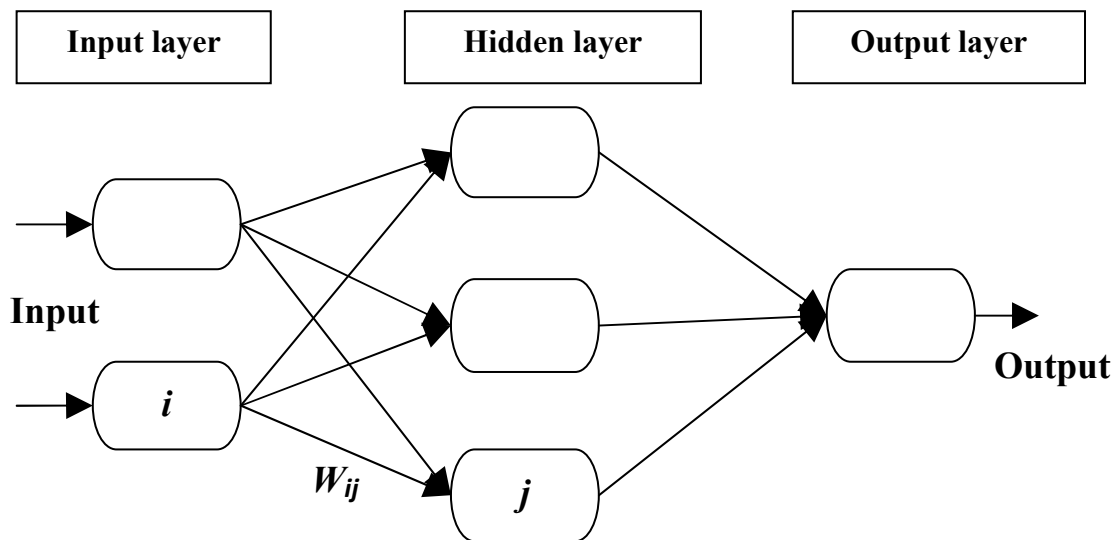


Fig.III.12 : exemple d'un réseau de neurones [47]

Le nombre de nœuds au niveau des différentes couches est variable en fonction du degré D'apprentissage souhaité et de la précision de la commande souhaitée. Pour une commande MPPT, les variables d'entrées peuvent donc être les paramètres caractéristiques d'un GPV (V_{OC}, I_{cc}) associées ou non à des données atmosphériques comme la température. Ou plusieurs signaux de référence comprenant au moins le rapport cyclique permettant de commander le CS pour fonctionner le plus souvent possible au PPM. La qualité de la recherche du PPM dépend essentiellement de l'algorithme utilisé dans la couche cachée et de la construction proprement dite du réseau. Ainsi, L'importance entre deux nœuds de la valeur du poids choisi W_{ij} est à prendre en compte. Pour identifier avec précision les différents PPM. Éventuels, les poids W_{ij} doivent être initialement déterminés avec le plus de soin possible à travers des procédures d'apprentissage laborieuses et spécifiques à chaque GPV, chaque site

D'implantation et chaque type de charge. De plus, cet apprentissage doit être révisé régulièrement (typiquement chaque mois) pour mettre à jour les relations entre les entrées et les sorties du réseau Ce qui rend cette commande fastidieuse en entretien et en maintenance. Bien qu'il existe une grande quantité de ces commandes MPPT dans la littérature, nous ne connaissons pas d'application industrielle les utilisant [56].

III.5.5. Relations de proportionnalité

Le mode de fonctionnement de ces commandes est basé sur des relations de proportionnalité entre les paramètres optimaux caractérisant le point de puissance maximal (V_{opt} et I_{opt}) et les paramètres caractéristiques du module PV (V_{oc} et I_{sc}). Suivant le paramètre contrôlé, on parle alors de commande en régulation de courant ou de tension [55].

III.5.6. Tension de circuit ouvert fractionnaire

Cette méthode utilise la relation approximativement linéaire entre la tension de MPP (V_{MPP}) et la tension de circuit ouvert (V_{OC}), qui varie avec l'irradiance et la température [48]:

$$V_{MPP} \approx K_I V_{OC} \quad (\text{III.3})$$

Où K_I est une constante qui dépend des caractéristiques de la matrice PV et qui doit être déterminée au préalable en déterminant le V_{MPP} et le V_{OC} pour différents niveaux d'irradiation et différentes températures. D'après [48], la constante K_I est comprise entre 0,71 et 0,78.

Une fois que la constante de proportionnalité, K_I , est connue, la tension MPP V_{MPP} peut être déterminée périodiquement en mesurant les V_{OC} . Pour mesurer les V_{OC} , le convertisseur de puissance doit être arrêté momentanément, ce qui entraîne une perte de puissance à chaque mesure. un autre problème de cette méthode est qu'elle est incapable de suivre le MPP sous des pentes d'irradiation, car la détermination du V_{MPP} n'est pas continue. Un autre inconvénient est que le MPP atteint n'est pas le vrai parce que la relation n'est qu'une approximation [47].

Pour pallier ces inconvénients, certaines solutions ont été proposées, comme cela est rapporté dans [48]. Par exemple, des cellules pilotes peuvent être utilisées pour obtenir des V_{OC} . Ce sont des cellules solaires qui représentent les cellules du champ photovoltaïque et qui ne sont pas utilisées pour produire de l'électricité mais pour obtenir des paramètres caractéristiques tels que les V_{OC} sans interférer avec les convertisseurs de puissance. Ces

cellules pilotes doivent être soigneusement choisies et placées pour représenter les caractéristiques du champ PV et les conditions d'irradiation. Un inconvénient de l'utilisation de ces cellules pilotes est que le coût du système est augmenté. Cette technique peut être utilisée car elle est très facile à mettre en œuvre et elle est peu coûteuse - elle ne nécessite pas de contrôle DSP ou microcontrôleur et un seul capteur de tension est utilisé [48].

III.5.7. Courant de court-circuit fractionnel

Tout comme dans la méthode de la tension fractionnée en circuit ouvert, il existe une relation, dans des conditions atmosphériques variables, entre le courant de court-circuit I_{SC} et le courant I_{MPP} comme le montre [47]:

$$I_{MPP} \approx K_2 I_{SC} \quad (\text{III.4})$$

Le coefficient de proportionnalité K_2 doit être déterminé en fonction de chaque PV, comme dans la méthode précédente avec K_1 . D'après [48], la constante K_2 est comprise entre 0,78 et 0,92

La mesure du courant de court-circuit pendant que le système fonctionne est un problème. Il faut généralement ajouter un commutateur supplémentaire au convertisseur de puissance pour court-circuiter périodiquement le générateur photovoltaïque et mesurer I_{SC} . I_{SC} est mesuré en court-circuitant le générateur PV avec un transistor à effet de champ supplémentaire ajouté entre le générateur PV et le condensateur de liaison CC. Une autre option c'est un convertisseur élévateur qui est utilisé et le commutateur du convertisseur est utilisé pour court-circuiter le générateur photovoltaïque. Un court-circuit du générateur photovoltaïque entraîne également une perte de puissance. Un dernier handicap est que le vrai MPP n'est pas atteint parce que la relation proportionnelle est une approximation. De plus, K_2 change si la matrice PV est partiellement ombrée, ce qui se produit en raison des nuances ou de la contamination de surface. Pour surmonter ce problème, propose un réglage en ligne de K_2 et un balayage périodique de la tension PV de circuit ouvert à court circuit pour mettre à jour K_2 et garantir que le vrai MPP est atteint en présence de multiples maxima qui augmente évidemment la complexité du système . La plupart de la littérature utilisant cette technique MPPT utilise un DSP comme contrôleur [47]

III.5.8. Calcul du courant et de la tension du point de puissance maximal

Le calcul I_{MPP} & V_{MPP} est une technique dans laquelle le MPP est calculé sur la base des mesures de l'irradiance et de la température en utilisant un modèle du module PV. Les inconvénients sont les mesures supplémentaires nécessaires, qui sont parfois difficiles à obtenir, et la nécessité d'un modèle précis de la matrice PV. D'autre part, le MPP est correctement suivi même dans des conditions atmosphériques changeantes. Il peut être utilisé dans les grandes usines, où l'investissement économique est énorme et un suivi parfait est nécessaire pour obtenir la puissance maximale disponible à partir des réseaux solaires [48].

III.6. Résultats de la simulation

Nous avons vu dans le deuxième chapitre quatre modèles de cellule PV et comme nous avons dit avant, nous allons appliquer du commande MPPT pour montrerons la différence entre ces modèles.

Dans cette chapitre, nous allons appliquer deux méthodes de MPPT sont :

- algorithme perturber & observer (P&O)
- inductance incrémentale (INC)

La figure montre le Modèle de développement de système PV sous MATLAB/Simulink :

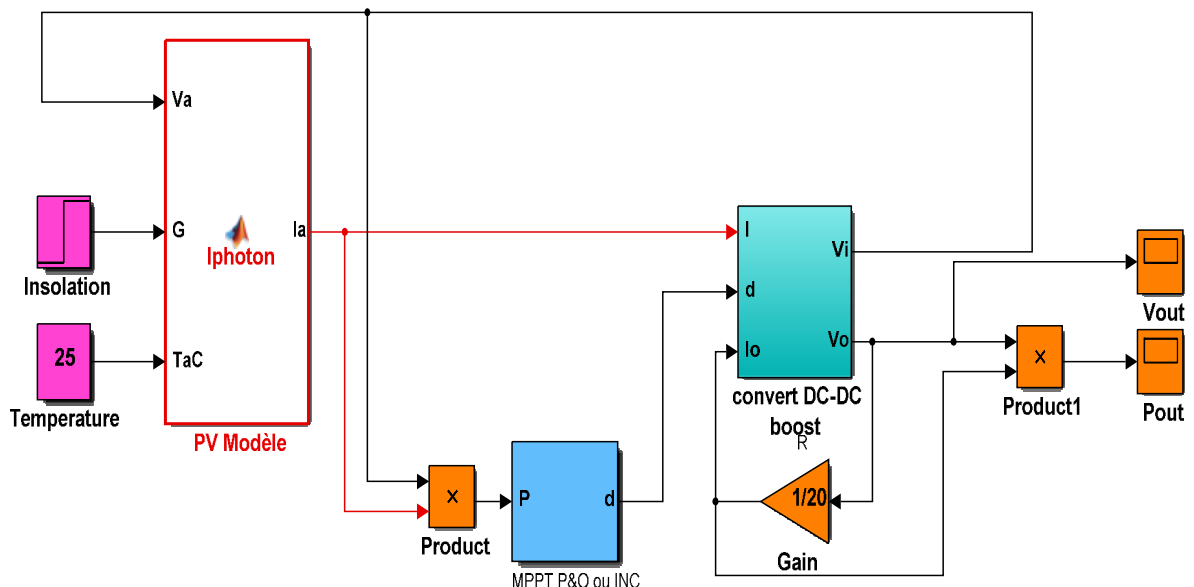


Fig.III.13 : système implémenté sous l'outil Matlab/Simulink

On a varié l'irradiance rapidement de façon illustré dans la **Figure (III.14)** pour tester la robustesse de chaque commande appliqué au chaque modèle où la température est fixée à 25°C:

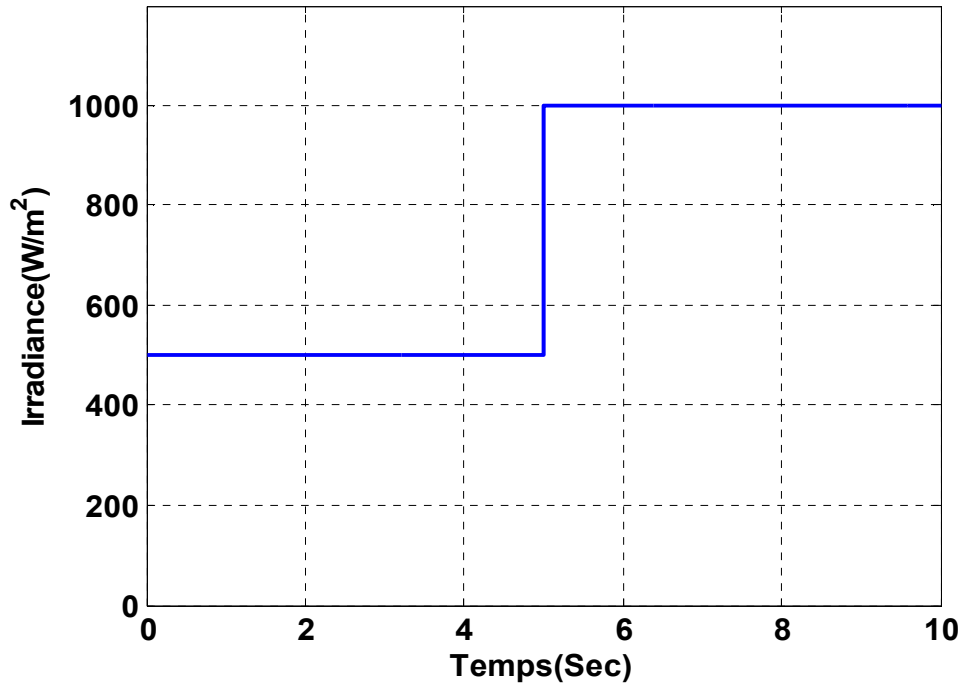


Fig.III.14 : Variation d'irradiance

III.6.1. Perturber & observer (P&O)

Les puissances des quatre modèles en même figure :

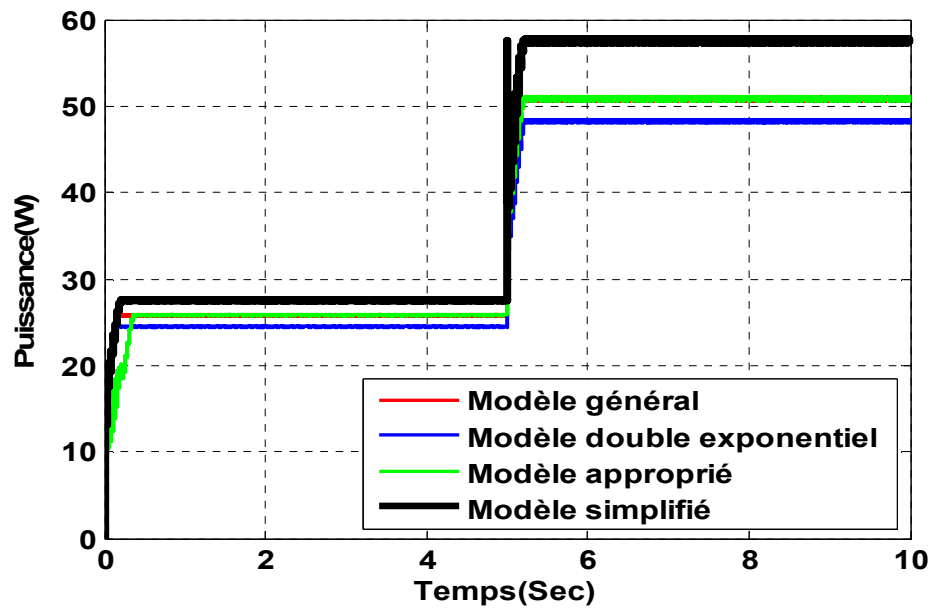


Fig.III.15 : Puissance du système PV quand appliqué P&O

III.6.2. Inductance incrémentale (INC)

Les puissances des quatre modèles en même figure :

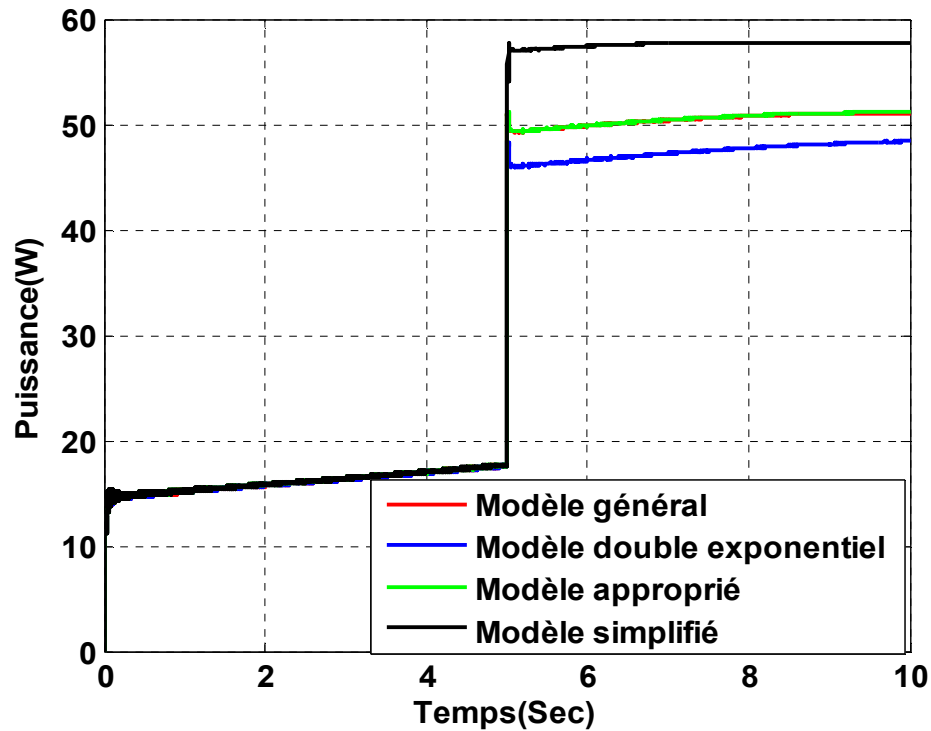


Fig.III.16 : Puissance du système PV quand appliqué INC

L'ensemble des résultats obtenus montre que :

- Les commandes MPPT ont régulé la puissance fournie par le générateur photovoltaïque à sa valeur optimale où restent les meilleurs modèles sont les mêmes présentés dans le chapitre II.
- La technique INC a une rapidité inférieure à la technique P&O mais elle est moins oscillatoire.
- La variation de l'éclairement montre que les deux techniques sont robustes.

III.7. CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons étudié plusieurs types de techniques MPPT, Nous avons analysé dans l'environnement MATLAB/SIMULINK le fonctionnement électrique de quatre

modèles du système PV par l'application des méthodes traditionnelles, adapté par un convertisseur DC-DC.

Les résultats obtenus montrent que l'utilisation de la commande MPPT permet d'améliorer d'une manière considérable le rendement des installations photovoltaïques.

Conclusion Générale

CONCLUSION GENERALE

La demande mondiale en énergie évolue rapidement et les ressources naturelles de l'énergie telles que l'uranium, le gaz et le pétrole diminuent en raison d'une grande diffusion et développement de l'industrie ces dernières années. Pour couvrir les besoins en énergie, des recherches ont out conduit à l'énergie renouvelable. Une des énergies renouvelables qui peut accomplir la demande est l'énergie solaire photovoltaïque, c'est une énergie propre, silencieuse, disponible et gratuite. C'est d'ailleurs ce qui explique que son utilisation connaît une croissance significative dans le monde.

Le travail qu'on a présenté porte sur l'analyse d'une modélisation et simulation du fonctionnement électrique d'un système photovoltaïque (PV) adapté par une commande numérique (commande MPPT) assurant la poursuite de la puissance maximale fournie par le générateur PV. Dans un premier temps, on a donné des généralités sur les systèmes PV, principe de l'effet PV, cellule PV. Ainsi le générateur photovoltaïque et leurs performances.

On a étudié, dans un deuxième temps on a étudié la modélisation du système photovoltaïque. Pour ce la, on a étudié d'abord la modélisation de quatre modèles différents du système solaire. Ces modèles sont utilisés par les chercheurs sur le domaine d'énergies renouvelables, pour savoir qui est le plus proche de la réalité, nous avons pris des mesures réelles « datasheet » d'un système particulier (Dans notre travail, nous avons choisi le module photovoltaïque du type UDT50) et nous conformés la comparaison par l'utilisation l'outil de simulation Matlab/Simulink.

Finalement, on a étudié quelques types convertisseurs DC-DC, utilisés dans les systèmes photovoltaïques. Ainsi, On a présenté les méthodes MPPT basées sur contre réaction de puissance, comme l'algorithme perturbation et observation et l'algorithme d'incrément de l'inductance. Ces méthodes sont utilisées dans ce travail cause de la simplicité, et l'exigence seulement des mesures de tension et du courant du panneau photovoltaïque.

D'après les résultats de la simulation obtenus, on peut dire que :

CONCLUSION GENERALE

- Les performances du générateur se dégradent avec l'augmentation de la température, la diminution de l'intensité de l'éclairement et les variations de la charge. Les performances du générateur PV sont évaluées à partir des conditions standards (CST) : éclairement $1000W/m^2$
- Le convertisseur fournit dans les conditions optimales une tension à sa sortie supérieure à celle fournie par le générateur PV. La commande MPPT adapte le générateur PV à la charge : transfert de la puissance maximale fournie par le générateur PV
- Comme nous l'avons dit l'utilisation de la commande MPPT permet d'améliorer d'une manière considérable le rendement des installations photovoltaïques.

Comme perspective nous proposons de développer notre système pour des puissances assai élevée par le développement des méthodes traditionnelles. Ainsi, l'utilisation des techniques d'intelligence artificielle comme la logique floue, les réseaux de neurones artificiels et les réseaux neuro-floue.

Bibliographie

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Ovik Raihan "DESIGN AND SIMULATION OF A SOLAR PV SYSTEM FOR BRAC UNIVERSITY" BRAC University Bangladesh (2010).
- [2] Abdelmalek, Bouden. "Analyse optimisée de système de pompage photovoltaïque" Université Mentouri Constantine(2008).
- [3] Schill Schiller, Jimmy Royer Thomas Djiako Eric, and Bocar Sada Sy. "Le pompage photovoltaïque: Manuel de cours à l'intention des ingénieurs et des techniciens" IEPF/Université d'Ottawa/EIER/CREPA (1998).
- [4] Belhadj, M. "Modélisation d'un Système de captage photovoltaïque Autonome" Mémoire de Magister option: Microélectronique-Photovoltaïque, Centre Universitaire de Béchar (2008): 43-50.
- [5] MECHALIKH HAMADA, Med Nadjib-Charaf Eddine. "Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque en fonctionnement autonome et connecté au réseau" Mémoire de Master Université Kasdi Merbah–Ouargla(2013).
- [6] Helali Kamelia. "Modélisation d'une cellule photovoltaïque: Etude comparative" Université Mouloud Mammeri (2012).
- [7] Louazane M "Etude technico-économique d'un système de pompage photovoltaïque sur le site de Ouargla" Mémoire de Magister Université El Hadj Lakhdar-Batna (2008).
- [8] Chekired, F "Etude et implémentation d'une commande MPPT neuro-floue sur FPGA" mémoire de magister Ecole Nationale Polytechnique - Alger (2008).
- [9] Djoudi Gherbi, "Dimensionnement de systèmes de pompage photovoltaïque", Mémoire de magister, Université de Blida, (2003).
- [10] Gacem, F "Simulation des systèmes de pompage photovoltaïque destinés pour l'alimentation en eau potable" Mémoire de magister Université de Blida (2008).
- [11] Observ ER "Baromètre du solaire photovoltaïque. Systèmes solaires", N°160, pp. 69 (2004).
- [12] N. Oleksiy, "Simulation, fabrication et analyse de cellules photovoltaïques à contacts arrières interdigités" Thèse de doctorat, INSA, Lyon, (2005).
- [13] Alain Bilbao Ibarreta "Réalisation de commandes MPPT Numériques" Rapport de stage Projet Fin d'Etudes Universtat Rovira Virgili (2006).
- [14] Bendjamaa, I "Modélisation et commande d'un système de stockage photovoltaïque" Mémoire de Magister Université Abou-BakerBlkaid-Tlemcen (2012).

BIBLIOGRAPHIE

- [15] Bouden Abdelmalek "Analyse optimisee de systeme de pompage photovoltaïque"
Memoire de Magister Universite Mentouri de Constantine (2008).
- [16] Anne Laburet, Michel Viloz "énergie solaire photovoltaïque 3e édition dunod paris"
(2006).
- [17] www.solarelectripower.org.
- [18] O.BENSEDDIK, F.DJALOU "Etude et optimisation du fonctionnement d'un système photovoltaïque" Mémoire de Master Université Kasdi Merbah-Ouargla (2012).
- [19] B. Flèche, D. Delagnes "Production d'énergie électrique :Energie solaire photovoltaïque"
Fichier En ligne
www.vincent.boitier.free.fr/L1/TD/Energie_solaire_photovoltaique.pdf (2017).
- [20] Angrist S "Direct Energy Conversion, Allyn and Bacon, Inc., 4th edition" (1989) , pp.
177-227.
- [21] Wasynczuk, O "Dynamic behavior of a class of photovoltaic power systems" IEEE
Transactions on Power Apparatus and Systems, vol.PAS-102, no. 9, (1983), pp. 3031-
3037.
- [22] J. C. H. Phang, D. S. H. Chan, and J. R. Philips "Accurate analytical method for the
extraction of solar cell model parameters" Electronics Letters (1984) pp.406-408
- [23] C. C. Hua and C. M. Shen, "Study of maximum power tracking techniques and control of
dc-dc converters for photovoltaic power system" Proceedings of 29th annual IEEE
Power Electronics Specialists Conference (1998) pp. 86-93.
- [24] Olivier GERGAUD "Modélisation énergétique et optimisation économique d'un système
de production éolien et photovoltaïque couplé au réseau et associé à un
accumulateur" Thèse de Doctorat de l'école Normale Supérieure de Cachan (2002).
- [25] Fry Bryan. "Simulation of Grid-Tied Building Integrated Photovoltaic Systems" Master
Thesis Mechanical Engineering Wisconsin-Madison (1998).
- [26] Rodrigues, E "Simulation of a solar cell considering single-diode equivalent circuit
model" in Proc International Conference on Renewable Energies and Power Quality
(2011).
- [27] Azzouzi M, D. Popescu, and M. Bouchahdane "Modeling of Electrical Characteristics of
Photovoltaic Cell Considering Single-Diode Model" in Journal of Clean Energy
Technologies November (2016).

BIBLIOGRAPHIE

- [28] Notton, G "Influence d'un ombrage partiel sur la production électrique d'un module photovoltaïque en silicium monocristallin" Revue des Energies Renouvelables (2010) pp 49-62.
- [29] Veerachary, M et K. Uezato "Voltage-based maximum power point tracking control of PV system" IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems (2002) pp. 262-270 .
- [30] Kim, M. et Youn, M "New maximum power point tracker using sliding-mode observer for estimation of solar array current in the grid-connected photovoltaic system" IEEE Transaction on Industrial Electronics (2006) pp. 1027-1035.
- [31] Huan-Liang Tsai, Ci-Siang Tu, et Yi-Jie Su "Development of Generalized Photovoltaic Model Using MATLAB/SIMULINK" in Proceedings of the World Congress on Engineering and Computer Science San Francisco, USA (2008).
- [32] <https://www.emse.fr/>.
- [33] Bouden Abdelmalek "Analyse optimisée de système de pompage photovoltaïque" Université Mentouri Constantine (2008).
- [34] Aboub Hania "Commande d'un onduleur neuf niveaux, destiné aux fortes puissances PV" MEMOIRE MAGISTER EN ELECTROTECHNIQUE Université Hadj Lakhdar – Batna (2008).
- [35] <https://www.dmme.virginia.gov/>.
- [36] Missoum Mohammed "Contribution de l'énergie photovoltaïque dans la performance énergétique de l'habitat à haute qualité énergétique en Algérie" MEMOIRE Magistère en génie mécanique UNIVERSITE HASSIBA BENBOUALI DE CHLEF (2011).
- [37] Andrej Čota "PHOTOVOLTAIC SYSTEMS Mise en service: IRENA" Agence régionale de l'énergie d'Istrie REA Kvarner Rijeka (2012).
- [38] Touil Nacer Eddine, Ghenbazi Slimane "Modélisation et Simulation d'un Système Photovoltaïque" Mémoire MASTER ACADEMIQUE en Réseaux Électriques Université Echahid Hama Lakhder d'El-Oued (2015).
- [39] KESSAÏSSIA Fatma Zohra "Caractérisation de Module photovoltaïques de différents technologies" Université Hassiba Benbouali de Chlef (2013).
- [40] HANANOU FATIHA et ROUABAH AICHA "Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque" Mémoire de MASTER En Electrotechnique industrielle UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA (2014).

BIBLIOGRAPHIE

- [41] Maher, CH "Gestion Energétique des Panneaux photovoltaïque" Mémoire Master Université Sfax (2008).
- [42] Geoffrey R. Walker, Paul C. Sernia "Cascaded DC–DC Converter Connection of Photovoltaic Modules" IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 19, N° 4, (2004).
- [43] Ying-Tung Hsiao, China-Hong Chen "Maximum Power Tracking for Photovoltaic Power System" 37th IAS Annual Meeting (2002) p1035 – 1040.
- [44] BENSACI Wafa "Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque adapté par une commande MPPT" Master en Génie électrique Université Kasdi Merbah–Ouargla (2012).
- [45] Cédric, C "optimisation énergétique de l'étage d'adaptation électronique dédiée à la conversion photovoltaïque" Thèse de doctorat université de Toulouse (2008).
- [46] Tat Luat Nguyen, Kay-Soon Low "A Global Maximum Power Point Tracking Scheme Employing DIRECT Search Algorithm for Photovoltaic Systems" IEEE Transactions on Industrial Electronics (2010) pp. 3456-3467.
- [47] David Sanz Morales "Maximum Power Point Tracking Algorithms for Photovoltaic Applications" Espoo (2010).
- [48] T. Eram, P.L. Chapman, "Comparison of Photovoltaic Array Maximum Power Point Tracking Techniques" IEEE Transactions on Energy Conversion (2007) pp. 439- 449.
- [49] N. Femia, G. Petrone, G. Spagnuolo, M. Vitelli, "Optimizing sampling rate of P&O MPPT technique" in Proc IEEE PESC (2004).
- [50] C. Zhang, D. Zhao, J. Wang, G. Chen, "A modified MPPT method with variable perturbation step for photovoltaic system" in Power Electronics and Motion Control Conference (2009) pp. 2096-2099 .
- [51] D. Sera, T. Kerekes, R. Teodorescu, F. Blaabjerg, "Improved MPPT Algorithms for Rapidly Changing Environmental Conditions" in Proc. 12th International Conference on Power Electronics and Motion Control (2006) pp. 1614-1619.
- [52] D. Sera, T. Kerekes, R. Teodorescu, F. Blaabjerg, "Improved MPPT method for rapidly changing environmental conditions" in Proc. IEEE International Symposium on Industrial Electronics (2006) pp. 1420-1425.
- [53] W. Xiao, W. G. Dunford, "A modified adaptive hill climbing MPPT method for photovoltaic power systems" in Proc. IEEE PESC (2004) pp. 1957-1963.
- [54] Overall efficiency of grid connected photovoltaic inverters, European Standard EN 50530 (2010).

BIBLIOGRAPHIE

- [55] Lahlah salah "Etude comparative des techniques MPPT Perturbation and Observation (P&O), Incremental Conductance (Inc.CoN) et Hill climbing (H.C)" MAGISTER EN ELECTROTECHNIQUE Université de Batna Promotion (2007).
- [56] Cédric, C "optimisation énergétique de l'étage d'adaptation électronique dédiée à la conversion photovoltaïque" Thèse de doctorat université de Toulouse (2008).
- [57] Bechouat Mohcene "Commandes non linéaires des systèmes photovoltaïques" Thèse de doctorat UNIVERSITE 8 MAI 1945 GUELMA (2017) .
- [58] K. Agroui "Etude du Comportement Thermique de Modules Photovoltaïques de Technologie Monoverre et Biverre au Silicium Cristallin" Unité de Développement de la Technologie du Silicium, B.P. 399, 2 Bd Dr Frantz Fanon, Alger . (1999) 7-11