



**DEPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE**

**MEMOIRE**

**DE FIN D'ETUDES POUR L'OBTENTION DU DIPLOME DE MASTER EN**

**ELECTROTECHNIQUE INDUSTRIELLE**

**THEME**

**Commande et gestion d'énergie d'un système  
photovoltaïque avec stockage**

**Présenté par le binôme :**

- SEKIOU Sameh
- BOUAZIZ Hadia

**Devant le jury :**

- |                    |    |                  |
|--------------------|----|------------------|
| - Djari Abdelhamid | Dr | <b>Président</b> |
| - Youcef Soufi     | Pr | <b>Encadreur</b> |
| - Abla Bouguerne   | Dr | <b>Examineur</b> |

**Année universitaire 2023/ 2024**

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

# Remerciements

*Tout d'abord nous tenons à remercier Allah le tout puissant pour la volonté, la santé et la patience qu'il nous a donnée durant toutes ces années d'étude.*

*Nous tenons à remercier infiniment notre encadreur, Pr. Youssef SOUFI pour son aide, sans réserve, sa patience et ses conseils précieux qui m'ont été très utiles.*

*Nous remercierons également les membres du jury Dr. DJARI Abdelhamid, et Dr. BOUGERNE Abba qui nous honoré et accepter de présider et d'examiner et enrichir notre mémoire de master fin d'études.*

*Ces remerciements vont aussi à toute notre famille, et tous nos amis pour leur aide et leur soutien.*

*Nous tenons à remercier également tous nos enseignants.*

*Sameh SEKIOU  
Hadia BOUAZIZ*

# *Dédicace*

*Tout d'abord, je tiens à remercier Allah De m'avoir donné la force et le courage de mener à bien ce modeste travail.*

*Je tiens à dédier cet humble travail à :*

*A ma chère et adorable mère "El-Cheikha" en témoignage de ma grande affection.*

*A ma sœur : "Sihem ", pour leur soutien morale.*

*A tous les membres de ma famille.*

*A tous mes amis surtout : Manel, Amira.*

*A mon amie est aussi binôme « Hadia »*

*A mon fiancé «Mohamed»*

*Mes camarades de la promotion 2023-2024*

*A tous les personnes que j'aime.*

*Sameh SEKIOU*

# Dédicace

*Après un remerciement sincère à Allah.*

*De profond de mon cœur, je dédie ce travail à tous ceux qui me sont chers.*

*A Ma chère et adorable père "Brahim " en témoignage de ma grande affection.*

*A Ma chère et adorable mère "Hemama " en témoignage de ma grande affection.*

*A Mes sœurs : Mebarqa, Ouarda et Maia pour leurs soutiens morales.*

*A Mes frères : Abdelkader, Hakim, Hichem et Azzeddine.*

*A Mes neveux et sœurs : Bassim Abdellah, Assil et Oussaid.*

*A Tous les membres de ma famille.*

*A Tous mes amis.*

*A Mon amis est binôme « Sameh ».*

*A Mes camarades de la promotion 2023-2024.*

*A Toutes les personnes que j'aime.*

*Hadia BOUAZIZ*

## ملخص

يشهد حاليا مجال أنظمة الطاقة الشمسية الكهروضوئية تطورا كبيرا من حيث التقدم التكنولوجي الجديد، وخاصة فيما يتعلق بدمج واستغلال التقنيات الحديثة المبتكرة في أنظمة تحويل الطاقة الكهربائية. يتطرق هذا العمل الى دراسة نمذجة، مراقبة وإدارة واحد من أهم مصادر الطاقات المتجددة وهو النظام الكهروضوئي المخصص لإنتاج الطاقة الكهربائية مع تخزين الطاقة ويهدف أيضا الى دمج وتطوير أنظمة التحكم والمراقبة لتحسين الأداء الاسمي لوضع التشغيل الأمثل من جهة و تحسين أداء النظام الكهروضوئي المدروس من خلال استخدام تقنيات التعظيم التقليدية والمتقدمة ومن جهة أخرى مع استخدام تقنية التحسين المتقدمة، سرب الجسيمات ( Particle Swarm Optimization: PSO) لاستخراج أقصى قدر من الطاقة و تحسين أدائها لمزيد من الموثوقية في ظل الظروف الجوية المتغيرة.

## Résumé

Actuellement, le domaine des systèmes solaires photovoltaïques connaît une évolution significative en matière de nouveaux progrès technologiques, notamment en ce qui concerne l'intégration et l'exploitation de technologies innovantes dans les systèmes de conversion de l'énergie électrique.

Ce travail présente l'étude, la modélisation, la commande et la gestion d'un système photovoltaïque destiné à la production de l'énergie électrique avec stockage de l'énergie dont l'objectif global est de développer des structures de commande et d'optimisation permettant d'améliorer les performances nominales pour un mode de fonctionnement optimal. Il traite d'une part l'amélioration des performances du système photovoltaïque considéré en utilisant les techniques de maximisation conventionnelle et avancées et d'autre part l'utilisation de la technique d'optimisation avancée, l'essaim de particules (Particle Swarm Optimization: PSO) pour l'extraction de la puissance maximale et améliorer son rendement pour plus de fiabilité en présence de conditions météorologiques variable.

## Abstract

Currently, the field of solar photovoltaic systems is experiencing a significant evolution in terms of new technological advancements, particularly with regard to the integration and exploitation of innovative technologies in electrical energy conversion systems.

This work presents the study, modelling, control and management of a photovoltaic system intended for the production of electrical energy with energy storage where the overall objective is to develop control and optimization structures to improve the performance for optimal operating mode. Firstly, it deals with improving the performance of the considered photovoltaic system using conventional and advanced maximization techniques and then the introduction of the advanced optimization technique particle swarm optimization (PSO) for extracting maximum power and improving its performance for higher reliability under variable weather conditions.

# *SOMMAIRE*

## Sommaire

Remerciements	i
Dédicace	ii
Résumé	iii
Notations et abréviations	iv
Liste des figures	ix
Liste des Tableaux	x
Introduction générale	1

## Chapitre 1

<b>I</b>	<b>Généralités sur les Générateurs photovoltaïques</b>	<b>6</b>
	<b>I.1</b> Introduction	7
	<b>I.2</b> Les systèmes photovoltaïques	7
	<b>I.3</b> Les principaux composants d'un système photovoltaïque	8
	<b>I.4</b> L'effet photovoltaïque	8
	<b>I.5</b> Principe de la conversion photoélectrique	9
	<b>I.6</b> Production d'électricité d'origine renouvelable dans le monde	10
	<b>I.7</b> Production d'électricité d'origine renouvelable en Algérie	11
	<b>I.8</b> Architecture des systèmes photovoltaïques	11
	<b>I.8.1</b> Système autonome	12
	<b>I.8.2</b> Systèmes hybrides	12
	<b>I.8.3</b> Systèmes PV raccordée au réseau	13
	<b>I.9</b> La cellule photovoltaïque	13
	<b>I.10</b> Différents types des cellules photovoltaïques	14
	<b>I.10.1</b> La cellule photovoltaïque en silicium monocristallin	14
	<b>I.10.2</b> La cellule photovoltaïque en silicium Poly cristallin	14
	<b>I.10.3</b> La cellule au silicium Amorphe	15
	<b>I.11</b> Modélisation du Générateurs photovoltaïque	15
	<b>I.11.1</b> Modélisation d'une cellule solaire idéale	15
	<b>I.11.2</b> Le schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque	16
	<b>I.12</b> Paramètres d'une cellule photovoltaïque	18
	<b>I.12.1</b> Tension à circuit ouvert	18
	<b>I.12.2</b> Courant de court-circuit	18

<b>I.12.3</b>	Rendement énergétique	18
<b>I.12.4</b>	Facteur de forme	18
<b>I.12.5</b>	Paramètres du module utilisé	19
<b>I.13</b>	Équations du module PV	20
<b>I.14</b>	Générateur photovoltaïque et ses performances	20
<b>I.14.1</b>	Constitution d'un générateur photovoltaïque	20
<b>I.15</b>	Protection d'un générateur photovoltaïque	22
<b>I.15.1</b>	Protection d'un PV contre les chocs électriques	22
<b>I.15.1.1</b>	Protection contre les contacts directs	22
<b>I.15.1.2</b>	Protection contre les contacts indirects	23
<b>I.15.2</b>	Protection d'un générateur photovoltaïque contre les surtensions	23
<b>I.15.3</b>	Protection du PV contre les surintensités	23
<b>I.15.3.1</b>	Ombre d'un générateur	23
<b>I.15.4</b>	Nécessité de protection contre les courants inverses	25
<b>I.15.4.1</b>	Diode de by-pass	25
<b>I.15.4.2</b>	Diode anti-retour	26
<b>I.16</b>	Validation du modèle considéré	26
<b>I.16.1</b>	Influence de l'éclairement sur les courbes $I=f(V)$ et $P=f(V)$	27
<b>I.17</b>	Les avantages et les inconvénients l'énergie solaire photovoltaïque	29
<b>I.17.1</b>	Les avantages de l'énergie solaire photovoltaïque	29
<b>I.17.2</b>	Inconvénients de l'énergie solaire photovoltaïque	30
<b>I.18</b>	Conclusion	30

## Chapitre 2

<b>II</b>	<b>Modélisation du convertisseur DC/DC</b>	31
<b>II.1</b>	Introduction	33
<b>II.2</b>	Connexion directe source-charge	33
<b>II.3</b>	Etage d'adaptation entre un Générateur PV et une charge	35
<b>II.4</b>	Convertisseurs DC/DC	36
<b>II.5</b>	Hacheur dévolteur (Buck)	37
<b>II.6</b>	Hacheur Buck-Boost	38
<b>II.7</b>	Hacheur survolteur (Boost)	40

<b>II.7.1</b>	Principe de fonctionnement	40
<b>II.7.2</b>	Modèle mathématique équivalent	41
<b>II.7.3</b>	Dimensionnement des composants du convertisseur	43
<b>II.8</b>	Mécanisme d'adaptation de l'impédance	43
<b>II.9</b>	Limitation de la commande MPPT	45
<b>II.10</b>	Conclusion	45

### **Chapitre 3**

<b>III</b>	<b>Techniques de recherche du point de puissance maximale MPPT d'un GPV</b>	46
<b>III.1</b>	Introduction	47
<b>III.2</b>	Point de puissance maximale (MPP)	47
<b>III.3</b>	Recherche de point de puissance maximum (MPPT)	48
<b>III.4</b>	Commandes MPPT des convertisseurs DC-DC	50
<b>III.5</b>	Critères d'évaluation d'une commande MPPT	51
<b>III.6</b>	Classification des Commandes MPPT	51
<b>III.6.1</b>	Commandes MPPT basées sur des relations de proportionnalité.	51
<b>III.6.1.1</b>	Algorithme à base de la mesure d'une fraction de la tension	52
<b>III.6.1.2</b>	La méthode de la tension de circuit ouvert du générateur	53
<b>III.6.1.3</b>	Algorithme à base de la fraction du courant ICC	53
<b>III.6.2</b>	MPPT direct	55
<b>III.6.2.1</b>	Algorithme perturbation et observation (P&O)	55
<b>III.6.2.2</b>	Algorithme de l'Incrémentation de la Conductance (IncCond)	57
<b>III.6.2.3</b>	Algorithme Hill Climbing	60
<b>III.6.2.4</b>	Algorithme de la logique floue (FLC)	62
<b>III.6.2.5</b>	Optimisation d'essaim de particules (PSO)	65
<b>III.6.2.6</b>	Application de l'algorithme PSO pour la recherche du MPPT	68
<b>III.7</b>	Conclusion	69

## Chapitre 4

<b>IV Simulation des commandes MPPT pour une charge résistive « R »</b>	70
<b>IV.1</b> Introduction	71
<b>IV.2</b> Modèle Simulink du système de conversion photovoltaïque considéré	71
<b>IV.3</b> Structure des panneaux photovoltaïques utilisés	71
<b>IV.4</b> Interprétations des résultats	84
<b>IV.5</b> Stockage d'énergie électrique	85
<b>IV.6</b> Les modes de stockage d'énergie électrique	86
<b>IV.6.1</b> Stockage sous forme chimique	86
<b>IV.7</b> Type d'accumulateurs existants	86
<b>IV.8</b> Le modèle électrique équivalent d'une batterie	86
<b>IV.8.1</b> Modèle idéal de la batterie	86
<b>IV.8.2</b> Modèle simple de la batterie	87
<b>IV.9</b> La pile à combustible	88
<b>IV.10</b> Stockage sous forme électrostatique	88
<b>IV.11</b> Gestion d'énergie dans un système isolé	89
<b>IV.12</b> Modes de fonctionnement du système	89
<b>IV.13</b> Conclusion	91
Conclusion générale	92
Annexes	96
Bibliographie	103

		<b>Notations et Abréviations</b>
<b>PV</b>	:	Panneaux photovoltaïque
<b>DC</b>	:	Courant continue
<b>AC</b>	:	Courant alternatif
<b>E</b>	:	L'éclairément
<b>T</b>	:	La température
<b>GPV</b>	:	Générateur photovoltaïque
<b>CS</b>	:	Convertisseur statique
<b>convertisseurs DC-DC</b>	:	Hacheur
$\alpha$	:	Rapport cyclique
<b>PPM</b>	:	Point de puissance maximale
<b>MPPT</b>	:	Maximum Power Point TracKing
<b>P&amp;O</b>	:	perturbation et observation
<b>IncCond</b>	:	Incrémentation de la Conductance
<b>HC</b>	:	Hill Climbing
<b>FLC</b>	:	Technique de la logique floue
<b>FL</b>	:	logique floue
<b>PSO</b>	:	Optimisation par essais particuliers.
<b>OEP</b>	:	optimisation des essais de particules
<b>EDLC</b>	:	condensateurs à double couche électrochimique
<b>SOC</b>	:	l'état de charge des accumulateurs

## Liste des figures

Figure	Titre	Page
<b>Chapitre 1</b>		
Figure. I.1	: Conversion de l'énergie solaire en énergie électrique	8
Figure. I.2	: Principe de la conversion photoélectrique	10
Figure. I.3	: Production d'électricité d'origine renouvelable dans le monde	10
Figure. I.4	: Programme des énergies renouvelables d'ici 2030	11
Figure. I.5	: Système PV autonome	12
Figure. I.6	: Système PV hybride	12
Figure. I.7	: Système PV raccordée au réseau électrique	13
Figure. I.8	: Structure basique cellule photovoltaïque	13
Figure. I.9	: Cellules monocristallines	14
Figure. I.10	: Cellules Poly cristallines	14
Figure. I.11	: Cellule Photovoltaïque amorphe	15
Figure. I.12	: Circuit équivalent d'une cellule PV (modèle idéal)	15
Figure. I.13	: Circuit électrique équivalent d'une cellule solaire	16
Figure. I.14	: Schéma électrique équivalent d'un module photovoltaïque	20
Figure. I.15	: Panneau PV constitué par M cellules séries et N colonnes parallèles	21
Figure. I.16	: Groupement de M cellules PV identiques en série	21
Figure. I.17	: Groupement de M cellules PV identiques en parallèle	22
Figure. I.18	: (a) ombrage des panneaux par un cheminé de la maison, (b) fonctionnement de la cellule dans le 3 <sup>ème</sup> quadrant de la caractéristique $I-V$ , à cause de l'ombre	24
Figure. I.19	: Système photovoltaïque- (a) fonctionnement normale, (b) présence d'une ombre : échauffement de la cellule, (c) protection par la mise en place d'une diode de by-pass	24
Figure. I.20	: Module de 36 cellules protégées par deux diodes de by-pass	25
Figure. I.21	: Diode anti-retour placée à la sortie du string et avant la charge	26
Figure. I.22	: Paramètres du panneau photovoltaïque considéré	26
Figure. I.23	: Panneau photovoltaïque considéré avec différents scenarios	27
Figure. I.24	: Profile d'irradiation solaire	27
Figure. I.25	: Courbes $I=f(V)$ pour $E=1000, 800, 600, 400 \text{ w/m}^2$ et $T^{\circ}=25^{\circ}$	28

Figure. I.26	: Courbes $P=f(V)$ pour $E=1000, 800, 600, 400 \text{ w/m}^2$ et $T^\circ=25^\circ$	28
Figure. I.27	: Courant de court-circuit pour $E=1000 \text{ et w/m}^2$ et $T^\circ=25$	29
Figure. I.28	: Puissance PV pour $E=1000 \text{ et w/m}^2$ et $T^\circ=25$	29
<b>Chapitre 2</b>		
Figure. II.1	: Connexion directe entre un GPV et une charge	34
Figure. II.2	: Points de fonctionnement d'un GPV en connexion directe avec la charge.	34
Figure. II.3	: Connexion d'un GPV à une charge à travers un étage d'adaptation	35
Figure. II.4	: Schéma de principe d'un type d'alimentation à découpage	36
Figure. II.5	: Schéma d'un quadripôle électrique	36
Figure. II.6	: Structures de base d'hacheur Buck	37
Figure. II.7	: Structures de base d'un hacheur Buck-Boost	38
Figure. II.8	: Structures de base d'un hacheur Boost	40
Figure. II.9	: Schéma de principe d'un hacheur parallèle	41
Figure. II.10	: Modèle mathématique du convertisseur Boost dans Simulink	42
Figure. II.11	: Répartition de la caractéristique selon le fonctionnement du hacheur utilisé	44
<b>Chapitre 3</b>		
Figure. III.1	: Courbe caractéristique de puissance d'un GPV	48
Figure. III.2	: Chaîne de conversion PV contrôlée par une commande MPPT	49
Figure. III.3	: Chaîne élémentaire de conversion photovoltaïque avec MPPT	50
Figure. III.4	: Fluctuation du PPM avec l'intensité d'éclairement et la charge RL	50
Figure. III.5	: Algorithme à Base de la Mesure d'une fraction de la Tension VOC	52
Figure. III.6	: Principe de la méthode de la tension du circuit ouvert	53
Figure. III.7	: Principe de la méthode de la fraction du courant ICC	54
Figure. III.8	: Algorithme à base de la mesure d'une fraction du Courant Icc	54
Figure. III.9	: Principe de la MPPT avec la méthode P&O	55
Figure. III.10	: Organigramme de la méthode P&O	56
Figure. III.11	: Signe de $dP/dv$ à différentes positions de la courbe caractéristique de	56
Figure. III.12	: Schéma de convergence vers le PPM par P&O [	57
Figure. III.13	: Méthode conductance incrémentale	58
Figure. III.14	: Algorithme conductance incrémentale	59
Figure. III.15	: Principe de la méthode Hill-Climbing.	60
Figure. III.16	: Organigramme de la méthode Hill-Climbing	61
Figure. III.17	: Schéma de principe de la commande Hill Climbing [	62
Figure. III.18	: Principe du contrôleur flou.	62
Figure. III.19	: Eléments de base de contrôleur flou	63

Figure. III.20	: Fonctions d'appartenances de $e(k)$ , $de(k)$ et $dD$	64
Figure. III.21	: Modèle Simulink du système PV commandé par l'algorithme FLC	65
Figure. III.22	: Stratégie de mouvement d'une particule	66
Figure. III.23	: Organigramme de la méthode PSO pour MPPT	69
<b>Chapitre 4</b>		
Figure. IV.1	: Le modèle Simulink du système de conversion photovoltaïque avec les différentes parties constituant le système considéré.	71
Figure. IV.2	: Structure des panneaux utilisés	72
Figure. IV.3	: La tension aux bornes de PV pour un éclairement $E=1000 \text{ W/m}^2$ (INC, P&O, PSO)	72
Figure. IV.4	: Le courant aux bornes de PV pour un éclairement $E=1000 \text{ W/m}^2$ (INC, P&O,	73
Figure. IV.5	: La puissance aux bornes de PV pour un éclairement $E=1000 \text{ W/m}^2$ (INC, P&O, PSO)	73
Figure. IV.6	: La tension aux bornes de la charge pour un éclairement $E=1000 \text{ W/m}^2$ (INC, P&O, PSO)	73
Figure. IV.7	: Le courant aux bornes de la charge pour un éclairement $E=1000 \text{ W/m}^2$ (INC, P&O, PSO)	74
Figure. IV.8	: La puissance aux bornes de la charge pour un éclairement $E=1000 \text{ W/m}^2$ (INC, P&O, PSO)	74
Figure. IV.9	: La tension aux bornes de PV pour un éclairement $E=1000 \text{ W/m}^2$ (FLC)	74
Figure. IV.10	: Le courant aux bornes de PV pour un éclairement $E=1000 \text{ W/m}^2$ (FLC)	75
Figure. IV.11	: La puissance aux bornes de PV pour un éclairement $E=1000 \text{ W/m}^2$ (FLC)	75
Figure. IV.12	: La tension aux bornes de la charge pour un éclairement $E=1000 \text{ W/m}^2$ (FLC)	76
Figure. IV.13	: Le courant aux bornes de la charge pour un éclairement $E=1000 \text{ W/m}^2$ (FLC)	76
Figure. IV.14	: La puissance aux bornes de la charge pour un éclairement $E=1000 \text{ W/m}^2$ (FLC)	77
Figure. IV.15	: Structure des panneaux utilisés	77
Figure. IV.16	: Profile de l'irradiation solaire	78
Figure. IV.17	: Modèle Simulink du système PV commandé par l'algorithme (INC)	78
Figure. IV.18	: Modèle Simulink du système PV commandé par l'algorithme (P&O)	78
Figure. IV.19	: Modèle Simulink du système PV commandé par l'algorithme (PSO)	79
Figure. IV.20	: Modèle Simulink du système PV commandé par l'algorithme (FLC)	79
Figure. IV.21	: La tension aux bornes de PV pour un éclairement variable (INC, P&O, PSO)	80

Figure. IV.22	: Le courant aux bornes de PV pour un éclairement variable (INC, P&O, PSO)	80
Figure. IV.23	: La puissance aux bornes de PV pour un éclairement variable (INC, P&O, PSO)	80
Figure. IV.24	: La tension aux bornes de la charge pour un éclairement variable (INC, P&O, PSO)	81
Figure. IV.25	: Le courant aux bornes de la charge pour un éclairement variable (INC, P&O,	81
Figure. IV.26	: La puissance aux bornes de la charge pour un éclairement variable (INC, P&O,	81
Figure. IV.27	: La tension aux bornes de PV pour un éclairement variable (FLC)	82
Figure. IV.28	: Le courant aux bornes de PV pour un éclairement variable (FLC)	82
Figure. IV.29	: La puissance aux bornes de PV pour un éclairement variable (FLC)	83
Figure. IV.30	: La tension aux bornes de la charge pour un éclairement variable (FLC)	83
Figure. IV.31	: Le courant aux bornes de la charge pour un éclairement variable (FLC)	84
Figure. IV.32	: La puissance aux bornes de la charge pour un éclairement variable (FLC)	84
Figure. IV.33	: Modèle idéal de la batterie	87
Figure. IV.34	: Modèle simple	88
Figure. IV.35	: Flux d'énergie dans un système PV autonome avec charges DC	89
Figure. IV.36	: Algorithme de gestion des flux énergétiques du système photovoltaïque en mode isolé	91

## Liste des Tableaux

Tableau	Titre	Page
<b>I. 1</b>	: Caractéristiques électriques typiques du module choisi	19
<b>III.1</b>	: Résume le principe de fonctionnement de cette méthode	57
<b>III.2</b>	: Règles flous	64

*INTRODUCTION*  
*GENERALE*

## **Introduction Générale**

La demande mondiale en énergie électrique ne cesse d'augmenter car l'électricité est la meilleure illustration des besoins du consommateur. En raison de ses innombrables applications à la fois industrielles et domestiques, il serait difficile d'envisager de vivre aujourd'hui sans électricité.

Actuellement et face à la croissance démographique continue des populations, à la modernisation de la société, l'épuisement des ressources énergétiques fossiles, aux problèmes environnementaux et par effet de l'utilisation irrationnelle de l'humanité, le recours systématique aux carburants fossiles, tel que le pétrole, le charbon et le gaz naturel dans la production de l'électricité a un impact désastreux sur l'environnement où la production électrique à partir de ces derniers est à l'origine des émissions mondiales de CO<sub>2</sub>. Ces combustibles représentent des sources limitées en raison de leur utilisation abondante. En outre, les problèmes de sécurité, l'élimination des déchets, la hausse des coûts de l'électricité et le problème du réchauffement climatique ont fait que toutes les autres sources d'énergie sont en train d'être examinées de plus près. Ces inconvénients ont poussé à réduire leur exploitation donc trouvé de nouvelles sources d'énergie qui est devenu un défi dans tous les domaines scientifiques et technologiques et de penser au développement des énergies renouvelables et durable.

Les énergies renouvelables telles que : l'énergie solaire, l'énergie éolienne, l'énergie biomasse et l'énergie hydroélectrique, sont des solutions prometteuses et alternatives pour concurrencer les sources d'énergies de masse. Les progrès scientifiques et techniques de ces dernières années ont permis d'envisager une utilisation très large de l'énergie solaire photovoltaïque, un changement profond dans l'économie de la production d'énergie par des processus conventionnels ainsi qu'une prise de conscience accrue de leurs effets négatifs sur l'environnement se sont manifestées. Par rapport à d'autres sources d'énergie, l'énergie solaire photovoltaïque (PV) est la source d'énergie qui connaît la croissance la plus rapide car elle est disponible gratuitement, inépuisable, forme d'énergie propre, moins polluante, fonctionne silencieusement, a un faible coût de fonctionnement et peut être adaptée à la production souhaitée à des fins spécifiques (puissance nette).

L'électricité photovoltaïque offre une solution technique et économique attrayante pour les sites non connectés au réseau électrique centralisé. Cette option est particulièrement avantageuse dans les cas où les besoins en électricité sont modestes et où une maintenance intensive n'est pas nécessaire. Elle représente une source d'énergie décentralisée, utilisable dès sa production et adaptable à toutes les régions ensoleillées et isolées. Cette technologie permet de répondre aux besoins électriques d'une habitation, tels que l'éclairage, le pompage de l'eau et la réfrigération [1].

Depuis quelques décennies, les panneaux solaires photovoltaïques ont un grand succès chez les particuliers et ils peuvent facilement être installés. Sachant que le but essentiel de toutes les recherches est l'amélioration globale des performances des systèmes de conversion photovoltaïque (PV).

L'énergie solaire photovoltaïque est captée directement à partir du rayonnement solaire et peut être convertie en énergie électrique via l'effet photovoltaïque. Les panneaux solaires photovoltaïques, constitués de cellules spéciales, ont la capacité de convertir les photons en électrons. Cette énergie, sous forme de courant continu, peut alors être utilisée directement.

La caractéristique I-V du générateur photovoltaïque (GPV) varie en fonction du niveau d'éclairement, de la température de la cellule et du vieillissement global. De plus, le point de fonctionnement du GPV est directement influencé par la charge à laquelle il est connecté. Pour optimiser l'extraction de la puissance disponible du GPV, un étage d'adaptation est introduit entre le générateur et la charge afin de les coupler de manière plus efficace. Cependant, le défi du couplage parfait entre un générateur photovoltaïque et une charge de type continu reste en suspens. Un obstacle majeur dans ce couplage est le transfert de la puissance maximale du GPV à la charge, qui souvent souffre d'une mauvaise adaptation. Cela conduit parfois à un éloignement significatif entre le point de fonctionnement et le point de puissance maximale (PPM). La littérature propose de nombreuses solutions, notamment des algorithmes de contrôle qui permettent de rechercher le point de puissance maximale lorsque le GPV est connecté à une charge via un convertisseur statique.

Un générateur photovoltaïque ne peut délivrer une puissance maximale que pour des valeurs particulières du courant et de la tension. Pour surmonter le problème de rendement des panneaux solaires et obtenir un rendement maximum, il est nécessaire d'optimiser la conception de toutes les parties du système PV. En outre, il est nécessaire d'optimiser les convertisseurs DC/DC (continu/continu) employés comme interface entre le générateur PV et la charge afin d'extraire le maximum de puissance et ainsi faire fonctionner le générateur PV à son point de puissance maximum (PPM) à l'aide d'un contrôleur MPPT (maximum power point tracking), par conséquent, obtenir un courant électrique maximum sous la variation de la charge et des conditions atmosphériques (luminosité et température).

Plusieurs critères d'optimisation de l'efficacité de systèmes photovoltaïques ainsi que des techniques ont été appliquées afin d'avoir une bonne adaptation et un rendement élevé. Parmi ces techniques, on trouve la technique de "Poursuite de Point de Puissance Maximale" ou "Maximum Power Point Tracker (MPPT)", en utilisant des méthodes classiques telles que P&O et INC et nouvelles technologies basées sur l'intelligence artificielle comme la logique floue et Optimisation par essais particuliers (PSO).

Toutefois, un défi majeur persiste : l'inconstance de l'énergie solaire en fonction des conditions météorologiques. Par exemple, pendant les mois d'hiver, la nuit ou par temps pluvieux, la capacité de production des panneaux solaires est significativement réduite. Pour résoudre ce problème, il est nécessaire d'installer des dispositifs de stockage d'énergie, tels que des accumulateurs, afin de maintenir un approvisionnement stable dans le réseau électrique pendant ces périodes de faible production solaire.

Le présent travail s'inscrit dans le contexte général de l'optimisation de la production d'énergie solaire photovoltaïques avec stockage d'énergie basé sur l'utilisation d'un système de conversion et d'adaptation d'énergie dont l'objectif global est de développer des structures de commande et d'optimisation permettant d'améliorer les performances nominales pour un mode de fonctionnement optimal des systèmes photovoltaïques. Il traite d'une part l'amélioration des performances du système photovoltaïque considéré en utilisant les techniques de maximisation conventionnelle et avancées et d'autre part l'utilisation de la technique d'optimisation avancée, l'essaim de particules (Particle Swarm Optimization: PSO) pour l'extraction de la puissance maximale et améliorer son rendement pour plus de fiabilité. L'originalité dans ce travail réside dans l'utilisation de la technique avancée d'optimisation(PSO) comme moyen pour la maximisation de la puissance dans système photovoltaïque en présence conditions météorologiques variable où la thématique de l'optimisation de la production de l'énergie solaire est toujours d'actualité surtout avec l'émergence de nouvelles applications dans les domaines des énergies renouvelables et de l'environnement.

Pour cela, outre une introduction générale et une conclusion, ce mémoire est subdivisé en quatre chapitres :

Le premier chapitre est réservé à la présentation de la structure physique, le principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque et les différents modèles mathématiques toute en choisissant le modèle à simple diode en premier lieu et la simulation du modèle retenu pour montrer l'influence des différents paramètres sur les caractéristiques du générateur photovoltaïque envisagé et l'exploration de fonctionnement de l'effet photovoltaïque et l'impact de la température, l'éclairement sur le rendement du système photovoltaïque et l'importance croissante des énergies renouvelables en particulier de l'énergie solaire dans la transition vers un système énergétique plus durable et respectueux de l'environnement.

Le deuxième chapitre, expose d'une manière détaillée les différents types de convertisseurs continu-continu employés dans les chaînes de conversion photovoltaïque ainsi que leurs modèles mathématiques et leurs modes de fonctionnement. Ensuite, une analyse approfondie du

convertisseur DC-DC, qui agit en tant qu'interface et adaptateur de puissance entre le générateur photovoltaïque et la charge, visant à optimiser le point de fonctionnement est présentée.

Le troisième chapitre est dédié à la présentation des diverses méthodes de recherche du point de puissance maximale adaptées à une gamme variée de profils de variation d'éclairement et dans différentes conditions de fonctionnement.

Le quatrième chapitre est consacré à la validation par simulation des différents éléments de base du système de conversion photovoltaïque considéré. Un intérêt particulier est accordé à la validation par simulation des différents scénarios de changement climatiques ou variations des conditions météorologiques basé sur l'utilisation des diverses méthodes ou techniques de maximisation de puissance conventionnels (P&O et IC). Ensuite, des algorithmes heuristiques basés sur le contrôleur flou et l'algorithme PSO pour la recherche du MPPT ont été mise en œuvre et validé par simulation pour illustrer les performances des algorithmes proposés. Les résultats obtenus simulation obtenus du système solaire photovoltaïque considéré en tenant en compte des diverses conditions de fonctionnement et des variations des conditions météorologiques telles que l'éclairement et la température ont été présenté. Les résultats de simulation de ce chapitre ont été exposés, analysés et discutés.

A la fin de ce travail, nous proposons une synthèse générale ainsi que des diverses pistes pour de futures recherches.

# *CHAPITRE I*

*Généralité sur les Générateurs Photovoltaïques*

## **I.1.Introduction**

Au cours des dernières années et face à la croissance démographique continue des populations et à la modernisation de la société. La demande mondiale en énergie électrique ne cesse d'augmenter car l'électricité est la meilleure illustration des besoins du consommateur. En raison de ses innombrables applications à la fois industrielles et domestiques.

Actuellement, la technologie se concentre sur le développement de sources d'énergie renouvelables telles que l'énergie solaire photovoltaïque, l'énergie éolienne, la bioénergie et l'énergie géothermique. L'énergie solaire photovoltaïque (PV) est la source d'énergie qui connaît la croissance la plus rapide car elle est disponible gratuitement, inépuisable, forme d'énergie propre (moins polluante), fonctionne silencieusement, a un faible coût de fonctionnement et peut être adaptée à la production souhaitée à des fins spécifiques (puissance nette).

Ce chapitre décrit d'une manière générale les générateurs photovoltaïques et l'importance croissante des énergies renouvelables, en particulier de l'énergie solaire, dans la transition vers un système énergétique plus durable et respectueux de l'environnement. Un accent particulier sur l'énergie solaire photovoltaïque et à la structure physique, le principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque en donnant les différents modèles mathématiques tout en choisissant le modèle à simple diode en premier lieu et la simulation du modèle retenu pour montrer l'influence des différents paramètres sur les caractéristiques du générateur photovoltaïque envisagé et l'exploration de fonctionnement de l'effet photovoltaïque et l'impact de la température, l'éclairement sur le rendement du système photovoltaïque et l'importance croissante des énergies renouvelables en particulier de l'énergie solaire dans la transition vers un système énergétique plus durable et respectueux de l'environnement.

## **I.2.Les systèmes photovoltaïques**

Un système photovoltaïque est un ensemble de composants électroniques qui capturent la lumière du soleil et la convertissent en électricité utilisable. Les principaux éléments d'un système photovoltaïque sont les panneaux solaires, qui sont constitués de cellules photovoltaïques capables de générer un courant électrique en réponse à la lumière solaire. Ils sont principalement composés de panneaux solaires, d'onduleurs et de batteries de stockage, et sont largement utilisés comme source d'énergie propre et renouvelable. Ces systèmes offrent une alternative durable aux sources d'énergie traditionnelles et contribuent à réduire les émissions de gaz à effet de serre. Ils sont de plus en plus utilisés en raison de leur durabilité et de leur contribution à la réduction des émissions de gaz à effet de serre.

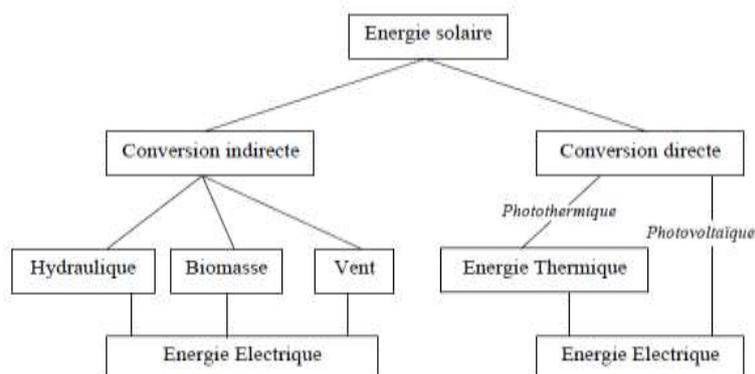
### I.3. Les principaux composants d'un système photovoltaïque

- **Cellules solaires** : Composées de semi-conducteurs, elles sont l'élément de base qui convertit la lumière en électricité.
- **Panneaux solaires** : Les cellules solaires sont généralement regroupées dans des panneaux solaires pour former des modules photovoltaïques et ce sont les l'élément central des systèmes photovoltaïques, composés de cellules photovoltaïques qui convertissent la lumière solaire en électricité.
- **Onduleurs** : Les onduleurs sont utilisés pour convertir le courant continu produit par les panneaux solaires en courant alternatif, rendant ainsi l'électricité utilisable dans les foyers ou pour l'injection dans le réseau électrique
- **Batteries de stockage** Les batteries de stockage permettent de stocker l'électricité produite par les panneaux solaires pour une utilisation ultérieure, offrant ainsi une solution pour l'autoconsommation.

### I.4. L'effet photovoltaïque

L'effet photovoltaïque est le principe par lequel l'énergie lumineuse est directement transformée en énergie électrique à l'aide de cellules photovoltaïques.

En 1975, K.W.Ford avait reporté que l'énergie du rayonnement solaire à la surface de la terre était  $10^4$  fois plus grande que la demande d'énergie mondiale. Mais le problème réside en ce que la forme sous laquelle nous recevons l'énergie n'est pas nécessairement celle sous laquelle cette énergie est utilisable. C'est pourquoi, l'utilisation des processus de conversion de l'énergie. La conversion de cette énergie en électricité peut être effectuée de manière directe ou indirecte (Figure I.1). L'utilisation des cellules photovoltaïques pour obtenir cette conversion est une voie prometteuse pour exploiter cette source d'énergie durable [2] [3].



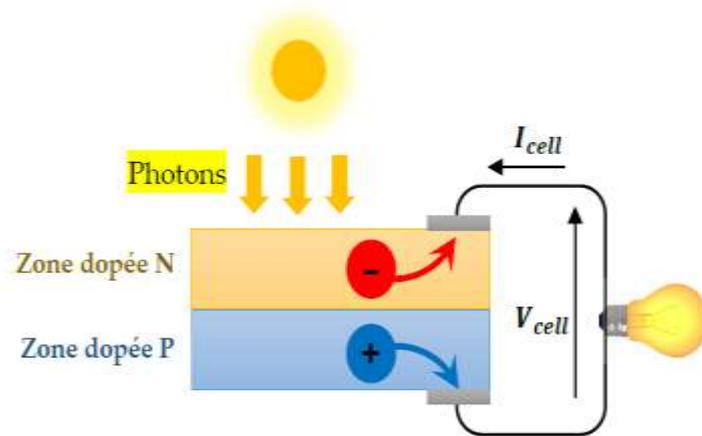
**Fig. I.1.** Conversion de l'énergie solaire en énergie électrique.

"Photovoltaïque" est la combinaison de deux mots : "photos", mot d'origine grecque qui signifie lumière, et "Volta", référence au nom du physicien italien Alessandro Volta, qui a inventé la première pile électrique en 1800. L'effet photovoltaïque ou conversion photovoltaïque a été découvert par le physicien français Edmond Becquerel [4] en 1839. Ce phénomène se produit lorsqu'un corps semi-conducteur est exposé à la lumière du soleil. Par la suite, Albert Einstein à découvert, en travaillant sur l'effet photoélectrique, que la lumière n'avait pas qu'un caractère ondulatoire, mais que son énergie était portée par des particules, les photons.

### **I.5.Principe de la conversion photoélectrique**

Le composant de base de la transformation lumière-électricité est la cellule photovoltaïque, elle est réalisée en associant un matériau semi-conducteur dopé P à un autre semi-conducteur dopé N pour obtenir ainsi une jonction PN (Figure I.2). L'énergie produite par l'absorption d'un photon dans un matériau se traduit du point de vue électrique par la création d'une paire électron-trou. Cette réaction entraîne une différence de répartition des charges créant ainsi une différence de potentiel électrique, c'est l'effet photovoltaïque. [5].

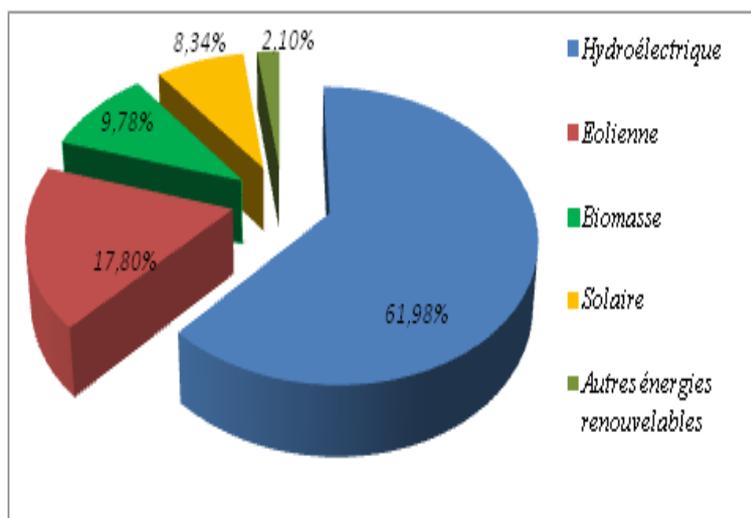
La photopile ou la cellule photovoltaïque est fabriquée à partir de semi-conducteurs de différents types, elle constitue l'élément de base d'un générateur photovoltaïque. Son rôle est de transformer de manière directe l'énergie reçue par le soleil en énergie électrique avec un certain rendement qui est caractéristique du semi-conducteur utilisé dans la fabrication. La photopile utilise deux couches de semi-conducteur, une dopée de type N qui est excédentaire en électrons et l'autre dopée P qui est excédentaire en trous. Ces deux couches sont comprises entre deux électrodes métalliques (+) et (-) pour collecter le courant. L'énergie du photon absorbée par le semi-conducteur va servir à arracher des électrons qui vont passer à un état d'énergie supérieur créant un déséquilibre électrique se traduisant par une paire électron-trou. Lorsque les deux couches entrent en contact, les électrons libérés se déplacent de la zone dopée N vers la zone dopée P, de même pour les trous qui se déplacent de la zone P vers la zone N, ceci va créer une jonction P-N et donc un champ électrique. Le champ permet de déplacer les électrons de la zone N vers la surface négative où ils deviennent disponibles pour le circuit électrique. En même temps les trous se déplacent dans la direction opposée, vers la surface positive où ils attendent les électrons entrants. Quand les trous et les électrons rejoignent la jonction P-N, une tension est générée, elle peut varier entre 0,3V et 0,7 V en fonction du matériau utilisé, de la température et du vieillissement de la cellule [6][7][8].



**Fig. I.2.**Principe de la conversion photoélectrique.

## I.6.Production d'électricité d'origine renouvelable dans le monde

Pour réduire la dépendance du secteur de l'électricité aux combustibles fossiles, plusieurs politiques gouvernementales dans le monde, encourageant ou forçant l'adoption de sources de production à faible teneur en carbone, ont été mises en place au cours de la dernière décennie. En 2018, l'électricité d'origine renouvelable a conforté sa place dans la structure mondiale de la production d'électricité avec 6839TWh ce qui représente plus de 26% de celle-ci. Plus des deux tiers de la capacité électrique mondiale nouvellement installée étaient renouvelables. Cette production se répartit comme suit : énergie éolienne (17,8%), hydroélectrique (61,98%), biomasse (9,78%), solaire (8,34%), et autres énergies renouvelables (2,1%) (Figure. I.3) [9][10]. La croissance annuelle moyenne de la production d'électricité de sources renouvelables jusqu'à 2025 sera quatre fois plus élevée dans la production mondiale de l'électricité [11].



**Fig. I.3.**Production d'électricité d'origine renouvelable dans le monde [11].

## I.7. Production d'électricité d'origine renouvelable en Algérie

L'Algérie dispose d'un des gisements solaires les plus importants du monde. La durée d'ensoleillement sur la quasi-totalité du territoire national dépasse les 2000 heures annuellement et atteint les 3900 heures (hauts plateaux et Sahara). L'énergie reçue quotidiennement est de l'ordre de 5kWh/m<sup>2</sup> /an sur la majeure partie du territoire national, soit près de 1700kWh/m<sup>2</sup>/an au Nord et 2263kWh/m<sup>2</sup>/an au Sud du pays [12].

Malgré tout ce potentiel naturel, la production d'électricité d'origine renouvelable ne représente que 0.8% assuré par les énergies hydraulique, éolienne et photovoltaïque. Le reste, soit 99.2% provient des combustibles fossiles notamment le gaz naturel [13].

L'Algérie s'engage dans une nouvelle ère énergétique durable en amorçant une dynamique d'énergie propre basée sur une stratégie de mise en valeur de ressources renouvelables et leur utilisation pour diversifier ses sources d'énergie. Le groupe Sonelgaz, dans son programme de développement des énergies nouvelles et renouvelables, prévoit la réalisation de 67 projets de production d'énergies renouvelables, soit 27 centrales photovoltaïques, 27 centrales hybrides, 6 centrales solaires thermiques et 7 centrales éoliennes [14]. La figure (I.4) illustre le programme de développement des énergies renouvelables prévu d'ici 2030 en Algérie.

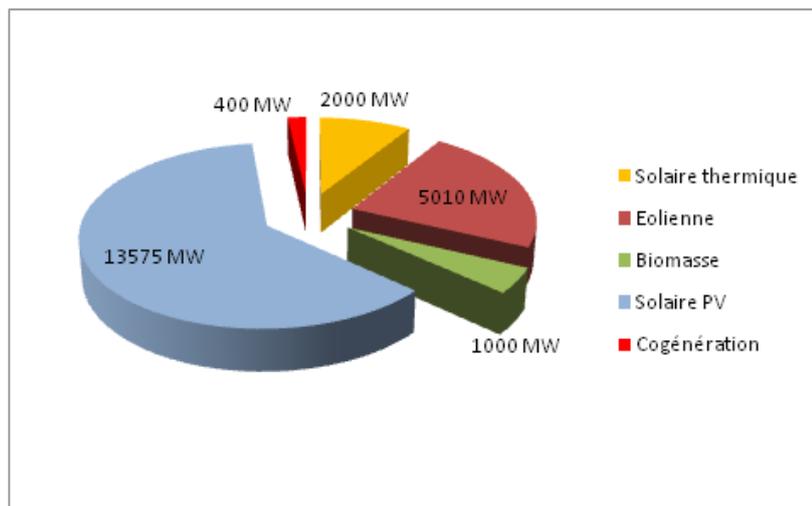


Fig. I.4. Programme des énergies renouvelables d'ici 2030[14].

## I.8. Architecture des systèmes photovoltaïques

En général, il existe trois types d'installation des systèmes photovoltaïques : système connecté au réseau, système autonome et système hybride. Les deux derniers sont indépendants du service public de distribution d'électricité ; on les retrouve souvent dans les régions éloignées du réseau électrique.

### I.8.1. Système autonome

Le système PV autonome « Stand Alone PV system » permet de fournir du courant électrique à des endroits où il n'y a pas de réseau. Donc l'énergie produite est utilisée immédiatement (habitations pompage, l'éclairage, etc....) ou stockée dans des batteries pour une utilisation différée en plus un onduleur (convertisseur DC/AC) doit être utilisée pour faire fonctionner les appareils à courant alternatif (figure. I.5).

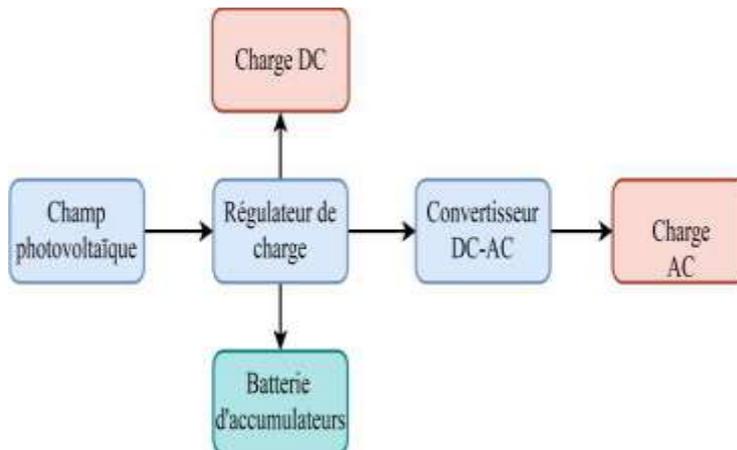


Fig. I.5. Système PV autonome.

### I.8.2. Systèmes hybrides

Le système PV peut être connecté avec d'autres sources renouvelables (éolienne ou groupe électrogène) pour former un système hybride capable de fonctionner dans toutes les conditions avec une génération optimale d'énergie. Leur rôle est de palier aux insuffisances éventuelles de la production photovoltaïque lorsque la demande d'énergie est élevée. La figure suivante (Figure I.6) schématise un système hybride.

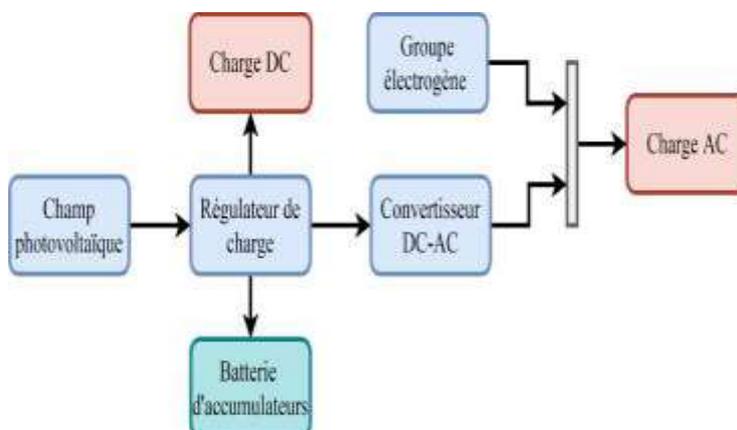


Fig. I.6. Système PV hybride.

### I.8.3. Systèmes PV raccordée au réseau

Dans ce système, l'énergie issue des panneaux photovoltaïques est injectée dans le réseau local ou national. Ce dernier couplé directement au réseau électrique à l'aide d'un onduleur. Une telle approche permet de produire sa propre électricité en périodes ensoleillées et d'acheminer son excédent d'énergie vers le réseau, auprès duquel le client s'approvisionne au besoin. La figure suivante (Figure I.7) illustre une architecture d'un système PV connecté "Grid-Connected PV System".

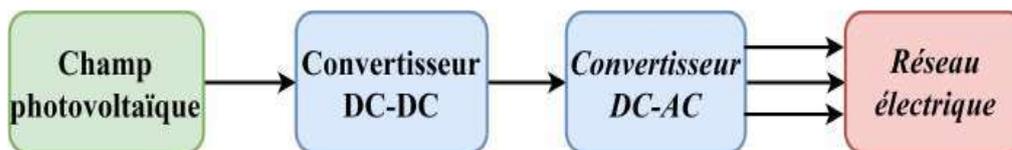


Fig. I.7. Système PV raccordée au réseau électrique.

### I.9. La cellule photovoltaïque

Une cellule photovoltaïque est un dispositif semi-conducteur capable convertir l'énergie solaire en courant électrique continu grâce à l'effet photovoltaïque. Cette cellule est composée d'au moins deux couches de matériau semi-conducteur, l'une ayant une charge positive et l'autre une charge négative. Lorsque la lumière traverse la cellule, certains photons sont absorbés par les atomes du semi-conducteur, libérant des électrons de la couche négative qui peuvent alors circuler à travers un circuit externe avant de retourner à la couche positive. Ce flux d'électrons génère un courant électrique.

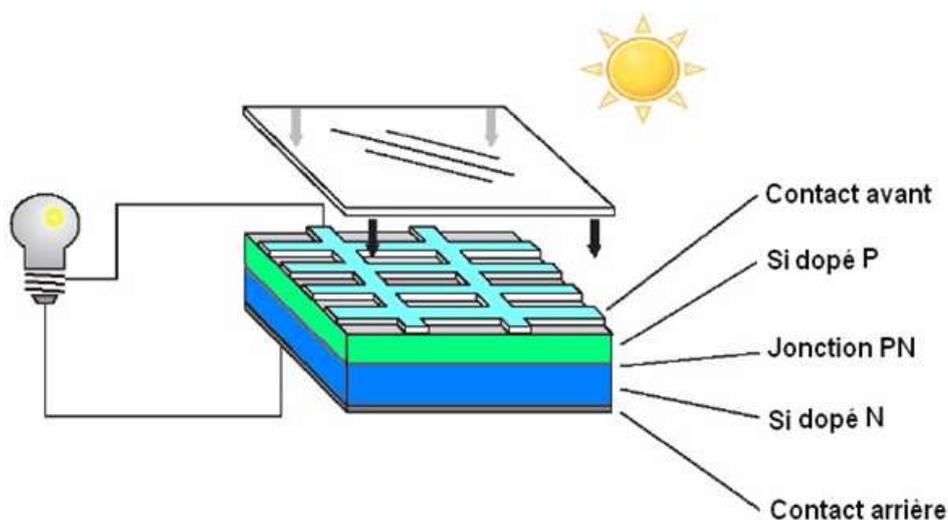


Fig. I.8. Structure basique cellule photovoltaïque.

## I.10. Différents types des cellules photovoltaïques

Il y a plusieurs types des cellules photovoltaïques, chacune caractérisée par son efficacité et son coût. Malgré les différences, tous les types présentent un rendement encore relativement faible, variant entre 8 et 23% de l'énergie reçue par les cellules. À ce jour, on distingue principalement trois types de cellules

### I.10.1. La cellule photovoltaïque en silicium monocristallin

Pour ce genre d'applications technologiques, le terme 'cristallin' signifie que tous les atomes dans le matériau PV actif font partie d'une structure cristalline simple ou il n'y a aucune perturbation dans les arrangements ordonnés des atomes, le silicium cristallin est actuellement le choix le plus courant pour les cellules commerciales même s'il existe de nombreux autres matériaux disponibles. Le silicium a un rendement électrique et une durée de vie de l'ordre de deux fois celle du silicium amorphe, mais il est nettement plus cher [15].



Fig. I.9. Cellules monocristallines.

### I.10.2. La cellule photovoltaïque en silicium Poly cristallin

Le silicium poly-cristallin est un matériau composé de petits grains de silicium cristallin. Ce matériau est moins coûteux (que le monocristallin). Les cellules carrées ou rectangulaires sont faciles à utiliser [15].

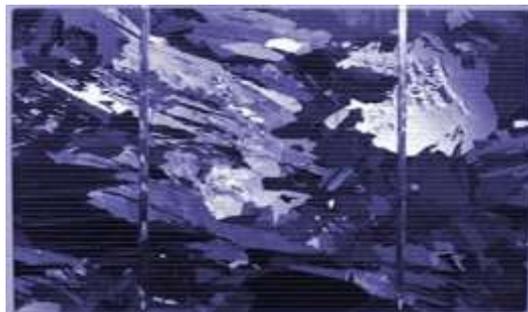


Fig. I.10. Cellules Poly cristallines.

### I.10.3. La cellule au silicium Amorphe

Le silicium absorbe le rayonnement solaire jusqu'à 100 fois mieux qu'en état cristallin ; les cellules sont constituées par des couches très minces sur une plaque de verre ou un autre support souple [15].

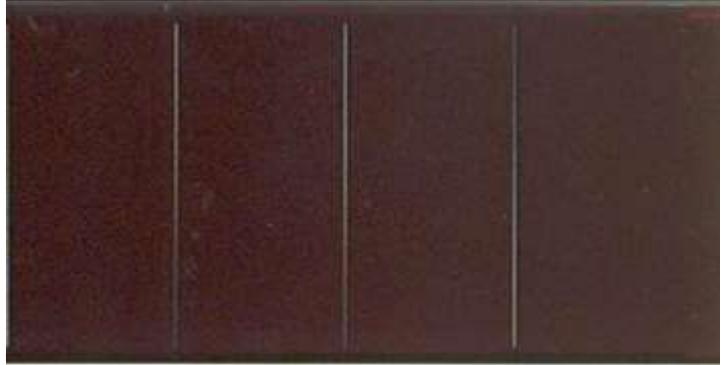


Fig. I.11. Cellule Photovoltaïque amorphe.

## I.11. Modélisation du Générateurs photovoltaïque

La modélisation du générateur PV passe nécessairement par un choix judicieux de circuit électrique équivalent de la cellule PV et afin de développer un circuit équivalent d'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 ce point de vue, plusieurs modèles mathématiques sont développés pour représenter le comportement non linéaire de la cellule. Ces modèles se différencient entre eux par les procédures mathématiques et le nombre de paramètres intervenant dans le calcul de la tension et du courant de la cellule PV.

### I.11.1. Modélisation d'une cellule solaire idéale

L'équation caractéristique d'une cellule solaire idéale est donnée par [16] :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_d = I_{ph} - I_0 \left( e^{\frac{qV}{kt}} - 1 \right) \quad (1.1)$$

Le circuit électrique correspondant à une cellule solaire est donné par la figure :

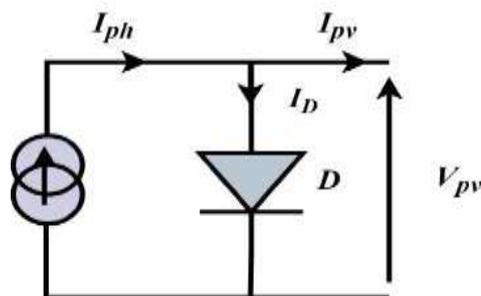
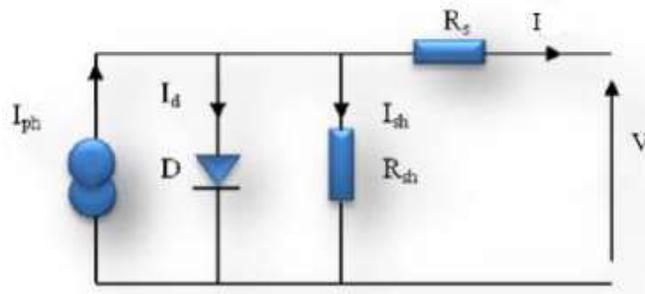


Fig.1.12. Circuit équivalent d'une cellule PV (modèle idéal).

- $I_{ph}$  : Est le photo-courant en ampère ;
- $V$  : Tension aux borne de diode ;
- $I_d$  : Courant traversant la diode ;
- $I_0$  : Courant de saturation ;
- $q$  : est la charge de l'électron  $q=1.602.10^{-19}$  coulomb ;
- $k$  : est la constante de Boltzmann  $k=1.381.10^{-23}$  J/K.

### I.11.2. Le schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque

La cellule photovoltaïque représentée par le circuit électrique de la figure (I.13) se compose d'une source de courant modélisant le flux lumineux, les pertes sont modélisées par deux résistances, une résistance shunt et une résistance série. Le modèle fait donc intervenir les cinq paramètres inconnus suivants :  $n, I_{ph}, R_s, R_{sh}$  et  $I_s$ . Dans ce travail, on s'intéresse à un modèle à simple à cause de sa simplicité et de sa précision [17].



**Fig. I.13.** Circuit électrique équivalent d'une cellule solaire.

Le modèle considéré à une seule diode est le plus simple, il se compose d'une source de courant modélisant le flux lumineux, les deux résistances modélisant les pertes incidentes, une diode pour les phénomènes de polarisation.

Avec :

- La source de courant : modélise le courant généré par les photons ;
- La diode : modélise la jonction P-N ;
- La résistance série  $R_s$ : modélise les pertes résistives au sien de la photopile ; c'est la résistance interne de la cellule, elle représente les pertes par effet joule, elle dépend principalement de la résistance du semi-conducteur utilisé, de la résistance de contact des grilles collectrices et de la résistance de ces grilles ;

- La résistance parallèle  $R_s$  (résistance shunt) : modélisation des courants de fuite ; elle est due à un courant de fuite au niveau de la jonction, elle dépend de la façon dont celle-ci a été réalisée les paramètres de la cellule photovoltaïque.

Dans ce cas, on a, la caractéristique courant tension de ce modèle est donnée par l'équation (1.2) :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_{sat} \left[ \exp\left(\frac{V_{pv} + (I_{pv} \times R_s)}{nkt}\right) - 1 \right] - \frac{V_{pv} + (I_{pv} \times R_s)}{R_{sh}} \quad (1.2)$$

Où :

- $V_{pv}, I_{pv}$ : Sont la tension (V) et le courant (A) de sortie du panneau ;
- $I_{ph}$ : Est le photo-courant en ampère ;
- $I_{sat}$ : Courant dans la diode en ampère ;
- $R_s$ : Est la résistance série en ohm ;
- $R_{sh}$ : Est la résistance shunt en ohm ;
- $q$  : est la charge de l'électron  $q=1.602.10^{-19}$  coulomb ;
- $k$  : est la constante de Boltzmann  $k=1.381.10^{-23}$  J/K ;
- $n$  : est le facteur de qualité de la diode, normalement compris entre 1 et 2.

Si l'on suppose que la résistance parallèle (shunte) est infinie ( $R_{sh} = \infty$ ), l'équation (1.2) devienne :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_{sat} \left[ \exp\left(\frac{e(V_{pv} + (I_{pv} \times R_s))}{nkt}\right) - 1 \right] \quad (1.3)$$

Où :

- $I_{pv}$ : Le courant fourni par la cellule PV et  $V_{pv}$  est la tension au bornes de la cellule PV.

On peut calculer la résistance série dans le point  $V_{co}$  :

$$dI_{pv} = 0 - I_{sat} \left[ \exp\left(\frac{e(V_{pv} + (I_{pv} \times R_s))}{nkt}\right) \right] \times \left( \frac{e(dV_{pv} + (dI_{pv} \times R_s))}{nkt} \right) \quad (1.4)$$

La résistance série ( $R_s$ ) du module PV a un grand impact sur la pente de la courbe  $I-V$ , par conséquent la valeur de  $R_s$  est calculée en évaluant la pente ( $dI/dV$ ) de la courbe  $I-V$  au point  $V_{co}$ .

Elle peut être calculée par la formule suivante :

$$R_s = -\frac{dV_{pv}}{dI_{pv}} - \frac{nvT}{I_{sat} \times \left( \exp\left(e\left(\frac{V_{pv} + R_s \times I_{pv}}{nvT}\right)\right) \right)} \quad (1.5)$$

## I.12. Paramètres d'une cellule photovoltaïque

### I.12.1. Tension à circuit ouvert :

La tension de circuit ouvert, notée  $V_{co}$ , est la tension à laquelle aucun courant n'est débité par le générateur photovoltaïque. (C'est la tension maximale qu'une photopile ou un générateur photovoltaïque peut atteindre), elle dépend de la barrière d'énergie et de la résistance shunt, elle décroît avec la température et la variation de l'intensité lumineuse

$$V_{co} = \frac{k \times T}{q} \times \log \left( \frac{I_p}{I_s} + 1 \right) \quad (1.6)$$

### I.12.2. Courant de court-circuit

Le courant de court-circuit  $I_{cc}$  est le courant pour lequel la tension aux bornes de la cellule ou du générateur photovoltaïque est nulle il augmente avec l'intensité d'éclairement de la cellule et dépend de la surface éclairée, la longueur d'onde du rayonnement, de la mobilité des porteurs et de la température

### I.12.3. Rendement énergétique :

Le rendement énergétique c'est le rapport entre la puissance électrique maximale délivrée par la cellule  $P_{max}(I_{opt}, V_{opt})$  et la puissance lumineuse incidente. Le terme  $P_{inc}$  désigne le produit de l'éclairement solaire et de la surface totale des cellules photovoltaïques. Ce paramètre reflète la qualité de conversion de l'énergie solaire en énergie électrique, le rendement peut être amélioré en augmentant le facteur de forme, le courant de court-circuit et la tension en circuit ouvert, c'est un paramètre essentiel car sa valeur seule permet d'évaluer les performances de la cellule

$$N = \frac{P_{max}}{P_{inc}} = \frac{FF \times I_{cc} \times V_{co}}{P_{inc}} \quad (1.7)$$

### I.12.4. Facteur de forme

On appelle filling factor (FF) dit aussi facteur de courbe ou facteur de remplissage ce coefficient représente le rapport entre la puissance maximale pouvant être produite par la cellule qui se réfère à  $P_{max}$  et le produit du courant de court-circuit  $I_{cc}$  par la tension de circuit-ouvert  $V_{co}$  (c'est-à-dire la puissance maximale d'une cellule idéale). Plus la valeur de ce coefficient sera grande plus la cellule est performante. Il est de l'ordre de 0.7 pour les cellules performantes et diminue avec la température. Il traduit l'influence des pertes par les deux résistances parasites  $R_s$  et  $R_{sh}$ . Il est défini par :

$$FF = \frac{P_{max}}{I_{cc} \times V_{co}} \quad (1.8)$$

### I.12.5. Paramètres du module utilisé

Le module a été choisi pour la validation du modèle mathématique. Il contient 60 cellules en silicium poly-cristallin et fournit une puissance maximale de 200 W avec la disposition de trois panneaux en série et un seul en parallèle. Les paramètres de simulation sont donnés dans le tableau (I.1) :

**Tableau. I.1.** Caractéristiques électriques typiques du module Choisi

Paramètres du module utilisé	Valeurs
Puissance maximale (w)	200.22
Panneaux photovoltaïque parallèles	1
Panneaux photovoltaïque en série	3
Nombre de cellules par module (Ncell)	60
Tension en circuit ouvert $V_{oc}$ (v)	57.6
Courant de court-circuit $I_{cc}$ (A)	4.6
Tension au point de puissance maximale $V_{mp}$ (v)	47
Courant au point de puissance maximale $I_{mp}$ (A)	4.26
Coefficient de température de $V_{oc}$ (%/deg.C)	-0.35502
Coefficient de température de $I_{sc}$ (%/deg.C)	0.06
Courant généré par la lumière $I_L$ (A)	4.6092
Courant de saturation des diodes $I_0$ (A)	$1.2872e^{-10}$
Facteur d'idéalité de la diode	1.5395
Résistance aux shunts $R_{sh}$ (ohms)	412.7019
Résistance série $R_c$ (ohms)	0.82756
Température standard, T	25°C

### I.13.Équations du module PV

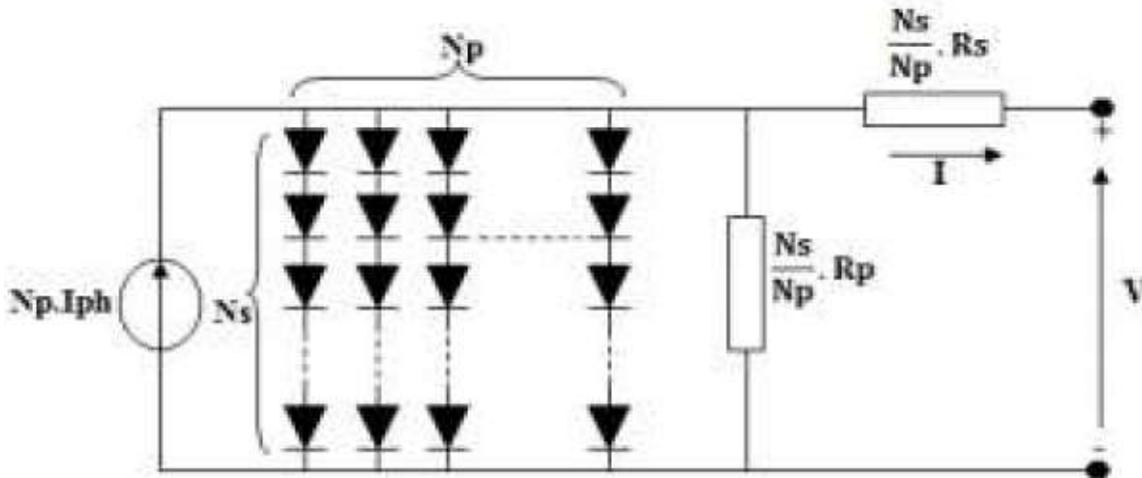


Fig. I.14.Schéma électrique équivalent d'un module photovoltaïque.

Les connexions en série de  $N_s$  cellules augmentent la tension pour un même courant, tandis que La mise en parallèle de  $N_p$  cellules accroît le courant en conservant la tension. Si toutes les cellules sont identiques et fonctionnent dans les mêmes conditions, nous obtenons le module photovoltaïque qui fournit un courant  $I_{pv}$  sous une tension  $V_{pv}$  [18].

Avec :

$$I_{pv-modul} = N_p \times I_{pv-cellule} \quad (1.9)$$

$$V_{pv-modul} = N_s \times V_{pv-cellule} \quad (1.10)$$

L'équation globale pour le courant et la tension d'un module PV devient la suivante [19] [20] :

$$I_{pv} = N_p \times I_{ph} - N_p \times I_0 \times \left[ \exp\left(\frac{q}{K \times A \times T_c} \times \left(\frac{V}{N_s} + \frac{R_s \times I_{cel}}{N_p}\right) - 1\right) \right] \frac{N_p}{R_p} \times \left(\frac{V}{N_s} + \frac{R_s \times I_{cel}}{N_p}\right) \quad (1.11)$$

### I.14. Générateur photovoltaïque et ses performances

#### I.14.1. Constitution d'un générateur photovoltaïque

La cellule photovoltaïque élémentaire produit une puissance électrique très faible par rapport aux besoins de la plupart des applications domestiques ou industrielles. Une cellule élémentaire de quelques dizaines de centimètres carrés délivre au maximum quelques watts sous une tension très faible (de l'ordre de 0,6 à 0,8 V), car il s'agit d'une tension de jonction PN. L'association de plusieurs cellules en série ou en parallèle forme un générateur photovoltaïque (GPV). Lorsque les cellules sont connectées en série, les tensions de chaque cellule s'additionnent, augmentant ainsi la tension totale du générateur. En revanche, lorsque les cellules sont connectées en parallèle, c'est l'ampérage qui augmente. La plupart des panneaux photovoltaïques commerciaux sont constitués de sous-réseaux de cellules connectées en série.

Chaque sous-réseau est composé d'un groupe de cellules connectées en série. Le nombre de cellules par sous-réseau est déterminé par un compromis économique entre la protection et les pertes en cas de défaut partiel d'une partie importante du générateur photovoltaïque (GPV).

En connectant M cellules en série et N colonnes de cellules en parallèle (Figure. I.15 a), on obtient un module ou un panneau PV (Figure 1.15 b). La tension ( $V_{PV}$ ) aux bornes du module PV et le courant ( $I_{pv}$ ) délivré par ce dernier dépendent des caractéristiques d'une cellule PV élémentaire ( $V_{cel}, I_{cel}$ ).

La puissance ( $P_{PV}$ ) disponible à la sortie du module PV constitué est donc donnée par :

$$P_{PV} = (M.N).V_{cel}.I_{cel} \quad (1.11)$$

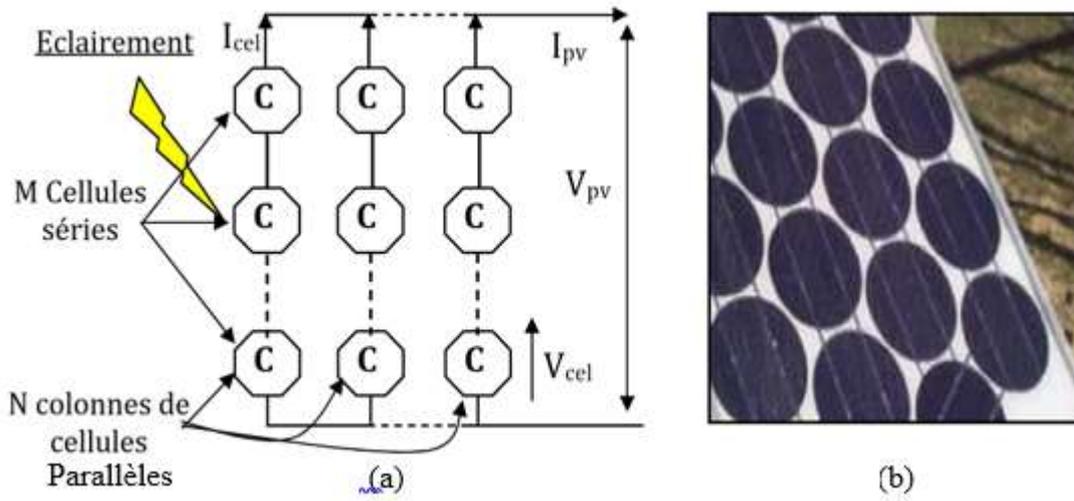


Fig. I.15. Panneau PV constitué par M cellules séries et N colonnes parallèles.

(a) Structure d'un panneau PV, (b) Panneau solaire en silicium monocristallin

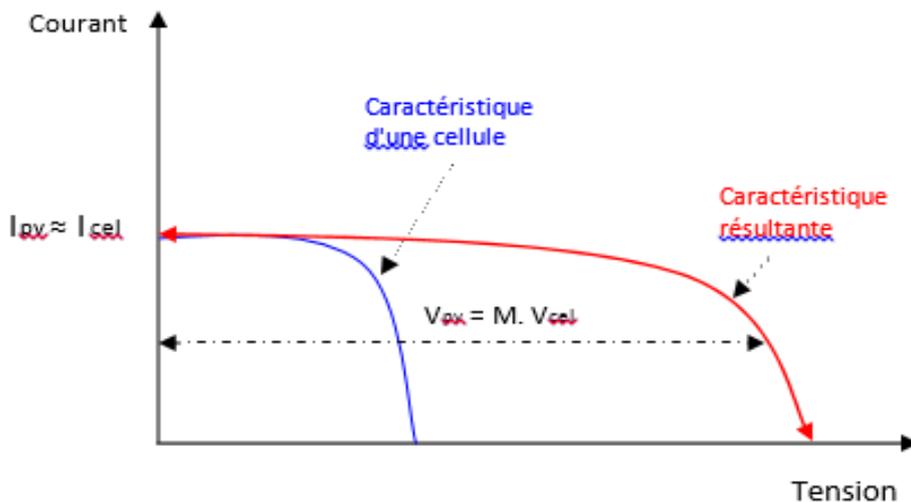


Fig. I.16. Groupement de M cellules PV identiques en série.

Le courant généré par les cellules en série étant le même dans toute la branche, il est important de ne connecter que des cellules identiques ayant une même densité de courant. Cela souligne la nécessité, en production, de tester toutes les cellules et de les classer en fonction de leur rendement. La figure. I.16 illustre la courbe de puissance du groupement ainsi réalisé.

Dans le cas d'un groupement en parallèle, c'est la tension de chacun des éléments qui doit être identique, les courants se combinent (Figure. I.17).

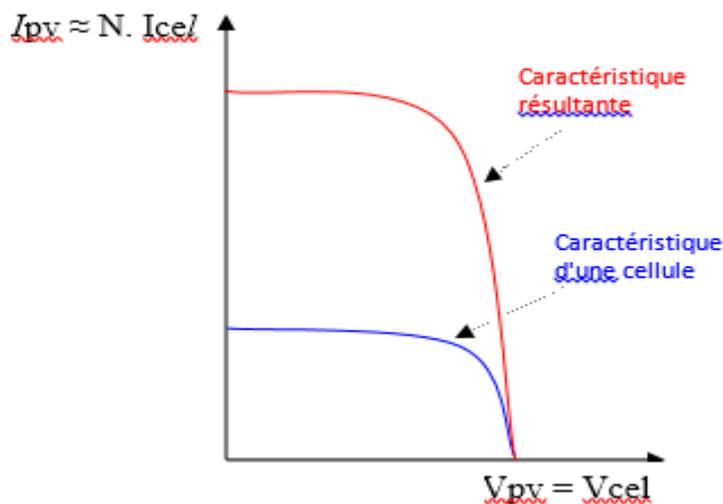


Fig. I.17. Groupement de M cellules PV identiques en parallèle.

## I.15. Protection d'un générateur photovoltaïque

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

### I.15.1. Protection d'un PV contre les chocs électriques

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

#### I.15.1.1. Protection contre les contacts directs

Les matériels PV partie courant continu doivent toujours être considérés comme sous tension et disposer de protection par isolation des parties actives ou par enveloppe [21].

### **I.15.1.2. Protection contre les contacts indirects**

Les modes de protection doivent intégrer les dispositions mises en œuvre côté *DC* et *AC*. Ainsi que la présence ou non d'une séparation galvanique par transformateur entre les parties *DC* et *AC*.

### **I.15.2. Protection d'un générateur photovoltaïque contre les surtensions**

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

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

En règle générale, un système de protection contre la foudre destiné à un générateur PV se compose des éléments suivants [22] :

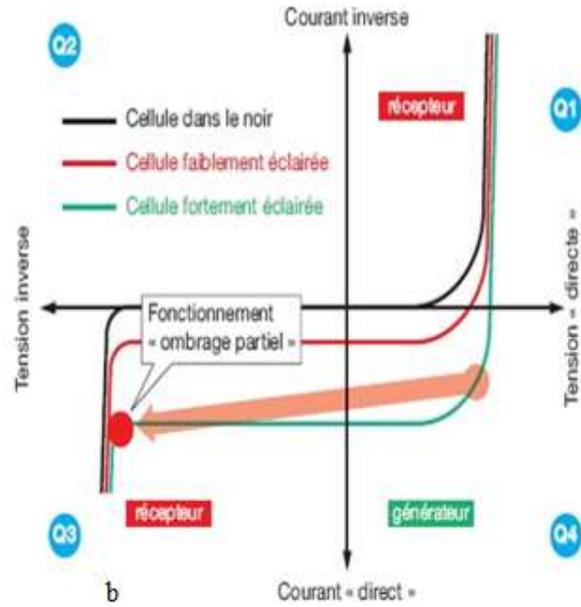
1. Système extérieur de Protection contre la Foudre (SPF) ;
2. Installation de mise à la terre et équilibrage de potentiel ;
3. Blindage magnétique et câblage ;
4. Protection SPD (Surge Protection Device) coordonnée.

### **I.15.3. Protection du PV contre les surintensités**

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

#### **I.15.3.1. Ombrage d'un générateur**

L'ombrage partiel d'une cellule va forcer cette dernière à travailler dans le quadrant  $Q3$  (figure. I.18), c'est-à-dire d'inverser la polarité de la tension de l'élément et de l'élever au seuil tension inverse de la jonction. La puissance absorbée par les cellules à l'ombre dépasse très nettement la puissance normalement dissipée et provoque des points chauds. Les points chauds peuvent endommager définitivement le module PV. Une protection contre les surintensités est sans effet, car l'augmentation de la puissance à dissiper est liée à l'apparition d'une tension inverse dans la cellule affectée et non à une augmentation significative du courant  $I_{cc}$ .

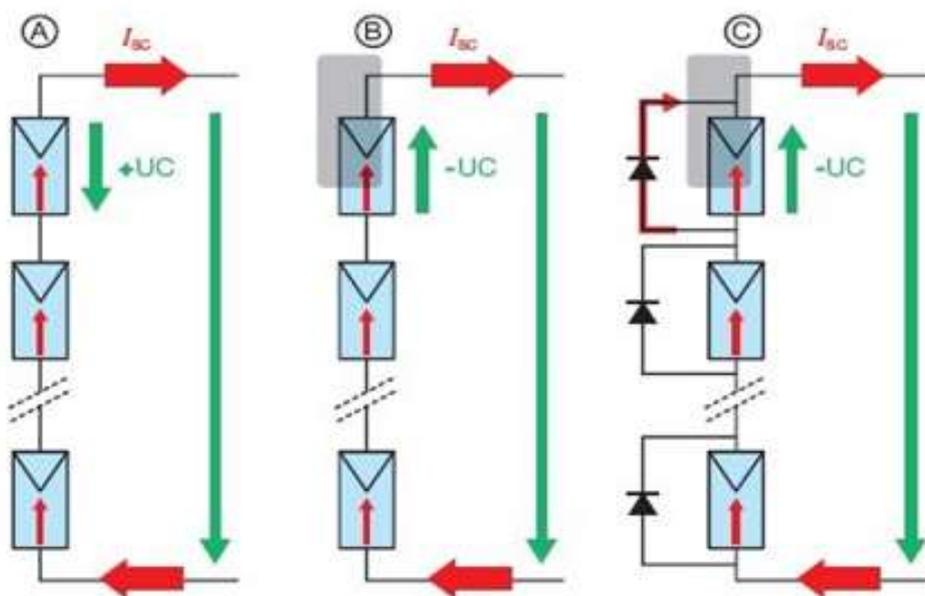


**Fig. I.18.**(a) ombrage des panneaux par un cheminé de la maison,

(b) fonctionnement de la cellule dans le 3<sup>ème</sup>quadrant de la caractéristique I-V, à cause de l'ombre.

Une diode By-pass permet au courant des autres éléments en série de contourner la cellule « ombrée » Figure. I.19 :

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



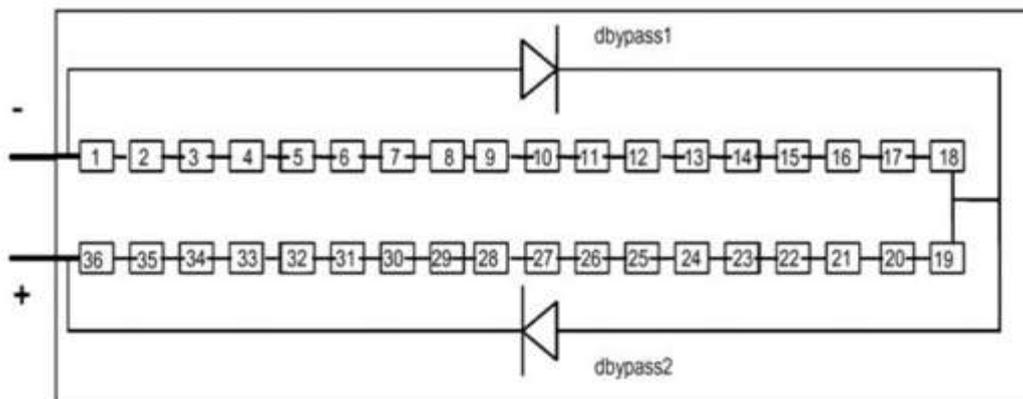
**Fig. I.19.**Système photovoltaïque- (a) fonctionnement normale, (b) présence d'une ombre : échauffement de la cellule, (c) protection par la mise en place d'une diode de by-pass.

### I.15.4.Nécessité de protection contre les courants inverses

Le dimensionnement des câbles de chaînes dépend fortement des chutes de tension ; les notions de courants admissibles pour la protection des canalisations contre les surcharges sont généralement automatiquement satisfaites et ne nécessitent pas la mise en place de Protection pour assurer cette fonction. Le principal critère de sélection des fusibles est la valeur d'IRM (courant inverse maximum PV) que le module peut supporter temporairement jusqu'à ce que le fusible de protection choisi interrompe le courant de défaut généré suite à un défaut [23].

#### I.15.4.1.Diode de by-pass

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



**Fig. I.20.**Module de 36 cellules protégées par deux diodes de by-pass [23].

La plupart des modules PV commerciaux sont constitués par association de cellules solaire en série incluant une ou deux diodes de by-pass (figure. I.20). L'une des configurations les plus populaires que nous pouvons trouver sur le marché des modules PV. Quelques modules PV sont offerts sans diodes de by-pass. Ceci peut être compris parce que dans des applications autonomes, où le rangé (le string) PV est constituée juste par association des modules PV en parallèle, chargeant une batterie de 12 ou 24 V, l'inclusion des diodes de by-pass n'est pas du tout nécessaire. La conception de rangée PV et la configuration des diodes de by-pass dans Les modules PV constituant la rangée, a une grande influence sur la probabilité et la sévérité de l'apparition de points chauds le long du string PV [24].

### I.15.4.2 Diode anti-retour

La tension produite par chaque string peut être différente. Lors de la mise en parallèle de ces strings pour former un champ, le string avec la tension la plus faible peut absorber un courant inverse provenant des autres strings. Cela conduit donc à une baisse de production et les modules du string traversés par le courant inverse pourraient être également susceptibles de la défaillance. Pour éviter ces courants inverses, une diode anti-retour est placée au bout de chaque string (Figure. I.21).

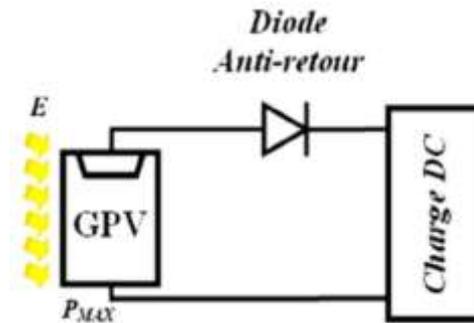


Fig. I.21. Diode anti-retour placée à la sortie du string et avant la charge.

### I.16. Validation du modèle considéré

Lors de la réalisation de ce mémoire, nous avons utilisés 04 panneaux photovoltaïque avec les paramètres indiqués dans la figure. I.22, deux en série et un panneau en parallèle d'une puissance globale de 600 w. les simulations ont été effectués différentes variations des conditions météorologiques (Variation de l'irradiation) et de la température avec un profil d'éclairement comme le montre les figures I.23 et I.24 successivement.

Array data	
Parallel strings	1
Series-connected modules per string	3

Module data	
Module:	User-defined
Maximum Power (W)	200.22
Open circuit voltage Voc (V)	57.6
Voltage at maximum power point Vmp (V)	47
Temperature coefficient of Voc (%/deg.C)	-0.35502
Cells per module (Ncell)	60
Short-circuit current Isc (A)	4.6
Current at maximum power point Imp (A)	4.26
Temperature coefficient of Isc (%/deg.C)	0.06

Model parameters	
Light-generated current IL (A)	4.6092
Diode saturation current I0 (A)	1.2872e-10
Diode ideality factor	1.5395
Shunt resistance Rsh (ohms)	412.7019
Series resistance Rs (ohms)	0.82756

Fig. I.22. Paramètres du panneau photovoltaïque considéré.

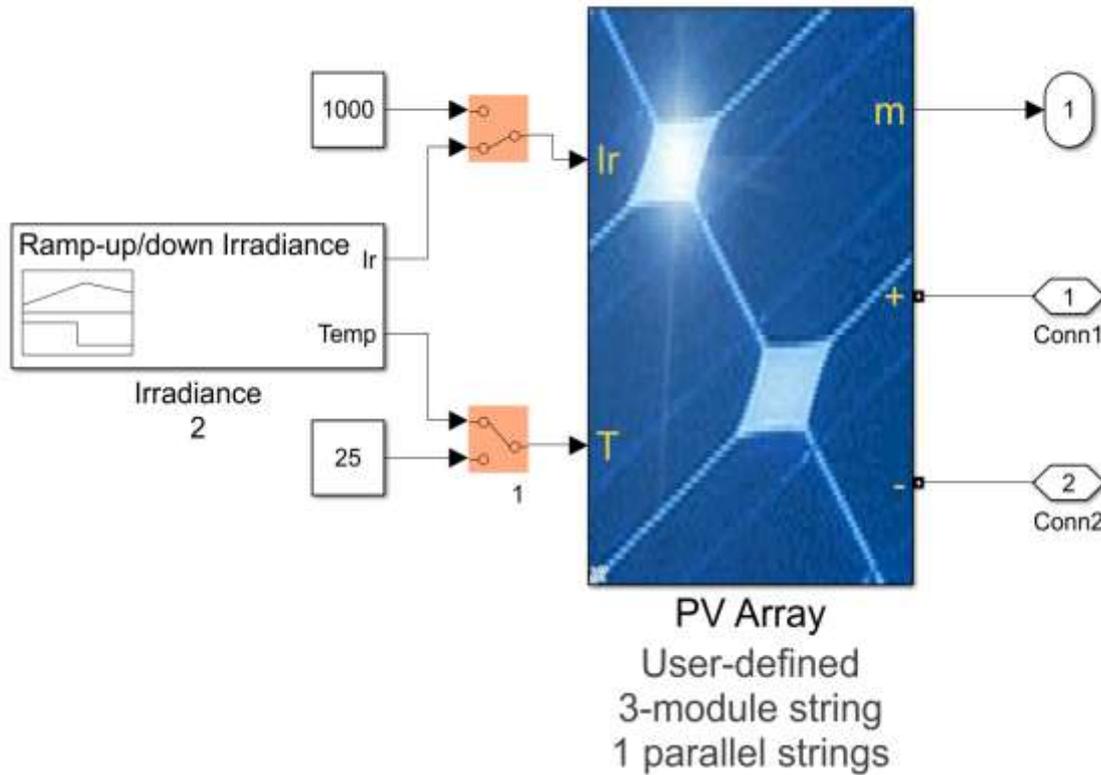


Fig. I.23. Panneau photovoltaïque considéré avec différents scenarios.

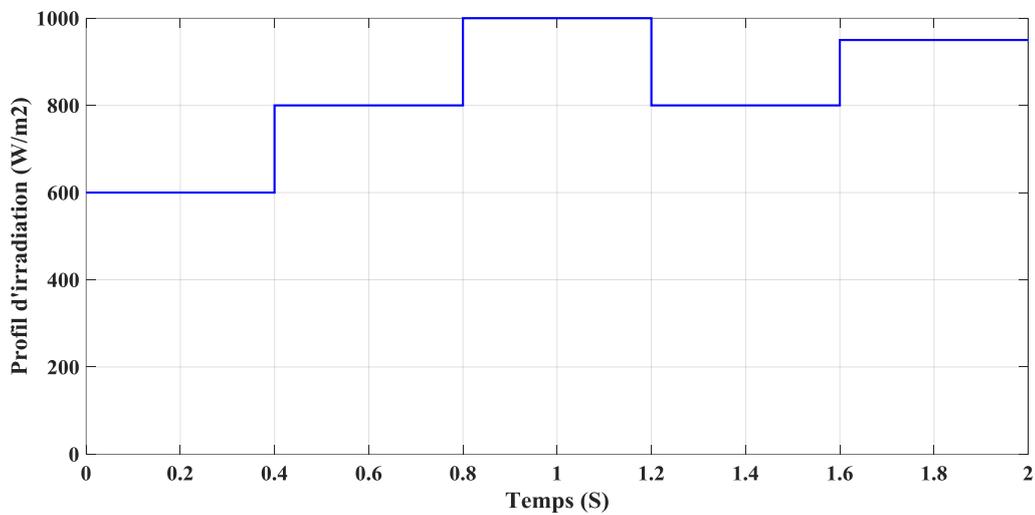
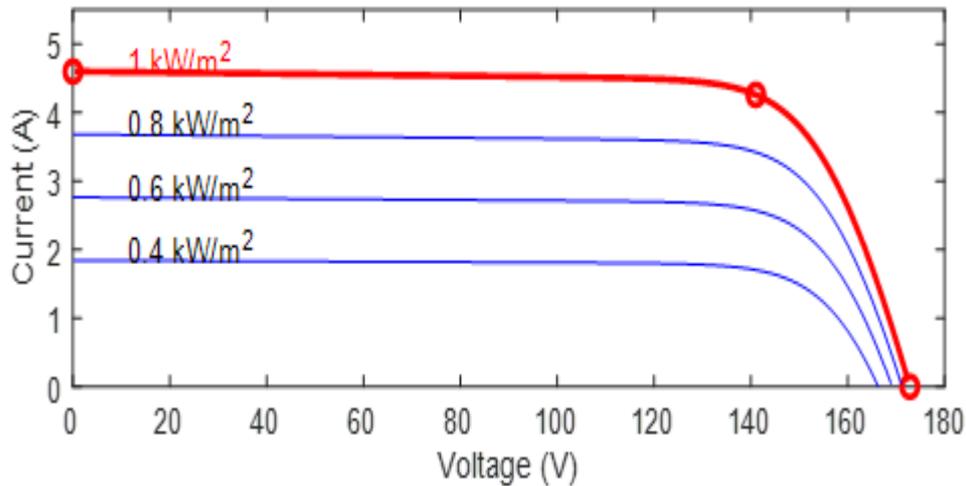


Fig. I.24. Profil d'irradiation solaire.

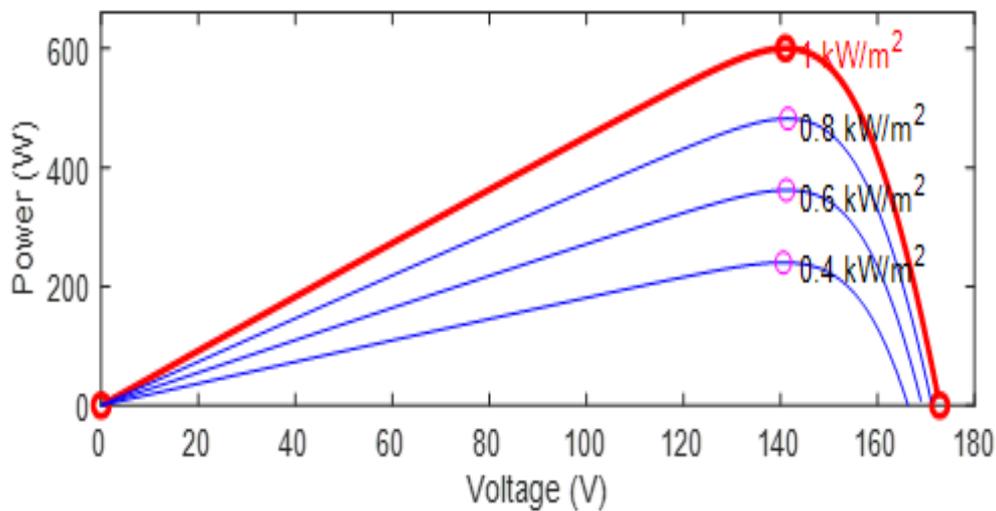
### I.16.1. Influence de l'éclairement sur les courbes $I=f(V)$ et $P=f(V)$

Le modèle de cellule est utilisé dans des conditions standards, avec une irradiation solaire de  $E = 1000 \text{ W/m}^2$ ,  $E = 800 \text{ W/m}^2$ ,  $E = 600 \text{ W/m}^2$  et  $E = 400 \text{ W/m}^2$  et une température ambiante de  $T = 25^\circ\text{C}$ , afin d'obtenir les caractéristiques courant-tension présentées dans la figure I.25. Nous remarquons que la caractéristique de la cellule se comporte comme une source de courant constant

dans sa partie horizontale et comme un générateur de tension constant dans sa partie verticale. De plus, nous observons qu'il existe toujours un point de puissance maximale. Les figures suivantes représentent les courbes  $I=f(V)$  et  $P=f(V)$  qui montrent l'influence de l'éclairement sur le courant et la puissance délivrée par les panneaux photovoltaïques.

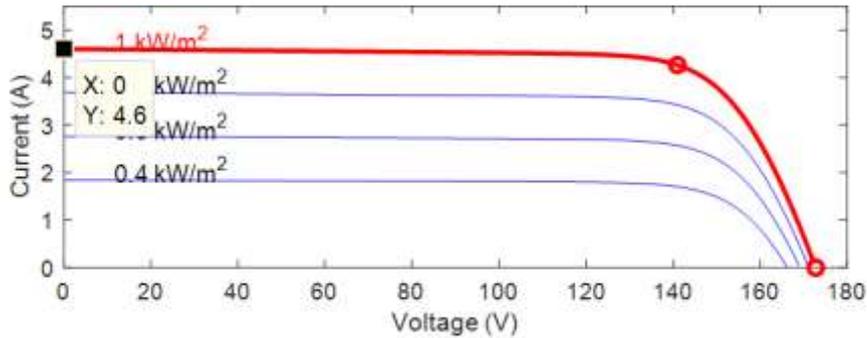


**Fig. I.25.** Courbes  $I=f(V)$  pour  $E=1000, 800, 600, 400 \text{ w/m}^2$  et  $T=25^\circ$ .



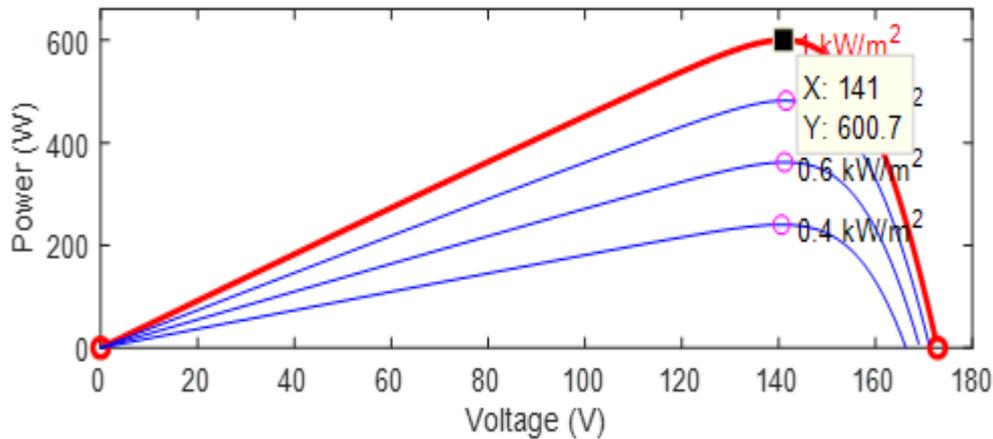
**Fig. I.26.** Courbes  $P=f(V)$  pour  $E=1000, 800, 600, 400 \text{ w/m}^2$  et  $T=25^\circ$ .

Nous constatons que le courant de court-circuit est une fonction linéaire de l'éclairement (l'éclairement influençant légèrement la tension) et que la tension varie légèrement. La figure. I.27 illustre la variation de la courbe  $I$  en fonction de  $V$  avec une température constante ( $T=25^\circ\text{C}$ ) et différentes valeurs de l'éclairement. On remarque que le courant subit une variation



**Fig. I.27.** Courant de court-circuit pour  $E=1000$  et  $w/m^2$  et  $T^\circ=25$ .

La figure. I.28 illustre la variation de la puissance générée par la cellule en fonction de la tension avec différents valeurs de l'éclairement. , on note que lorsque l'intensité du l'éclairement augmente la valeur de la puissance augmente aussi.



**Fig. I.28.** Puissance PV pour  $E=1000$  et  $w/m^2$  et  $T^\circ=25$ .

## I.17. Les avantages et les inconvénients l'énergie solaire photovoltaïque

### I.17.1. Les avantage de l'énergie solaire photovoltaïque

Énergie renouvelable et inépuisable Le soleil est une source d'énergie gratuite et illimitée pour les panneaux solaires, qui n'ont besoin que de sa lumière pour fonctionner. De plus, la plupart des cellules photovoltaïques sont fabriquées à partir de silicium, un matériau abondant et non toxique, qui est le deuxième matériau le plus abondant sur Terre.

- L'énergie solaire photovoltaïque ne génère ni bruit, et ne produit ni émissions nocives ni gaz polluants. Elle utilise uniquement l'énergie du soleil comme source, ne générant aucun coproduit nocif, et contribue activement à la réduction du réchauffement climatique.

- L'énergie solaire nécessite peu d'entretien, les modules solaires ne nécessitant pratiquement aucune maintenance et étant faciles à installer. L'électricité peut être produite grâce à l'énergie solaire dans de nombreux endroits.

- L'énergie solaire photovoltaïque fournit de l'électricité aux zones rurales les plus isolées.

### **I.17.2. Les inconvénients de l'énergie solaire photovoltaïque**

- Le coût élevé des panneaux solaires

- L'énergie solaire peut être limitée en raison de sa dépendance à la chaleur.

- Les modules photovoltaïques ne fonctionnent pas en l'absence d'énergie solaire

- La fabrication des modules photovoltaïques nécessite une technologie avancée et des investissements importants.

- Le rendement réel de conversion d'un module est souvent bas (la limite théorique pour une cellule en silicium cristallin étant de 28%).

- Lorsque le stockage de l'énergie électrique sous forme chimique (batterie) est nécessaire, le coût du générateur photovoltaïque augmente. Cependant, la fiabilité et les performances du système restent équivalentes tant que la batterie et les composants de régulation associés sont choisis judicieusement.

- Les générateurs photovoltaïques ne sont pas aussi compétitifs que les générateurs Diesel pour répondre à de faibles demandes d'énergie dans des régions isolées.

### **I.18. Conclusion**

La conversion de l'énergie solaire en électricité grâce à la technologie photovoltaïque est devenue une alternative incontournable aux sources d'énergie en voie d'épuisement, comme le pétrole. Cette nouvelle source énergétique s'est révélée être une solution intéressante par sa grande flexibilité et sa capacité à fonctionner dans des environnements hostiles, surpassant ainsi les moyens de production conventionnels. De plus, son exploitation est nettement moins dommageable pour l'environnement que celle des combustibles fossiles, et elle offre une portabilité et une flexibilité inégalées par rapport aux autres ressources comme l'hydraulique et la géothermie. La conversion de cette forme d'énergie en électricité a été rendue possible grâce à la découverte de nouveaux systèmes basés sur les cellules photovoltaïques.

Ce chapitre nous a permis de donner un aperçu général sur les *Générateurs photovoltaïques*. Dans la première partie on a donné le principe de l'effet photovoltaïque, avec une description de la cellule PV et son modèle mathématique précisément le modèle à une diode pour obtenir les

caractéristiques  $I = f(V)$  courant-tension d'un générateur photovoltaïque, Nous avons également discuté de la protection d'un GPV ,Les variations (irradiation, température) qu'ils affecter sur les caractéristiques courant-tension et la puissance du GPV sont aussi un objectif dans ce chapitre, cette puissance va donner un chercher Le point maximal variable à travers des conditions météorologiques. L'optimisation de ce point fait par des techniques des commandes classiques MMPT font l'étude dans le prochain chapitre et aussi on présentera une étude sur les convertisseurs DC-DC (hacheurs).

# *CHAPITRE II*

*Modélisation du convertisseur DC/DC*

## II.1.Introduction

Comme expliqué dans le chapitre précédent, les caractéristiques d'un module solaire mettent en évidence que la puissance maximale générée dépend fortement de l'intensité des radiations solaires et de la température, En plus de ces dépendances, Un panneau PV ne fonctionne pas à sa puissance maximale lorsqu'il est connecté directement avec la charge.

Pour cela, pour que le module solaire fournisse sa puissance maximale disponible, il est nécessaire d'adapter en permanence la charge avec le générateur photovoltaïque. Cette adaptation peut être réalisée en insérant un convertisseur continu-continu (hacheur) contrôlé par un mécanisme de poursuite du point de puissance maximale (Maximum Power Point Tracking, MPPT).

Ce chapitre expose les divers types de convertisseurs continu-continu employés dans les chaînes de conversion photovoltaïque, ainsi que leurs modes de fonctionnement. Ensuite, une analyse approfondie du convertisseur DC-DC, qui agit en tant qu'interface et adaptateur de puissance entre le générateur photovoltaïque et la charge, visant à optimiser le point de fonctionnement est présentée.

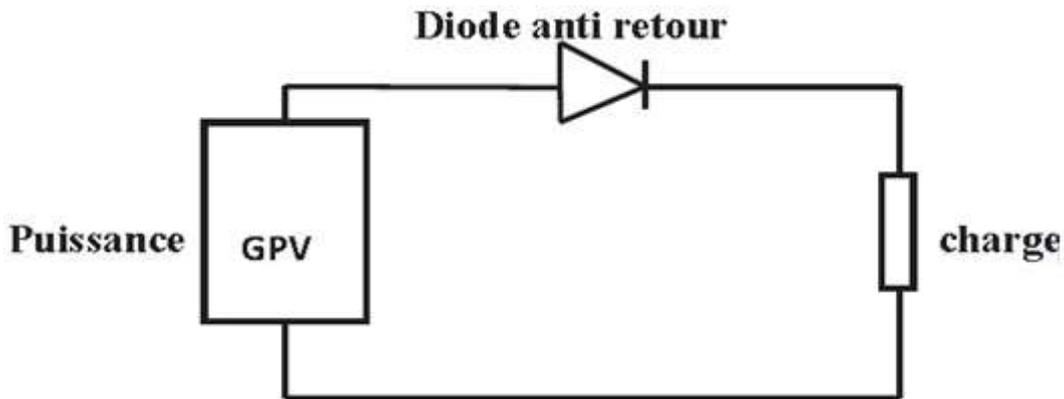
## II.2.Connexion directe source-charge

Les hacheurs sont les convertisseurs statiques qui permettent le transfert de l'énergie électrique d'une source continue vers une autre source continue. (Ils sont l'équivalents des transformateurs en alternatif). Lorsque l'entrée et la sortie sont de natures dynamiques différentes, on peut les relier directement (on parle alors d'hacheur à liaison directe). Lorsqu'elles sont de même nature dynamique, il faut faire appel à un élément de stockage momentané (on parle dans ce cas d'hacheur à accumulation). Enfin dans le cas où l'isolation galvanique de la sortie avec l'entrée est une nécessité, on réalise des hacheurs dits « isolés ». Suivant le degré de réversibilité que l'on désire, la structure du montage diffère. Enfin, suivant la puissance nominale du système, la technologie des composants ne sera pas la même.

En ce qui concerne la connexion directe entre un générateur photovoltaïque (GPV) et une charge en courant continu, qui est actuellement la méthode la plus courante pour l'utilisation de l'énergie solaire, Avant de procéder, il est important de vérifier que la charge accepte bien cette connexion directe au générateur de puissance continue.

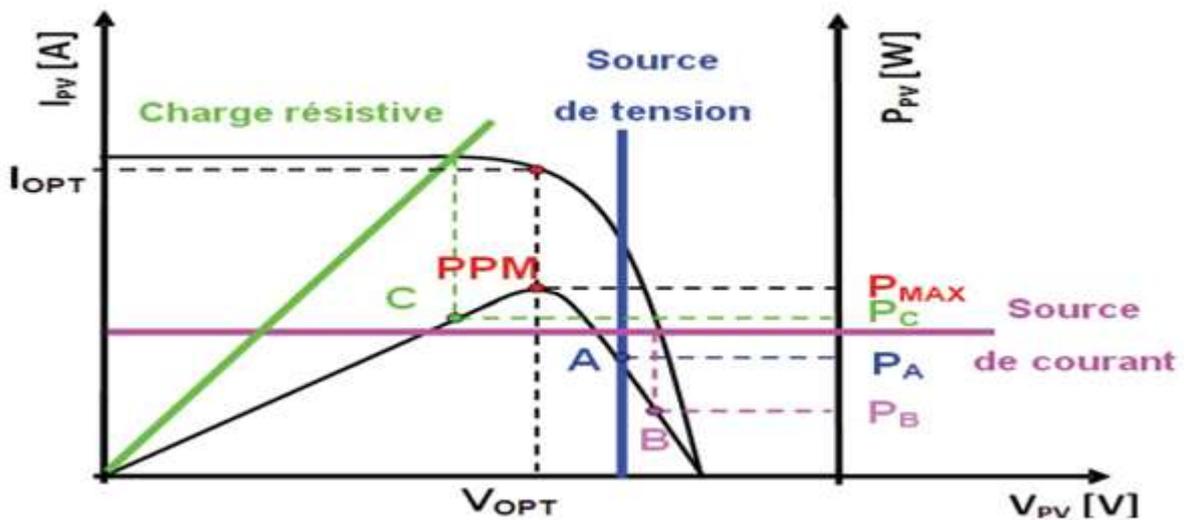
Ce type de configuration assure une mise en œuvre simple et un coût réduit, principalement en raison de l'absence d'électronique, Cependant, si une partie du GPV n'est pas exposée à la lumière et que la charge est une batterie, celle-ci pourrait se décharger dans le GPV, lequel pourrait alors fonctionner comme un récepteur, risquant ainsi d'être endommagé de manière irréversible. Pour éviter cette situation, il est essentiel d'installer une diode anti-retour entre

Le GPV et la charge, comme illustré dans la figure. II.1.



**Fig. II.1.** Connexion directe entre un GPV et une charge.

L'inconvénient de cette configuration est que la puissance extraite d'un générateur photovoltaïque (GPV) lorsqu'il est connecté directement à une application est souvent très éloignée de la puissance maximale que peut délivrer le GPV ; elle ne présente aucune limitation ni possibilité de régler la tension de la batterie. Comme le montre la figure suivante.



**Fig. II.2.** Points de fonctionnement d'un GPV en connexion directe avec la charge.

Comme illustré dans la figure. II.2, un générateur photovoltaïque (GPV) peut être directement connecté à trois types de charges en courant continu.

- une charge de type source de tension continue,
- une charge de type source de courant continu,
- une charge purement résistive.

Nous avons représenté les caractéristiques  $I(V)$  et  $P(V)$  d'un GPV ainsi que les caractéristiques  $I(V)$  des trois types de charges. Pour un courant optimal ( $I_{OPT}$ ) et une tension

optimale ( $V_{OPT}$ ), la puissance fournie par le générateur est maximale ( $P_{MAX}$ ) et le point de fonctionnement du GPV dans ce cas-là est nommé PPM (Point de Puissance Maximale), Ensuite, nous remarquerons le point d'intersection entre les caractéristiques  $I(V)$  du générateur et celles des trois types de charges

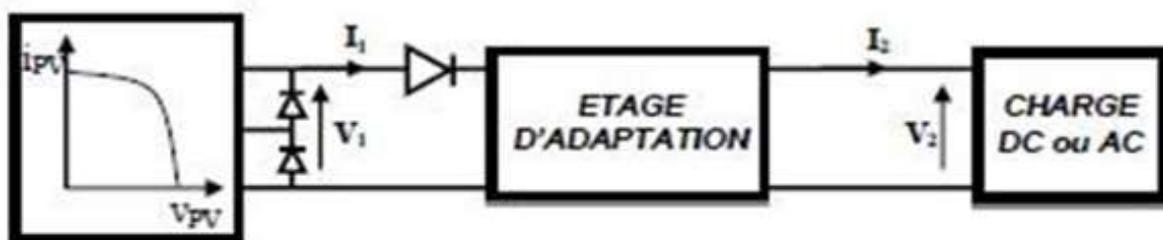
- Point A pour une charge de type source de tension ;
- Point B pour une charge en source de courant ;
- Point C pour une charge résistive.

Pour ces trois points (A, B, C), la puissance fournie par le générateur est respectivement  $PA$ ,  $PB$  et  $PC$ . Ces cas de figures montrent que valeurs de puissance inférieures à la puissance maximale disponible  $P_{MAX}$ , donc une perte d'une partie de la puissance dérivable aux bornes du générateur  $PV$  entraîne finalement des pertes de production énergétique significatives, La différence étant perdue sous forme de chaleur dissipée dans le générateur.

### II.3. Etage d'adaptation entre un Générateur PV et une charge

Comme nous vu Précédemment un générateur PV présente des caractéristiques  $I(V)$  non linéaires avec des points de puissance maximale ( $PPM$ ). La production de puissance varie fortement en fonction de l'éclairement, de la température, et du vieillissement du système. De plus, en fonction des caractéristiques de la charge connectée au générateur PV, il peut y avoir un écart important entre la puissance maximale que le générateur pourrait fournir et celle effectivement transférée à la charge en mode connexion directe. Pour garantir que le générateur photovoltaïque (GPV) fonctionne à pleine puissance et avec un rendement élevé, il est nécessaire d'adapter le générateur à la charge. Cela est réalisé en insérant entre le GPV et la charge un quadripôle d'adaptation, qui est un convertisseur d'énergie continu-continu de type "hacheur"

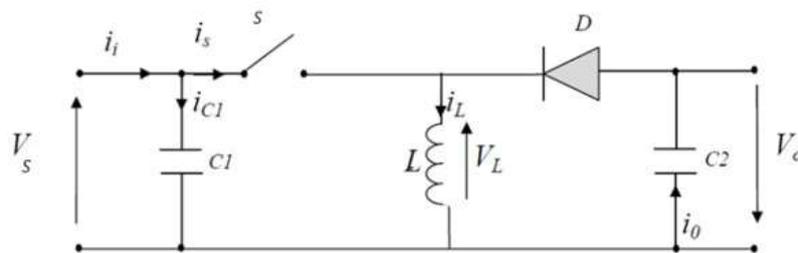
Afin de maintenir un générateur photovoltaïque (GPV) à son point de puissance maximale (PPM), on utilise souvent des contrôleurs MPPT (Maximum Power Point Tracking). Ces contrôleurs visent à réduire au minimum l'écart entre la puissance de fonctionnement réelle et la puissance maximale de référence, qui varie en fonction des conditions climatiques.



**Fig. II.3.** Connexion d'un GPV à une charge à travers un étage d'adaptation.

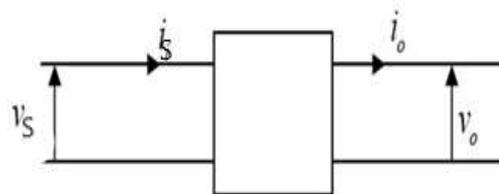
## II.4. Convertisseurs DC/DC

Les hacheurs sont des convertisseurs de courant continu à courant continu qui permettent de contrôler la puissance électrique dans des circuits fonctionnant en courant continu avec une grande flexibilité et un rendement élevé. Ils sont composés de condensateurs, d'inductances et de commutateurs. Dans des conditions idéales, ces composants ne consomment aucune puissance active, ce qui explique les bons rendements obtenus avec les hacheurs. La technique du découpage, qui est apparue vers les années 1960, a résolu les problèmes de mauvais rendement et d'encombrement des alimentations série. Dans une alimentation à découpage (Figure. II.4), la tension d'entrée est modulée à une fréquence donnée par un transistor qui est alternativement activé et désactivé. Cela crée une onde carrée de tension qui peut être ensuite lissée pour obtenir une tension continue.



**Fig. II.4.** Schéma de principe d'un type d'alimentation à découpage.

D'un point de vue circuit, un hacheur peut être représenté comme un quadripôle (Figure. II.5), agissant comme un élément de liaison entre deux parties d'un réseau. On peut le comparer à un transformateur pour grandeurs électriques continues [25].



**Fig. II.5.** Schéma d'un quadripôle électrique.

La régulation de la tension de sortie à un niveau constant est effectuée en ajustant le "rapport cyclique", qui représente la fraction de la période de commutation pendant laquelle l'interrupteur est activé. L'interrupteur est généralement un dispositif semi-conducteur en mode tout-ou-rien (bloqué ou saturé), tel qu'un transistor MOSFET. Lorsque le dispositif semi-conducteur est bloqué, son courant est nul, ce qui signifie que sa dissipation de puissance est négligeable. En

revanche, lorsque le dispositif est saturé, la chute de tension à travers lui est quasiment nulle, ce qui entraîne une perte de puissance très faible [25].

Pendant le fonctionnement du hacheur, le transistor sera commuté à une fréquence constante :  $f_d$  avec un temps de fermeture  $= \alpha T_d$  et un temps d'ouverture  $= (1 - \alpha) T_d$ .

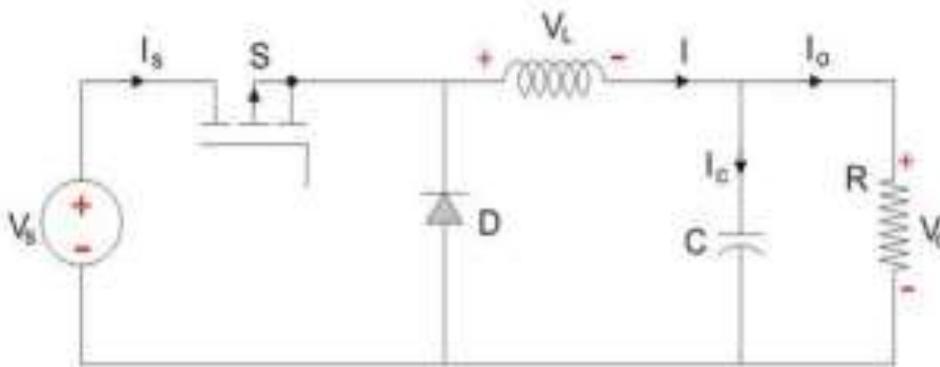
Où :

- $T_d$  est la période de commutation qui est égale à  $\frac{1}{f_d}$
- $\alpha$  Le rapport cyclique du commutateur ( $\alpha \in [0, 1]$ ).

## II.5. Hacheur dévolteur (Buck)

Un hacheur Buck, aussi appelé convertisseur abaisseur, est un type de convertisseur DC-DC qui abaisse la tension continue (DC) d'entrée à une tension de sortie inférieure. Il est souvent utilisé dans les applications où une tension plus basse est nécessaire, comme dans les systèmes d'alimentation à découpage. Le fonctionnement d'un hacheur Buck implique la commutation périodique d'un interrupteur pour contrôler la tension de sortie. Cela permet de réguler efficacement la tension de sortie tout en maintenant un bon rendement énergétique.

La figure (I.6) illustre le principe de fonctionnement de ce convertisseur.



**Fig. II.6.** Structures de base d'hacheur Buck.

Lorsque  $S$  est fermée et  $D$  est ouvert durant l'intervalle  $[0, \alpha T_d]$ , les équations de la tension et du courant sont donnés par les équations II.1 et II.2.

$$V_s = L \times \frac{di_L}{dt} + V_0 \quad (\text{II.1})$$

$$i_L = I_{min} + \frac{V_s - V_0}{L} \quad (\text{II.2})$$

À l'instant  $t = \alpha T_d$ , le courant atteint sa valeur maximale dans l'inductance  $I_{max}$

$$I_{max} = I_{min} + \frac{V_S - V_0}{L} \times \alpha T_d \quad (\text{II.3})$$

Lorsque  $S$  est ouvert et  $D$  est fermée durant l'intervalle  $[\alpha T_d, T_d]$ ,

$$L \frac{di_L}{dt} = -V_0 \quad (\text{II.4})$$

$$i_L = I_{max} - \frac{V_0}{L} \times (1 - \alpha) T_d \quad (\text{II.5})$$

A l'instant  $t = T_d$ , le courant dans l'inductance revient à sa valeur minimale  $I_{min}$  exprimé comme suit :

$$I_{min} = I_{max} - \frac{V_0}{L} \times (1 - \alpha) \times T_d \quad (\text{II.6})$$

Avec  $\Delta i_L = I_{max} - I_{min}$  : représente l'ondulation du courant dans l'inductance L l'égalité des deux équations de l'ondulation de courant (II.2) et (II.6) donne la valeur moyenne de la tension de sortie  $V_s$  :

$$V_0 = \alpha V_s \quad (\text{II.7})$$

En appliquant le principe de conservation de puissance entre l'entrée et la sortie du convertisseur, on peut établir la valeur moyenne du courant dans l'inductance.

$$I_L = I_0 \quad (\text{II.8})$$

Donc le convertisseur est abaisseur en tension.

## II.6. Hacheur Buck-Boost

Un hacheur Buck-Boost est un type de convertisseur DC\_DC utilisé pour réguler la tension de sortie, qui peut être supérieure, inférieure ou égale à la tension d'entrée, en fonction des besoins. Il est souvent utilisé dans les applications où une large plage de tensions de sortie est nécessaire, comme dans les systèmes d'alimentation à découpage. Ce type d'hacheur est capable de fournir une tension de sortie stabilisée même lorsque la tension d'entrée varie.

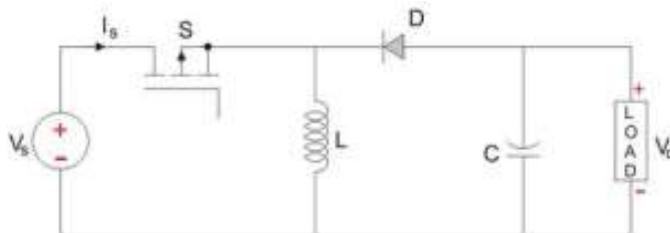


Fig. II.7. Structures de base d'un hacheur Buck-Boost.

Lorsque  $S$  est fermée et  $D$  est ouvert durant l'intervalle  $[0, \alpha T_d]$  :

On a les équations qui régissent le système comme suit :

$$V_S = L \times \frac{di_L}{dt} \quad (\text{II.9})$$

$$i_L = I_{min} + \frac{V_S}{L} \times t \quad (\text{II.10})$$

À l'instant  $t = \alpha T_d$ , le courant atteint sa valeur maximale dans l'inductance  $I_{max}$

D'où :

$$I_{max} = I_{min} + \frac{V_S}{L} \times \alpha T_d \quad (\text{II.11})$$

Lorsque  $S$  est ouvert et  $D$  est fermée durant l'intervalle  $[\alpha T_d, T_d]$  :

On prend maintenant les nouvelles équations :

$$L \times \frac{di_L}{dt} = V_0 \quad (\text{II.12})$$

$$i_L = I_{max} + \frac{V_0}{L} \times (1 - \alpha) T_d \quad (\text{II.13})$$

À l'instant  $t = T_d$ , le courant dans l'inductance revient à sa valeur minimale  $I_{min}$  comme suit :

$$I_{min} = I_{max} + \frac{V_0}{L} \times (1 - \alpha) T_d \quad (\text{II.14})$$

Ainsi que l'ondulation du courant dans l'inductance est exprimée comme suit :

$$\Delta i_L = I_{max} - I_{min} \quad (\text{II.15})$$

L'égalité des deux équations de l'ondulation de courant (II.11) et (II.14) donne la valeur moyenne de la tension de sortie  $V_S$  :

$$V_0 = \frac{\alpha V_S}{(1 - \alpha)} \quad (\text{II.16})$$

En appliquant le principe de conservation de puissance entre l'entrée et la sortie du convertisseur, on peut établir la valeur moyenne du courant dans l'inductance comme suit :

$$I_L = \frac{I_0}{1 - \alpha} \quad (\text{II.17})$$

La tension de sortie du convertisseur Buck-Boost est négative par rapport à la tension d'entrée. Son amplitude peut être supérieure ou inférieure à celle de la tension d'entrée selon la valeur du rapport cyclique. C'est un abaisseur-élevateur-inverseur en tension.

## II.7.Hacheur survolteur (Boost)

Un hacheur Boost, aussi connu sous le nom de convertisseur élévateur (boost converter en anglais), est un type de convertisseur DC-DC utilisé pour augmenter la tension continue (DC). Il fonctionne en prenant une tension d'entrée plus basse et en la convertissant en une tension de sortie plus élevée. Cela est utile dans de nombreuses applications telles que les systèmes d'alimentation des circuits électroniques, les systèmes photovoltaïques, les véhicules électriques, etc.

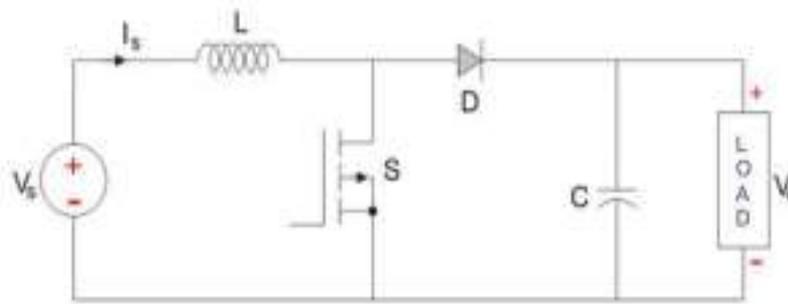


Fig. II.8.Structures de base d'un hacheur Boost.

### II.7.1.Principe de fonctionnement

L'application des lois de Kirchhoff sur les deux circuits équivalents des deux phases de fonctionnement donne :

- Pour la première période  $\alpha T_d$  :

$$V_L = V_S = L \times \frac{di_L}{dt} \quad (\text{II.18})$$

$$I_C = C \frac{dV_0}{dt} = -I_0 \quad (\text{II.19})$$

- Pour la deuxième période  $(1-\alpha) T_d$  :

$$V_L = L \times \frac{di_L}{dt} = V_S - V_0 \quad (\text{II.20})$$

$$I_C = C \frac{dV_L}{dt} = I_L - I_0 \quad (\text{II.21})$$

Les systèmes d'équations de base (II.18, 19, 20,21) représentent le convertisseur Boost pour une période  $\alpha T_d$  et  $(1-\alpha) T_d$  respectivement. Le convertisseur oscillant entre ces deux états avec une fréquence élevée, nous devons trouver une représentation dynamique Approximée valable pour les deux intervalles de temps. Pour cela nous considérons que la variation des variables

dynamiques  $I_C$ ,  $V_L$  est de forme linéaire, en d'autres termes nous pouvons faire une approche d'exponentielle par un segment  $e^\varepsilon \approx 1 + \varepsilon$  Si ( $\varepsilon \ll 1$ ) et ainsi la dérivée de ces grandeurs sera constante. Cette approche nous permet de décomposer l'expression de la valeur moyenne de la dérivée de la variable dynamique  $x$  sur les deux intervalles de temps  $\alpha T_d$  et  $(1 - \alpha)T_d$  [26].

$$\left\langle \frac{dx}{dt} \right\rangle T_d = \frac{dx}{dt} \alpha T_d + \frac{dx}{dt} (1 - \alpha) T_d \quad (\text{II.22})$$

Où :

$\left\langle \frac{dx}{dt} \right\rangle$  : Est la valeur moyenne de la dérivée de  $x$  sur une période  $T_d$

En appliquant la relation (II.22) sur les systèmes d'équations (II.18, 19, 20,21) on obtient les équations qui régissent le système sur une période entière :

$$I_C = C \frac{dV_0}{dt} \alpha T_d = -I_0(\alpha T_d) + (I_L - I_0)(1 - \alpha) T_d \quad (\text{II.23})$$

$$V_i = L \frac{dI_L}{dt} \alpha T_d = V_S(\alpha T_d) + (V_S - V_0)(1 - \alpha) T_d \quad (\text{II.24})$$

En arrangeant les termes des équations précédentes, (pour qu'on puisse interconnecter le Boost avec les autres blocs de simulation), on obtient la modélisation en valeur moyenne du Convertisseur Boost.

$$I_0 = (1 - \alpha) I_L \quad (\text{II.25})$$

$$V_S = (1 - \alpha) V_0 \quad (\text{II.26})$$

### II.7.2. Modèle mathématique équivalent

Le modèle mathématique du hacheur Boost est obtenu par l'application des lois de Kirchhoff sur le schéma de base du hacheur, représenté en figure II.9 et par rapport au régime de fonctionnement et la condition de l'interrupteur  $S$ .

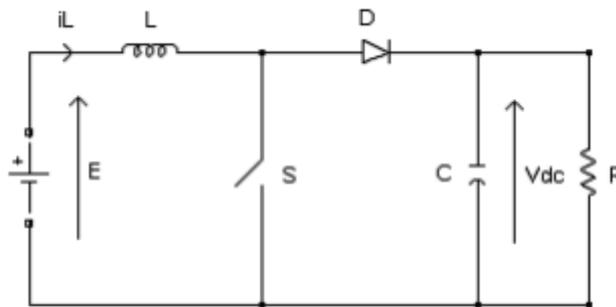


Fig. II.9. Schéma de principe d'un hacheur parallèle.

$$L \times \frac{di_L}{dt} = E - V_{dc} \times (1 - u) \quad (\text{II.27})$$

$$C \times \frac{dV_d}{dt} = i_L \times (1 - u) - \frac{V_{dc}}{R} \quad (\text{II.28})$$

Les équations dynamiques du hacheur sont dérivées pour le courant dans l'inductance et la tension aux bornes du condensateur en régime de conduction continu exprimé en (II.27) et (II.28), où  $i_L$  est le courant dans la bobine  $L$ ,  $E$  est la tension d'entrée,  $V_{dc}$  est la tension de sortie et  $u$  est la commande. Soit  $x_1 = i_L$  et  $x_2 = V_{dc}$  alors les équations d'état deviennent :

$$\dot{x}_1 = \frac{E}{L} - \frac{x_2(1-u)}{L} \quad (II.29)$$

$$\dot{x}_2 = \frac{x_1(1-u)}{C} - \frac{x_2}{RC} \quad (II.30)$$

Alors, la représentation classique en espace d'état  $\dot{x}' = Ax + Bu$  de (II.29) se transforme en :

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1-u}{L} \\ \frac{1-u}{C} & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L} \\ 0 \end{bmatrix} E \quad (II.31)$$

Les paramètres du système sont : l'inductance de la bobine  $L$  en  $[H]$ , la capacité du condensateur  $C$  en  $[F]$  et la résistance de la charge  $R$  en  $[\Omega]$ . Les variables d'état sont le courant dans la bobine et la tension aux bornes du condensateur. Le signal de contrôle  $u$  est compris dans le domaine discret de  $[0 ; 1]$  et il indique l'état de l'interrupteur  $S$  : ouvert pour 0 et fermé pour 1. Il peut être remplacé par sa valeur moyenne sur une période de découpage  $\alpha$  qui représente le rapport cyclique  $\alpha = \frac{T_{on}}{T_s}$  où  $T_{on}$  est le temps de conduction et  $T_s$  est la période de découpage. La figure. II.10, représente l'équation (II.31) dans l'environnement Matlab/Simulink réalisation Simulink de l'équation (II.31).

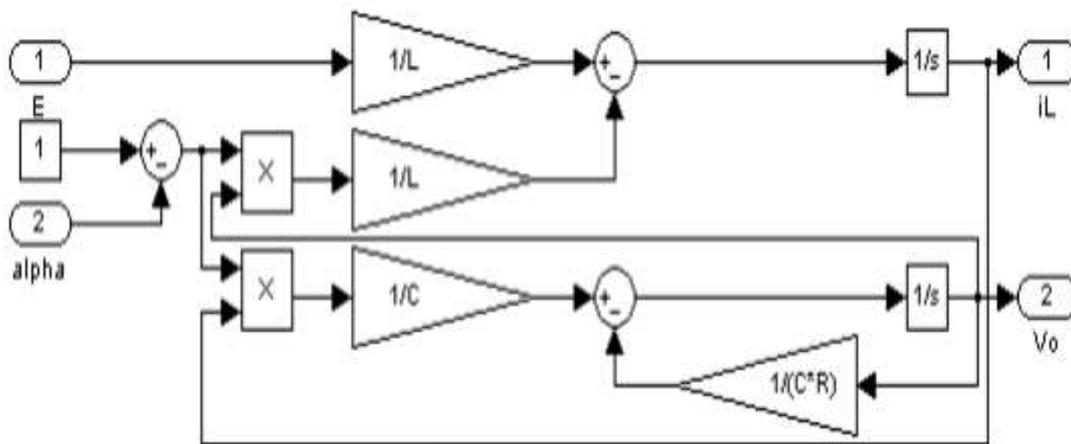


Fig. II.10. Modèle mathématique du convertisseur Boost dans Simulink.

### II.7.3. Dimensionnement des composants du convertisseur

Pour réduire les variations des courants et des tensions sans augmenter inutilement le poids et le coût des composants du circuit convertisseur, il est essentiel de dimensionner chaque composant de manière appropriée en fonction des variations désirées. Cette considération revêt une importance particulière lors du dimensionnement de l'inductance  $L$  pour garantir que le courant admissible par l'interrupteur est respecté, surtout dans les cas où les variations du courant  $I_L$  sont plus significatives que les autres variations [26].

- En appliquant la relation  $V_L = L \frac{dI_L}{dt}$  est on obtient :

$$\frac{dI_L}{dt} = \frac{V_L}{L} \approx \frac{V_S}{L} \quad (\text{II.32})$$

- La valeur crête à crête du courant  $I_L$  est donné par :

$$I_{LCC} = 2\Delta I_L \approx \frac{V_S}{L} \alpha T_d \quad (\text{II.33})$$

- La valeur de l'inductance  $L$  à choisir pour certaine ondulation  $\Delta I_L$  est :

$$L \approx \frac{V_S}{2\Delta I_L} \alpha T_d \quad (\text{II.34})$$

- Pour le calcul de la capacité  $C$  du condensateur on a :

$$\frac{dV_0}{dt} = \frac{I_S}{C} \approx \frac{I_0}{C} \quad (\text{II.35})$$

- La valeur d'ondulation crête à crête de tension de sortie est :

$$V_{CCC} = 2\Delta V_C = \frac{I_0}{C} \alpha T_d \quad (\text{II.36})$$

- La valeur de la capacité  $C$  est donnée par :

$$C \approx \frac{I_0}{2\Delta V_C} \alpha T_d \quad (\text{II.37})$$

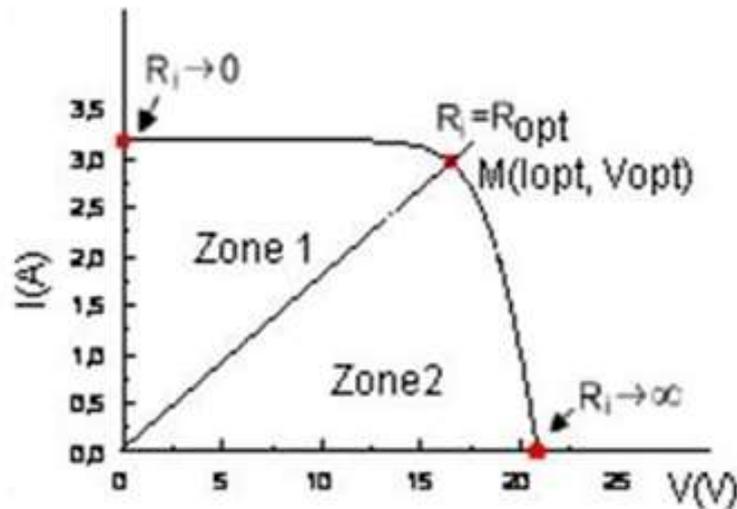
### II.8. Mécanisme d'adaptation de l'impédance

Le convertisseur d'énergie photovoltaïque sélectionné est un hacheur qui peut fonctionner en mode survolteur, dévolteur ou en mode dévolteur-survolteur, en fonction des besoins de la charge. Ce type de convertisseur est conçu pour ajuster en temps réel l'impédance apparente de la charge pour qu'elle corresponde à l'impédance du champ photovoltaïque au point de puissance maximale. Ce processus d'ajustement est souvent appelé suivi du point de puissance maximale (MPPT, Maximum Power Point Tracking).

Dans la Figure. II.11, la région (1) de la caractéristique courant-tension  $I-V$  correspond à un fonctionnement en mode "hacheur dévolteur", où le suivi du point de puissance maximale (MPPT) est assuré pour toute résistance  $R_i$  comprise entre 0 et la résistance optimale ( $R_{opt}$ ). Cette situation s'inverse pour la région (2) de la caractéristique courant-tension  $I-V$ , qui représente un

fonctionnement en mode "hacheur survolteur". Dans cette région, le MPPT est assuré pour toute résistance  $R_i$  comprise entre la résistance optimale ( $R_{opt}$ ) et l'infini.

Ainsi, il est crucial de choisir entre un convertisseur dévolteur ou survolteur en fonction de la charge spécifique, et l'un ou l'autre type peut être utilisé en fonction de la configuration du circuit. Si la tension requise par la charge peut fluctuer au-dessus ou en dessous de celle fournie par la source, il est nécessaire d'utiliser un hacheur dévolteur/survolteur. Dans cette section, nous nous concentrons sur l'utilisation du hacheur survolteur.



**Fig. II.11.** Répartition de la caractéristique selon le fonctionnement du hacheur utilisé [27].

L'impédance vue par PV est l'impédance d'entrée du convertisseur. En utilisant notre cas du convertisseur BOOST, la relation de donnant l'impédance  $R_{in}$  vue par le panneau est [28].

$$R_{in} = \frac{V_{in}}{I_{in}} \quad (\text{II.38})$$

Et nous avons démontré précédemment qu'en valeur moyenne :

$$V_0 = \frac{1}{1-\alpha} V_{in} \quad (\text{II.39})$$

Et que :

$$I_{in} = \frac{1}{1-\alpha} I_0 \quad (\text{II.40})$$

D'où :  $R_{in} = (1 - \alpha)^2 R_{ch} / \alpha$  : est le rapport cyclique du convertisseur BOOST.

- ✚ Si le point de fonctionnement se trouve à gauche du point de puissance maximale (PPM), il est nécessaire d'augmenter la tension du panneau solaire pour l'atteindre. Cela implique d'augmenter la valeur de l'impédance perçue  $R_{in}$  en diminuant le rapport cyclique  $\alpha$ .
- ✚ Si le point de fonctionnement se situe à droite du point de puissance maximale (PPM), la réduction de l'impédance perçue  $R_{in}$  déplacera la tension de fonctionnement vers la gauche en augmentant le rapport  $\alpha$ .

## II.9. Limitation de la commande MPPT

Le principal désavantage de la commande MPPT réside dans l'absence de régulation sur la sortie pendant la recherche du point de puissance maximale. L'algorithme ne peut pas simultanément contrôler l'entrée et la sortie. Les fluctuations de tension et de courant de sortie peuvent être observées en raison des variations atmosphériques.

La commande MPPT ajuste le rapport cyclique pour aligner l'impédance d'entrée du convertisseur et de la charge avec l'impédance optimale du module photovoltaïque.

- On peut écrire donc :

$$R_{in} = R_{opt} = \frac{V_{ppm}}{I_{ppm}} \quad (\text{II.41})$$

L'équation (II.39) pour le convertisseur BOOST est résolue pour le rapport cyclique ( $\alpha$ ) :

$$\alpha = 1 - \sqrt{\frac{R_{in}}{R_{ch}}} \quad (\text{II.42})$$

De l'équation (II.26), la tension de sortie du convertisseur est la suivante :

$$V_0 = \frac{1}{1-\alpha} \times V_S \quad (\text{II.43})$$

De l'équation (II.25), le courant de sortie du convertisseur est le suivant :

$$I_0 = (1 - \alpha) I_S \quad (\text{II.44})$$

## II.10. Conclusion

Dans ce chapitre, une analyse détaillée et un état de l'art non exhaustif sur les convertisseurs DC-DC utilisé comme interface entre la charge est le générateur photovoltaïque pour que celui-ci fonctionne à un rendement optimal a été présentée toute en étudiant leurs principes de fonctionnement, ainsi que les principaux types et leur éléments constitutifs. Le mécanisme d'adaptation de l'impédance du convertisseur-charge à l'impédance optimale du GPV a été développé. Pour le fonctionnement optimal d'un système photovoltaïque, il est nécessaire d'utiliser un étage d'adaptation entre le générateur PV et la charge. Les différentes méthodes ou techniques pour la poursuite et la recherche du point maximum de puissance sera abordé dans le prochain chapitre.

# CHAPITRE III

*Techniques de recherche du point de  
puissance maximale MPPT d'un GPV*

### III.1.Introduction

La non linéarité des caractéristiques électriques du générateur photovoltaïque sont influencées par les changements atmosphériques de la radiation solaire de la température ainsi que l'ombrage partiel comme nous avons montré de le chapitre 1. Ceci nécessite un étage d'adaptation (convertisseur DC-DC) permet de transformer les grandeurs électriques continues en grandeurs adaptées à la charge. Cet étage peut être contrôlé par un mécanisme de poursuite nommé dans la littérature Recherche du Point de Puissance Maximale ou bien Maximum Power Point Tracking en anglo-saxon (MPPT), afin de maximiser la puissance produite par le générateur. Plusieurs méthodes pour trouver le MPP ont été élaborées et publiées. Ces techniques diffèrent dans de nombreux aspects tels que la complexité, les capteurs nécessaires, le coût, la rapidité l'efficacité, la robustesse, et la stabilité.

De nombreuses méthodes ont été proposées dans la littérature pour atteindre l'objectif de l'algorithme (MPPT). Ces techniques peuvent être classées en trois catégories, les algorithmes indirects qui se basent sur la mesure d'une fraction de tension de circuit ouvert ou sur la mesure d'une fraction de courant de court-circuit qui sont les plus utilisées dans les systèmes PV commerciaux. Les méthodes directes ou MPPTs conventionnels qui incluent la méthode de Perturbation et Observation (P&O), Incrémentation de la Conductance (INC) et Hill Climbing (HC), et les algorithmes basés sur l'intelligence artificielle (IA) dont celles basées sur la logique floue. Chacune ayant une approche distincte pour atteindre le MPP [29].

Dans ce chapitre, on abordera les différentes méthodes MPPT les plus fréquentes dans la littérature, on commence par la présentation des méthodes indirectes, on aborde en premier lieu les méthodes directes les plus utilisées dans les systèmes PV commerciaux telles que les techniques Perturbation et Observation (P&O) et Incrémentation de la Conductance (INC). Enfin, on présente le troisième type relatif aux méthodes intelligentes, où on s'intéresse aux techniques basées sur les modèles flous de Mamdani et celle basée sur l'optimisation par essais particuliers (PSO).

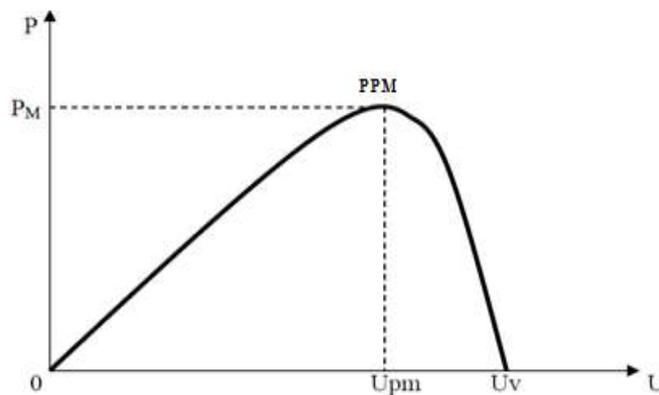
### III.2.Point de puissance maximale (MPP)

Le raccordement d'une charge à un générateur photovoltaïque est le mode de couplage le plus simple possible. Dans ce cas, le point de fonctionnement se situe à l'intersection de la droite de charge et de la caractéristique  $I-V$  du générateur. Cependant, Ce point ne coïncide généralement pas avec le point de puissance maximale du système, pour résoudre ce problème, on peut soit modifier la configuration du générateur photovoltaïque, soit ajouté un dispositif de recherche de point de puissance maximale entre le générateur et la charge.

Grâce aux grandeurs physiques agissant sur la caractéristique électrique courant tension ( $I-V$ ), nous permet de créer une technique d'utilisation plus performante, et plus efficace pour extraire un point de puissance maximale d'une manière permanente sans perte dans l'énergie transférée du générateur photovoltaïque vers la charge.

L'exploitation optimale de l'énergie électrique disponible aux bornes du générateur photovoltaïque peut contribuer à la réduction du coût global du système. Il existe pour satisfaire ce but. Pour obtenir ce résultat on utilise un système d'adaptation basé sur la commande MPPT, on donnera dans la suite une présentation et description du système MPPT.

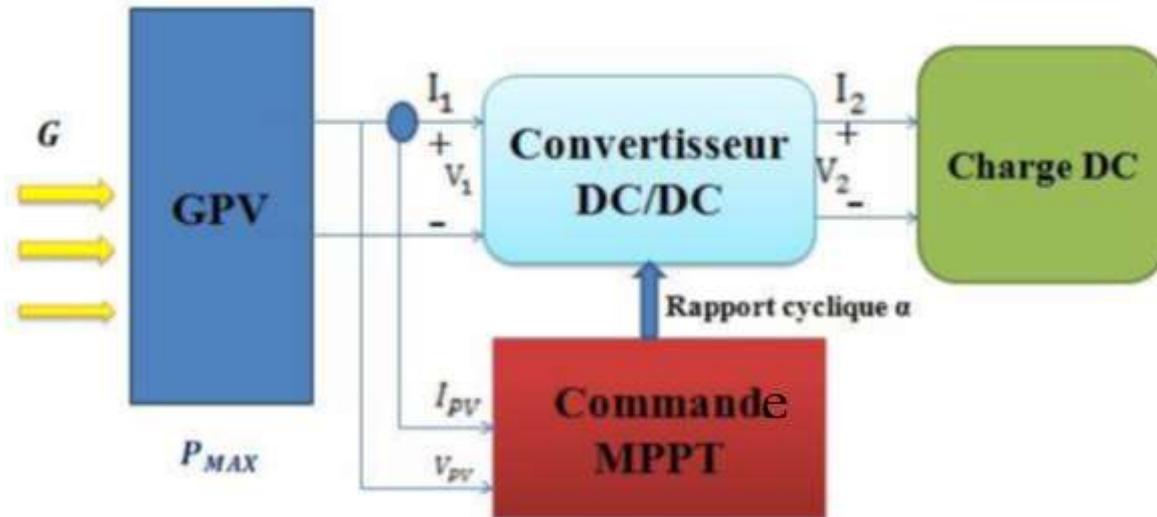
Les premières utilisations du MPPT remontent à 1968 dans le cadre d'applications spatiales ayant pour générateur électrique des panneaux photovoltaïques. Le développement du MPPT a constitué un thème techniquement attrayant, si bien que finalement, un grand nombre de procédures et techniques ont été développés. Elles varient en complexité, capteurs nécessaires, vitesse de convergence, coût, efficacité, matériel pour la réalisation, etc. Un champ photovoltaïque caractérise par un point de puissance maximum, représentant un couple courant-tension ( $I, U$ ) ou la puissance  $P=U \times I$  est optimale. Ce couple ( $I, U$ ) détermine un point de fonctionnement nommé le point de puissance maximale (MPP) [30].



**Fig.III.1.** Courbe caractéristique de puissance d'un GPV [31].

### III.3. Recherche de point de puissance maximum (MPPT)

L'idée principale de cette commande est de faire varier le rapport cyclique du convertisseur DC-DC pour parer aux contraintes engendrées par différents changements. L'algorithme MPPT peut être plus ou moins compliqué pour rechercher le PPM. En général, cet algorithme est basé sur la variation du rapport cyclique en fonction de l'évolution de ses paramètres d'entrée (courant, tension et puissance du générateur PV) jusqu'à l'atteinte du PPM. Plusieurs méthodes MPPTs sont développées dans la littérature [31].



**Fig.III.2.** Chaîne de conversion PV contrôlée par une commande MPPT.

Des méthodes spécifiques sont disponibles pour optimiser le fonctionnement des dispositifs à leurs points de performance maximale, même sans connaître ces points à l'avance ni les raisons des éventuelles modifications ultérieures. Pour les sources d'énergie telles que les panneaux solaires, cela implique la recherche du Point de Puissance Maximale (PPM).

Le principe de ces commandes est d'effectuer une recherche du point de puissance maximale (PPM) tout en assurant une parfaite adaptation entre le générateur et sa charge de façon à transférer le maximum de puissance. La figure. III.3 représente une chaîne élémentaire de conversion photovoltaïque associée à une commande MPPT. Comme présenté sur la figure, précédente, la commande MPPT est associée à un quadripôle possédant des degrés de liberté qui permettent de faire une adaptation entre le GPV et la charge. Dans le cas de la conversion solaire, le quadripôle peut être réalisé à l'aide d'un convertisseur *DC-DC*, pour que la puissance fournie par le GPV corresponde à la Puissance maximale ( $P_{max}$ ) qu'il génère et qu'elle puisse ensuite être transférée directement à La charge. La technique de contrôle communément utilisée consiste à agir sur le rapport cyclique de manière automatique pour amener le GPV à sa valeur optimale de fonctionnement Quelles que soient les fluctuations atmosphériques [32].

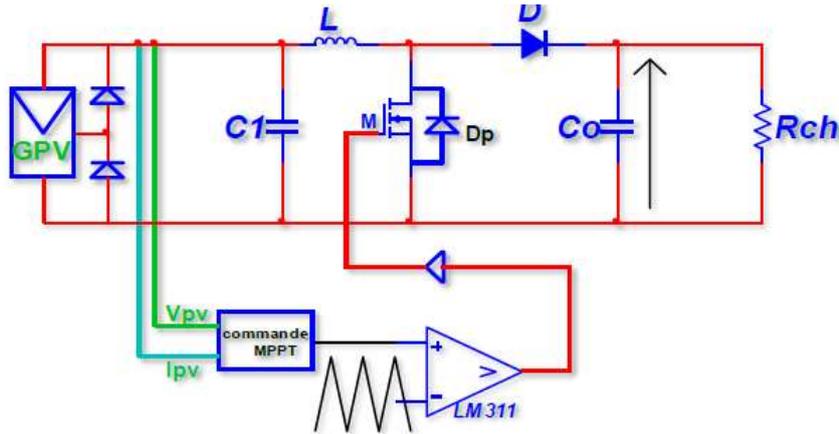


Fig.III.3. Chaîne élémentaire de conversion photovoltaïque avec MPPT.

### III.4.Commandes MPPT des convertisseurs DC-DC

Pour une puissance incidente  $W_1$ , la puissance optimale transférée à la charge ne pourrait être maximale que pour un rapport cyclique bien défini  $\alpha$  est optimal (point  $PPM_1$ ) sur la figure III.4-a. Si la puissance change  $W_2$  alors ce point de puissance maximale est le point  $PPM_2$  et le point de fonctionnement du générateur PV est le point  $P_f$ . Pour converger vers le nouveau point  $PPM_2$ , il faut ajuster le rapport cyclique  $\alpha$  à la valeur  $\alpha_{2opt}$ .

Il en sera de même lorsque la charge  $RL$  change figure. III.4-b, le point de puissance maximale dévie de sa position optimale  $PPM_1$ , pour converger vers ce  $PPM_1$ , il faut agir sur le rapport cyclique  $\alpha$ . Donc, un système photovoltaïque autonome, la régulation automatique est essentielle pour maintenir le point de fonctionnement optimal.

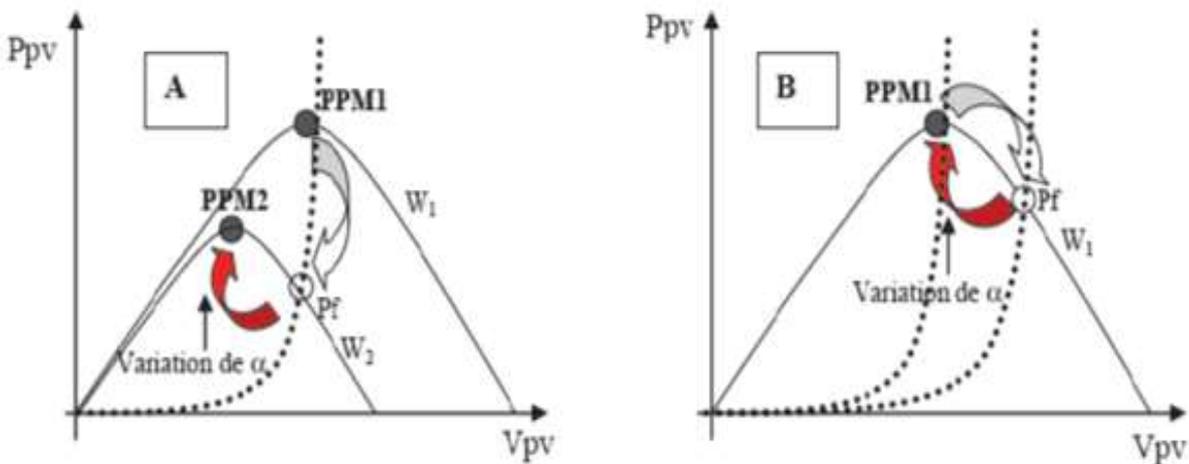


Fig.III.4.Fluctuation du PPM avec l'intensité d'éclairage et la charge RL.

A : Variation de l'éclairage et B : Variation de la charge [31].

### III.5. Critères d'évaluation d'une commande MPPT

L'efficacité d'une commande MPPT peut être affectée par plusieurs critères tels que la rapidité, la précision le temps de réponse, la complexité, la flexibilité et le coût. L'évaluation d'efficacité de la méthode MPPT est basée sur le rendement du point de fonctionnement noté  $\eta_{MPPT}$ , par définition c'est le rapport de pertes de puissance d'un module PV par rapport à la fourniture de la puissance maximale qu'il pourrait produire [32].

$$\eta_{MPPT} = \frac{P_{in}}{P_{max}} \quad (III.1)$$

- **Simplicité** : Le niveau de complexité d'un algorithme influe proportionnellement sur la difficulté d'implémentation et sur la quantité des pertes liées directement au temps de calculs nécessaires.
- **Temps de réponse** : Un système est rapide si son temps de réponse est jugé satisfaisant.
- **Flexibilité** : Une commande MPPT est flexible si elle est capable de suivre le MMP sous les changements des conditions atmosphériques et elle doit être conçue pour fonctionner avec tous les types des panneaux et avec le même taux de précision.
- **Coût** : Le coût est lié directement avec le niveau de complexité de l'algorithme entraînant, le nombre de capteurs et les modes de calcul nécessaire des difficultés d'implémentation.

### III.6. Classification des Commandes MPPT

Les commandes MPPT peuvent être généralement classées en fonction de leur implémentation électronique : analogique, numérique ou mixte. Cependant, une classification plus pertinente serait basée sur le type de recherche qu'elles effectuent et les paramètres qu'elles utilisent. La classification des algorithmes de suivi peut être basée sur la fonction des techniques ou des stratégies de commande utilisées. On peut ainsi distinguer deux catégories principales : méthodes directes et indirectes [33].

#### III.6.1. Commandes MPPT basées sur des relations de proportionnalité.

Ces commandes sont basées principalement sur des relations de proportionnalité entre les paramètres optimaux caractérisant le point de puissance maximal et les paramètres caractéristiques du GPV. Suivant le paramètre contrôlé, on parle alors de commande en régulation de courant ou de tension.

### III.6.1.1. Algorithme à base de la mesure d'une fraction de la tension

Cette technique ou méthode est basée sur la relation linéaire entre la tension de circuit ouvert et la tension optimale donnée par l'équation (III.2). Cette méthode est très simple et facile à implémenter et donne des résultats acceptables.

$$V_{MPP} = K_V \times V_{OC} \quad (III.2)$$

Où :

$K_v$ : est un facteur de tension dépendant des caractéristiques de la cellule PV et qui varie entre 0.73 et 0.8. Pour déduire la tension optimale (la tension à la puissance maximale), on doit mesurer la tension du circuit ouvert  $V_{oc}$  périodiquement en déconnectant le convertisseur *DC-DC* pour une fraction de seconde. Par conséquent, le point de fonctionnement du panneau est maintenu proche de point optimal en ajustant la tension de panneau à la tension optimale calculée. Le processus permet d'agir cycliquement sur le rapport cyclique pour atteindre la tension optimale [34].

Lors de la déconnection de la charge du générateur PV, cette technique présente un inconvénient qui est la perte de la puissance disponible. Aussi, la constante  $K_v$  n'est pas toujours entre 73% et 80% de la tension  $V_{oc}$ . Pour remédier ce problème plusieurs travaux présentés utilisent des cellules pilotes pour obtenir la tension  $V_{oc}$ .

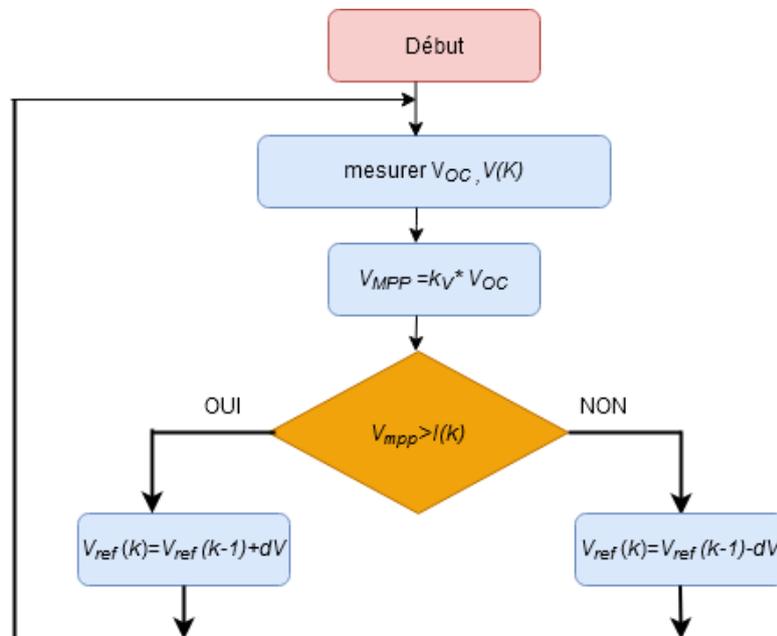


Fig.III.5. Algorithme à Base de la Mesure d'une fraction de la Tension  $V_{oc}$ .

### III.6.1.2. La méthode de la tension de circuit ouvert du générateur

Cette méthode, se base sur la tension du générateur photovoltaïque PV au point de puissance maximale qui est approximativement proportionnelle à sa tension à circuit ouvert  $V_{oc}$ . La constante proportionnelle  $K_1$ , dépend de la technologie de cellules photovoltaïques, du facteur de forme et des conditions météorologiques.

$$K_1 = \frac{V_{MPP}}{V_{OC}} < \text{Cte} \quad (\text{III.3})$$

La tension de circuit ouvert du générateur PV est mesurée et stockée en arrêtant le système à une fréquence donnée. Le point de puissance maximale (MPP) est calculé selon l'équation (III.3), et la tension de fonctionnement est ajustée pour atteindre ce point. Bien que cette méthode soit simple en apparence, il est difficile de déterminer une valeur optimale pour  $K_1$ .

Elle peut donc présenter des inexactitudes, mais elle présente l'avantage d'être simple et à bas prix. Aussi, elle permet une interruption de service transparente pour l'utilisateur, notamment dans les systèmes avec stockage ou la déconnection des panneaux sont réalisées de manière imperceptible [35].

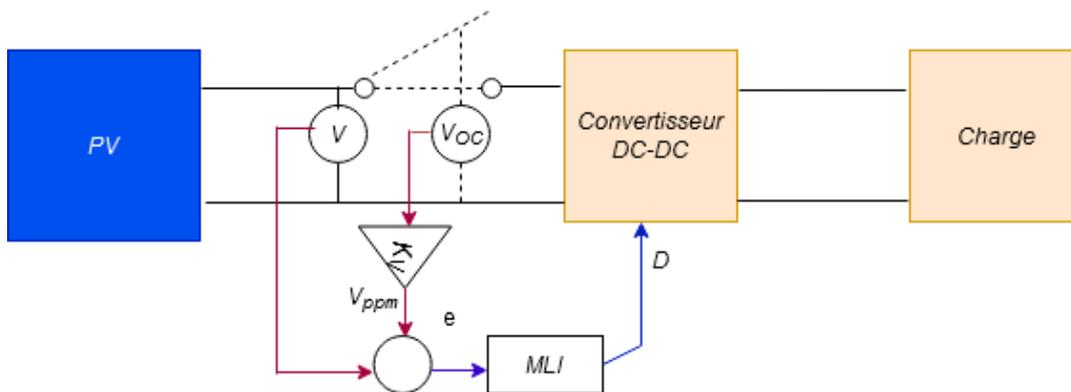


Fig.III.6.Principe de la méthode de la tension du circuit ouvert.

### III.6.1.3. Algorithme à base de la fraction du courant ICC

Cette méthode est similaire à la précédente et est basée sur la proportionnalité entre le courant de court-circuit et le courant au point de puissance maximale :

$$K_2 = \frac{I_{MPP}}{I_{OC}} \cong \text{Cte} < 1 \quad (\text{III.4})$$

Cette méthode présente les mêmes avantages et inconvénients que la méthode de la tension de circuit ouvert. Cette méthode permet de savoir la valeur du courant optimal dans lequel doit fonctionner le panneau PV (Figure III.7). Dans ce cas le courant du point de puissance maximale  $I_{PPM}$  est proportionnel au courant de court-circuit  $I_{CC}$  comme montré l'expression suivante :

$$I_{MPP} = K_C \times I_{CC} \quad (III.5)$$

Où :  $K_C$  est une constante de courant. Elle est généralement comprise entre 0,78 et 0,92. La mesure du courant  $I_{CC}$  durant le fonctionnement est problématique. Un commutateur est généralement ajouté dans la chaîne avant le convertisseur pour court-circuiter le générateur et mesurer le courant  $I_{CC}$ . Ceci augmente le nombre de composants et donc le coût. A noter que la puissance de sortie est réduite lors de la mesure du courant  $I_{CC}$ . De plus, le PPM n'est jamais atteinte [35].

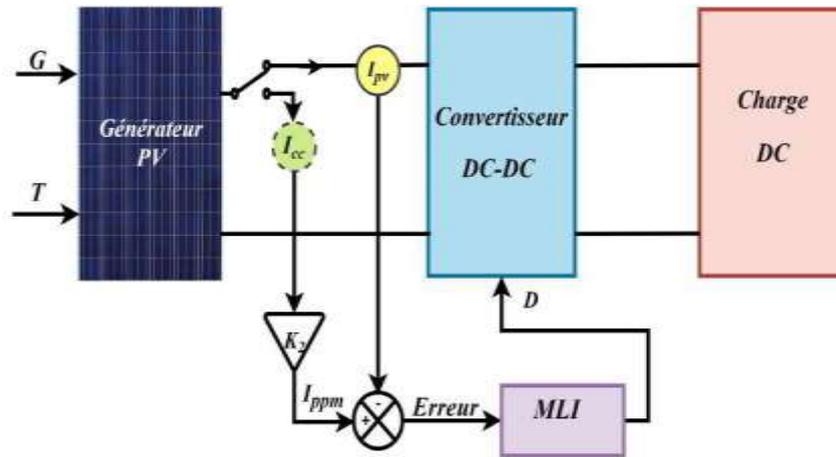


Fig.III.7.Principe de la méthode de la fraction du courant  $I_{CC}$ .

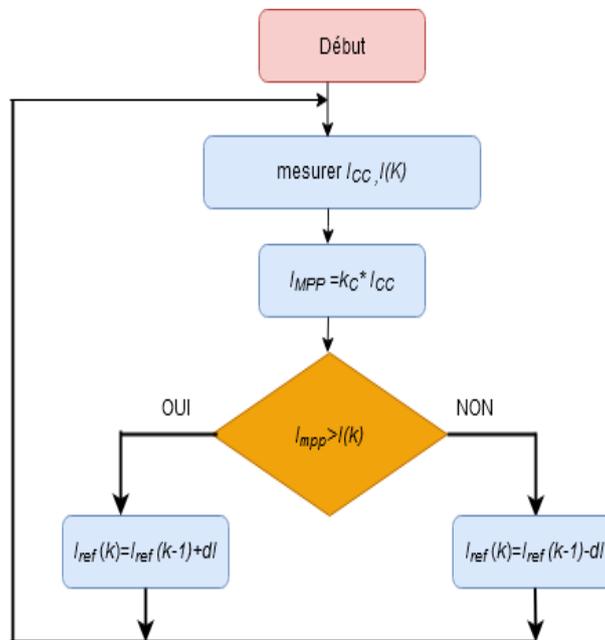


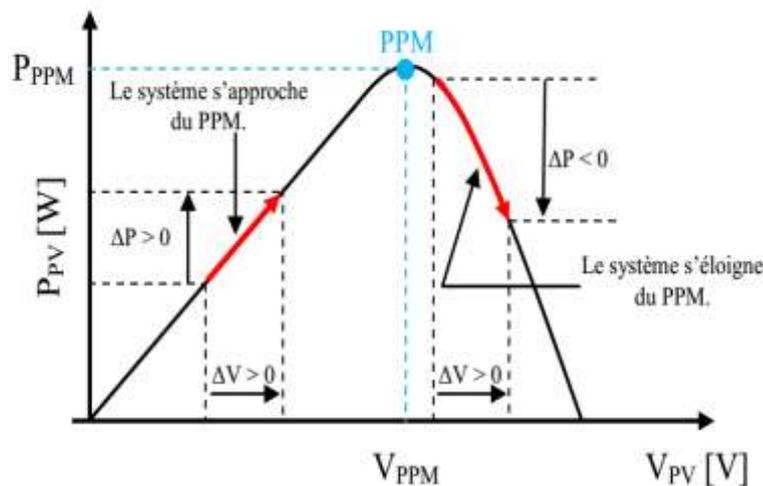
Fig.III.8.Algorithme à base de la mesure d'une fraction du Courant  $I_{CC}$ .

### III.6.2.MPPT Direct

Les méthodes directes sont celles qui se basent sur les mesures de tension et de courant des panneaux solaires et leur algorithme est basé sur la variation de ces mesures. L'avantage de ces algorithmes est qu'ils ne nécessitent pas une connaissance préalable des caractéristiques des panneaux PV et parmi ces méthodes on trouve les commandes connues sous le nom de MPPTs conventionnels qui incluent la méthode de Perturbation et Observation (P&O), Incrémentation de la Conductance (INC) et Hill Climbing (HC).

#### III.6.2.1.Algorithme perturbation et observation (P&O)

L'algorithme de perturbation et observation de poursuite du PPM étant le plus utilisé et il est largement utilisé dans le milieu industriel en raison de sa simplicité d'implémentation et ses bonnes performances. Le principe de cette méthode consiste à perturber le système(en augmentant ou en diminuant la tension de fonctionnement ( $\Delta V_{pv}$ ) et observant l'effet sur la puissance à la sortie  $\Delta P_{pv}$ . La figure. III.9 illustre le fonctionnement de cet algorithme.



**Fig.III.9.**Principe de la MPPT avec la méthode P&O

Si la puissance augmente, alors la perturbation a déplacé le point de fonctionnement vers le MPP. L'algorithme P&O continuera à perturber la tension dans la même sens par contre si la puissance diminue ( $\Delta V_{pv}$ ) la perturbation à dépasser le point de fonctionnement du MPP. L'algorithme inversera la direction de la perturbation suivante.

L'inconvénient majeur de cette technique est la perte de puissance causée par des oscillations autour du point de puissance maximale (MPP) et son temps de réponse relativement faible sous un changement brusque du niveau de l'ensoleillement. Cette technique nécessite des capteurs de courant et de tension. La performance de l'algorithme peut être améliorée en modifiant

le pas de rapport cyclique du convertisseur dans le but d'ajuster le suivi pour mieux atteindre le MPP [36] [37].

La figure III. 10 représente l'organigramme du système PV commandé par l'algorithme P&O [38].

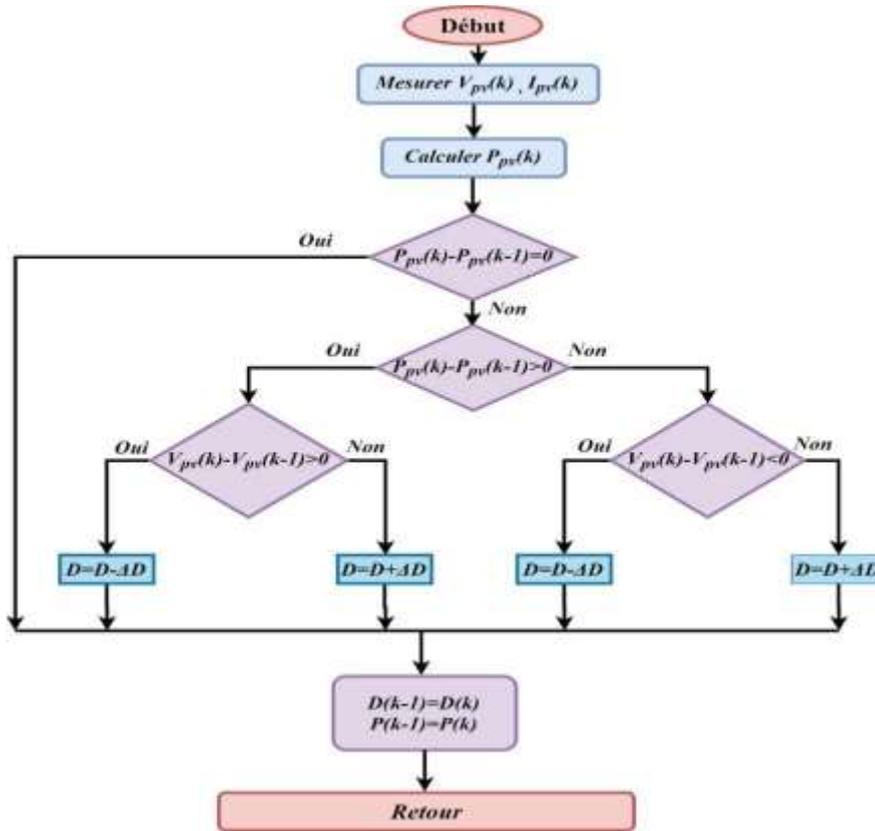


Fig.III.10.Organigramme de la méthode P&O.

A partir du signe de la dérivée de puissance nous pouvons déterminer le sens recherche du point de puissance maximal (défini par le paramètre alpha) illustré dans la figure ci-dessus :

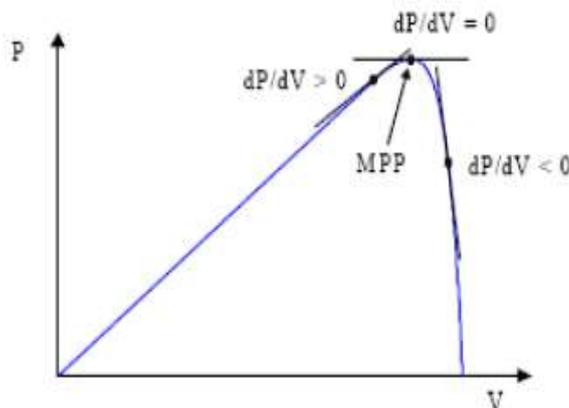


Fig.III.11.Signes de  $dP/dv$  à différentes positions de la courbe caractéristique de Puissance.

Deux capteurs sont généralement nécessaires pour mesurer la tension et le courant à partir desquels la puissance est calculée. Parfois, le courant est estimé à partir de la tension mesurée, éliminant ainsi le besoin du capteur de courant.

Il existe une variante de l'algorithme P&O qui utilise uniquement deux mesures, à savoir le courant et la tension en sortie du convertisseur. Le but est de maximiser la puissance en sortie. Le principe de fonctionnement est alors le même moyennant quelques changements.

Bien que cette technique donne de bons résultats en simulation avec un convertisseur [39].

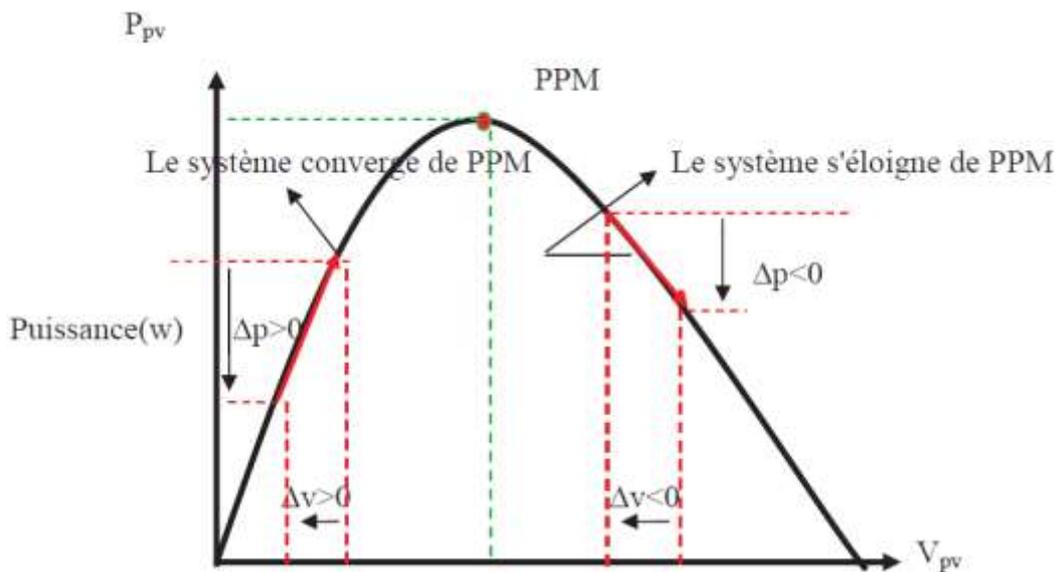


Fig.III.12.Schéma de convergence vers le PPM par P&O [40]

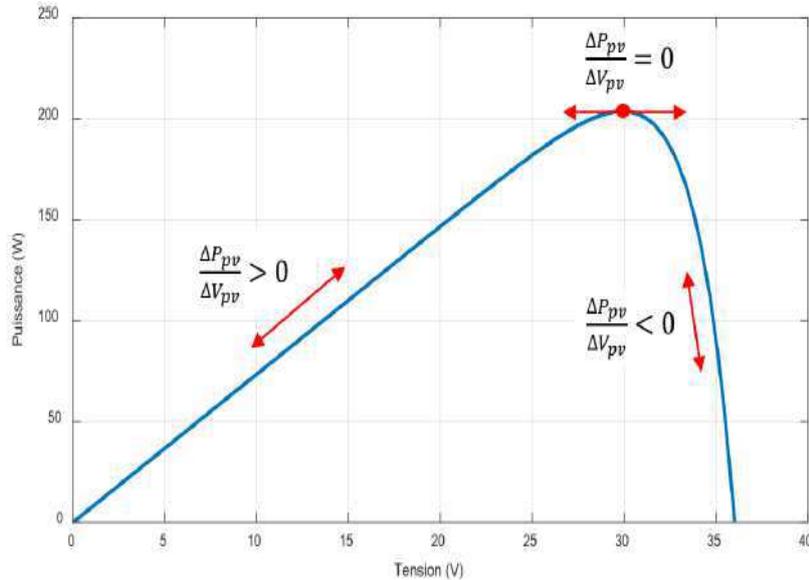
Tableau.III.1.Résume le principe de fonctionnement de cette méthode

Perturbation	Changement de la puissance	Perturbation suivante
Positive	Positive	Positive
Positive	Négative	Négative
Négative	Positive	Négative
Négative	Négative	Positive

### III.6.2.2.Algorithme de l'Incrément de la Conductance (IncCond)

La méthode de conductance incrémentale (IC) est développée pour remédier le problème de la divergence de la P&O dans le cas d'un changement rapide de l'ensoleillement. Cette méthode repose sur le fait que la dérivée de la puissance de sortie P par rapport à la tension du panneau V est égale à zéro au point de puissance maximale MPP. Les caractéristiques P-V du panneau sur la figure. III.13 montrent en outre que la dérivée est

supérieur à zéro à gauche du MPP et inférieur à zéro à droite du MPP. Cela conduit à l'ensemble d'équations suivant [41][42] :



**Fig.III.13.**Méthode conductance incrémentale

$$P = IV \quad (\text{III.6})$$

$$dP/dV = d(IV)/dV \quad (\text{III.7})$$

$$= IdV/dV + VdI/dV \quad (\text{III.8})$$

$$= I + VdI/dV \quad (\text{III.9})$$

$$(1/V)dP/dV = (I/V) + dI/dV \quad (\text{III.10})$$

Cette algorithmme utilise deux grandeurs, La tension et le courant de générateur pour calculer la conductance G et la conductance incrémentale ΔG, pour prendre sa décision augmenter ou diminuer le rapport cyclique de sortie [42].

On définit :

$$G = I_{pv}/V_{pv} \quad (\text{III.11})$$

$$\Delta G = \Delta I_{pv}/\Delta V_{pv} \quad (\text{III.12})$$

Si la conductance est plus grande que la conductance incrémentale, la tension de fonctionnement est inférieure à la tension au point MPP et inversement dans le cas contraire comme montré sur la figure III.13

Les étapes qui résument le principe de cet algorithmme sont :

$$dP/dV = 0 \text{ Si } \Delta G = -G \text{ au PPM}$$

$$dP/dV > 0 \text{ Si } \Delta G > -G \text{ gauche du PPM}$$

$$dP/dV < 0 \text{ Si } \Delta G < -G \text{ droite du PPM}$$

La figure III.14 représente les étapes de l'organigramme de la méthode INC.

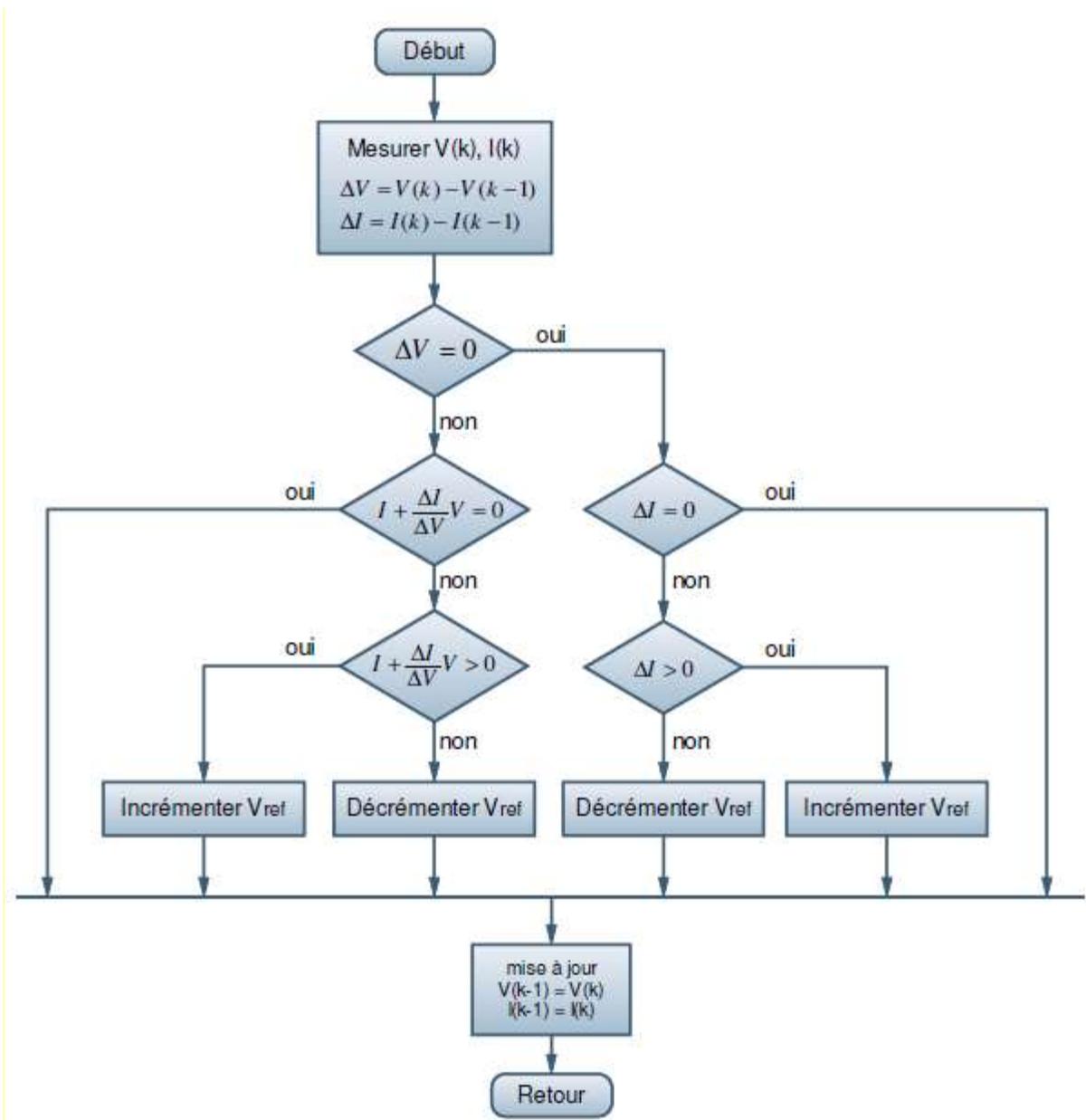


Fig.III.14.Algorithme conductance incrémentale.

La taille de l'incrément détermine la rapidité de la poursuite du MPP. Une poursuite rapide peut être obtenue avec un incrément plus grand, mais Le système ne pourrait pas fonctionner exactement au MPP et oscille autour de celui-ci. Il y a donc, comme pour la méthode P&O, un compromis entre rapidité et précision. Cette méthode Peut être améliorée en amenant le point de fonctionnement près du MPP dans une première étape, puis d'utiliser l'algorithme IncCond pour suivre exactement le MPP dans une deuxième Etape. Généralement, le point de fonctionnement initial est réglé pour correspondre à une charge résistive proportionnelle au rapport de la tension de circuit ouvert  $V_{oc}$  sur le courant de Court-circuit  $I_{cc}$ .

### III.6.2.3. Algorithme Hill Climbing

La méthode Hill Climbing est une méthode d'optimisation permettant de trouver un optimum local parmi un ensemble de configurations. L'idée principale consiste à faire « monter » le point de fonctionnement le long de la caractéristique du générateur présentant un maximum. Pour cela, deux pentes sont possibles. La recherche s'arrête théoriquement quand le point de puissance maximal est atteint. Cette méthode est basée sur la relation entre la puissance du panneau et la valeur du rapport cyclique appliqué au convertisseur. Mathématiquement, le PPM est atteint lorsque

$$\frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} = 0$$

$$\frac{\partial P_{PV}}{\partial V_{PV}} < 0 \Rightarrow M = M - \Delta M \quad (III.13)$$

Dans le cas contraire, le module PV agit comme une source de tension, et le signal d'erreur (M) est calculé comme suit :

$$\frac{\partial P_{PV}}{\partial V_{PV}} > 0 \Rightarrow M = M + \Delta M \quad (III.14)$$

Au MPP, l'erreur sera de zéro et l'expression est écrite comme suit :

$$\frac{\partial P_{PV}}{\partial V_{PV}} = 0 \Rightarrow M = M \quad (III.15)$$

Le principe et l'organigramme de méthode Hill-Climbing est donné par les figures. III.15 et III.16 successivement [43].

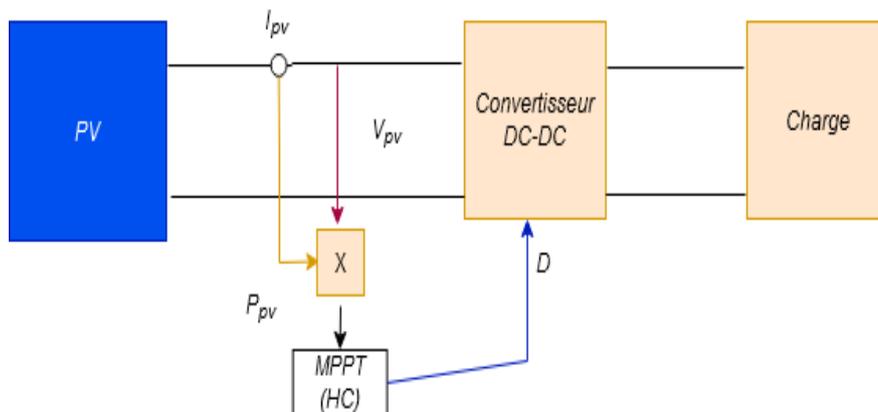
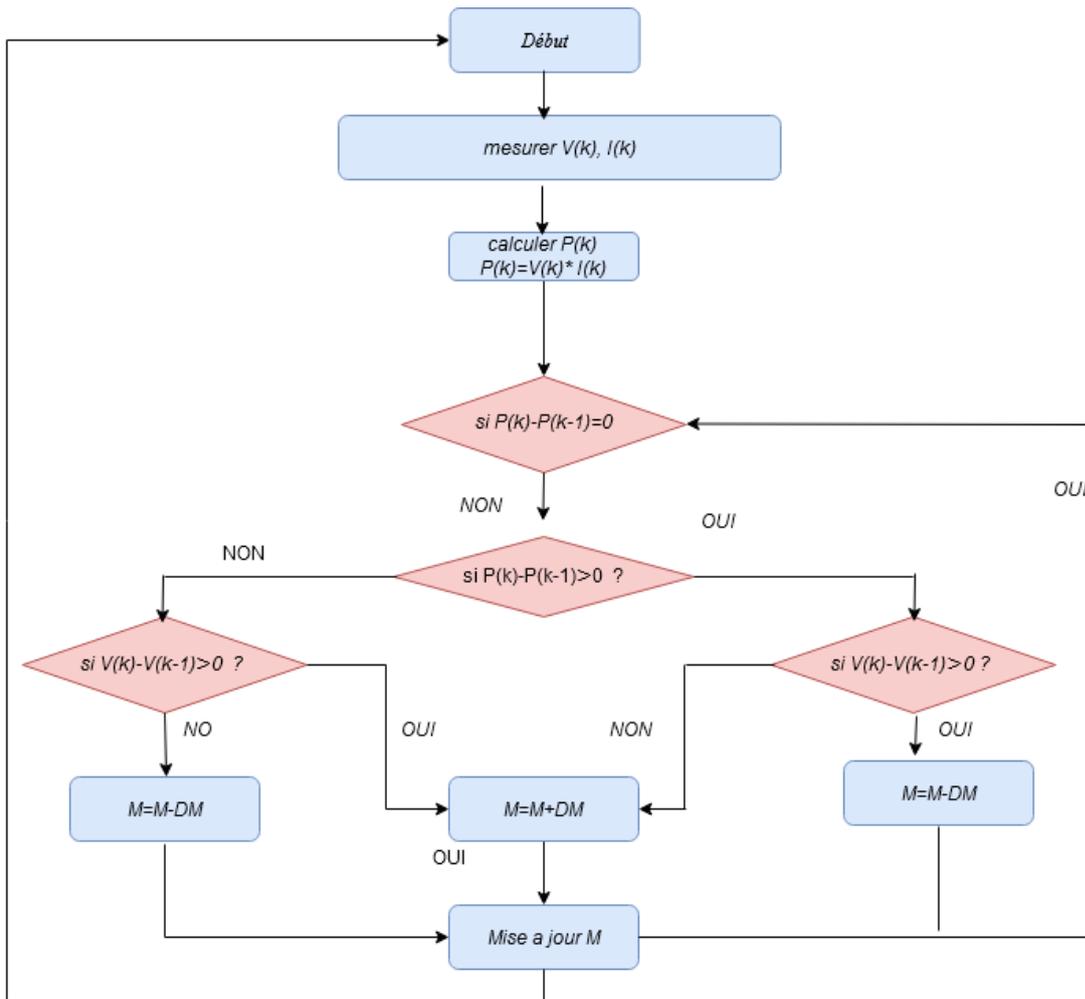


Fig.III.15.Principe de la méthode Hill-Climbing.



**Fig.III.16.** Organigramme de la méthode Hill-Climbing.

L'algorithme de cette méthode Hill Climbing illustré sur la figure III.16, implique une perturbation dans le rapport cyclique du convertisseur de puissance, la perturbation du rapport cyclique du convertisseur de puissance perturbe le courant du générateur photovoltaïque et perturbe la tension du générateur photovoltaïque par conséquent [44].

L'incrément (décrément) de la tension augmente (diminue) la puissance lorsque lors de l'utilisation sur la gauche de la MPP et diminue (augmente) la puissance quand sur la droite du MPP. Par conséquent, s'il y a une augmentation de la puissance, la perturbation subséquente devrait être gardé le même pour atteindre le MPP et s'il y a une diminution de la puissance, la perturbation devrait être inversée. Le processus est répété périodiquement jusqu'à la MPP est atteinte. Le système oscille alors autour du MPP et L'oscillation peut être réduite en réduisant la taille de pas de perturbation. Cependant, une taille plus petite perturbation ralentit le MPPT [45].

Le fonctionnement de cette commande est illustré sur la figure. III.17 en reprenant la chaîne de conversion PV élémentaire.

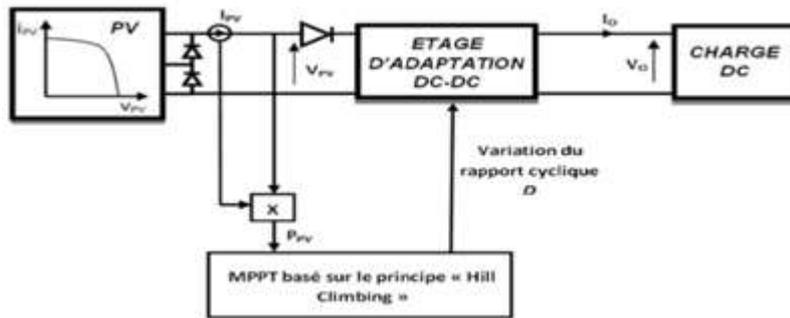


Fig.III.17.Schéma de principe de la commande Hill Climbing [45].

### III.6.2.4.Algorithme de la logique floue (FLC)

La logique floue (FL fuzzy logic) est une nouvelle technique basée sur l'intelligence artificielle utilisée pour améliorer l'algorithme conventionnelle de l'IC en termes de robustesse, de stabilité et la facilité d'implémentation. A l'instar des autres contrôleurs MPPT, la tâche principale du contrôleur FL est d'atteindre le MPP. Cependant, la performance de cette commande dépend essentiellement de l'expertise humaine. Le contrôleur mesure les valeurs de la tension et du courant à la sortie du générateur PV, puis calcule la puissance afin d'extraire les entrées du contrôleur  $e(K)$  et  $\Delta e(K)$ . La sortie de celui-ci représente la perturbation du rapport cyclique  $\Delta D$ . Le contrôleur flou examine, dans ce cas, la puissance de sortie à chaque temps d'échantillonnage  $K$  et détermine le rapport  $e(K) = \Delta P_{pv} / \Delta V_{pv}$ . Si le rapport est négatif, le rapport cyclique est modifié pour diminuer la tension jusqu'à ce que la puissance soit maximale. Dans le cas contraire on modifier le rapport cyclique pour augmenter la tension comme illustrée à la figure. (III.18) [46].

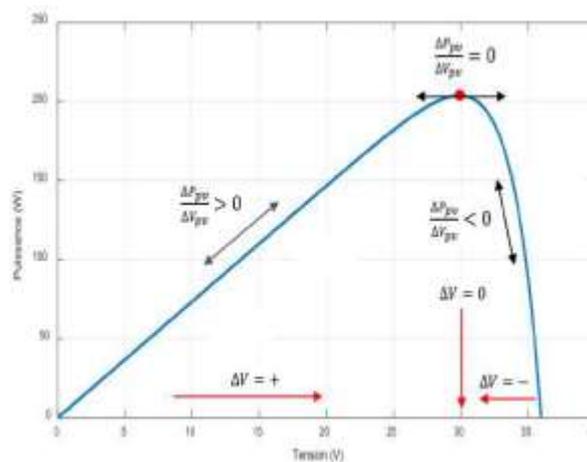


Fig.III.18.Principe du contrôleur flou.

Les quatre éléments de base de contrôleur flou illustré sur la figure. III.19.Sont : unité de fuzzification, règles de base, moteur d'inférence et défuzzification.

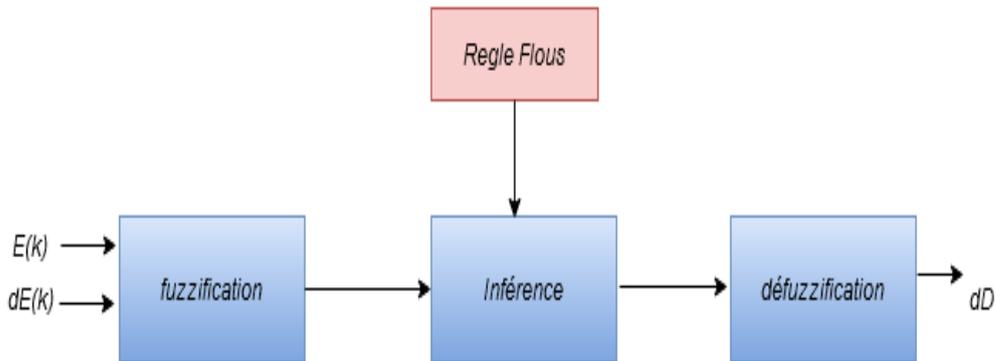


Fig.III.19.Eléments de base de contrôleur flou.

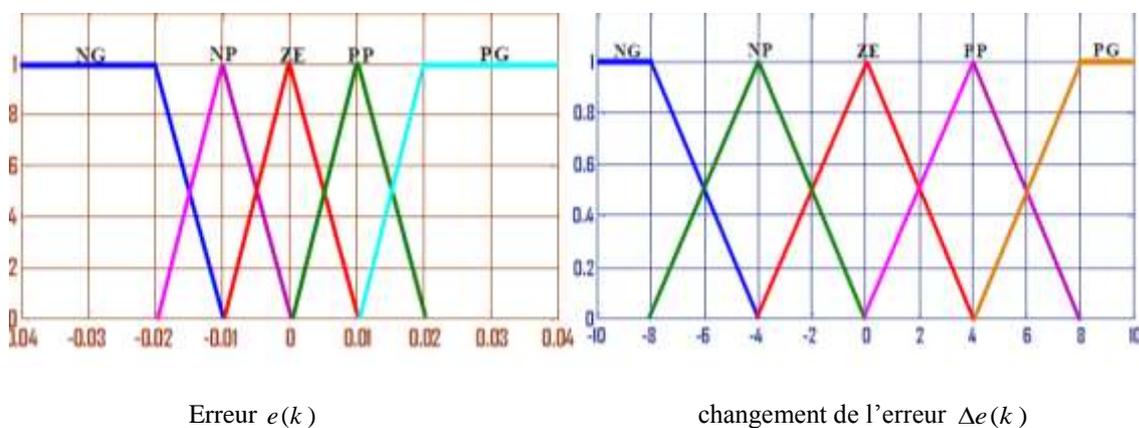
▪ L'unité de fuzzification

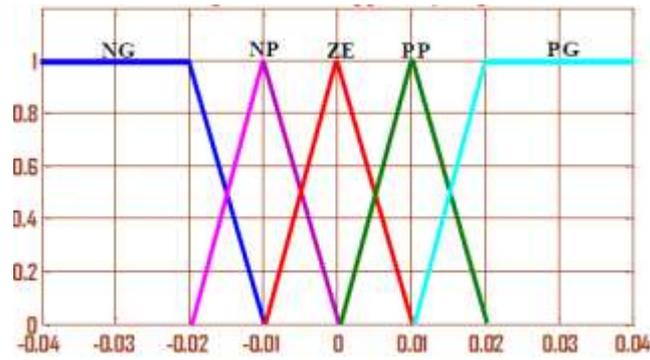
La fuzzification porte sur la conversion de variables réelles à des variables floues. La tension  $V_{pv}$  et le courant  $I_{pv}$  sont mesurés pour le calcul de la puissance  $P_{pv}$ . Dans notre cas, on a deux variables d'entrée qui sont : l'erreur  $e(k)$  et la variation de l'erreur  $\Delta e(k)$ . À un instant d'échantillonnage  $k$ ,  $e(k)$   $\Delta e(k)$  sont exprimées comme suit [47] :

$$e(k) = \frac{P_{pv}(k) - P_{pv}(k-1)}{V_{pv}(k) - V_{pv}(k-1)} \quad (III.16)$$

$$\Delta e(k) = \Delta e(k) - e(k-1) \quad (III.17)$$

Lors de synthèse du contrôleur, les entrées sont cryptées par les fonctions d'appartenance selon la Figure III. 19. On obtient donc :





Changement du rapport cyclique  $\Delta D$

**Fig.III.20.**Fonctions d'appartenances de  $e(k)$ ,  $\Delta e(k)$  et  $\Delta D$ .

On attribue à ces grandeurs des variables linguistiques : NG (Negative Grand), NP (Negative Petit), ZE (Zéro), PP (Positive Petit), et PG (Positive Grand). Cette opération doit être effectuée dans un domaine normalisé généralement par l'intervalle  $[-1, 1]$  afin de faciliter le calcul.

▪ **Inférence flou**

La méthode d'inférence la plus couramment utilisée est l'inférence "Mamdani. Ce bloc d'inférence possède la capacité de simuler les décisions humaines et de déduire les actions de commande floue à l'aide de l'implication floue et des règles d'inférence dans la logique floue. La commande floue utilise généralement l'une des méthodes d'inférence suivantes : Max-Min, Max-Prod et Somme-Prod. Dans ce chapitre, la méthode d'inférence de Mamdani, qui est la combinaison floue Max-Min, est utilisée. L'algorithme de règles floues comprend 25 règles de commande floue présenté dans le tableau III.2. [48].

**Tableau.III.2.**Règles floues

E/DE	NG	NP	ZE	PP	PG
NG	ZE	ZE	PG	PG	PG
NP	ZE	ZE	PP	PP	PP
ZE	PP	ZE	ZE	ZE	NP
PP	NP	NP	NP	ZE	ZE
PG	NG	NG	NG	ZE	ZE

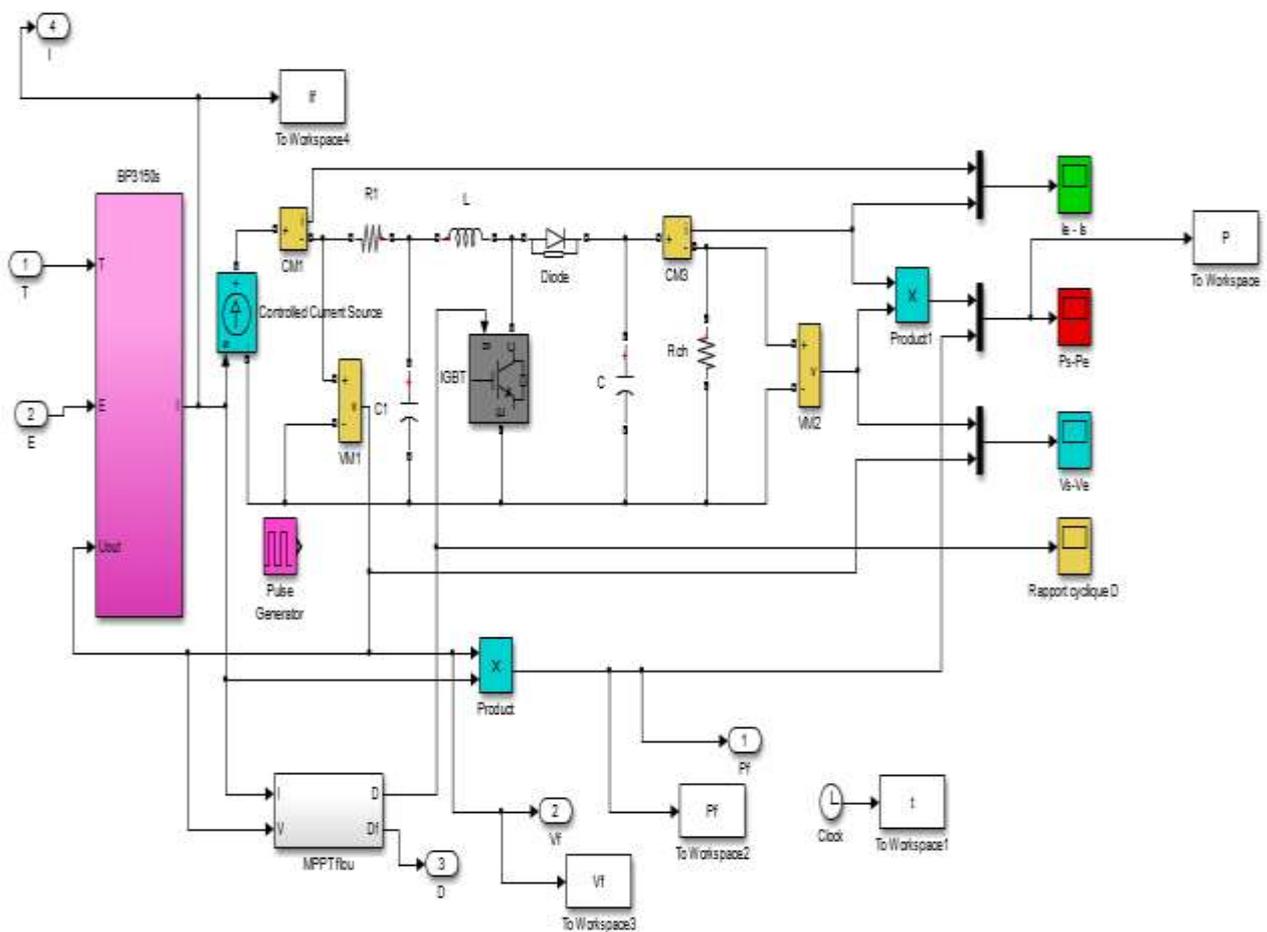
▪ **Défuzzification :**

C'est l'opération inverse de la fuzzification qui permet de passer du domaine réel au domaine flou. Elle consiste à déterminer le degré d'appartenance d'une variable d'entrée pour une

fonction d'appartenance donnée Les méthodes les plus utilisées pour la défuzzification sont : la moyenne des maxima (MOM), la méthode du critère maximal (MCM) et la méthode de centre de gravité (MCG) [49] [50]. Dans ce travail, la défuzzification est effectuée par l'utilisation de cette dernière pour déterminer la sortie du contrôleur flou ( $\Delta D$ ), qui peut être exprimée comme suit :

$$\Delta D(k) = \frac{\sum_{j=1}^n \mu(\Delta D_j(k)) \cdot \Delta D_j(k)}{\sum_{j=1}^n \mu(\Delta D_j(k))} \quad (\text{III.18})$$

Avec :  $\mu_{D_j}(k)$  est le degré d'activation.



**Fig.III.21.**Modèle Simulink du système PV commandé par l'algorithme FLC.

### III.6.2.5.Optimisation d'essaim de particules (PSO)

L'optimisation des essaims de particules (OEP) ou Particle Swarm Optimization (PSO), est un algorithme d'optimisation stochastique basé sur la population motivée par le comportement collectif intelligent de certains animaux tels que les nuées d'oiseaux ou des bancs de poissons.

Depuis sa présentation en 1995 par Russel Eberhart et James Kennedy, elle a connu une multitude d'améliorations. Le PSO sélectionne des solutions aléatoires de l'essaim (particule) ou (swarm) dans l'espace de recherche. Le déplacement d'une particule est influencé par l'expérience personnelle ( $P_{best}$ ), L'expérience globale ( $G_{best}$ ) et le mouvement actuel des particules pour décider de leurs prochaines positions dans l'espace de recherche. Les expériences sont accélérées par deux facteurs  $C_1$  et  $C_2$  et deux nombres générés entre  $[0, 1]$  alors que le mouvement actuel est multiplié par un facteur d'inertie  $w$  variant entre  $[w_{min} ; w_{max}]$ . Dans un espace de recherche de taille  $N$  et de dimension  $D$ , chaque particule  $i \ni (i=1,2,3,\dots,N)$  de l'essaim est modélisée par un vecteur de position  $X_i = [X_{i,1}, X_{i,2}, X_{i,3}, \dots, X_{i,D}]$  et une vitesse de déplacement  $V_i = [V_{i,1}, V_{i,2}, V_{i,3}, \dots, V_{i,D}]$ . Le mouvement de particule  $i$  illustré sur la figure III.21 entre deux itérations  $t, t+1$  est donnée par les deux équations suivantes [51] [52] [53] :

$$v_{ij}(t+1) = w v_{ij}(t) + r_1 c_1 (P_{Best}(t) - x_{ij}(t)) + r_2 c_2 (G_{Best}(t) - x_{ij}(t)) \quad (III.19)$$

$$v_{ij}(t+1) = w v_{ij}(t) + r_1 c_1 (P_{Best}(t) - x_{ij}(t)) + r_2 c_2 (G_{Best}(t) - x_{ij}(t)) \quad (III.20)$$

$$x_{ij}(t+1) = x_{ij}(t) + v_{ij}(t+1) \quad (III.21)$$

- $V_{ij}(t+1), V_{ij}(t)$  : Étant les vitesses de la particule aux itérations  $t$  et  $t+1$  ;
- $x_{ij}(t), x_{ij}(t+1)$  : Étant les positions de la particule aux itérations  $t$  et  $t+1$  ;
- $P_{best}(t)$  : est la meilleure ancienne position de la particule  $i$  ;
- $G_{best}(t)$  : est la meilleure position du voisinage de la particule  $i$  à l'itération  $t$  ;
- $C_1, C_2$ : représentent des coefficients de confiance. Ce sont des valeurs aléatoires entre  $[0,1]$  ;
- $W$  : Facteur d'inertie.

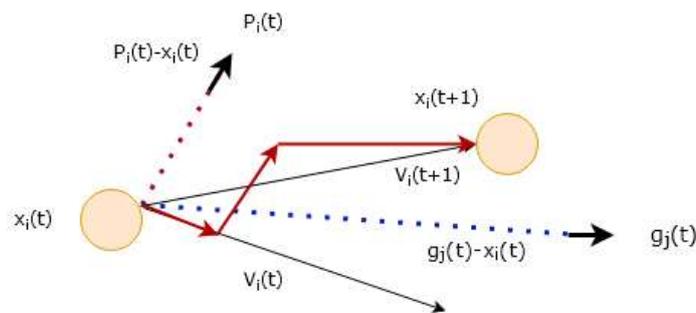


Fig.III.22.Stratégie de mouvement d'une particule.

A chaque itération de l'algorithme, chaque particule est déplacée suivant les équations (III.19) et (III.20). Une fois le déplacement des particules effectué, les nouvelles positions sont évaluées par une fonction dite fitness  $f$ . Cette fonction est à caractère maximal (plus grande pour une position meilleure). Donc une comparaison de la fonction fitness de chaque position de la particule à l'instant  $t$  est faite, avec la fonction fitness de sa meilleure position (locale) pour déterminer  $P_{ij}(t)$ , et avec les fonctions fitness de la meilleure position de toutes les particules (globale) pour déterminer  $G_j(t)$ .

$$\text{Si } f(X_i(t+1)) > f(P_{Best}(t)) \Rightarrow P_{Best} = X_i(t+1) \quad (\text{III.22})$$

$$\text{Si } f(X_i(t+1)) > f(G_{Best}(t)) \Rightarrow G_{Best} = X_i(t+1) \quad (\text{III.23})$$

Cette procédure est résumée par l'algorithme suivant :

**Initialiser** aléatoirement les positions et les vitesses de chaque particule ;

**Pour** chaque particule  $P_{Best} = X_i$  ;

**Tant que** le critère d'arrêt n'est pas vérifié **faire**

**Pour**  $i = 1$  à  $N$  **faire**

**Déplacer** la particule suivant l'équation (III.19) et (III.20) ;

**Évaluer** les positions de chaque particules ;

**Si**  $f(X_i(t+1)) > f(P_{Best}(t))$  alors

$$P_{Best} = X_i(t+1) ;$$

**Si**  $f(X_i(t+1)) > f(G_{Best}(t))$  alors

$$G_{Best} = X_i(t+1) ;$$

**Fin Pour**

**Fin Tant que**

**Fin**

Afficher la meilleure solution  $f(G_{Best})$

### III.6.2.6. Application de l'algorithme PSO pour la recherche du MPPT

Une interface à travers un convertisseur DC-DC (transformateur DC) entre la source et la charge avec une action de contrôle (MPPT) est nécessaire pour assurer à chaque instant le transfert de la puissance maximale. Le point de fonctionnement sera perturbé tous le temps sous l'influence de l'action de recherche MPPT et les conditions météorologiques.

Dans la recherche du point de puissance maximale on peut prendre le rapport cyclique  $D$  à la place de la position de la particule  $x$ , la variation du rapport cyclique  $\Delta D$  comme étant la vitesse du déplacement  $v$ , et la fonction fitness étant la puissance correspondante à chaque rapport cyclique, donc les équations (III.19) et (III.20) deviennent [54][55] :

$$\Delta D_{ij}(t+1) = w \Delta D_{ij}(t) + r_1 c_1 (D_{Best,i}(t) - D_{ij}(t)) + r_2 c_2 (D_{Best,g}(t) - D_{ij}(t)) \quad (III.24)$$

$$D_{ij}(t+1) = D_{ij}(t) + \Delta D_{ij}(t+1) \quad (III.25)$$

Avec :

$D_{ij}(t+1)$  : Le rapport cyclique de la particule  $i$  à l'instant  $t$  et  $t+1$  ;

$D_{ij}(t)$  : Le rapport cyclique de la particule  $i$  à l'instant  $t$  ;

$\Delta D_{ij}(t+1)$  : La variation du rapport cyclique de la particule  $i$  à l'instant  $t$  et  $t+1$  ;

$\Delta D_{ij}(t)$  : La variation du rapport cyclique de la particule  $i$  à l'instant  $t$  ;

$D_{Best,i}(t)$  : Le meilleur rapport cyclique de la particule  $i$  ;

$D_{Best,g}(t)$  : Le meilleur rapport cyclique global ;

L'organigramme de la Figure III.22 donne les étapes de la poursuite du MPP avec PSO.

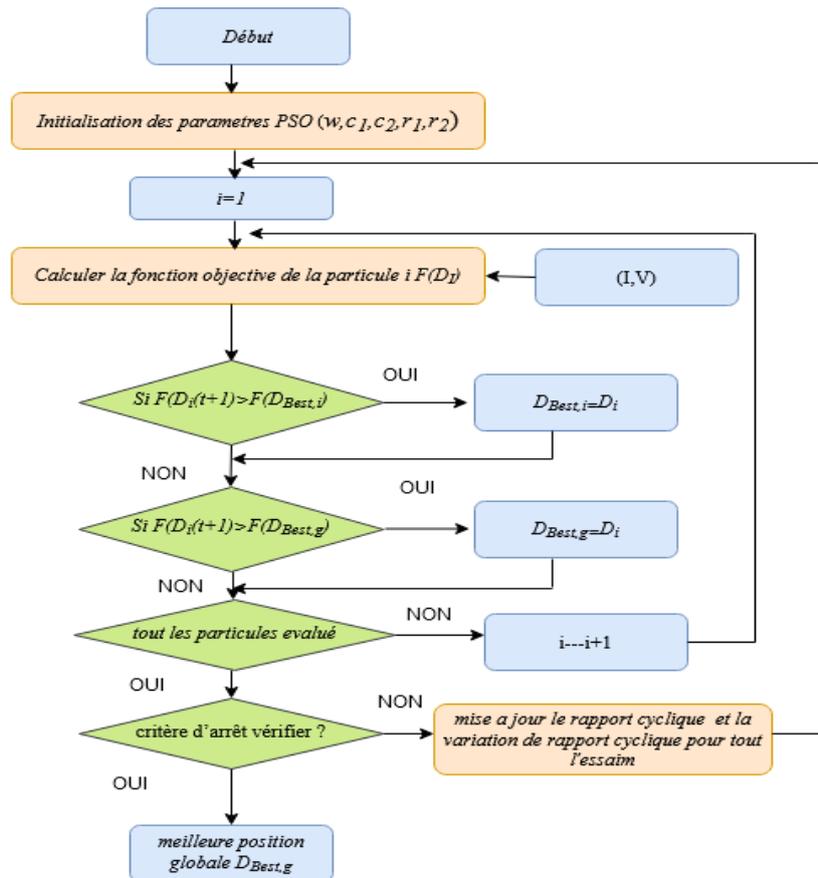


Fig.III.23. Organigramme de la méthode PSO pour MPPT.

### III.7. Conclusion

La caractéristique I-V d'un panneau photovoltaïque n'est pas linéaire, ce qui signifie qu'elle ne suit pas une relation directe entre le courant et la tension. Pour optimiser la puissance délivrée par le panneau solaire, on utilise des régulateurs MPPT (Maximum Power Point Tracking) qui ajustent continuellement leur point de fonctionnement pour maximiser la puissance produite. Ces régulateurs sont généralement mis en œuvre à l'aide de microcontrôleurs. En mesurant la tension et le courant du générateur, l'algorithme de MPPT calcule la puissance fournie et ajuste le signal de commande du régulateur pour optimiser le transfert de puissance du panneau solaire vers la charge. Pour cela, Dans ce chapitre, on a présenté les différentes techniques pour la poursuite du point de fonctionnement à puissance maximale (MPPT). Ces techniques, telles que Perturbation et Observation (P&O), Incrément de Conductance (INC) et Hill Climbing (HC), permettent d'ajuster les paramètres du système afin de maintenir le panneau solaire au point de puissance maximale, même en présence de variations des conditions d'éclairement et de la température outre la méthode basée sur l'intelligence artificielle (FL) et l'approche méta-heuristique (PSO) qui vont être utilisés dans le chapitre suivant pour la maximisation de la puissance.

# *CHAPITRE IV*

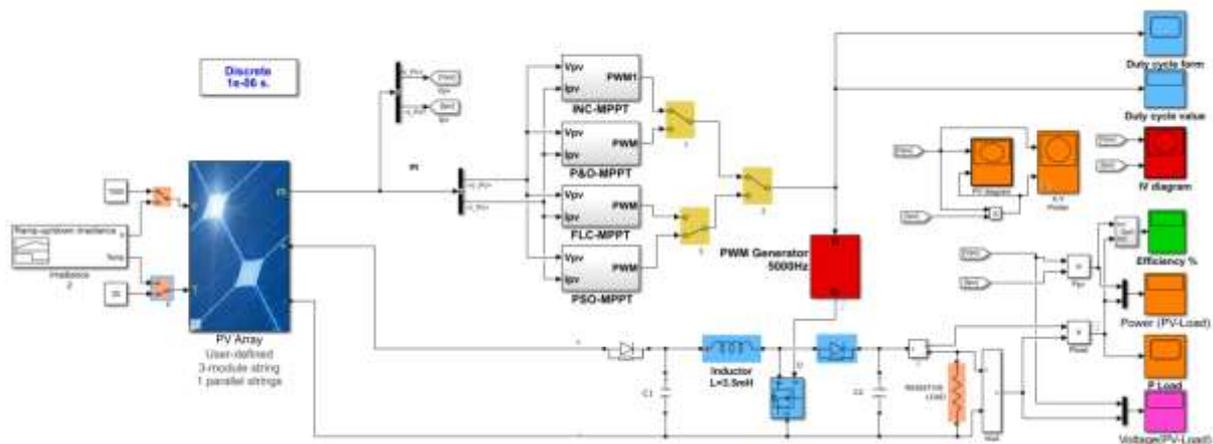
*Simulation des commandes MPPT*

## IV.1.Introduction

Ce chapitre est consacré à la simulation des différentes techniques de maximisation de puissance décrites en détail dans le chapitre précédent et qui sont largement utilisées dans les systèmes PV ont été simulé dont l'objectif est de démettre en évidence leurs avantages et leurs limites. Dans ce cadre, n'a commencé par la simulation des méthodes indirectes les plus utilisées dans les systèmes PV commerciaux telles que les techniques Perturbation et Observation (P&O)et Incrémentation de la Conductance (INC). Ensuite, on a abordé le deuxième type relatif aux méthodes intelligentes, ou on s'intéresse précisément à la logique floue et l'optimisation par essais de particule (PSO).

## IV.2.Modèle Simulink du système de conversion photovoltaïque considéré

La figure IV.1 suivante présente le modèle Simulink du système de conversion photovoltaïque avec les différents parties constituant le système considéré toute en appliquant les différentes techniques envisagées lors de la réalisation de ce travail pour un profil d'irradiation et de température fixe et variable.



**Fig. IV.1.**Le modèle Simulink du système de conversion photovoltaïque avec les différentes parties constituant le système considéré.

## IV.3.Structure des panneaux photovoltaïques utilisés

Les panneaux photovoltaïques utilisés lors de la simulation sont d'une puissance globale de 600 watt comme le montre la figure suivante dont trois panneaux sont raccordés en série et un seul panneau en parallèle soumis à soit constante ou irradiation variable pour valider et montrer son efficacité.

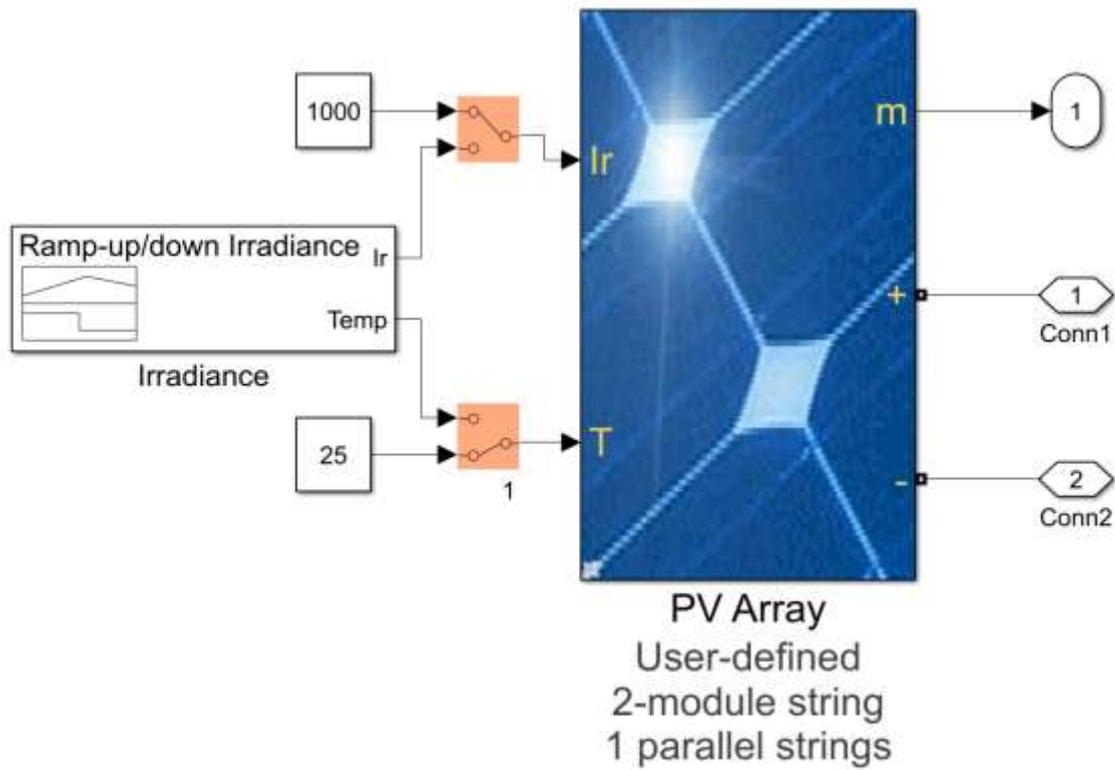


Fig. IV.2. Structure des panneaux utilisés.

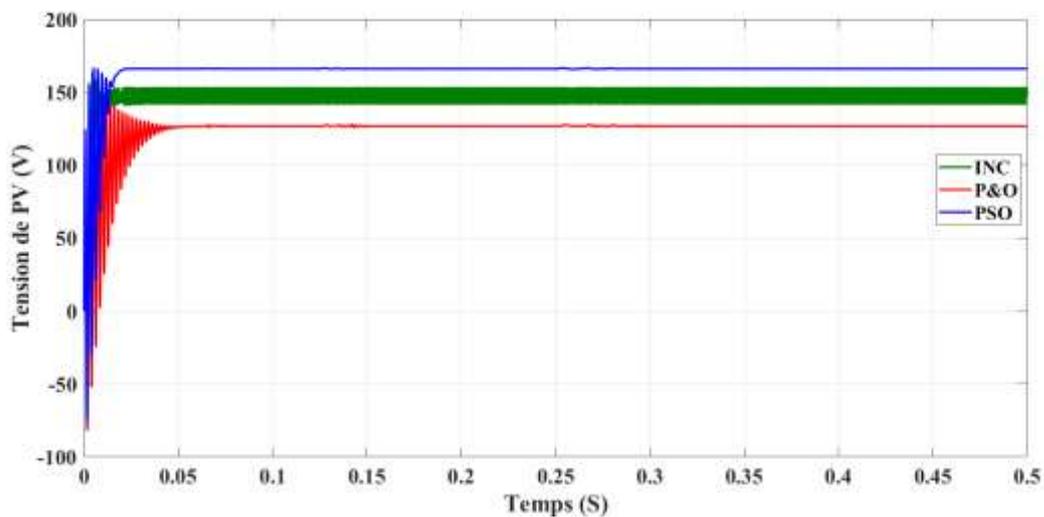


Fig. IV.3. La tension aux bornes de PV pour un éclairement  $E=1000 \text{ W/m}^2$  (INC, P&O, PSO).

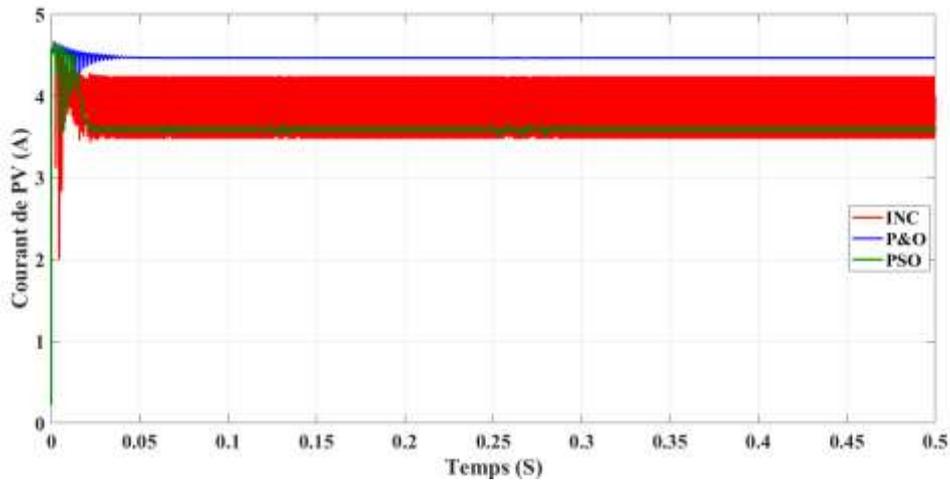


Fig. IV.4. Le courant aux bornes de PV pour un éclairement  $E=1000 \text{ W/m}^2$  (INC, P&O, PSO).

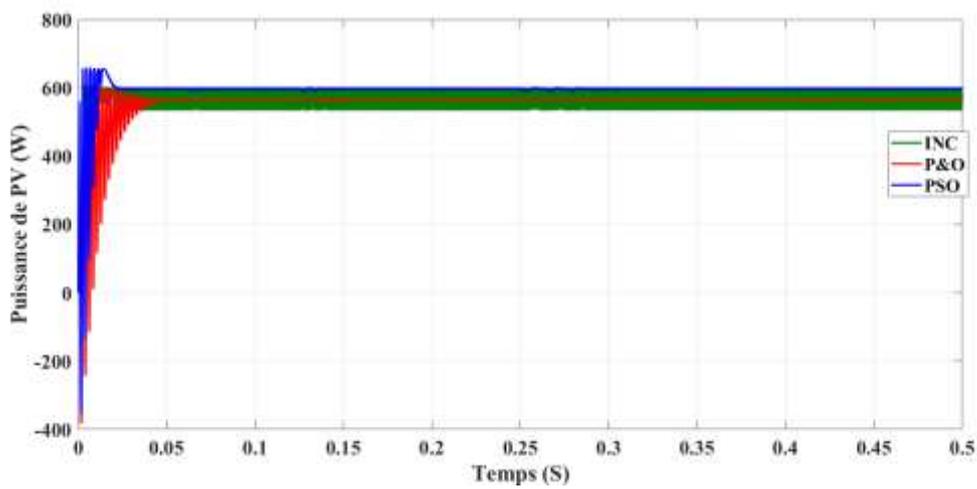


Fig. IV.5. La puissance aux bornes de PV pour un éclairement  $E=1000 \text{ W/m}^2$  (INC, P&O, PSO).

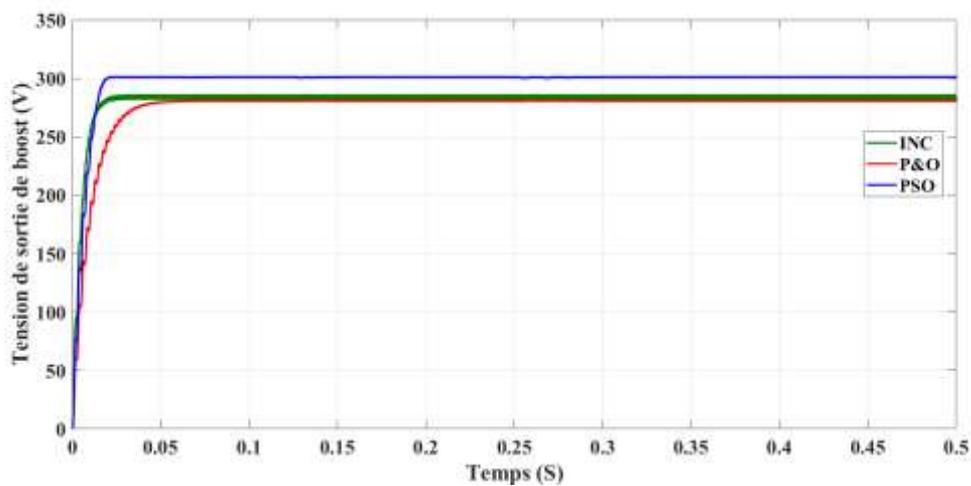


Fig. IV.6. La tension aux bornes de la charge pour un éclairement  $E=1000 \text{ W/m}^2$  (INC, P&O, PSO).

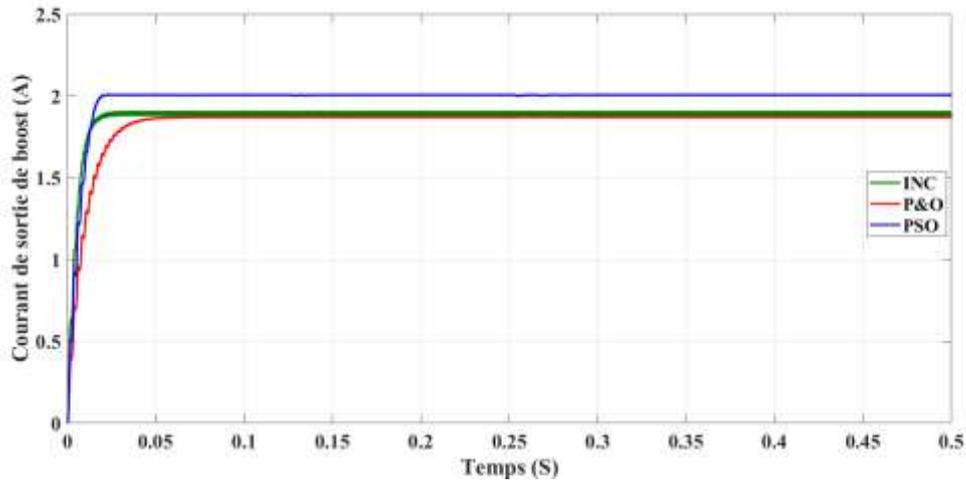


Fig. IV.7. Le courant aux bornes de la charge pour un éclairement  $E=1000 \text{ W/m}^2$  (INC, P&O, PSO).

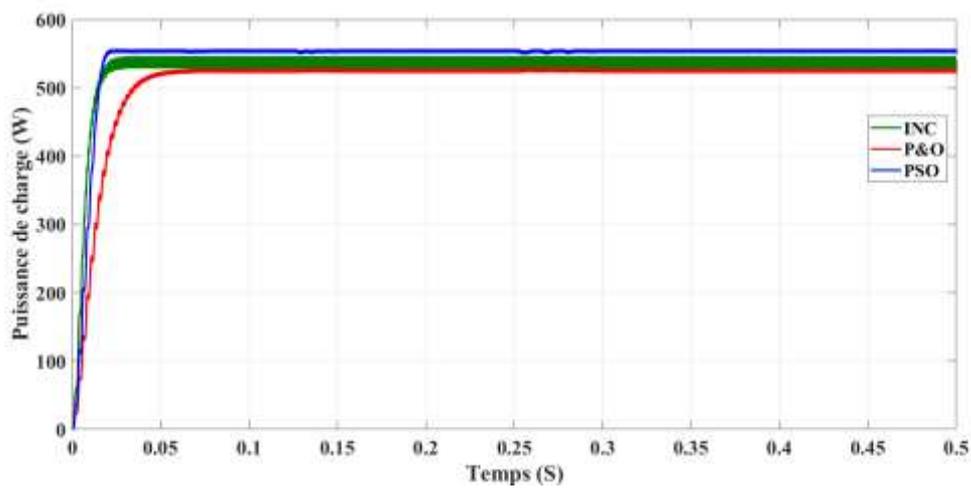


Fig. IV.8. La puissance aux bornes de la charge pour un éclairement  $E=1000 \text{ W/m}^2$  (INC, P&O, PSO).

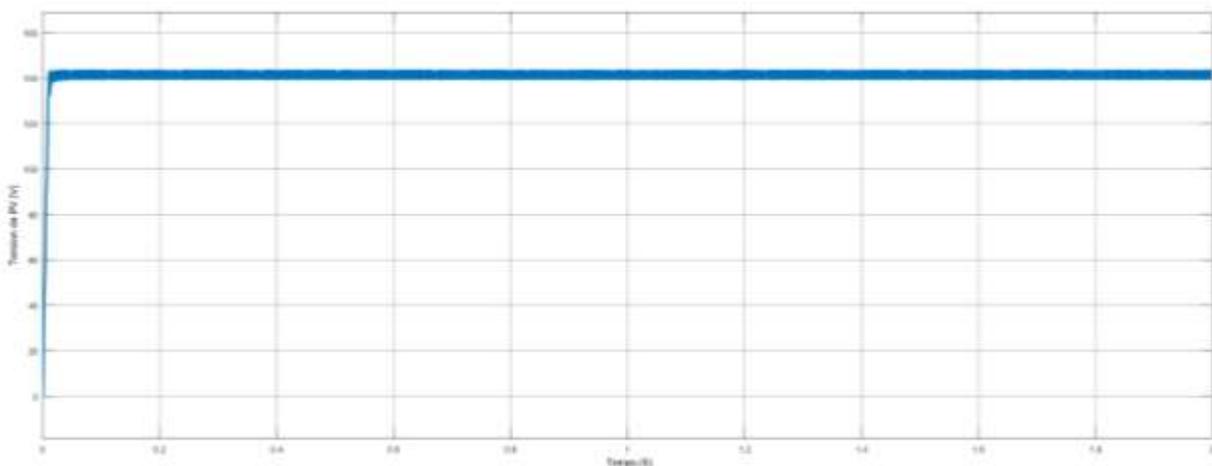
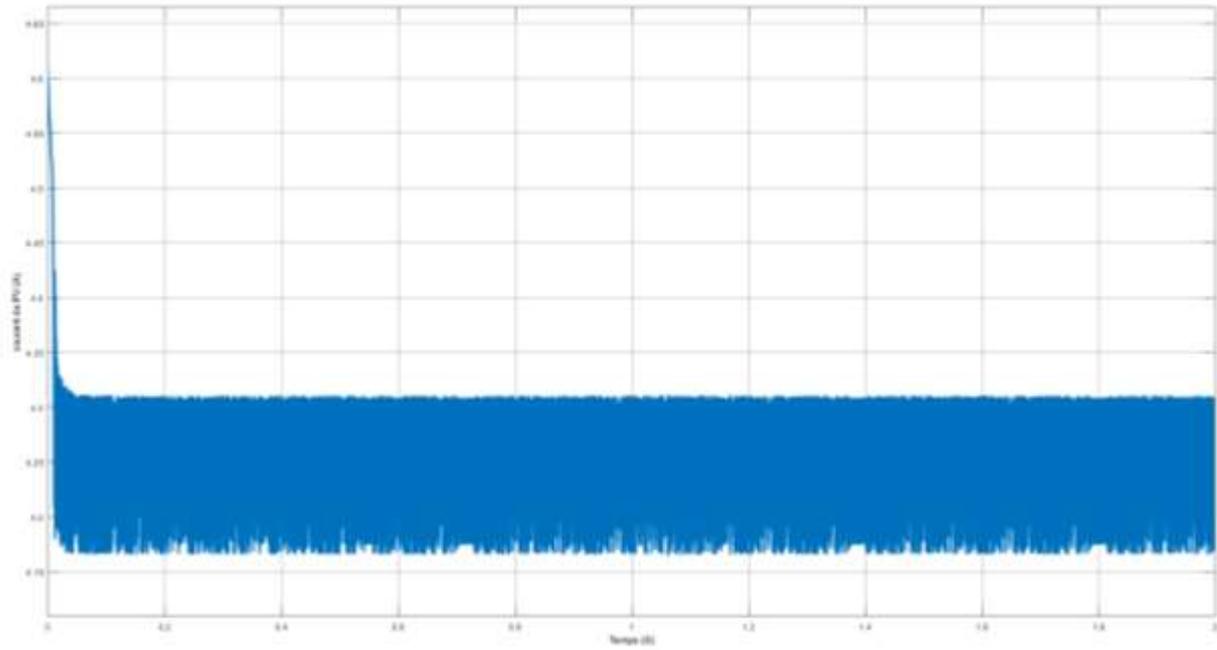
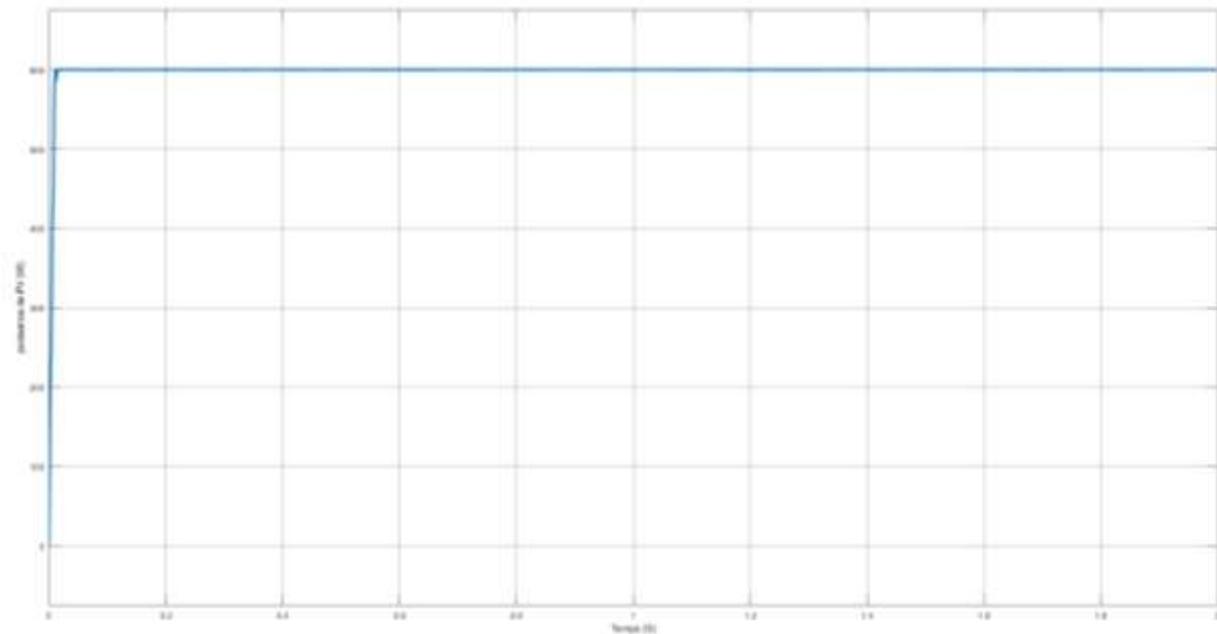


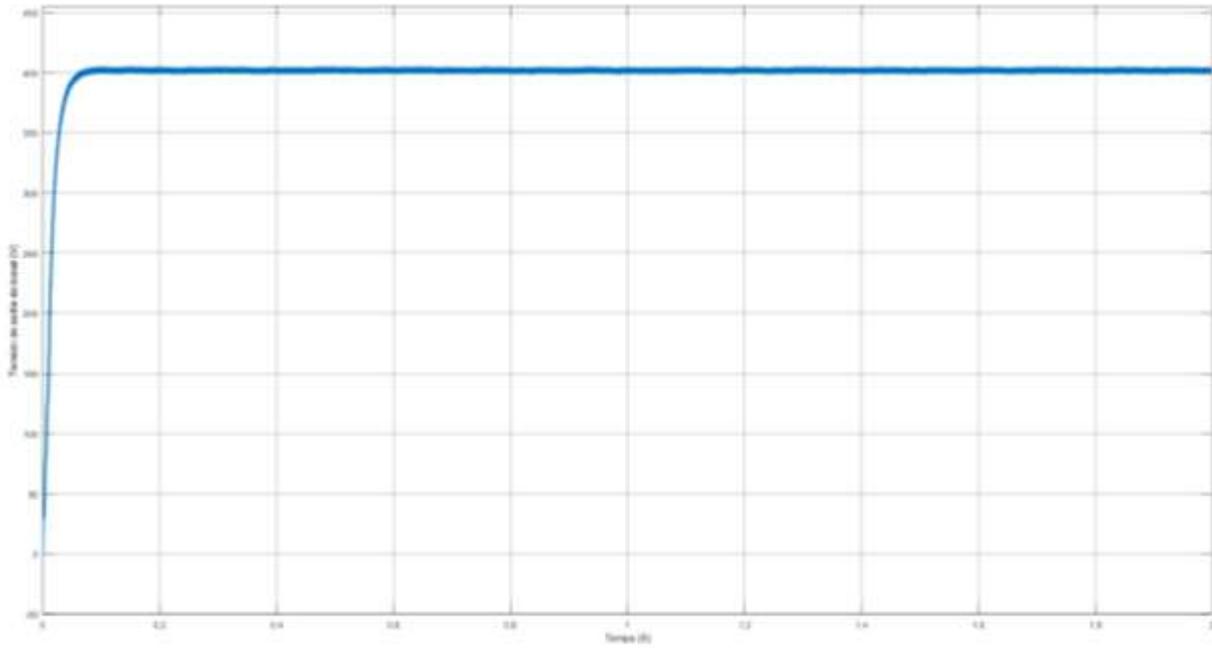
Fig. IV.9. La tension aux bornes de PV pour un éclairement  $E=1000 \text{ W/m}^2$  (FLC).



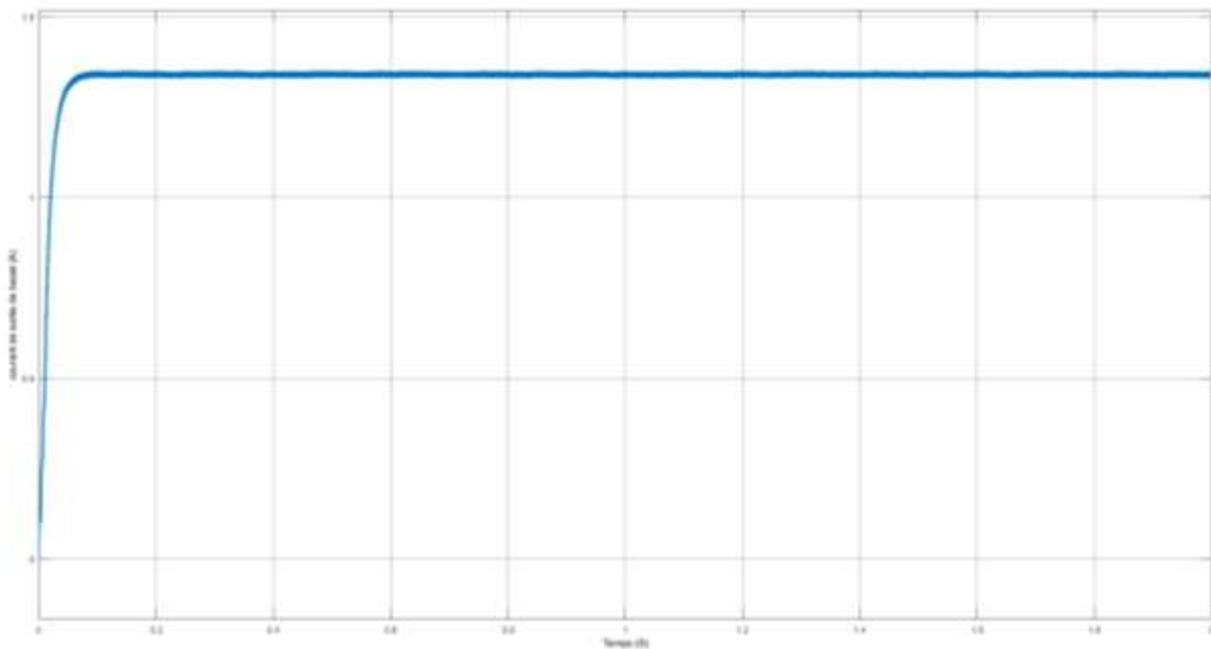
**Fig. IV.10.**Le courant aux bornes de PV pour un éclairement  $E=1000 \text{ W/m}^2$  (FLC).



**Fig. IV.11.**La puissance aux bornes de PV pour un éclairement  $E=1000 \text{ W/m}^2$  (FLC).



**Fig. IV.12.**La tension aux bornes de la charge pour un éclairement  $E=1000 \text{ W/m}^2$  (FLC).



**Fig. IV.13.**Le courant aux bornes de la charge pour un éclairement  $E=1000 \text{ W/m}^2$  (FLC).

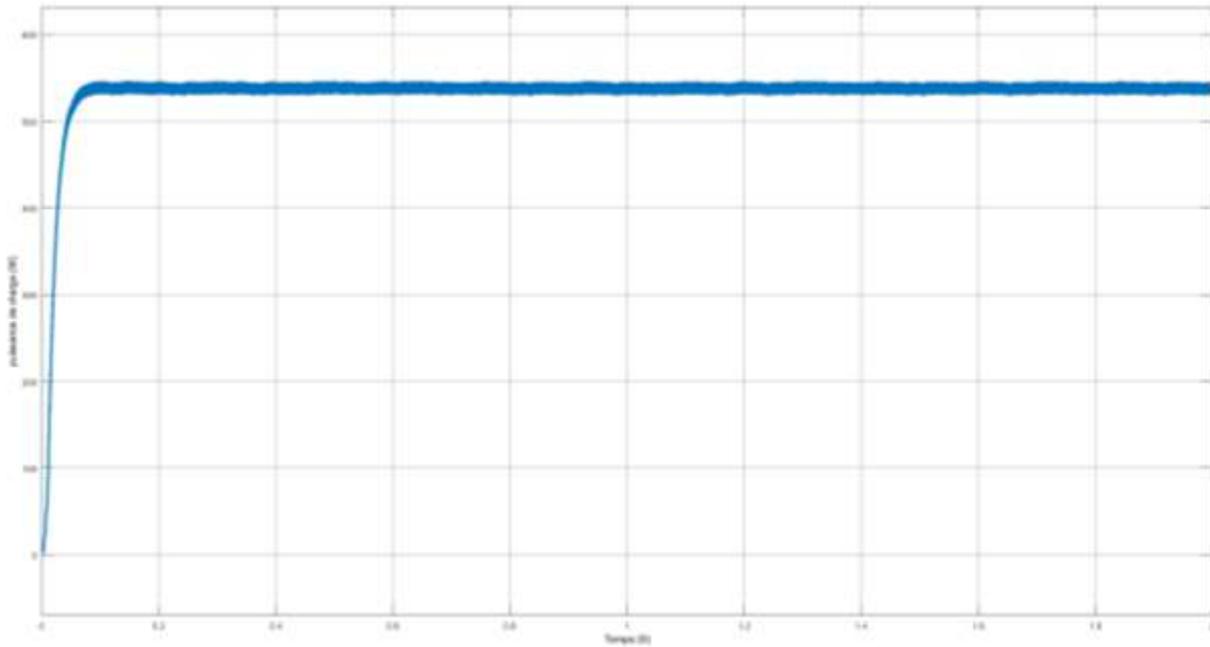


Fig. IV.14. La puissance aux bornes de la charge pour un éclairement  $E=1000 \text{ W/m}^2$  (FLC).

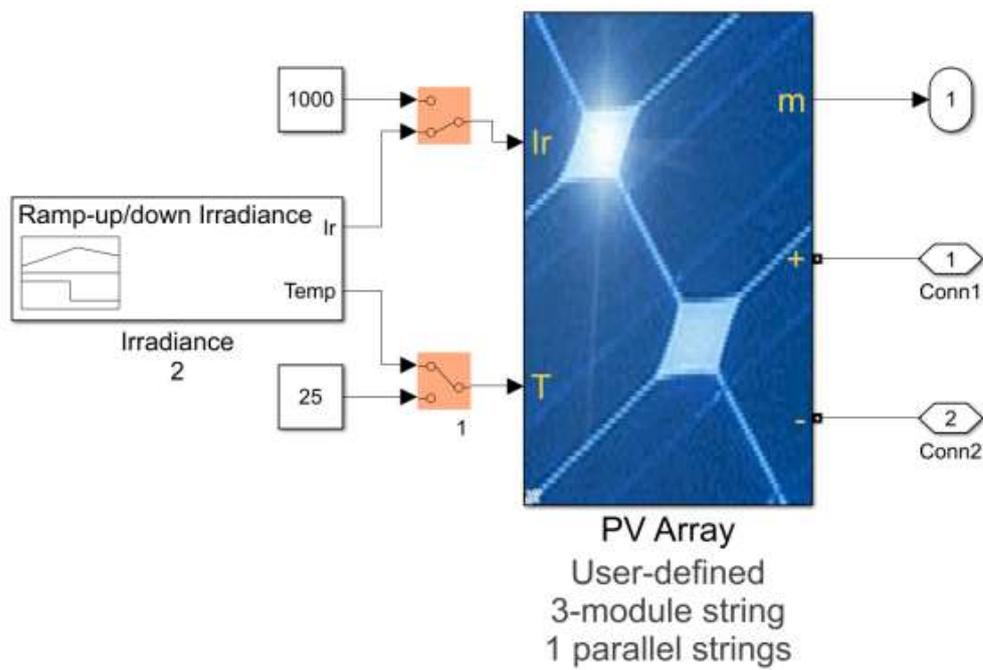


Fig. IV.15. Structure des panneaux utilisés.

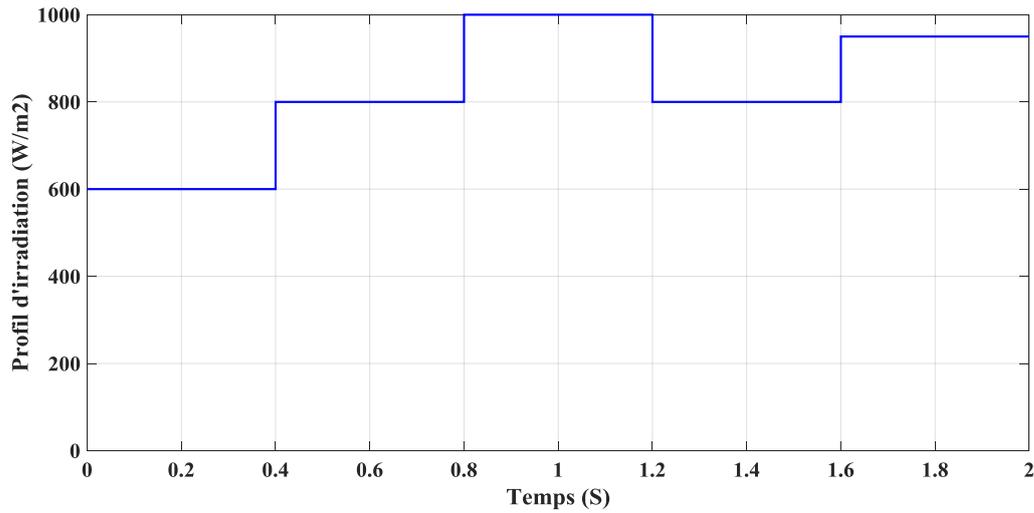


Fig. IV.16. Profile de l'irradiation solaire.

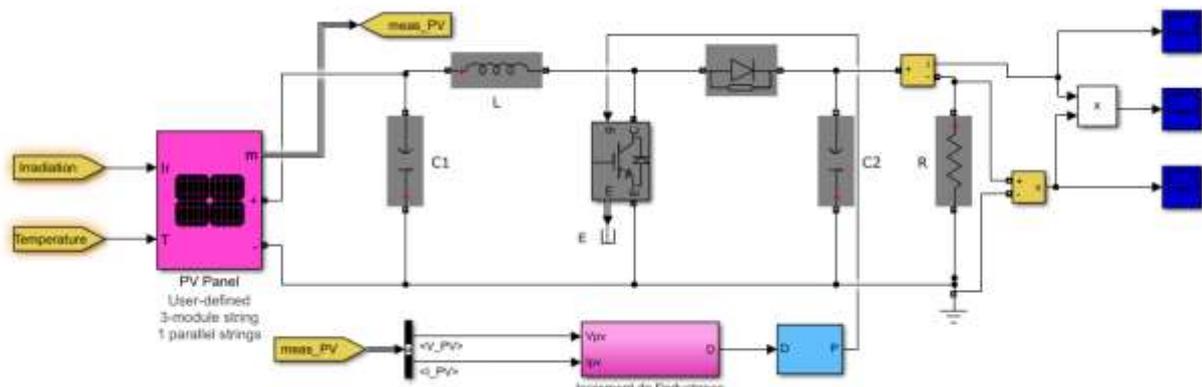


Fig. IV.17. Modèle Simulink du système PV commandé par l'algorithme (INC).

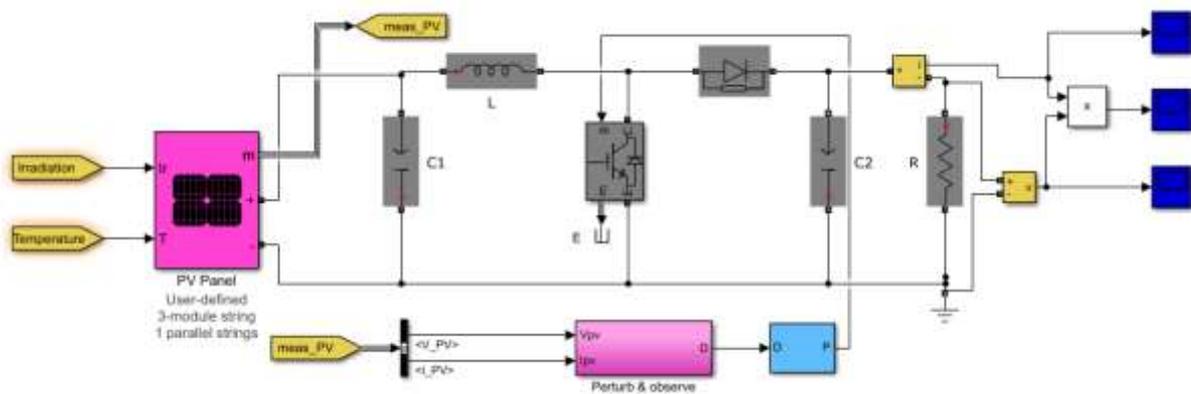


Fig. IV.18. Modèle Simulink du système PV commandé par l'algorithme (P&O).

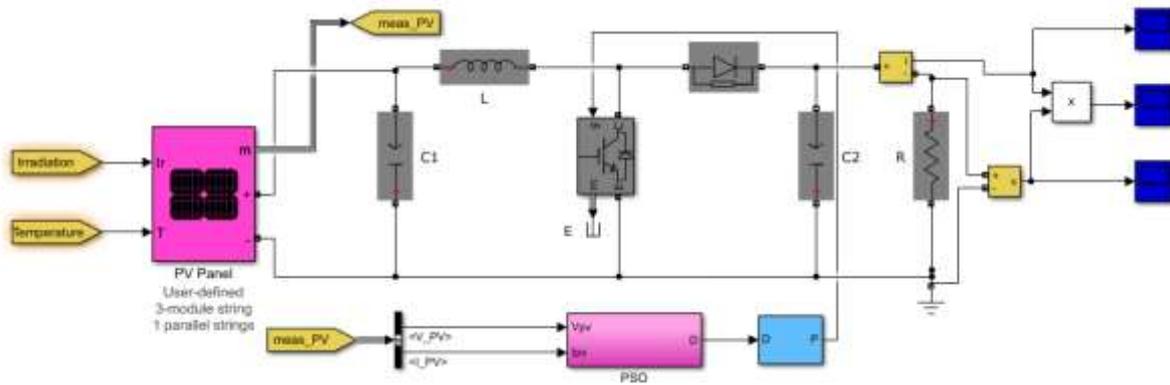


Fig. IV.19. Modèle Simulink du système PV commandé par l'algorithme (PSO).

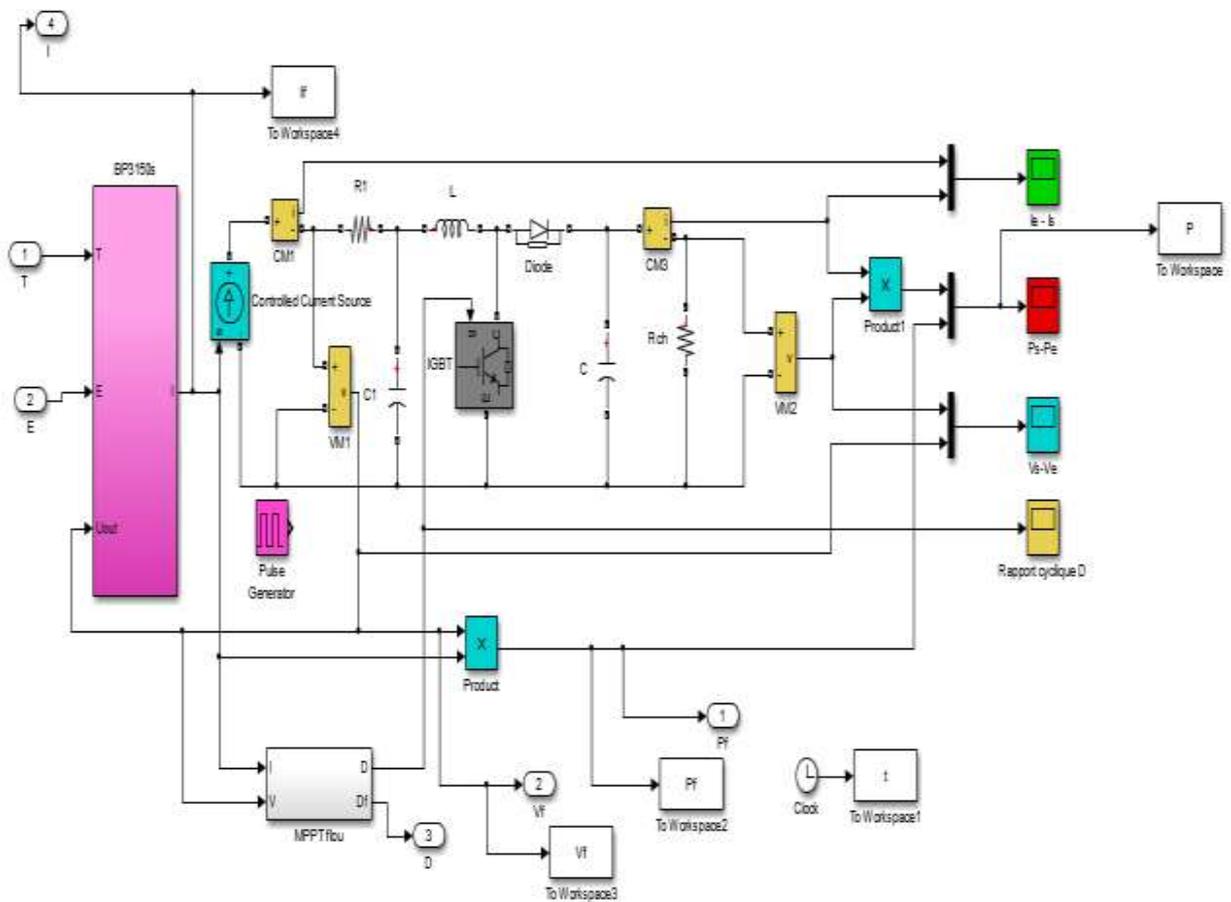


Fig. IV.20. Modèle Simulink du système PV commandé par l'algorithme (FLC)

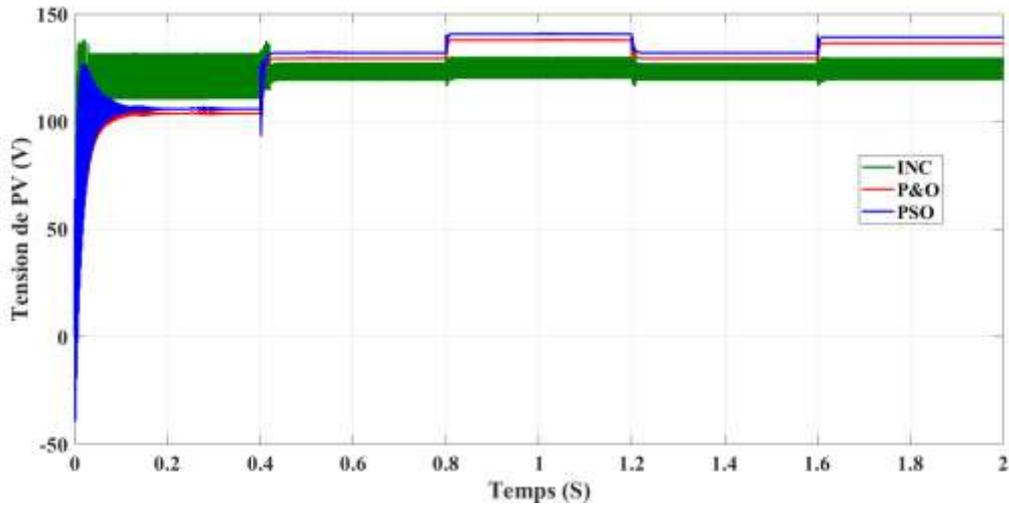


Fig. IV.21. La tension aux bornes de PV pour un éclairement variable (INC, P&O, PSO).

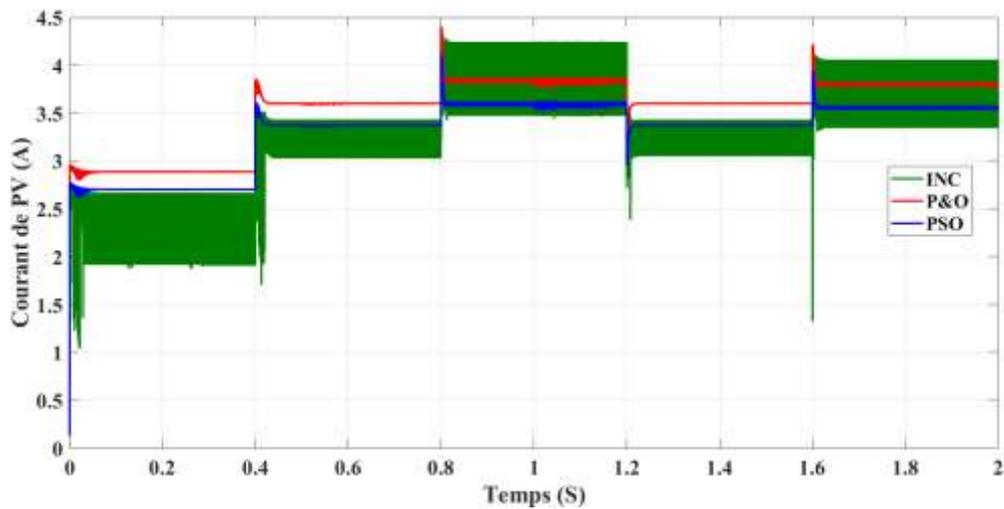


Fig. IV.22. Le courant aux bornes de PV pour un éclairement variable (INC, P&O, PSO).

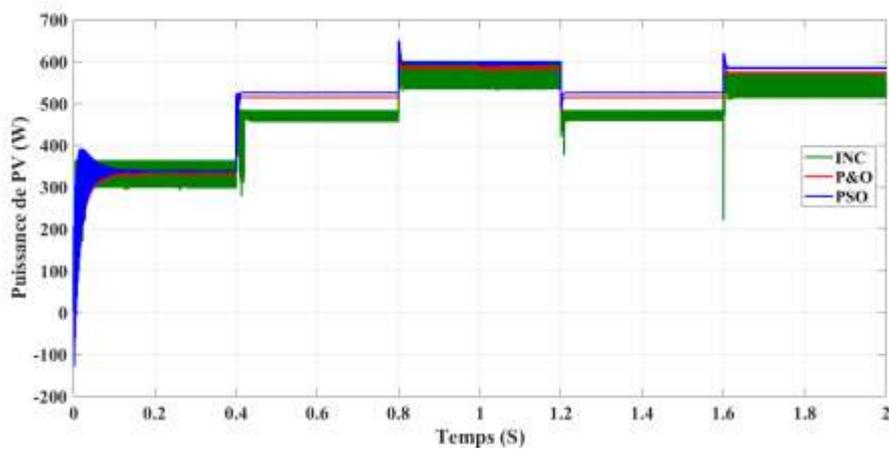


Fig. IV.23. La puissance aux bornes de PV pour un éclairement variable (INC, P&O, PSO).

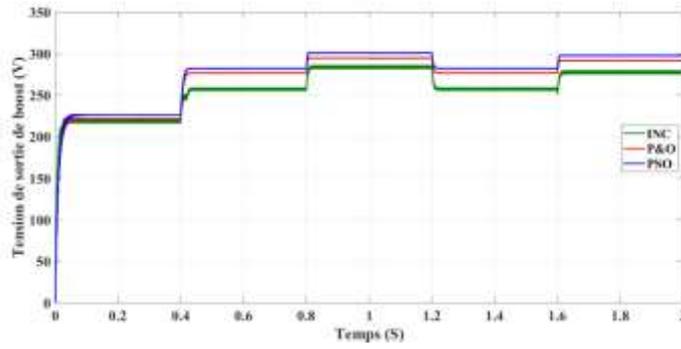


Fig. IV.24. La tension aux bornes de la charge pour un éclairement variable (INC, P&O, PSO).

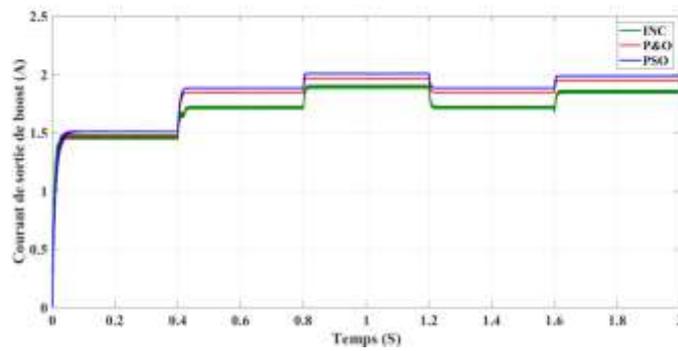


Fig. IV.25. Le courant aux bornes de la charge pour un éclairement variable (INC, P&O, PSO).

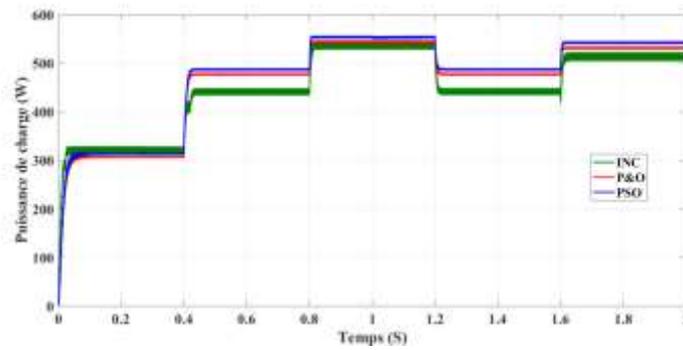


Fig. IV.26. La puissance aux bornes de la charge pour un éclairement variable (INC, P&O, PSO).

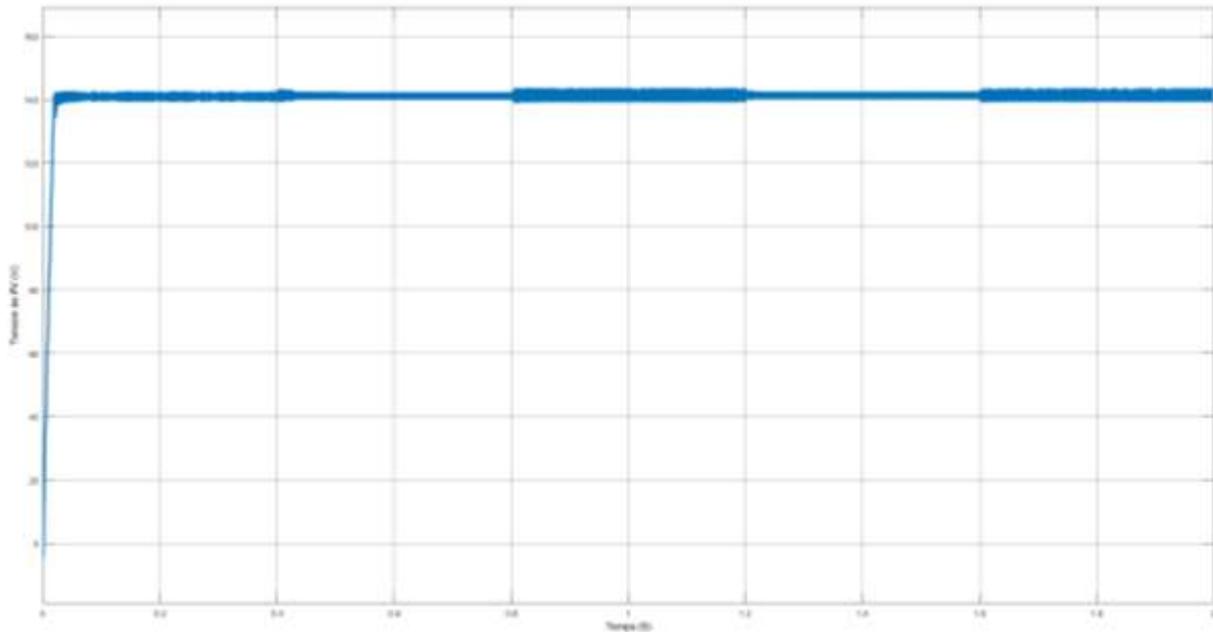


Fig. IV.27. La tension aux bornes de PV pour un éclairement variable (FLC).

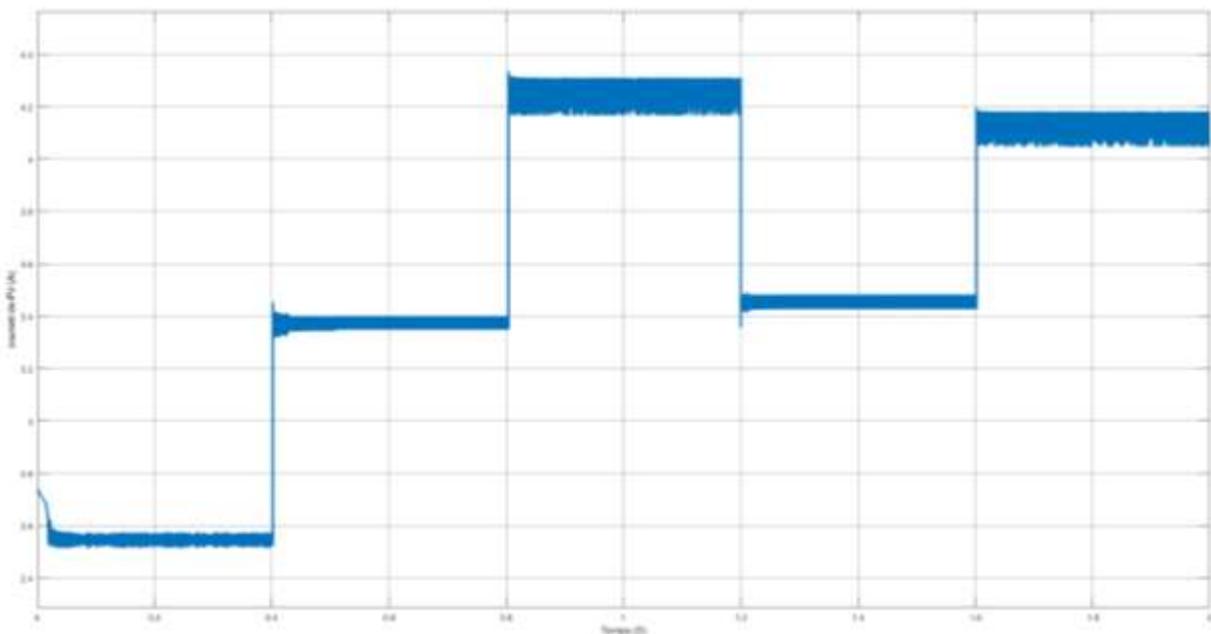
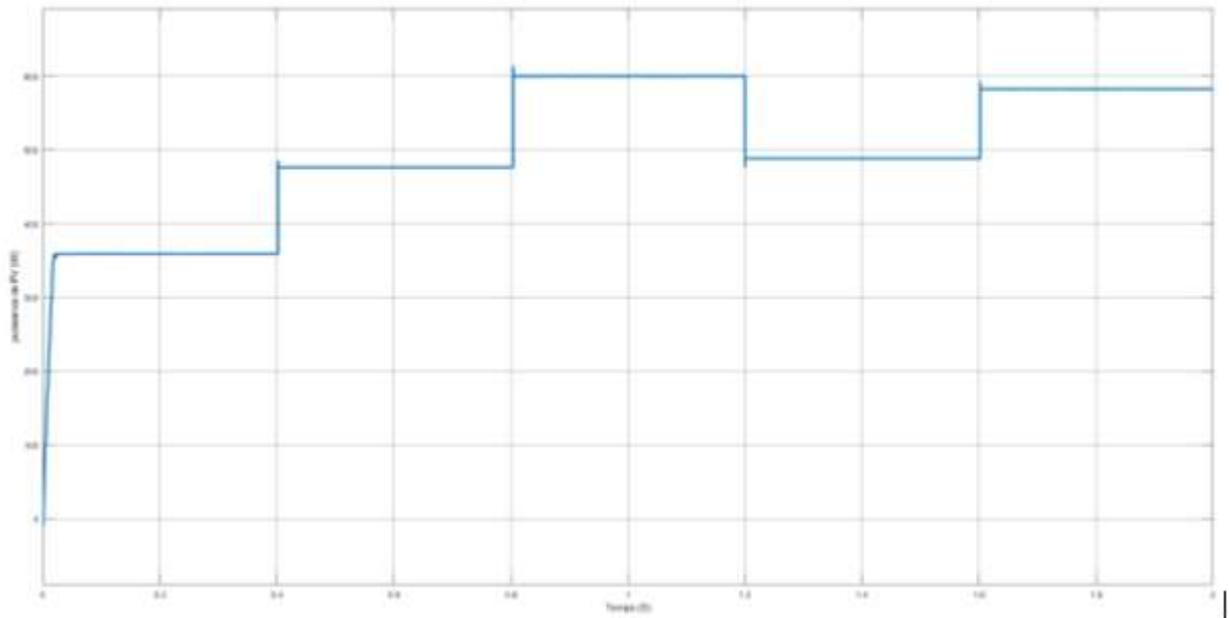
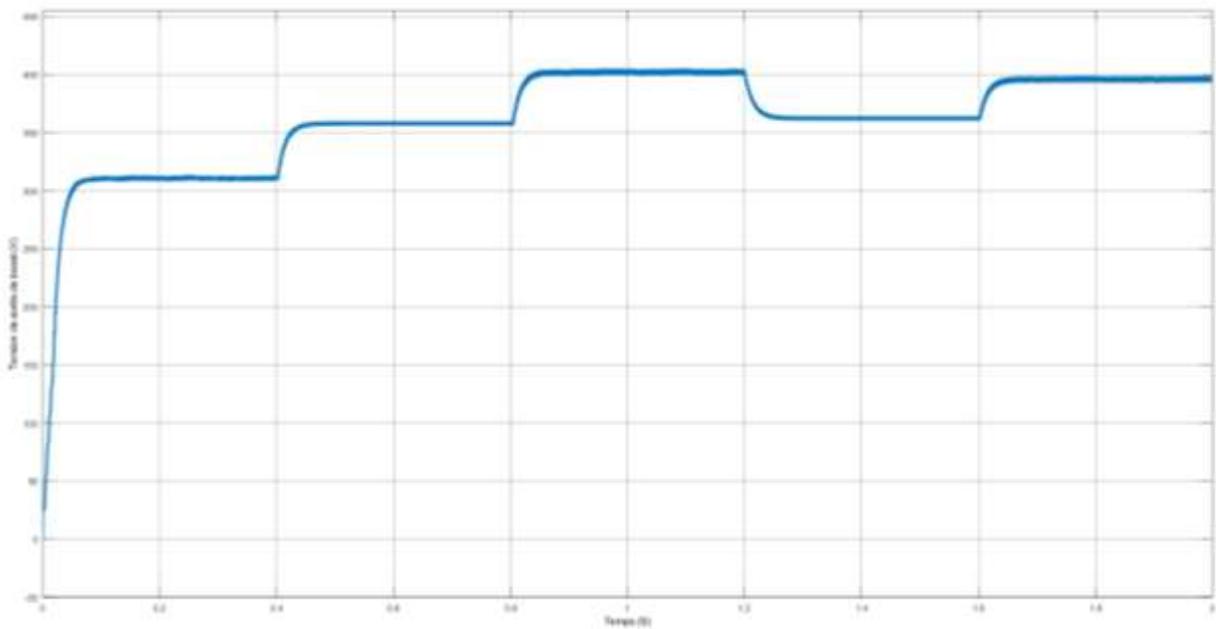


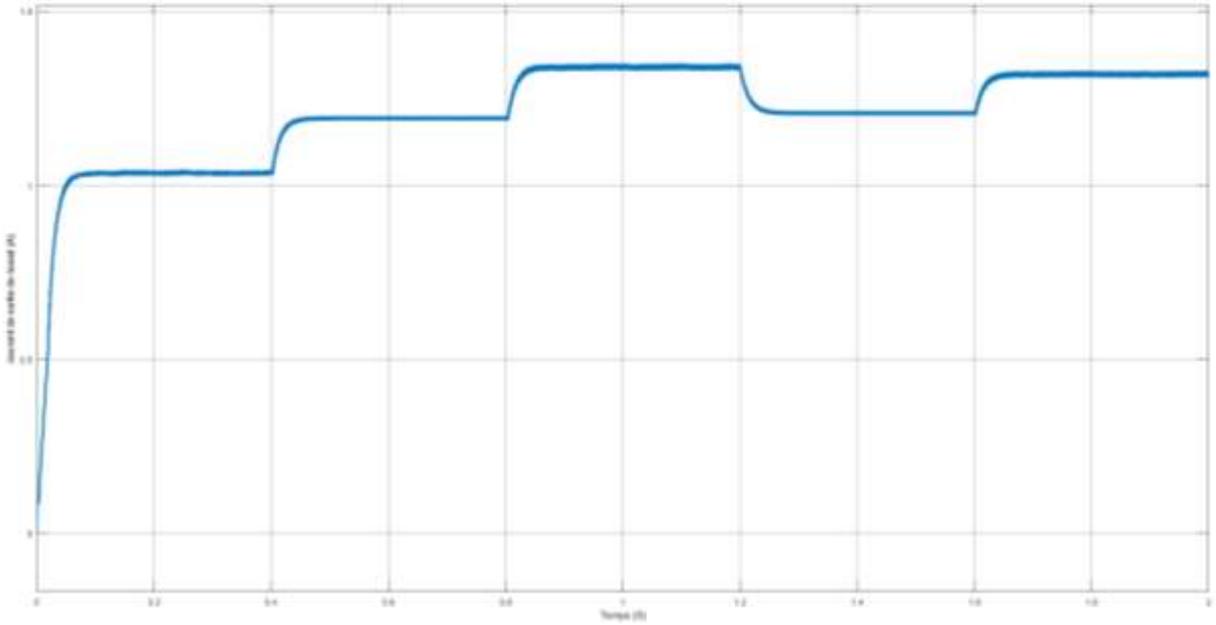
Fig. IV.28. Le courant aux bornes de PV pour un éclairement variable (FLC).



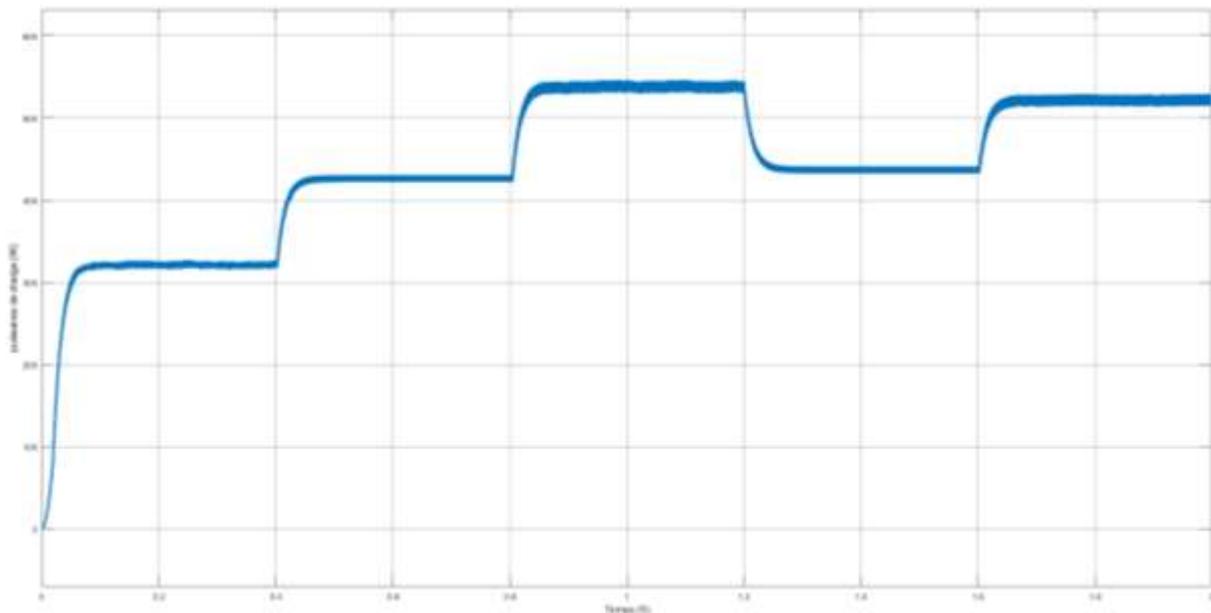
**Fig. IV.29.**La puissance aux bornes de PV pour un éclairement variable (FLC).



**Fig. IV.30.**La tension aux bornes de la charge pour un éclairement variable (FLC).



**Fig. IV.31.**Le courant aux bornes de la charge pour un éclairage variable (FLC).



**Fig. IV.32.**La puissance aux bornes de la charge pour un éclairage variable (FLC).

#### IV.4. Interprétations des résultats

Afin de vérifier l'efficacité et la validité des techniques de maximisation proposées, des tests de simulation sur le système PV considéré sont effectués. Le modèle Simulink du système PV commandé et les résultats obtenus sont illustrés sur les figures précédentes en termes de tension, courant et puissance avec un profil d'irradiation et de température.

D'après les résultats de simulation obtenus, on remarque que l'algorithme IC présente des paramètres statistiques les moins bons et son comportement dynamique est caractérisé par

d'importantes ondulations qui ont un effet négatif sur le fonctionnement du système PV. La logique floue fournit un temps de réponse le plus court et suit correctement la variation de l'éclairement basé sur la logique floue est robuste et efficace. En effet, cet algorithme fonctionne au point optimal sans oscillations. En outre, il est caractérisé par un bon comportement en régime transitoire. Cependant, l'implémentation de ce type d'algorithme est plus complexe que les algorithmes classiques. De plus, l'efficacité de cet algorithme dépend énormément du tableau d'inférence.

Pour atteindre le MPP, beaucoup de travaux sont consacrés pour l'étude comparative de la méthode PSO avec les méthodes précédentes (IC, FL). La simulation est effectuée pour évaluer les comportements dynamiques en termes de stabilité, rapidité et l'efficacité. Les résultats de simulation obtenus sous différentes conditions atmosphériques prouvent que les algorithmes : FL et PSO sont capables de suivre la variation de l'éclairement et de la température afin d'atteindre le MPP. La réponse dynamique de l'IC présente des ondulations indésirables qui sont considérées comme un dangereux désavantage pour système PV. Il est évident que la puissance PV extraite avec PSO est meilleure que celles des techniques FL et IC.

#### **IV.5. Stockage d'énergie électrique**

Les panneaux solaires produisent de l'électricité pendant la journée, mais cette production est interrompue la nuit ou par mauvais temps. Pour maintenir un approvisionnement continu en énergie, notre système nécessite l'ajout d'un dispositif de stockage capable d'emmagasiner l'énergie excédentaire produite lorsque la demande est faible. Cette énergie stockée peut être réinjectée dans le réseau lorsque nécessaire ou utilisée ultérieurement. Les batteries remplissent cette fonction de stockage et sont largement utilisées dans différents secteurs en pleine croissance. De nombreux efforts sont déployés pour améliorer leur performance.

Le stockage d'énergie électrique implique la conservation de l'électricité générée pour une utilisation ultérieure, jouant ainsi un rôle crucial dans les systèmes d'alimentation électrique. Son objectif est de réguler l'offre et la demande d'électricité, en particulier pour gérer les fluctuations associées aux sources d'énergie intermittentes comme les énergies renouvelables. Les technologies de stockage d'énergie incluent divers dispositifs tels que les batteries, les supercondensateurs, les systèmes de stockage par pompage hydraulique, les volants d'inertie, les systèmes de stockage thermique, entre autres. Ces technologies stockent l'énergie dans des formes variées telles que chimique, électrostatique, gravitationnelle, cinétique ou thermique, pour la restituer en cas de besoin, ce qui contribue à garantir la stabilité et la fiabilité des réseaux électriques

Cette partie porte donc sur l'étude des différents types de batteries existantes et la comparaison de leurs caractéristiques, afin de déterminer quel type est la plus appropriée pour notre utilisation

## **IV.6. Les modes de stockage d'énergie électrique**

### **IV.6.1. Stockage sous forme chimique**

Il existe différentes catégories de batteries (batteries électrochimiques), qui sont des dispositifs conçus pour emmagasiner de l'énergie électrique sous forme chimique. L'accumulation électrochimique est largement appliquée dans les contextes fixes. Cette technologie bénéficie d'une expérience de plus de cinquante ans, notamment dans les applications automobiles.

Sa rentabilité et son remarquable taux de recyclage en font l'élément prédominant pour le stockage dans les systèmes électriques. Elle est utilisée dans les systèmes hybrides pour emmagasiner l'énergie supplémentaire en vue d'une utilisation ultérieure, et joue un rôle crucial dans le maintien de la stabilité énergétique. Quand elle n'est pas une source de production d'énergie, elle reste parmi les types les plus répandus. Différentes réactions chimiques sont déclenchées par l'énergie électrique et stockent cette dernière sous forme d'énergie chimique

En fonction des besoins, des réactions chimiques inverses peuvent générer de l'électricité. Une batterie est constituée de plusieurs cellules, des unités indépendantes et complètes possédant toutes les caractéristiques électrochimiques nécessaires au stockage. L'assemblage de ces cellules dans un module, appelé batterie, vise principalement à fournir une tension plus élevée aux bornes du dispositif. Chaque cellule comprend trois éléments de base : une électrode positive (cathode), une électrode négative (anode), et un électrolyte [56].

## **IV.7. Type d'accumulateurs existants**

Les principaux types d'accumulateurs utilisés actuellement dans les systèmes énergétiques sont :

- Les Accumulateurs au plomb acide
- Les Accumulateurs au Nickel- cadmium

## **IV.8. Le modèle électrique équivalent d'une batterie**

Ce modèle utilise un circuit électrique équivalent pour représenter les caractéristiques électriques de la batterie, tels que la tension, la résistance interne et la capacité. Ce modèle est facile à utiliser et peut être appliqué à différents types de batteries, mais il ne prend pas en compte les processus électrochimiques de la batterie.

### IV.8.1.Modèle idéal

Un modèle électrique idéal de la batterie est un modèle simplifié qui suppose que la batterie est une source de tension constante qui peut fournir une puissance électrique illimitée sans se décharger. Un modèle électrique plus réaliste de la batterie prend en compte l'impédance interne de la batterie, qui représente la résistance interne de la batterie et les pertes de tension qui se produisent lors de la décharge de la batterie. Il prend également en compte la capacité de la batterie, qui représente la quantité d'énergie stockée dans la batterie et la manière dont elle se décharge ; la figure IV.115 [57].

$$V_t = V_b - IR_i \quad (\text{IV}).$$

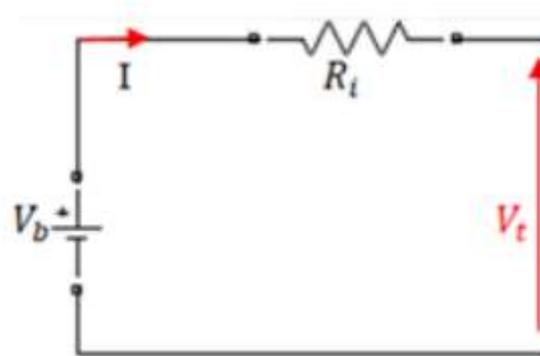


Fig. IV.33.Modèle idéal de la batterie.

### IV.8.2.Modèle simple de la batterie

Un modèle électrique simple. Ce modèle suppose que la batterie  $V_0$  est une source de tension constante qui ne varie pas en fonction de la charge ou de la décharge de la batterie. Ce modèle est très simplifié et ne prend pas en compte les effets de l'impédance interne de la batterie ou de la capacité de la batterie et  $V_t$  est la tension terminale aux bornes de batterie [58].

$$V_t(t) = V_0 - R_i I_b \quad (\text{IV.1})$$

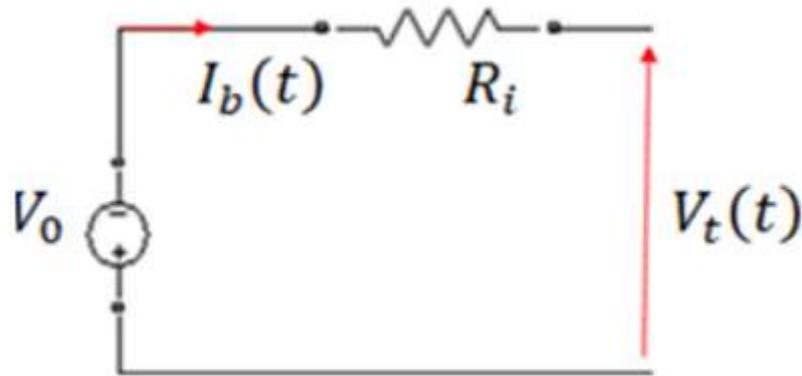


Fig. IV.34. Modèle simple [58].

### IV.9. La pile à combustible

La pile à combustible figure parmi les technologies prometteuses pour l'avenir de la production décentralisée d'énergie électrique, ce qui motive de nombreuses initiatives de recherche et développement à l'échelle mondiale. Cette technologie progresse rapidement et de manière significative, stimulée par la volonté des fabricants de piles de mettre sur le marché des produits économiquement viables et fiables dans les délais les plus courts possibles.

La pile à combustible, également appelée cellule à combustible, est un dispositif électrochimique qui convertit l'énergie chimique directement en électricité en faisant réagir un combustible avec un oxydant, généralement de l'hydrogène et de l'oxygène. Ce processus génère de l'électricité, de la chaleur et de l'eau comme seuls produits de réaction, ce qui en fait une technologie propre. Les piles à combustible sont prometteuses pour une variété d'applications, notamment les véhicules à hydrogène, les systèmes de stockage d'énergie et les sources d'électricité pour les bâtiments. Elles offrent un rendement élevé et une faible pollution, ce qui en fait une alternative attractive aux moteurs à combustion interne traditionnels.

### IV.10. Stockage sous forme électrostatique

Les supercondensateurs, aussi appelés condensateurs à double couche électrochimique (EDLC), sont des dispositifs de stockage d'énergie qui emmagasinent l'électricité sous forme d'énergie électrostatique. Contrairement aux batteries classiques, les supercondensateurs stockent cette énergie de manière électrostatique plutôt que chimique, leur permettant ainsi de se charger et de se décharger beaucoup plus rapidement. Ils se composent généralement de deux électrodes poreuses séparées par un électrolyte conducteur d'ions. L'énergie est stockée sous forme de double couche électrique à l'interface entre l'électrode et l'électrolyte.

Les supercondensateurs sont utilisés dans diverses applications nécessitant une haute puissance et une longue durée de vie, telles que les véhicules électriques, les systèmes de stockage d'énergie renouvelable et les appareils électroniques portables. Leur capacité à fournir rapidement de l'énergie lors de pics de demande et leur longue durée de vie par rapport aux batteries traditionnelles en font des composants très précis

#### IV.11. Gestion d'énergie dans un système isolé

Dans cette partie, nous traiterons le cas d'un système isolé, muni d'un de batteries pour assurer le stockage de l'énergie, et connecté à 3 charges avec différents degrés de priorité : notons P1 la charge la plus prioritaire, P2 la deuxième charge, et P3 la charge dont nous pourrions nous passer, le système se charge d'alimenter ou de déconnecter chacune de ces charges en fonction de l'énergie disponible au niveau des batteries (c'est-à-dire en vérifiant l'état de charge des accumulateurs - SOC) ou à la sortie du générateur PV.

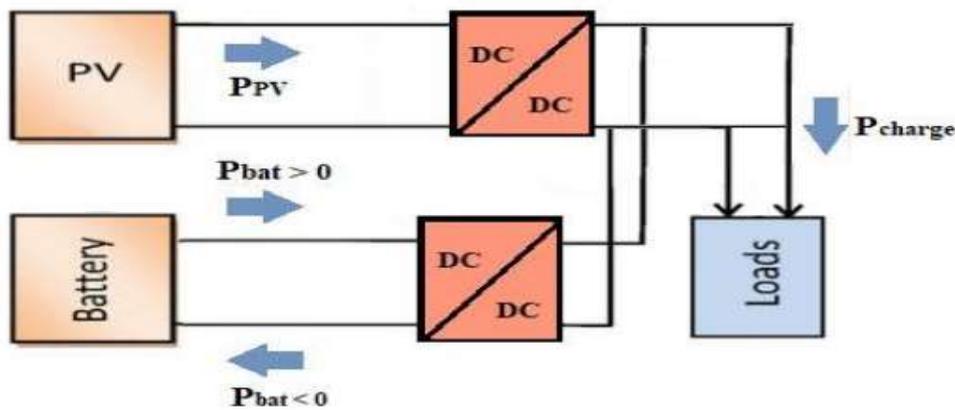


Fig. IV.35. Flux d'énergie dans un système PV autonome avec charges DC.

#### IV.12. Modes de fonctionnement du système

Nous pouvons décrire ces modes en fonction de l'état de charges des batteries ou des conditions météorologiques (ensoleillement et température), ces modes sont énumérés par ordre selon la valeur du SOC :

➤ **M1 : Mode de puissance limitée**

Ce mode est défini lorsque la batterie est pleinement chargée, son SOC dépasse 90%, elle ne peut être chargée davantage, elle est alors déconnectée. Le surplus d'énergie provenant du générateur PV ne peut être injectée ni à la batterie ni aux charges (étant donné qu'un seuil de

puissance leur est imposé). Il est donc nécessaire de limiter la puissance produite par le GPV à une valeur limite qu'on appelle  $P_{limit}$ .

➤ **M2 : Mode de fonctionnement normal**

Ce mode est défini lorsque l'état de charge des batteries SOC est compris entre 50% et 90% ; le générateur PV produit de l'énergie électrique suffisamment, puisque les conditions climatiques sont favorables. Les charges sont alors toutes connectées et alimentées.

➤ **M3 : Mode d'état de charge faible**

Ce mode est défini lorsque l'état de charge des batteries baisse en dessous de 50% jusqu'à 35% ; afin d'éviter que les batteries se déchargent rapidement d'où la nécessité de faire appel au réseau électrique, le système de gestion déconnecte la charge avec l'ordre de priorité le plus faible (Charge P3).

➤ **M4 : Mode d'état de charge très faible**

Ce mode est défini lorsque les batteries continuent à se décharger (le SOC est compris entre 35% et 25%) ; le but étant de prolonger cette décharge sans pour autant recourir au réseau électrique, le système déconnecte alors la deuxième charge avec l'ordre de priorité le plus faible (Charge P2).

➤ **M5 : Mode de déconnexion (de la charge principale)**

L'état de charge est maintenant inférieur à 25%, le générateur n'est plus en mesure d'alimenter la charge prioritaire (Charge P1), d'où l'utilité de la déconnecter ainsi que la batterie au risque de subir de profondes décharges qui peuvent la détériorer et influencer son cycle de vie. Cependant la déconnexion de la batterie dépend de la stabilisation du bus continu qui est comme suit : - lorsque la tension VDC est inférieure à la tension de référence, la batterie devrait se décharger. - lorsque la tension VDC est supérieure à la tension de référence, la batterie devrait se charger. Cela veut dire, que si la tension VDC est stabilisée, la batterie se déconnecte puisque le PV assure cette régulation. Nous pouvons récapituler la procédure de gestion d'énergie à travers le schéma représenté par la figure IV.17.

Avec :

$V_{DC}$  : Tension du bus continu (V) ;

$V_{ref}$  : Tension de référence à imposer au bus continu (V) ;

$P_{stock}$  : Puissance stockée par la batterie (W) ;

$P_{PV}$  : Puissance produite par le GPV (W) ;

$P_{charge}$  : Puissance absorbée par la charge (W) ;

$P_{limte}$  : Puissance de limitation à imposer au GPV (W) ;

AnnBat : Déconnexion de la batterie.

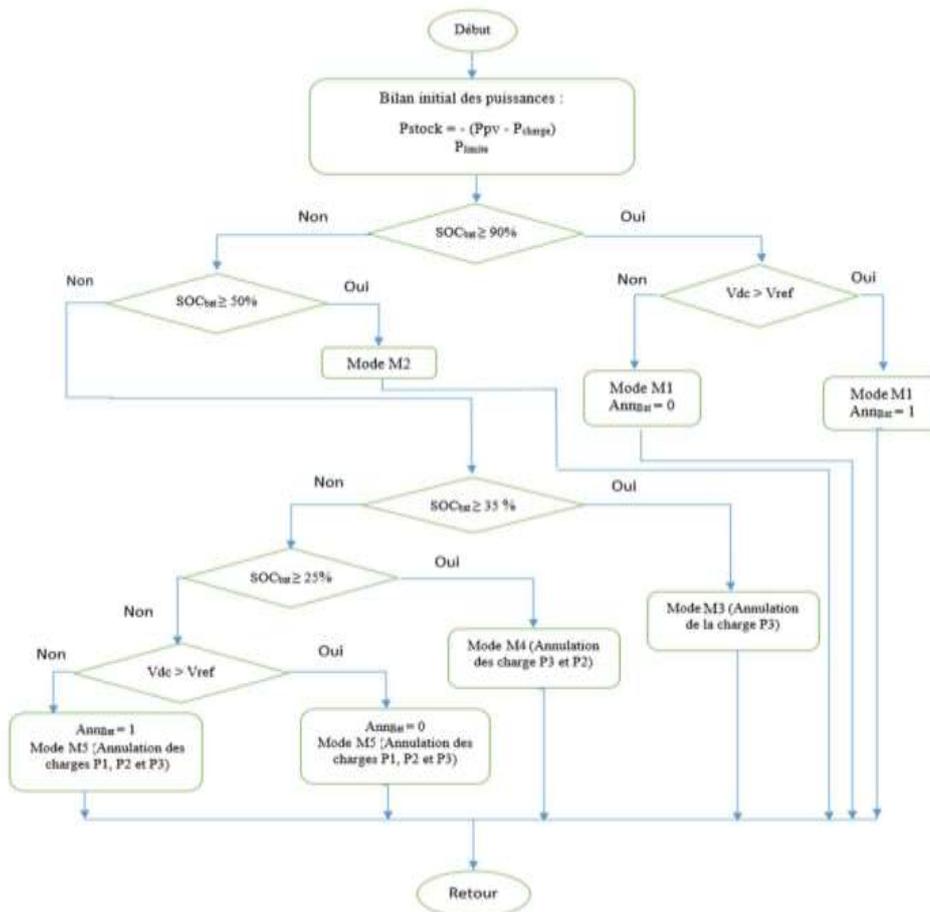


Fig. IV.36. Algorithme de gestion des flux énergétiques du système photovoltaïque en mode isolé.

### IV.13. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons simulé les différentes techniques de maximisation conventionnelle et celle à base de l'intelligence artificielle sous la variations des conditions climatiques et les résultats obtenues montrent la validité et l'efficacité des approches ou technique proposées en premier lieu et la deuxième partie de ce chapitre est dédié aux différents modes de stockage d'énergie électrique surtout avec l'utilisation des sources d'énergie renouvelables telles que le solaire pour atteindre la durabilité en termes d'énergie, environnement et réduire les émissions nocives alors que le plus grand défi réside dans la gestion des fluctuations de production d'énergie de ces sources. Le stockage d'énergie électrique offre une solution vitale à ces fluctuations, assurant

la stabilité des réseaux électriques et la durabilité de l'approvisionnement en électricité. Donc le stockage d'énergie électrique est une technologie essentielle dans notre parcours vers un avenir énergétique plus durable et fiable. Comprendre son rôle et l'appliquer de manière efficace représente à la fois un défi et une opportunité pour apporter un changement positif à notre système énergétique, en équilibrant les besoins actuels et ceux des générations futures.

*CONCLUSION  
GENERALE*

## **Conclusion Générale**

Actuellement et face à la croissance démographique continue des populations et à la modernisation de la société. La demande mondiale en énergie électrique ne cesse d'augmenter car l'électricité est la meilleure illustration des besoins du consommateur. En raison de ses innombrables applications à la fois industrielles et domestiques, il serait difficile d'envisager de vivre aujourd'hui sans électricité, alors que les sources d'énergie conventionnelles tendent à s'épuiser par effet de l'utilisation irrationnelle de l'humanité.

L'efficacité d'une installation photovoltaïque repose essentiellement sur les conditions météorologiques telles que l'ensoleillement et la température surtout que la puissance fournie par le générateur photovoltaïque peut fluctuer en raison des changements ou variations des conditions climatiques. Une installation photovoltaïque de qualité est celle où la puissance fournie par le générateur photovoltaïque est maximisée, quelles que soient les conditions d'utilisation dont plusieurs approches conventionnelles et avancées sont souvent utilisées pour poursuivre le point maximal de la puissance.

Les générateurs photovoltaïques présentent de grandes variations de leur puissance électrique en fonction des conditions météorologiques. De plus, quand le GPV est connecté à une charge, certains problèmes apparaissent, et la puissance transférée à la charge correspond rarement à la puissance maximale qu'il peut fournir.

Pour avoir la meilleure connexion entre une source non linéaire et une charge arbitraire et produire la meilleure puissance, le contrôleur maximum power point tracking " (MPPT) a été développé depuis longtemps. Ce genre de contrôleur, particulièrement adapté pour piloter une source non linéaire, force le générateur à produire le maximum de puissance disponible à ses bornes, induisant une amélioration globale du rendement du système de conversion électrique. Pour atteindre cet objectif, de différentes commandes MPPT conventionnelles, avancées et algorithmes d'optimisation ont été utilisés dans ce travail.

La modélisation des différents éléments de base du système de conversion photovoltaïque considéré a été effectuée toute en évoquant l'aspect de la modélisation du générateur photovoltaïque et du convertisseur. La modélisation du système PV a consisté à la mise en équations des différentes parties des constituant : la source primaire (température et ensoleillement), le convertisseur statique : l'hacheur survolteur (Boost) et dévolteur (Buck), permettant la commande en tension du panneau photovoltaïque. Il s'agit donc d'optimiser le traitement global de l'énergie électrique au sein du système et en particulier au niveau du générateur, en plaçant celui-ci à chaque instant à son point optimal de fonctionnement grâce à un système de poursuite de type MPPT. De plus, en raison de

leur fonctionnement en commutation, ces convertisseurs statiques sont des générateurs de perturbations susceptibles de nuire au bon fonctionnement du générateur tant sur le plan électrique qu'énergétique. Sur le plan énergétique, les ondulations de la tension ou du courant à l'entrée de certains convertisseurs se traduisent par une oscillation du point de fonctionnement sur la caractéristique autour du point de puissance optimale, qui implique une dégradation de la conversion photovoltaïque.

Pour surmonter le problème de rendement des panneaux photovoltaïques et obtenir un rendement maximum, il est nécessaire d'optimiser la conception de toutes les parties du système PV. En outre, il est nécessaire d'optimiser les convertisseurs DC/DC (continu/continu) employés comme interface entre le générateur PV et la charge afin d'extraire le maximum de puissance et faire fonctionner le générateur PV à son point de puissance maximum (PPM) à l'aide des contrôleurs MPPT (maximum power point tracking) conventionnelles et avancés, par conséquent, obtenir un courant électrique maximum sous la variation de la charge et des conditions atmosphériques (luminosité et température).

Un intérêt particulier est accordé à la validation par simulation des différents scénarios climatiques en tenant compte de l'utilisation des différentes techniques conventionnelles et avancées dédiés à la maximisation de la puissance. Plusieurs critères d'optimisation de l'efficacité du système photovoltaïque considéré ont été appliqués afin d'avoir une bonne adaptation et un rendement élevé. Parmi ces techniques de poursuite de Point de puissance maximale” ou “Maximum Power Point Tracker (MPPT)”telles que : P&O et INC et celle basées sur l'intelligence artificielle comme la logique floue et optimisation par essais particuliers (PSO) ont été introduit et utilisées afin d'améliorer les performances, augmenter le rendement avec plus de fiabilité du système photovoltaïque considéré.

Les résultats obtenus montrent l'efficacité des techniques proposés et surtout à base de l'intelligence artificielle et une comparaison entre les différentes techniques abordées a été présenté. Cette comparaison a été réalisée dans des conditions presque similaires pour évaluer l'efficacité et les performances de chaque algorithme les uns par rapport aux autres. Une validation par simulation a été mise en œuvre pour illustrer les performances des algorithmes ou techniques proposés. Toutefois, un défi majeur persiste : l'inconstance de l'énergie solaire en fonction des conditions météorologiques. Pour résoudre ce problème, il est nécessaire d'installer des dispositifs de stockage d'énergie, tels que des accumulateurs, afin de maintenir un approvisionnement stable dans le réseau électrique pendant ces périodes de faible production solaire.

L'originalité dans ce travail réside dans l'utilisation de la technique avancée d'optimisation(PSO) comme moyen pour la maximisation de la puissance dans système photovoltaïque sous la variation des conditions climatiques où l'optimisation de la production de l'énergie solaire est toujours d'actualité surtout avec l'émergence de nouvelles applications dans les domaines des énergies renouvelables et de l'environnement.

# *Annexes*

L'algorithme PSO

```

function D = PSO(Vpv,Ipv)
persistent u;
persistent dcurrent;
persistent pbest;
persistent p;      %power
persistent dc;     %duty cycle
persistent v;      %velocity
persistent counter;
persistent gbest;
% initialization :
if isempty(counter)
counter=0;
dcurrent=0.5;      %current duty cycle
gbest=0.5;
    p=zeros(3,1);  %power
    v=zeros(3,1);  %voltage
pbest=zeros(3,1);
    u=0;
dc=zeros(3,1);    %duty cycle
%initial dc for each particle
dc(1)=0.2;
dc(2)=0.4;
dc(3)=0.7;
end
% AT the first time , this if ignored (counter=0)
%Delay
if(counter>=1 && counter<300)
    D=dcurrent;
counter=counter+1;
return;           %return control to the invoking function before it reaches the end of the function.
end
counter=0;        %reset the counter

```

```

%calculate the fitness function (power) of each particle,
%then compare the current value of the function with previous one
%if the current value is better than the previous ,update the value
%Note: at the first time , this if ignored (u=0)
if(u>=1 && u<=3)
if((Vpv*Ipv)>p(u))
p(u)=Vpv*Ipv;
pbest(u)=dcurrent;
end
end
u=u+1;
% AT the first time , this if excuted because it consist the condition...
% u==0(initial value of u)
if(u==5)
    u=1;
end
if(u==1)
D=dc(u);
dcurrent=D;
counter=1;
return;
elseif(u==2)
    D=dc(u);
dcurrent=D;
counter=1;
return;
elseif(u==3)
D=dc(u);
dcurrent=D;
counter=1;
return;
elseif(u==4 )
    [m,i]=max(p);    %finds the indices of the maximum values of P (max power)and returns them
in output vector i

```

```

gbest=pbest(i); % find the location(duty) of the particle which has max P
    D=gbest;
dcurrent=D;
counter=1;
%update velocity and duty cycle
    v(1)=updatevelocity(v(1),pbest(1),dc(1),gbest)
    v(2)=updatevelocity(v(2),pbest(2),dc(2),gbest)
    v(3)=updatevelocity(v(3),pbest(3),dc(3),gbest)
%update duty cycle
dc(1)=updateduty(dc(1),v(1))
dc(2)=updateduty(dc(2),v(2))
    dc(3)=updateduty(dc(3),v(3))
return;
else%if u==0
    D=0.1;
end
end
functionvfinal=updatevelocity(velocity,pobest,d,gwbest)
% PSO Parameters
w=0.4;
c1=2; % Personal Learning Coefficient
c2=2; % Global Learning Coefficient
vfinal = (w*velocity)+(c1*rand(1)*(pobest-d))+(c2*rand(1)*(gwbest-d));
end
functiondfinal=updateduty(d,velocity)
dup=d+velocity;
if(dup>1)
dfinal=1;
elseif(dup<0)
dfinal=0;
else
dfinal=dup;
end
end
end

```

### L'algorithme INC

```
function duty = mppt_algorithm(vpv,ipv)
% I used the mppt algorithm in the matlabexempl
% I only
duty_init = 0.25;
duty_min = 0.1;
duty_max = 0.5309;
delta=0.005;
persistent voldioldduty_old
datatype=('double');
if isempty (vold)
vold = 0;
iold = 0;
duty_old = duty_init;
end
dv = vpv-vold;
di = ipv-iold;
if (dv==0)
if (di==0)
duty=duty_old;
else
if (di>0)
duty=duty_old-delta;
else
duty=duty_old+delta;
end
end
else
if(di/dv==(-ipv/vpv))
duty=duty_old;
else
if(di/dv>(-ipv/vpv))
duty=duty_old-delta;
```

```

else
duty=duty_old+delta;
end
end
end
if duty >= duty_max || duty <= duty_min
duty = duty_old
end
duty_old=duty;
vold=vpv;
iold=ipv;

```

### L'algorithme P&O

```

function D = PO(Vpv,Ipv)
Dmax=0.5309;
Dmin=0.1;
Dinit=0.12;
deltaD=1e-4;
persistent Dpre Ppre Vpre;
%first run
if isempty(Dpre)
Dpre=Dinit;
Vpre=0;
Ppre=0;
end
Ppv=Vpv*Ipv;
dp=Ppv-Ppre;
dv=Vpv-Vpre;
if dp~=0
if(dp>0)
if(dv<0)
D=Dpre+deltaD;
else
D=Dpre-deltaD;

```

```
end
else
if(dv<0)
        D=Dpre-deltaD;
else
        D=Dpre+deltaD;
end
end
else
        D=Dpre;
end
if D>=Dmax || D <= Dmin
        D=Dpre;
end
Ppre=Ppv;
Vpre=Vpv;
Dpre=D;
End
```

# *BIBLIOGRAPHIQUE*

<b>Bibliographie</b>	
[1]	K. Kassmi et M. Hamdaoui et F. Olivie, "Conception et modélisation d'un système photovoltaïque adapté par une commande MPPT analogique", Université de Maroc, revue des énergies renouvelables, pp 451 – 462, 2007.
[2]	Alain Bilbao Learreta," Réalisation d'une commande MPPT numérique ", Mémoire ingénieur, LAAS /CNRS, Septembre2006.
[3]	Aziz, K. Kassmi, F. Olivie, G. Sarrabayrouse, "Synthèses bibliographiques sur les chaines photovoltaïques", Rapport Laas N°04348,27p, Juin2004.
[4]	Boualem Dendib," Technique conventionnelles et avancées de poursuite MPPT pour des applications photovoltaïque " : étude comparative." Université Ferhat Abbas-Sétif, mémoire de magister, Département d'électronique TS4/6338,2007.
[5]	S. Naoual, "Modélisation et extraction automatique des paramètres d'un générateur," université Ferhat Abbas de Sétif mémoire de magister, département d'électrotechnique 2010.
[6]	Cédric Cabal, « Optimisation énergétique de l'étage d'adaptation électronique dédié à la conversion photovoltaïque », Thèse de Doctorat, Université de Toulouse, Décembre 2008.
[7]	Bisker. A, Chiri .M, " Commande d'un Système Photovoltaïque en mode Isolé et en mode Connecté au Réseau", Projet de fin d'études En vue de l'obtention du diplôme D'Ingénieur d'État en Électrotechnique, École Nationale Polytechnique, Juin 2012.
[8]	Hananou. F, Rouabah.A,"Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque", Master academique, Universite Kasdi Merbah Ouargla, 09 /06/2014
[9]	Bouznit, M., Pablo-Romero, M., and Sánchez-Braza, A. Measures to promote renewable energy for electricity generation in Algeria. Sustainability, 12(4), 1468,2020
[10]	Harrouz, A., Abbas, M., Colak, I., & Kayisli, K. (2017). Smart grid and renewable Energy in Algeria. 6th International Conference on Renewable Energy Research and Applications
[11]	RCREEE- Regional Center for Renewable Energy and Energy Efficiency (2019) Arab future energy index (AFEX), Renewable energy 2019. <a href="https://www.rcreee.org/content/arab-future-energy-indexrenewable-energy-2019-reportREN21">https://www.rcreee.org/content/arab-future-energy-indexrenewable-energy-2019-reportREN21</a> . (2019). Renewables 2019 global status report.
[12]	CEREFÉ – Commission for Renewable Energy and Energy Efficiency. (2020), Transition énergétique en Algérie.
[13]	H. Atmania et A. Salem, L'investissement dans les énergies renouvelables en Algérie ; un pas vers latransition énergétique (Cas de l'énergie solaire), Revue Algérienne d'Economie de gestion Vol.12, N° 01, Revue Algérienne d'Economie de gestion Vol. 12, N° 01, p 151-167, 2018
[14]	Hebri Assia,"Le programme des energies renouvelables en algérie vers une efficacité énergétique " D'ici 2030. Volume 8, Numéro 2, Pages 351-362,2018-04-05
[15]	Anne Labouret, Michel Viloz, "Energie photovoltaïque", Dunod 3eme édition, 2006. Bernard Eque, Energie solaire photovoltaïque (Ellipses 2004).
[16]	Adel et Shahat, PV cell module modeling and simulation for smart grid applications, Journal of Theoretical and Applied Information Technology, JATIT All rights reserved,

	pp 9-20, 2010.
[17]	A. Gow and C.D. Manning ,Development of a Photovoltaic Array Model for Use in PowerElectronics Simulation Studies ,IEE Proceedings on Electric Power Applications, Vol. 146, N°2, pp. 193- 200, 1999
[18]	K.H. Hussein I. Muta T. Hoshino M.Osakada, Maximum photovoltaic power tracking: an algorithm forrapidly changing atmospheric conditions,IEE Proc-Gener. Trans. Distrib, Vol. 142, No. 1, pp 59-64 January1995.
[19]	Rapport de stage projet de fin d'études Ingénieur Technique Industrielle, Septembre 2006 ,Réalisation de Technique MPPT numérique, par Alain Bilbao Learreta, Université Virgile
[20]	V. Didier, "les onduleurs des systèmes photovoltaïques : fonctionnement, état de l'art et étude des performances", rapport HESPUL, Villeurbanne, 2007.
[21]	Cahier Technique, "photovoltaïque 2010", Socomec SA, Strasbourg, 2010.
[22]	J. Birkl, P. Zahlmann, "protection contre des installations photovoltaïques", Exigences, procédures de test et applications pratiques", l'artisan Electricien Electronicien N° 439 - Avril/Mai 2010.
[23]	L.Bun, "Détection et Localisation de Défauts pour un Système PV", thèse de doctorat, université de Grenoble, 2011.
[24]	S. Silvestre, A. Boronat, A. Chouder, "Study of bypass diodesconfiguration on PV modules", Applied Energy 86 (2009) 1632-1640.
[25]	N. Abouchabana, " Etude d'une nouvelle topologie buck-boost appliquée à unMPPT ", Mémoire de Magistère, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, Algérie, 2009
[26]	YaakoubBenyahia, "Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque adapté par une commande MPPT", Mémoire de fin d'études, 6 pages, page 34-35, 22/06/2013
[27]	M.alkisihem "maximum power point tracking(MPPT) for photovoltaicSystems ",these magister, Université de Boumerdes, 2011
[28]	N. Abouchabana, "Etude d'une nouvelle topologie buck-boost appliquée à un MPPT ", Mémoire de Magistère, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, Algérie, 2009
[29]	Rabah Dhouadi, "Commande avancée d'un système photovoltaïque", thèse de doctorat, Université de Skikda, 2022.
[30]	Salama fateh, "Modélisation d'un système multi générateurs photovoltaïques interconnectés au réseau électrique", Mémoire de Magister, Universite Ferhat Abbas – Setif, 2011.
[31]	J.P.Ferrieux, F.Forest.Dunod," alimentations à découpage, convertisseurs à résonance"
[32]	W.Xiao, «A Modifed Adaptative Hill Climbing Maximum Power Point TrackingMPPT Control Method for Photovoltaic Power Systems", Université de Columbia, 2003.

[32]	A. Cid bastor "conception et réalisation de modules photovoltaïques électroniques", Thèse de doctorat à l'institut national des sciences appliquées de Toulouse 2006.
[33]	M. S. Jamri and T. C. Wei," Modeling and Control of a Photovoltaic Energy System Using the State-Space Averaging Technique", American Journal of Applied Sciences 7 (5): 682-691, 2010.
[34]	K. Kassmi, M. Hamlaoui et F. Olivier, "Conception et modélisation d'un système photovoltaïque adapté par une commande MPPT analogique ", Revue des Energies Renouvelables Vol. 10 N°4 (2007) 451 – 462.
[35]	T. Mrabti, M. El Ouariachi, K. Kassmi, F. Olivié et F. Bagui,"Conception, modélisation et réalisation d'un système photovoltaïque de moyenne puissance", Revue des Energies Renouvelables Vol. 11 N°4 (2008) 567 – 575.
[36]	V. Boitier, P. Maussion " Recherche du maximum de puissance sur les générateurs Photovoltaïques", 1 LAAS-CNRS ; Université de Toulouse ; 7, avenue du Colonel Roche, F-31077 Toulouse, France.
[37]	A. Yafaoui., B. Wu and R., "Cheung implementation of maximum power point tracking algorithm for residential photovoltaic systems", 2nd Canadian Solar Buildings Conference Calgary, June 10 – 14, 2007.
[38]	Chouder, A. Rahmani, L. Sadaoui, N. Silvestre, S, "Modeling and simulation of a grid connected PV system based on the evaluation of main PVmodule parameters. Simul". Model. Pract. Theory 20, 46–58, 2012.
[39]	Sheik Mohammed, S., "Modeling and simulation of photovoltaic module using MATLAB/ Simulink", Int. J. Chem. Environ. Eng. 2, 2011
[40]	Anne, Labouret, Michel, Vilozz., "Energie solaire photovoltaïque" Ellipses 2006
[41]	V. Boitier, P. Maussion "Recherche du maximum de puissance sur les générateurs Photovoltaïques ", LAAS-CNRS ; Université de Toulouse ; 7, avenue du Colonel Roche, F-31077 Toulouse, France.
[42]	Huan-Liang Tsai., Ci-Siang Tu., Yi-Jie Su., 2008. "Development of generalized photovoltaic model using MATLAB/Simulink". Proceedings of the World Congress on Engineering and Computer Science October 22 - 24, San Francisco, USA.
[43]	C. Cedric, "Optimisation énergétique de l'étage d'adaptation électronique dédié à la conversion photovoltaïque", Thèse de Doctorat de l'université de Toulouse, Décembre 2008
[43]	H.Abouabaida, M.Cherkaoui, M.ouassaid,"Robust Maximum Power tracking for fast changing environmental conditions", International review on modelling and simulations, Vol:04, N°:01, pp:391-396,2011
[44]	H.Abouabaida, M.Cherkaoui, M.ouassaid,"Backstepping controller in close cooperation with MPPT algorithm for PV system", Journal of Electrical Engineering, Vol:12, 2012
[45]	M.Amarouayache,"Contribution à l'optimisation d'une chaîne de conversion d'énergie photovoltaïque", Thèse de doctorat en sciences en électrotechnique, Université de Constantine1, 2014
[46]	L.Ahlam, A.Zouletkha, « Application de la logique floue pour la poursuite du point de puissance maximale d'un générateur photovoltaïque ». Mémoire de Master, Université Saida, 2017.
[47]	Z.Ayache, A.Bendaoud, H.Slimani, B. Benazza, H. Miloudi, A. Bentaallah «Commande MPPT et Contrôle d'un Système Photovoltaïque par la Logique Floue». Laboratoire IRECOM, Université Djilali Liabès.

[48]	Mohamed Redha Rezoug, Rachid Chenni and Djamel Taibi , « Fuzzy Logic-Based Perturb and Observe Algorithm with Variable Steps of a Reference Voltage for Solar Permanent Magnet Synchronouns Motor Drive System Fed by Direct-Connected Photovoltaic Arry » <i>Renew. Energies</i> , 2018.
[49]	M.Boukli Hacene Omar, « Conception et Réalisation d'un générateur photovoltaïque Muni d'un convertisseur MPPT pour une Meilleure Gestion Energétique». Mémoire Magister, Université Abou Bakr Belekaid, 2011
[50]	Mohamed Redha Rezoug, Rachid Chenni and Djamel Taibi , « Fuzzy Logic-Based Perturb and Observe Algorithm with Variable Steps of a Reference Voltage for Solar Permanent Magnet Synchronouns Motor Drive System Fed by Direct-Connected Photovoltaic Arry » <i>Renew. Energies</i> , 2018, 11, 02–15
[51]	Hadji Slimane, « Optimisation de la conversion énergétique pour les systèmes à énergie Photovoltaïque », <i>Electronique</i> , These de doctorat, Université Ferhat Abbas Sétif1, 2018.
[52]	Ali M. Eltamaly , M. S. Al-Saud , A. G. Abo-Khalil ,« Performance Improvement of PV Systems Maximum Power Point Tracker Based on a Scanning PSO Particle Strategy », 2020.
[53]	Zainal Salam Kashif Ishaque. An improved particle swarm optimization (psa)–based mppt for pv with reduced steady-state oscillation. <i>Science-direct</i> , Aug 2011.
[54]	Mahamed G. H. Omran. Particle swarm optimization methods for pattern. November 2004.
[55]	Bendahou Djamel et Bourouis El-Abbes, ” Commande MPPT pour les systèmes photovoltaïques en utilisant l’optimisation par essaim de par-ticules. M’emoire de master, Université Saad Dahlab de Blida, 2013.
[56]	A. A. BOUDIBA, ”Système de gestion de batteries–Estimation de l’état de charge” Doctorat dissertation, 2021
[57]	Boujoudar Youness, Système de gestion des batteries et estimation d’état de charge par réseaux de neurones. Mémoire master <i>Electronique Signaux et Systèmes Automatisés</i> , Fès Maroc, (2016)
[58]	Linden, D. and Reddy. « Handbook of Batteries, Third Edition». McGraw-Hill, 2002.