REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE YAHIA FARES DE MEDEA

Faculté de **T**echnologie

Mémoire de fin d'études de Master

Filière : Electrotechnique
Spécialité : Réseau Electrique

Utilisation des Algorithmes méta heuristiques Pour l'optimisation de Contrôleur Flou, application à une source PV raccordé au réseau électrique

---

Présenté par :

SELMI Asmaa

DEBBOUB Besma

Proposé et Dirigé par :

Dr. OULD CHERCHALI Noureddine

Dr. MORSLI Abdelkader

Promotion 2020

Remerciements

Avant tout, nous remercions Allah pour m'avoir donné la santé, le courage et la patiente nécessaires pour l'aboutissement de ce travail.

Nous tenons à exprimer notre remerciement et notre gratitude à notre encadreur : Mr. Docteur OULD CHERCHALI Noureddine pour la confiance qu'il nous a prodigué pour la direction de ce travail,, de ses conseils appréciables, de sa disponibilité, de son soutien moral, de ses directives pertinentes et pour l'intérêt manifeste qu'il a porté à ce projet.

Nous exprimons aussi notre respect et remerciements à mon codirecteur Docteur MORSLI Abdelkader qui n'a épargné aucun moyen pour me soutenir, et aussi pour ses conseils précieux.

Nos remerciements au département de Génie Electrique de l'université de Médéa Yahia Fares et à tous les enseignants qui nous enseignés durant les années curcus.

Nos remerciements sont également adressés aux membres de jury qui ont accepté de juger ce travail

Enfin , nous remercions aussi toutes les nos familles et les personnes qui nous ont aidés de près ou de loin à la rédaction de ce travail spécifiquement notre bonne sœur BOUKIRAT SAMIA et notre collègues de classe branche réseau électrique.

Dédicace

A l'aide de dieu tout puissant, qui m'a tracé le chemin de ma vie, j'ai pu réaliser ce travail que je dédie :

A deux êtres qui me sont très chers dans cette vie, à savoir mon père Said et ma mère Rabia.

Je leur dis merci Papa du fond de mon cœur pour ton éducation, ton sacrifice, ton assistance et pour ce que tu m'as fait et qui m'a permis d'avoir cette réussite et ce bonheur.Que Dieu ait pitié de vous et vous fasse vivre au paradis.

Je te dis merci et mille fois merci Mama pour ta patience, ton courage et ton sacrifice pour moi.

♥Ma cher frère :*Rabeh*

♥Me chère sœur :*Nawel*

♥ A mes chers amis

Et A tous mes amies qui j'ai connus dans :Tout les Années universitaires ♥.

Dédicace

Avec l'expression de ma reconnaissance, je dédie ce modeste travail à ceux qui, quels que soient les termes embrassés, je n'arriverais jamais à leur exprimer mon amour sincère.

♥ A l'homme, mon précieux offre du dieu, qui doit ma vie, ma réussite et tout mon respect : mon cher père *Mahmoud*.

♥ A la femme qui a souffert sans me laisser souffrir, qui n'a jamais dit non à mes exigences et qui n'a épargné aucun effort pour me rendre heureuse : mon adorable mère *Fadila*.

♥Mes chers frères :Mouhamed et Oussama.

♥A mes chères sœurs :Amina et bouchra.

qui n'ont pas cessée de me conseiller, encourager et soutenir tout au long de mes études. Que Dieu les protège et leurs offre la chance et le bonheur.

♥sans oublier mes petits anges : Rayan , Nour et Amir .

et les amis que j'ai connu jusqu'à maintenant. Merci pour leurs amours et leurs encouragements♥.

ملخص :

تتعلق هذه الأطروحة بدراسة أداء سلسلة التحويل الكهروضوئية المتصلة بالشبكة. الهدف الرئيسي هو إيجاد خوارزمية أو قانون لتحسين PSO تحكم فعال ومثالي يسمح باستخراج جهد الخرج. في هذا العمل، تم إدخال تحكم جديد باستخدام خوارزمية تحسين وظائف العضوية لوحدة التحكم الغامضة، وأظهرت نتائج المحاكاة أن أداء وحدة التحكم التي تم الحصول عليها قد تم تحسينه مقارنة بأداء وحدة التحكم الأصلية الضبابية. تظهر نتائج المحاكاة التي تم الحصول عليها تحت Matlab / SimPowerSystems الإصدار أداء التحكم في السلوك الديناميكي للأنظمة الكهروضوئية

الكلمات : DC-DC ; محول، Gpv الخلايا الكهروضوئية P-O، PSO وحدة التحكم المنطقية الضبابية وظيفة العضوية

Abstract :

This thesis concerns a study on the performance of a photovoltaic conversion chain connected to the network. The main objective is to find an algorithm or an efficient and optimal control law allowing extracting the output voltage. In this work, new control have been introduced using a PSO optimization algorithm, to improve the membership functions of a fuzzy controller, The simulation results show that the performance of the obtained controller has been improved compared to that of a fuzzy controller original. The simulation results obtained under Matlab / SimPowerSystems version R2012a show the performance of the control in the dynamic behavior of photovoltaic systems.

Keywords: DC-DC converter Gpv, Photovoltaics, , Fuzzy logic controller, Membership function, Optimization, PSO,

Résumé :

Ce mémoire concerne une étude sur les performances d'une chaine de conversion photovoltaïque raccordé au réseau.. L'objectif principal est de trouver un algorithme ou une loi de commande efficace et optimale permettant d'extraire la tension de sortie.Dans ce travail, de nouvelle commande ont introduits utilisant un algorithme d'optimisation PSO, pour améliorer les fonctions d'appartenance d'un contrôleur floue, Les résultats de la simulation montrent que les performances de contrôleur obtenu ont été améliorées par rapport à celle d'un contrôleur floue originale. Les résultats de simulation obtenus sous Matlab/SimPowerSystems version R2012a montrent la performance du contrôle dans le comportement dynamique des systèmes photovoltaïques.

Mots clés : Gpv, Photovoltaïque, Convertisseur DC-DC, Contrôleur logique floue, Fonction d'appartenance, Optimisation, PSO, P&O.

RESUME I
TABLE DES MATIERES II
LISTE DES TABLEAUX V
LISTE DES FIGURES VI
GLOSSAIRE DES TERMES TECHNIQUES VII

INTRODUCTION GENERALE 1

CHAPITRE I: système photovoltaïque

I.1 Introduction 3

I.2 Système photovoltaïque 3
I.2.1 Définition : 3
I.2.2 Principe de fonctionnement: 3
I.2.3 Cellule photovoltaïque : 5
I.2.4 Module photovoltaïque : 6
I.2.5 Panneaux photovoltaïques : 7
I.2.6 Champ photovoltaïque : 7
I.2.7 Avantages et Inconvénients l'énergie solaire photovoltaïque : 9
I.2.7.1 Avantage : 9
I.2.7.2 Inconvénients : 9

I.3 Les différentes technologies des cellules solaires : 10
I.3.1 Silicium monocristallin le silicium cristallin : 10
I.3.2 Silicium poly cristallin : 10
I.3.3 Silicium amorphe (a-si) : 11
I.3.4 Cellule Tandem : 12
I.3.5 Cellule multi-jonction : 12

I.4 Comparatif des différentes technologies : 13

I.5 Facteur de forme : 13

I.6 Rendement photovoltaïque : 14

I.7 Générateur photovoltaïque : 14
I.7.1 Caractéristique Courant-Tension : 15
I.7.2 Influence de l'éclairement et la température sur les courbes I=f(V) et P=f(V) : 16
I.7.3 Influence de l'association série des cellules PV : 18
I.7.4 Influence de l'association parallèle des cellules PV : 19
I.7.5 Influence de l'association mixte (Série +Parallèle) des cellules PV : 19

I.8 Modélisation du module photovoltaïque : 20
I.8.1 Cas d'une cellule idéale : 20
I.8.2 Cas d'une cellule réelle : 21

I.9 Conclusion 22

Chapitre II : Les convertisseurs (DC/DC) la commande par l'intelligence artificielle

II.1 Introduction 23

II.2 Le générateur photovoltaïque (GPV): 23
II.2.1 Connexion directe : 23
II.2.2 Connexion indirecte : 24

II.3 Les convertisseurs DC-DC (hacheurs) : 25
II.3.1 Convertisseur Boost (hacheur survolteur) : 26
II.3.1.1 Modèle mathématique équivalent : 27
II.3.1.2 Modèle approximé du convertisseur Boost : 28

II.4 Régulateurs Proportionnelle – Intégrale (PI) : 29

II.5 Poursuite du point de puissance maximale (MPPT) : 29
II.5.1 Définition de l'MPPT d'un système solaire photovoltaïque : 29
II.5.2 Les commandes MPPT : 30
II.5.2.1 Méthode MPPT de Perturb and Observe (P&O) : 30

II.6 les onduleurs : 33
II.6.1 Onduleurs autonomes : 33
II.6.2 Onduleurs non autonomes(ou assistés) : 34
II.6.3 Onduleur monophasé : 35
II.6.4 Onduleur triphasé : 35
II.6.5 Commande des onduleurs : 35
II.6.5.1 Commande par modulation de largeur d'impulsion : 35
II.6.5.2 Caractéristiques de la modulation : 36

II.7 Logique floue : 36
II.7.1 Généralité : 36
II.7.2 Principe de la logique floue : 37
II.7.3 Méthode Mamdani : 37
II.7.4 Fonctions d'appartenance : 37
II.7.5 Structure générale d'un régulateur par logique floue : 39

II.8 Les avantages et les inconvénients : 40
II.8.1 Avantage : 40
II.8.2 Les Inconvénients : 40

II.9 Conclusion : 41

Chapitre *III: L'Optimisation par Essaim Particulaire (OEP)*

III.1 Introduction: 42

III.2 L'Optimisation par Essaim Particulaire (*OEP*) : 42

III.3 Principe : 43

III.3.1 Principales caractéristiques : 43

III.4 Formalisation mathématique du PSO : 44

III.5 Configuration de la méthode : 45
III.5.1 Nombre de particules : 45
III.5.2 Notion de voisinage : 45
III.5.3 Topologie du voisinage : 46
III.5.4 Coefficient de confiance : 47
III.5.5 Vitesse maximale et coefficient de constriction : 47
III.5.6 Facteur d'inertie : 48

III.6 Initialisation de l'essaim : 49
III.6.1 Critères d'arrêt : 49

III.7 Fonctionnement : 49

III.8 Avantages et inconvénients de PSO : 52

III.9 CONCLUSION : 52

CHAPITRE IV: Résultats de simulation et discussions

IV.1 Introduction : 53

IV.2 L'outil Matlab/simulik : 53

IV.3 Description de système : 53
IV.3.1 Le panneau solaire : 55
IV.3.2 Le convertisseur dc-dc (Le hacheur) : 56
IV.3.2.1 Convertisseur Hacheur Boost : 56
IV.3.2.2 Convertisseur Onduleur : 56

IV.4 Commande du convertisseur DC/AC par régulateur PI : 57

IV.5 Commande du convertisseur DC/AC par régulateur flou : 57

IV.6 Analyse des résultats : 58
IV.6.1 Commande du convertisseur réglage de bus continu Vdc par régulateur PI (T=25 $C0$& G=1000W/$m2$) : 58
IV.6.2 Commande du convertisseur et réglage de bus continu Vdc par logique floue : 59
IV.6.2.1 résultat de simulation (T=250 C & G=1000W/m2) : 61
IV.6.3 Commande du convertisseur réglage de bus continu Vdc par logique floue optimisé : 63

IV.7 Etude comparative entre les trois contrôleurs dans les conditions standard (T=25°C et G=1000 w/m2) : 69

IV.8 les résultats obtenus de simulation raccordée au réseau : 70

CONCLUSION GENERALE : 72

BIBLIOGRAPHIE 73
ANNEXE 77

Liste des Tableaux

CHAPITRE I

Tableau I. 1 *comparatif des deferentes technologies cellule.* 13

CHAPITRE IV

Tableau IV. 1 *tableau des gains trouves.* 60
Tableau IV. 2 *tableau de regles floues.* 60
Tableau IV. 3 *valeurs obtenus.* 65

CHAPITRE I

Figure I. 1 energie solaire. 3
Figure I. 2 le prie de fonctionnement d'une cellule solaire. 4
Figure I. 3 schema electrique de principe de fonctionnement photovoltaïque 5
Figure I. 4 structure basique d'une cellule solaire 6
Figure I. 5 module photovoltaïque. 7
Figure I. 6 panneaux photovoltaïques. 7
Figure I. 7 constitution d'un champ photovoltaïque. 8
Figure I. 8 photos d'une cellule monocristalline. 10
Figure I. 9 photo de cellule poly cristallin. 11
Figure I. 10 photo d'une cellule amorphe. 11
Figure I. 11 une cellule tandem 12
Figure I. 12 une cellule multi-jon 12
Figure I. 13 caracteristique i =f (v) d'un module photovoltaïque. 15
Figure I. 14 l'influence de l'eclairement sur la caracteristique i=f(v). 16
Figure I. 15 l'influence de l'eclairement sur la caracteristique p=f(v). 16
Figure I. 16 l'influence de la temperature sur la caracteristique i=f(v). 17
Figure I. 17 l'influence de la temperature sur la caracteristique p=f(v). 17
Figure I. 18 association de n modules solaires en serie 18
Figure I. 19 association de np modules solaires en parallele 19
Figure I. 20 association mixte ns x np modules solaires 19
Figure I. 21 schema equivalent d'une cellule ideale. 20
Figure I. 22 schema equivalent d'une cellule photovoltaïque reelle 21

CHAPITRE II

Figure II. 1 connexion directe entre un gpv et une charge. 23
Figure II. 2 points de fonctionnement d'un gpv en connexion directe pour differentes charges dc . .. 24
FigureII. 3 connexion d'un gpv a une charge a travers un etage d'adaptation. 25
Figure II. 4 montre la representation d'un convertisseur dc/dc. 26
FigureII. 5 schema electrique du convertisseur boost . 27
Figure II. 6 schemas equivalents du hacheur survolteur, pour k est ferme. 27
Figure II. 7 schemas equivalents du hacheur survolteur, pour k est ouvert t∈ [dts , ts] 27
Figure II. 8 chaine elementaire de conversion photovoltaïque avec convertisseur statique controle par une commande mppt sur charge quelconque 29
Figure II. 9 organigramme de l'algorithme p&o 31
Figure II. 10 recherche du ppm par la methode (p&o) 32
Figure II. 11 schema de principe de l'onduleur. 33
Figure II. 12 alimentation sans coupure 34
Figure II. 13 representation d'un onduleur triphase. 35
Figure II. 14 formes usuelles des fonctions d'appartenance. 39
Figure II. 15 structure generale d'un regulateur par logique floue. 39

CHAPITRE III

FigureIII. 1 groupe d'oiseux 43
Ffigure III. 3 un voisinage geographique..... 45
Figure III. 4 voisinage etoile 46
Figure III. 5 voisinage anneau 46
Figure III. 6 voisinage rayon. 47
Figure III. 7 optimisation par essaim particulaire (oep). 50
Figure III. 8 organigramme de pso..... 51

CHAPITRE IV

Figure IV. 1 un modele utilitaire du reseau (25 kv d'alimentation de distribution + systeme de transmission equivalent de 120 kv). 54
Figure IV. 2 schema bloc de la simulation du panneau solaire avec 36 cellules sous 1000w/m^2 56
Figure IV. 3 regulateur pi. 57
Figure IV. 4 structure de commande par un controleur flou. 57
Figure IV. 5 la tension vdc. 59
Figure IV. 6 fonction d'appartenance des variables d'entrees. 61
Figure IV. 7 fonction d'appartenance de la variable de sortie (du). 61
Figure IV. 8 la tension vdc. 62
Figure IV. 9 présentation de l'erreur……63
Figure IV. 10 Fonction d'appartenance des variables d'entrées……..64
Figure IV. 11 Fonction d'appartenance des variables de sortie dU……64
Figure IV.12 variation de la fonction objective. 65
Figure IV. 13 fonction d'appartenance optimisee des variables d'entrees. 67
Figure IV. 14 fonction d'appartenance optimisee de la variable de sortie output1 (du). 67
Figure IV. 15 la tension vdc. 69
Figure IV. 16 la tension vpv. 70
Figure IV. 17 le courant ipv. 70
Figure IV. 18 la commande d. 71

ρx_{gbesti} **:** La position de la meilleure solution connue de son voisinage.

ρ_{xi}**(t):** la position dans l'espace de recherche.

ρx_{pbesti}: La position de la meilleure solution par laquelle elle est passée.

AC: Courant Alternatif (Alternative Current).

B : Facteur d'idéalité.

CC : Courant continue.

CFL : contrôleur flou.

D : La diode.

D:variable de sortie.

DC: Courant Continu (Direct Current).

E : L'éclairement absorbe par la cellule.

E : l'erreur.

e : la charge de l'électron (e=1,6 10-19 C).

E_{eq} : Tension equivalent **.**

E_{ref} : L'éclairement de référence (1000 w/m_2).

FF : facteur de forme qui indique le degré d'idéalité de la caractéristique.

FF : Facteur de forme.

Gbesti : La valeur de fitness de sa meilleure solution connu du voisinage.

GPV: Générateur Photovoltaïque.

I : Courant de MPPT.

I_0 : Courant de saturation de la diode.

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

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

I_{opt} : Courant optimum (A).

I_{ph} : le photo-courant de la cellule dépendant de l'éclairement et de la température ou bien courant de (court circuit).

I_{pv} : le courant fourni par la cellule lorsqu'elle fonctionne en générateur.

I_{sat} : le courant de saturation(A).

K : la constante de Boltzmann (1,381 10-23 J/K).

Ki: Coefficient de température du court-circuit de la cellule (Ampères / K).

MOSFET : transistors à effet de champ d'oxyde de métal.

MPPT: Maximum Power Point Tracking.

n : le facteur d'idéalité de la jonction (1< n<3).

N_p : Nombre de modules dans le panneau en parallèle.

N_s : Nombre de modules dans le panneau en série.

P : puissance de MPPT.

P&O : l'algorithme perturbation et observation.

Pbesti : La valeur de fitness de sa meilleure solution.

PI : Proportionnelle Intégrale.

Pm : puissance maximale mesurée dans les conditions de référence.

P_{pv} : Puissance de panneau(W).

P_{pv} : Puissance de panneau(W).

PSO : *Particle Swarm Optimization.*

PSOFL : la logique floue optimisé par « *Particle Swarm Optimization* ».

PV : photo voltaïque.

q : Charge de l'électron ($1{,}6.10^{-19}$C).

R_{ch} : resistance de charge**.**

Rp : Résistance parallèle de la cellule (Ω).

RS : Résistance série de la cellule (Ω).

R_{ser} : la résistance série représentant les diverses résistances de contacts et de connexions.

R_{shu} : la résistance shunt caractérisant les courants de fuite de la jonction. **S** : surface active de la cellule (m2).

Tc : la température effective des cellules en Kelvin(K).

V : Tension de MPPT.

Vc : Tension de condensateur (V).

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

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

Ve : Tension denrée de l‟hacheur (V).

Vg : Tension du générateur photovoltaïque (V).

V_{opt} : Tension optimale (V).

V_{pv} : la tension aux bornes de cette même cellule.

Vt : Tension thermique.

ΔE : changement d'erreur.

η : Rendement énergétique.

Dans plusieurs pays en développement avec une importante population rurale et de bas tarifs d´électrification. Le système d´énergie solaire photovoltaïque (PV) peut offrir le moyen le plus pratique et le moins coûteux pour avoir accès à l'électricité [1].

L'énergie solaire représente certainement la source d'énergie renouvelable la plus élégante. En plus d'être silencieuse, elle s'intègre parfaitement aux constructions (façades, toiture…), et du fait qu'elle n'intègre pas de pièces mécaniques mobiles, elle ne nécessite pas un entretien particulier reste fiable longtemps, c'est la raison pour laquelle elle est devenue une référence dans les applications spatiales et dans les sites isolés. Elle est en train de s'imposer comme une valeur sure dans les applications à petite et moyenne consommation d'énergie, surtout depuis que les panneaux solaires sont devenus moins chers pour des rendements meilleurs. Les panneaux solaires, bien qu'ils soient de plus en plus performants, ont des rendements qui restent assez faibles (autour de 20%), c'est pourquoi il faut exploiter le maximum de puissance qu'ils peuvent générer en réduisant au maximum les pertes d'énergie [2].

Une caractéristique importante de ces panneaux est la puissance maximale disponible est fournie seulement en un seul point de fonctionnement appelé «Maximum Power Point » (MPP), défini par une tension et courant donnés, et ce point se déplace en fonction des conditions météorologiques (ensoleillement, température, etc.) ainsi que des variations de la charge. Extraire le maximum de puissance nécessite donc un mécanisme de poursuite de ce point qu'on appelle MPPT [3].

Plusieurs critères d'optimisation de l'efficacité des systèmes photovoltaïques étaient appliqués, et des techniques suivies pour avoir une adaptation et un rendement élevé. Les techniques traditionnelles: numériques, analogiques et analytiques ou les techniques basées sur l'intelligence artificielle telle que les réseaux de neurones, la logique floue, le neurone-flou, les algorithmes génétiques (GA) et la technique SWARM (PSO).

Dans ce sens, l'Optimisation par la méthode (PSO) sera l'objectif primordial de notre travail, pour régler la tension dans un système photovoltaïque sous des conditions climatiques. Afin de valider l'importance de telle méthode, Pour avoir une tension constante délivrée par le système photovoltaïque, nous présentons une technique de commande utilisant la méthode de contrôle basée sur la logique floue.

Outre l'introduction et la conclusion générales, ce projet sera divisé en quatre chapitres selon le plan suivant :

- Au premier chapitre, on fait une généralité sur les générateurs photovoltaïques. On présente le principe de l'effet photovoltaïque, la cellule PV et ses paramètres, les différentes technologies avec la comparaison.
- Au deuxième chapitre se penche sur :

❖ Les convertisseurs DC-DC

❖ La technique de la MPPT avec P&O.

Après, on va introduire les différentes techniques de l'intelligence artificielle.

- Au troisième chapitre, a pour objet de présenter l'origine de la technique d'Optimisation par Essaim de Particules, sa mise en œuvre et les réglages de ses paramètres et fournit une initialisation de base « logique floue» [4].
- Au quatrième chapitre, on verra la simulation et évaluation de la tension sous l'environnement de simulation (MATLAB/SIMULINK).

Enfin, nous donnerons une conclusion pour établir un bilan des résultats de simulation obtenus, ainsi que des perspectives à envisager concernant des éventuelles applications.

I.1 Introduction

L'énergie solaire photovoltaïque convertit directement le rayonnement lumineux en électricité. Elle utilise pour cela des modules photovoltaïques composés de cellules solaires ou de photopiles qui réalisent cette transformation d'énergie. L'utilisation des modules photovoltaïques comme source d'énergie électrique.

Dans ce chapitre, nous présentons des généralités sur les systèmes photovoltaïques [5].

I.2 Système photovoltaïque

La Présentation de Système photovoltaïque **:**

I.2.1 Définition :

Le terme « photovoltaïque », souvent abrégé par les lettres PV, a été formé à partir des mots « photo », un mot grec signifiant lumière, et « Volta », le nom du physicien italien Alessandro Volta, qui a inventé la pile électrochimique en 1800. L'effet photovoltaïque, c'est la conversion directe de l'énergie solaire en électricité. Les cellules solaires photovoltaïques sont des semi-conducteurs capables de convertir directement la lumière en électricité. Cette conversion, appelée effet photovoltaïque [6].



Figure I. 1 *Energie solaire [7].*

I.2.2 Principe de fonctionnement:

Une cellule photovoltaïque est constituée de plusieurs couches .on trouve au centre de cette cellule, une couche avec porteurs de charges libres négative N en contact avec une

autre couche avec porteurs de charges libre s positives P. de part et autre du cœur de la cellule ,on a une couche conductrice (k) autrement dit une grille métallique ,puisqu'il faut que cette couche soit conductrice et ne subisse pas des phénomènes de corrosion .on a donc une couche qui sert de cathode (pôle+) recouvrant la couche semi-conductrice dopée N et une couche qui joue le rôle de l'anode (pôle-) en dessous la couche semi-conductrice P. aussi le silicium est très réflecteur, on place donc un revêtement anti-réflexion sur le dessus de la cellule .enfin on trouve une couche de verra qui protège la cellule .ces couvertures de protections sont indispensables car la cellule est très fragile. L'épaisseur totale de la cellule est de l'ordre du millimètre. pour finir, on relie les cellule entre elles, constituant alors le panneau solaire, afin d'obtenir une puissance suffisante [8].

.

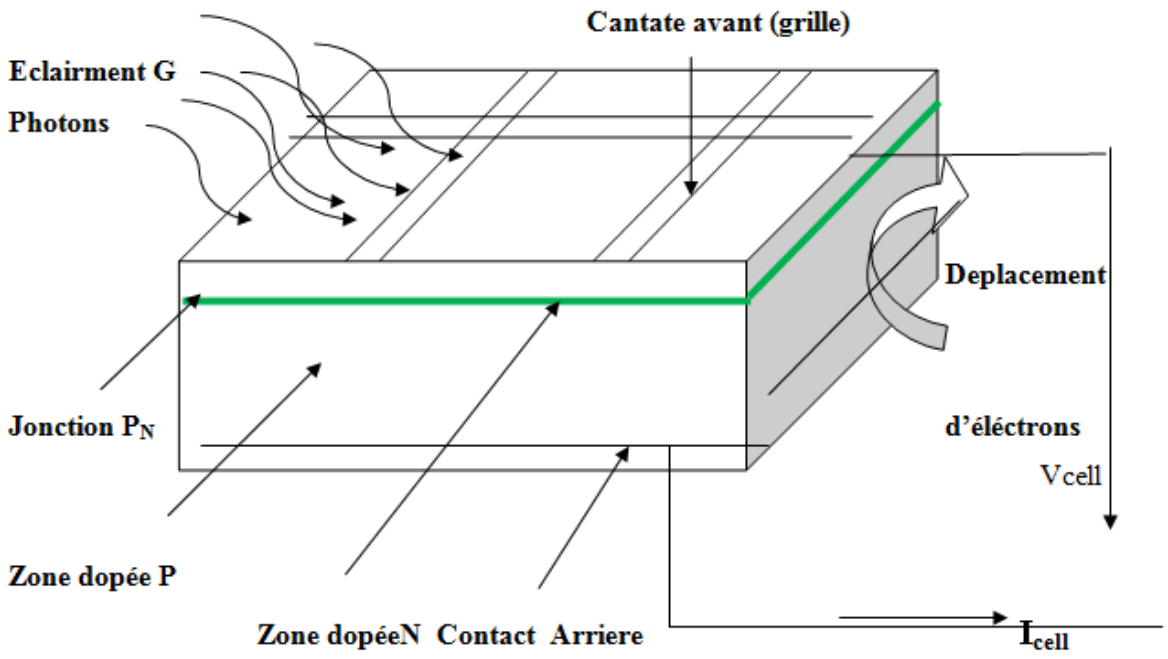


Figure I. 2 *Le prie de fonctionnement d'une cellule solaire [9].*

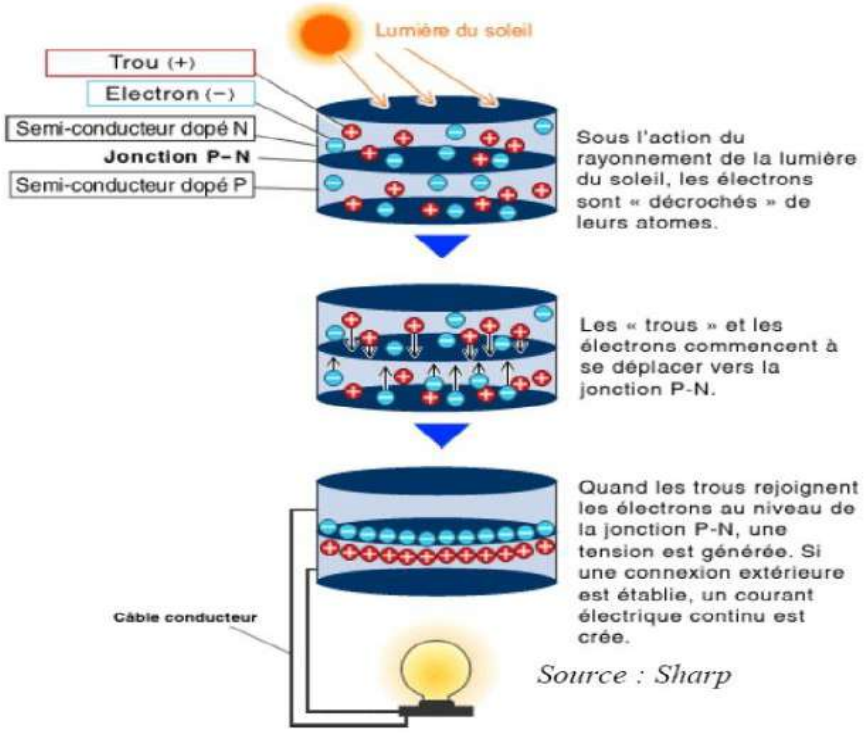


Figure I. 3 *Schéma électrique de principe de fonctionnement photovoltaïque [10].*

I.2.3 Cellule photovoltaïque :

En électronique, une cellule photoélectrique est un dispositif électrique qui convertit l'énergie incidente du rayonnement solaire en électricité grâce à l'effet photovoltaïque, les cellules photovoltaïques sont les composants de base des modules photovoltaïques capables de générer de l'énergie électrique à partir du rayonnement solaire, donc c'est l'élément de base essentiel pour ce type d'énergie solaire, la cellule solaire photovoltaïque la plus courante est une feuille de silicium cristallin d'une épaisseur d'environ 0,3 mm, lorsqu'elle est exposée à une lumière directe de 1 soleil, une cellule de 6 centimètres de diamètre peut produire un courant de 0,5 ampère à 0,5 volt. Figure I.4 illustre le principe de fonctionnement d'une cellule [11].

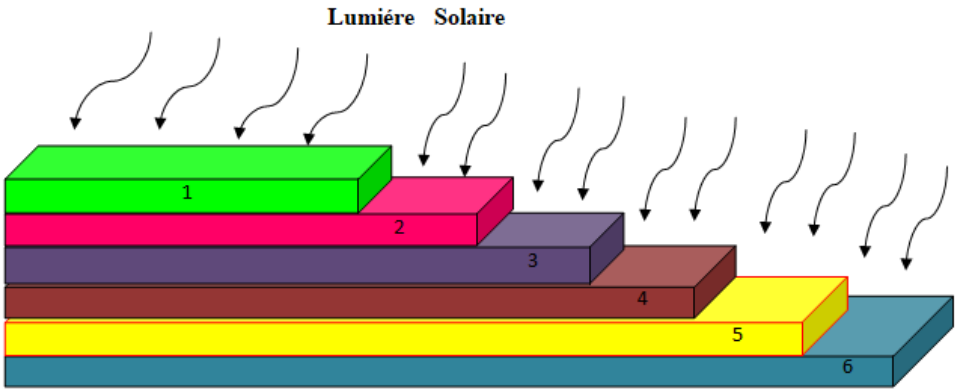


Figure I. 4 *Structure basique d'une cellule solaire [11].*

1 Verre.
2 Revétement anti-reflrts.
3 Grille conductrice.
4 Semi-conducteur dopé N.
5 Semi-conducteur dopé P.
6 Conducteur.

I.2.4 Module photovoltaïque :

Les modules photovoltaïques sont des dispositifs utilisés pour capturer l'énergie de la lumière du soleil sous un système complexe composé, d'un ensemble de cellules photovoltaïques interconnectées et protégées de l'extérieur par une structure composée essentiellement, d'un verre de protection sur la face avant du module, et d'un verre ou d'un film en fluorure polyvinylique sur la face arrière du module, cadre rigide, d'intercalaires, de diodes by-pass, de connecteurs, d'une boîte de jonction, et câbles. Il est considéré comme un générateur électrique de courant continu, dépend principalement de l'éclairement du soleil qui arrive sur sa face avant. On utilise des modules PV dans des installations photovoltaïques raccordées au réseau (toitures d'habitation, centrales solaires, ...), ou bien en installation autonome pour alimenter des sites ou appareils isolés [12].

Les puissances des modules disponibles sur le marché s'échelonnent entre quelques Watts crête et quelques dizaines de Watts-crête (1m² de cellules PV produit de l'ordre de100W). Pour obtenir des puissances supérieures, il est donc nécessaire d'associer en série et/ou en parallèle plusieurs modules pour former un panneau photovoltaïque puis un champ photovoltaïque, la figure (I-5) Illustre Module solaire photovoltaïque [13].



Figure I. 5 *Module photovoltaïque [13].*

I.2.5 Panneaux photovoltaïques :

Un panneau solaire est un dispositif pour tirer une partie de l'énergie solaire, il est constitué d'un ensemble de modules photovoltaïques interconnectés, intégrées et protégées, conçu pour l'utilisation de l'énergie solaire photovoltaïque. Il est chargé de transformer directement l'énergie du rayonnement solaire en électricité. La cellule solaire est seulement capable de générer une tension de quelques dixièmes de volt(+/- 0,5 V) et une puissance maximale de 1 ou 2 Watts puis le module qui produit de l'ordre de (100W) Par conséquent, il est nécessaire de connecter en série plusieurs modules qui se comportent comme des générateurs de courant pour atteindre des tensions de 624 V, acceptées dans de nombreuses applications domestiques et commerciales. Les panneaux les plus courants ont une puissance crête de 40 à 180 Wc (Watt crête) et Sa durée de vie utile est estimée à 25 ans. La figure (I-6) représente des pénaux solaires [14].



Figure I. 6 *Panneaux photovoltaïques [14].*

I.2.6 Champ photovoltaïque :

Afin d'obtenir la tension nécessaire à l'onduleur, plusieurs panneaux photovoltaïques sont connectés en série. Ils forment alors une chaîne de modules ou string. Les chaînes sont

ensuite associées en parallèle et forment un champ photovoltaïque (champ PV). La figure suivante représente la constitution d'un champ photovoltaïque [14]

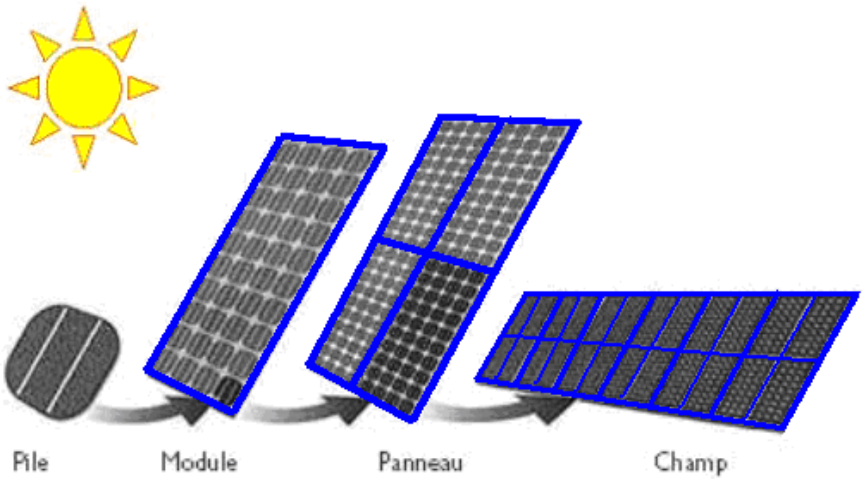


Figure I. 7 *Constitution d'un champ photovoltaïque [14].*

❖ L'emplacement du champ photovoltaïque devra respecter les contraintes suivantes :

- Exposition au rayonnement solaire toute la journée en toute saison.
- Les panneaux doivent être orientés au sud dans l'hémisphère Nord et au nord dans l'hémisphère Sud, et inclinés pour être le plus souvent possible perpendiculaire au rayon lumineux.
- Accès facile pour le nettoyage.
- Proximité avec la régulation, le stockage et les récepteurs.
- Fixations solides pour résister aux vents : les modules sont généralement fixés soit au sol, soit en toiture, soit en façade.

Il faut également installer des diodes ou des fusibles en série sur chaque chaîne de modules. Ces protections sont utiles pour éviter qu'en cas d'ombre sur une chaîne, elle se comporte comme un récepteur et que le courant y circule en sens inverse et l'endommage [15]**.**

I.2.7 Avantages et Inconvénients l'énergie solaire photovoltaïque :

I.2.7.1 Avantage :

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

- Les installations photovoltaïques sont en général de haute fiabilité, et leur montage d'installation très simple et adaptable aux besoins de chaque projet
- L'énergie solaire est une énergie renouvelable et, par conséquent, elle est inépuisable, bien que le soleil ait une durée de vie limitée, à l'échelle humaine, il est considéré comme une source d'énergie inépuisable.
- Faible pollution et respect de l'environnement, la production d'électricité dans le cas de l'énergie photovoltaïque ou de l'eau chaude dans l'énergie thérmique est propre et la serre de causes .
- Installations avec un coût d'installation et de maintenance réduit tel que le coût d'une installation solaire par rapport à d'autres types d'installations telles qu'une centrale nucléaire est très faible. De même, la maintenance d'une installation solaire n'est pas très coûteuse [16].

I.2.7.2 Inconvénients :

Selon les caractéristiques de l'installation solaire, les inconvénients de l'énergie solaire seront plus ou moins importants. Malgré tous les avantages, il convient d'analyser soigneusement les inconvénients. Certains inconvénients de l'énergie solaire peuvent impliquer qu'une installation solaire soit inefficace. Les aspects à considérer sont les suivants :

- L'efficacité énergétique est faible par rapport à d'autres sources d'énergie. Le rapport de la quantité d'énergie reçue dans un panneau solaire à la quantité d'énergie électrique est faible par rapport à d'autres sources d'énergie telles que l'énergie nucléaire.
- La performance est fonction de la météo. La dépendance à la climatologie fait de cette source d'énergie une option irréalisable dans les zones où le ciel est habituellement nuageux.

- La variation de l'inclinaison de la radiation influence la performance des panneaux solaires.
- Les rendements des panneaux photovoltaïques sont encore faibles et de l'ordre de 20% donc l'énergie photovoltaïque convient pour des projets à faible besoin [16][17].

I.3 Les différentes technologies des cellules solaires :

Il existe différents types de cellules photoélectriques selon la nature et les caractéristiques des matériaux utilisés, ce matériau est découpé en plaques minces, monocristallines ou poly cristallines en forme de disque, en fonction du processus de fabrication de la barre de silicium.

I.3.1 Silicium monocristallin le silicium cristallin :

Les cellules solaires monocristallines sont les photopiles delà première génération élaborées à partir d'un bloc de silicium cristallisé en un seul cristal, ont généralement une forme carrée, avec des coins arrondis, auparavant, ils avaient une forme circulaire ceci est dû au processus de croissance du cristal de silicium monocristallin qui a une forme cylindrique, il est plus efficace que le silicium poly cristallin , a un rendement de 12 à 18%,mais la méthode de production est laborieuse [18]. Voire la figure I-8 :



Figure I. 8 *photos d'une cellule monocristalline [18].*

I.3.2 Silicium poly cristallin :

Dans le procédé de fabrication du silicium poly cristalline, on laisse le silicium se solidifier lentement dans un moule rectangulaire +9et on obtient un solide rectangulaire avec beaucoup de cristaux, ce qui donne naissance aux cellules poly-cristallines. Ce type de cellules a un rendement inférieur à celui des cellules monocristallines de 11 à 15%, mais

présente actuellement une forte implantation car elles ont un coût économique inférieur à celui des cellules monocristallines. L'avantage de ces cellules par rapport au silicium monocristallin est qu'elles produisent peu de déchets de coupe et qu'elles nécessitent 2 à 3 fois moins d'énergie pour leur fabrication et une durée de vie estimée à 30ans [18].



Figure I. 9 *photo de cellule poly cristallin [18].*

I.3.3 Silicium amorphe (a-si) :

Le silicium est déposé en couche mince sur une plaque de verre ou un autre support souple. L'organisation irrégulière de ses atomes lui confère en partie une mauvaise semi conduction. Les cellules amorphes sont utilisées partout où une solution économique est recherchée ou lorsque très peu d'électricité est nécessaire, par exemple pour l'alimentation des montres, des calculatrices, ou des luminaires de secours. Elles se caractérisent par un fort coefficient d'absorption, ce qui autorise de très faibles épaisseurs, de l'ordre du micron. Par contre, son rendement de conversion est faible (de 7 à 10%) et les cellules ont tendance à se dégrader plus rapidement sous la lumière [19].



Figure I. 10 *photo d'une cellule amorphe [19].*

I.3.4 Cellule Tandem :

Empilement monolithique de deux cellules simples. En combinant deux cellules (couche mince de silicium amorphe sur silicium cristallin par exemple) absorbantes dans des domaines spectraux se chevauchant, on améliore le rendement théorique par rapport à des cellules simples distinctes, qu'elles soient amorphes, cristallines ou microcristallines [19].

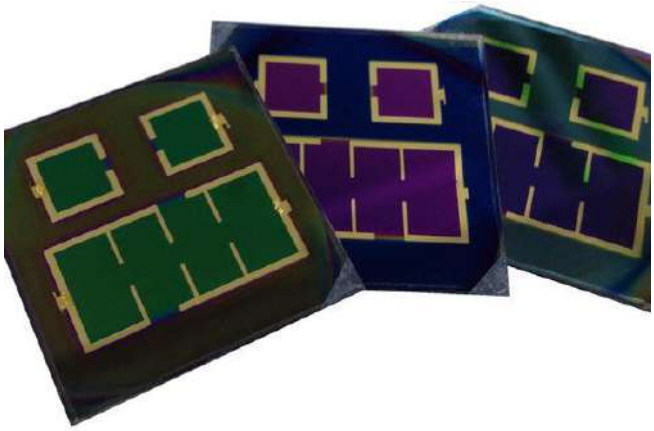


Figure I. 11 *une Cellule Tandem [19].*

I.3.5 Cellule multi-jonction :

Des cellules ayant une grande efficacité ont été développées pour des applications spatiales. Les cellules multi-jonctions sont constituées de plusieurs couches minces. Chaque type de semi-conducteur est caractérisé par une longueur d'onde maximale au-delà de laquelle il est incapable de convertir le photon en énergie électrique.[20].



Figure I. 12 *Une Cellule multi-jon [20].*

I.4 Comparatif des différentes technologies :

Le tableau suivant présente les avantages et les inconvénients pour les technologies les plus utilisées d'une cellule photovoltaïque:

Tableau I. 1 *Comparatif des déférentes technologies cellule [10].*

	Monocristallin	**Polycristallin**	**Amorphe**
Cellule et Module			
Caractéristiqes	❖ Très bon rendement : 14 à 20 %. ❖ Durée de vie : importante (30 ans) ❖ Coût de fabrication : élevé. ❖ Puissance : 100 à 150 Wc/m2. 7 m2/kWc. ❖ Rendement faible sous un faible éclairement. .	❖ Bon rendement : 11 à 15 %. ❖ Durée de vie : importante (30 ans) ❖ Coût de fabrication : meilleur marché que les panneaux monocristallins ❖ Puissance : 100 Wc/m2. 8 m2/kWc. ❖ Rendement faible sous un faible éclairement.	❖ Rendement faible : 5 à 9 %. ❖ Durée de vie : assez importante (20 ans) ❖ Coût de fabrication : peu onéreux par rapport aux autres technologies ❖ Puissance : 50 Wc/m2. 16 m2/kWc. ❖ Fonctionnement correct avec un éclairement faible.

I.5 Facteur de forme :

Le facteur de forme FF indique le degré d'idéalité de la caractéristique correspondant au rapport suivant :

$$FF = \frac{P_m}{V_{co} I_{cc}} \quad . \qquad (I.1)$$

Avec :

FF : facteur de forme qui indique le degré d'idéalité de la caractéristique.

Pm : puissance maximale mesurée dans les conditions de référence

- (STC : Standard Test Condition), c'est-à-dire sous l'ensoleillement de 1 000 W/m2, a la température de 25° C sous un spectre AM 1,5.

Vco : tension du circuit correspondant à la tension qui apparait aux bornes de la cellule quand le courant débite est nul(V).

Icc : courant de court- circuit correspondant au courant débite par la cellule quand la tension a ses bornes est nulle (en pratique ce courant est très proche du photo-courant Iph) (A).

I.6 Rendement photovoltaïque :

Le rendement énergétique (η) d'une cellule est défini par le rapport entre la puissance maximale (Pm) et la puissance du rayonnement solaire qui arrive sur la cellule photovoltaïque :

$$\boldsymbol{\eta} = \frac{P_m}{E.S} \qquad \text{(I.2)}$$

Avec :

η : rendement énergétique,

E : éclairement (W/m2),

S : surface active de la cellule (m2) [20].

I.7 Générateur photovoltaïque :

La puissance produite par une cellule photovoltaïque seule est très faible, elle ne peut pas faire fonctionner le matériel électrique usuel. Il est donc nécessaire d'associer plusieurs de ces cellules en série et en parallèle pour obtenir les caractéristiques électriques désirées. L'association de plusieurs cellules photovoltaïques en série/parallèle donne lieu à un générateur photovoltaïque. Si les cellules se connectent en série, les tensions de chaque cellule s'additionnent, augmentant la tension totale du générateur. D'une autre part, si les cellules se connectent en parallèle, c'est l'ampérage qui augmentera. Si on associe ns cellules en série

et $\boldsymbol{np}$ branches en parallèle on obtient un générateur (module) photovoltaïque avec un courant de court-circuit $\boldsymbol{np}$ fois plus important que celui de la cellule élémentaire, et une tension de

circuit ouvert *ns* fois plus élevée que celle de la cellule seule. Cependant, des conditions doivent être respectées pour qu'une telle association soit possible :

- ✓ Les caractéristiques des cellules élémentaires doivent être les plus proches possibles.
- ✓ Elles doivent être soumises aux mêmes conditions de température et d'ensoleillement. Si ces règles ne sont pas respectées, certaines cellules vont se comporter comme des récepteurs, ce qui entraînera une augmentation de la température, et peut être, une détérioration du module photovoltaïque [21].

I.7.1 Caractéristique Courant-Tension :

La figure I.13 représente la courbe ***I =f (V)*** d'un module photovoltaïque typique dans des conditions constantes d'irradiation et de température.

L'irradiation standard adoptée pour mesurer la réponse des modules photovoltaïques est une intensité rayonnante de 1000 W/m^2 et une température de 25^0. L'irradiation standard adoptée pour mesurer la réponse des modules photovoltaïques est une intensité rayonnante de 1000 W/m^2 et une température de 25^{0}C [22].

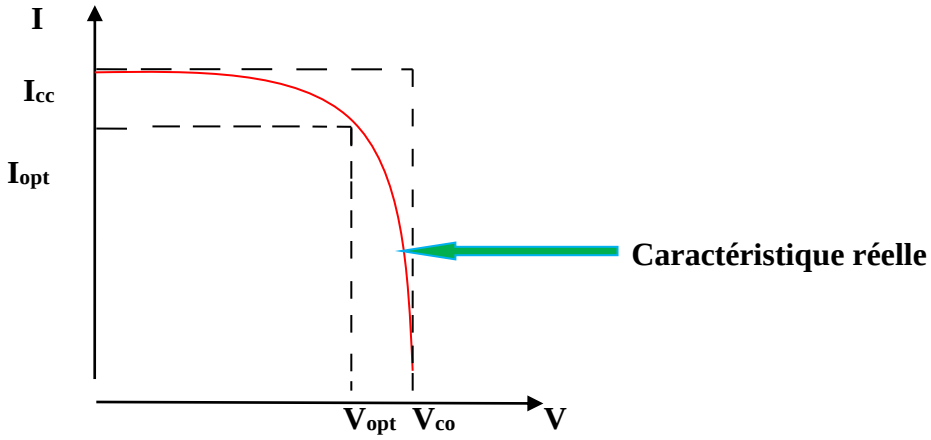


Figure I. 13 *Caractéristique I =f (V) d'un module photovoltaïque [22].*

Il est difficile de donner un caractère source de courant ou de tension à un module photovoltaïque sur toute l'étendue de la caractéristique courant-tension. Par conséquent, le module photovoltaïque est considéré comme une source de puissance avec un point P_m où la puissance se trouve être maximale. Il est donc intéressant de se placer sur ce point pour tirer le maximum d'énergie et ainsi exploiter au mieux la puissance crête installée.

Il est important de noter que certains régulateurs solaires réalisent une adaptation d'impédance afin qu'à chaque instant on se trouve proche de ce point P_m [22].

I.7.2 Influence de l'éclairement et la température sur les courbes I=f(V) et P=f(V) :

La figure (I.14) montre l'influence de l'éclairement sur la caractéristique *I=f(V)* a une température constante, on constate que le courant subit une variation importante, mais par contre la tension varie légèrement, car le courant de court circuit est une fonction linéaire de l'éclairement alors que la tension de circuit ouvert est une fonction logarithmique [25].

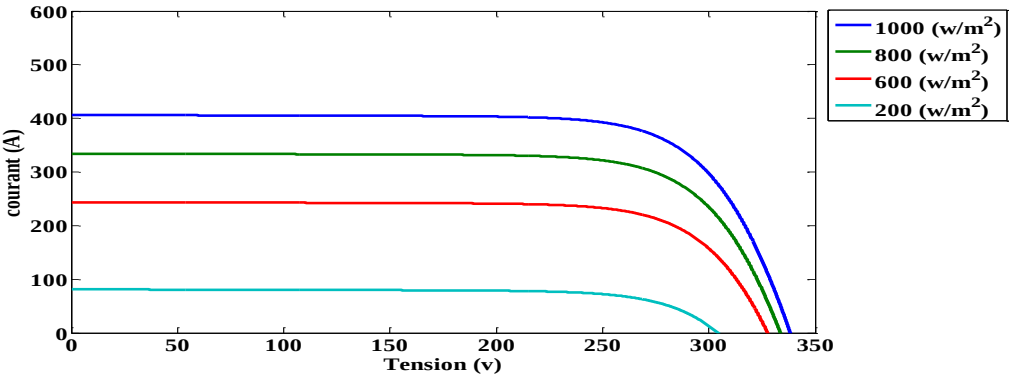


Figure I. 14 *L'influence de l'éclairement sur la caractéristique I=f(V).*

La figure (I.15) illustre la variation de la puissance délivrée par le générateur en fonction de la tension pour différentes valeurs d'éclairement, ce qui nous permet de déduire l'influence de l'éclairement sur la caractéristique *P(V)* [25].

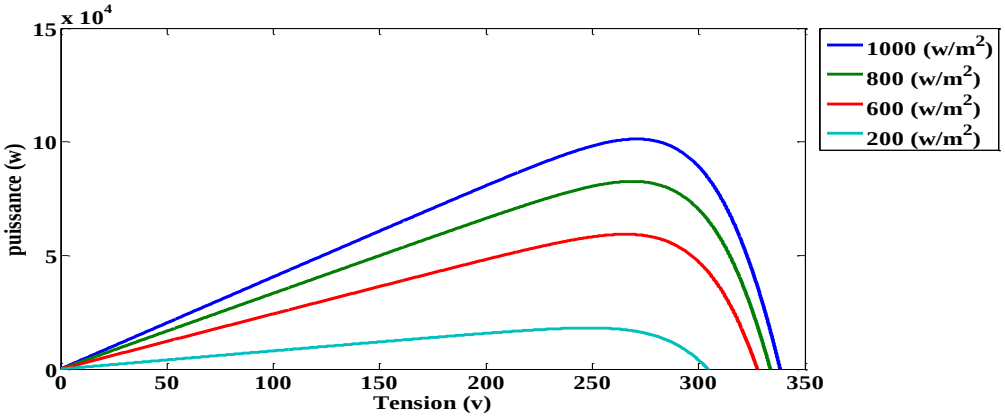


Figure I. 15 *L'influence de l'éclairement sur la caractéristique P=f(V).*

La figure (I.16) montre l'influence de la température sur la caractéristique *I=f(V)*. il est essentiel de comprendre l'effet de changement de la température d'une cellule solaire sur la caractéristique *I=f(V)*.

Le courant dépend de la température puisque le courant augmente légèrement à mesure que la température augmente, mais la température influe négativement sur la tension de circuit ouvre. quand la température augmente la tension de circuit ouvert diminue. par conséquent la puissance maximale du générateur subit une diminution [23].

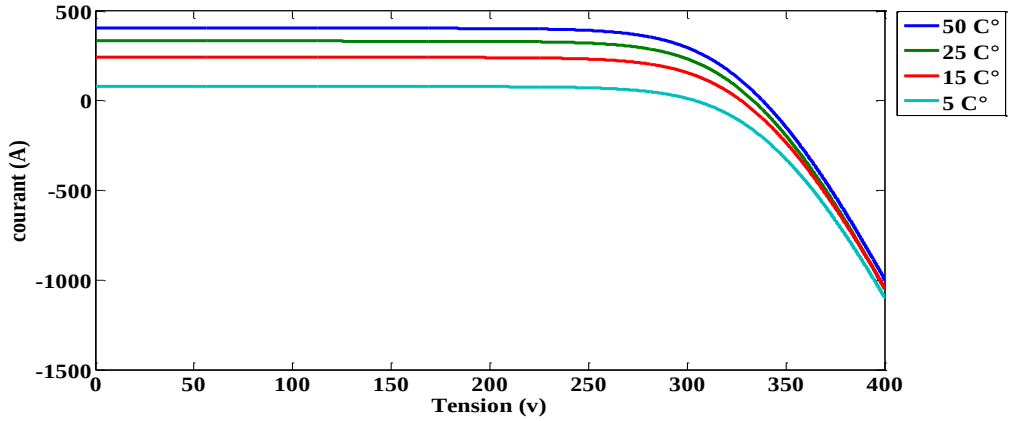


Figure I. 16 *L'influence de la température sur la caractéristique I=f(V).*

La figure (I.17) illustre la variation de la puissance délivrée par le générateur en fonction de la tension pour différentes valeurs de la température, ce qui nous permet de déduire l'influence de la température sur la caractéristique *P=fct(V)* [26].

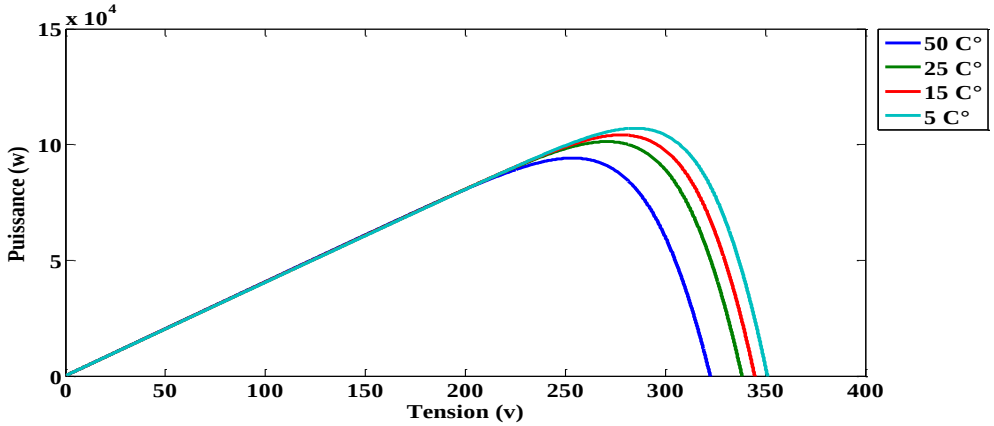


Figure I. 17 L'influence de la température sur la caractéristique P=f(V).

D'après les figures ci-dessus, on remarque que l'augmentation de la température cause une diminution de tension dont la valeur est plus importante que l'augmentation enregistrée par le courant, il claire donc que l'augmentation de la température a un effet négatif sur la puissance maximale (Fig I.17).

I.7.3 Influence de l'association série des cellules PV :

La cellule individuelle, unité de base d'un système photovoltaïque, ne produit qu'une très faible puissance électrique, typiquement de 0.5 W avec une tension de moins d'un volt [27].

Pour produire plus de puissance, les cellules sont assemblées pour former un module (ou panneau).

Un module de 8 cellules en série est suffisant pour obtenir une tension compatible avec la charge. Pour avoir plus de tension, il faut assembler N_s modules en série, par contre pour le courant généré, un nombre N_p de modules en parallèle permet d'en ajouter, les diodes de protection série et parallèles protègent le circuit contre le retour de courant.

L'association en série des cellules délivre une tension égale à la somme des tensions individuelles et un courant égal à celui d'une seule cellule [24].

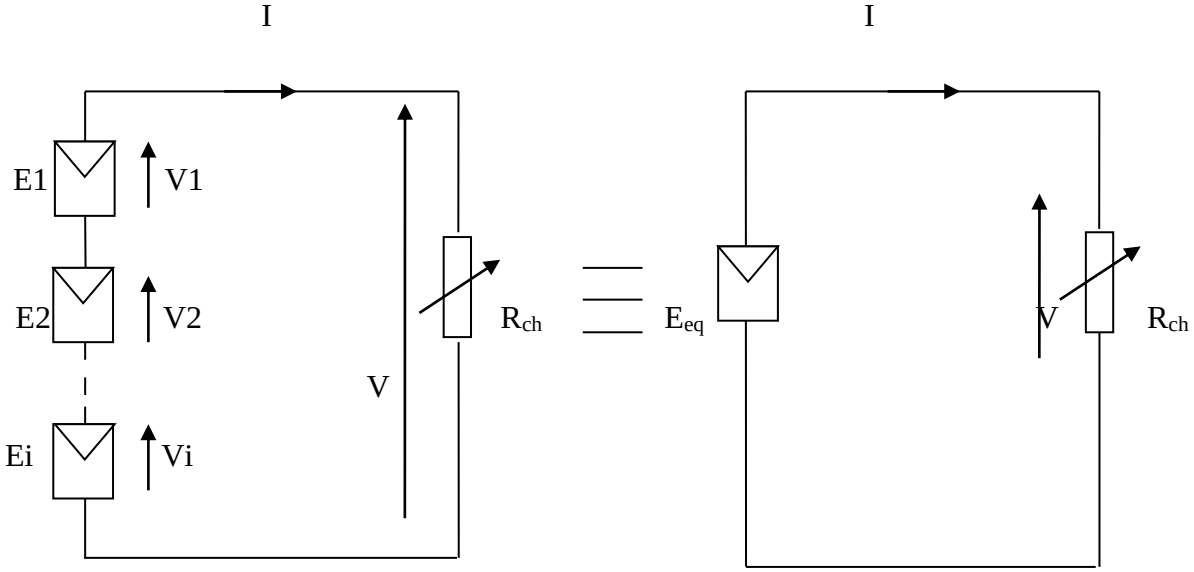


Figure I. 18 *Association de N modules solaires en série [24].*

I.7.4 Influence de l'association parallèle des cellules PV :

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

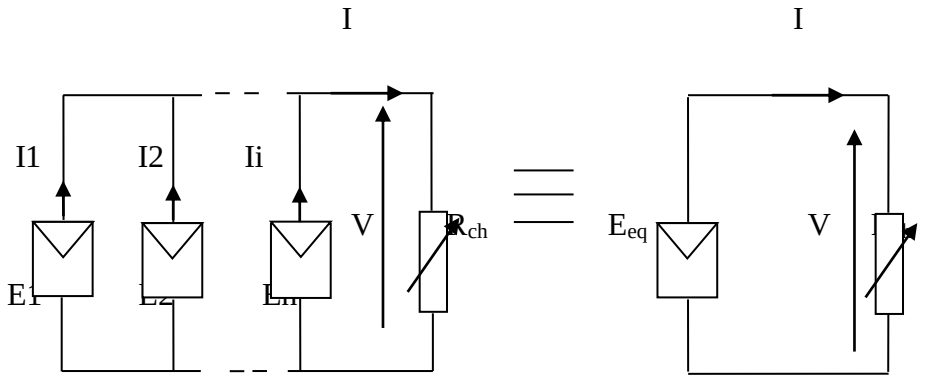


Figure I. 19 *Association de Np modules solaires en parallèle [24].*

I.7.5 Influence de l'association mixte (Série +Parallèle) des cellules PV :

Pour avoir une satisfaction en courant et en tension, on est obligé d'utiliser un groupement mixte, c'est-à-dire Série-Parallèle [24].

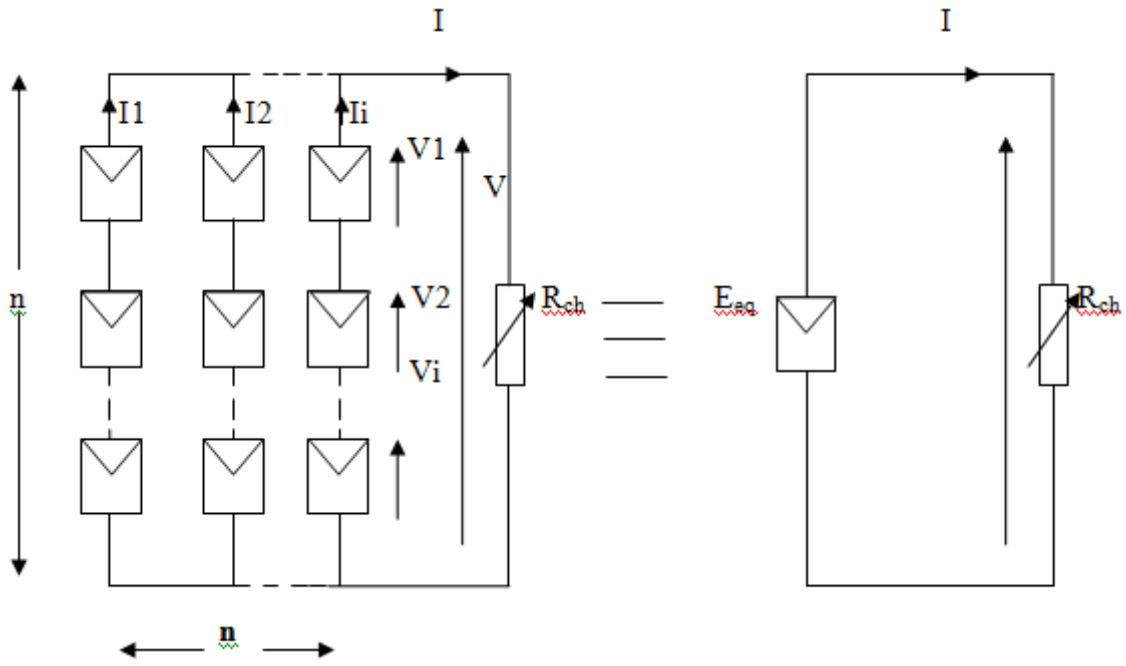


Figure I. 20 *Association mixte Ns x Np modules solaires [24].*

I.8 Modélisation du module photovoltaïque :

Des nombreux modèles mathématiques de modules photovoltaïques, ont été développés, dont le but est l'obtention de la caractéristique Courant-Tension et Puissance-Tension pour l'analyse et l'évaluation des performances des systèmes photovoltaïques.

I.8.1 Cas d'une cellule idéale :

Dans le cas idéal, la cellule d'une jonction PN soumise à l'éclairement photovoltaïque peut être schématisée par un générateur de courant en parallèle avec une diode délivrant un courant selon la figure (I.21) qui représente le circuit équivalent d'une cellule solaire idéale [24].

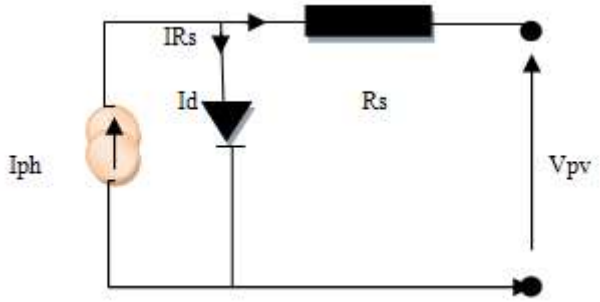


Figure I. 21 *Schéma équivalent d'une cellule idéale [24].*

- L'équation retenue de ce modèle est :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_d \text{(I.1)} \qquad \text{(I.3)}$$

- Le courant I_{ph} est assimile au courant I_{cc} avec V_{pv}= 0, courant de court-circuit.

$$I_{ph}=[I_{cc} + Ki \ast(\text{Tc-Tref})]\ast \frac{E}{E_{ref}} \qquad \text{(I.4)}$$

Ki: Coefficient de température du court-circuit de la cellule (Ampères / K).

Tc: Température de la cellule en Kelvin.

E : L'éclairement absorbe par la cellule.

E_{ref} : L'éclairement de référence (1000 w/m2).

$$I_d = I_0 \left(e^{\frac{V_d}{V_t}} - 1 \right) \qquad \text{(I.5)}$$

I_0 : Courant de saturation de la diode.

$$\text{Vt} = \frac{BKT}{q} \qquad \text{(I.6)}$$

Vt : Tension thermique.

B : Facteur d'idéalité.

K : Constant de Boltzmann (1,38.10^{-23}J/K).

q : Charge de l'électron (1,6.10^{-19}C) [24].

I.8.2 Cas d'une cellule réelle :

Le schéma équivalent de la cellule photovoltaïque réelle tient compte l'effet résistifs parasites dues à la fabrication et représenté sur la figure (I.22). Ce schéma équivalent est constitué d'une diode (d) caractérisant la jonction, une source de courant (I_{ph}) caractérisant le photo-courant, une résistance série (R_s) représentant les pertes par effet Joule, et une résistance shunte (Rp) caractérisant un courant de fuite entre la grille supérieure et le contact arrière qui est généralement très supérieure à (R_s) [24]:

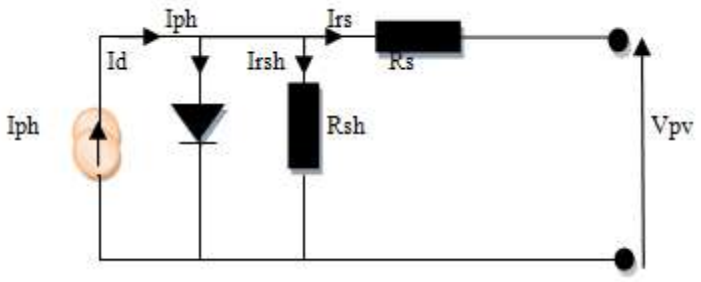


Figure I. 22 *Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque réelle [24].*

Le courant de sortie d'une cellule photovoltaïque se met sous la forme mathématique suivante :

$$I_{pv}=I_{ph}-I_d-I_p \qquad \text{(I.7)}$$

I_{pv} : Courant générer par la cellule photovoltaïque.

I_{ph} : Photo courant crée par la cellule (proportionnel au rayonnement incident).

I_d : Le courant circulant dans la diode.

$$I_d = I_0\left(e^{\frac{V_d}{V_t}} - 1\right) \qquad \text{(I.8)}$$

$$I_0 = I_{0r}\left(\left(\frac{T}{T_n}\right)^3 e^{\left[\frac{Eg}{BK}\left(\frac{1}{T_n}-\frac{1}{T}\right)\right]} - 1\right) \quad \text{(I.9)}$$

I_{or} : Le courant de court- circuit de la cellule a la température et l'éclairement de référence.

T : Température de la jonction des cellules PV [°K].

B : Facteur d'idéalité de la jonction.

E_g : Energie de gap [ev].

R_s : Resistance série symbolise la résistance de masse du matériau semi- conducteur, ainsi les résistances ohmiques et de contact au niveau des connexions des cellules

V_{pv} : La tension de sortie

I_p : Le courant circulant dans la résistance R_P

R_p: Resistance shunt représente les fuites autour de la jonction p-n et sur les coins de cellule.

- En substituant les équations (I.8, I.9), le courant IPV devient [24] :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_0\left[e^{\left(\frac{(V_{pv}+1_{pv}*R_S)}{V_t}\right)} - 1\right] - \frac{(V_{pv}+1_{pv}*R_s)}{R_p} \quad \text{(I.10)}$$

I.9 Conclusion

L'énergie solaire photovoltaïque c'est la transformation directe d'une partie du rayonnement solaire en énergie électrique. Dans ce chapitre nous avons fait des descriptions générales sur l'énergie photovoltaïque (l'énergie solaire, le rayonnement solaire et on a étudié le principe de l'effet photovoltaïque).

Dans un premier temps, nous avons brièvement rappelé les grandes familles des systèmes solaires photovoltaïques et leurs performances, on a décrit le principe de fonctionnement Ensuite, en décrit les différentes technologies, fait la comparaison, et consacrer à la présentation du générateur photovoltaïque, le rendement et le facteur de forme pv.

Le principal intérêt de ce modèle réside dans sa simplicité et sa facilité de mise en œuvre à partir des caractéristiques techniques données par le constructeur.

II.1 Introduction

Afin d'extraire, à chaque instant, le maximum de puissance disponible aux bornes du GPV et de la transférer à la charge, un étage d'adaptation est utilisé. Cet étage joue le rôle d'interface entre la charge et le GPV. Il assure, à travers une action de contrôle, le transfert du maximum de puissance fournie par le générateur. L'adaptateur communément utilisé en PV est un convertisseur statique (convertisseur de puissance DC/DC). La structure de conversion est choisie en fonction de la charge à alimenter.

Dans ce chapitre on va étudier la connexion directe, indirecte entre le générateur photovoltaïque et la charge. Le convertisseur DC-DC utilisé dans notre système photovoltaïque est de type Boost. Ainsi, on décrive la commande MPPT des convertisseurs DC-DC par l'algorithme perturbation et observation (P&O) et continuer avec l'intelligence artificielle [25].

II.2 Le générateur photovoltaïque (GPV):

Le générateur photovoltaïque est représenté par un modèle standard à une seule diode, établit par shockley pour une seule cellule PV, et généralisé à un module PV en le considérant comme un ensemble de cellules identiques branchées en série-parallèle [26].

II.2.1 Connexion directe :

Si le branchement est direct d'une charge avec un GPV sans passer par un autre dispositif électrique, on est dans le cas d'une connexion directe .Dans ce cas, le point de fonctionnement du GPV dépend de l'impédance de la charge à laquelle il est connecté. Actuellement, ce type d'application peut se résumer à un champ photovoltaïque ayant Une tension VPPM fixée par la tension nominale de l'application. Ce choix est principalement lié à la simplicité, la fiabilité et le faible coût de l'opération [26].

La présence de la diode anti-retour est indispensable pour empêcher la circulation d'un courant négatif vers le module PV :

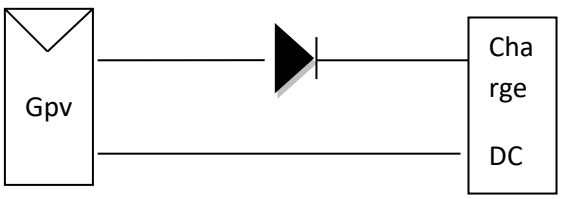


Figure II. 1 *Connexion directe entre un GPV et une charge [26].*

La présence de la diode anti-retour est indispensable pour empêcher la circulation d'un courant négatif vers le module PV.

L'inconvénient de ce type de connexion est que la puissance extraite d'un GPV connectée directement à une application est souvent très éloignée du maximum de puissance que peut délivrer le GPV comme l'illustre la figure II.2 :

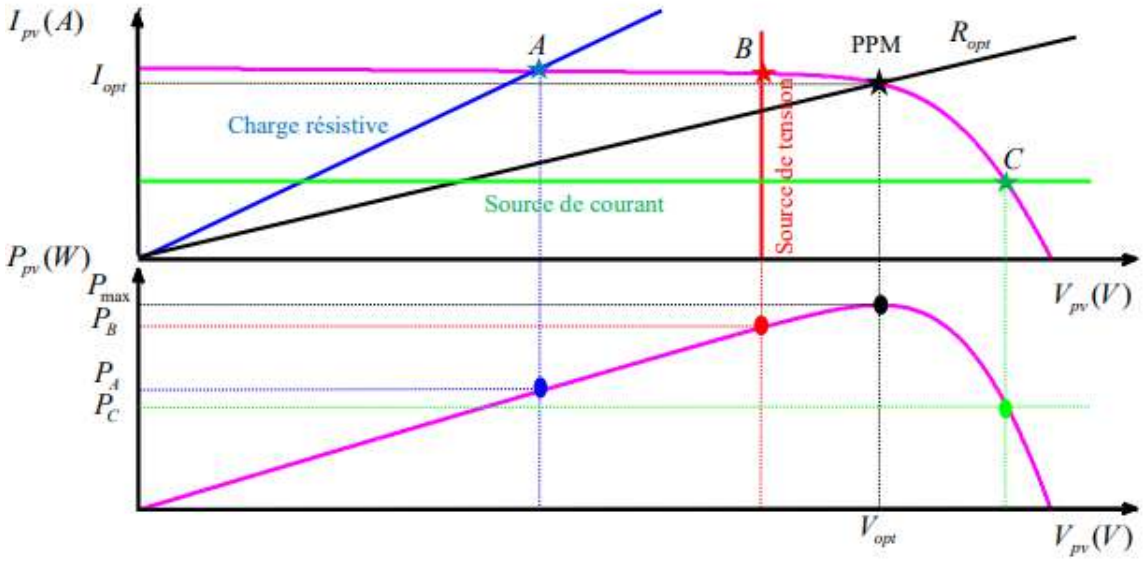


Figure II. 2 *Points de fonctionnement d'un GPV en connexion directe pour différentes charges DC [26].*

- Comme le montre la figure (II.2). Un GPV peut être connecté directement à trois types de charges:
- une charge de type source de tension continue.
- une charge de type source de courant continu.
- une charge purement résistive.

II.2.2 Connexion indirecte :

Lors de la construction d'un système PV, l'une des préoccupations majeures de conception est de trouver l'adaptation optimale entre les caractéristiques électriques des modules solaires, batteries et charge électrique. Une telle adaptation peut être aisément obtenue si la courbe de 5 lesquels la puissance délivrée par ces modules devient maximum. La puissance maximale produite par les modules PV varie en fonction des fluctuations du rayonnement solaire. Par conséquent, la charge devra être reliée aux modules PV par le biais d'un convertisseur MPPT qui puisse suivre les PPM [26].

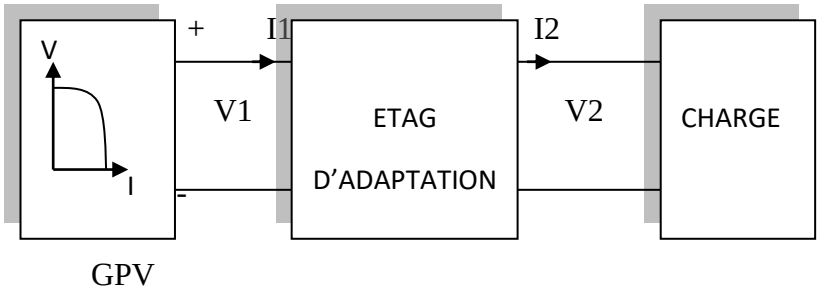


Figure II. 3 *Connexion d'un GPV à une charge à travers un étage d'adaptation [26].*

On constate que la pente en tout point de la caractéristique du générateur est négative. Autrement dit, l'impédance différentielle $Z_d = \frac{dV}{di}$ du GPV est toujours négative de part et d'autre du PPM. En ce dernier point de fonctionnement optimal, où la pente de la caractéristique P-V devient nulle, cette impédance vaut :

$$Z_{d\ opt} = \frac{dV}{di} = \frac{V_{opt}}{I_{opt}} \qquad \text{(II.1)}$$

Alors, seule une charge dont la caractéristique passe par le point (I_{opt}, V_{opt}) permet d'extraire la puissance optimale. La valeur de cette charge vaut alors :

$$R_{opt} = \frac{\boldsymbol{V_{opt}}}{\boldsymbol{I_{opt}}} = \text{f (G, T)} \qquad \text{(II.2)}$$

L'utilisation optimale consiste alors à ce que la charge conserve à chaque instant sa valeur optimale R_{opt} lorsque les conditions varient. Dans le cas général, il y a peu de chance pour que la charge réelle suive naturellement ces variations. Il y a donc lieu d'effectuer en permanence l'adaptation d'impédance nécessaire en insérant, entre le générateur et la charge électrique [26].

II.3 Les convertisseurs DC-DC (hacheurs) :

Les hacheurs sont des convertisseurs du type continu-continu permet tant de contrôler la puissance électrique dans des circuits fonctionnant en courant continu avec une très grande souplesse et un rendement élevé.

Le hacheur se compose de condensateurs, des inductances et des interrupteurs. Tous ces dispositifs idéalement ne consomment pas d'énergie, qui est la raison de la haute efficacité de commutation des convertisseurs. L'interrupteur est réalisé avec un dispositif à semi-

conducteurs en mode commuté, généralement un MOSFET (transistors à effet de champ d'oxyde de métal) [27].

Le rôle du convertisseur DC/DC (dans le cadre du PV) est de faire l'adaptation entre la source (GPV) et la charge pour un transfert de puissance maximale.

L'objectif de ce travail est de présenter une meilleure conception d'un convertisseur boost capable de rechercher la puissance maximale quelles que soient les variations de l'ensoleillement [28].

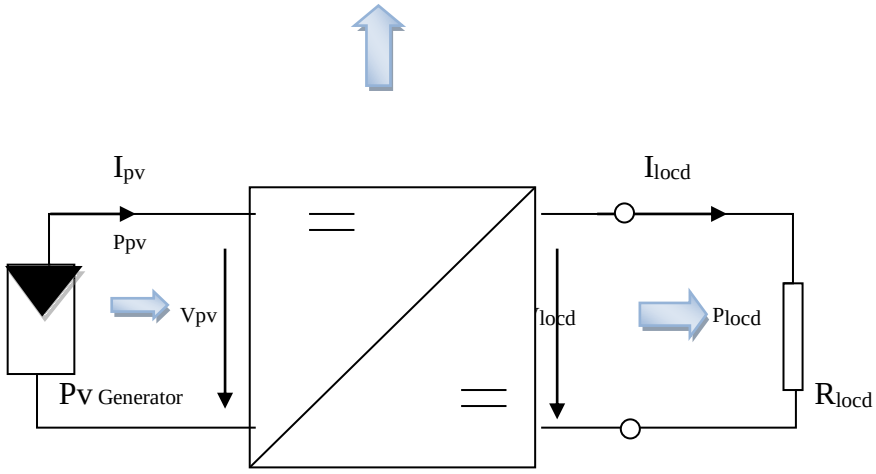


Figure II. 4 *montre la représentation d'un Convertisseur DC/DC [28].*

II.3.1 Convertisseur Boost (hacheur survolteur) :

Le hacheur survolteur (Boost), le convertisseur boost ou hacheur parallèle connu par le nom d'élévateur de tension (step-up), est donné par la figure (II.5), il est généralement utilisé dans la conversion d'une tension d'entrée basse en une tension de sortie haute, il se compose d'une source de tension d'entrée continue VA, d'une inductance L, d'un interrupteur S, d'une diode, et deux condensateurs Cin et Cout. En premier temps [0, αT] le transistor est fermé, le courant dans l'inductance croit progressivement, au fur et à mesure elle emmagasine de l'énergie, jusqu'à la fin de la première période, le transistor s'ouvre et l'inductance l s'oppose à la diminution du courant I ainsi elle génère une tension qui s'ajoute à la tension de source, qui s'applique sur la charge à travers la diode [29].

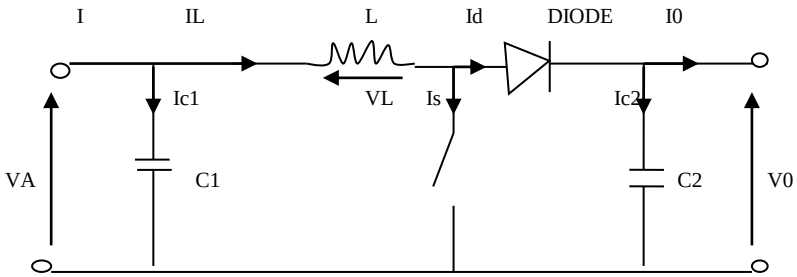


Figure II. 5 *Schéma électrique du convertisseur boost [30].*

II.3.1.1 Modèle mathématique équivalent :

L'application des lois de Kirchhoff sur les deux circuits équivalents du convertisseur survolteur figures(II.6), (II.7) des deux phases de fonctionnement donne :

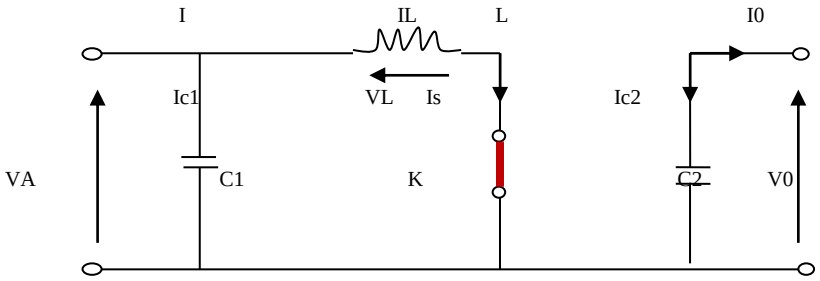


Figure II. 6 *Schémas équivalents du hacheur survolteur, pour K est fermé [30].*

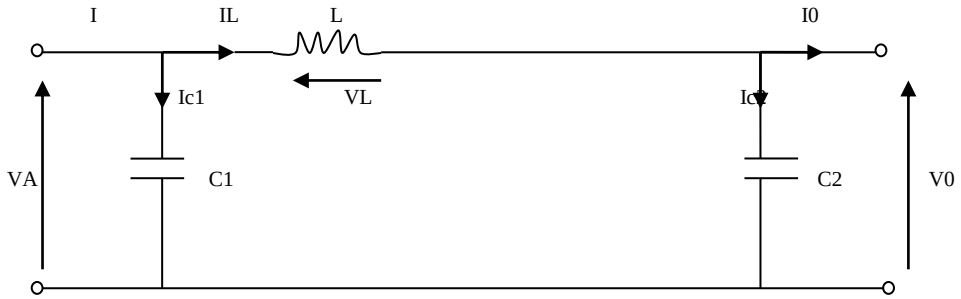


Figure II. 7 *Schémas équivalents du hacheur survolteur, pour K est ouvert $T \in [DTs, Ts]$ [31].*

Pour la première période αTs :

$$I_{c1} = \mathrm{C1}\frac{dV_i}{dt} = I_i - I_L \quad \text{(II.3)}$$

$$I_{c2} = C2\frac{dV_0}{dt} = -I_0 \quad \text{(II.4)}$$

$$V_L = \mathrm{L}\frac{dI_L}{dt} = V_i - R_L I_L \quad \text{(II.5)}$$

- Pour la deuxième période (1-α) Ts :

$$I_{c1} = \text{C1}\frac{dV_i}{dt} = I_i - I_L \quad \text{(II.6)}$$

$$I_{c2} = C2\,\frac{dV_0}{dt} = I_L - I_0 \quad \text{(II.7)}$$

$$V_L = \text{L}\frac{dI_L}{dt} = V_i - V_0 - R_L I_L \quad \text{(II.8)}$$

II.3.1.2 Modèle approximé du convertisseur Boost :

Le convertisseur oscillant entre αTS et (1-α) TS 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 CI, VL 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 laps de temps αTs et (1-α) Ts:

$$<\frac{dx}{dt}> T_s = \frac{dx}{dt_{(\propto T_S)}} + \propto T_s + \frac{dx}{dt_{(1-\propto)T_S}}(1-\propto)T_s \quad \text{(II.9)}$$

Où $<\frac{dx}{dt}>$ est la valeur moyenne de la dérivée de x sur une période Ts. cette relation est valide si: $\frac{dx}{dt(\alpha Ts)}$ et $\frac{dx}{dt(1-\alpha)Ts}$ sont constants sur les périodes αTs et (1−α) Ts respectivement en d'autres termes cette approximation est valable si les périodes αTs et (1−α) Ts sont très faibles devant la constante de temps du circuit $C1RG$, C2Z, L/RL dans ce cas la forme exponentielle du courant qui parcourt la self et la tension aux bornes de la capacité est de forme linéaire comme le montre la figure (II.7)[10].

II.4 Régulateurs Proportionnelle – Intégrale (PI) :

Un régulateur PI est constitué d'un comparateur pour observer l'écart entre la mesure et la consigne, et d'un correcteur dont l'algorithme permet d'obtenir une loi d'évolution de la mesure du procédé conforme au cahier de charges. Le correcteur a une action PI (Proportionnelle, Intégrale) et associée à un comparateur.

Dans un premier temps une commande à base de régulateurs PI sera réalisée. Cette dernière en étant simple et rapide à mettre en œuvre, procure l'avantage d'avoir des performances acceptables, la **Stabilité et la Précision** [32].

II.5 Poursuite du point de puissance maximale (MPPT) :

II.5.1 Définition de l'MPPT d'un système solaire photovoltaïque :

La technique MPPT est une commande associée à un étage d'adaptation permettant de faire fonctionner un générateur électrique non linéaire de façon à produire en permanence le maximum de sa puissance. Les systèmes MPPT sont généralement associés avec le générateur photovoltaïque ou encore avec les générateurs éoliens. Un contrôleur MPPT permet alors de piloter le convertisseur statique reliant la charge et le panneau photovoltaïque, de manière à fournir en permanence le maximum de puissance à la charge La Figure (II.8) représente une chaîne de conversion photovoltaïque avec convertisseur statique contrôlé par une commande MPPT et une charge quelconque [32].

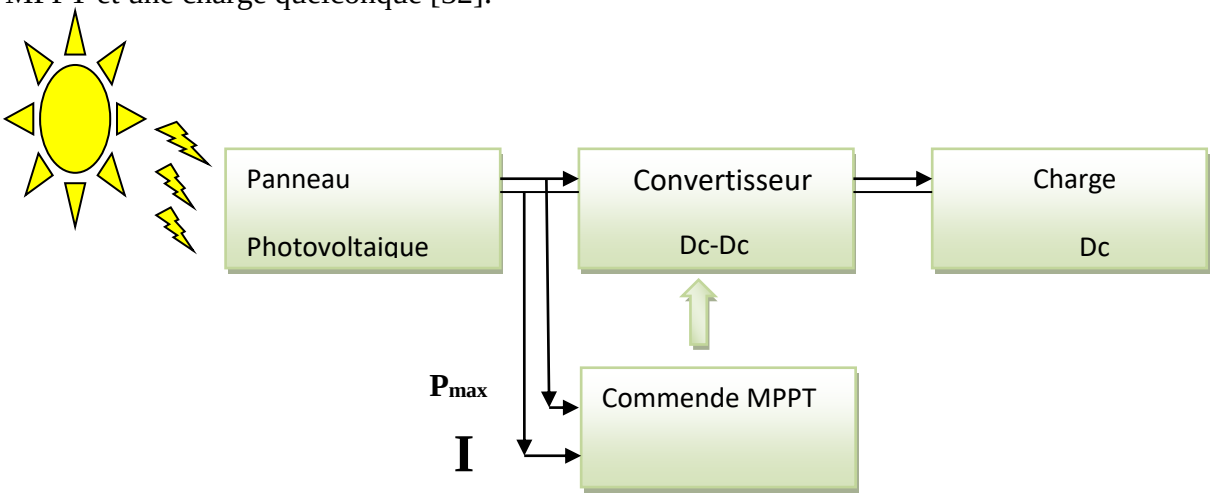


Figure II. 8 *Chaîne élémentaire de conversion photovoltaïque avec convertisseur Statique contrôlé par une commande MPPT sur charge quelconque [32].*

II.5.2 Les commandes MPPT :

Il existe des nombreuses méthodes et techniques de commande MPPT disponibles dans la littérature dont on cite les plus connues: Constant Voltage Méthode, Short-Curent Pulse Méthode, Open, Voltage Méthode, Température Méthode et leurs combinaisons mais Il existe différents types de contrôleurs MPPT [32].

II.5.2.1 Méthode MPPT de Perturb and Observe (P&O) :

La méthode de perturbation et observation (P&O) est une approche largement répondue dans la recherche de MPPT parce qu'elle est simple et exige seulement des mesures de tension et du courant du panneau photovoltaïque VPV et IPV respectivement, elle peut dépister le point maximum de puissance même lors des variations de l'éclairement et la température. Comme son nom l'indique, la méthode P&O fonctionne avec la perturbation de la tension V_{PV} et l'observation de l'impact de ce changement sur la puissance de sortie du panneau photovoltaïque. [32]

La figure (II.9) représente l'algorithme de la méthode P&O. À chaque cycle. V_{PV}, I_{PV} sont mesurés pour calculer $P_{PV}(k)$. Cette valeur de $P_{PV}(k)$ est comparée à la valeur P_{PV} (k-1) calculée au cycle précédent.

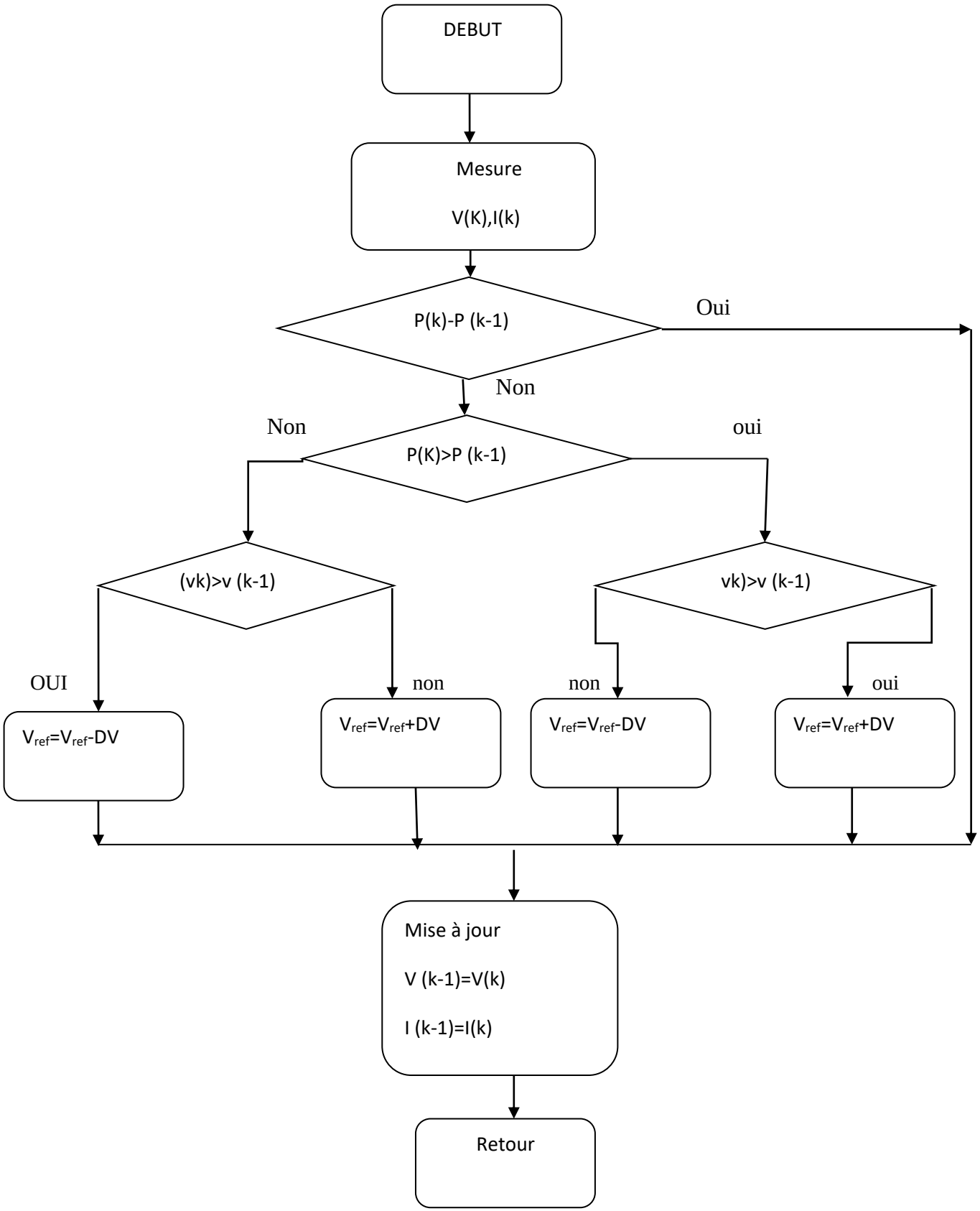


Figure II. 9 *Organigramme de l'algorithme P&O [26].*

Si la puissance de sortie a augmenté, V_{PV} est ajustée dans la même direction que dans le cycle précédent. Si la puissance de sortie a diminué, V_{PV} est ajustée dans la direction opposée que dans le cycle précédent. V_{PV} est ainsi perturbée à chaque cycle de MPPT.

Quand le point de puissance maximale est atteint, V_{PV} oscille autour de la valeur optimale V_{OP} Ceci cause une perte de puissance qui augmente avec le pas de l'incrémentation de la perturbation. Si ce pas d'incrémentation est large, l'algorithme du MPPT répond rapidement aux changements soudains des conditions de fonctionnement.

D'autre part, si le pas est petit, les pertes, lors des conditions de changements atmosphériques lents ou stables, seront inférieures mais le système ne pourra pas répondre rapidement aux changements rapides de la température ou de l'éclairement. Le pas idéal est déterminé expérimentalement en fonction des besoins [33].

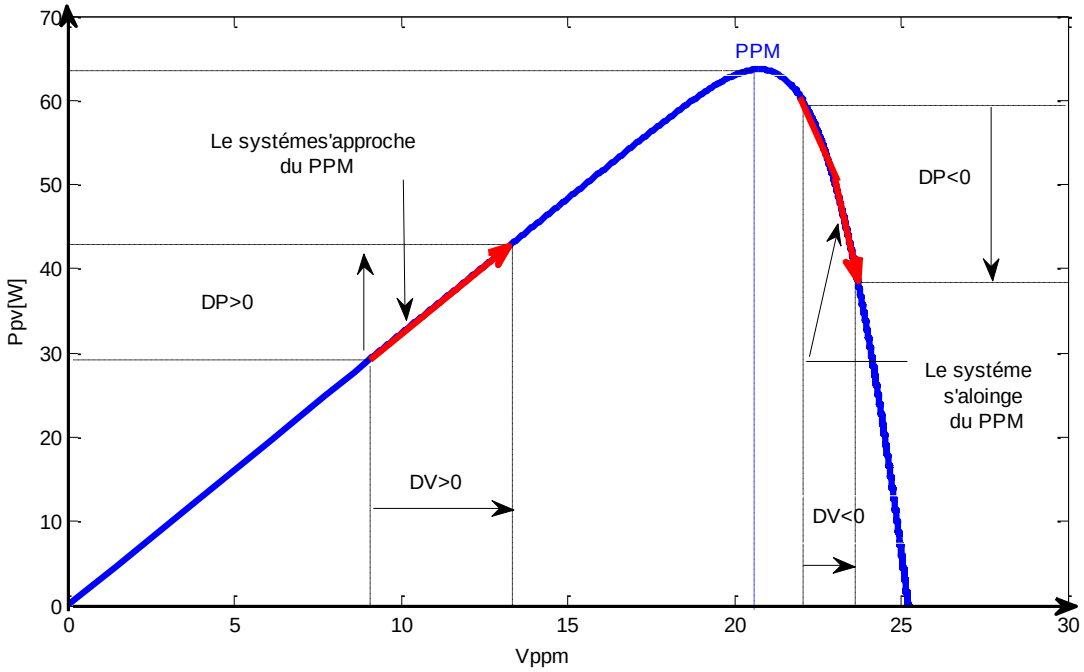


Figure II. 10 *Recherche du PPM par la méthode (P&O) [33].*

Il est important de noter qu'avec l'algorithme P&O, la variable à contrôler peut être soit la tension soit le courant du GPV. Cependant, la variable idéale qui caractérise le MPP est celle qui varie peu lors d'un changement climatique. Néanmoins, la dynamique de la température est lente et varie sur une plage réduite. Par conséquent, il est préférable de contrôler la tension du GPV. Un inconvénient de la méthode P&O est qu'elle peut échouer lors d'un rapide changement des conditions atmosphérique [33].

II.6 les onduleurs :

Un onduleur est un dispositif d'électronique de puissance permettant de délivrer des tensions et des courants alternatifs à fréquence fixes ou variables sous forme d'une alimentation alternative monophasée ou triphasée à partir d'une source d'énergie électrique continue. L'onduleur est utilisé pour fournir une tension ou un courant alternatif pour assurer l'alimentation en énergie des charges (micro-ordinateur, station de télécommunication) pendant la coupure du réseau électrique ou une alimentation permanente pour les systémes autonomes (centrales photovoltaïques, engins aérospatiaux, ...). La représentation symbolique d'un onduleur est donnée par la figure (II.11) [34] :

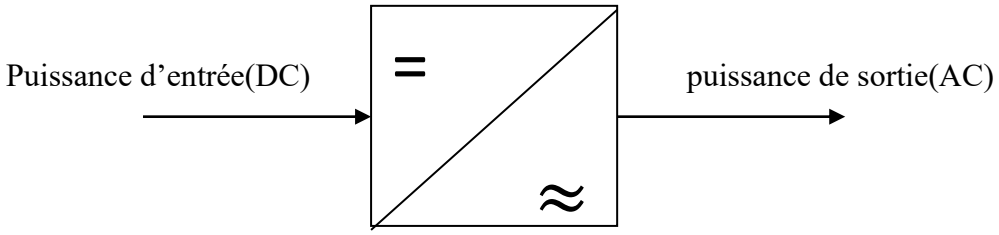


Figure II. 11 S*chéma de principe de l'onduleur [34].*

Les onduleurs sont classés selon le type d'application et leurs performances, en deux grandes catégories : les onduleurs autonomes et les onduleurs non autonomes.

II.6.1 Onduleurs autonomes :

L'onduleur autonome est un système de commutation à transistors ou à thyristors, dont les instants de commutation sont imposés par des circuits externes, il n'a pas besoin le réseau électrique pour fonctionner. Ils sont de différentes tailles de 100W pour alimenter un ordinateur portable à 10KW, les onduleurs autonomes utilisent des batteries pour le stockage et des contrôleurs de charge pour assurer la durabilité de ces batteries [34]. La fréquence et la forme d'onde (amplitude et phase) de la tension de sortie sont imposées à la charge, c.-à-d. elles sont propres à ce type d'onduleur. Dans cette catégorie, on distingue aussi :

A fréquence fixe : utilisé comme source de secours ou alimentation sans coupure, Il est alimenté le plus souvent à partir d'une batterie d'accumulateurs (cas de PC, salles d'informatique…) comme il est montré sur la figure (II.12) [35].

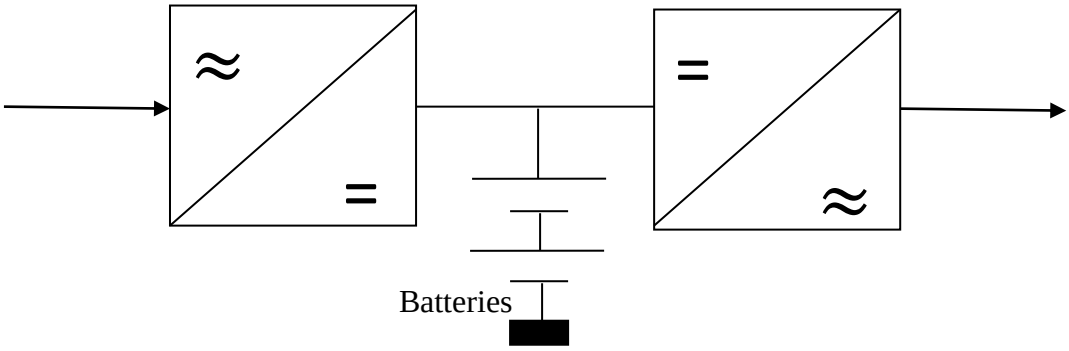


Figure II. 12 *Alimentation sans coupure [35].*

Il est utilisé aussi pour l'alimentation des charges inductives (fours à induction,…) mais dans ce cas tous les onduleurs sont monophasés.

II.6.2 Onduleurs non autonomes(ou assistés) :

Un onduleur non autonome est un système de commutation à thyristors, dont les instants de commutation sont imposés par la charge. Dans ce cas, la fréquence et la forme d'onde de la tension de sortie sont imposées au réseau alternatif sur lequel débite ce type d'onduleur. Ces onduleurs sont employés pour :

- Le transport d'énergie en courant continu, on peut transporter de grandes puissances à très haute tension (de l'ordre du million de volts) par lignes aériennes sur des distances élevées (500-1000 Km) pour lesquelles, les lignes à courant alternatif posent des problèmes délicats (stabilité, pertes…). De plus, le transport sur des plus faibles distances par câbles souterrains dont la capacité très élevée, limite leur emploi en courant alternatif [34].
- Le freinage par récupération pendant les phases de freinage les moteurs à courant continu. Peuvent fonctionner en génératrices et l'énergie mise en jeu, dans ce cas, peut être récupérée et transférée au réseau alternatif par un onduleur assisté (domaine de la traction électrique à courant continu).
- La cascade hypo synchrone pour le réglage de la vitesse de rotation des moteurs asynchrones à rotor bobiné.
- Dans ce travail on s'intéresse aux onduleurs autonomes.

Deux types d'onduleurs sont donc utilisés pour assurer une telle conversion :

1) Onduleur Monophasé
2) Onduleur Triphasé [34].

II.6.3 Onduleur monophasé :

Ce type d'onduleur qui délivre en sa sortie une tension alternative monophasée, est généralement destinée aux alimentations de secours. Trois classes d'onduleurs monophasés sont à distinguer, suivant leur topologie.

- Onduleur monophasé en demi-point
- Onduleur monophasé en pont
- Onduleur push-pull [36].

II.6.4 Onduleur triphasé :

L'onduleur triphasé se comporte de trois phases dont les ondes de tension sont déphasées respectivement de 120 l'une par rapport à l'autre, nous intéresserons uniquement à la structure de l'onduleur à trois bras et à interrupteurs en série. Il faut représenter par la figure(II.13) [36].

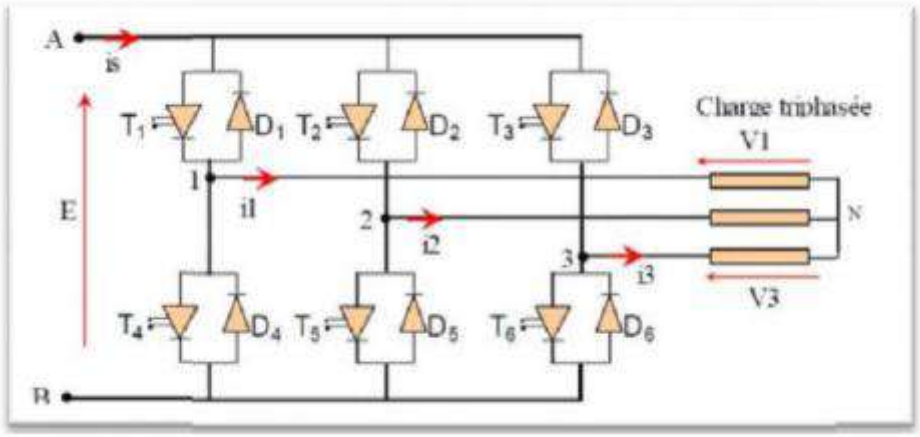


Figure II. 13 *Représentation d'un onduleur triphasé [36].*

II.6.5 Commande des onduleurs :

II.6.5.1 Commande par modulation de largeur d'impulsion :

La modulation de l'argeur d'impulsion (MLI) (en anglais : pulse width modulation (PWM)) est réalisée par la comparaison d'un signal triangulaire appelé porteuse de haute fréquence à un signal de référence appelé modulatrice. Les instants de commutation sont déterminés par les points d'intersection entre la porteuse et la modulante. La fréquence de commutation des interrupteurs est fixée par la porteuse. Dans le cas triphasé, trois références sinusoïdales déphasées à la même fréquence f. Comme à la sortie de l'onduleur, la tension n'est pas purement sinusoïdale, donc elle comporte des harmoniques, ce qui engendre des

pertes supplémentaires. La commande MLI sert à remédier ces problèmes et elle a les avantages suivantes :

1) Variation de la fréquence de la tension de sortie.
2) Elimination de certaines harmoniques de tension [36].

II.6.5.2 Caractéristiques de la modulation :

Coefficient de réglage :le taux de modulation, r, qui est l'image du rapport des amplitudes de tension de la référence $Vmref$ sur la tension de la porteuse Vmp, qui exprimé par :

$$r=\frac{V_{mref}}{V_{mp}} \qquad (II.10)$$

L'indice de modulation : l'indice de modulation, m, qui est l'image du rapport de fréquence de la porteuse fp sur la fréquence de référence f. Ce dernier est donné par :

$$m = \frac{f_p}{f} = \frac{T_{ref}}{T} \qquad (II.11)$$

D'autre technique de MLI existent également dans la littérature comme la MLI à échantillonnage régulier ou l'on peut distinguer deux méthodes :

- La MLI à échantillonnage régulier symétrique ou la référence est échantillonnée à chaque période de la porteuse.
- La MLI à échantillonnage régulier asymétrique ou la référence est échantillonnée à la demi-période de la porteuse [36].

II.7 Logique floue :

La logique floue est une théorie très puissante qui permet de générer de réponses à partir d'informations vagues, ambiguës, incomplètes et imprécises, là où les modèles mathématiques du système sont inconnus ou difficiles à extraire [37].

II.7.1 Généralité :

Une des caractéristiques du raisonnement humain est qu'il est généralement fondé sur des données imprécises ou même incomplètes. En effet, les connaissances dont nous disposons sur un système quelconque sont généralement incertaines ou vagues, soit parce que nous avons un doute sur leur validité ou alors nous éprouvons une difficulté à les exprimer clairement. De ce fait on a eu besoin d'un nouveau type de raisonnement qui se rapproche plus de celui-ci et qu'on peut traiter d'une façon mathématique rigoureuse. Le professeur Lotfi Zadeh de l'université de Berkeley (Californie) fut le premier à avoir effectué des travaux sur la logique floue en 1965, il a ainsi introduit une théorie qui présente une

extension de la logique classique (booléenne), et permet la modélisation des imperfections des données et se rapproche dans une certaine mesure de la flexibilité du raisonnement humain. Les commandes basées sur la logique floue (dans la littérature anglo-saxonne Fuzzy Logic Control) sont de plus en plus populaires grâce à l'évolution des microcontrôleurs. L'avantage de ces techniques est qu'elles peuvent fonctionner avec des valeurs d'entrées peu précises et qu'elles n'ont pas besoin de modèle mathématique de grande précision.

De plus, elles peuvent traiter des non linéarités. Le principe d'une commande floue se base sur deux variables d'entrées qui sont l'erreur E et le changement d'erreur dE et une variable de sortie dU En général [37].

II.7.2 Principe de la logique floue :

Le principe général et la théorie de base de la logique floue est la description d'un phénomène qui contient en général des expressions floues comme : Chaude, froid. Rapide, lent. Grand, moyen, petit. Max, min. Positive, nulle, négative…etc.., Les éléments constituant la théorie de base de la logique floue sont : Les variables linguistiques, les ensembles flous et les fonctions d'appartenance [10].

II.7.3 Méthode Mamdani :

La méthode Mamdani est la stratégie d'interface floue la plus utilisée. Depuis qu'il a été proposé en 1975, par le professeur Ebrahim Mamdani de l'Université de Londres qui a construit l'un des systèmes flous pour contrôler une combinaison de machine à vapeur et de chaudière. Dans la méthode de Mamdani, un ensemble de règles if-then floues a été appliqué, et celles-ci ont été fournies par des opérateurs humains expérimentés [10].

La logique floue de Mamdani utilise les variables linguistiques pour décrire les états de +9*processus et utilise ces variables comme entrées pour contrôler les règles. Les termes des variables linguistiques sont des ensembles flous avec une certaine forme. La logique floue de Mamdani utilise habituellement l'ensemble flou trapézoïdal ou triangulaire, mais d'autres formes sont possibles.

II.7.4 Fonctions d'appartenance :

Une définition des variables linguistiques à l'aide des fonctions d'appartenance est nécessaire dans le but de traiter des déductions floues par calculateur .dans ce contexte, est attribuée à chaque valeur de la variable linguistique une fonction d'appartenance μ, dont la valeur varie ente 0 et 1.Le plus souvent, on utilise des fonctions d'appartenance de type

triangulaire ou trapézoïdale, gaussienne. on utilise pour les fonctions d'appartenance les fonctions suivantes [38] :

- **Fonction triangulaire :** l'allure est définie par 3 paramètres {a, b, c}.

$$\mu(x) = \max\left(\min\left(\frac{x-a}{b-a'} \frac{c-x}{c-b} \right), 0 \right) \quad \text{(II.12)}$$

- **Fonction trapézoïdale:** elle est définie par 4 paramètres {a, b, c, d}.

$$\mu(x) = \max\left(\min\left(\frac{x-a}{b-a'}, 1, \frac{d-x}{d-c} \right), 0 \right) \quad \text{(II.13)}$$

- **Fonction gaussienne :** elle est définie par 2 paramètres {m, σ}.

$$\mu(x) = \exp\left(-\left(\frac{x-m}{2\sigma} \right)^2 \right) \quad \text{(II.14)}$$

- **Fonction en forme de cloche :** elle est définie par 2 paramètres {x0, a}.

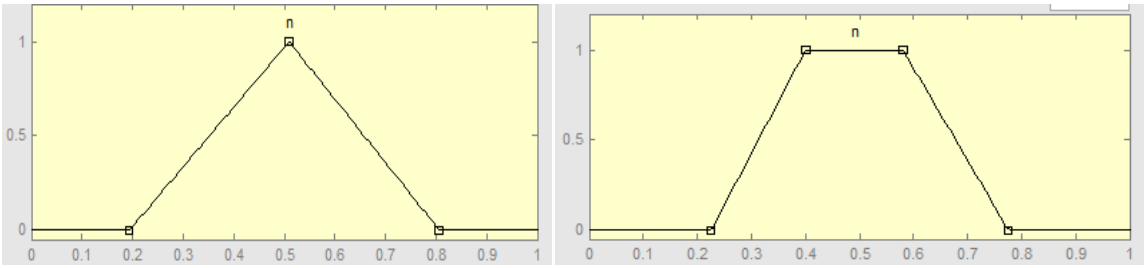
$$\mu(x) = \left(\frac{1}{1+\left(\frac{x-x_0}{a} \right)^2} \right) \quad \text{(II.15)}$$

- **Fonction trigonométrique :** elle est définie par 2 paramètres {x0, a}.

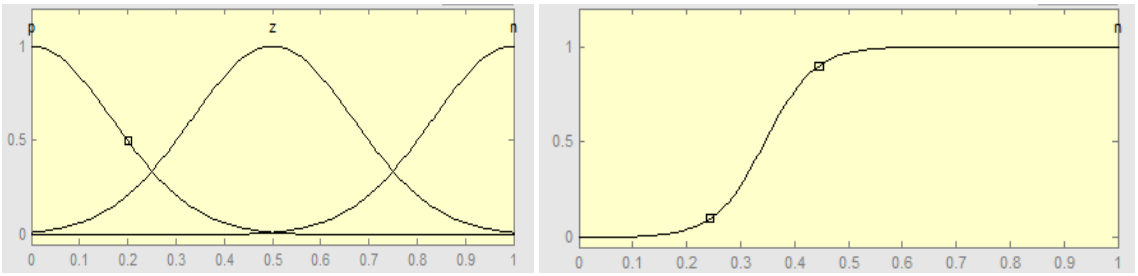
$$\mu(x) = \frac{1}{2}\left(1+\cos\frac{\pi(x-x_0)a}{2a}, x_0 - a \le x \le x_0 + 2a \right) \quad \text{(II.16)}$$

- **Fonction sigmoïdale :** elle est définie par 2paramètres {x0, c}.

$$\mu(x) = \frac{1}{1+\exp\left(a\left(x-c\right)\right)} \quad \text{(II.17)}$$



-Fonction triangulaire -Fonction trapézoïdale



-Fonction gaussienne - Fonction sigmoïdale

Figure II. 14 *Formes usuelles des fonctions d'appartenance [38].*

II.7.5 Structure générale d'un régulateur par logique floue :

Le principe d'une commande floue se base sur deux variables d'entrées qui sont l'erreur E et le changement d'erreur ΔE et une variable de sortie D. En général, la commande logique floue comprend donc trois étapes communément nommées dans la littérature :

1. La fuzzification.
2. La lecture de la table de vérité.
3. La défuzzification [38].

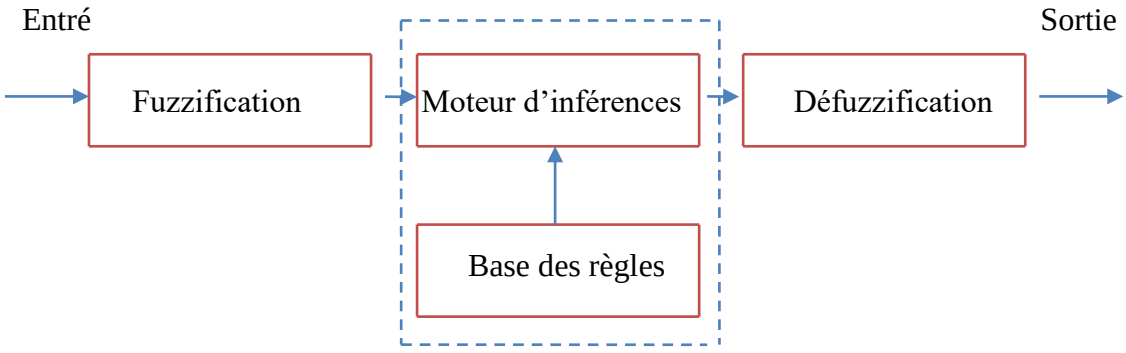


Figure II. 15 *Structure générale d'un régulateur par logique floue [39].*

- **La fuzzification :**

Durant la fuzzification, les variables d'entrées numériques sont converties en variable linguistique.

- **La lecture de la table des règles :**

Le mécanisme d'inférence calcule les sous-ensembles flous relatifs à la variation de la sortie à partir d'appartenance des variables d'entrées fuzzifiées et de la table des règles fournie par l'expert.

- **Défuzzification** :

La défuzzification transforme la variable floue de sortie en valeur non floue permettant la commande effective du système.la méthode de défuzzification que nous avons utilisée est celle du centre de gravité de la variable floue de sortie [40].

II.8 Les avantages et les inconvénients :

Il ya plusieurs des avantages et inconvénients :

II.8.1 Avantage :

- Linguistique : pas numérique, où les variables utilisés sont similaire à la façon dont les humains pensent.
- Simplicité : ne nécessite pas d'équations analytiques complexes, facile à comprendre. Utilise moins de règles.
- Prototypage rapide : le designer n'a pas besoin de connaitre tout à propos du système avant de commencer.
- Plus robuste : plus facile à mettre au point en changeant les fonctions d'appartenance [38].

II.8.2 Les Inconvénients :

- Systèmes d'explications limitées.
- Quand même nécessaire de consulter des experts.
- Problèmes de saturation si les fonctions d'appartenance ne sont pas bien définies [38].

II.9 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons entamé la partie la plus importante et la plus délicate de cette étude.

Dans la première partie de ce chapitre, nous avons présenté le générateur photovoltaïque (la connexion directe et indirecte). Ensuite, nous avons étudié théoriquement le fonctionnement d'un convertisseur de type Boost qui est employés très souvent. La commande de ces convertisseurs s'effectue par une variation du rapport cyclique du signal de commande de l'interrupteur qui est déduit de l'algorithme du MPPT.

La deuxième partie, nous présentons les onduleurs et ses types, ses Caractéristiques.

Enfin, on base sur la logique floue, nous donnons une généralité, le principe et Structure générale d'un régulateur de tension par logique floue nous sommes particulièrement intéressés par l'algorithme basé sur la logique floue. Nous terminons avec les avantages es les inconvénients.

III.1 Introduction:

Le problème d'optimisation, heuristique, mathématique ou autres, doté d'informations nécessaires est l'ajustement des variables pour améliorer le parcours calculé (résultats : décision optimale) par rapport au chemin requis selon certaine gamme d'intérêt; en bref, l'optimisation est l'ajustement de variables dont le but d'obtenir une solution meilleure pour un processus donné. Les métaheuristiques sont une famille d'algorithmes stochastiques destinés à résoudre des problèmes d'optimisation "difficile". Utilisées dans de nombreux domaines, ces méthodes présentent l'avantage d'être généralement efficaces, sans pour autant que l'utilisateur ait à modifier la structure de base de l'algorithme qu'il utilise. Ce chapitre présente un intérêt particulier à une métaheuristique apparue dernièrement : la méthode d'Optimisation par Essaim Particulaire (OEP) [41].

III.2 L'Optimisation par Essaim Particulaire (*OEP*) :

L'optimisation par essaim de particules (Particle Swarm Optimization (PSO) est une méthode d'optimisation stochastique, pour les fonctions non-linéaires, basée sur la reproduction d'un comportement social et développée par le Dr.EBERHART et le Dr.KENNEDY en 1995. L'origine de cette méthode vient des observations faites lors des simulations informatiques de vols groupés d'oiseaux et de bancs de poissons de REYNOLD, HEPPNER ET GRENANDER. Ces simulations ont mis en valeur la capacité des individus d'un groupe en mouvement à conserver une distance optimale entre eux et à suivre un mouvement global par rapport aux mouvements locaux de leur voisinage. D'autre part, ces simulations ont également révélé l'importance du mimétisme dans la compétition qui oppose les individus à la recherche de la nourriture. En effet, les individus sont à la recherche de sources de nourriture qui sont dispersés de façon aléatoire dans un espace de recherche, et dès lors qu'un individu localise une source de nourriture, les autres individus vont alors chercher à le reproduire.

Ce comportement social basé sur l'analyse de l'environnement et du voisinage constitue alors une méthode de recherche d'optimum par l'observation des tendances des individus voisins. Chaque individu cherche à optimiser ses chances en suivant une tendance qu'il modère par ses propres vécus [41].

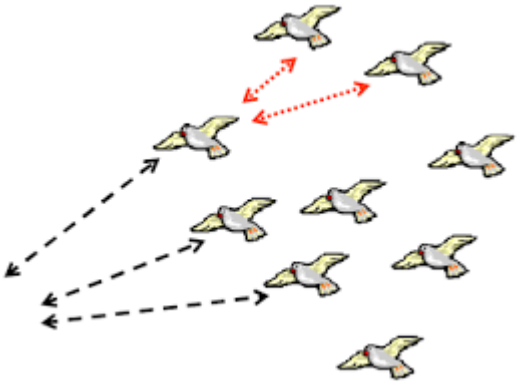


Figure III. 1 *Groupe d'oiseux [41].*

III.3 Principe :

L'optimisation par essaim de particules repose sur un ensemble d'individus originellement disposés de façon aléatoire et homogène, que nous appellerons dès lors des particules, qui se déplacent dans l'hyper-espace de recherche et constituent, chacune,une solution potentielle.

Chaque particule dispose d'une mémoire concernant sa meilleure solution visitée ainsi que la capacité de communiquer avec les particules constituant son entourage. A partir de ces informations, la particule va suivre une tendance faite, d'une part, de sa volonté à retourner vers sa solution optimale, et d'autre part, de son mimétisme par rapport aux solutions trouvées dans son voisinage [42].

A partir d'optimums locaux et empiriques, l'ensemble des particules va, normalement, converger vers la solution optimale globale du problème traité.

III.3.1 Principales caractéristiques :

Ce modèle présente quelques propriétés intéressantes, qui en font un bon outil pour de nombreux problèmes d'optimisation, particulièrement les problèmes fortement non linéaires, continus ou mixtes (certaines variables étant réelles et d'autres entières) :

- il est facile à programmer, quelques lignes de code suffisent dans n'importe quel langage évolué.
- il est robuste (de mauvais choix de paramètres dégradent les performances, mais n'empêchent pas d'obtenir une solution) [42].

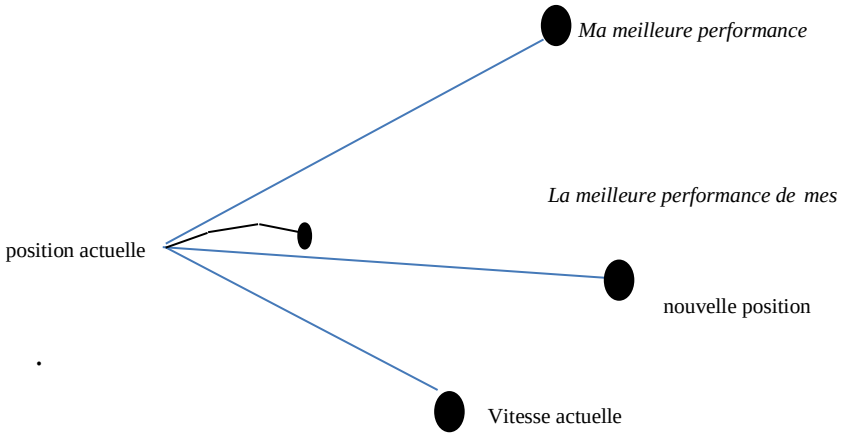


Figure III. 2 Déplacement d'une particule [42].

III.4 Formalisation mathématique du PSO :

Un essaim de particule est caractérisé par :

a) le nombre de particules de l'essaim, noté *nb*.

b) la vitesse maximale d'une particule, notéρv_{max}.

c) la topologie et la taille du voisinage d'une particule qui définissent son réseau social.

d) l'inertie d'une particule, notée *w*.

e) les coefficients de confiance, notés ρ1 et ρ2, qui pondèrent le comportement conservateur (la tendance à retourner vers la meilleur solution visitée) et le panurgisme (la tendance à suivre le voisinage) [43].

Une particule est caractérisée, à l'instant t, par :

- ρ_{xi}(t):sa position dans l'espace de recherche;
- ρ_{vi}((*t*): sa vitesse ;
- La position de la meilleure solution par laquelle elle est passée; ρ_{pbesti} *:*
- La position de la meilleure solution connue de son voisinage;ρ_{gbesti}
- La valeur de fitness de sa meilleure solution; *pbesti* :
- *Gbesti* : La valeur de fitness de sa meilleure solution connu du voisinage [43]**.**

III.5 Configuration de la méthode :

III.5.1 Nombre de particules :

La quantité de particules allouées à la résolution du problème dépend essentiellement de deux paramètres : la taille de l'espace de recherche et le rapport entre Les capacités de calcul de la machine et le temps maximum de recherche. Il n'y a pas de règle pour déterminer ce paramètre, faire de nombreux essais permet de se doter de l'expérience nécessaire à appréhension de ce paramètre.

III.5.2 Notion de voisinage :

Le voisinage constitue la structure du réseau social. Les particules à l'intérieur d'un voisinage communiquent entre-elles. Différents voisinages ont été étudiés (Kennedy, 1999) et sont considérés en fonction des identificateurs des particules et non des informations topologiques comme les distances euclidiennes dans l'espace de recherche [42] [44].

Le voisinage d'une particule est le sous-ensemble de particules de l'essaim avec lequel il a une communication directe. Ce réseau de rapports entre toutes les particules est connu comme la sociométrie, ou la topologie de l'essaim. Il existe deux principaux types de voisinage :

- Les voisinages géographiques : les voisins sont considérés comme les particules les plus proches. Cependant, à chaque itération, les nouveaux voisins doivent être recalculés à partir d'une distance prédéfinie dans l'espace de recherche. C'est donc un voisinage dynamique.

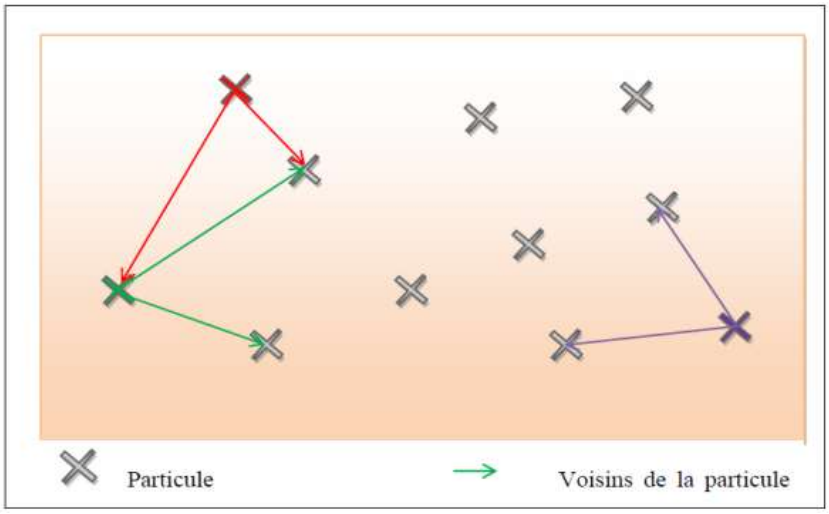


Figure III. 3 *Un voisinage géographique [44].*

Dans cet exemple, le voisinage de la particule est composé des deux particules les plus proches.

Les voisinages sociaux : les voisins sont définis à l'initialisation et ne sont pas modifiés. Ensuite, C'est le voisinage le plus utilisé, pour plusieurs raisons :

- Il est plus simple à programmer
- Il est moins coûteux en temps de calcul.
- En cas de convergence, un voisinage social tend à devenir un voisinage géographique. Pour ce faire, on dispose (virtuellement) les particules en cercle puis, pour la particule étudiée, on inclut progressivement dans ses informatrices, d'abord elle même, puis les plus proches à sa droite et à sa gauche, jusqu'à atteindre la taille voulue. On peut aussi choisir les informatrices au hasard [45].

III.5.3 Topologie du voisinage :

- Topologie en étoile (figure III.4) : le réseau social est complet, chaque particule est attirée vers la meilleure particule notée gbest et communique avec les autres.

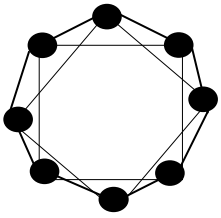


Figure III. 4 *Voisinage étoile [45].*

- Topologie en anneau (figure III.5) : chaque particule communique avec n (n = 3) voisines immédiates. Chaque particule tend à se déplacer vers la meilleure dans son voisinage local notée p_{best}.

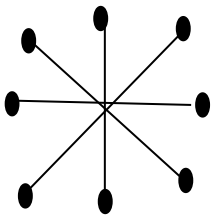


Figure III. 5 *Voisinage anneau [46].*

- Topologie en rayon (figure III.6) : une particule "centrale" est connectée à tous les autres. Seule cette particule centrale ajuste sa position vers la meilleure, si cela provoque une amélioration l'information est propagée aux autres [46].

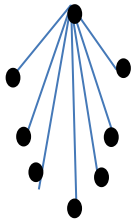


Figure III. 6 *Voisinage rayon [46].*

III.5.4 Coefficient de confiance :

Les variables de confiance pondèrent les tendances de la particule à vouloir suivre son instinct de conservation ou son panurgisme. Les variables aléatoires ρ1 et ρ2 peuvent être définis de la façon suivante

$$\rho_1 = r_1 . c_1 \quad \text{(III.1)}$$

$$\rho_2 = r_2 . c_2 \quad \text{(III.2)}$$

Où r1 et r2 suivent une loi uniforme sur [0...1] et c1 et c2 sont constantes positives déterminées de façon empirique [47].

III.5.5 Vitesse maximale et coefficient de constriction :

Afin d'éviter que les particules ne se déplacent trop rapidement dans l'espace de cherche, passant éventuellement à côté de l'optimum, il peut être nécessaire de fixer une vitesse maximale pour améliorer la convergence de l'algorithme.

Cependant, on peut s'en passer si on utilise un coefficient de constriction introduit par Maurice CLERC- et qui permet de resserrer l'hyper-espace de recherche.

L'équation de la vitesse :

$$K = 1 - \frac{1}{\rho} + \frac{\sqrt{|\rho^2 - 4\rho|}}{2} \quad \text{(III.3)}$$

$$\rho_{V1}(t) = k(\rho_{V1}(t-1) + \rho_1 . \left(\rho_{x\,pbest} - \rho_{xi}(t)\right) + \rho_2(\rho_{x\,gbest} - \rho_{xi}(t))) \quad \text{(III .4)}$$

Les études de SHI et EBRAHART indiquent que l'utilisation d'un coefficient de construction donne généralement un meilleur taux de convergence sans avoir à fixer de vitesse maximale. Cependant, dans certains cas, le coefficient de constriction seul ne permet pas la convergence vers la solution optimale pour un nombre d'itérations donné.

Pour résoudre ce problème, il peut être intéressant de fixer *v*max = *x* max en plus du coefficient de constriction, ce qui, selon les études de SHI et EBRAHART, permet d'améliorer les performances globales de l'algorithme [47].

III.5.6 Facteur d'inertie :

Le facteur d'inertie w - introduit par SHI et EBE RHART - permet de définir la capacité d'exploration de chaque particule en vue d'améliorer la converge de la méthode. Une grande valeur de w (>1) est synonyme d'une grande amplitude de mouvement et donc d'exploration globale. Par contre, une faible valeur de w (<1) est synonyme de faible amplitude de mouvement et donc d'exploration locale. Fixer ce facteur, revient donc à trouver un compromis entre l'exploration locale et l'exploration globale.

Le calcul de la vitesse est alors défini par :

$$\rho_{Vi}(t) = w.\rho_{Vi}((t-1) + \rho_1.\left(\rho_{x\,pbest}(t) - \rho_{xi}(t)\right) + \rho_2(\rho_{x\,gbest} - (\rho_{xi\,gbest}(t) - \rho_{xi}(t)) \quad \text{(III.5)}$$

La position est modifiée en ajoutant une vitesse à sa position courante :

$$\rho_{xi} = \rho_{xi}(t+1) + \rho_{Vi}(t) \quad \text{(III.6)}$$

La taille du facteur d'inertie influence directement la taille de l'hyper-espace exploré et aucune valeur de w ne peut garantir la convergence vers la solution optimale.

Les études menées par SHI et EBERHART indiquent une meilleure convergence pour w € [0.8, 1.2]. Au-delà de 1.2 l'algorithme tend à avoir certaines difficultés à converger.

Enfin, il est également possible de faire diminuer le facteur d'inertie au cours du temps, un peu à la manière de la température dans un algorithme de recuit simulé (Simulated Annealing). De bons résultats ont été trouvés pour une valeur décroissant linéairement de 0.9 à 0.4 [47]

III.6 Initialisation de l'essaim :

La position des particules ainsi que leur vitesse initiale doivent être initialisés aléatoirement selon une loi uniforme sur [0..1]. Cependant, en ce qui concerne la position des particules, est préférable d'utiliser un générateur de séquence de SOBOL, qui est plus pertinent dans la positon homogène des particules dans un espace de dimension n [47].

III.6.1 Critères d'arrêt :

Comme indiqué précédemment, la convergence vers la solution optimale globale n'est pas garantie dans tous les cas de figure même si les expériences dénotent la grande performance de la méthode. De ce fait, il est fortement conseillé de doté l'algorithme d'une porte de sortie en définissant un nombre maximum d'itération (que nous noterons nbItermax).

L'algorithme doit alors s'exécuter tant que l'un des critères de convergence suivant n'ait pas été atteint :

_ nbItermax a été atteint.

_ la variation de la vitesse est proche de 0.

_ le fitness de solution est suffisant [47].

III.7 Fonctionnement :

L'organigramme du PSO est présenté selon la procédure illustrée par la figure (III.7) [46]. L'algorithme de cette méthode peut être décrit comme suit :

- **1ére étape :** Initialisation des coefficients c1 et c2, le coefficient d'inertie (w).
- **2éme étape :** la création de la population initiale aléatoirement et le calcul de la fitness de chaque particule (*P best*) : la meilleure position de la particule i dans la population actuelle; (*P gbest*) : la meilleure position dans toutes les populations (la meilleure des meilleures)[47].
- **3éme étape :** calcul de la nouvelle vitesse et nouvelle position de chaque particule par l'utilisation des formules (III.6) et (III. 7).
- **4éme étape :** calcul de la meilleure fitness de la population actuelle et comparer par la précédente pour trouver 0la meilleure de toutes les populations (*P gdest*).
- **5éme étape :** incrémentation du nombre d'itération t = (t+1).
- **6éme étape :** si un critère d'arrêt est satisfait aller à la 7éme étape. Autrement, aller à la 3éme étape.
- **7éme étape :** a position enregistrée dans *(P gbes)*

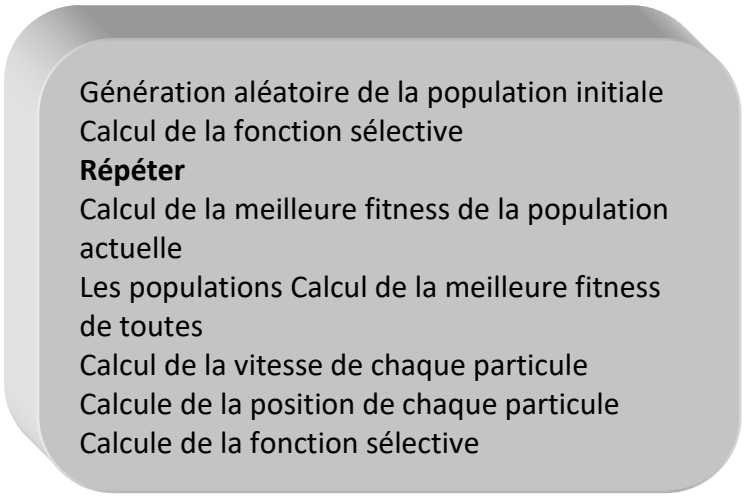


Figure III. 7 *Optimisation par Essaim Particulaire (OEP) [47].*

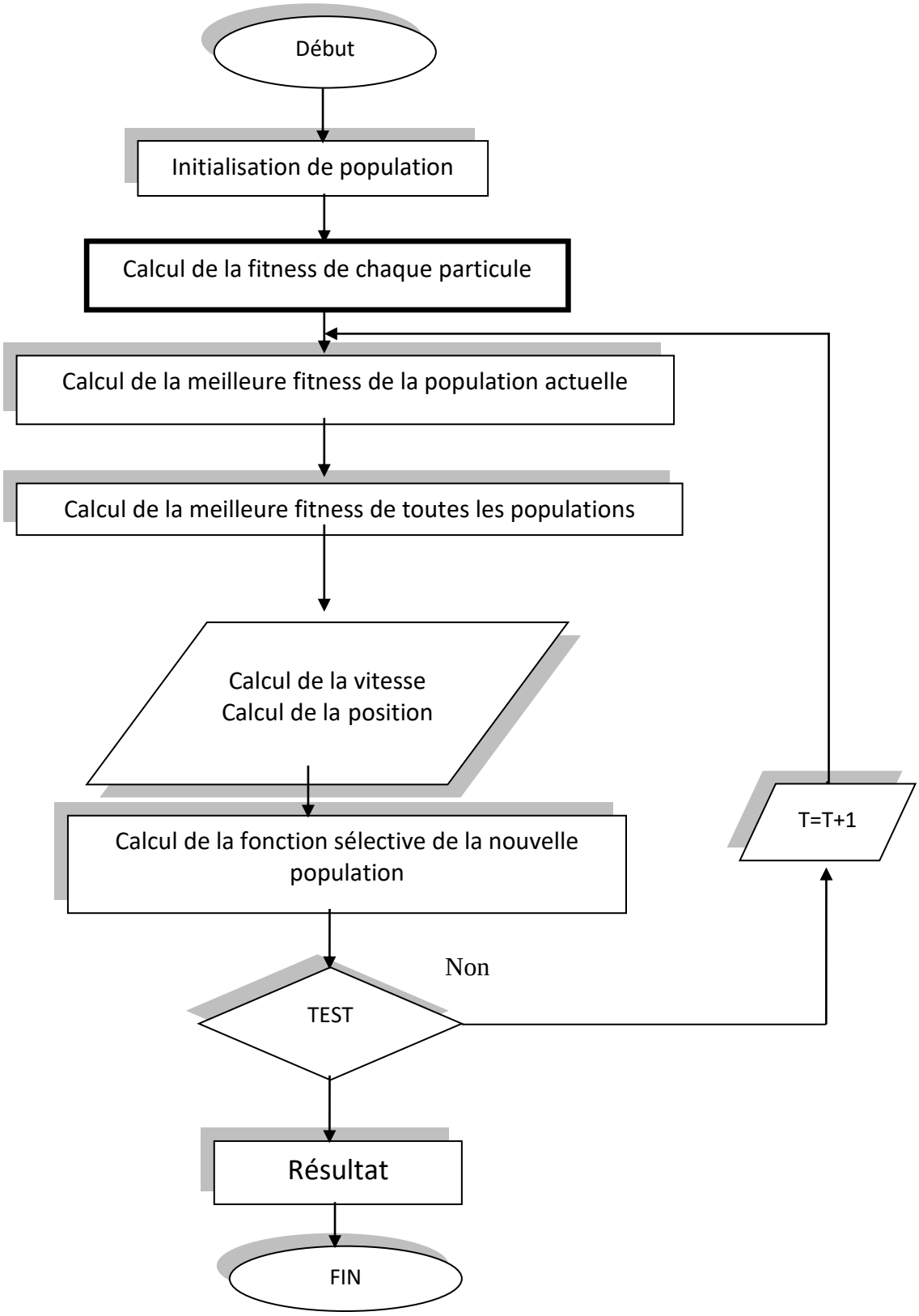


Figure III. 8 *Organigramme DE PSO [47].*

III.8 Avantages et inconvénients de PSO :

L'algorithme du PSO présente un avantage certain sur les méthodes classiques dans le sens où il permet une exploration aléatoire de l'espace de solution. De plus de sa simplicité à mettre en œuvrer et son exécution conduit à l'obtention de très bon résultat, rapidement et facilement avec peu de paramètre à ajuster.

Bien que le PSO trouve de bonnes solutions dans un temps beaucoup plus court que d'autres algorithmes évolutionnaires, l'amélioration de la qualité des solutions ne peut être garantie en augmentant le nombre d'itération.

L'algorithme de PSO a deux inconvénients principaux :

- Le premier inconvénient est que l'essaim peut prématurément converger.
- Le deuxième inconvénient est que les approches stochastiques ont un problème de dépendance tout changement d'un de leurs paramètres peut avoir un effet sur le fonctionnement de l'algorithme tout comme sur la solution obtenue [47].

III.9 CONCLUSION :

L'optimisation par essaim particulaire est une nouvelle méta-heuristique très efficace car, à partir de peu de modifications, elle permet la résolution d'un large panel de problèmes. De plus, bien que définie à la base pour des problèmes d'optimisation.

Dans ce chapitre on a étudié les essaims particulaires, Notre première étape de documentation, nous a permis de comprendre l'origine, le principe Puis, à partir des informations, nous avons expliquera la formalisation mathématique du PSO, Configuration de la méthode. Ensuite, on donne les Critères d'arrêt, la Fonctionnement et l'organigramme de PSO. Enfin, on détermine par les avantages et inconvénients.

Dans le chapitre suivant nous avons appliquée ces méthodes métaheuristiques pour résoudre les problèmes d'optimisation (régulateur de tensionVdc) sur le système photovoltaïque.

IV.1 Introduction :

La modélisation est une étape fondamentale qui permet d'introduire un certain nombre des modèles puis d'évaluer la caractéristique de chaque élément de l'installation ainsi que les paramètres constituants Dans un système énergétique photovoltaïque PV sous une température de 25° et des différentes irradiations(cas standard).

Les trois simulations décrivent l'utilisation de l'environnement Matlab/SimPowerSystems version R2012a pour modéliser un réseau de champs PV raccordé à un réseau électrique.

IV.2 L'outil Matlab/simulik :

MATLAB fait également partie d'un ensemble d'outils intégrés dédiés au traitement du Signal. En complément du noyau de calcul Matlab, l'environnement comprend des modules optionnels qui sont parfaitement intégrés à l'ensemble [48].

IV.3 Description de système :

La première simulation de Générateur PV contrôlés par la méthode P&O est un modèle d'un réseau de 200 kW connecté à un réseau de 25 kV par l'intermédiaire convertisseur élévateur DC-DC (Hacheurs Boost) et un seul convertisseur (Onduleur de deux niveaux) triphasés.

Le contrôleur PI basé sur la technique " Perturbez et Observer " est mis en œuvre au moyen d'un bloc de fonction de MATLAB.

Le modèle présenté sur la figure IV.1 contient :

- Un champ photovoltaïque fournit un maximum de 100 kW à 1000 W/m_2 d'irradiation solaire.
- Un modèle identique de convertisseur élévateur, Hacheur Boost (bloc orange).
- Un tension croissante PV égale à 500V CC. Le contrôleur PI utilisent la- Un onduleur de niveau triphasé (bloc bleu) convertit le 500 V CC à 260 V CA et maintient l'unité du facteur de puissance (cosα=1).
- 20 kvar d'harmonique produite par l'onduleur (filtrage par des condensateurs).
- 200 k_{VA}, 260V/25kV couplage de transformateur triphasé.

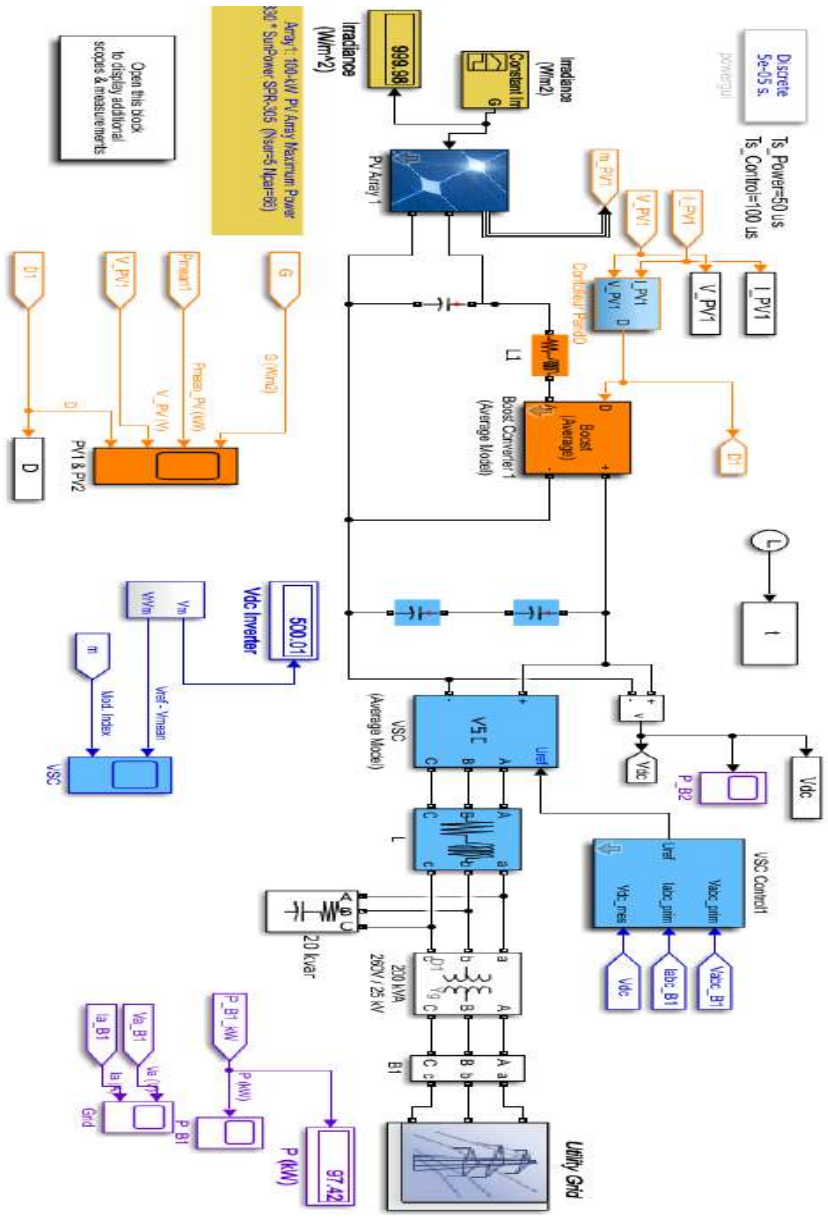


Figure IV. 1 *Un modèle utilitaire du réseau (25 kV d'alimentation de distribution + système de transmission équivalent de 120 kV).*

Dans le modèle, les convertisseurs Boost et l'onduleur sont représentés par des sources de tension équivalentes générant la tension en courant alternatif sur un cycle de fréquence de commutation technique " Perturbez et Observer ".

- ✓ Un onduleur de niveau triphasé (bloc bleu) convertit le 500 V CC à 260 V CA et maintient l'unité du facteur de puissance (cosα=1).
- ✓ 20 kvar d'harmonique produite par l'onduleur (filtrage par des condensateurs).
- ✓ 200 k_{VA}, 260V/25kV couplage de transformateur triphasé.
- ✓ Un modèle utilitaire du réseau (25 kV d'alimentation de distribution + système de transmission équivalent de 120 kV).

Dans le modèle, les convertisseurs Boost et l'onduleur sont représentés par des sources de tension équivalentes générant la tension en courant alternatif sur un cycle de fréquence de commutation.

IV.3.1 Le panneau solaire :

Nous avons utilisé les équations relatives aux panneaux solaires série [10]:

$$I = I_{ph} - I_{s1}\left[e^{\frac{q(V+I\,zR_S}{zn_1kT_{cK}}} - 1\right] - I_{s2}\left[e^{\frac{q(V+I\,zR_S}{zn_2kT_{ck}}} - 1\right] - \frac{V+I\,zR_S}{zR_S} \qquad \text{(IV.1)}$$

Où :

$$I_{ph}(T) = I_{ph}(\text{T=298})[1 + (T - 298K).5.10^{-4}] \qquad \text{(IV.2)}$$

I_{ph}(T=298)=3.25A

Avec :

$$I_{s1} = K_1T^3e^{\frac{Eg}{kT}}\ et\ I_{s1} = K_2T^{5/2}e^{\frac{Eg}{kT}} \qquad \text{(IV.3)}$$

$$K_1 = 1.2A/cm^2K^3\ et\ K_2 = 2.9.10^5A/cm^2K^{5/3} \qquad \text{(IV.4)}$$

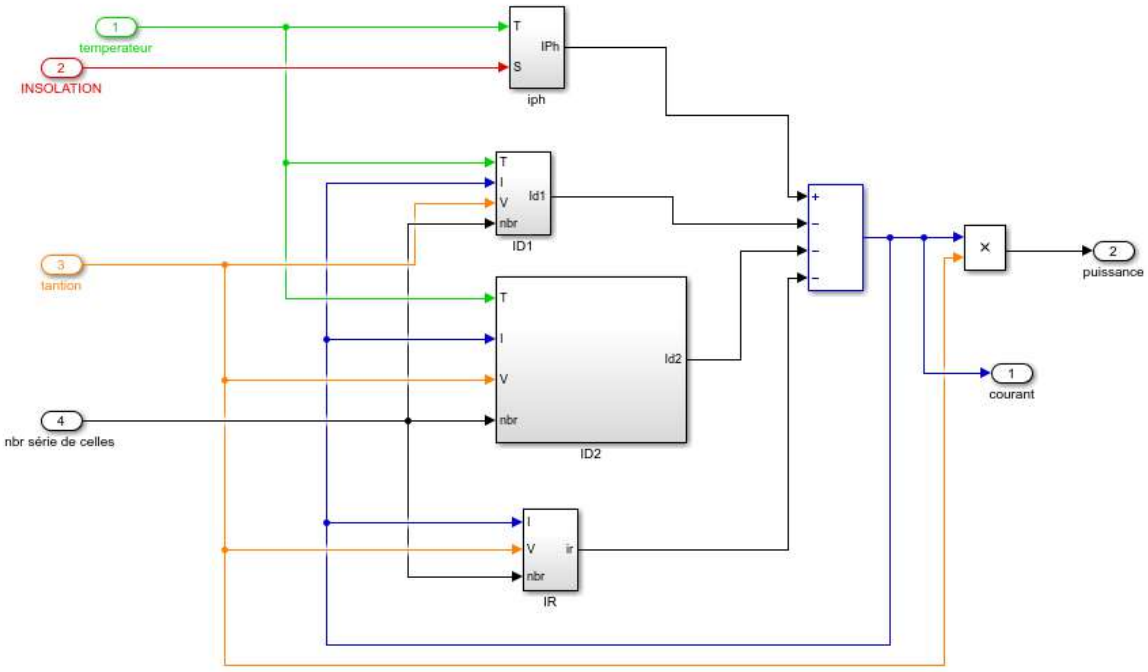


Figure IV. 2 *Schéma bloc de la simulation du panneau solaire avec 36 cellules sous 1000W/m^2 [10].*

IV.3.2 Le convertisseur dc-dc (Le hacheur) :

IV.3.2.1 Convertisseur Hacheur Boost :

Dans ce modèle, les convertisseurs élévateurs (blocs orange) augmente la tension continue de 273,5 V à 500V. ce convertisseur utilise un contrôleur MPPT qui fait automatiquement varier le rapport cyclique D=[0.48,0.5], afin de générer la tension nécessaire pour extraire la puissance maximale.

IV.3.2.2 Convertisseur Onduleur :

L'onduleur triphasé à trois niveaux (blocs bleus) régule la tension continue à 500 V et maintient l'unité du facteur de puissance (cos $\alpha=1$).

Le système de contrôle utilise deux boucles de régulation :

♦ Une boucle de commande externe qui régule la tension continue à +/- 250 V.et une boucle de contrôle interne qui régule les courants Id et Iq du réseau (les composantes active et réactive du courant).

♦ La référence du courant Id est la sortie du régulateur externe de courant continue (DC).la référence du courant I_q est fixée à zéro, afin de maintenir l'unité du facteur de puissance. Les sorties de tension V_d et V_q du régulateur de courant sont converties en 3 signaux de modulation Uref_abc utilisés par le générateur d'impulsions MLI (PWM) à trois niveaux. le

système de contrôle utilise un échantillon de 100 µs, pour les contrôleurs de tension et pour l'unité de synchronisation PLL.

IV.4 Commande du convertisseur DC/AC par régulateur PI :

Le schéma bloc réalisé sous Simulink est présenté sur la figure IV.3.il correspond au modèle du convertisseur DC/AC par régulateur PI :

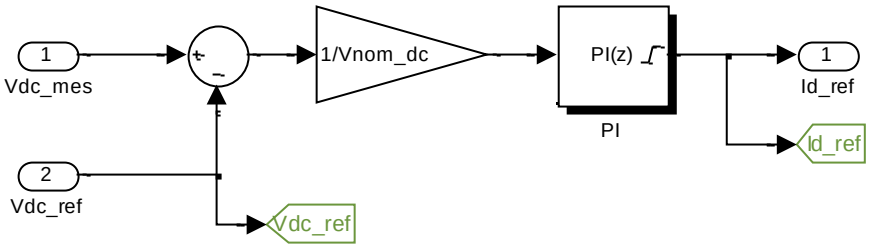


Figure IV. 3 *régulateur PI [10].*

IV.5 Commande du convertisseur DC/AC par régulateur flou :

le régulateur flou utilisé pour régler la tension de sortie du convertisseur est de type Mamdani il reçoit comme entrée l'erreur (E) et la variation de l'erreur (dE), a la sortie il délivre la variation de commande.

La commande génère par le régulateur est utilisé pour commander les interrupteurs du convertisseur de telle sorte à régler le niveau de la tension de sortie. Le schéma bloc de la structure de commande par régulateur floue d'un convertisseur statique (boost) est illustré par la figure IV.4 [44] :

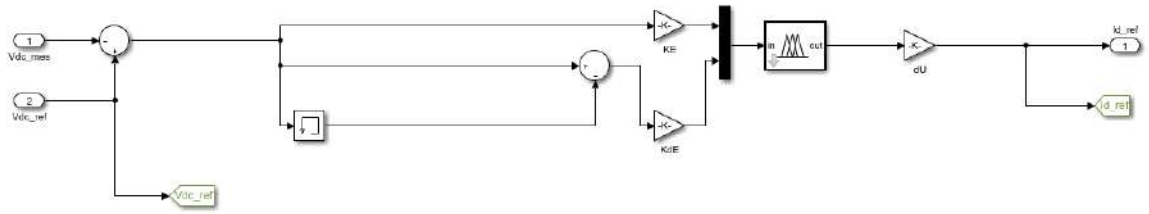


Figure IV. 4 *structure de commande par un contrôleur flou.*

IV.6 Analyse des résultats :

IV.6.1 Commande du convertisseur réglage de bus continu Vdc par régulateur PI (T=25 C^0& G=1000W/m^2) :

On exécute le modèle P and O pendant 1 secondes et on observe les séquences des événements sur les oscilloscopes.

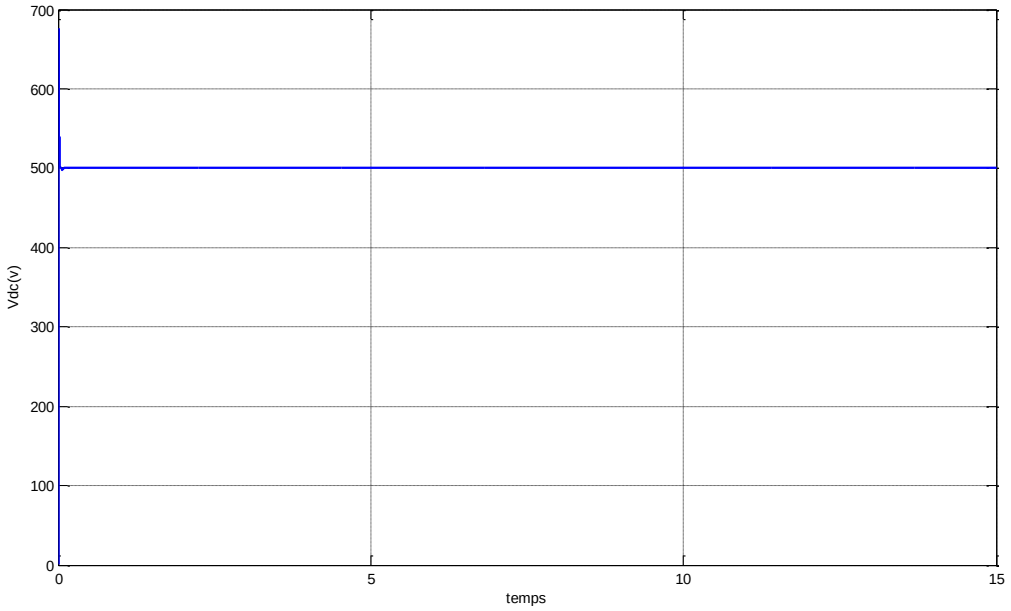
De t = 0 s à t = 0,05 s, les convertisseurs Boost et l'onduleur sont bloqués.

♦ La tension du G PV (SunPower - SPR305) [Annexe 3] correspond à la tension du circuit ouvert (Nser * Voc = 5 *64,2 =321 V, voir la courbe de la tension V sur l'oscilloscope du Boost).

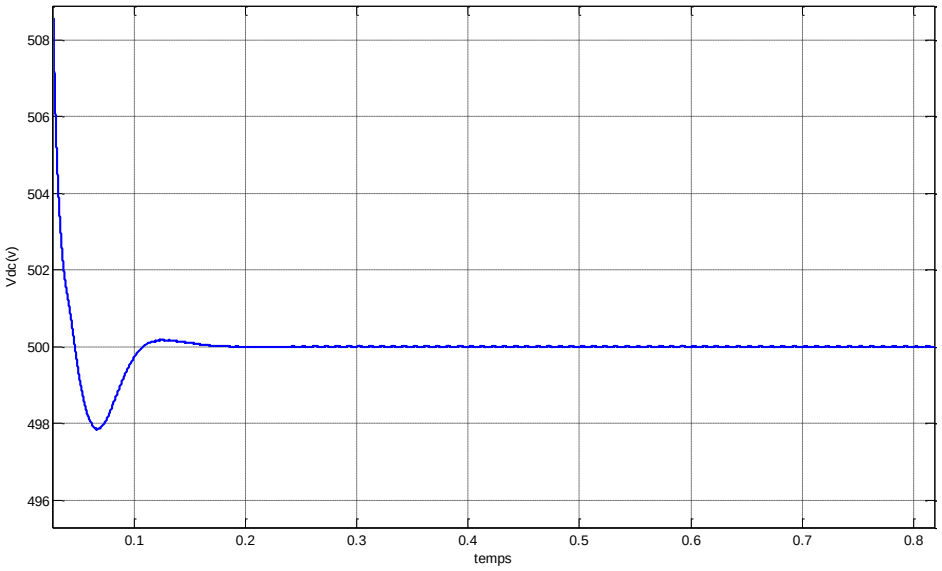
La figure IV.5 montre Les résultats de simulation du système photovoltaïque avec des régulateur PI et MPPT « Perturbation et observation » dans les conditions standards.

♦ A t = 0.05 s, les convertisseurs Boost et l'onduleur sont débloqués. La tension du court-circuit est régulée à Vcc = 500V. - Le rapport cyclique du convertisseur élévateur Boost est fixé (D = 0.5, comme indiqué sur l'oscilloscope du Boost) et les irradiations du soleil sont réglées à 1000 W / m2. L'état d'équilibre est atteint à t = 0.25s.

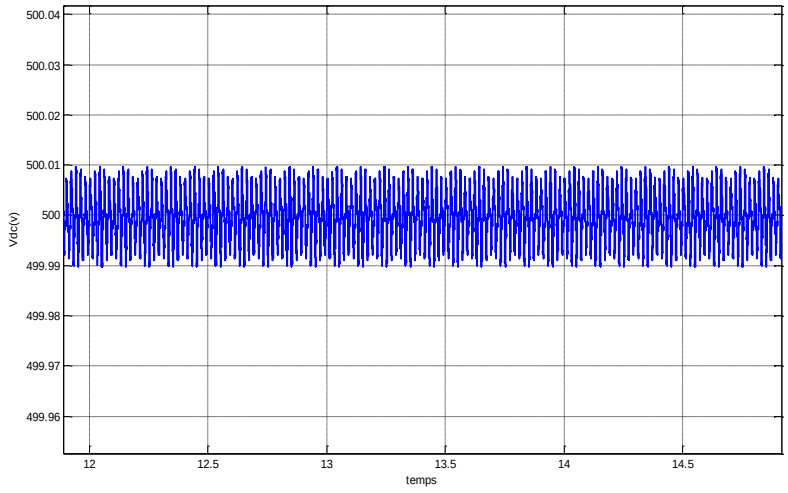
♦ La tension résultante du PV est donc V_PV = (1 - D) * Vcc = (1-0.5) * 500 = 250 V (voir la figure de la tension V sur l'oscilloscope du Boost).



(a) La tension Vdc.



(a) Zoom.



(b) Zoom.

Figure IV. 5 *La tension Vdc.*

IV.6.2 Commande du convertisseur et réglage de bus continu Vdc par logique floue :

Au cours de nos travaux de simulation nous avons été confronté aux problèmes de déterminations des gains de contrôleur flou de bus continu Vdc, pour cela on a trouvé ces valeurs par tâtonnement comme suit :

Tableau IV. 1 *tableau des gains trouvés.*

Gain	E	dE	Du
Valeur	0.1	0.1	0.0015

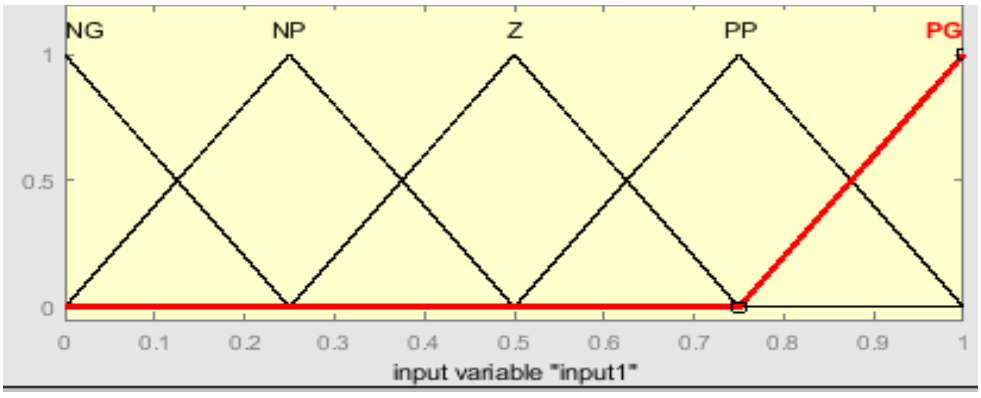
Nous présentons le tableau de règles floues :

Tableau IV. 2 : *tableau de règles floues.*

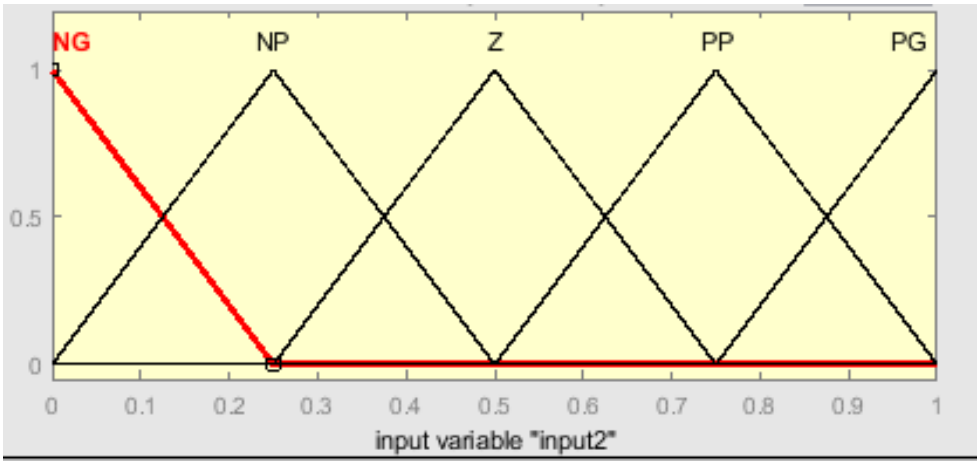
dE / E	NG	NP	Z	PP	PG
NG	PG	PG	PG	PP	Z
N	PG	PG	PP	Z	NP
Z	PG	PP	Z	Np	NG
P	PP	Z	NP	NG	NG
PG	Z	NP	NG	NG	NG

On utilise pour la commande Floue des fonctions d'appartenance triangulaire.

On va présenter les fonctions d'appartenances :



(a) Input E.



(b) Input dE.

Figure IV. 6 *Fonction d'appartenance des variables d'entrées.*

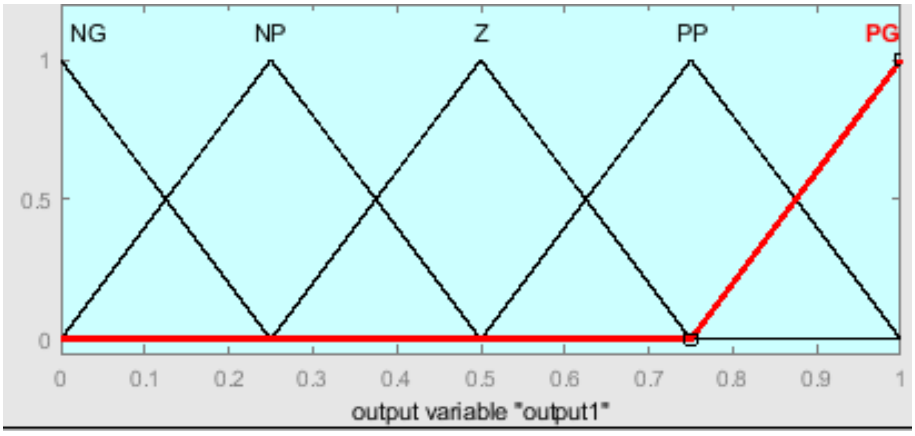
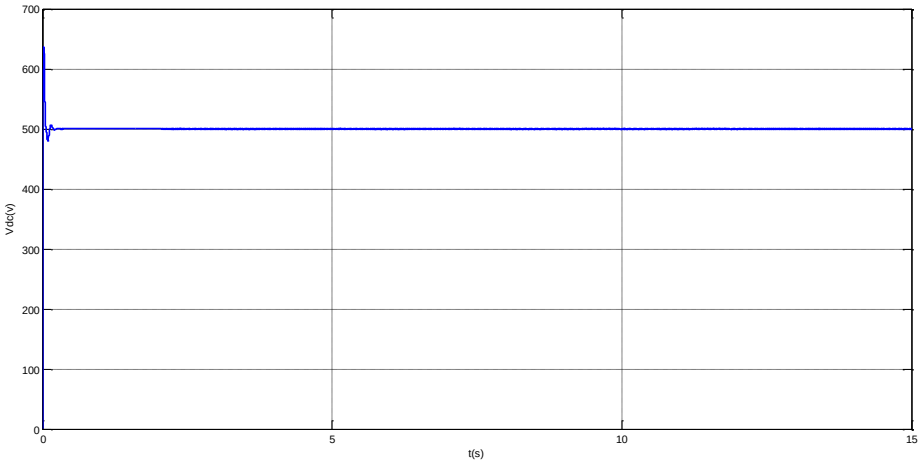


Figure IV. 7 *Fonction d'appartenance de la variable de sortie (dU).*

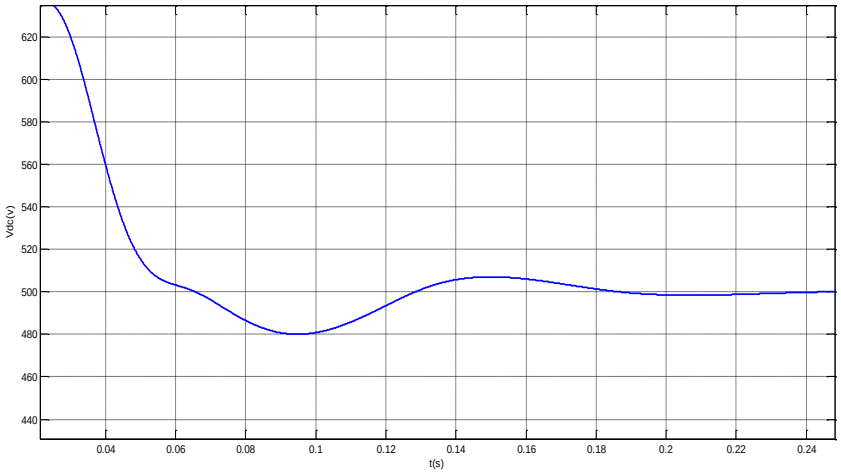
IV.6.2.1 Résultat de simulation (T=250 C & G=1000W/m2) :

Le résultat de simulation du système photovoltaïque adapté par par le régulateur «logique floue» représentent par

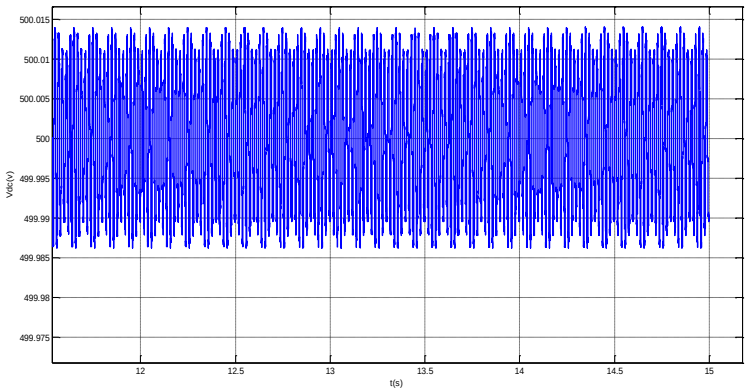
La figure suivante :



(a) La tension Vdc.



(a)Zoom.



(b) Zoom.

Figure IV. 8 *La tension Vdc.*

IV.6.3 Commande du convertisseur réglage de bus continu Vdc par logique floue optimisé :

Les difficultés rencontrées dans la conception des contrôleurs flous (CF), ont guidé les chercheurs à s'orienter vers l'optimisation de ces contrôleurs. On rencontre souvent, dans la littérature, trois stratégies d'optimisations pour la conception des CF :

1. Les fonctions d'appartenance sont fixées et les règles floues sont optimisées.

2. Les règles floues sont bien définies et Les fonctions d'appartenance associées aux variables d'entrées et de sorties sont optimisées.

3. Les fonctions d'appartenance et les règles floues associées sont optimisées simultanément.

Dans ce qui suit, on s'intéresse à la deuxième stratégie ou on applique PSO pour concevoir le meilleur CLF pour la commande de tension Vdc [50].

Pour cette simulation nous avons utilisé le critère d'erreur individuel, ce choix a été fait dans le but d'améliorer le temps de réponse et de réduire les fluctuations comme le montre les équations (IV.5) et ou « J» représente la fonction de Fitness [51].

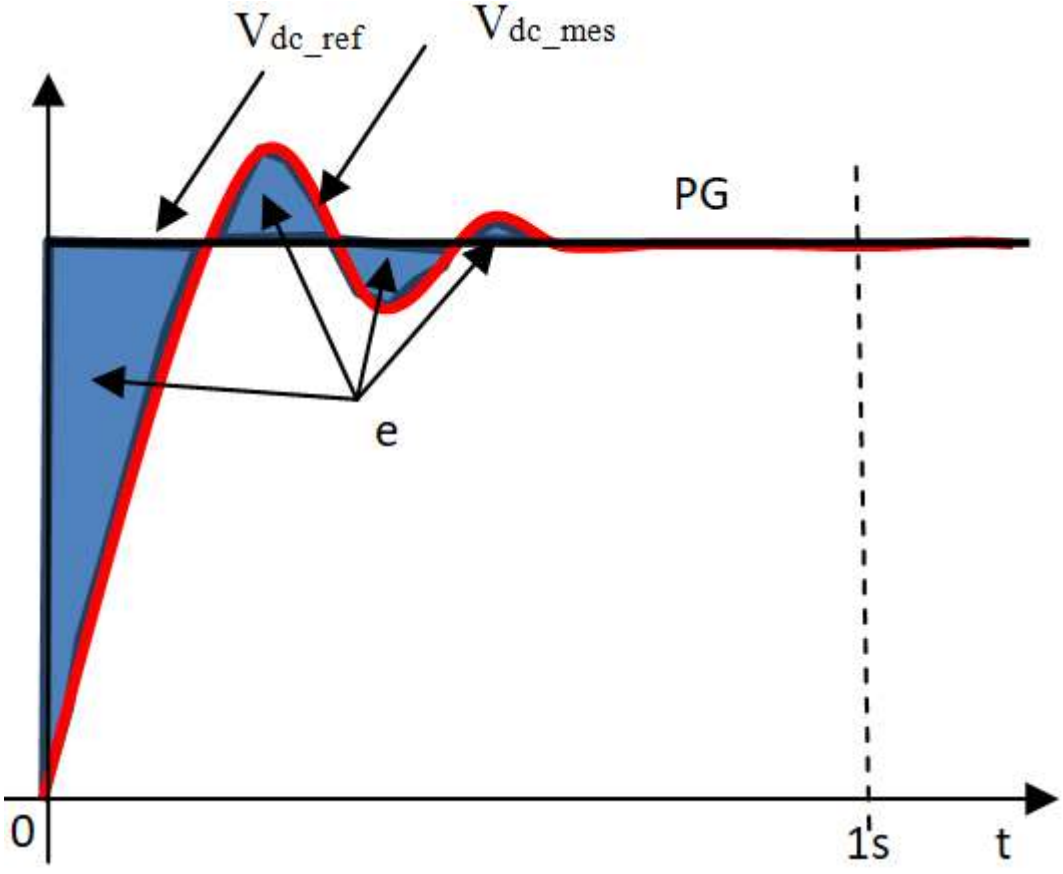


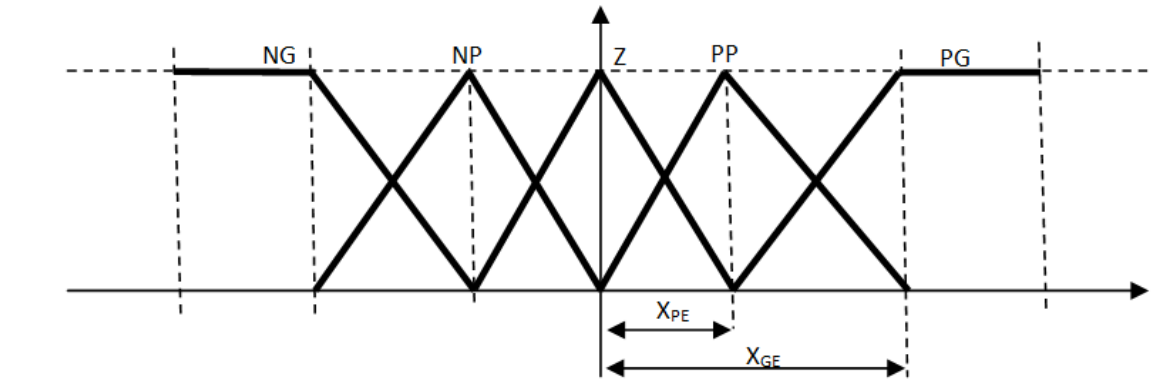
Figure IV. 9 présentation de Fitness.

$$J = \int_0^1 e(t)dt \quad \text{(IV.5)}$$

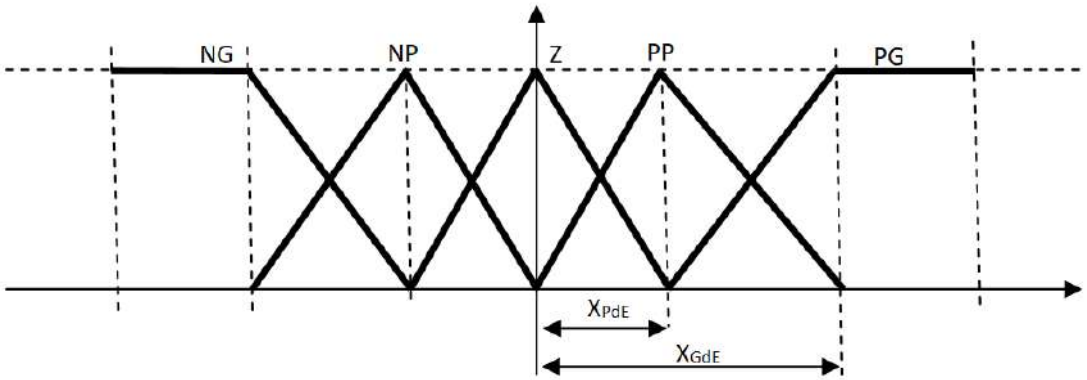
Avec :

$$e = V_{mes} - V_{ref} \quad \text{(IV.6)}$$

IV.6.3.1 Les contraintes et les variables:



(a)Input E.



(b)Input dE.

Figure IV. 10 Fonction d'appartenance des variables d'entrées.

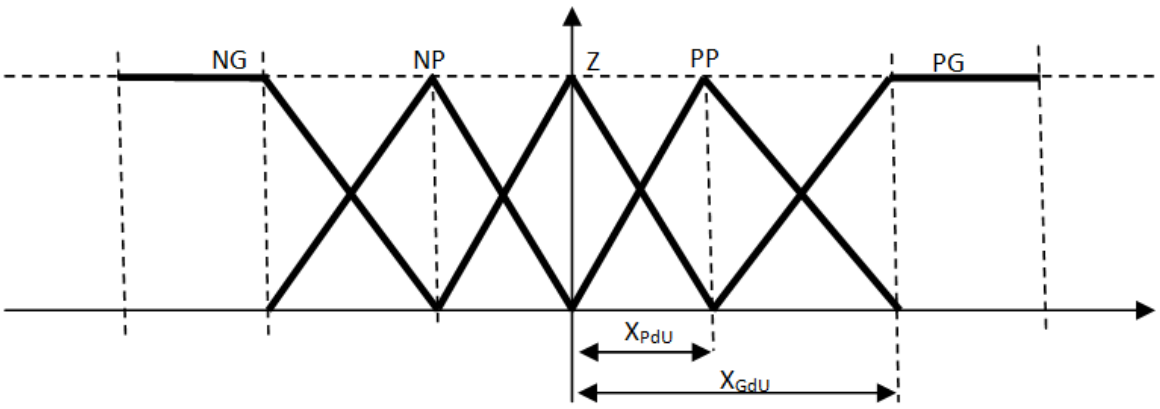


Figure IV. 11 *Fonction d'appartenance de la variable de sortie (dU).*

La simulation de contrôleur flou optimisé par essaim (PSO) a permet d'avoir les variables suivants :

Tableau IV. 3 : *variables obtenus.*

Populations	6
Itérations	250
Meilleurs variables	X_pE=0.0501 X_GE = 0.4597 X_pdE =0.0102 X_GdE =0.0103 X_pdU =0.8206 X_GdU =1.0000

- Le déplacement de chaque particule dans l'espace de recherche, est basé sur sa position actuelle et la mise à jour de sa vitesse, La meilleure valeur évaluée de pbest est placée à gbest, et pour atteindre l'optimum global, on prend une taille de la population qui est égale à 6 individus.

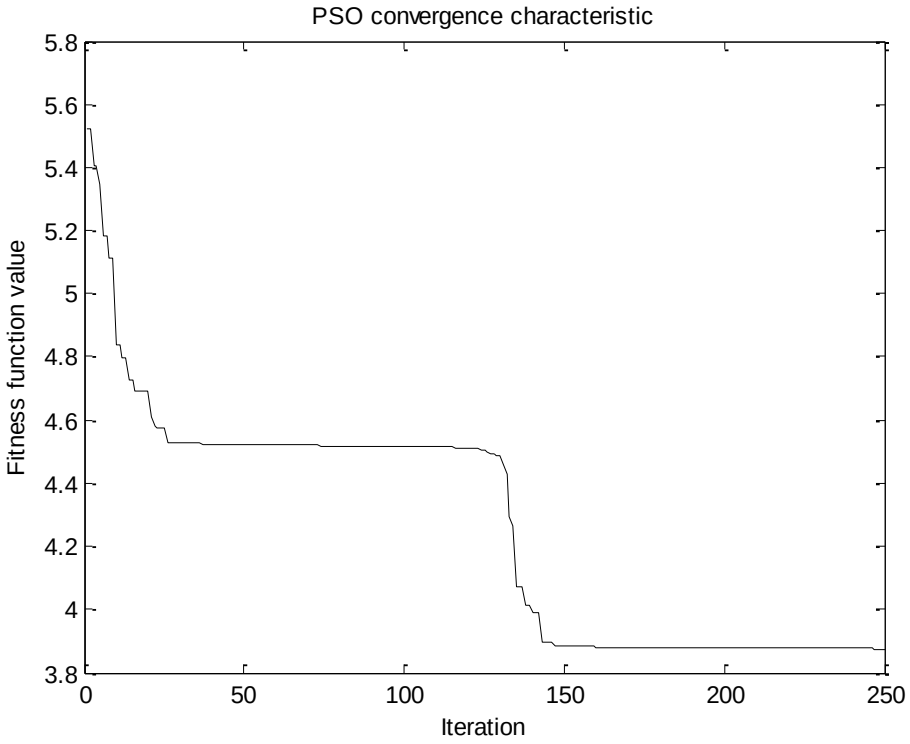
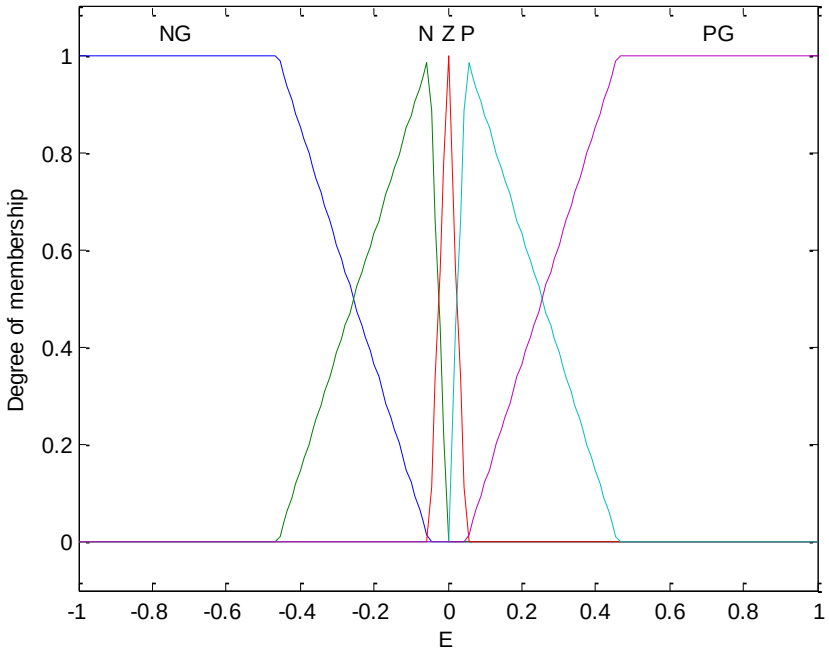


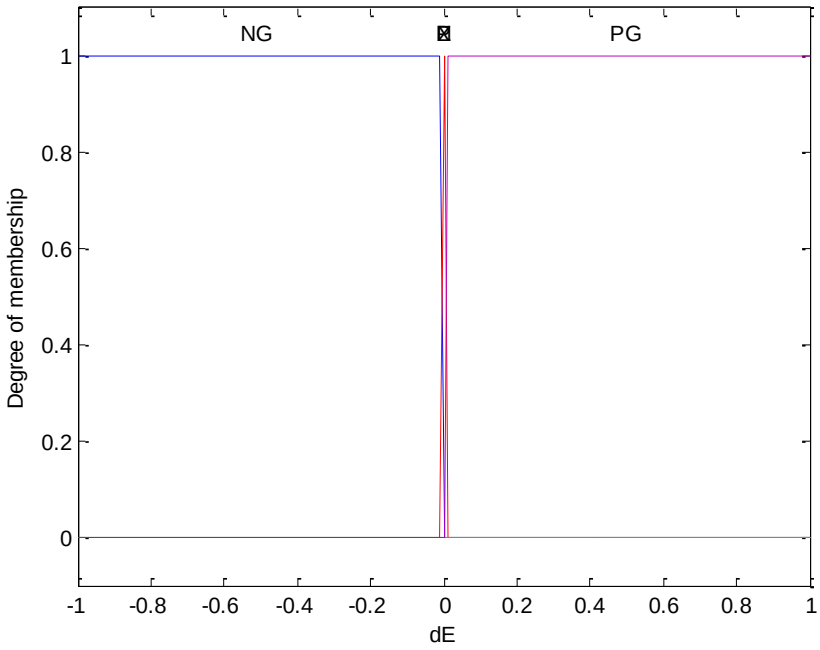
Figure IV. 12 *Variation de la fonction objective.*

La variation de la valeur minimale de la fonction objective (fitness) en fonction du nombre de l'itération est donnée par la Figure (IV.9). Nous remarquons que la valeur minimale a convergé progressivement vers une solution optimale représentée par le meilleur individu de la population de la dernière population. Cet individu donne les valeurs des paramètres recherchés.

La solution optimale obtenue après 250 itérations donne les formes des fonctions d'appartenance illustrées dans la figure (IV.10) au dessous :



(a) Input E



(b) Input dE.

Figure IV. 9 *Fonction d'appartenance optimisée des variables d'entrées.*

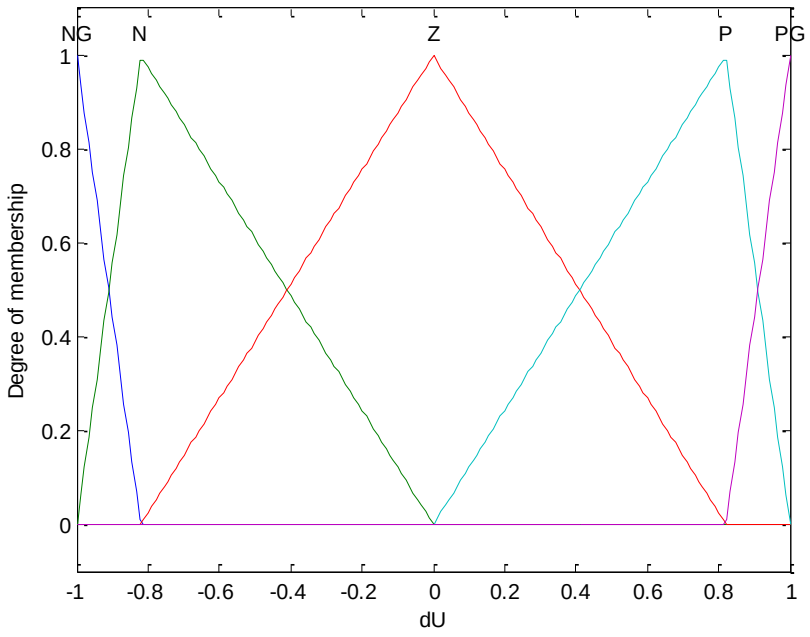
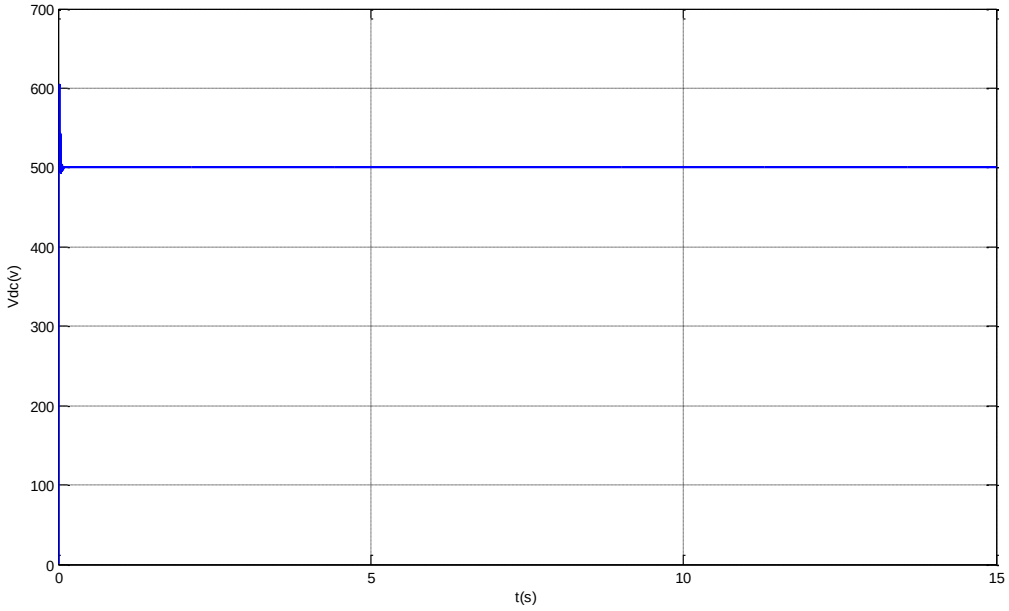
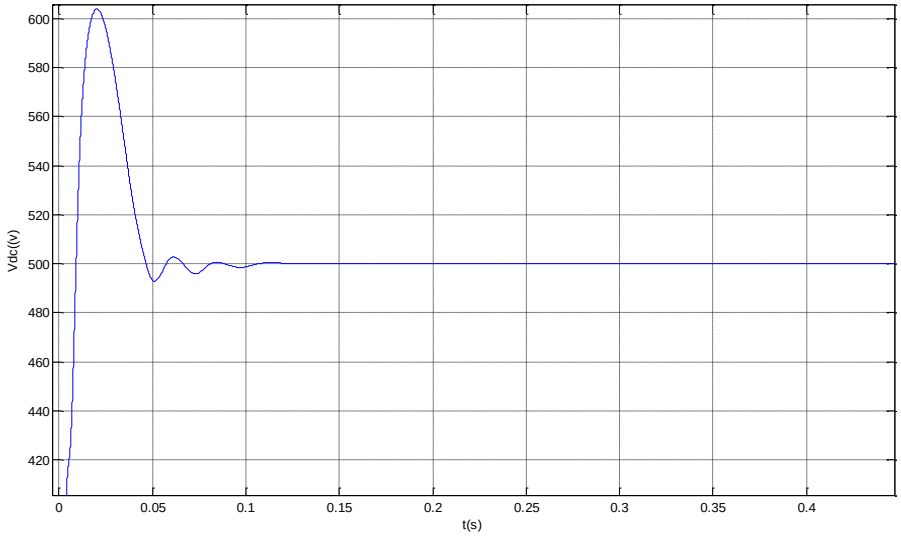


Figure IV.14 *Fonction d'appartenance optimisée de la variable de sortie output1 (dU).*

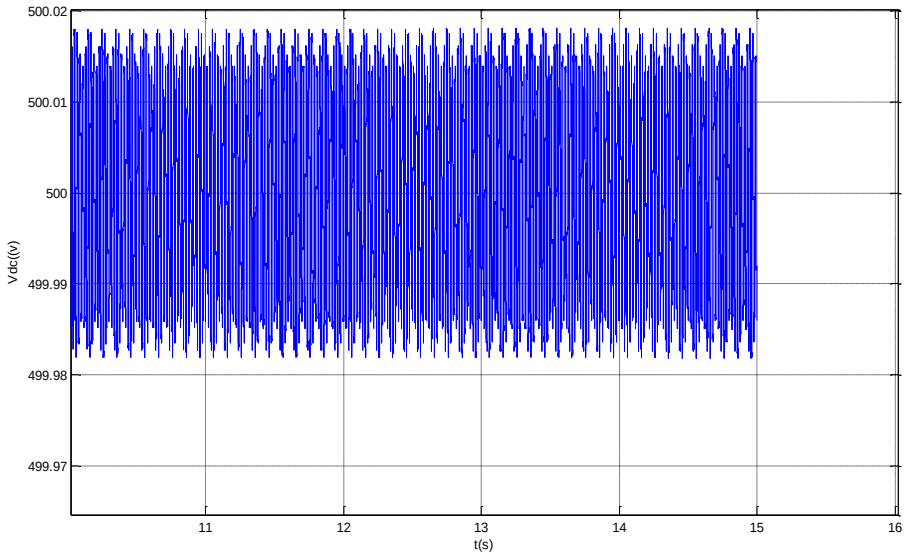
La figure suivante représente le résultat de simulation par le Contrôleur flou optimisé lors du fonctionnement:



(a) La tension Vdc.



Zoom(a)



(b) zoom.

Figure IV. 15 *La tension Vdc.*

IV.7 Etude comparative entre les trois contrôleurs dans les conditions standard (T=25°C et G=1000 w/m2) :

On fait la comparaison entre les trois contrôleurs au niveau de la tension de sortie Vdc par le système PV avec une irradiation G et de température T stable.

-Pour la stabilité de l'irradiation et la température, on remarque que la méthode P&O poursuivre le PPM avec une réponse lente, par contre, l'autre contrôleur se fonctionne bien (figures (IV.5) (IV.8) (IV.12)).

-Les figures (IV.5) (IV.8) (IV.12) montrent la réponse des différents contrôleurs utilisés. Les figures qu'ils montrent la différence entre la rapidité et robustesse des contrôleurs. Le contrôleur flou optimisé est plus rapide que le contrôleur flou simple, qui lui-même a prouvé une bonne rapidité par rapport le contrôleur PI.

IV.8 les résultats obtenus de simulation raccordée au réseau :

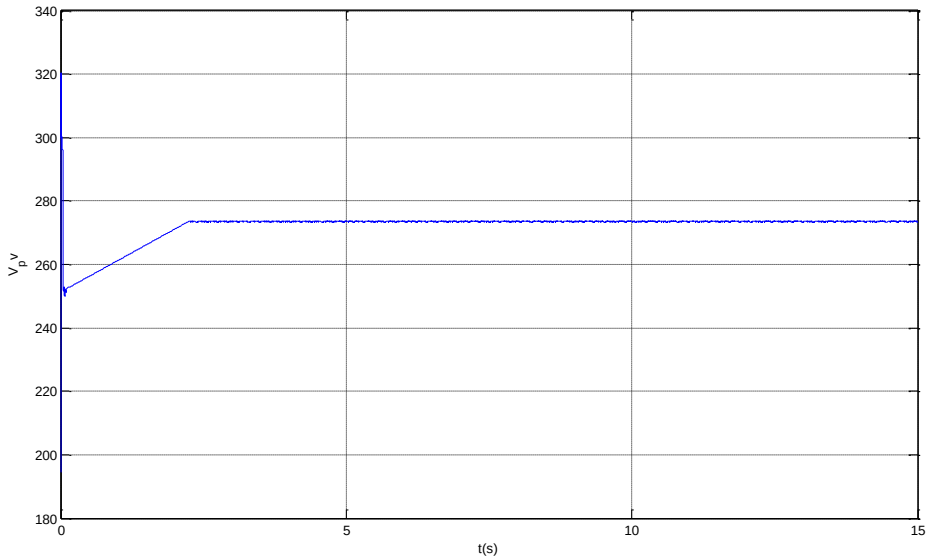


Figure IV. 10 *la tension Vpv.*

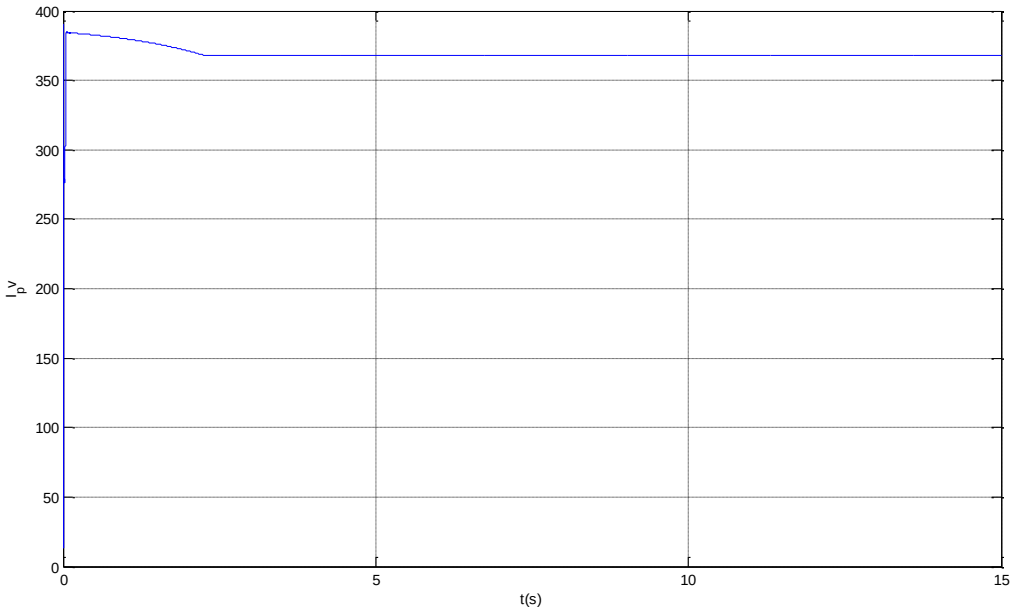


Figure IV. 17 *le courant Ipv.*

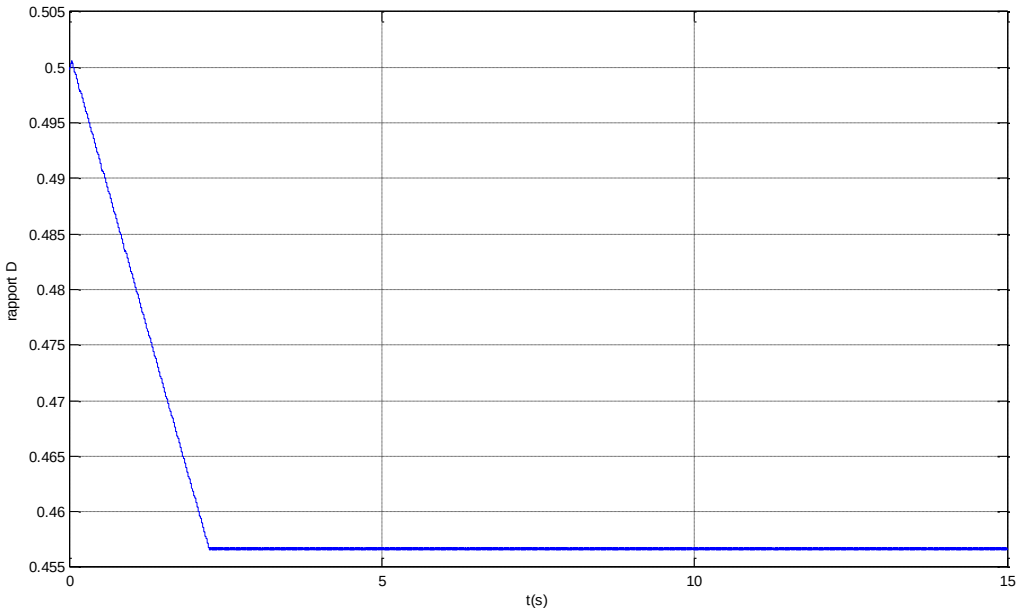


Figure IV. 11 *la commande D.*

IV.10. Conclusion :

Les simulations effectuées au sein de ce chapitre, ont une dimension purement pratique, car la seule manière d'évaluer la performance d'un contrôleur numérique avant d'établir un prototype réel est d'effectuer d'abord une simulation. On a vu dans ce chapitre dans le détail la simulation de trois types de contrôleurs combiné avec un hacheur Boost :

- Un contrôleur PI.
- Un contrôleur flou FL
- Un contrôleur flou optimisé par les essaimes particulaires(PSOFL).

Dans un premier temps, nous avons comparé les résultats de simulations obtenus par les trois contrôleurs,

Après la comparaison, Nous avons observé à travers des résultats obtenus que le contrôleur flou optimisé soit celui qui est le plus performant et le plus robuste .Puis, le contrôleur flou original et le contrôleur PI.

Conclusion générale :

Dans ce travail, nous avons un but de réguler la tension de sortie Vdc.

La première partie, nous avons étudié le principe des systèmes photovoltaïques où on a présenté le modèle des différents éléments qui le constituent (module, générateur, …..).

La deuxième partie, nous avons brièvement présenté les différentes configurations des convertisseurs DC/DC.

La troisième partie, nous avons brièvement présenté la technique d'optimisation, un algorithme d'optimisation (PSO) appliqués à un contrôleur floue pour trouver les meilleures fonctions d'appartenances, comme une parmi les solutions qui permettent de régler la tension de sortie Vdc.

La nouvelle solution de commande qui nous proposons (PSOFL), ont été testées pour montrer leurs efficacités. Les résultats de simulation à l'aide du logiciel Matlab de l'ensemble du système photovoltaïque en utilisant un convertisseur (Boost) montrent que les deux approches ont donné les meilleures performances du point de vue stabilité et de rapidité mais l'approche floue a montré aussi qu'elle a des bonnes performances par rapport la méthode P&O.

Les résultats obtenus lors de notre travail encouragent la poursuite des recherches dans ce sens. Nous pouvons également envisager de les améliorer. Il serait également intéressant de voir l'effet de l'utilisation d'autres architectures hybrides (éolienne-photovoltaïque) ainsi que d'autres algorithmes hybrides (PSO-AG)

[1] R. Chenni, ‘’Etude technico-économique d’un système de pompage photovoltaïque dans un village solaire’’, Thèse de doctorat, Université Mentouri de Constantine, février 2007.

[2] M.Angel Cid Pastor, ‘’Conception et réalisation de modules photovoltaïques électroniques’’, Thèse de doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse, septembre 2006.

[3] http://www.photovoltaique.info/-De-la-lumiere-a-l-electricite-.html. Consulter le 23/02/2020.

[4] C. Cédric, ’’Optimisation énergétique de l’étage d’adaptation électronique dédié a la conversion photovoltaïque’’. Thèse de doctorat, Université de Toulouse, 2008.

[5] V. Stéphane, ‘’ Systèmes photovoltaïques raccordés au réseau : Choix et dimensionnement des étages de conversion’’, Thèse de doctorat, Université Grenoble, Institut polytechnique de Grenoble, 2010.

[6] https://lenergie-solaire.net/definitions/lumiere-du-soleil.html. Consulter le 28/02/2020.

[7] https://d2gg9evh47fn9z.cloudfront.net/800px_COLOURBOX2835324.jpg.

Citer le 03/03/2020.

[8] http://phys.iit.edu/~segre/phys100/science_2009_324_891.pdf. Consulter le 03/03/2020.

[9] https://mobile.agoravox.tv/local/cache-vignettes/L600xH345/puiajpg-e275e275-9724a.jpg. Consulter le 12/03/2020.

[10] Morsli Abdelkader, “Etude d'un système solaire photovoltaïque utilisant des super condensateurs“, Mémoire de Magister, Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, Algérie. 2010

[11] M. PETIBON Stéphane, “Nouvelles architectures distribuées de gestion et de conversion de l’énergie pour les applications photovoltaïques“, Mémoire Doctorat, Université Toulouse III, Le 20 Janvier 2009.

[12] https://www.memoireonline.com/02/11/4239/m_Production -de-lenergiephotovoltaique--la-societe-Nova-Diffusion12.html. Consulter le 20/03/2020.

[13] B.Youcef, AIT MAHDI M. Amine, “Modélisation et Simulation D’un Système Photovoltaïque“, thèse de doctorat, Université Kasdi MERBAH OUARGLA ,2016-2017.

[14] https://lenergie-solaire.net/energie-solaire-photovoltaique/panneauphotovoltaïque. Consulter le 22/03/2020.

[15] A.Mohammed Saleh, “ Optimisation de la production d’un générateur photovoltaïque“, Mémoire Master, Université Kasdi MERBAH OUARGLA, 09/06/2015.

[16] https://lenergie-solaire.net/avantages-inconvenients Consulter le 23/03/2020.

[17] B. Faiza, ‘‘étude et simulation d’une commande MPPT pour système PV’’, Diplôme Master, Université Mohamed Boudiaf - M’sila, 2015 – 2016.

[18] http://deltavolt.pe/energia-renovable/energia-solar/paneles-solares. Consulter le 23/03/2020.

[19] REYNAUD. Jean-François, ‘‘Recherches d’optimums d’énergies pour charge/décharge d'une batterie à technologie avancée dédiée à des applications photovoltaïques’’, Thèse Doctorat, Université Toulouse III, 4 Janvier 2011.

[20] R. Issad, “ Etude de contrôle direct du couple de la machine asynchrone alimentée par un générateur photovoltaïque,“ Mémoire de Magister, Université de Bejaia, 2007-2008.

[21] http://www.photovoltaique.info/-Modules-photovoltaiques,82-.html. Consulter le 28/03/2020.

[22] M.Blhadj, “modélisation d’un système de captage photovoltaïque autonome“, mémoire de magister, universitaire de Bechar ,2007-2008.

[23] M. Adouane, “étude et conception d’une stratégie de commande d’un onduleur connecté au réseau électrique“, mémoire de magistère, école nationale polytechnique, Alger, Algérie, 2008.

[24] M. Adouane, “Etude et conception d’une stratégie de commande d’un onduleur connecté au réseau électrique“, Mémoire de magistère, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, Algérie, 2008.

[25] M.S. Amamra, “ Optimisation de la production d’un générateur Photovoltaïque “, thèse master, université de Ouargla 2015.

[26] BELKAID ABDELHAKIM, “ Conception et implémentation d’une commande MPPT de haute performance pour une chaine de conversion photovoltaïque autonome“, DOCTORAT EN SCIENCES, Option: Electrotechnique, UNIVERSITE FERHAT ABBAS - SETIF 1 ,2015.

[27] N. Abouchabana, “Etude d’une nouvelle topologie buck-boost appliquée à un MPPT “, Mémoire de Magistère, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, 2009.

[28] P. Sahebrao N, R. C. Prasad, “design and simulation of MPPT algorithm for solar energy system using simulink model“, international journal of research in engineering and applied sciences (IJREAS), ISSN : 2249-9210, Vol.02, Issue.01.

[29] T.T. Guingane, Z. Koalaga, E. Simonguy, F. Zougmore, D. Bonkoungou, “modélisation et simulation d’un champ photovoltaïque utilisant un convertisseur élévateur de tension (boost) avec le logiciel matlab/simulink“, journal international de technologie, de l’innovation, de la physique, de l’énergie et de l’environnement, vol. 2, n°1, 1, 2016.

[30] Djellab Badreddine, " Etude et Modélisation des convertisseurs DC/DC pour un système pile à combustible", mémoire de master Université Mohamed Khider Biskra, 2013.

[31] C. CABAL, " Optimisation Energétique de l'Etage d'Adaptation Electronique Dédie à la Conversion Photovoltaïque", Thèse de Doctorat, Université Paul Sabatier, Toulouse III, France, 2008

[32] S. A. TADJER, "Etude d'un Système de Compensation d'Harmonique En Utilisant un Générateur Photovoltaïque",Mémoire de Magister, Université Mouhamed Bougara-Boumerdes, Algérie, 2008.

[33] https://www.memoireonline.com/02/11/4239/m_Production -de-lenergiephotovoltaique--la-societe-Nova-Diffusion12.html. .Consulter le 08/04/2020

[34] MECHOUMA RABIAA, "Contribution à l'étude des onduleurs dans les systèmes photovoltaïques : Application pour les charges commerciales", Thèse de doctorat d'université hadj Lakhdar –Batna, Mars 2015.

[35] ONDULEURS Structures et principes de base. CI22 Machines alternatives et leur contrôle, 2012.

[36] Saou Souhila "Etude et réalisation d'un onduleur solaire sinusoïdal", Diplôme de Master, Université Larbi Ben M'Hidi - Oum El Bouaghi ,2016.

[37] M. BOUKLI-HACEN Omar, "Conception et réalisation d'un générateur photovoltaïque muni d'un convertisseur MPPT pour une meilleure gestion énergétique", Thèse de Magister, Université de Tlemcen, 2011.

[38] [38] F.Hamidia, " contribution à la neuro-flou de machine électrique ", thèse doctorat de L'ENP, université Dr Yahia Fares de Médéa, 2013.

[39] **S**.Issdi, "commande d'une poursuite du point de puissance maximum MPPT par réseaux de neurones ", magister en electricité solaire, université Bejaia, 2006.

[40] Ayat Rahma, "utilisation des techniques intelligentes (PSO/GA) en vue de la supervision d'une installation de production d'énergie renouvelable",.magister automatique, université farhat abbes-sétif-1 UFAS,2014.

[41] https://www.emse.fr/~brodhag/TRAITEME/fich13_2.htm. Consulter le 01/05/2020.

[42] Toumi, "Restauration adaptative d'image par les methodes intelligentes", Thèse de doctorat, Université de Biskra, 5 février 2013.

[43] EUDES et RIOLAND, "Optimisation par essaim particulaire pour un problème d'ordonnancement et d'affectation de ressources", thèse de doctorat, 2007.

[44] K .guesmi,M essonbouli and A. Hamzaoui, " DC/DC power converter" ,Modeling et control 4th international conference on electrical Engenering ,07-08 November 2006.

[45] Kennedy J. & Eberhart R.C, Swarm Intelligence, Morgan Kaufman Publishers, Academic Press, 2001.

[46] Eldor, "Perfectionnement des algorithmes d'Optimisation par Essaim Particulaire. Applications en segmentation d'images et en électronique", Thèse de doctorat, Université de Paris EST, 15 décembre 2012.

[47] L. Benameur, " Contribution à l'optimisation complexe par des techniques de swarm intelligence ", Thèse de doctorat, Faculté des Sciences de Rabat, 13 mai 2010.

[48] A.f Filipov, Differential equation with discontinuous right-hand side .Amer.Mat Soc, Trans62p: 199-231, 1960.

[49] https://www.mathworks.com/help/matlab/ref/rand.html. Consulter le 15/05/2020.

[50] H-K Tran, J-ShianChiou, S-Tao Peng, " Design Genetic Algorithm Optimization Education Software based Fuzzy Controller for a Tricopter Fly Path Planning ", Eurasia Journal of Mathematics, Science & Technology Education, 2016,12(5) ,1303-1312 doi: 10.12973/eurasia 1514a, VIETNAM, TAIWAN, 2016.

[51] M. T .MESSAOUDI, " Simulation d'un système photovoltaïque autonome régulé par logique floue ", Mémoire de Master, UNIVERSITE KASDI MERBAH, OUARGLA, Algérie. 2015.

A.1 Data sheet SunPower - SPR305 :

SUNPOWER

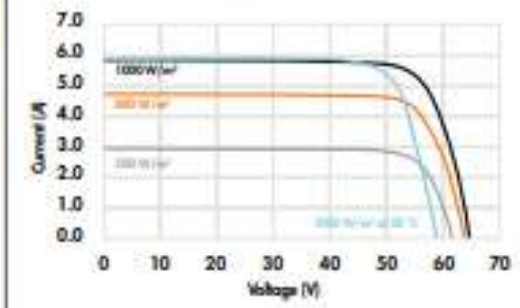
305 SOLAR PANEL

EXCEPTIONAL EFFICIENCY AND PERFORMANCE

Electrical Data

Peak Power (+/-5%)	Pmax	305 W
Rated Voltage	Vmp	54.7 V
Rated Current	Imp	5.58 A
Open Circuit Voltage	Voc	64.2 V
Short Circuit Current	Isc	5.96 A
Maximum System Voltage	IEC, UL	1000 V, 600 V
Temperature Coefficients		
	Power	-0.38% / °C
	Voltage (Voc)	-176.6 mV/°C
	Current (Isc)	3.5 mA/°C
Series Fuse Rating		15 A
Peak Power per Unit Area		187 W/m², 17.4 W/ft²
CEC PTC Rating		282.1 W

IV Curve



Tested Operating Conditions

Temperature	-40° C to +85° C (-40° F to +185° F)
Max load	50 psf (2400 Pascals) front and back
Impact Resistance	Hail - 25mm (1 in) at 23 m/s (52 mph)

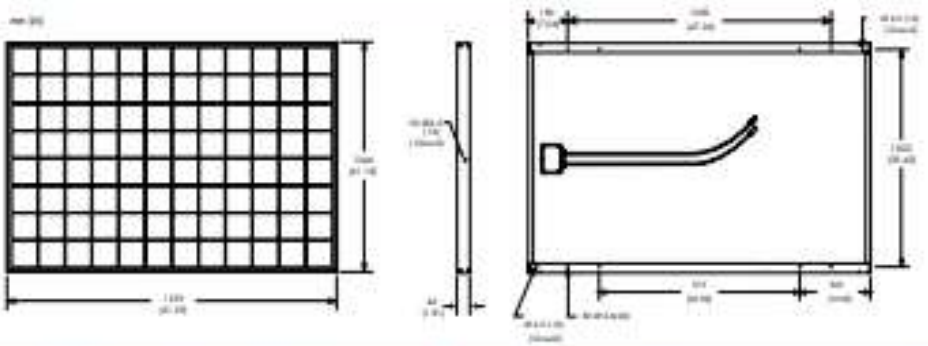
Mechanical Data

Solar Cells	96 SunPower all-back contact monocrystalline
Front Glass	4.0 mm (5/32 in) tempered
Junction Box	IP-65 rated with 3 bypass diodes
Output Cables	900 mm length cables / Multi-Contact connectors
Frame	Clear anodized aluminum alloy type 6063
Weight	24 kg, 53 lbs

Warranty and Certifications

Warranty	25 year limited power warranty
	10 year limited product warranty
Certifications	IEC 61215, Safety tested IEC 61730;
	UL listed (UL 1703); Class C Fire Rating

Dimensions



CAUTION: READ SAFETY AND INSTALLATION INSTRUCTIONS BEFORE USING THE PRODUCT.

About SunPower

SunPower designs, manufactures and delivers high-performance solar electric technology worldwide. Our high-efficiency solar cells generate up to 50 percent more power than conventional solar cells. Our high-performance solar panels, roof tiles and trackers deliver significantly more energy than competing systems.

© October 2007 SunPower Corporation. All rights reserved. Specifications included in this datasheet are subject to change without notice.

Printed on recycled paper

www.sunpowercorp.com

SUNPOWER

BENEFITS

Highest Efficiency
Panel efficiency of 18.7% is higher than any commercially available competitor panel

More Power
SunPower 305 delivers 50% more power per unit area than conventional solar panels and 100% more than thin film solar panels

Reduces Installation Cost
More power per panel means fewer panels per install. This saves both time and money

Reliable and Robust Design
Proven materials, tempered front glass, and a sturdy anodized frame allow panel to operate reliably in multiple mounting configurations



SPR-305-WHT

305 SOLAR PANEL

EXCEPTIONAL EFFICIENCY AND PERFORMANCE



The SunPower 305 Solar Panel provides today's highest efficiency and performance. Utilizing 96 next generation SunPower all-back contact solar cells, the SunPower 305 delivers an unprecedented total panel conversion efficiency of 18.7%. The 305 panel's reduced voltage-temperature coefficient and exceptional low-light performance attributes provide outstanding energy delivery per peak power watt.

SunPower's High Efficiency Advantage - Up to Twice the Power

Comparable systems covering 1000 m² / 10,750 ft²			
	Thin Film	Conventional	SunPower
Watts / Panel	65	165	305
Efficiency	9.0%	12.0%	18.7%
kWs	90	120	187