الجمهوريـــــــــــة الجزائريـــــــــة الشعبيـــــــــة الديمقراطيـــــــة

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE ET DE LA TECHNOLOGIE



UNIVERSITE YAHIA FARES DE MEDEA
FACULTE DE LA TECHNOLOGIE
Département du Génie Électrique

MÉMOIRE DE FIN D'ETUDES

En vue de l'obtention de diplôme
Master en **G**énie **É**lectrique
Spécialité : **Energie Solaire et Éolienne**

THEME :

POURSUITE DU POINT DE PUISSANCE MAXIMALE (MPPT) D'UN SYSTEME PHOTOVOLTAÏQUE PAR UN CONTROLEUR FLOU TYPE 2 T2FLC.

Proposés et dirigés par:

Dr. OULD CHERCHALI. N

Dr. MORSLI. A

Préparés et présentés par:

Mr. FEKROUN Sidahmed

Mr. OTMANINE Omar

Année universitaire : 2016/2017

الملخص:

إن الحاجة الى الطاقة الكهربائية في المناطق النائية تتزايد مما يدفعنا إلى التفكير في استغلال الطاقات المتجددة من بينها الطاقة الشمسية لأن استخدامها يعتمد اساسا على الظروف المناخية.

تهتم هذه الأطروحة بدراسة سلسله تحويل الخلايا الكهروضوئية المخصصة نحو الحمل. و تركز كذلك على تحسين أداء كفاءة و مردودية نظام تحويل الطاقة الشمسية بتاثير الخلايا الكهروضوئية الضوئية من خلال استخدام خوارزمية مناسبة للتحكم وسيطرة على واجهة تدفق الطاقة. الهدف الرئيسي من هذا العمل هو العثور على خوارزمية أو نظام مراقبة الامثل والفعال لاستخراج الاستطاعة القصوى المتاحة من المولد الضوئي.

ولهذا الغرض اقترحنا تطبيق التحكم باستعمال المنطق الضبابي ذو النمط 1 و 2 لمتابعة نقطة الاستطاعة القصوى، مما اظهر كفاءة وقوة هذا التحكم بالمقارنة مع أنواع التحكم الكلاسكية المقترحة و ذلك في ما يخص السرعة الاستجابة وتقلل الاضطرابات وهذا بسبب تغير المناخ و كذا خصائص النظام. نتائج المحاكاة المتحصل عليها تمت بواسطة Simulink/Matlab الذي دل علي المراقبة في السير الديناميكي للنظام الكهروضوئي.

الكلمات المفتاحية : MPPT، نظام الكهروضوئي (GPV)، المنطق الضبابي ذو النمط 1و 2، P&O

Résumé

Le besoin en énergie dans les sites isolés augmente sans cesse. Alors pour répondre à ce besoin, la solution du développement de la chaîne de conversion photovoltaïque performante est d'actualité. Toutefois, l'utilisation de l'énergie solaire dépend amplement des conditions atmosphériques.

Ce mémoire concerne une étude sur les performances d'une chaine de conversion photovoltaïque destinée à la charge. Elle est centrée sur l'amélioration des performances et du rendement d'un système de conversion d'énergie solaire par effet photovoltaïque à travers l'utilisation d'un algorithme approprié pour la commande de l'interface de puissance. L'objectif principal est de trouver un algorithme ou une loi de commande efficace et optimale permettant d'extraire le maximum de puissance disponible à partir du générateur photovoltaïque.

Dans ce but on propose, l'application de la commande pour la poursuite du point de puissance maximum (MPPT), sont la logique flou Type-2 (T2FLC), qui montre son efficacité et sa robustesse par rapport aux autres commandes proposés en qualité de la rapidité et de la diminution les perturbations vis-à-vis les variations climatiques ainsi que des paramètres du système. Les résultats de simulation obtenus sous Matlab/Simulink montrent la performance du contrôle dans le comportement dynamique des systèmes photovoltaïques.

Mots clés : MPPT, GPV**,** logique flou T1FLC et T2FLC, P&O

Abstract

The demand of energy is increasing in rural area. Therefore, to meet this need the development efficient photovoltaic conversion chain solution is timely. However, the use of solar energy amply depends on atmospheric conditions.

This thesis concerns a study on the performance of a photovoltaic conversion chain for the load. It is centered on the improvement of the performances and the output of a conversion system of solar energy or a system of extraction of solar energy per photovoltaic effect through the use of a suitable algorithm for the ordering of the interface of power. The principal objective is to find an algorithm or a law of effective and optimal order making it possible to extract the maximum of power available starting from the photovoltaic generator and of the thermo electric generator.

For this purpose, the application of the control for the continuation of the maximum power point (MPPT) is proposed, namely the fuzzy logic Type-2 (T2FLC), which shows its efficiency and its robustness compared to the other proposed commands in quality Of the speed and the decrease the disturbances with respect to the climatic variations as well as of the parameters of the system. The simulation results obtained under Matlab / Simulink show the performance of the control in the dynamic behavior of photovoltaic systems.

Keywords: MPPT, GPV, fuzzy logic T1FLC, T2FLC, P&O

REMERCIEMENTS

Avant tout, nous remercions ALLAH, le tout puissant, qui nous a donné

Le courage et la volonté pour accomplir ce travail

Nous tenons à remercier nos encadreurs Messieurs Ould cherchali Noureddine

Et Morsli Abdelkader pour Leurs conseils, leur disponibilité et pour nous avoir fait

profiter de leur connaissances et de leur qualité tant professionnelle qu'humaine.

Sans oublier les parents pour leur Daâouat

Un grand remerciement à tous les enseignants du Département du Génie Électrique

de la faculté de Technologie de l'Université de Yahia Fares Pour

de leurs disponibilités et leurs gentillesses.

Une dédicace toute spéciale à A nos amies et collègues de la promotion

MERCI

DEDICACE

Chaleureusement je dédie ce modeste travail à :

Mes chers parents qui ont peiné pour mon éducation, mes études et à mon bien –être.

Que Dieu Allah les bénit.

A ma femme et mes enfants ; Mohamed Moadh et abde el fettah

Mes Chères frères et leurs familles

Ma sœur, et sa famille

A tous les enseignants de ma formation

A mes amies

A mes camarades de la dernière promotion de l'énergie solaire et éolienne

De l'université Yahia Fares 2016/2017

* * * * * * * * * * *

Fekroun Sid-Ahmed

Dédicace

J e dédie ce modeste travail

A ma très chère famille qui m'a guidé durant les moments les plus Pénibles de ce long chemin, et qui ont été à mes côtés et m'ont soutenu durant toute ma vie afin de devenir ce que je suis, merci.

A ma mère, mon père, mes frères, ma sœur et mes belles sœurs ;

A mes nièces et mes Neveux,

A tout le reste de la famille

A tous les enseignants de ma formation

Et à tous mes chers amis ;

A mes camarades de la dernière promotion de l'énergie solaire et éolienne

De l'université Yahia Fares 2016/2017

A ceux qui ont assisté à ma formation

Merci.

* * * * * * * * * * *

Otmanine Omar

Table des matières

Page

Introduction générale 1

CHAPITRE 1. Généralités sur les Générateurs photovoltaïques

Introduction 3

1.1 - Définition d'un système PV 4

1.2 - L'effet photovoltaïque 5

1.3 - La cellule photovoltaïque 6

1.3.1 - Technologies des cellules photovoltaïques et le Type et rendement 7

1.3.1.1 - Technologies de la 1ère génération à base de Silicium Cristallin 7

1.3.1.2 - Technologies de la 2ème génération à base de couche-mince 8

1.3.1.3 - Technologies de la 3ème génération «les cellules organiques» 8

1.3.2 - Caractéristiques électriques d'une cellule photovoltaïque 9

1.3.2.1 - Caractéristiques électriques d'une cellule photovoltaïque a deux diodes: 10

1.3.2.2 Caractéristiques électriques d'une cellule photovoltaïque a un seul diode: 11

1.3.3. Paramètres d'une cellule photovoltaïque 14

1.3.3.1 - Courant de court-circuit (Icc) 14

1.3.3.2 - Tension de circuit-ouvert (Vco) 15

1.3.3.3 - Le rendement énergétique 15

1.3.3.4 - Facteur de forme 16

1.4 - Générateur photovoltaïque et ses performances 16

1.4.1 - Caractéristique courant- tension 17

1.4.2 - Les zones de Caractéristique I(V) d'un générateur photovoltaïque 17

1.4.3 - Influence de l'éclairement et de la température sur le courbes I=f(v) et P=f(v) 18

1.4.4 - Influence de l'association série des cellules PV 20

1.4.5 - Influence de l'association parallèle des cellules PV 21

1.4.6 - Influence de l'association mixte (Série + Parallèle) des cellules PV 22

1.5 - Conclusion 22

CHAPITRE 2. Les convertisseurs (DC/DC) et la commande MPPT

Introduction 25

2.1 - Convertisseurs DC/DC (hacheur) 25

2.1.1 - Le hacheur survolteur (Boost) 26

2.1.1.1 - Modèle mathématique équivalent 26

2.1.1.2 - Modèle approximé du convertisseur Boost 27

2.1.1.3 - Étude en régime continu 29
2.1.2 - Hacheur dévolteur (Buck) 31
2.1.3 - Le convertisseur Buck - Boost 33
2.2. Commandes MPPT des convertisseurs DC-DC 34
2.2.1 - Différents types de commandes MPPT à algorithmes performants 35
2.2.1.1 - Méthode de perturbation et d'observation (P&O) 36
2.3 - Conclusion 39

CHAPITRE 3. Commande MPPT par l'intelligence artificielle

Introduction 42
3.1 - Logique floue type-1 42
3.2 - Théorie des ensembles et les fonctions d'appartenance de flous type-1 43
3.3 - Description et structure d'une commande par la logique floue 44
3.3.1 - la fuzzification 45
3.3.2 - Inférence floue ou Moteur d'inférence (Mécanisme d'inférence) 45
3.3.3 – Base de règles floues (règles d'inférences) 46
3.3.4 - Défuzzification 46
3.4 - logique floue type-2 47
3.5 - Théorie des ensembles et les fonctions d'appartenance de flous type-2 47
3.5.1 - Les définitions 47
3.5.2 - Représentation des ensembles flous type-2 49
3.5.3 - Systèmes flous de type-2 49
3.5.3.1 - Structure d'un système flou de type-2 49
3.5.3.2 - Fuzzification 50
3.5.3.3 - Base de Règle 50
3.5.3.4 - Mécanisme d'inférence 51
3.5.3.5 - Le module de traitement de la sortie 51
3.5.3.6 - Réduction de type 51
3.5.2.7 - Défuzzification 52
3.6 - Mise en œuvre de la commande MPPT 52
3.6.1 - La commandes MPPT basée sur le principe de la logique floue type- 1 53
3.6.2 - La commandes MPPT basée sur le principe de la logique floue type-2 56
3.7 - Algorithmes génétiques 58
3.7.2 - Principe de fonctionnement des algorithmes génétiques 59
3.7.3. Structure de l'algorithme génétique 59
3.8 - Conclusion 61

CHAPITRE 4. Modelisation du système GPV, convertisseur, MPPT, charge »

Introduction 64

4.1 - Système photovoltaïque proposée 64

4.2 - Simulation du générateur photovoltaïque (GPV) 64

4.2.1 - Modèle du GPV 64

4.2.2 - Modèle du module photovoltaïque 65

4.2.3 - Modélisation du générateur photovoltaïque sous Matlab/Simulink 65

4.3 - modélisation du convertisseur Boost avec le contrôleur MPPT 68

4.4 - Simulation de la méthode MPPT 69

4.4.1 - L'algorithme perturbation et observent (P&O). 70

4.4.2 - Logique floue type 1 70

4.4.3 – Logique flou type-2 71

4.5 - Système globale (GPV, convertisseur, MPPT, charge) 72

4.6 - Caractéristiques du générateur photovoltaïque 73

4.6.1 - Les caractéristiques (I-V) et (P-V) 73

4.6.2 - Simulation du module PV avec variation de la température 75

4.6.3 - Simulation du module PV avec variation de l'irradiation 75

4.7 - Conclusion 77

CHAPITRE 5. Partie Simulation

Introduction 79

5.1. Simulation des trois commandes MPPT (P&O, Logique Floue Type1, Logique floue Type2) 79

A- Techniques conventionnels 81

A.1 - Simulation de l'algorithme P&O 81

A.2 - Comportement de la méthode à un changement d'irradiation 82

A.3- Comportement de la méthode à un changement de température 84

B- Techniques intelligentes 85

B.1 - Simulation des algorithmes génétiques 85

B.1.1 Simulation par Algorithme Génétique du contrôleur Floue Type 1 89

B.1.2 -Simulation par Algorithme Génétique du contrôleur Floue Type 2 91

B.2 - Simulation de l'algorithme de la logique floue Type1 92

B.2.1 - conditions standards ($T=25^0C$ & $G=1000W/m^2$) 92

B.2.2 - Comportement de la méthode à un changement d'irradiation 93

B-2-3-Comportement de la méthode à un changement de température 94

B-3-Simulation de l'algorithme de la logique floue Type2 95
B-3-1- conditions standards (T=25^{0}C & G=1000W/m^2) 95
B-3-2- Comportement de la méthode à un changement d'irradiation 96
B-3-3-Comportement de la méthode à un changement de température 97
5.2. Etude comparative de la puissance entre les trois contrôleurs 98
5.2.1. Simulation des trois contrôleurs dans les conditions standard (T=25°C et G=1000W/m²) 98
5.2.2. Simulation des trois contrôleurs dans les conditions (T=25°C et G variable) 99
5.3. Etude comparative de l'énergie produitedes trois contrôleurs MPPT 102
5.4. Conclusion 103
Conclusion générale 104
Bibliographie
Annexes

Liste des Figures

		Page
	CHAPITRE 1. Généralités sur les Générateurs photovoltaïques	
Figure 1.1	Système de conversion photovoltaïque	04
Figure 1.2	Schéma de principe de la conversion photoélectrique	05
Figure 1.3	Représentation schématique d'une cellule photovoltaïque solaire	07
Figure 1.4	Circuit équivalent du modèle à deux diodes	10
Figure 1.5	Circuit électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque	11
Figure 1.6	Notion de Facteur de forme FF pour une cellule photovoltaïque	16
Figure 1.7	Caractéristique I =f (V) d'un module photovoltaïque et Les différentes zones	18
Figure 1.8	L'influence de l'éclairement sur la caractéristique (a). I=f(V) et (b). P=f(V).	19
Figure 1.9	L'influence de la température sur la caractéristique (a). I=f(V) et (b). P=f(V).	19
Figure 1.10	Caractéristique résultante d'un groupement en série de Ns cellules identiques	20
Figure 1.11	Association de Ns modules solaires en série	20
Figure 1.12	Caractéristique résultante d'un groupement en parallèle de N_p cellules identiques	21
Figure 1.13	Association de Np modules solaires en parallèle	21
Figure 1.14	Association mixte Ns x Np modules solaires	22
	CHAPITRE 2. Les convertisseurs (DC/DC) et la commande MPPT	
Figure 2.1	Circuit électrique de base du hacheur survolteur	26
Figure 2.2	Schémas équivalents du hacheur survolteur,	26
Figure 2.3	Allure des variables dynamiques	28
Figure 2.4	Caractéristique de la tension et du courant du hacheur survolteur (Boost).	30
Figure 2.5	Circuit électrique de base du hacheur dévolteur.	31
Figure 2.6	Caractéristique de la tension et du courant du hacheur dévolteur (Buck).	32
Figure 2.7	Variation de la tension de charge avec le courant de charge pour un Convertisseur Buck	33
Figure 2.8	Circuit électrique de base du hacheur dévolteur-survolteur	33
Figure 2.9	Caractéristique de la tension et du courant du dévolteur-survolteur (Buck-Boost).	34
Figure 2.10	Schéma synoptique d'un système photovoltaïque avec MPPT.	35

Figure 2.11	Caractéristique P_{PV} (V_{PV}) d'un panneau solaire.	36
Figure 2.12	Algorithme de la méthode de Perturbation et d'Observation (P & O) du MPPT.	38
	CHAPITRE 3. Commande MPPT par l'intelligence artificielle	
Figure 3.1	Fonctions d'appartenance floue type-1 gaussienne	44
Figure 3.2	Structure générale d'un régulateur par logique floue	44
Figure 3.3	(a). Représentation schématique d'un ensemble flou Gaussien de type-2. (b). Les appartenances secondaires sont représentées dans, où on remarque qu'ils sont gaussiennes.	48
Figure 3.4	Fonction d'appartenance d'un ensemble flou type-2	49
Figure 3.5	**Structure de base d'un système flou de type-2.**	
Figure 3.6	Diagramme d'esquisse d'un contrôleur flou type-1	53
Figure 3.7	Les fonctions d'apparencede type-1 (a) erreur E, (b) changement d'erreur CE,(c) le rapport cyclique dD	54
Figure 3.8	Diagramme d'esquisse d'un contrôleur flou type-2	56
Figure 3.9	Les fonctions d'apparencede type-2 (a) erreur E, (b) changement d'erreur CE,(c) le rapport cyclique dD	57
Figure 3.10	Organigramme général de l'AG.	60
	CHAPITRE 4. Modelisation du système GPV, convertisseur, MPPT, charge »	
Figure 4.1	Schéma Type d'un système photovoltaïque	64
Figure 4.2	Circuit électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque à une seule diode.	65
Figure 4.3	Simulation du module photovoltaïque	66
Figure 4.4	subsysteme sous Simulink de l'étage GPV	68
Figure 4.5	Schéma block d'un convertisseur BOOST	69
Figure 4.6	Schéma block Simulink de l'MPPT	69
Figure 4.7	Schéma block de la commande MLI	70
Figure 4.8	Schéma block de l'algorithme de la commande P&O	70
Figure 4.9	Schéma block Simulink de l'erreur et sa variation du contrôleur floue type1	71
Figure 4.10	Schéma block Simulink de l'erreur et sa variation du contrôleur Floue type 2	72
Figure 4.11	Schéma block du Système globale (GPV, convertisseur, MPPT, charge)	73
Figure 4.12	Caractéristique P = f(V) du module PV (T = 25 C°, G = 1000W / m2)	74

Figure 4.13	Caractéristique I= f(V) du module PV(T=25C°, G=1000W/m2)	74
Figure 4.14	Résultat de simulation des Caractéristiques d'un module photovoltaïque I=f(V) pour différente températures et un éclairement; G =1000W//m^2.	75
Figure 4.15	Résulta de simulation des Caractéristiques d'un module PV, P = f(V); pour différente températures et un éclairement; G =1000W//m2.	75
Figure 416	Résulta de simulation des Caractéristiques d'un module PV, P = f(V); Pour différents éclairement et une température T=25C°.	76
Figure 4.17	Résulta de simulation des Caractéristiques d'un module photovoltaïque I=f(V) pour déférente éclairement et une T=25C°.	76
	CHAPITRE 5. Partie Simulation	
Figure 5.1	Variation de l'Irradiation et de la Température	81
Figure 5.2	Réponse de l'algorithme P&O dans les conditions standards (T=25°C & G=1000W/m^2)	82
Figure 5.3	Réponse du contrôle P&O pour une variation d'irradiation avec *(T=25C°)*.	83
Figure 5.4	Réponse du contrôle P&O pour une variation de température avec (G=1000W/m²)	84
Figure 5.5	Fonction d'appartenance Gaussienne du contrôleur floue type 1 et 2	87
Figure 5.6	Différence entre fonctions d'appartenance triangulaire et gaussienne	88
Figure 5.7	Résultat de la simulation du contrôleur Floue type1 avec des fonctions d'appartenance triangulaire	89
Figure 5.8	Résultat de la simulation du contrôleur Floue type1 avec des fonctions d'appartenance gaussienne	90
Figure 5.9	Résultat de la simulation du contrôleur Floue type2	91
Figure 5.10	Réponse de l'algorithme Floue type 1 dans les conditions standards (T=25°C & G=1000W/m^2)	92
Figure 5.11	Réponse du l'algorithme Floue Type 1 pour une variation d'irradiation avec(T=25C°).	93
Figure 5.12	Réponse du l'algorithme floue type1pour une variation de température avec (G=1000W/m²)	94
Figure 5.13	Réponse de l'algorithme Floue type 2 dans les conditions standards (T=25°C & G=1000W/m^2)	95
Figure 5.14	**Réponse du l'algorithme floue type 2 pour une variation de température avec (G=1000W/m²)**	**97**
Figure 5.15	Réponse des algorithmes P&O, floue type 1 et Floue type 2 avec (T=25°C & G=1000W/m^2)	99
Figure 5.16	Zooms de l'évolution de la puissance des trois contrôleurs dans les	101

conditions (T=25°C et G variable).

Liste des tableaux

Page

Tableau 1.1. Performance des différentes technologies des cellules photovoltaïques 09

Tableau 3-1. Exemple d'une table des règles à cinq classes pour une commande logique floue 55

Tableau 4.1. Données Techniques du BP MSX120 65

Tableau 4.2. Grandeurs d'entrés utilisés pour le model Simulink 66

Tableau 4.3. Paramètres du convertisseur BOOST [Voir Annexe.1] 72

Liste des symboles et des abréviations

CC	Courant continue
D	La diode
E :	Eclairement (W/m2)
FF	Facteur de forme
G	L'éclairement ou le flux incident (W/m2)
Iph	Le photo-courant (A)
Ipv	Courant délivré par une cellule photovoltaïque (A)
I_g	Courant du générateur photovoltaïque (A)
Iopt :	Courant optimum (A).
Imp	Courant de point de Puissance maximale (A)
I_L	Courant traverse l‟inductance de l‟hacheur (A)
Is	Courant de sortie de l‟hacheur (A)
Is_1	Courant de saturation de diode D1 (A)
Is_2	Courant de saturation de diode D1 (A)
Isa	Ccourant de saturation nominal (A)
Icc	Courant de court circuit (A)
Ir	Courant de référence de cellule PV(A) à T=25 °C et G=1000 W/m2
Ic	Courant de condensateur(A)
K	Constant de Boltzman (1.38 10-23 J K)
MPPT	Maximum Power Point Tracking.
n	Le facteur d'idéalité de la jonction
n_1	Coefficient d‟idéalité de diode D1
n_2	Coefficient d‟idéalité de diode D2
Np	Le nombre de modules en parallèle
Ns	Le nombre de modules en série
GPV	Générateur Photovoltaïque.
PV	Photovoltaïque
P&O	Méthode de Perturbation et observation

q	La charge électrique 1.6 10-19(C)
R_S	Résistance série de la cellule (Ω)
R_p	Résistance parallèle de la cellule (Ω)
Tc	Température de la cellule (°C)
Tr	Température référence (25 °C ou 298°K)
Vc	Tension de condensateur (V)
Ve	Tension d‟entrée de l‟hacheur (V)
Vg	Tension du générateur photovoltaïque (V)
Vmp	Tension de point de puissance maximale (V)
Vpv	Tension aux bornes de la cellule photovoltaïque (V)
Vopt :	Tension optimale (V).
Vr	Tension de référence de la cellule PV (T=25 °C , G=1000 W/m2)
Vs	Tension de sortie de l‟hacheur
Vco	La tension du circuit ouvert (V)
Vg	La tension du générateur (V)
Vth	La tension thermique (V)
η_{MPPT}	Rendement du point de fonctionnement MPPT
α	Rapport cyclique
ΔT	La variation de la température (°C)

Introduction générale

La production d'énergie est un défi de grande importance pour les années à venir. Les besoins énergétiques des sociétés industrialisées ainsi que les pays en voie de développement ne cessent de se multiplier. Cette production a triplé depuis les années 60 à nos jours. La totalité de production mondiale d'énergie provient de sources fossiles. La consommation de ces sources donne lieu à des émissions de gaz à effet de serre et donc une augmentation de la pollution. En plus la consommation excessive de stock de ressources naturelles réduit les réserves de ce type d'énergie de façon dangereuse pour les générations futures. [1]

Les panneaux solaires ou photovoltaïques sont l'élément de base de tout système photovoltaïque. Ils sont constitués de cellules photosensibles reliées entre elles. Chaque cellule convertit les rayons provenant du Soleil en électricité grâce à l'effet photovoltaïque. Les panneaux photovoltaïques ont une caractéristique électrique spécifique qui est donnée par le fabricant sous forme de courbes. Ces courbes représentent généralement l'évolution du courant et de la puissance par rapport à la tension du panneau. La caractéristique électrique du panneau est de nature non linéaire et possède un point particulier appelé « Point de Puissance Maximale » (en anglais "Maximum Power Point" MPP). Ce point est le point de fonctionnement optimal pour lequel le panneau opère à sa puissance maximale.

L'énergie photovoltaïque dépend fortement des conditions climatiques et de la localisation du site, ce qui rend la position du MPP variable dans le temps et donc difficile à situer.

Dans la plupart des systèmes de production d'énergie photovoltaïque, on trouve une technique ou un algorithme particulier nommé « Maximum Power Point Tracking » (MPPT) qui se traduit par, poursuite du point de puissance maximale. Cette technique, comme son nom l'indique, ou poursuit le ppm dans le temps et permet de la sorte de tirer le maximum de puissance que le panneau est apte à fournir. Le MPPT vise à améliorer et à optimiser l'exploitation des systèmes photovoltaïques. Il permet de faire un gain qui peut atteindre 25% d'où son importance. Techniquement, le MPPT fait appel à une interface entre le panneau et la charge qui est généralement un dispositif de conversion de puissance [2].

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

travail est de contribuer à une meilleure compréhension des performances de convertisseur DC-DC adapté par la commande numérique lors qu'il est couplé à un générateur photovoltaïque et améliorer sa tension de sortie afin d'obtenir une bonne source qu'on peu utiliser comme un générateur d'électricité.

Le mémoire présenté est organisé en cinq chapitres. :

Dans le chapitre 1, on fait une généralité sur les générateurs photovoltaïques. On présente le principe de l'effet photovoltaïque, la cellule PV et ses paramètres. En suite on fait un rappel sur les générateurs PV et leurs performances.

Dans le chapitre 2, on étudie quelques types convertisseurs DC-DC, utilisés dans les systèmes photovoltaïques. Ainsi, on décrite la commande MPPT des convertisseurs DC- DC basée sur contre réaction de puissance.

Dans le chapitre 3, on étudie quelques types techniques quelques méthodes de poursuite du point de puissance maximale (MPPT) des panneaux solaires, utilisés dans les systèmes photovoltaïques, commençant par des techniques simples comme les deux techniques que nous avons vu dans le deuxième chapitre (P&O) et d'autres techniques de commande plus robuste ont était associées à la commande MPPT telle que l'intelligence artificielle,(1FLC et T2FLC). Et en utilisant a méthode de synthèse d'un Contrôleur flou par un algorithme énétique.

Dans le chapitre 4, on fait une modélisation et une simulation par MATLAB-IMULINK de chaque élément du système PV, utilisé convertisseur survolteur (boost) et commande MPPT

Dans le chapitre 5 on Etudié de différentes techniques MPPT «P&O, T1FLC et T2FLC». [3]

Finalement, on terminera ce mémoire par une conclusion générale qui résume les résultats obtenus et expose quelques perspectives de recherche futures. [4].

CHAPITRE 1

Généralités Sur Les Générateurs Photovoltaïques

Introduction :

Le soleil est une source énergétique quasiment inépuisable d'énergie qui envoie à la surface de la terre un rayonnement qui représente chaque année environ milliers de fois la consommation énergétique de l'humanité [5]. C'est pourquoi, Depuis très longtemps, l'homme a cherché à utiliser l'énergie émise par le soleil, étoile la plus proche de la terre. Cette énergie est disponible en abondance sur toute la surface terrestre et, malgré une atténuation importante lors de la traversée de l'atmosphère, une quantité encore importante arrive à la surface du sol. On peut ainsi compter sur 1000 W/m2 dans les zones tempérées et jusqu'à 1400 W/m2 lorsque l'atmosphère est faiblement polluée en poussière ou en eau. Le flux solaire reçu au niveau du sol terrestre dépend ainsi de plusieurs paramètres.

- L'orientation, la nature et l'inclinaison de la surface terrestre,
- La latitude du lieu de collecte, de son degré de pollution ainsi que son longitude,
- La période de l'année,
- L'instant considéré dans la journée,
- La nature des couches nuageuses [5].

Ainsi, pour mettre à profit cette énergie solaire importante diffusée sur l'ensemble de la planète, il a pu arriver à réaliser ce but par le moyen dit La chaine de conversion photovoltaïque ou système PV. Ce dernier, est un ensemble d'éléments qui sert à la production d'électricité à partir du rayonnement solaire.

La conversion de cette nouvelle forme énergétique en électricité fut possible grâce à la découverte de nouveaux systèmes faits à base de cellules photovoltaïques.

Dans ce chapitre, on présente globalement le fonctionnement du GPV, le principe de la conversion PV. On décrira une modélisation mathématique afin de tracer les caractéristiques courant-tension (I-V) et puissance-tension (P-V) de la cellule PV en montrant l'influence des conditions météorologiques (éclairement et température) [46].

Pour comprendre le fonctionnement de cette énergie et en optimiser son utilisation, nous effectuons dans ce chapitre un bref rappel sur le principe de l'effet photovoltaïque, la cellule photovoltaïque et ses performances ainsi le générateur solaire photovoltaïque et leurs performances.

le schéma simplifié montre le système de conversion photovoltaïque est basé sur des blocs modulaires, comme représenté dans la figure 1.1

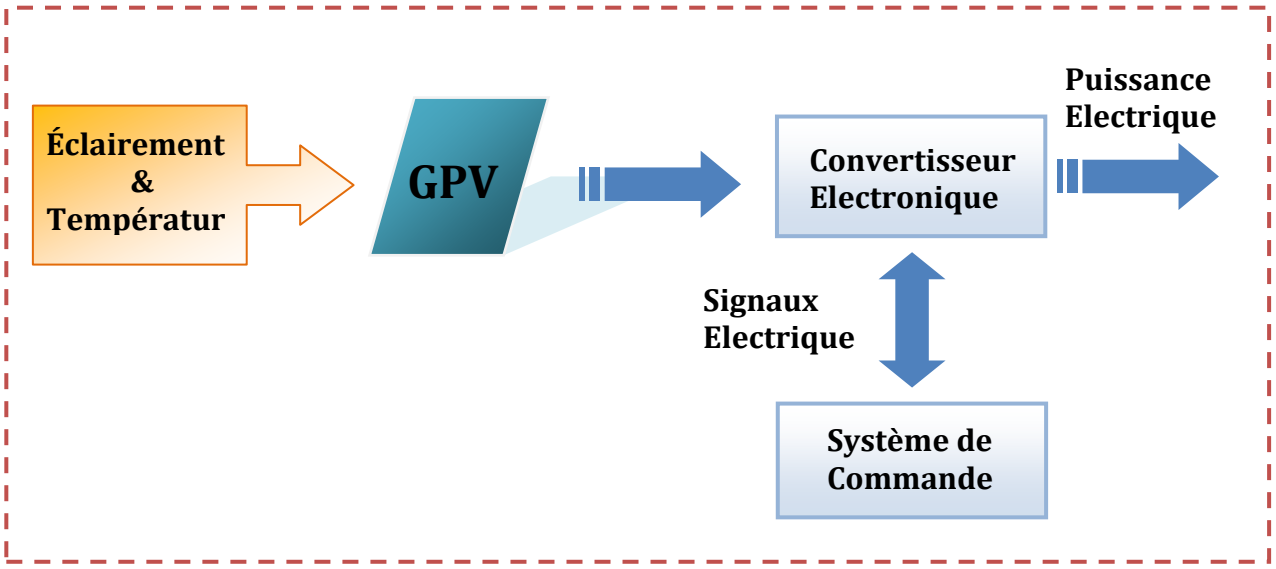


Figure 1. 1 - Système de conversion photovoltaïque.

1.1. Définition d'un système PV :

Le terme « Photovoltaïque » vient du Grec, il est composé de deux parties:

Photos : Lumière.

Volt : Unité de tension électrique, du nom Alessandro Volta. Ce phénomène fut découvert au 19ème siècle par le physicien Alexandre Edmond Becquerel en 1839. La première cellule photovoltaïque fut développée début 1954 pour l'alimentation en énergie des satellites. Depuis 1958, les cellules photovoltaïques alimentent seulement le système énergétique des satellites jusqu'à ses premières applications terrestres au début des années 70. Le choc pétrolier dans les années 70, la découverte de la méthode pour trouver le MPPT (conséquence des recherches dans le domaine spatial) ainsi que les efforts consentis pour réduire le coût des panneaux, ont favorisé la commercialisation de cette énergie renouvelable. En 1973, la première maison alimentée par des cellules photovoltaïque est construire, ainsi d'équipements de télécommunications. Aujourd'hui, des centrales solaires sont en construction dans le monde entier. [8][39].

Aujourd'hui, grâce à sa fiabilité et à son concept respectueux de l'environnement, le photovoltaïque prend une place prépondérante.

Pour comprendre ce phénomène, nous avons rappelé dans ce chapitre quelques notions de base sur le rayonnement solaire et les propriétés des semi-conducteurs ; matériaux de base des cellules photovoltaïques.

Une fois ces rappels théoriques sont faits, il nous sera facile d'expliquer le principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque en passant au système photovoltaïque complet et à ses trois ou quatre types à savoir [9]:

- Les systèmes autonomes.
- Les systèmes connectés au réseau.
- Les systèmes fonctionnant au fil du soleil (Pompage PV).
- Les systèmes hybrides.

Le type que vous choisissez dépendra de vos besoins, de votre emplacement et de votre budget.

1.2. L'effet photovoltaïque:

Les cellules solaires utilisent du silicium comme matériau semi-conducteur. Les cellules sont ensuite assemblées dans un module solaire qui convertit la lumière du soleil directement en électricité. Lorsque la lumière du soleil est absorbée par le matériau de silicium, l'énergie solaire frappe les électrons gratuitement dans la structure en cristal de silicium, ce qui permet aux électrons de circuler à travers le matériau de silicium pour générer de l'électricité. La conversion de la lumière (photon) en électricité (tension) est appelée « *effet photovoltaïque* ».

Cet effet photovoltaïque est un phénomène physique propres à certains matériaux communément appelés les semi-conducteurs (souvent le silicium). Il est composé à partir de 3 étapes qui se résument en l'absorption de lumière par le matériau de la cellule P.V. Le transfert d'énergie des photons vers les charges électriques et finalement la collecte de charge.
L'absorption d'un photon (grain de lumière) dans le matériau semi-conducteur entraîne la formation d'une paire électron-trou. L'électron et le trou sont séparés sous l'effet de la différence de potentiel dans la jonction. Si on ferme le circuit par une charge (ampoule, etc...), un courant électrique circule. Comme la montre dans la figure 1.2 ci-dessous.

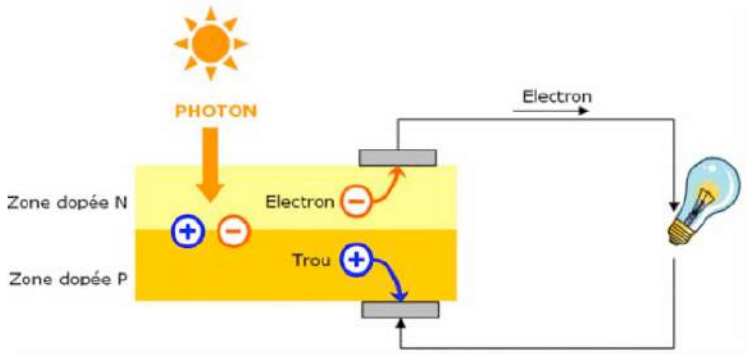


Figure 1.2 - Schéma de principe de la conversion photoélectrique.

1.3. La cellule photovoltaïque :

La cellule photovoltaïque est fabriquée à partir de deux couches de Silicium (matériau semi-conducteur) : – une couche dopée avec du Bore qui possède moins d'électrons que le Silicium, cette zone est donc dopée positivement (zone P). – une couche dopée avec du Phosphore qui possède plus d'électrons que le Silicium, cette zone est donc dopée négativement (zone N) [1].

Nous allons ici exposer les principes de fonctionnement principaux de cette technique. L'effet photovoltaïque utilisé dans les cellules solaires permet de convertir directement l'énergie lumineuse des rayons solaires en électricité par le biais de la production et du transport dans un matériau semi-conducteur de charges électriques positives et négatives sous l'effet de la lumière. Ce matériau comporte deux parties, l'une présentant un excès d'électrons et l'autre un déficit en électrons, dites respectivement dopée de type n et dopée de type p. Lorsque la première est mise en contact avec la seconde, les électrons en excès dans le matériau n diffusent dans le matériau p. La zone initialement dopée n devient chargée positivement, et la zone initialement dopée p chargée négativement. Il se crée donc entre elles un champ électrique qui tend à repousser les électrons dans la zone n et les trous vers la zone p. Une jonction (dite p-n) a été formée. En ajoutant des contacts métalliques sur les zones n et p, une diode est obtenue. Les électrons ne circulent que de la zone p à n et inversement pour les trous .Ceci est du à l'utilisation de semi-conducteur. Lorsque la jonction est éclairée, les photons d'énergie égale ou supérieure à la largeur de la bande interdite communiquent leur énergie aux atomes, chacun fait passer un *électron* de la bande de valence dans la bande de conduction et laisse aussi un *trou* capable de se mouvoir, engendrant ainsi une paire *électron-trou*. Si une charge est placée aux bornes de la cellule, les électrons de la zone n rejoignent les trous de la zone p via la connexion extérieure, donnant naissance à une différence de potentiel: le courant électrique circule.

La tension électrique fournie par une cellule en silicium cristallin est de l'ordre de 0,5 Volts. Pour obtenir des tensions plus élevées, on dispose plusieurs cellules en série.

La figure (1.3) représente ce fonctionnement [1].

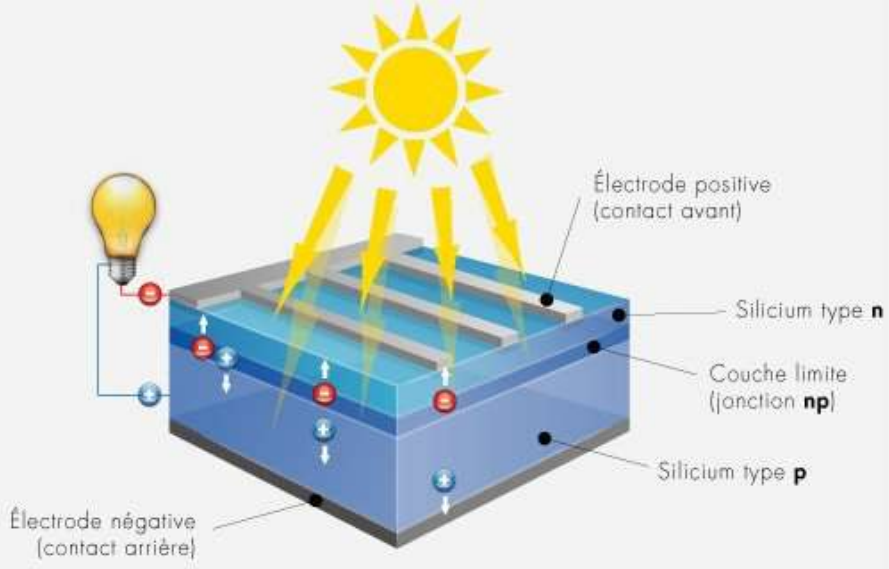


Figure 1.3 - Représentation schématique d'une cellule photovoltaïque solaire

Une cellule photovoltaïque donc est un dispositif qui permet de transformer l'énergie solaire en énergie électrique. Cette transformation est basée sur les trois mécanismes suivants: Absorption des photons (dont l'énergie est supérieure au gap) par le matériau constituant le dispositif ; Conversion de l'énergie du photon en énergie électrique, ce qui correspond à la création des pairs électrons/trous dans le matériau semi-conducteur, Collecte des particules générées dans le dispositif [4].

1.3.1. Technologies des cellules photovoltaïques et le Type et rendement:

On distingue trois générations des cellules photovoltaïques en fonction des développements Technologiques :

1.3.1.1. Technologies de la 1ère génération à base de Silicium Cristallin:

Les cellules de première génération sont basées sur une seule jonction P-N qui utilisent généralement le silicium sous forme cristalline comme matériau semi-conducteur. La méthode de production basée sur les wafers de silicium est très énergivore et donc très chère. Elle nécessite par ailleurs un silicium d'une grande pureté. On différencie également les cellules à base de silicium monocristallin et poly cristallin [1].

1.3.1.2. Technologies de la 2ème génération à base de couche-mince:

Plus récemment sont apparues les technologies de couches minces, plus fines et dont la part du marché semble promise à une augmentation rapide. Les cellules dites couche mince (Thin-film) constituent ce que certains appellent les cellules de seconde génération car elles font historiquement suite aux cellules en silicium cristallin relativement épaisses. On distingue plusieurs types de cellules couche minces à savoir :

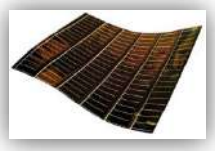
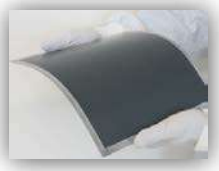
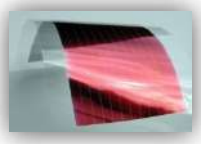
- le silicium amorphe (a-si).
- le tellurure de Cadmium (CdTe).
- le cuivre/indium/sélénium ou cuivre/indium/Gallium/sélénium (CIS ou CIGS).

1.3.1.3. Technologies de la 3ème génération «les cellules organiques»

Elles sont constituées de molécules organiques combinant flexibilité et légèreté. Il y a trois types de ces cellules: les moléculaires, celles en polymères et les organiques hybrides. Ces technologies sont encore au stade de la recherche et développement [1].

Dans le tableau (1.1), ci-dessous on résume les différentes performances des technologies citées précédemment [11]:

Tableau 1.1. Performance des différentes technologies des cellules photovoltaïques

Type de cellules	Rendement	Avantage	Inconvénient	Image
silicium monocristallin	**13-17%**	Bon Rendement Pour une cellule	Coût de Fabrication Elevé, perte de matières en cours de fabrication	
Silicium Poly-cristallin	**11-15%**	Bon Rendement Pour un module	Coût de Fabrication Elevé, perte de matières en cours De fabrication	
silicium amorphe	**5-9%**	Facile à fabriquer	Mauvais rendement	
CdTe	**7-11%**	Absorbe 90% des Photons incidents	Cadmium très polluant	
CIGS	**20%**	Energie de gap ajustable. 99% des Photons absorbés	Manque de Matière Première	
Cellules organiques	**≤5%**	Faible cout de fabrication, flexible	Rendement encore trop bas	

1.3.2. Caractéristiques électriques d'une cellule photovoltaïque :

Les cellules solaires sont généralement associées en série et en parallèle, puis encapsulées sous verre pour obtenir un module photovoltaïque. Un générateur PV est constitué de modules interconnectés pour former une unité produisant une puissance continue élevée compatible avec le matériel électrique usuel. Les modules PV sont habituellement branchés en série-parallèle pour augmenter la tension et l'intensité à la sortie du générateur. Les modules interconnectés sont

montés sur des supports métalliques et inclinés suivant l'angle désiré en fonction du lieu, cet ensemble est souvent désigné par champ de modules.

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

Parmi ces modèles on peut citer les suivants : la modélisation des modules PV avec 1-D et 2-D sont présentés, mais dans notre travail on va utiliser le modèle avec une seule diode.

1.3.2.1 Caractéristiques électriques d'une cellule photovoltaïque a deux diodes:

Le modèle à deux diodes est présenté comme le circuit équivalent. Il est représenté sur la figure 1.4.

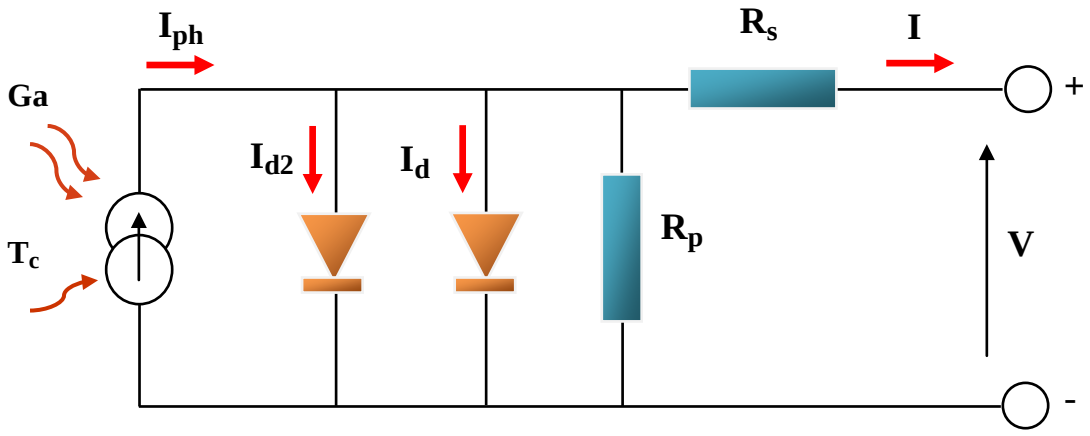


Fig. 1.4. Circuit équivalent du modèle à deux diodes. [18][47]

Ce circuit inclut deux diodes parallèlement et une résistance série et une autre résistance shunt. Ce circuit peut être utilisé pour une cellule individuelle, pour un module comportant plusieurs cellules, ou pour une panneau photovoltaïque composé de plusieurs modules.

La relation de la caractéristique courant-tension dans la condition standard, figure. 1.4 est exprimée par l'équation (1.1). Six paramètres doivent être connus afin de déterminer le courant et la tension, et la puissance fournie à la charge.

L'équation suivante décrit le courant de sortie de la cellule photovoltaïque pour le modèle à deux diodes:

$$I = I_{ph} - I_{01}\left[e^{q\left(\frac{V+I.R_S}{a_1 KT}\right)} - 1\right] - I_{02}\left[e^{q\left(\frac{V+I.R_S}{a_2 KT}\right)} - 1\right] - \left(\frac{V+I.R_S}{R_p}\right) \qquad \textbf{(1.1)}$$

Les paramètres de ce circuit sont :

I_{01} : le courant de saturation inverse de la diode D1.

I_{02} : le courant de saturation inverse de la diode D2.

I_{ph} : le courant généré par l'effet photoélectrique.

a_1 : le facteur d'idéalité de la jonction de la diodeD1.

a_2 : le facteur d'idéalité de la jonction de la diodeD2

R_S : la résistance série.

R_{sh} : la résistance parallèle

V : tension de sortie du PV (V).

T : La température en Kelvin (°k).

K : C constant de Boltzmann (1.381 x 10-23 J/K).

1.3.2.2 Caractéristiques électriques d'une cellule photovoltaïque a un seul diode:

Ainsi la caractéristique « I−V » du générateur PV est basée sur celle d'une cellule élémentaire modélisée par le circuit équivalent bien connu de la figure 1.5 [4]. Ce circuit introduit une source de courant et une diode en parallèle, ainsi que Deux résistances parasites sont introduites dans ce schéma.

Ces résistances ont une certaine influence sur la caractéristique $I = f(V)$ de la cellule [2]:

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

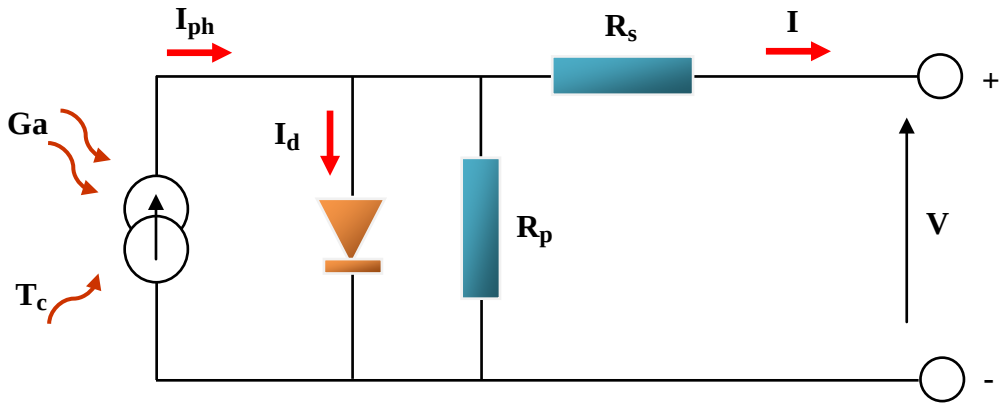


Figure 1. 5- Circuit électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque.

Dans la figure 1.5 les différents paramètres caractéristiques des cellules photovoltaïques sont:

I_{ph} : Les courants générés par les cellules solaires (A).

R_S : résistance Série (Ω).

R_P : Résistance parallèle (Ω).

G_a : Éclairement de la lumière du soleil (W/m2).

I_d : courant de diode (A).

I : courant de sortie du PV (A).

V : tension de sortie du PV (V).

Le fabricant du module solaire donne d'autres paramètres requis pour modeler les piles solaires. La fiche technique qui donne les caractéristiques électriques est calculée sous le STC. De condition normale d'essais quand la température T est 25°C et l'irradiante G est 1000 W/m2. Les paramètres qui peuvent être trouvés à l'intérieur de la fiche technique sont :

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

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

P_{mp} : puissance au point de puissance maximum.

V_{mp} : tension au point de puissance maximum.

I_{mp} : courant au point de puissance maximum.

A partir de la Figure I.5 le courant de sortie de la cellule de PV est :

$$I = I_{ph} - I_d \qquad \textbf{(1.2)}$$

Où :

Par équation de Shockley, l'identification de courant de diode est donnée par :

$$I_d = I_0 \left(e^{\frac{qVd}{kT}} - 1 \right) \qquad U_T = \frac{kT}{q} \qquad \textbf{(1.3)}$$

Où :

I_0: Courant de saturation renversé de diode .

q : Charge élémentaire d'électron (1.602 x 10-19 Cb) .

V_d : Tension de diode .

U_T : Tension thermique.

K : C constant de Boltzmann (1.381 x 10-23 J/K).

T : La température en Kelvin (°k).

La relation entre la tension et le résultat actuel en remplaçant le courant de diode :

$$I_d = I_{ph} - I_0 \left(e^{\frac{qVd}{kT}} - 1 \right) \quad \textbf{(1.4)}$$

Où :

V_d : la tension de rendement de la cellule de PV.

La saturation renversée I0 est trouvée en employant l'équation ci-dessus. En plaçant l'égale du courant *I* à zéro et le calcul à *T1* de la température [12].

$$I_0(T_1) = \frac{I_{ph}(T1)}{\left(e^{\frac{qVoc}{kT}} - 1 \right)} \quad \textbf{(1.5)}$$

Le courant produit par les piles solaires I_{pv} peut être rapproché avec l'ISC courant de court-circuit de dans [7]. Le courant produit peut être calculé pour l'autre irradiance. Le courant, la température et l'irradiance standard de la fiche technique sont employés pour déterminer le courant à l'état différent.

$$I_{SC} \approx I_{ph}$$

$$I_{sc}(T_1) = \left(\frac{G}{Gnom} \right) I_{sc}\left(T_{1,nom} \right) \quad \textbf{(1.6)}$$

Où :

I_{sc} $(T1)$: Courant de court circuit au T1 de la température;

$T_{1,\ nom}$: La température de la cellule de la fiche technique au STC ;

G_{nom} : Irradiance de fiche technique au STC.

Après calcul, [7]. Donne l'équation du PV.

$$I = I_{ph} - I_0 \left[e^{q\left(\frac{V + I.R_S}{aKT} \right)} - \left(\frac{V + I.R_S}{R_p} \right) \right] \quad \textbf{(1.7)}$$

Où :

a : le facteur de qualité(idéalité) de diode entre 1 et 2 et doit être estimé. La valeur de « a» est égale à 1 pour la diode idéale.

V : est la tension de cellules. Pour un module de PV, la tension de cellules est multipliée par le montant total des cellules en série.

Le courant de saturation renversé I_0 dépend de la température T. il est calculé par l'équation suivante [13]:

$$I_0 = I_0(T_1)\left(\frac{T}{T_1}\right)^{\frac{3}{n}} . e^{\frac{qV.q(T1)}{ak\left(\frac{1}{T}-\frac{1}{T_1}\right)}} \quad \textbf{(1.8)}$$

La valeur de la résistance série RS est mesurée de la pente dV/dI de la courbe I-V à la tension de circuit ouvert de point [2]. L'équation de Rs est donnée par :

$$R_S = -\frac{dV}{dI} - \frac{akT/q}{I_0 e^{\left(\frac{qVoc}{akT}\right)}} \quad \textbf{(1.9)}$$

Le modèle est accompli en employant les équations récursives suivantes pour trouver les courants [14]. L'équation récursive est employée pour calculer le courant pour p cellules en parallèle. Il est plus commode de résoudre numériquement. L'équation présente une méthode simplifiée pour calculer la série de résistance et pour négliger le résistance parallèle [14].

$$I_{n+1} = I_n - \frac{I_{ph} - I_{n_} I_0\left[e^{q\left(\frac{V+I_n.R_S}{akT}\right)}-1\right]}{-1-I_0\left(\frac{qR_S}{akT}\right)e^{q\left(\frac{V+I_n.R_S}{akT}\right)}} \quad \textbf{(1.10)}$$

1.3.3. Paramètres d'une cellule photovoltaïque :

Les paramètres des cellules photovoltaïques (I_{CC}, I_{CO} et FF), extraits des caractéristiques courant-tension, permettent de comparer différentes cellules éclairées dans des conditions identiques.

1.3.3.1. Courant de court-circuit (I_{CC}) :

Il s'agit du courant obtenu en court-circuitant les bornes de la cellule (en prenant V= 0). Dans le cas idéal (R_S nulle et R_P infinie), ce courant se confond avec le photo-courant I_{ph} dans le cas contraire, en annulant la tension V dans l'équation (I.1), on obtient:

$$I_{cc} = I_{ph} - I_{sat}\left[exp\left(\frac{e(I_{cc}+R_s)}{nKT}\right)-1\right] - \left(\frac{I_{cc}*R_s}{R_p}\right) \quad \textbf{(1.11)}$$

Pour la plupart des cellules (dont la résistance série est faible), on peut négliger le terme :

$$I_{sat} = \left[exp\left(\frac{e(I_{pV}+R_{ser})}{nkT}\right)-1\right] \quad \textbf{(1.12)}$$

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

$$I_{cc} \cong \frac{I_{ph}}{\left(1+\frac{R_S}{R_p}\right)} \quad \textbf{(1.13)}$$

Quantitativement, il a la plus grande valeur du courant généré par la cellule pratiquement ($I_{CC} = I_{ph}$).

$$I_{ph} \cong I_{cc} \quad \textbf{(1.14)}$$

1.3.3.2. Tension de circuit-ouvert (V_{CO}) :

La tension à circuit ouvert V_{CO} est obtenue quand le courant qui traverse la cellule est nul. (C'est la tension maximale d'une photopile ou d'un générateur photovoltaïque).

$$0 = I_{cc} - I_{sat}\left[exp\left(\frac{eV_{PV}}{nKT}\right)-1\right] - \left(\frac{V_{PV}}{R_p}\right) \quad \textbf{(1.15)}$$

Dans le cas idéal, sa valeur est légèrement inférieur à :

$$V_{co} = V_T ln\left[\frac{I_{ph}}{I_{sat}}+1\right] \quad \textbf{(1.16)}$$

1.3.3.3. Le rendement énergétique:

Le rendement de conversion d'énergie (**η)** est le rapport de la puissance générée et de la puissance du rayonnement solaire incident P_O .On appelle rendement rapport de la puissance maximale fournie (P_{max}) sur la puissance du rayonnement solaire incident (P_{inc}) [15]:

Il est donné par :

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{inc}} = \frac{I_{opt}\,V_{opt}}{P_{inc}} = \frac{I_{opt}\,V_{opt}}{\emptyset\, S} \quad \textbf{(1.17)}$$

Ø : Flux incident

S : Surface de la cellule solaire.

1.3.3.4. Facteur de forme*:*

Un paramètre important est souvent utilisé a partir de la caractéristique *I(V)* pour qualifier la qualité et l'efficacité d'une cellule ou d'un générateur PV : c'est le facteur de remplissage ou facteur de forme (Fill Factor .FF).ce coefficient représente le rapport entre la puissance maximale que peut délivrer par la cellule noté P_{max}, la puissance qu'il est théoriquement possible d'obtenir $I_{opt} \times V_{opt}$ (puissance optimale). Et la puissance la puissance maximale d'une cellule idéale, le produit du courant de court-circuit I_{CC} par la tension de circuit ouvert V_{CO} formé par le rectangle $Icc \times Vco$ (Figure 1.6).

Plus la valeur de ce facteur sera grand, plus la puissance exploitable le sera également. les meilleure cellules auront donc fait l'objet de compromise technologique pour atteindre le plus possible les caractéristique idéales [4], [15]

Il est défini par la relation suivante :

$$FF = \frac{P_{max}}{I_{cc} V_{co}} = \frac{I_{opt} V_{opt}}{I_{cc} V_{co}} \qquad \textbf{(1.18)}$$

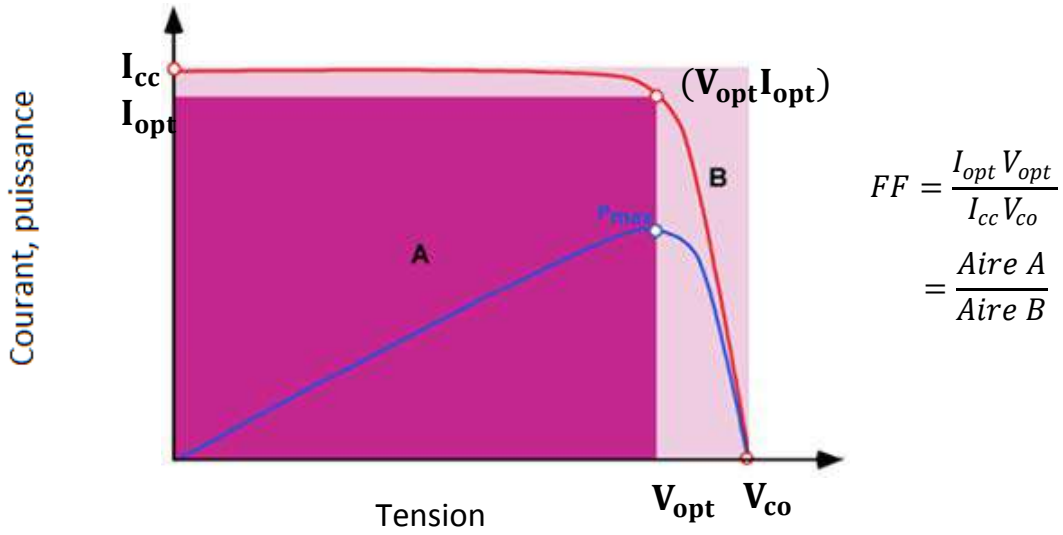


Figure.1.6. Notion de Facteur de forme FF pour une cellule photovoltaïque

1.4. Générateur photovoltaïque et ses performances :

Le générateur photovoltaïque est un ensemble d'équipements mis en place pour exploiter l'énergie photovoltaïque afin de satisfaire les besoins en charge. En fonction de la puissance désirée, les modules peuvent être assemblés en panneaux pour constituer un "champ photovoltaïque". Relié au récepteur sans autre élément, le panneau solaire fonctionne "au fil du

soleil", c'est-à-dire que la puissance électrique fournie au récepteur est fonction de la puissance d'ensoleillement. Elle est donc à son maximum lorsque le soleil est au zénith et nulle ne la nuit. Mais, très souvent, les besoins en électricité ne correspondent pas aux heures d'ensoleillement et nécessitent une intensité régulière (éclairage ou alimentation de réfrigérateurs, par exemple). On équipe alors le système de batteries d'accumulateurs qui permettent de stocker l'électricité et de la restituer en temps voulu [1].

Pour un certain nombre d'applications, le courant continu produit, par le générateur photovoltaïque, est convertit à l'aide d'un onduleur en courant alternatif. Un module photovoltaïque est constitué d'un ensemble de cellules photovoltaïques élémentaires montées en série et/ou en parallèle afin d'obtenir des caractéristiques électriques désirées tels que: la puissance, le courant de court-circuit I_{CC} ou la tension en circuit ouvert V_{CO}.

Un générateur photovoltaïque est constitué d'un ou plusieurs modules PV en série et /ou en parallèle pour obtenir une puissance, un I_{CC} et un V_{CO} désirés [7].

1.4.1. Caractéristique courant- tension :

Il est difficile de donner un caractère source de courant ou de tension à un panneau photovoltaïque sur toute l'étendue de la caractéristique courant tension. Le panneau photovoltaïque est donc à considérer comme une source de puissance. On s'aperçoit alors de l'existence d'un point Pm où la puissance se trouve être maximale. Il est sans aucun doute intéressant de se placer sur ce point pour tirer le maximum d'énergie et ainsi exploiter au mieux la puissance crête installée. Certains régulateurs solaires réalisent donc une adaptation d'impédance pour qu'à chaque instant on se trouve proche de ce point de puissance maximale (Maximum Power Point Tracking) (MPPT)) [7].

La caractéristique réelle et le schéma équivalent de la cellule sont représentés sur la figure. Les valeurs respectives des divers éléments du schéma équivalent déterminent les performances de la cellule réelle.

I.4.2. Les zones de Caractéristique I(V) d'un générateur photovoltaïque:

La caractéristique fondamentale du générateur photovoltaïque donnée pour un éclairement et une température donnée, n'impose ni le courant ni la tension de fonctionnement, seule la courbe $I = f(V)$ est fixée. C'est la valeur de la charge aux bornes du générateur qui va déterminer le point de fonctionnement du système photovoltaïque [16].

La figure (1.7) ci-dessous montre trois zones essentielles:

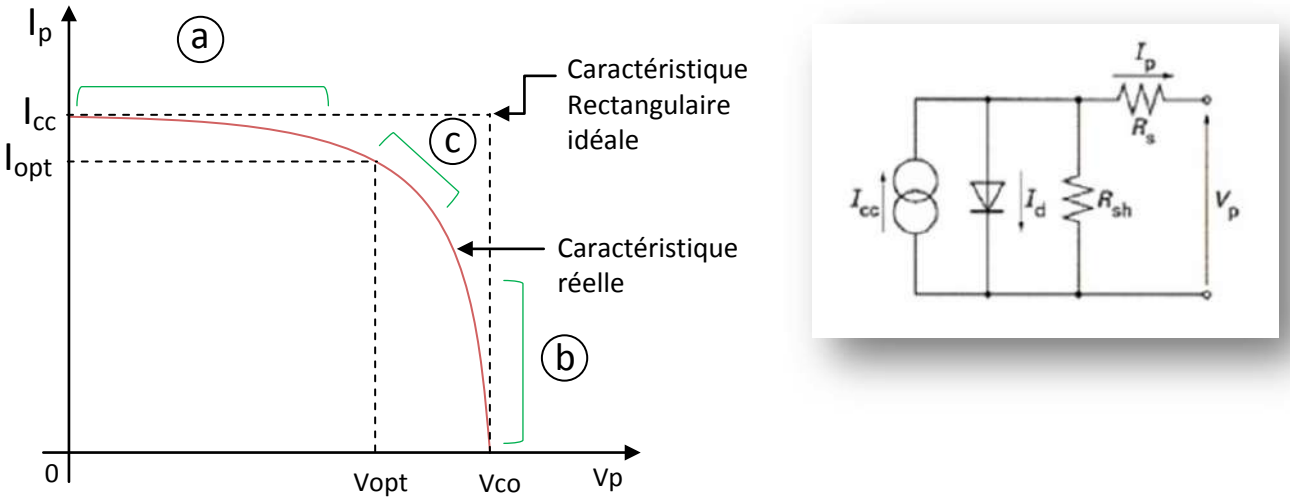


Figure 1.7 *:* Caractéristique I =f (V) d'un module photovoltaïque et Les différentes zones.

Nous pouvons décomposer la caractéristique *I(V)* du générateur photovoltaïque en 3 zones :

- **La zone(a)**, Une zone assimilable à *un générateur de courant* I_{CC} proportionnel à l'irradiation, d'admittance interne pouvant être modélisée par $1/R_{sh}$.
- **La zone (b)**, Une zone assimilable à *un générateur de tension* V_{C0} d'impédance interne équivalente à la résistance série R_S.
- **La zone (c)**, Une zone où l'impédance interne du générateur varie très fortement de R_S à R_P C'est dabs la zone (c) qui situé le point de fonctionnement pour lequel la puissance fournie par le générateur est maximale. Ce point est appelé point de puissance optimale, caractérisé par le couple (I_{max}, V_{max}), et seule une charge dont la caractéristique passe par ce point, permet d'extraire la puissance maximale disponible dans les conditions considérées [17].

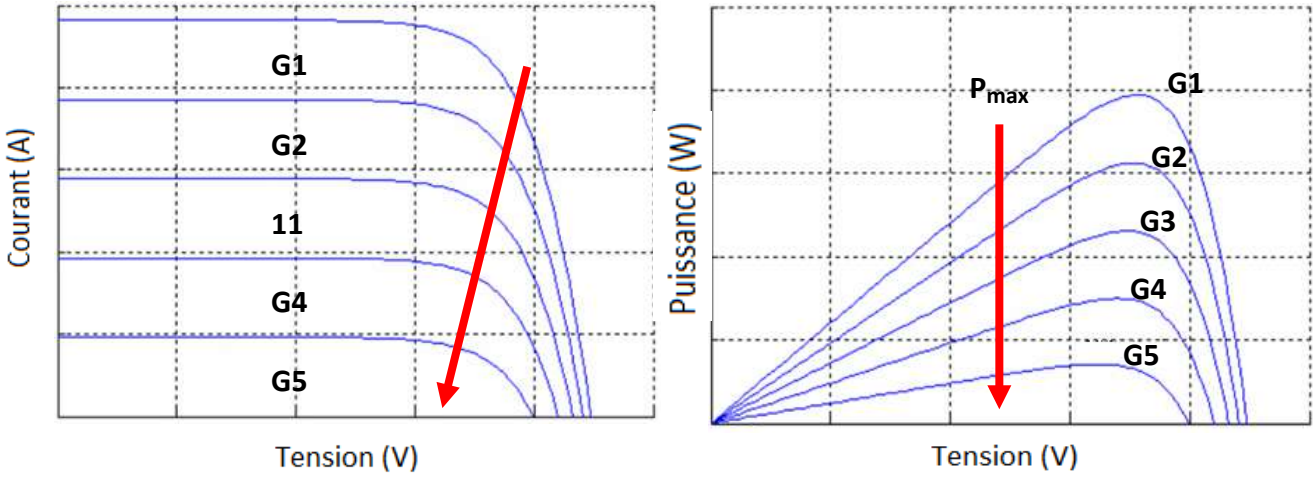
1.4.3. Influence de l'éclairement et de la température sur le courbes *I=f(v)* et *P=f(v)* :

La figure (1.8) présente les caractéristiques d'une cellule solaire, pour plusieurs intensités de rayonnement solaire.

La figure (1.8.a) Montre l'influence de l'éclairement sur la caractéristique *I=f(V)*. A une température constante, On remarque que le courant électrique, est directement proportionnel au rayonnement à ces niveaux d'éclairement. Par contre la tension est dégradée légèrement par rapport au courant, lorsque l'intensité de la lumière baisse.

La figure (1.8.b) Montre l'influence de l'éclairement sur la caractéristique *P=f(V)*. 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) [4].

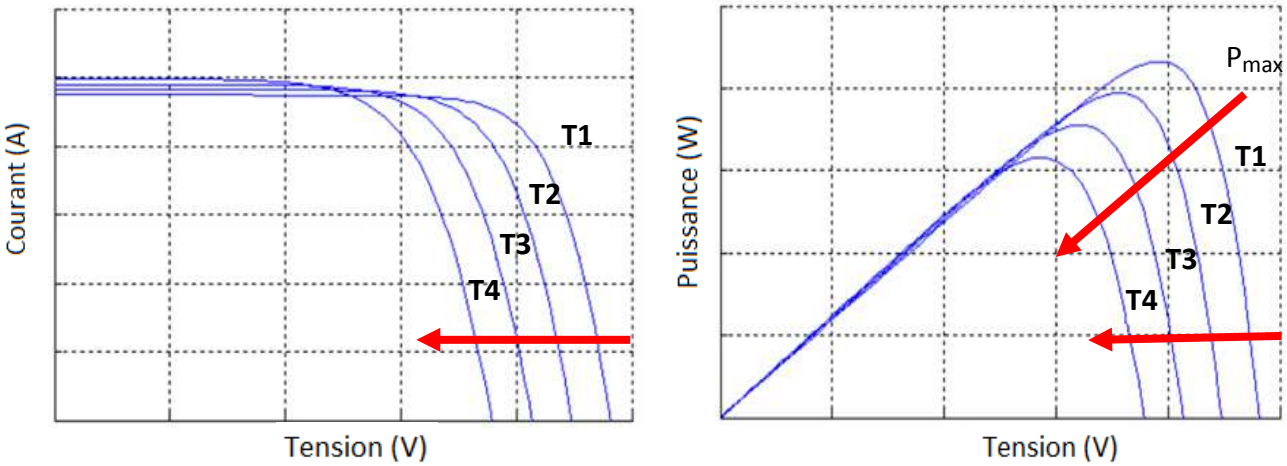


(a) **G1 > G2 > G3 > G4 >** **(b)**

Figure 1.8 *:* L'influence de l'éclairement sur la caractéristique (a). I=f(V) et (b). P=f(V).

La figure (1.9.a) 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 [1].



(a) **T1 > T2 > T3 > T4** **(b)**

Figure 1.9 *:* L'influence de la température sur la caractéristique (a). I=f(V) et (b). P=f(V).

La figure (1.9.b) 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=f(V)* [5] [1].

I.4.4. Influence de l'association série des cellules PV :

Dans un groupement en série, les cellules sont traversées par le même courant et la caractéristique résultante du groupement en série est obtenue par addition des tensions à courant donné. La Figure (1.10) montre la caractéristique résultante *(Iscc,Vsco)* obtenue en associant en série (indice s) ns cellules identiques (Icc,Vco), ainsi:

$$I_{scc} = I_{cc} \;\; et \;\; V_{sco} = n_s V_{sco}$$

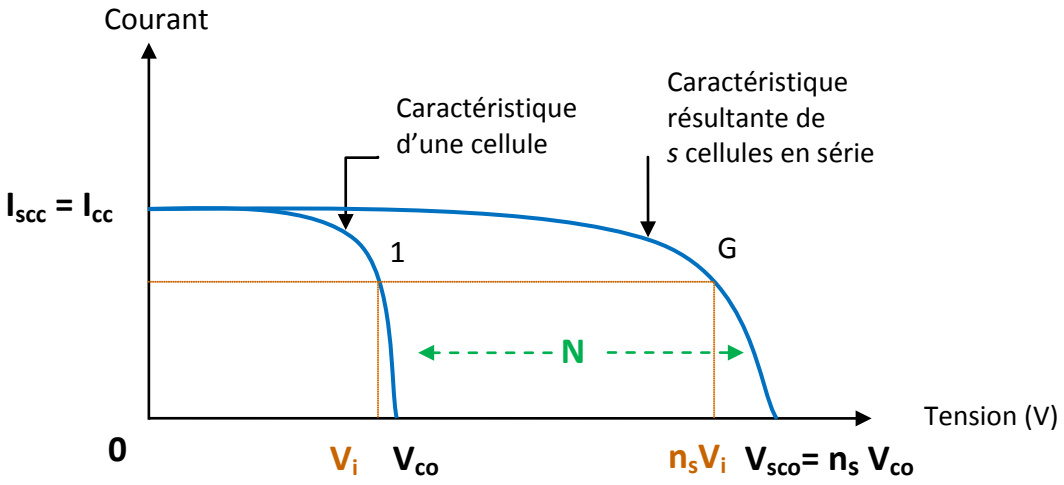


Figure 1.10. Caractéristique résultante d'un groupement en série de Ns cellules identiques.

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, comme l'illustre la figure 1.11

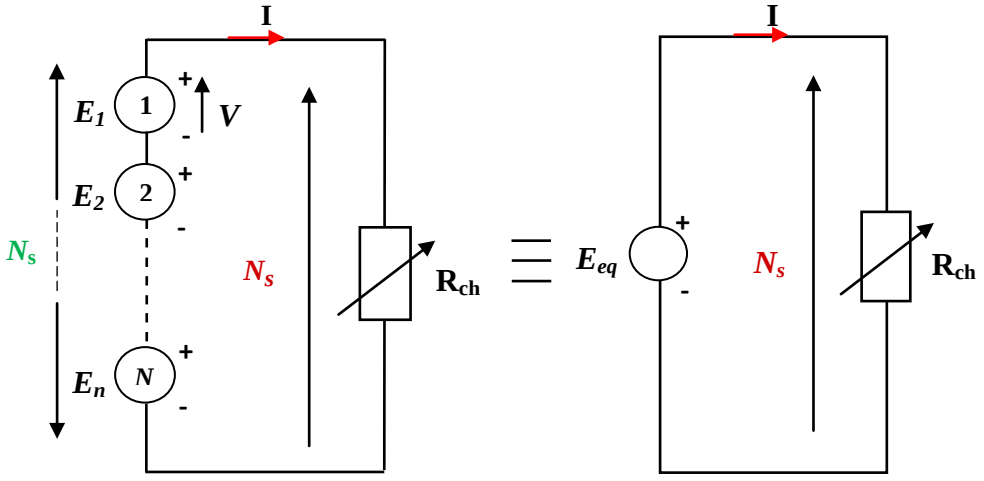


Figure 1.11. Association de Ns modules solaires en série.

I.4.5. Influence de l'association parallèle des cellules PV :

Les propriétés du groupement en parallèle des cellules sont duales de celles du groupement en série. Ainsi, dans un groupement de cellules connectées en parallèle, les cellules sont soumises à la même tension et la caractéristique résultante de groupement est obtenue par addition des courants à tension donnée. . La figure 1-12 montre la caractéristique résultante obtenue en associant en parallèles ns cellules identiques.

$$I_{pcc} = n_s I_{cc} \ et \ V_{pco} = V_{sco}$$

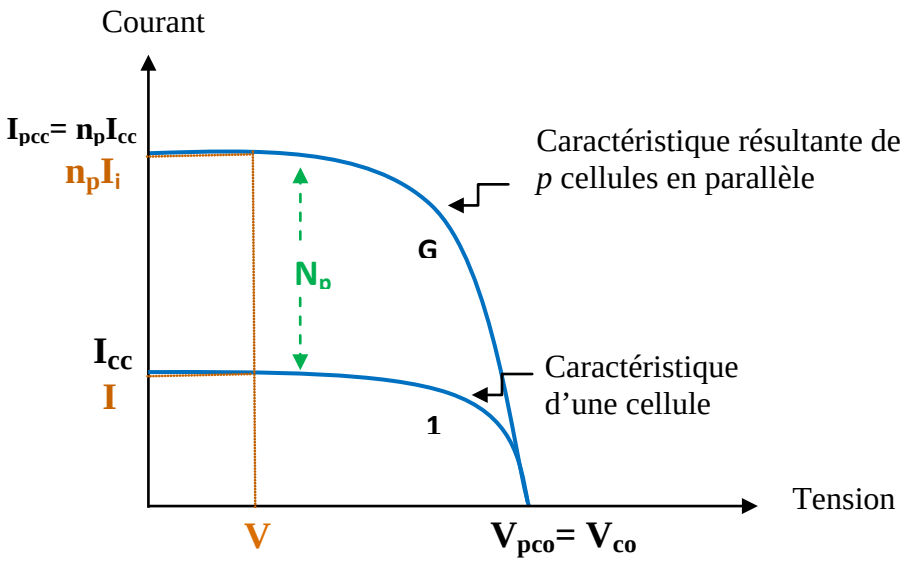


Figure 1. 12. Caractéristique résultante d'un groupement en parallèle de N_p cellules identiques.

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, Comme l'illustre la figure 1.13

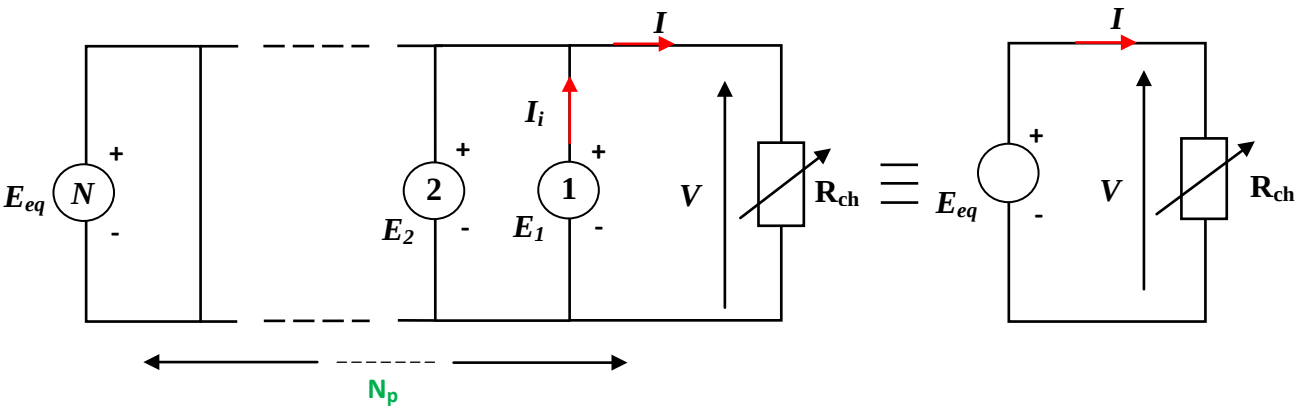


Figure.1.13 : Association de Np modules solaires en parallèle.

1.4.6. 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 [1] [4].

Comme l'illustre la figure 1.14

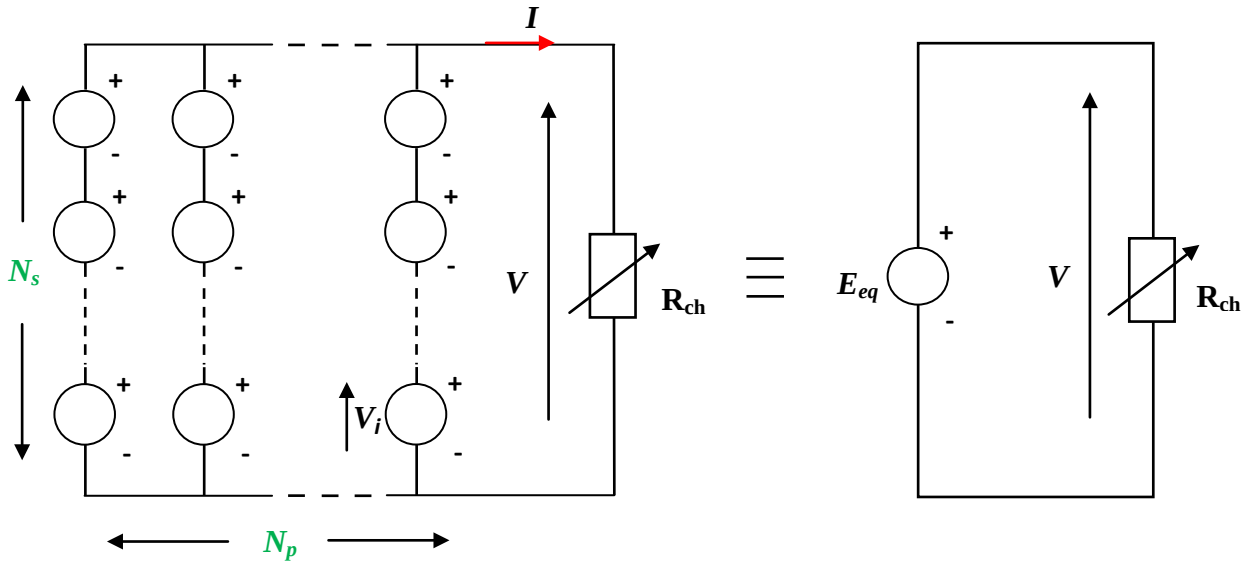


Figure 1.14. Association mixte Ns x Np modules solaires.

1.5. Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons présenté la modélisation d'une cellule photovoltaïque et On a étudié le principe de l'effet photovoltaïque, la cellule PV et ses paramètres. En suite on fait un rappel sur les systèmes PV et leurs performances, aussi les caractéristiques du générateur PV avec ses performances. Ainsi, l'influence de quelques paramètres sur ses caractéristiques.

Dans le prochain chapitre, on présente les convertisseurs DC-DC (hacheurs) et leurs commande MPPT pour chercher le point où la puissance du générateur photovoltaïque est maximale.

CHAPITRE 2

Les Convertisseurs (DC/DC) Et La Commande MPPT

Introduction :

Comme on a vu dans le chapitre précédent, les caractéristiques d'un panneau $I = f(V)$ et $P = f(V)$ solaire montrent bien que la puissance maximale générée dépend fortement de l'intensité des radiations solaires ainsi que la température.

En plus de ces dépendances, le module solaire ne peut générer sa puissance maximale que pour une certaine tension et courant de fonctionnement, la position de ce point de fonctionnement dépendant à son tour de l'ensoleillement et de la température ainsi que de la charge. Pour que le module fournisse sa puissance maximale disponible il faut une adaptation permanente de la charge avec le générateur photovoltaïque(GPV).

Cette adaptation pourra être réalisée par l'insertion d'un convertisseur DC-DC (hacheur) contrôlé par un mécanisme de poursuite «Maximum Power Point Tracking» (MPPT) [1] [2] [14] [20][21].

Le but de ce chapitre est l'étude des quelques types convertisseurs DC-DC, utilisés dans les systèmes photovoltaïques. Comme le hacheur Boost (survolteur) le hacheur Buck (dévolteur), et le hacheur mixte buck-boost (dévolteur-survolteur). Dans ce travail on fait le point sur le convertisseur élévateur de tension statique DC/DC (Boost), qui relie le module photovoltaïque à la charge. Ensuit, la description des méthodes de poursuite du point de puissance maximale, choisies pour la simulation, comme la méthode Perturb & Observe, « P & O' » [14].

2.1. Convertisseurs DC/DC (hacheur) :

Dans cette section, les principes de la conversion de la puissance de commutation sont introduits et les détails des différents circuits de convertisseurs DC-DC sont discutés. Les modèles mathématiques pour les convertisseurs buck, boost et buck/boost sont dérivés de représenter l'état stable du circuit et des comportements dynamiques.

Une commutation d'un convertisseur est constituée 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).

Si le dispositif semi-conducteur est bloqué, son courant est nul et donc la dissipation de puissance est égale à zéro. Si le dispositif est dans l'état saturé, la chute de tension à travers sera proche de zéro et donc la puissance dissipée sera très faible [14].

Dans cette section on va discuter les différents types de convertisseurs Continu-Continu (DC/DC) afin de les modéliser mathématiquement le convertisseur (boost) pour une utilisation facile de simulation.

2.1.1. Le hacheur survolteur (Boost) :

Le convertisseur Boost ou hacheur parallèle connu par le nom d'élévateur de tension, son schéma de principe de base est donné par la figure.2.1**.** 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_L)ainsi elle génère une tension qui s'ajoute à la tension de source, qui s'applique sur la charge à travers la diode[22],[4]

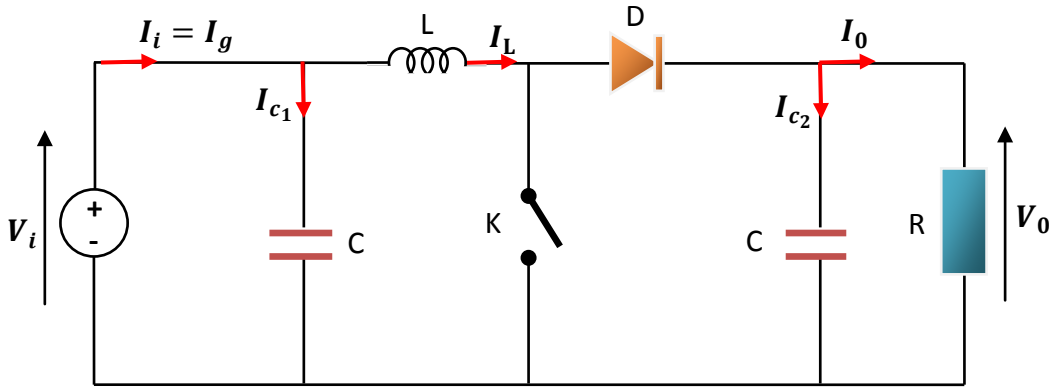


Figure 2.1. Circuit électrique de base du hacheur survolteur.

2.1.1.1. Modèle mathématique équivalent :

L'application des lois de Kirchhoff sur les deux circuits équivalents du convertisseur survolteur (voir figure 2.2) des deux phases de fonctionnement donne :

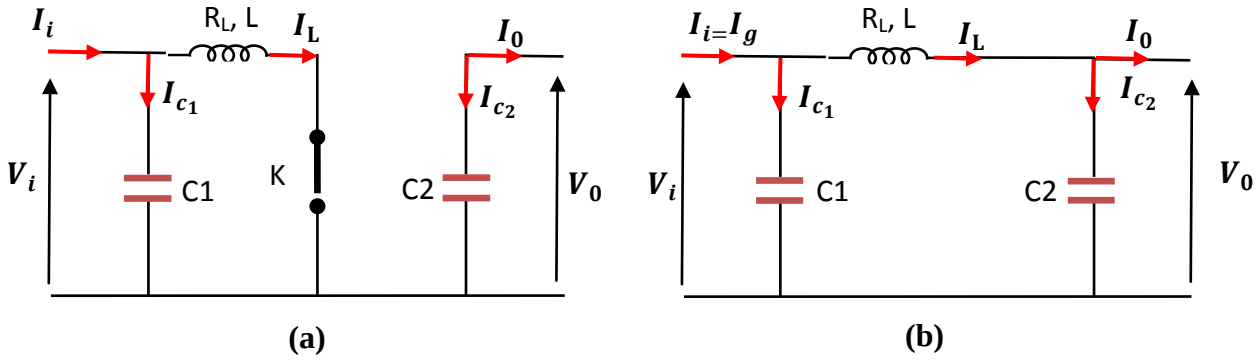


Figure 2.2. Schémas équivalents du hacheur survolteur, *(a) : K fermé, (b) : ouvert*

Pour la première période αTs :

$$\begin{cases} I_{C_1} = C_1 \frac{dV_i}{dt} = I_i - I_L \\ I_{C_2} = C_2 \frac{dV_0}{dt} = -I_0 \\ V_L = L \frac{dI_L}{dt} = V_i - R_L I_L \end{cases} \quad (2.1)$$

Pour la deuxième période (1-α) Ts :

$$\begin{cases} I_{C_1} = C_1 \frac{dV_i}{dt} = I_i - I_L \\ I_{C_2} = C_2 \frac{dV_0}{dt} = I_L - I_0 \\ V_L = L \frac{dI_L}{dt} = V_i - V_0 - R_L I_L \end{cases} \quad (2.2)$$

2.1.1.2. Modèle approximé du convertisseur Boost :

Les systèmes d'équations de base (II. (4.5.6)) et (II. (7.8.9)) représentent le convertisseur boost pour une période αT_S et $(1-\alpha)T_S$ respectivement. Le convertisseur oscillant entre ces deux états avec une fréquence élevée, nous devons trouver une représentation dynamique approximée valable pour les deux intervalles de temps. Pour cela nous considérons que la variation des variables dynamiques C_I, V_L est de forme linéaire, en d'autres termes nous pouvons faire une approche d'exponentielle par un segment $(e^{\varepsilon} \approx 1 + \varepsilon \; si \; \varepsilon \ll 1)$et ainsi la dérivée de ces grandeurs sera constante. Cette approche nous permet de décomposer l'expression de la valeur moyenne de la dérivée de la variable dynamique *x* sur les deux laps de temps αTs et (1-α) Ts:

$$< \frac{dx}{dt} > T_s = \frac{dx}{dt_{(\alpha T_S)}} + \alpha T_S + \frac{dx}{dt_{(1-\alpha)T_S}} (1-\alpha) T_s \quad (2.3)$$

Où $< \frac{dx}{dt} >$ est la valeur moyenne de la dérivée de *x* sur une période T_S. Cette relation est valide si:

$\frac{dx}{dt_{(\alpha T_S)}}$ et $\frac{dx}{dt_{(1-\alpha)T_S}}$ sont constants sur les périodes αT_s et $(1-\alpha)T_s$respectivement end'autres termes cette approximation est valable si les périodes αT_s et $(1-\alpha)T_s$ sont très faibles devant la constante de temps du circuit$C_1 R_G$, $C_2 Z$, L/R_L[4],[19].

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.2.3.

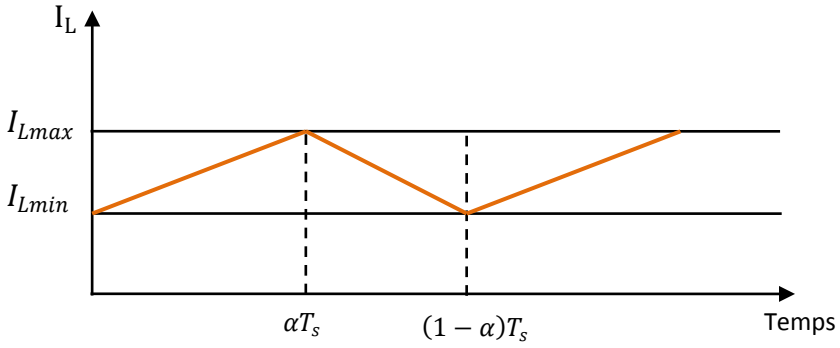


Figure 2.3. Allure des variables dynamiques

En appliquant la relation (II.7) sur les systèmes d'équations (II. 1, 2,3) et (II. (4, 5,6)), on obtient les équations qui régissent le système sur une période entière :

$$\begin{cases} I_{C_1} = C_1 \frac{dV_i}{dt} \alpha T_S = (I_i - I_L)\alpha T_S + (1-\alpha)T_S(I_i - I_L) \\ I_{C_2} = C_2 \frac{dV_0}{dt} \alpha T_S = -\alpha T_S I_0 + (1-\alpha)T_S(I_L - I_0) \\ V_L = L \frac{dI_L}{dt} \alpha T_S = (V_i - R_L I_L)\alpha T_S + (1-\alpha)T_S(V_i - V_0 - R_L I_L) \end{cases} \quad \textbf{(2.4)}$$

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

$$\begin{cases} I_L = I_i - C_1 \frac{dV_i}{dt} \\ I_0 = (1-\alpha)I_L - C_2 \frac{dV_0}{dt} \\ V_i = (1-\alpha)V_0 + L \frac{dI_L}{dt} + R_L I_L \end{cases} \quad \textbf{(2.5)}$$

Pour le dimensionnement des différents composants du circuit afin de diminuer les ondulations des courants et des tensions sans faire un surdimensionnement ce qui accroîtrait

Le poids et le prix des circuits, un calcul de ces composants en fonction des ondulations voulues est nécessaire. Cette remarque est très importante pour le dimensionnement de l'inductance L afin de respecter le courant admissible par le transistor MOSFET S, où dans le cas pratique les ondulations du courant I_L sont plus importantes par rapport aux autres ondulations.

En appliquant la relation $V_0 + L\frac{dI_L}{dt}$, et par l'approximation des segments d'exponentielles par des droites, la pente du courant I_L pendant la première période de fonctionnement est donnée par :

$$\frac{dI_L}{dt} = \frac{V_L}{L} = \frac{V_s - R_L I_L}{L} \quad \textbf{(2.6)}$$

A partir de la relation (3.14), la valeur crête à crête du courant I_L est :

$$I_{icc} = 2\Delta I_L = \frac{V_s - R_L I_L}{L}\alpha T_s \quad \textbf{(2.7)}$$

La valeur de l'inductance *L* à choisir pour certaine ondulation ΔI_L est:

$$L \approx \frac{V_i - V_0 - R_L I_L}{2\Delta I_L} \quad \textbf{(2.8)}$$

Pour le calcul des capacités $C1$et $C2$ on a:

$$\frac{dV_i}{dt} = \frac{I_{c1}}{C_1} = \frac{I_i - I_L}{C_1} \quad \textbf{(2.9)}$$

$$\frac{dV_0}{dt} = \frac{I_{c2}}{C_2} = \frac{-I_0}{C_2} \quad \textbf{(2.10)}$$

Les valeurs des ondulations crête à crête des tensions d'entrées et de sorties sont :

$$V_{c1cc} = 2\Delta V_{c1} = \frac{I_i - I_L}{C_1}\alpha T_s \quad \textbf{(2.11)}$$

$$V_{c2cc} = 2\Delta V_{c2} = \frac{-I_0}{C_2}\alpha T_s \quad \textbf{(2.12)}$$

Les valeurs des capacités C_1 et C_2 sont respectivement données par :

$$C_1 = \frac{I_i - I_L}{2\Delta V_{c1}}\alpha T_s \quad \textbf{(2.13)}$$

$$C_2 = \frac{-I_0}{2\Delta V_{c2}}\alpha T_s \quad \textbf{(2.14)}$$

2.1.1.3. Étude en régime continu:

Le régime continu est obtenu en éliminant les dérivées des variables dynamiques, et en remplaçant ces signaux par leurs valeurs moyennes.

Le système d'équations (II.11, 12,13) donne :

$$I_L = I_i \quad \textbf{(2.15)}$$

$$I_o = (1-\alpha)I_L \quad \textbf{(2.16)}$$

$$V_i = (1-\alpha)V_o \quad \textbf{(2.17)}$$

$$\boldsymbol{V_o = \frac{1}{1-\alpha} V_i} \quad \textbf{(2.18)}$$

Comme le présente la figure (2.4), lorsque l'interrupteur du transistor (S) est sur la position (on), le courant de l'inductance du hacheur augmente linéairement et à cet instant la diode (D) est bloquée (off). Et lorsque (S) tourne sur la position (off), l'énergie emmagasinée par l'inductance est dissipée dans le circuit (RC) bien que la diode (D) est passante. Les caractéristiques de tension et du courant de charge du convertisseur Boost dans le cas de la conduction continue sont décrites par la figure (2.4), comme suit :

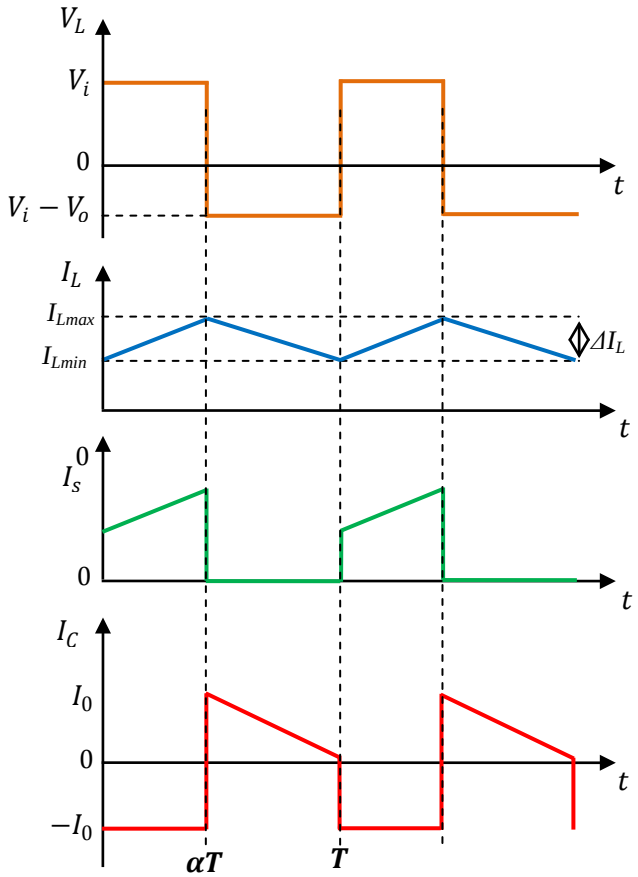


Figure 2.4. Caractéristique de la tension et du courant du hacheur survolteur (Boost).

2.1.2 Le hacheur dévolteur (Buck) :

La figure 2.5 présente le convertisseur buck ou convertisseur dévolteur (abaisseur de tension) ou hacheur série. Son rôle principal est de convertir sa tension d'entrée en une tension de sortie inférieure.

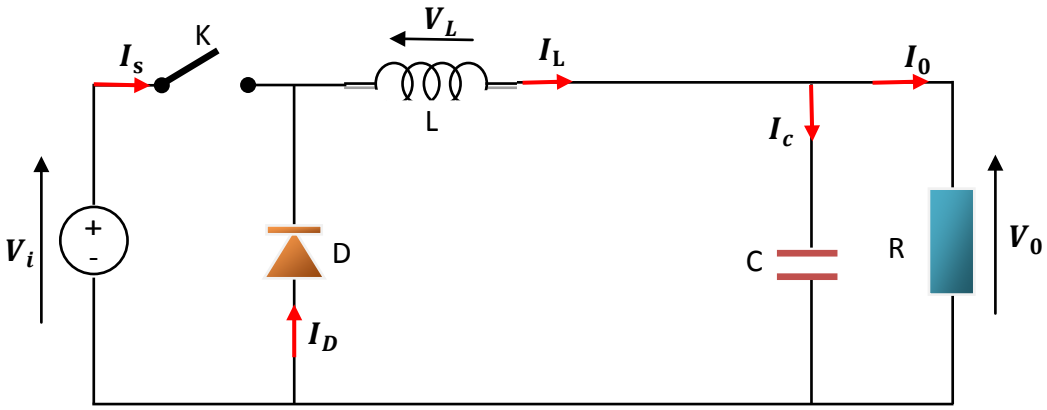


Figure 2. 5. Circuit électrique de base du hacheur dévolteur.

Les composantes clés sont l'inductance *L*, le commutateur (Transistor) (S), la diode (D,) et le condensateur *C*. Celui-ci se charge par le commutateur (S) et qui maintient la tension à ces bornes jusqu'à l'ouverture de qui fait décharger son énergie à travers la diode sur la charge pour un cycle de période de fonctionnement.

Le commutateur peut être un transistor MOSFET ou un IGBT qui peut se commuter sur deux positions, marche ou arrêt rapidement. La tension de la source doit être plus grande que la tension aux bornes de la charge. L'équation mathématique caractérisant le courant de l'inductance est donnée par l'équation suivante.

$$\frac{\delta I_L}{\delta t} = \frac{V_i - V_s}{L} \qquad \textbf{(2.19)}$$

I_L : Le courant dans l'inductance.

Le processus de commutation est décrit par la position de l'interrupteur (S). Dans le premier laps de temps (αT) le transistor est dans un état de saturation, alors l'inductance L se charge d'énergie avec augmentation du courant. Dans le deuxième laps de temps (α-1)T, l'inductance L libère cette énergie à la charge avec une diminution de courant I_L . En négligeant la chute de tension à travers la diode, le taux de changement du courant est donné par :

$$\frac{\delta I_L}{\delta t} = \frac{V_i}{L} \qquad \textbf{(II.20)}$$

Lorsque le courant de l'inductance ne se décroit pas à zéro avant la commutation du transistor, le convertisseur fonctionne dans le mode de conduction continu, comme illustré sur la figure (2.4), et dans ce cas, si la tension de charge dépend seulement de la tension de source et du rapport cyclique $\alpha = T_{on}/T$, la tension aux bornes de la charge :

$$\boldsymbol{V_o = \alpha . V_i} \qquad \textbf{(2.21)}$$

Dans le mode de conduction discontinu le courant de l'inductance s'annule dans un cycle de commutation entre le transistor (S) et la diode. Dans ce cas, la tension de charge dépend d'une manière plus complexe du rapport cyclique et le courant de la charge, la figure (2.4) montre comment la tension de charge varie avec le courant de charge. Les caractéristiques des courants et la tension représentant le fonctionnement du hacheur dévolteur sont données par la figure (2.6) :

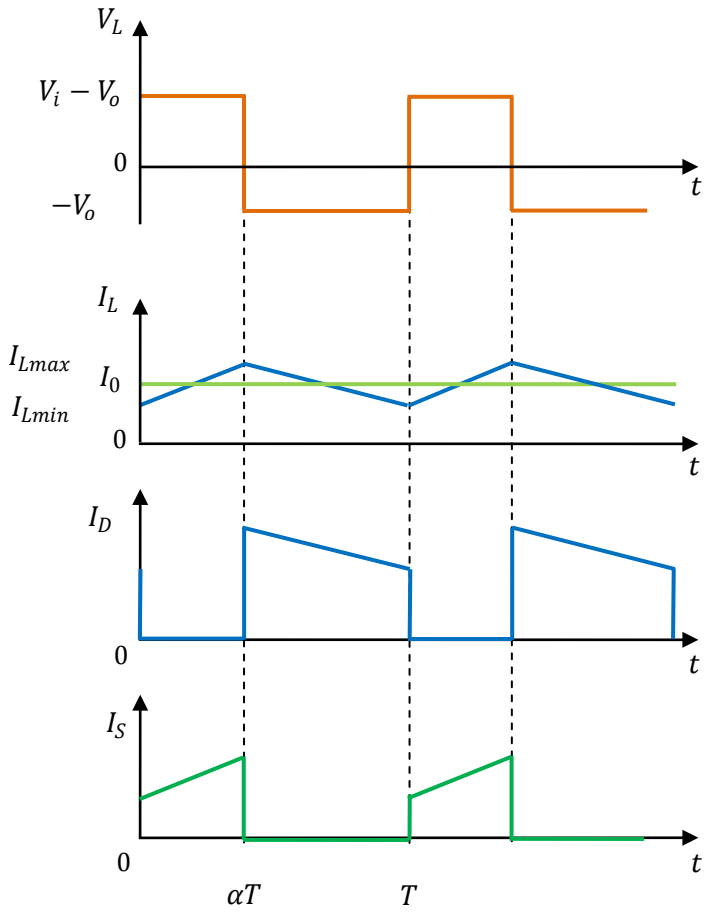


Figure 2. 6 : Caractéristique de la tension et du courant du hacheur dévolteur (Buck).

Dans le transistor et l'inductance d'un convertisseur Buck.

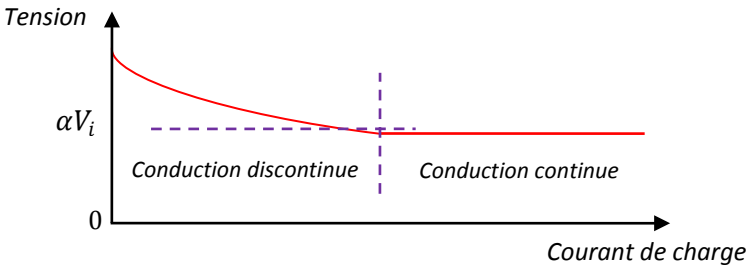


Figure 2. 7 : Variation de la tension de charge avec le courant de charge pour un Convertisseur Buck [1], [4], [14]

2.1.3. Le convertisseur Buck-Boost :

Le convertisseur dévolteur-survolteur combine les propriétés des configurations de dévolteur et de survolteur. Il peut être employé pour transformer idéalement n'importe quelle tension continue d'entrée en n'importe quelle tension continue désirée de sortie.

La figure 2.8 montre le schéma de Le circuit électrique de base du hacheur dévolteur-survolteur, et les caractéristiques du courant et de la tension de charge. Dans ce dispositif, la tension peut être augmentée ou diminuée selon le mode de commutation. Cependant, La tension de sortie est de signe opposé à la tension d'entrée.

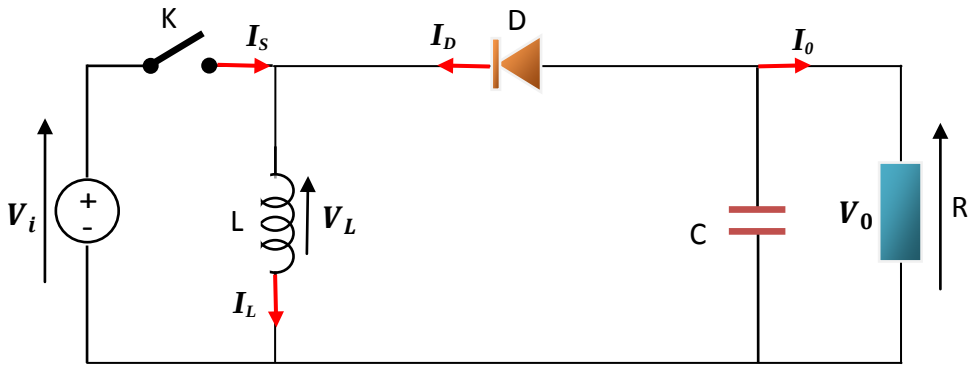


Figure 2. 8 *:* Circuit électrique de base du hacheur dévolteur-survolteur.

Tandis que, lorsque le transistor est sur la position (on) le courant dans l'inductance augmente, l'énergie est stockée ; et quand le commutateur tourne sur la position (off).

La tension à travers l'inductance est renversée et l'énergie stockée se transfert vers la charge via la diode. Dans ce cas, l'équation de la tension aux bornes de la charge décrivant le fonctionnement en conduction continue est donnée comme suit:

$$V_o = -\frac{\alpha}{1-\alpha} V_i \qquad (2.22)$$

Les caractéristiques des courants et la tension représentant le fonctionnement du hacheur dévolteur sont données par la figure (2.9).

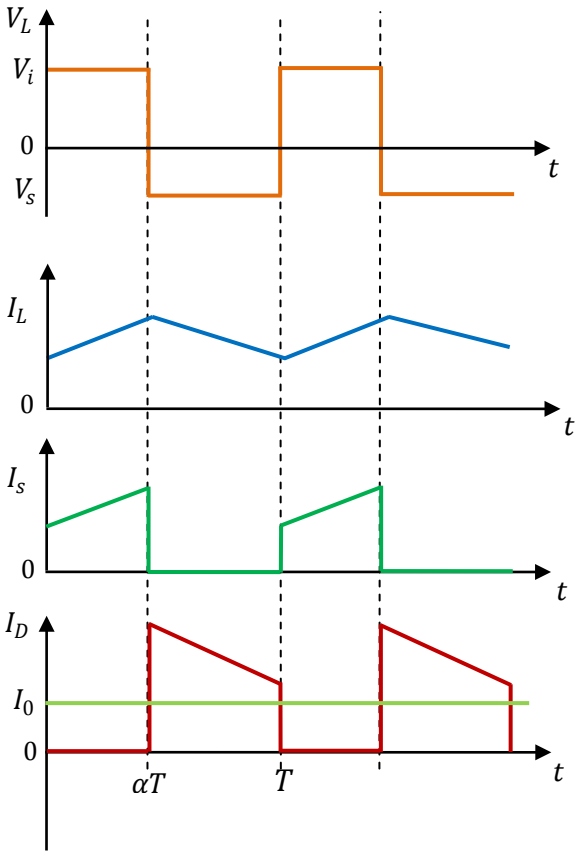


Figure 2.9. Caractéristique de la tension et du courant du dévolteur-survolteur (Buck-Boost).

2.2. Commandes MPPT des convertisseurs DC-DC:

Nous pouvons classer d'une manière générale les commandes du MPPT selon le type d'implémentation électronique: analogique, numérique ou mixte. Il est cependant plus intéressant de les classifier selon le type de recherche qu'elles effectuent et selon les paramètres d'entrée de la commande du MPPT. Bien qu'il existe un grand nombre de publications scientifiques qui présentent des commandes du MPPT plus ou moins complexes [17] [18] [20].

La figure (2.10) montre le diagramme synoptique d'un système photovoltaïque, avec un module MPPT qui a pour entrées la tension et le courant de sortie du module [6]. Dans la plupart des cas, on fait une maximisation de la puissance fournie par le module solaire.

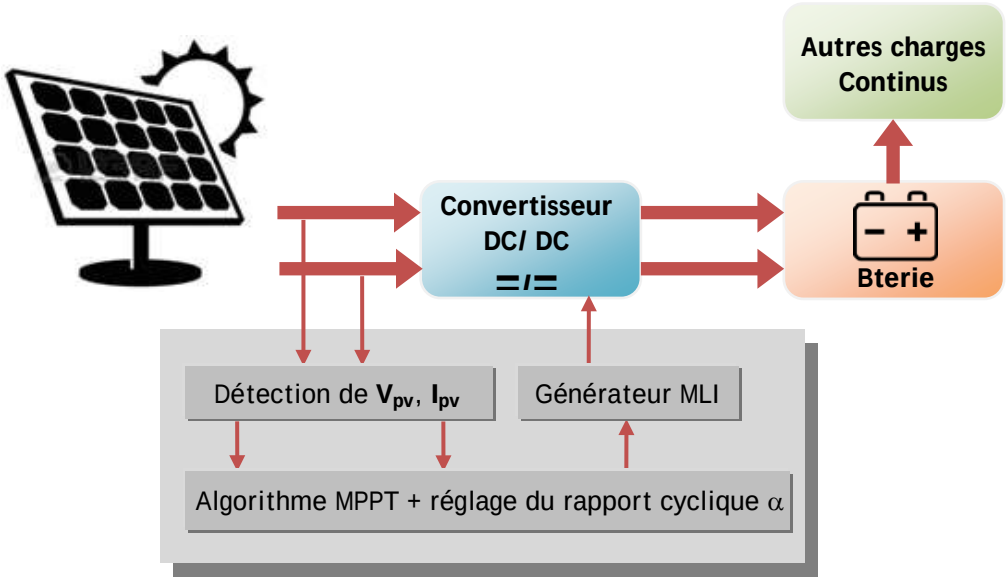


Figure 2.10. Schéma synoptique d'un système photovoltaïque avec MPPT.

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

La puissance extraite du module est calculée à partir des mesures de courant I et de tension V du module et la multiplication de ces deux grandeurs $P_{PV} = I_{PV} * V_{PV}$.

Ces mesures sont utilisées par diverses méthodes qui poursuivent le MPP réel de la ragée. [4][20][23].

2.2.1. Différents types de commandes MPPT à algorithmes performants:

Il existe dans la littérature plusieurs algorithmes MPPT. Les plus utilisés sont:

- Algorithme de la Tension Constante (CV, Constant Voltage)
- Algorithme du Courant constant (Constant Current)
- Perturbation et Observation (P&O, « Perturb and Observe »)
- Incrémente de Conductance (IncCond, « Incremental Conductance »)

Dans notre travail on s'intéresse par la méthode le plus utilisée en raison de sa simplicité et sa facilité de réalisation, c'est la méthode Perturbation et Observation (P&O), nous rappelons brièvement le principe de cette méthode.

2.2.1.1. Méthode de perturbation et d'observation (P&O):

La méthode perturbation et observation 'P&O', est la plus répandue dans le milieu industriel, car son algorithme est facile à implémenter. Comme son nom l'indique, cette méthode fonctionne en perturbant le système (la tension V_{pv} ou le courent I_{pv}) et observant l'impact sur la puissance à la sortie du GPV. Elle exige seulement des mesures de tension et du courant du panneau photovoltaïque V_{PV} et I_{PV} respectivement, elle peut dépister le point maximum de puissance même lors des variations de l'éclairement et la température. [2][4].

Comme nous avons dit, Le principe des commandes MPPT de type P&O consiste à perturber la tension V_{PV} d'une faible amplitude autour de sa valeur initiale et d'analyser le comportement de la variation de puissance P_{PV} (noté dP) qui en résulte, Ainsi, comme l'illustre la figure (2.11), on peut déduire que si une incrémentation positive de la tension V_{PV} engendre un accroissement de la puissance P_{pv}, cela signifie que le point de fonctionnement se trouve à gauche du PPM.

Si au contraire, la puissance décroît, cela implique que le système a dépassé le PPM. Un raisonnement similaire peut être effectué lorsque la tension décroît. A partir de ces diverses analyses sur les conséquences d'une variation de tension sur la caractéristique P_{PV} (V_{PV}), il est alors facile de situer le point de fonctionnement par rapport au PPM, et de faire converger ce dernier vers le maximum de puissance à travers un ordre de commande approprié.

En résumé, si suite à une perturbation de tension, la puissance PV augmente, la direction de perturbation est maintenue. Dans le cas contraire, elle est inversée pour reprendre la convergence vers le nouveau PPM.

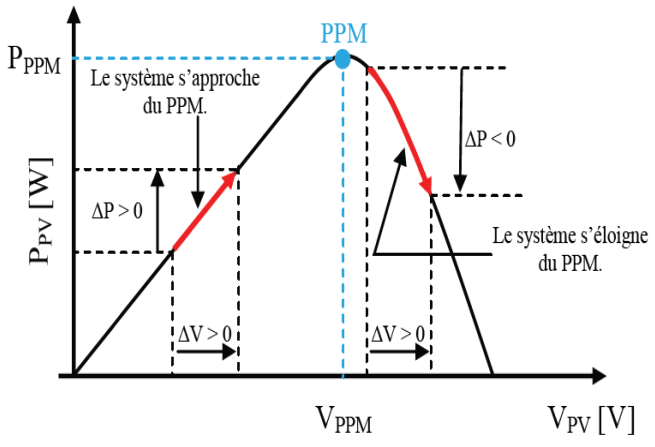


Figure 2.11. Caractéristique P_{PV} (V_{PV}) d'un panneau solaire.

La figure (2-12) représente l'organigramme de l'algorithme de P&O associé à une commande MPPT de type P&O, où l'évolution de la puissance est analysée après chaque perturbation de tension. Pour ce type de commande, deux capteurs (courant et tension du GPV) sont nécessaires pour déterminer la puissance du PV à chaque instant. Cet algorithme est résumé sur l'organigramme suivant.

À chaque cycle V_{pv} et I_{pv} sont mesurés pour calculer $P_{PV}(k)$.Cette valeur de $P_{PV}(k)$ est comparée à la valeur $(k-1)$ calculée au cycle précédent.

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} et ainsi perturbée à chaque cycle de MPPT.

Quand le point de puissance maximale est atteint, oscille autour de la valeur optimale. Ceci cause une perte de puissance qui augmente avec le pas de l'incrémentation de la perturbation. Si ce pas V_{OP} 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 [1][4].

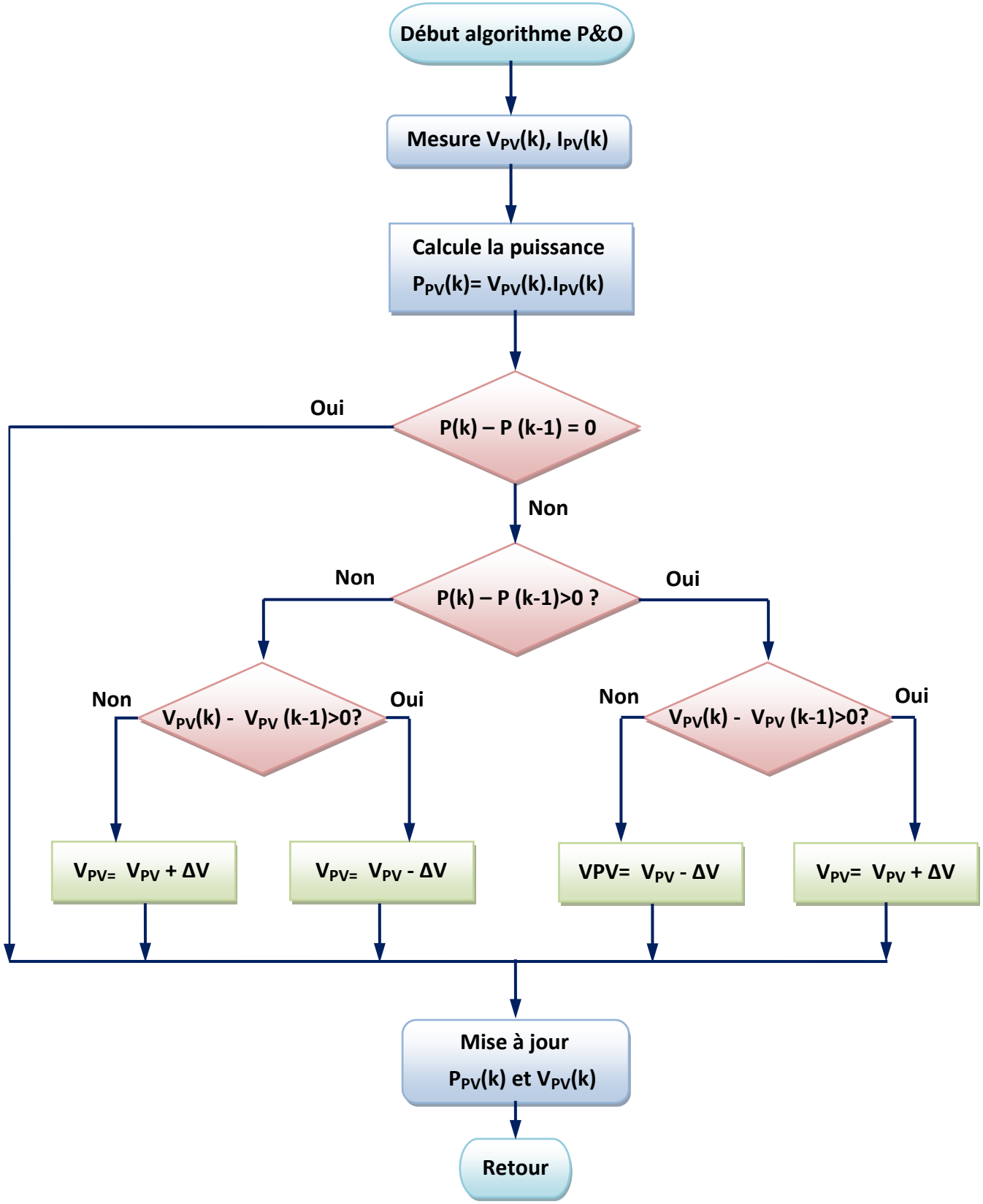


Figure 2.12. Algorithme de la méthode de Perturbation et d'Observation (P & O) du MPPT.

L'inconvénient de la méthode P&O simple est lorsqu'une augmentation brutale de l'ensoleillement est produite, on aura une augmentation de la puissance du panneau.

L'algorithme précédent réagit comme si cette augmentation est produite par l'effet de perturbation précédente, alors il continu dans la même direction qui est une mauvaise direction, ce que l'éloigne du vrai point de puissance maximale.
Ceci cause un retard de réponse lors des changements soudains de fonctionnement et des pertes de puissance.

Pour remédier à l'inconvénient majeur de la déviation de cette méthode lors de la recherche du MPP durant l'augmentation rapide des niveaux d'insolation, une version améliorée de cet algorithme est proposée [4], [14], [24].

D'autre par il existe des inconvénients de cette technique, tel que celui du cas de changement rapide des conditions atmosphériques (nuage mobile) ; dans ce cas, cette méthode peut déplacer le point de fonctionnement dans une direction fausse par rapport à l'ondulation.

2.3. Conclusion:

Dans ce chapitre on a vu quelques topologies de base des convertisseurs continus-continus (DC-DC), convertisseurs (buck, boost et buck/boost) et on a présenté les méthodes MPPT basées sur contre réaction de puissance, comme la méthode de perturbation et observation. Cette commande MPPT utilise directement la tension et le courant du panneau photovoltaïque pour chercher le point de fonctionnement correspondant à la puissance maximale.

Il existe d'autres méthodes MPPT basés sur l'intelligence artificielle comme, la logique floue type-1 et le type-2 qui serons traités dans le chapitre suivant.

CHAPITRE 3

Commande MPPT Par L'intelligence Artificielle

Introduction :

Comme nous avons vu dans le deuxième chapitre qu'il y a un nombre important de technique de commande MPPT ont été élaboré depuis les années 70, commençant par des techniques simples comme les contrôleurs MPPT basés sur le retour d'état de la tension et du courant [4, 48], aux contrôleurs plus performant utilisant des algorithmes pour calculer MPP du MLI comme les la technique que nous avons vu dans le deuxiéme chapitre (P&O).

Ces dernières années d'autres techniques de commande plus robuste ont était associées à la commande MPPT telle que l'intelligence artificielle (logique floue type1 et type2).

Afin d'augmenter le rendement des panneaux solaires [4]. Dans ce chapitre, nous allons présenter en bref un rappel sur les ensembles flous et un aperçu général sur la logique floue ainsi que son application pour l'optimisation d'un système photovoltaïque [25], et l'étude des commandes MPPT utilisant un contrôleur flou type1 et type2, dans lequel les algorithmes génétiques sont employés pour optimiser les paramètres du controleur [26] pour améliorer l'efficacité de conversion d'énergie PV.

3.1. Logique floue type-1:

La logique floue est une extension de la logique classique dans le but de raisonner sur des connaissances imparfaites. Le terme d'ensemble flou apparaît pour la première fois en 1965 lorsque le professeur Lotfi A. Zadeh, de l'université de Berkeley aux USA.

L'auteur eut l'idée d'élargir la notion d'appartenance, normalement traduite par « oui » ou « non » aux critères « peut être », « sans doute », « à peu prés »…etc. Il a ainsi fixé la notion de sous ensemble flou et a fourni le point de départ d'une nouvelle théorie et publie un article intitulé: la théorie des ensembles flous (*Fuzzy sets*) En 1973 [49, 29]. Il a réalisé depuis de nombreuses avancées théoriques majeures dans le domaine et a été rapidement accompagné par de nombreux chercheurs développant des travaux théoriques [28]. En 1974, Mamdani (Université de Londres) réalise un contrôleur flou expérimental pour commander un moteur à vapeur.

La logique floue a formalisé la représentation et le traitement de connaissance imprécises ou approximatives afin de traiter des systèmes de grande complexité ou mal connu. Ce dernier a montré de plusieurs années sa fiabilité et sa capacité d'adaptation aux problèmes industriels concrets [27]. Dans les années 80, plusieurs applications commencent à immerger (notamment au Japon). Elle a été utilisée dans plusieurs domaines variés de contrôle et de régulation [50]. A partir 1990, c'est en Allemagne que des applications apparaissent en grand nombre ainsi qu'à une

moindre échelle aux USA. Enfin en France, la logique floue devient aujourd'hui une réalité [31].

Brièvement, la logique floue, est une extension de la logique booléenne en se basant sur sa théorie mathématique des ensembles flous, qui est une généralisation de la théorie des ensembles classiques. 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.

3.2. Théorie des ensembles et les fonctions d'appartenance de flous type -1:

Un ensemble flou A sur un univers de discours U est caractérisé par une fonction d'appartenance $\mu_A(x)$ qui prend ses valeurs sur l'intervalle [0,1]. Il peut être représenté comme un ensemble de paires ordonnées de l'élément générique x et son niveau (degré) d'appartenance :

$$A = \{(x, \mu_A(x) / \ x \in U)\} \quad \textbf{(3.1)}$$

Ensemble flou — *Fonction D'appartenance* (FA) — *Univers de discours*

Quand l'univers de discours U est un ensemble continu (Exp : nombres réels), le sous ensemble flou A est écrit comme suit :

$$A = \int_U \mu_A(x)/x \quad \textbf{(3.2)}$$

Quand U est discret, A s'est écrit comme suit:

$$A = \sum_U \mu_A(x)/_x \quad \textbf{(3.3)}$$

Les formes les plus couramment utilisées pour les fonctions d'appartenance sont les formes triangulaires, trapézoïdales ou Gaussiennes. [29]

La figure 3.1 représente la fonction d'appartenance sous forme gaussienne, $\mu_A(x)$ est contraint d'être entre 0 et 1 pour x∈X [30].

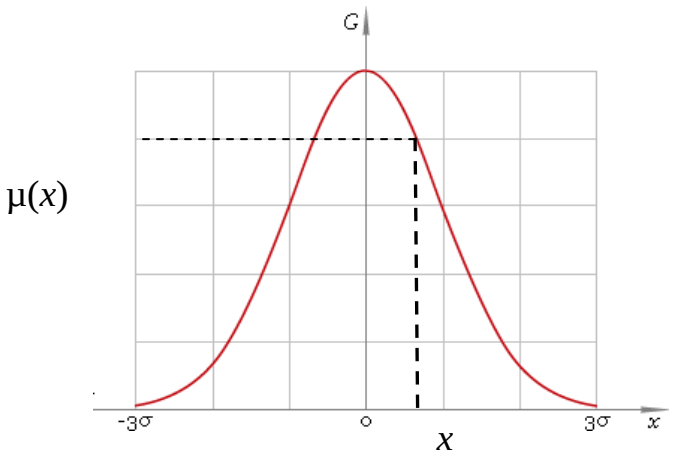


Figure 3.1. Fonctions d'appartenance floue type-1 gaussienne

3.3. Description et structure d'une commande par la logique floue:

Le principe d'une commande floue se base sur des variables d'entrées et le cycle de changement vers des variables de sorties.

On peut distinguer quatre parties principales constituant la structure d'un régulateur floue

Voir la figure (3.2) [31] :

- la fuzzification.
- la méthode d'inférence
- la Base de de règles
- la défuzzification

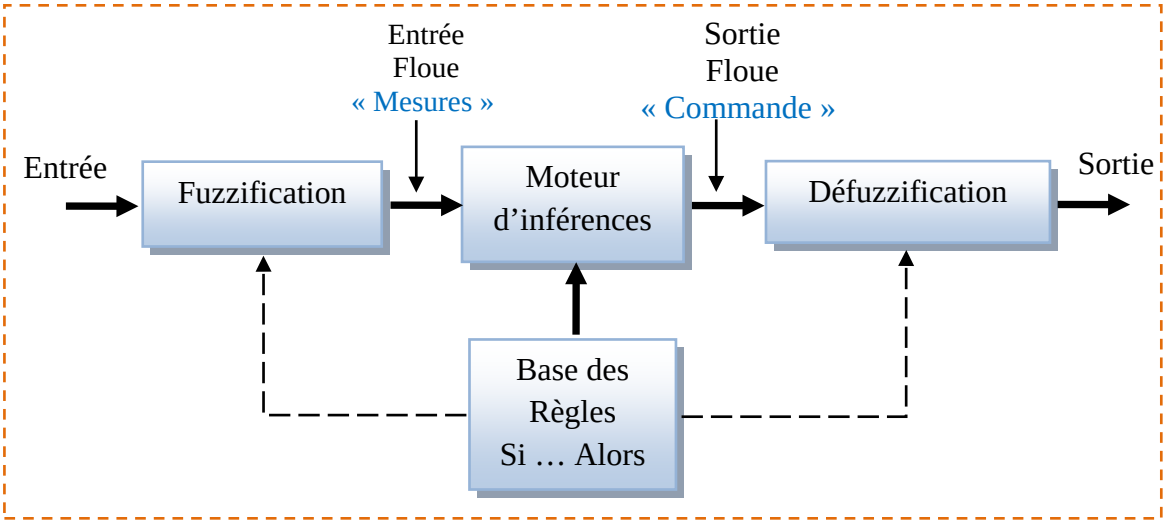


Figure.3.2. Structure générale d'un régulateur par logique floue

3.3.1 la fuzzification :

La fuzzification consiste à déterminer le degré d'appartenance de chaque variable d'entrée à chaque état. Elle transforme la grandeur physique (*mesurée*) d'entrée en une grandeur floue, utilisée pour activer les règles qui sont exprimées par des variables linguistiques associées à des ensembles flous [32].

c-a-d :

La fuzzification est l'étape qui permet de transformer une grandeur mesurée sur le processus en un ensemble flou. C'est l'opération de projection des variables physiques réelles sur des ensembles flous caractérisant les valeurs linguistiques prises par ces variables.

3.3.2 Inférence floue ou Moteur d'inférence (Mécanisme d'inférence) :

Le moteur d'inférence floue transforme, à l'aide des techniques de raisonnement flou, la partie floue issue de la fuzzification en une nouvelle partie floue. En fait, le moteur d'inférence combine les règles floues, en utilisant le principe de la logique floue, pour effectuer une transformation à partir des ensembles flous dans l'espace d'entrée vers des ensembles flous dans l'espace de sortie.

Dans les inférences de régulateur par logique floue interviennent les opérateurs « et, ou ». L'opérateur « et » s'applique aux variables à l'intérieur d'une règle tandis que l'opérateur « ou » lie les différentes règles.

Il existe plusieurs méthodes pour réaliser ces opérateurs dans une inférence et qui s'appliquent aux fonctions d'appartenance à savoir: [31]

- Méthode d'inférence max-min (Mamdani 1974) :

$$\mu_R(x,y) = max\big(\mu_A(x), \mu_B(x)\big) \text{ et } \mu_R(x,y) = min\big(\mu_A(x), \mu_B(x)\big) \quad \textbf{(3.4)}$$

- Méthode d'inférence max-produit (Larsen 1980) :

$$\mu_R(x,y) = \mu_A(x).\mu_B(x) \quad \textbf{(3.5)}$$

- Méthode d'inférence somme-produit (Sugeno) :

$$\mu_R(x,y) = \mu_A(x) + \mu_B(x) - \mu_A(x).\mu_B(x) \quad \textbf{(3.6)}$$

3.3.3 Base de règles floues (Règles d'inférence):

La base de règles floues, ou base de connaissances, contient des règles floues décrivant le comportement du système, elle est le cœur du système entier dans le sens où tous les autres composants sont utilisés pour interpréter et combiner ces règles afin de former le système final. Ces règles peuvent être fournies par un expert ou peuvent être extraites de données numériques.

Elle donne la relation qui existe entre les variables d'entrées (exprimées comme variables linguistiques) et la variable de sortie (également exprimée comme variable linguistique).

Les règles sont de la forme:

Si "*Condition*" **Alors** "*Action*" (Si "*prémisse*" Alors "*Conclusion ou conséquence* de la règle ").
Opération: **Si** Condition **Et** Condition', **Alors** Conséquence.

$$\textbf{Si}\ \underbrace{u\ est\ A}_{\textit{prémisse}}\ \textbf{Et}\ u'\ est\ A\ \ \textbf{Alors}\ \underbrace{v\ est\ B}_{\textit{Conclusion}}$$

A, B sont des termes linguistiques correspondants à des ensembles flous définis sur leurs univers de discours respectifs U, V.

u, v sont deux variables linguistiques prenant leurs valeurs linguistiques sur U et V.

3.3.4 Défuzzification :

A la fin de l'inférence, La sortie issue de l'inférence est une grandeur floue, donc une opération défuzzification jouant le rôle de convertisseur des valeurs floues en valeurs précises nécessaire pour l'état du processus.

Plusieurs stratégies de défuzzification existent, les plus utilisées sont:

- Méthode du maximum
- Méthode de la moyenne des maximums
- La méthode de la hauteur
- Méthode du centre de gravite (très souvent employée) [32]

la méthode la plus souvent rencontrée étant le calcul du « centre de gravité » de l'ensemble flou.

Dans cette méthode la valeur non floue de la sortie sera le centre de gravité de la valeur obtenue par agrégation. Elle est donnée par : [33], [31]

$$Z_0 = \frac{\sum_{i=1}^{n} Z_i \mu_c(Z_i)}{\sum_{i=}^{n} \mu_c(Z_i)} \quad \textbf{(3.7)}$$

n: représente le nombre des niveaux quantifiés de la sortie. [32]

μ: Degré d'appartenance de sortie *x*

Z_i : Surface du sous-ensemble i

3.4 logique floue type-2:

La notion des ensembles flous de type-2 a été proposée par Lotfi Zadeh [34] comme extension u concept des ensembles flous ordinaires dits ensembles flous de type-1 (EFT-1). Un ensemble flou type-2 est caractérisé par une fonction d'appartenance, c.-à-d. la valeur d'appartenance de chaque élément de l'ensemble est un nombre flou dans [0,1]. Les ensembles flous type-2 est utilisés dans les situations où l'incertitude se présente (par exemple l'incertitude sur la forme des fonctions d'appartenance). [34] Donc, les ensembles flous type-1 peuvent être considérés comme une approximation du premier ordre de l'incertitude, alors que les ensembles flous type-2 seront considérés comme approximation du deuxième ordre. Dans ce chapitre nous allons présenter les principes de base et le fondement théorique de la logique floue type-2.

3.5 Théorie des ensembles et les fonctions d'appartenance de flous type-2:

On se basera sur les définitions des ensembles flous type-1, afin de définir les ensembles flous type-2 où le degré d'appartenance de chaque élément de ces ensembles est un ensemble flou type-1. Dans ce qui vient on va présenter des définitions des ensembles flous type-2 et quelques importants concepts associés [35].

3.5.1 Les définitions : [36], [37]

- Un ensemble flou type-2, noté $\tilde{A}$ dans un univers de discourt X est caractérisé par une fonction d'appartenance floue, notée $\mu_{\tilde{A}}(x)$, telle que :

$$\tilde{A} = \{((x,u), \mu_{\tilde{A}}(x,u))/\forall x \in X, \forall u \in J_x \subseteq [0,1]\} \quad \textbf{(3.8)}$$

$$avec\ 0 < \mu_{\tilde{A}}(x,u) < 1$$

- A chaque valeur de x, notée $x = x'$, le plan bidimensionnel dont les axes sont u et $\mu_{\tilde{A}}(x,u)$ est appelé tranche verticale (vertical slice) de $\mu_{\tilde{A}}(x,u)$ comme il est illustré sur la figure 3.3 suivante.

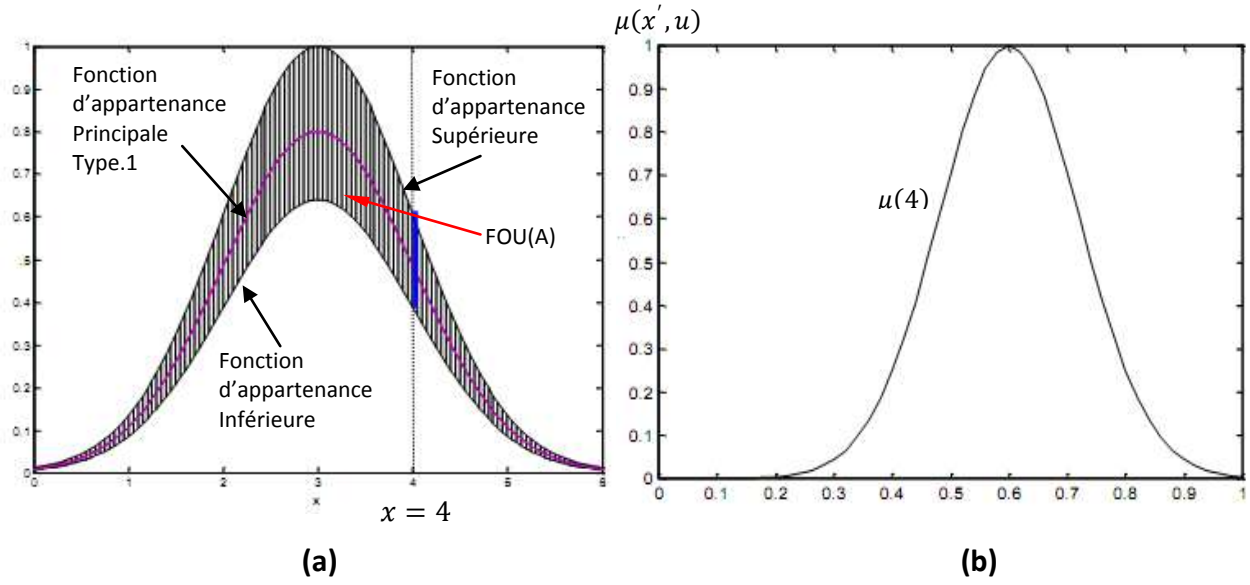


Figure.3.3 (a). Représentation schématique d'un ensemble flou Gaussien de type-2. (b). Les appartenances secondaires sont représentées dans, où on remarque qu'ils sont gaussiennes.

Donc pour $\forall x' \in X$ et $\forall u \in J_{x'} \subseteq [0,1]$, on a:

$$\mu_{\tilde{A}}(x = x', u) \simeq \mu_{\tilde{A}}(x') = \int_{u \in J_{x'}} f_{x'}(u)/u \quad J_{x'} \subseteq [0,1] \qquad \textbf{(3.9)}$$

Où $0 \leq f_{x'}(u) \leq 1$

- Le domaine de la fonction d'appartenance secondaire est appelé *appartenance primaire* de x noté J_x tel que $J_x \subseteq [0,1]$ $\forall x \in X$.
- Les fonctions d'appartenance supérieure et inférieure de $\tilde{A}$ sont deux fonctions d'appartenance type-1 qui représentent les frontières du *FOU* (figure (III.3.a)). La fonction $FOU(\tilde{A})$, et est notée $\overline{\mu}_{\tilde{A}}(x)$, $\forall x \in X$, et la fonction d'appartenance inférieure correspond à la borne inférieure de $FOU(\tilde{A})$ et est notée $\underline{\mu}_{\tilde{A}}(x)$, $\forall x \in X$:

$$\overline{\mu}_{\tilde{A}}(x) = \overline{FOU(\tilde{A})} \quad \forall x \in X \qquad \textbf{(3.10)}$$

$$\underline{\mu}_{\tilde{A}}(x) = \underline{FOU(\tilde{A})} \quad \forall x \in X \qquad \textbf{(3.11)}$$

- L'incertitude dans la fonction d'appartenance de l'ensemble flou type-2, $\tilde{A}$ consiste en une région bornée appelée l'empreinte d'incertitude (Footprint Of Uncertainty (FOU). C'est

l'union de toutes les fonctions d'appartenance primaires (la surface sombre dans figure (III.3.a) :

$$FOU(\tilde{A}) = \cup_{x \in X} J_x \quad \textbf{(3.12)}$$

- L'amplitude de la fonction d'appartenance secondaire est appelée le degré d'appartenance secondaire. Dans (II.3), $f_x(u)$ est le degré d'appartenance secondaire figure (III.3.b).

3.5.2. Représentation des ensembles flous type-2:

Les ensembles flous type-2 les plus utilisés sont de forme intervalle, Gaussienne, et triangulaire. Le nom du type est pris de la forme du degré d'appartenance primaire. Notons qu'il n'est pas nécessaire que la fonction d'appartenance principale soit de la même forme de type d'ensemble utilisé.

L'ensemble type-1 réduit d'un ensemble flou type-2 est le centroïde de l'ensemble flou type-2 du FLS ; par conséquent, chaque élément de l'ensemble de type réduit est un centroïde d'un certain ensemble encastré type-1.

Le degré d'appartenance de chaque point est un ensemble flou type-1 gaussien dont le domaine de définition est inclus dans l'intervalle[1, 0]. La figure (3.4) schématise une fonction d'appartenance floue type-2 avec une zone d'incertitude [35].

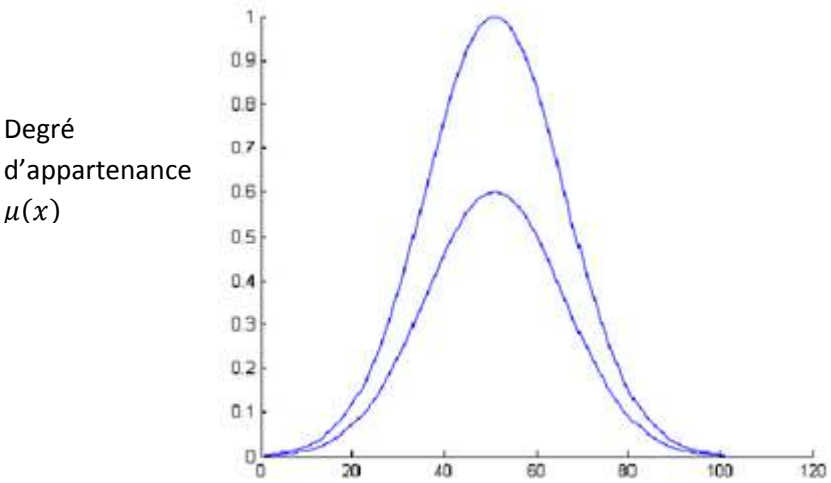


Figure 3.4. Fonction d'appartenance d'un ensemble flou type-2

3.5.3 Systèmes flous de type-2 :

3.5.3.1 Structure d'un système flou de type-2 :

La figure 3.5 montre la structure de base d'un système flou de type-2. Elle est très similaire à la structure d'un système flou de type-1 [34].

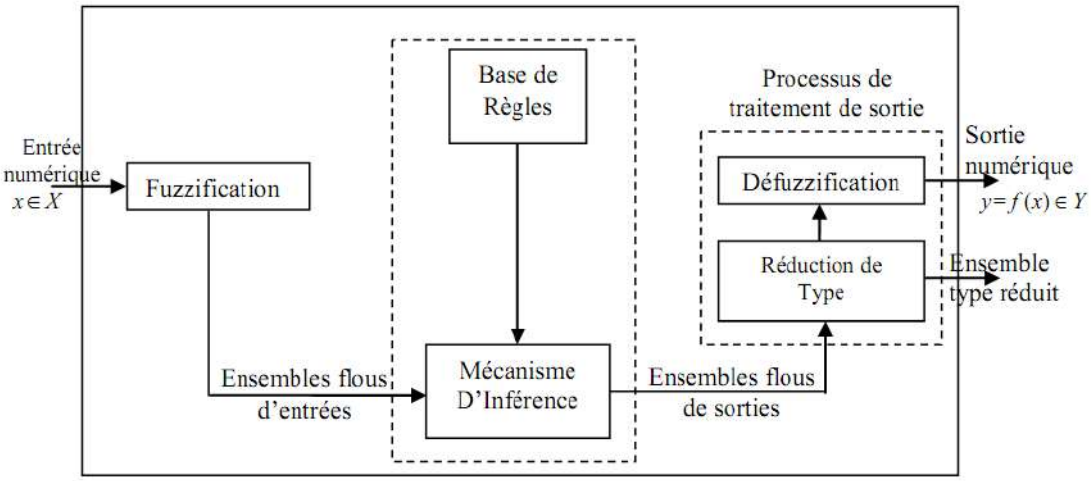


Figure.3.5. Structure de base d'un système flou de type-2.

Pour un système FLS de type-1, le block traitement de sortie se réduit seulement à la défuzzification. Quand une entrée est appliquée à un FLS de type-1, le mécanisme d'inférence calcul un ensemble flou de sortie type-1 correspondant à chaque règle. La défuzzification calcul alors une sortie réelle à partir de ces ensembles flous délivrés par chaque règle . Pour un système flou type-2, chaque ensemble de sortie d'une règle est de type-2.

Dans ce contexte, on trouve des versions généralisées des méthodes de défuzzification qui peuvent nous fournir un ensemble de type-1 à partir des ensembles de sorties de type-2. On appelle cette opération «Réduction de type » au lieu de défuzzification , et on appelle l'ensemble résultant de
type-1 « Ensemble réduit ». Le défuzzificateur dans un système flou type-2 peut alors défuzzifier l'ensemble réduit pour obtenir une sortie ordinaire non floue pour le système flou type-2.

3.5.3.2. Fuzzification :

Le fuzzifier mappe des entrées croquantes dans des ensembles flous de type 2 qui activent l'inférence moteur.

3.5.3.3. Base de Règle :

Il régit dans T2FLS reste le même que dans T1FLS, mais les antécédents et Les conséquences sont représentées par des ensembles flous de l'intervalle de type 2.

3.5.3.4. Mécanisme d'inférence:

Le bloc d'inférence affecte les entrées floues aux sorties floues en utilisant les règles dans la règle Base et les opérateurs tels que l'union et l'intersection. Dans les ensembles flous de type 2, les opérateurs Join (U) Et Meet (π), Qui sont de nouveaux concepts dans la théorie de la logique floue, sont utilisés au lieu de l'union et opérateurs d'intersection. Ces deux nouveaux opérateurs sont utilisés dans les fonctions d'adhésion secondaire.

3.5.3.5. Le module de traitement de la sortie :

Le module de traitement de la sortie se compose de deux blocs , le réducteur de type et l'interface de défuzzification. Les méthodes de réduction de type donnent un EFT-1 à partir de l'EFT-2 obtenu à la sortie du mécanisme d'inférence. L'ensemble résultant obtenu par la réduction de type sera par la suite défuzzifié pour obtenir une sortie numérique (déterministe).

3.5.3.6. Réduction de type :

Dans un système flou type-1, où les ensembles de sortie sont des ensembles flous type-1, nous effectuons la défuzzification dans le but d'obtenir une valeur numérique (ensemble type-0) représentant la combinaison des ensembles de sortie.

Dans le cas du type-2, les ensembles de sortie sont des ensembles de type-2; donc nous devons utiliser des versions étendues des méthodes de déffuzification de type-1 appelées la réducteur de type [38]. Cette opération va transformer l'ensemble flou type-2 résultant en un

ensemble flou type-1 appelé ensemble type réduit, qui sera défuzzifié par la suite. Cet ensemble type réduit résultant prend en considération plus d'information au sujet des incertitudes des règles que la valeur défuzzifiée (un nombre).

Parmi les méthodes de réduction de type utilisées on cite :

- La réduction de type par le centre de gravité.
- La réduction de type par la hauteur.
- La réduction de type par le centre des ensembles.

Il existe deux méthodes communes pour Opération de réduction de type dans l'intervalle T2FLS: l'une est l'itération de Karnik-MendelL'algorithme, et l'autre est la méthode des limites d'incertitude de Wu-Mendel. Ces deux méthodes sont En fonction du calcul du centroïde.

3.5.2.7. Défuzzification :

A la fin de l'étape de la réduction de type, on obtient un EFT-1, type réduit, et puisque les entrées du système à commander sont des valeurs précises, alors il est nécessaire de transformer l'ensemble type réduit en une valeur numérique bien déterminée [37]. Parmi les méthodes utilisées pour la défuzzification, on cite la défuzzification par le centre de gravité.

La façon la plus naturelle de faire ceci est de trouver le centre de gravité de l'ensemble type réduit. Le calcul du centre de gravité est équivalent à trouver une moyenne pondérée des sorties de tous les ensemble flou type-1 imbriqués dans le système flou type-2, où les poids correspondent aux appartenances dans l'ensemble type réduit.

Si l'ensemble type réduit Y, pour une entrée x, est discrétisé en n points, l'expression de son centre de gravité est :

$$C_Y(x) = \frac{\sum_{i=1}^{n} y_i \mu_Y(y_i)}{\sum_{i=}^{n} \mu_Y(y_i)} \quad \textbf{(3.13)}$$

$\mu_Y(y_i)$: C'est le degré de la fonction d'apparences

y_i : c'est la sortie de système.

n : le nombre de règle dans le système flou type-2.

Où $\boldsymbol{C_Y}$est la sortie floue et $\boldsymbol{y_i}$ est le centre de la fonction d'appartenance de sortie de l'inférence max-min

composition. C_Y est une fonction d'augmentation monotone avec Respect de $\boldsymbol{C_Y}$. Le point le plus proche de gauche C_{Y_L} et le plus à droite Le point C_{Y_R}.

En se référant à [51], la sortie croustillée defuzzifiée du système flou fuzzy à intervalle de type 2 est la moyenne de C_{Y_L}et C_{Y_R}

Lequel est:

$$C_Y(x) = \frac{C_{Y_L} + C_{Y_R}}{2} \quad \textbf{(3.14)}$$

3.6. Mise en œuvre de la commande MPPT:

Des nombreuses méthodes de poursuite de point de puissance maximale (MPPT) ont été développées pour permettre au système d'extraire le maximum de puissance du générateur photovoltaïque. Le principe de ces méthodes est de déplacer le point de fonctionnement en augmentant V_{PV}, lorsque dP_{PV}/dV_{PV} est positif ou en diminuant V_{PV}, lorsque dP_{PV}/dV_{PV} est négatif. [39]

3.6.1 La commandes MPPT basée sur le principe de la logique floue type-1:

Récemment, la commande par logique floue a été utilisée dans les systèmes de poursuite du point maximum de puissance MPPT, L'avantage de ces techniques est qu'elles peuvent fonctionner avec des valeurs d'entrées peu précises et qu'elle ne nécessite pas la connaissance exacte du modèle à réguler [39].

La structure de base de notre contrôleur flou typp-1 est donnée par la Figure 3.6 ci-après à deux entrées et une sortie.

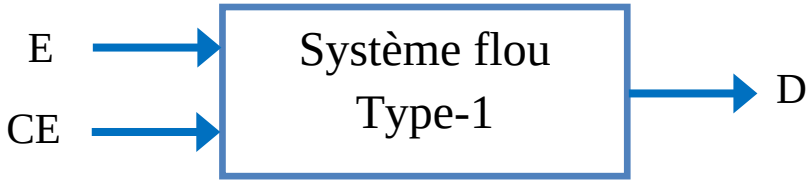


Figure.3.6. Diagramme d'esquisse d'un contrôleur flou type-1

En général, la commande logique floue comprend donc trois étapes communément nommées dans la littérature : La fuzzification, Les règles d'inférence, La defuzzification

❖ *Fuzzification :*

l'erreur (E) et le changement d'erreur (CE) sont considérés comme des variables d'entrée qui sont comme ci-dessous :

$$E(k) = \frac{dP}{dV} = \frac{P(k)-P(k-1)}{V(k)-V(k-1)} \quad \textbf{(3.15)}$$

$$CE(k) = E(k) - E(k-1) \quad \textbf{(3.16)}$$

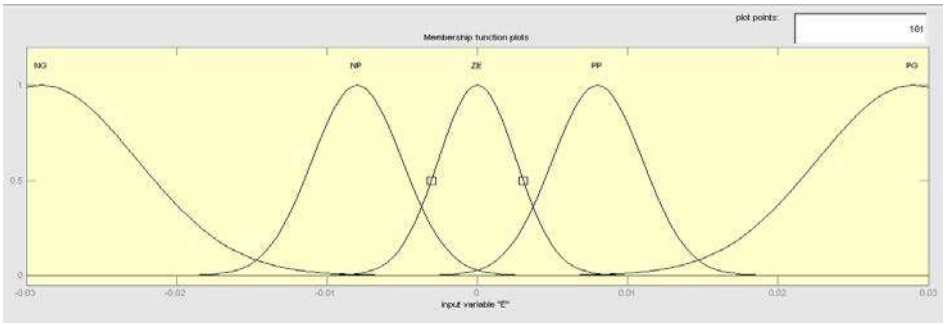
Où $E(k)$et $CE(k)$ désignent, respectivement, l'erreur et le changement d'erreur. $P(k)$ Et $V(k)$ étant respectivement la puissance du GPV et sa tension de sortie à l'instant d'échantillonnage k. La sortie du régulateur flou est la variation du rapport cyclique dD du convertisseur statique.

Dans la technique basée sur la logique floue proposée, elle consistera à imposer une valeur forte pour le rapport cyclique lorsque l'erreur est importante puis diminuer ce rapport cyclique lorsque

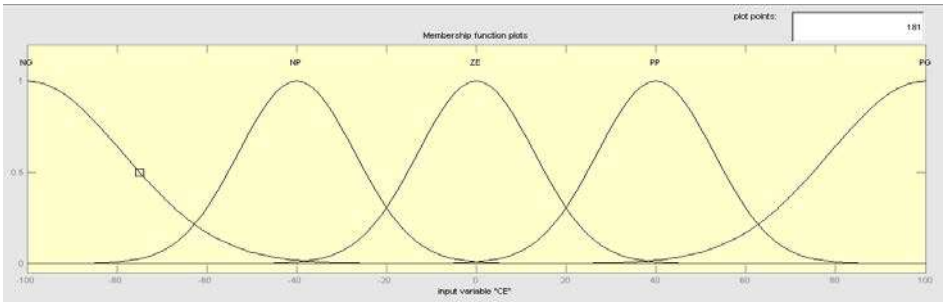
l'erreur devient faible, de sorte à éviter les oscillations. La commande floue permet, ainsi,d'assurer une transition harmonieuse entre les différents modes de fonctionnement du système [4]. Durant la fuzzification, les variables d'entrées numériques sont converties en variable linguistique les valeurs linguistiques pouvant prendre les cinq valeurs suivantes :

NG: Négative grand, **NP**: Négative petit, **ZE**: Zéro, **PG**: Positive grand, **PP** : Positive petit. en employant les sous-ensembles flous de base. [25]

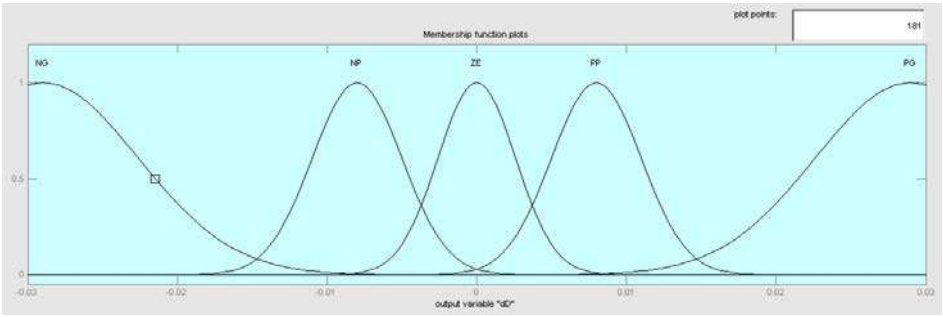
Comme le montre la structure de base de la commande logique flou type-1 dans la figure 3.7. La fonction d'apparence Gaussienne.



(a). « **E** »



(b). « **CE** »



(c). « **dD** »

Figure 3.7. Les fonctions d'apparence de type-1 (a) erreur E, (b) changement d'erreur CE, (c) le rapport cyclique dD

❖ *Méthode d'inférence floue :*

La valeur de la variable de sortie dD (le rapport cyclique), qui pilote le convertisseur statique pour rechercher le PPM (point de puissance maximale) est déterminée à l'aide d'une table de vérité et de l'évolution des paramètres d'entrée.

Tableau 3-1. Exemple d'une table des règles à cinq classes pour une commande logique floue [4][19].

CE E	**NG**	**NP**	**ZE**	**PP**	**PG**
NG	ZE	ZE	PG	PG	PG
NP	ZE	ZE	PP	PP	PP
ZE	PP	ZE	ZE	ZE	NP
PP	NP	NP	NP	ZE	ZE
PG	NG	NG	NG	ZE	ZE

Le tableau III.1 comprend 25 règles floues de commande. Ces règles sont employées pour la commande du convertisseur survolteur (ou dévolteur) telle que la puissance maximum du panneau solaire soit atteinte.

Par exemple : la case (5, 3) du tableau 4.2 représente la règle de commande.

Le variable linguistique assignée à dD, dépend des différentes combinaisons entre E et CE.

Par exemple :

Si les variables d'entrée (E et CE), ont comme valeur PG et ZE correspondant à un point de fonctionnement très éloigné du PPM, d'après la table de vérité la valeur donnée à la variable de sortie dD est NG, ce qui implique diminuer le rapport cyclique (dD) largement.

Si **E** est PG et **CE** est ZE alors **dD** est NG.

Dans notre cas, on utilise la méthode d'inférence de Mamdani qui est la combinaison floue MAX-MIN. Les opérateurs logiques sont interprétés comme suit :

❖ Défuzzification :

Elle consiste à convertir cette fois, une variable linguistique en variable numérique. Cette étape ne s'applique qu'à la variable de sortie dD, afin de pouvoir piloter le convertisseur de puissance pour atteindre le PPM. La valeur dD_0 de la sortie singleton Sugeno est calculée par la formule :

$$dD_0 = \frac{\sum_{i=1}^{n} \mu_f(D_i) - D_i}{\sum_{i=}^{n} \mu_f(D_i)} \quad \textbf{(3.17)}$$

3.6.2 La commandes MPPT basée sur le principe de la logique floue type-2:

Pour une commande MPPT, les variables d'entrées peuvent donc être la puissance (P_{pv}) du GPV et sa tension (V_{pv}). La sortie est généralement un ou plusieurs signaux de référence comprenant au moins le rapport cyclique (D) permettant de commander le convertisseur statique(CS) pour fonctionner le plus souvent possible au PPM. La qualité de la recherche du PPM dépend essentiellement de l'algorithme utilisé dans la commande de la logique floue type-2. (Figure 3.8)

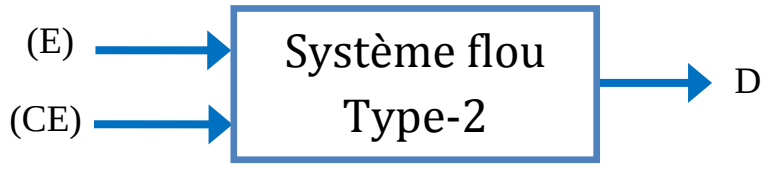


Figure.3.8. Diagramme d'esquisse d'un contrôleur flou type-2

Comme nous avons vu dans le type-1 de FLC, Un T1FLCs est incapable de gérer directement les incertitudes des règles, car ils utilisent les ensembles flous de type1 qui sont certains. Pour cette raison nous sommes allés de faire un autre effort pour améliorer le résultat, On sait que l'ensemble flou de type 2 nous permet de modéliser et de minimiser les effets de Incertitudes dans la base de règles FLC.

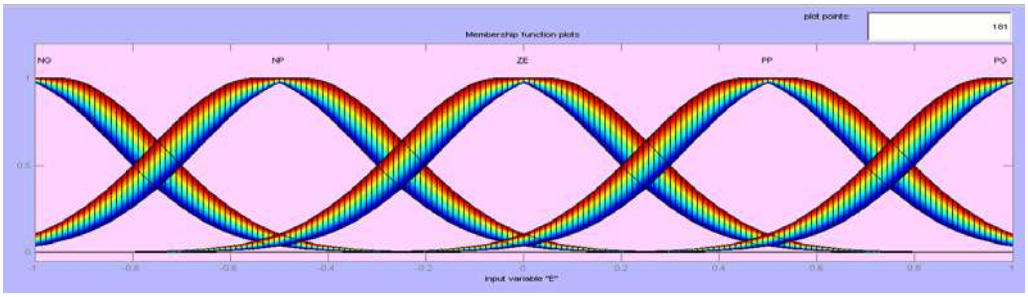
Commande logique flou type-2 comprend donc cinq étapes communément nommées dans la littérature : type 1 fuzzification, La base de règles floues, Les règles d'inférence, type1 defuzzification et Réduction de type.

Les entrées au contrôleur de logique floue sont E, CE. Le changement de la contribution de D (le rapport cyclique du convertisseur Boost) est la sortie. Par adhésion gaussienne des fonctions d'apparences sont décrites les variables de logique floue.

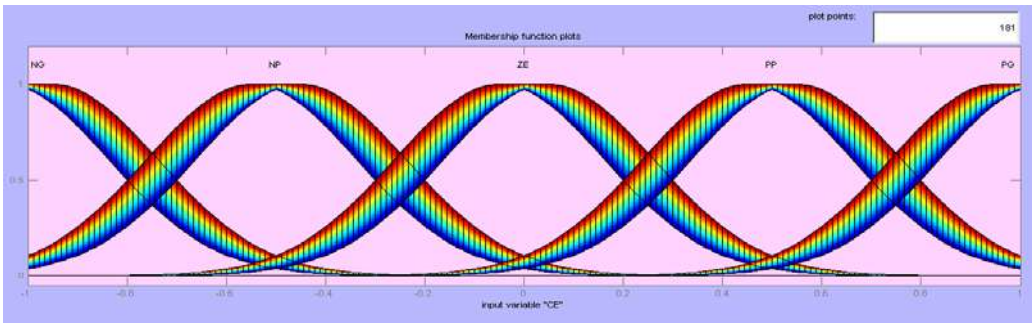
L'inférence floue est effectuée en utilisant la méthode de Mamdani, et la sortie (le cycle de fonctionnement dD) est calculée en utilisant le bloc Defuzzifier. Le centre de gravité est utilisé pour calculer la sortie de ce FLC qui est le cycle de service, qui utilise la base de règles du tableau I. La sortie (dD) est donnée au convertisseur DC-DC.

Ainsi ses variables seront qualifies Négatif Grand (NG), Négatif Petit (NP), Erreur nul ou bien zéro (EZ), Positif Petit (PP) et Positif Grant (PG)

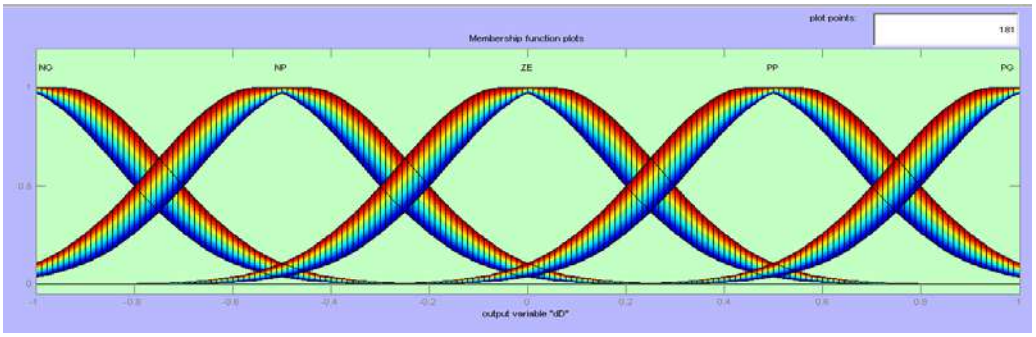
Figure 3.9 montre la fonction d'appartenance antérieure et conséquente.



(a). « **E** »



(b). « **CE** »



(c). « **dD** »

Figure 3.9. Les fonctions d'apparence de type-2 (a) erreur E, (b) changement d'erreur CE, (c) le rapport cyclique dD

La table de règles du T2FLC reste la même que le T1FLC. La seule différence étant que les ensembles flous associés aux prémisses et aux conclusions seront de type 2; alors,

Si E est $\widetilde{E_E^l}$ et CE est $\widetilde{E_{CE}^l}$ alors dD est Y_i

Avec $\widetilde{E_1^l}$, $\widetilde{E_2^l}$ respectivement l'ensemble flou de type 2 de l'erreur e et de

Et $Y_i = [\underline{y_i}, \overline{y_i}]$ est l'ensemble flou de la conclusion de type 2.

En appliquant la formule **(III.14)** pour calculer le centre de gravité au type réduit, la sortie sera donnée par :

$$dD_0 = \frac{dD_{0_l} + dD_{0_r}}{2} \qquad \textbf{(3.18)}$$

dD_{0_l} , dD_{0_r} sont deux points de gauche et de droite caractérisant l'ensemble réduit.

3.7. Algorithmes génétiques

Introduction :

Les organismes que nous connaissons aujourd'hui sont rendus utile pour la résolution des problèmes d'optimisation dans des divers domaines de la science et en particulier dans celui de l'ingénierie grâce à l'orientation de la recherche vers des techniques d'optimisation basés sur les analogies avec des processus naturels, biologiques ou humain. Parmi ces techniques, on trouve les algorithmes génétiques (AG) qui sont des procédures stochastiques (pseudo-aléatoires) inspirées des lois de l'évolution des espèces et de la génétique naturelle. [26]

Les algorithmes génétiques (en abrégé AG) développés par J. Holland présentent des qualités intéressantes pour la résolution de problèmes d'optimisation complexes. Leurs fondements théoriques furent exposés par Goldberg. Ils tentent de simuler le processus d'évolution des espèces dans leur milieu naturel: soit une transposition artificielle de concepts basiques de la génétique et des lois de survie énoncés par Darwin [40].

Tout d'abord, les AG peuvent traiter des problèmes pour lesquels les solutions potentielles sont situées dans un espace de grande dimension, ce qui ne permet pas d'utiliser des méthodes standard reposant sur une exploration systématique. Ensuite, la recherche d'une solution optimale à un problème peut être réalisée par un algorithme génétique sans nécessiter de connaissance a priori sur la répartition des solutions dans l'espace. [41].

3.7.2. Principe de fonctionnement des algorithmes génétiques:

Les algorithmes génétiques (AG) sont des algorithmes d'optimisation stochastique fondés sur les mécanismes de la sélection naturelle et de la génétique. Leur fonctionnement est extrêmement simple. On part avec une population de solutions potentielles (chromosomes) initiales arbitrairement choisies. On évalue leur performance (fitness) relative. Sur la base de ces performance on crée une nouvelle population de solutions potentielles en utilisant des opérateurs évolutionnaires simples : la sélection, le croisement et la mutation. On recommence ce cycle jusqu'à ce que l'on trouve une solution satisfaisante [51].

L'objectif de la version artificielle de l'évolution est de maximiser une fonction d'adaptation (fitness en anglais). Cette fonction d'adaptation est représentative de l'efficacité des solutions générées sur un problème posé. Elle est le principal biais introduit par le concepteur pour guider l'évolution vers les solutions recherchées. La nature n'est pas aussi directive, c'est pourquoi l'analogie ne doit pas être prise au pied de la lettre: l'objectif n'est pas de reproduire, ni même de comprendre le fonctionnement de la sélection naturelle, le but est de disposer d'une méthode efficace de conception et d'optimisation de structures pour répondre à des problèmes particuliers [52].

3.7.3. Structure de l'algorithme génétique:

L'implémentation d'un AG est spécifique au problème à résoudre. Pour l'utiliser, il faut disposer des cinq éléments suivants [40]:

- Un principe de codage de l'élément de population : La qualité du codage des données conditionne le succès des algorithmes génétiques. Les codages binaires ont été trèsutilisés à l'origine. Les codages réels sont désormais largement utilisés, notamment dans les domaines applicatifs pour l'optimisation de problèmes à variables réelles.
- Un mécanisme de génération de la population initiale. Ce mécanisme doit être capable de produire une population d'individus non homogène qui servira de base pour les générations futures.
- Une fonction à optimiser. Celle-ci retourne une valeur appelée fitness ou fonction d'évaluation de l'individu.
- Des opérateurs permettant de diversifier la population au cours des générations et d'explorer l'espace d'état. L'opérateur de **croisement** recompose les gènes d'individus

existant dans la population ainsi que l'opérateur de **mutation** a pour but de garantir l'exploration de l'espace d'états.

- Des paramètres de dimensionnement: taille de la population, nombre total de générations, probabilités d'application des opérateurs de croisement et de mutation.

La figure 3.10 illustre l'organigramme fonctionnel de la structure de l'algorithme génétique. Les diverses phases et les mécanismes associés à chacune d'entre elles seront présentés dans les sections suivantes.

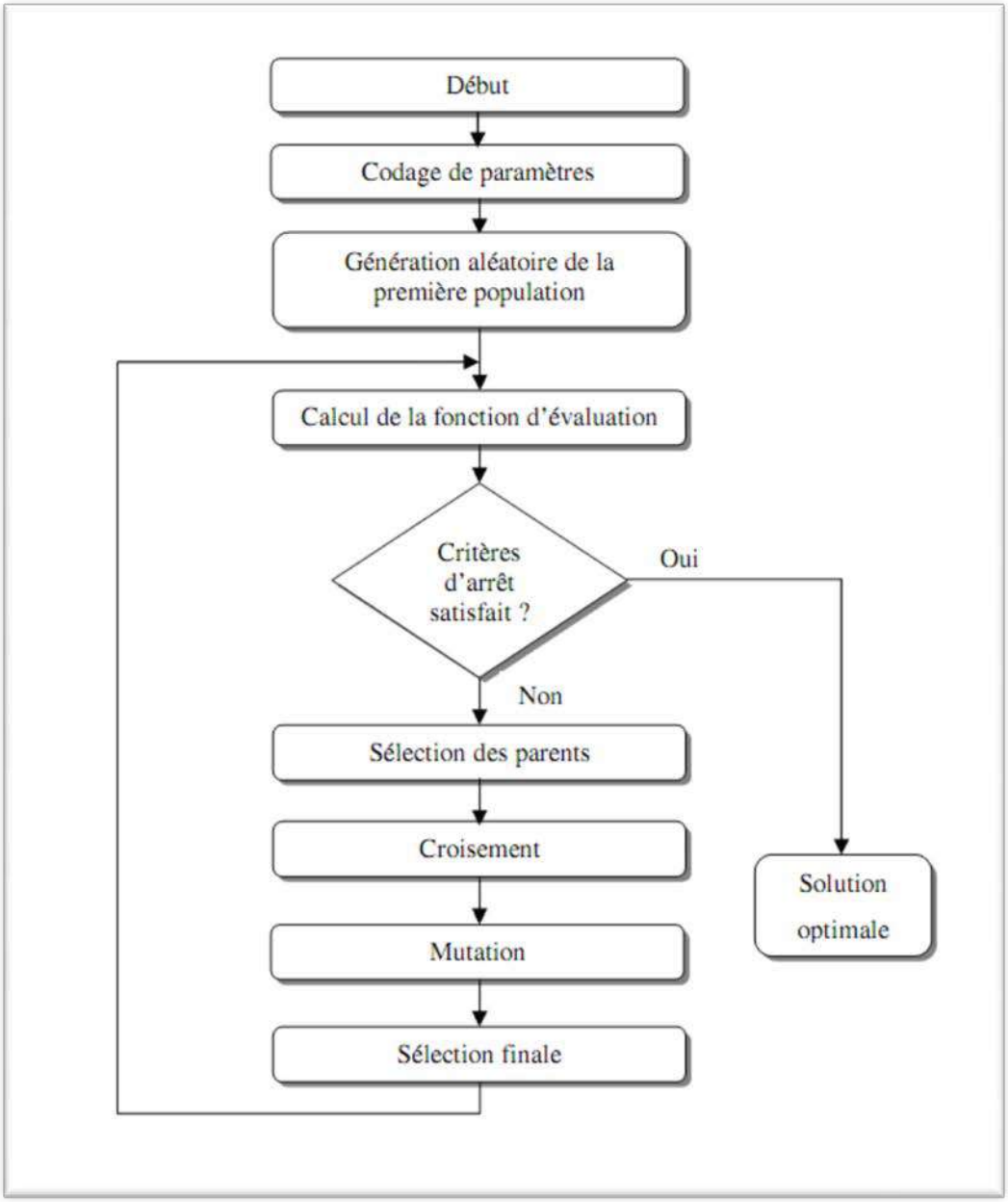


Figure. 3.10. Organigramme général de l'AG.

Il y a trois opérateurs fondamentaux impliqués dans le processus de recherche d'un algorithme génétique: choix, croisement et mutation. Le choix est un processus qui choisit un chromosome de la population de la génération courante pour l'inclusion dans la population de prochaine génération

selon leur forme physique. L'opérateur de croisement combine deux chromosomes pour produire un nouveau chromosome (progéniture). L'opérateur de mutation maintient la diversité génétique d'une génération de population au prochain et vise à réaliser de la variabilité stochastique de AG afin d'obtenir une convergence plus rapide.

Les étapes génétiques d'exécution d'algorithme sont indiquées ci-dessous:

Étape 1: Lisez le nombre de modules reliés, de modèle d'insolation et de température pour chaque module.

Étape 2: Définissez la fonction objective et identifient les paramètres.

Étape 3: Produisez de la population initiale.

Étape 4: évaluez la population par fonction objective.

Étape 5: Examinez la convergence. Si satisfait alors arrêtez continuent autrement.

Étape 6: Commencez le processus de reproduction par appliquer les opérateurs génétiques: Choix, croisement et mutation.

Étape 7: évoluez la nouvelle génération. Passez à l'étape 3. [53, 54]

On va essayer dans ce travail de trouver les fonctions d'appartenances optimales en utilisant les AGs, et cela se fait par les étapes suivantes :

1. Choix du critère d'optimisation : Dans ce travail nous allons utiliser le critère quadratique à minimiser.

- $\mathbf{J} = \int e^2(t)\, dt$ **(3.19)**
- $\mathbf{e} = P_{max} - P_{réel}$ **(3.20)**

J : représente la fonction de Fitness

e : la différence entre la puissance maximale produite par le GPV et la puissance réel

Ce choix a été fait dans le but d'améliorer le temps de réponse et de réduire les fluctuations.

3.8. Conclusion:

Dans ce chapitre nous avons utilisé l'intelligence artificielle comme un outil pour la modélisation de cellules photovoltaïques, et comme une méthode de poursuite de point de puissance maximale. Pour cela, nous avons présenté les principes des techniques de l'intelligence artificielle (logique floue T1FLC et T2FLC).

Dans le prochain chapitre, nous allons voir la Modelisation Du Systeme GPV, Convertisseur, MPPT, Charge) , en utilisant Matlab/Simulink.

CHAPITRE 4

Modelisation Du Systeme « GPV, Convertisseur, MPPT, Charge »

Introduction:

Dans ce chapitre on va exposer sous forme de block par le Biais du logiciel Simulink/Simpower, le système photovoltaïque composé d'un générateur PV, l'étage intermédiaire (convertisseur BOOST), la commande et la charge.

4.1. Système photovoltaïque proposée:

La figure 4.1 illustré ci-dessous représente le schéma-type d'un système photovoltaïque il est composé d'un générateur PV, un convertisseur élévateur, la commande MPPT qui permet d'avoir une puissance maximale à la sortie du générateur on jouant sur le rapport cyclique ainsi que la charge DC.[4][14][1].

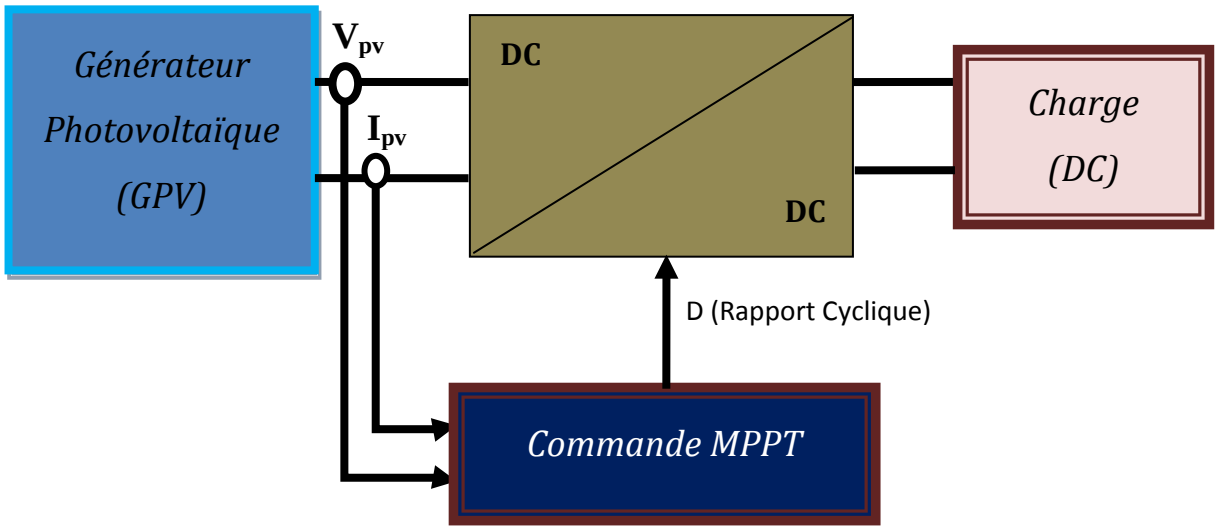


Figure 4.1. Schéma Type d'un système photovoltaïque

4.2.Simulation du générateur photovoltaïque (GPV).

4.2.1. Modèle du GPV.

Avant de désigné le model du générateur à étudier, il faut d'abord connaitre le circuit électrique équivalent de cette source, pour notre travail on a choisi le modèle à une seule diode [55](voir chapitre 1)

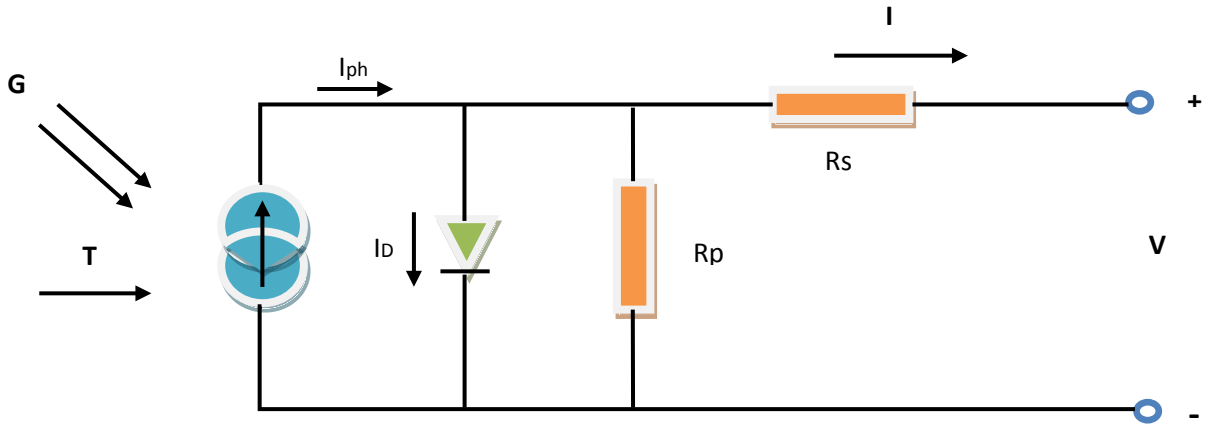


Figure 4.2. Circuit électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque à une seule diode.

4.2.2. Modèle du module photovoltaïque :

Le model retenue pour notre simulation est le BP MSX 120 [58] composé de 72 cellules solaires en série et une seule en parallèle et fournit une puissance maximum nominale de 120W. La tension maximum de point de puissance est V_{mpp}=33.7 V et le courant fourni au point de puissance maximum est I_{mpp}=3.56 A. Les paramètres techniques du BP MSX120 sont donnés dans le Tableau 4.1 [Annexe 2]

Tableau 4.1 Données Techniques du BP MSX120

Courant de court-circuit I_{sc}	3.87 A
Tension de circuit ouvert V_{oc}	42.1 V
Courant au point de puissance maximum I_{MPP}	3.56 A
Tension au point de puissance maximum V_{MPP}	33.7 V
Nombre des cellules en série N_s	72
Coefficient de température d' I_{sc}	(0.065±0.015)% °C
Coefficient de température de V_{oc}	-(80±10) mV/°C
P_{max}	120 W
Courant de saturation renversé de diode I_0	0.323µ M
Facteur de qualité de diode **A**	1.3977
Résistance série $\mathbf{A_s}$	0.473 Ω
Résistance parallèle $\mathbf{R_p}$	1367 Ω
Courant de court-circuit I_{sc}	3.87 A

4.2.3. Modélisation du générateur photovoltaïque sous Matlab/Simulink.

Afin de déterminer les caractéristiques I-V et P-V du panneau solaire ainsi que le point de puissance maximale on va réaliser les différents blocks qui compose le générateur photovoltaïque

A l'aide du logiciel Matlab/Simulink [56][4][55], des données techniques du panneau ainsi que des constantes physiques sont intégré dans le model Simulink Tableau 4.2

Tableau 4.2 Caractéristiques d'entrés utilisés pour le model Simulink

Imp	Courant à la puissance maximale au STC
Ns	Nombre de cellules en série
Npp	Nombre de modules en parallèle
Nss	Nombre de modules en série
A (constante de diode)	1.3977
K (constante de Boltzmann)	1.38e-23
Iscn	Tension nominale de court-circuit
Kp	Coefficient de la température de tension
Ki	Coefficient de température courant
Vmp	Puissance maximum de tension

Le montage de la figure 4.3 est utilisé pour déterminer les caractéristiques I-V et P-V, cependant pour démontrer le MPP l'introduction d'un étage intermédiaire (convertisseur élévateur DC-DC) dans notre model et nécessaire pour traquer le MPP.

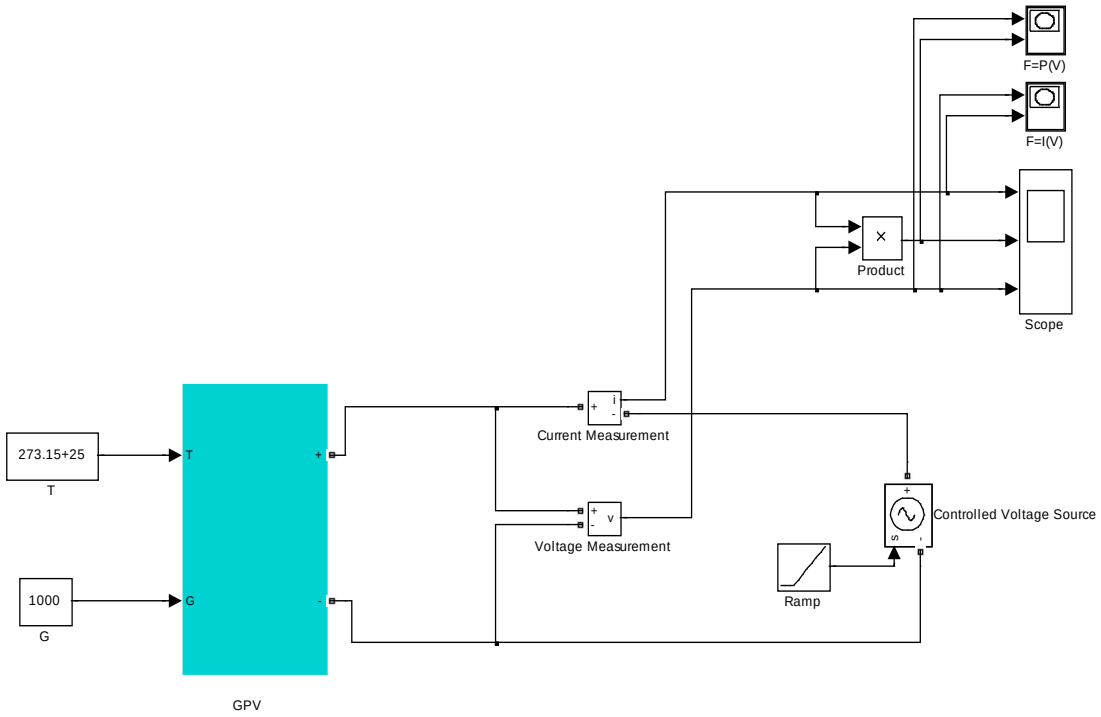


Figure 4.3. Simulation du module photovoltaïque

Dans le premier chapitre nous avant vu que les équations électriques qui régissant notre système sont données par les équations (4.1),(4.2) et (4.3) [55].

$$I_m = I_{ph} - I_0\left(e^{\frac{qV_d}{KT}} - 1\right) \quad \textbf{(4.1)}$$

$$I_{sc}(T_1) = \left(\frac{G}{Gnom}\right) I_{sc}\ (T_{1,nom}) \quad \textbf{(4.2)}$$

$$I_0(T_1) = \frac{I_{ph}(T_1)}{\left(e^{\frac{qV_{0c}}{KT}} - 1\right)} \quad \textbf{(4.3)}$$

Ces mêmes équations seront traduites en blocks sous Matlab/Simulink afin de réaliser le sub-système du générateur photovoltaïque, ce système et caractériser par une grandeur d'entré qui est le courant qui va générer à la sortie GPV une tension comme le montre la figure 4.4

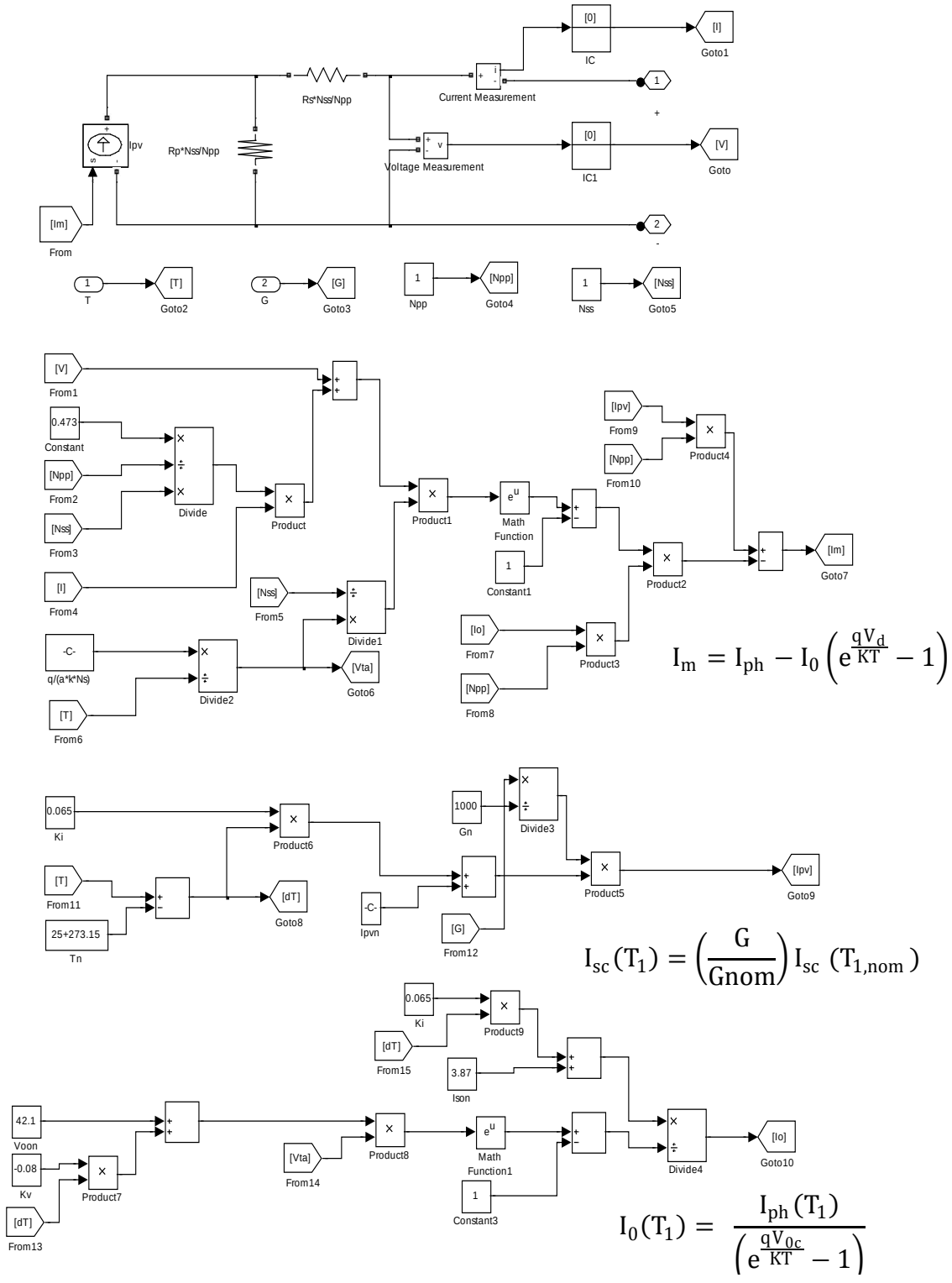


Figure 4.4. subsysteme sous Simulink de l'étage GPV

4.3 Modélisation du convertisseur BOOST avec le contrôleur de MPPT.

Le schéma block du convertisseur BOOST sous Simulink/Simpower et représenté sur la figure 4.5, la source d'entrée est de type courant continu (inductance en série avec une source de tension) et la charge de sortie est de type tension continue (condensateur en parallèle avec la charge résistive).

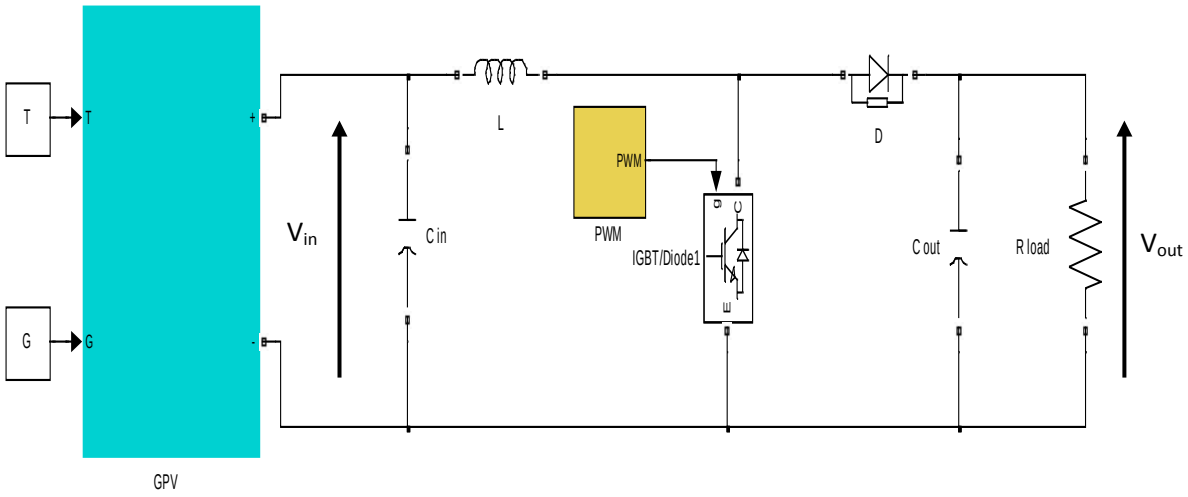


Figure 4.5. Schéma block d'un convertisseur BOOST

4.4. Simulation de la méthode MPPT

La figure 4.6 représente Le schéma bloc du contrôleur MPPT, les grandeurs d'entrés sont la tension et le courant générer par le générateur photovoltaïque, à la sortie on retrouve le rapport cyclique (D), ce dernier sera comparer à un signal triangulaire pour produire la MLI (figure 4.7).

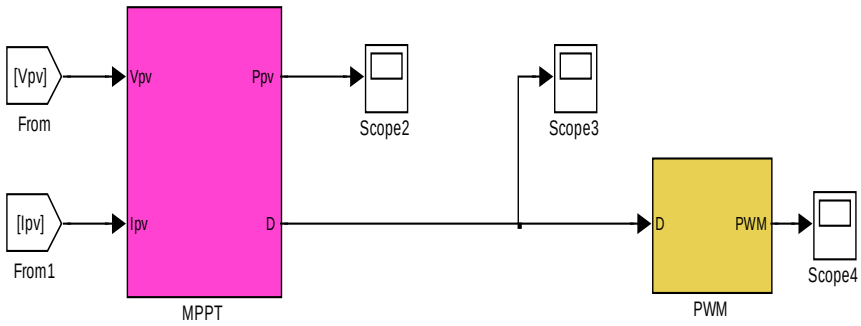


Figure 4.6. Schéma block Simulink de l'MPPT

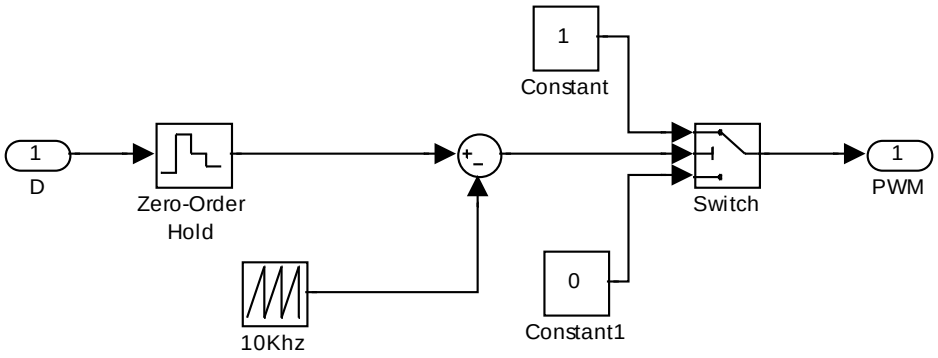


Figure 4.7. Schéma block de la commande MLI

4.4.1. L'algorithme perturbation et observent (P&O).

La figure (4.8) illustre le bloc schématique de SIMULINK de par la commande MPPT « perturbation et observation »:[1] [14] [4] [55].

Le rapport cyclique est augmenté ou diminué jusqu'au que le PPM du GP soit atteint. Le pas du rapport cyclique est constant, et il détermine l'efficacité et l'exactitude du contrôleur MPPT. Pour limiter le rapport cyclique on à utiliser un l'imitateur entre [0.01, 0.9]

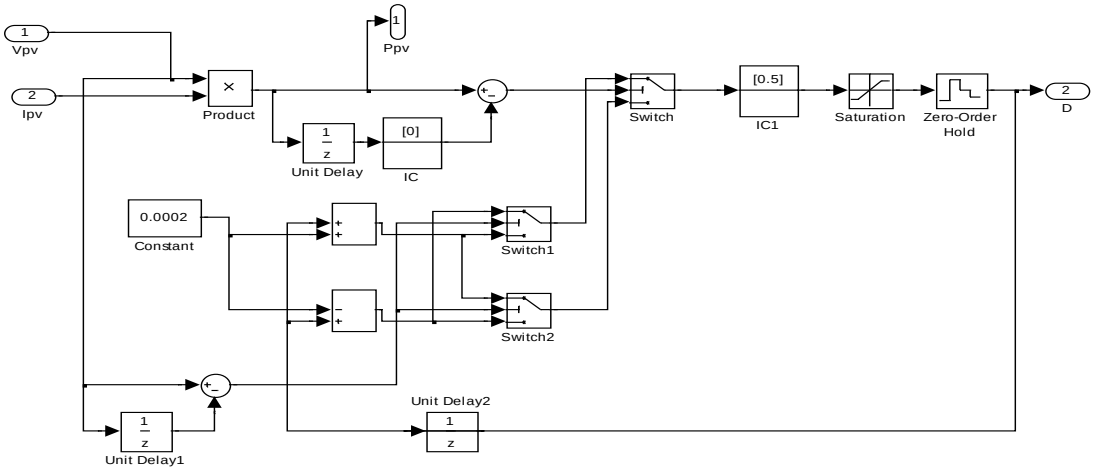
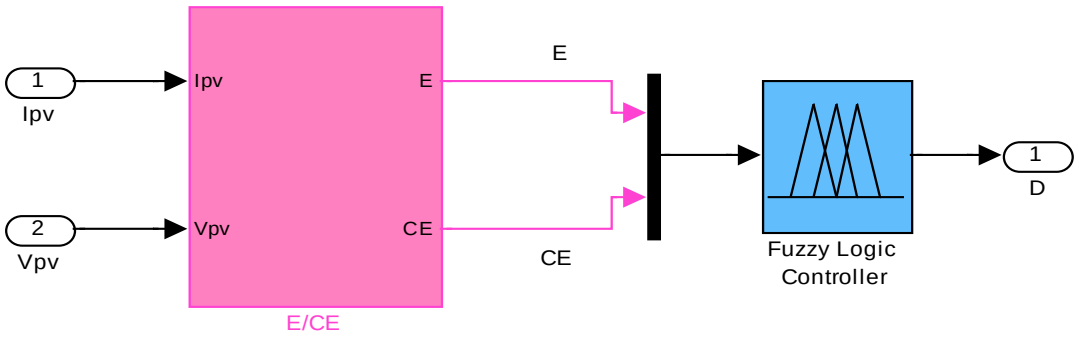


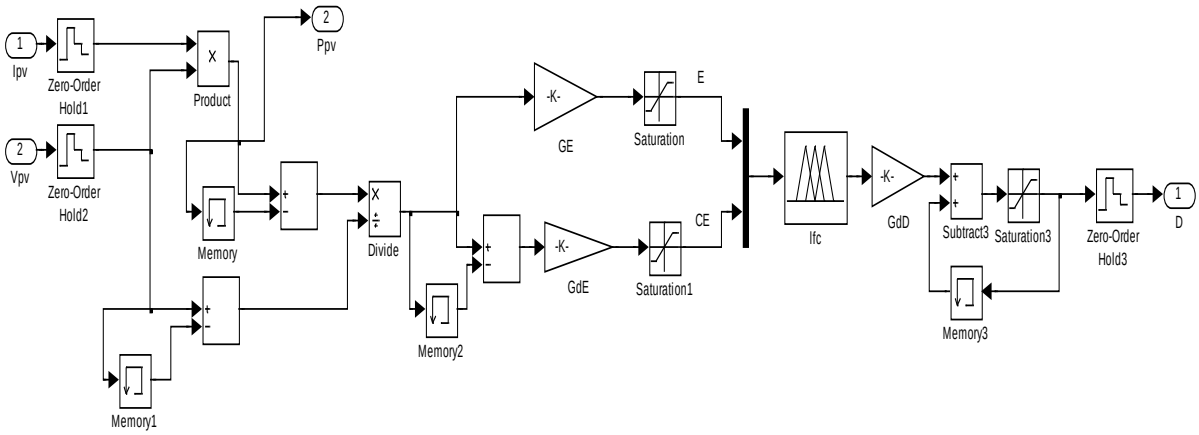
Figure4.8. Schéma block de l'algorithme de la commande P&O

4.4.2 Logique floue type 1.

Pour la simulation de la commande floue type 1, le contrôleur présenter sur la figure (4.9) sera intégrer à la place du contrôleur (P&O).



a- Schéma globale du block E/CE

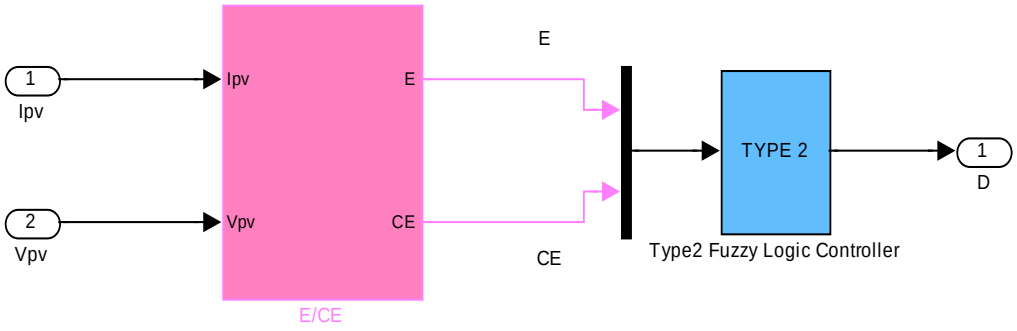


b- Schéma descriptive du block E/CE

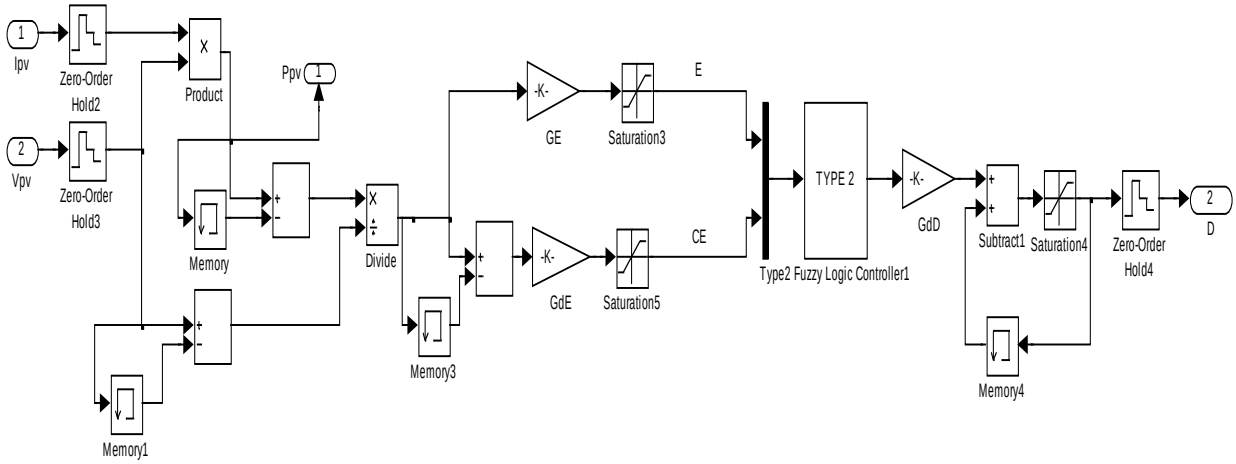
Figure 4.9. Schéma block Simulink de l'erreur et sa variation du contrôleur floue type 1

4.4.3 Logique floue type-2 :

Idem que la commande floue type 1 cité plus haut, le contrôleur floue type 2 figure (4.10) sera utiliser à la place du contrôleur (P&O), Pour exécuter la simulation de celle-ci.



a- *Schéma globale du block E/CE*



b- *Schéma descriptive du block E/CE*

Figure4.10. *Schéma block Simulink de l'erreur et sa variation du contrôleur floue type 2*

4.5 Système globale (GPV, convertisseur, MPPT, charge).

Le système global de notre model ce compose d'un GPV, convertisseur DC-DC (BOOST), une commande MPPT et une charge voir figure 4.11.

Les valeurs des composants du convertisseur ont été dimensionnées dans l'Annexe 1

Tableau 4.3 : Paramètres du convertisseur BOOST [Voir Annexe.1]

Rcharge	24.3 ohm
L	≥ 444 µH
C_{in}	≥ 78.6 µF
C_{out}	≥ 154.69 µF

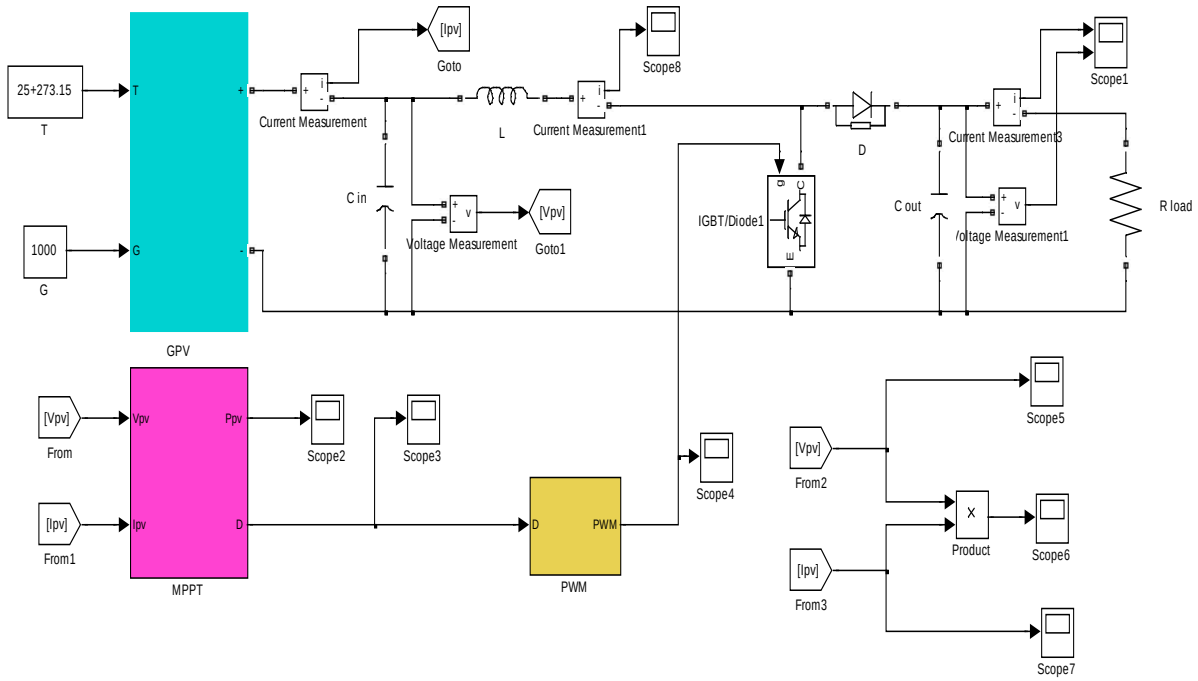


Figure 4.11. Schéma block du Système globale (GPV, convertisseur, MPPT, charge)

4.6. Caractéristiques du générateur photovoltaïque.

4.6.1. Les caractéristiques (I-V) et (P-V):

La caractéristique I-V d'une cellule photovoltaïque dépend fortement de l'éclairement et de la température, pour des valeurs choisies de la température et de l'éclairement et en traçant les résultats comme la caractéristique I-V, prouve que le courant de sortie I d'une rangée est considérablement influencé par le changement de l'éclairement G tandis que la tension V de sortie reste approximativement constante. En revanche, pour une température changeante, on peut voir que la tension change considérablement tandis que le Courant demeure constant.

La caractéristique P-V d'une rangée de cellules photovoltaïque peut être obtenue à partir de la caractéristique I-V et la relation pour la puissance P = V. I cela montrent clairement la dépendance du courant de sortie I et de la tension V de sortie de la température et de l'éclairement et traduisent une dépendance de la puissance de ces deux paramètres.

La puissance de sortie d'un panneau solaire est considérablement réduite pour une insolation décroissante. Il montre également un effet qui ne pourrait pas être immédiatement évident : la puissance de sortie est réduite par une augmentation de la température de panneau. Ceci peut être expliqué par la dépendance significative de la température à la tension VOC de circuit ouvert.

Comme on la mentionné au début de ce chapitre le module PV choisi pour notre étude et le BP MSX 120, il est caractérisé par ;

- une puissance maximale de120 W
- un courant maximale Impp= 3.56 A
- une tension maximale Vmpp= 33.7 V

Sur les figures (4.12) (4.13) les caractéristiques courant-tension et puissance-tension du module BP MSX 120 de PV sont montrées. Il faut noter que les valeurs de la tension $V_{mpp,}$ courant I_{mpp} et P_{max} sont identiques avec ceux données par le fabricant.

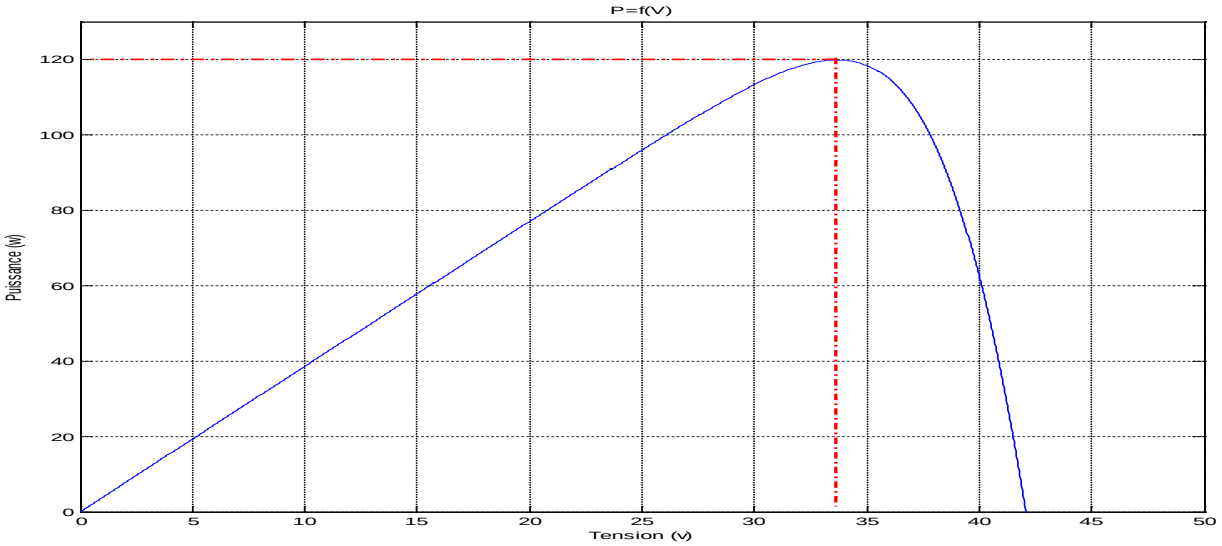


Figure 4.12. Caractéristique P = f(V) du module PV (T = 25 C°, G = 1000W / m2)

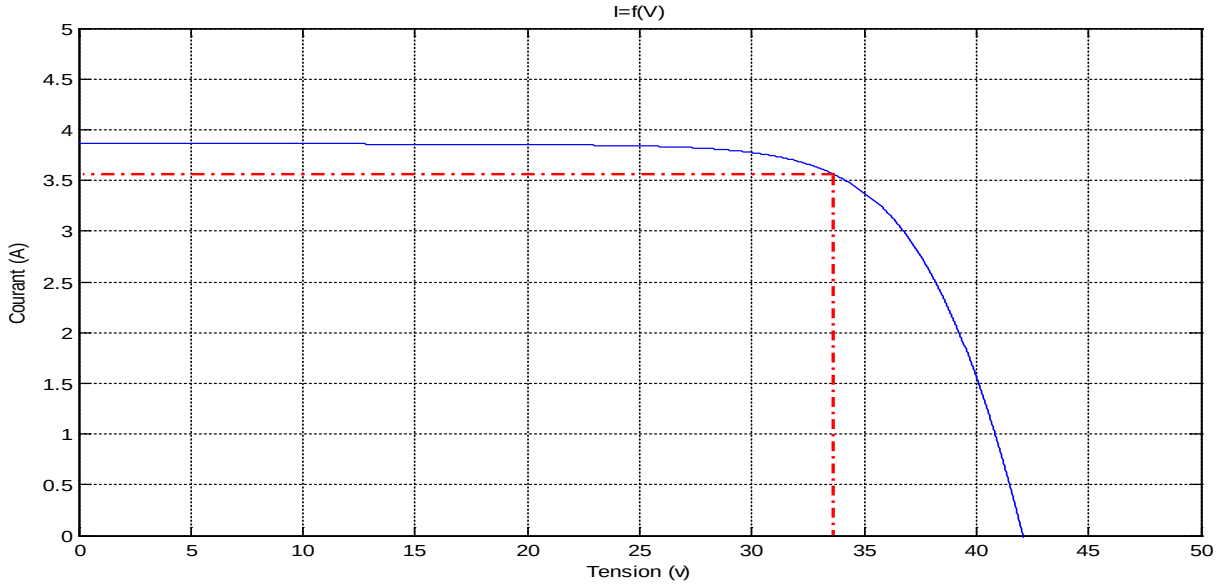


Figure4.13. Caractéristique I= f(V) du module PV(T=25C°, G=1000W/m2)

4.6.2. Simulation du module PV avec variation de la température.

Comme en constate sur les figures (4.14) (4.15), La variation de la température de 0Cº, de 15Cº, de 25Cº et de 50 Cº a un impact sur la tension et affect moins le courant de sortie.

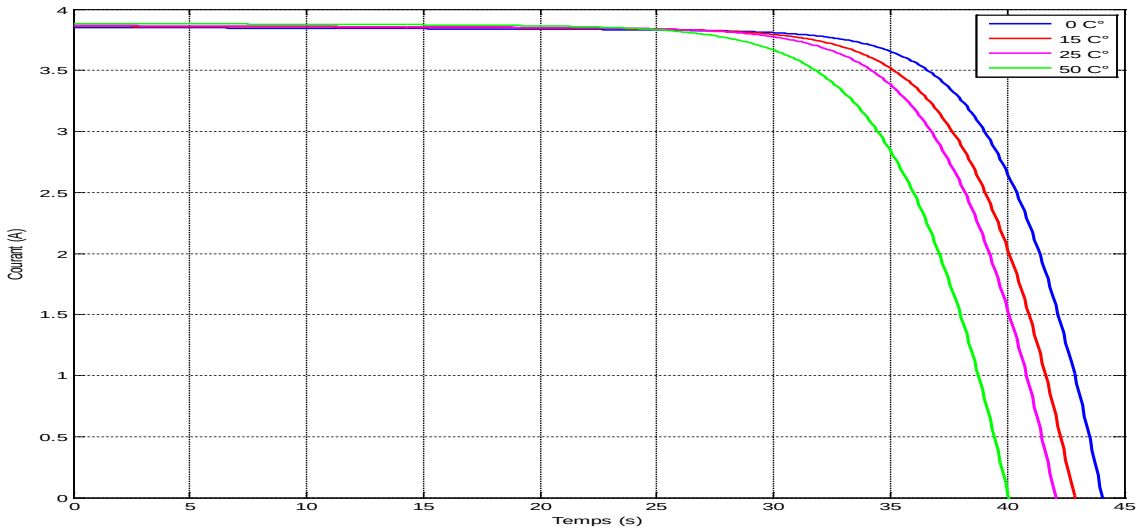


Figure4.14. Résulta de simulation des Caractéristiques d'un module photovoltaïque I=f(V) pour différente températures et un éclairement; G =1000W//m^2.

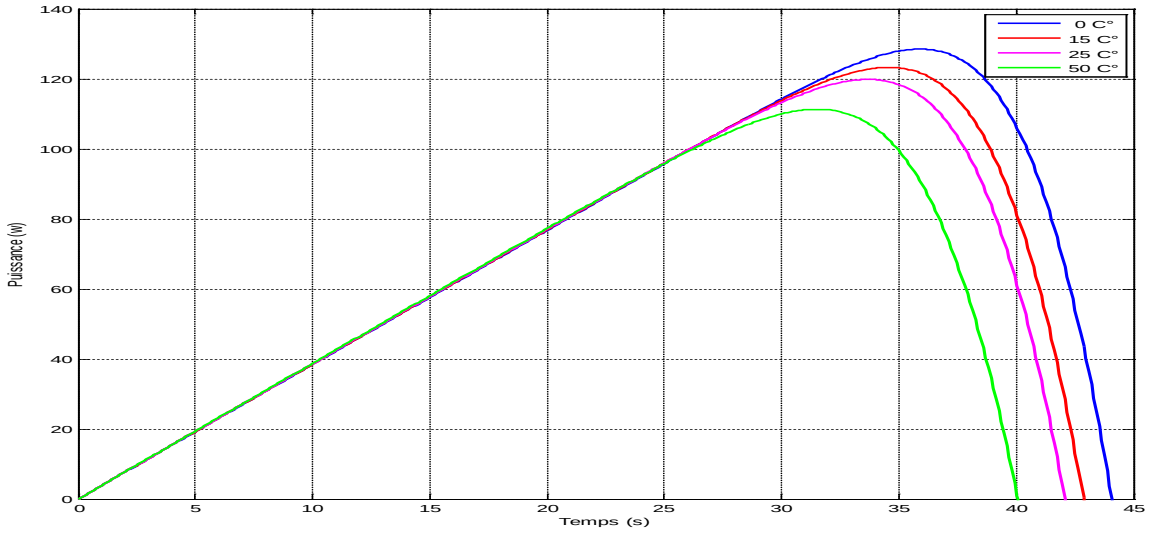


Figure 4.15. Résulta de simulation des Caractéristiques d'un module PV, P = f(V); pour différente températures et un éclairement; G =1000W//m2.

4.6.3. Simulation du module PV avec variation de l'irradiation.

L'irradiation varie de 400, 600, 800 et 1000 et la température est fixée à 25 C°,la Figure (4.16) (la courbe P-V) montre bien que la puissance du PV diminue lorsque l'irradiation G diminue.

Même constat sur la figure (4.17) (la courbe I-V) qui démontre que le courant diminue également quand l'irradiation diminue.

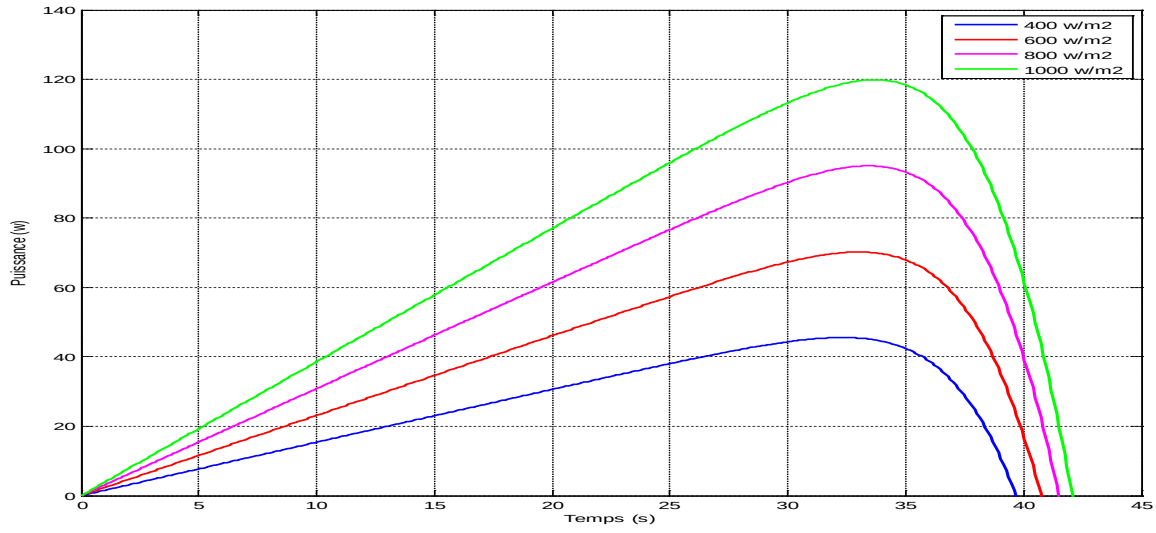


Figure 4.16. Résulta de simulation des Caractéristiques d'un module PV, P = f(V); Pour différents éclairement et une température T=25C°.

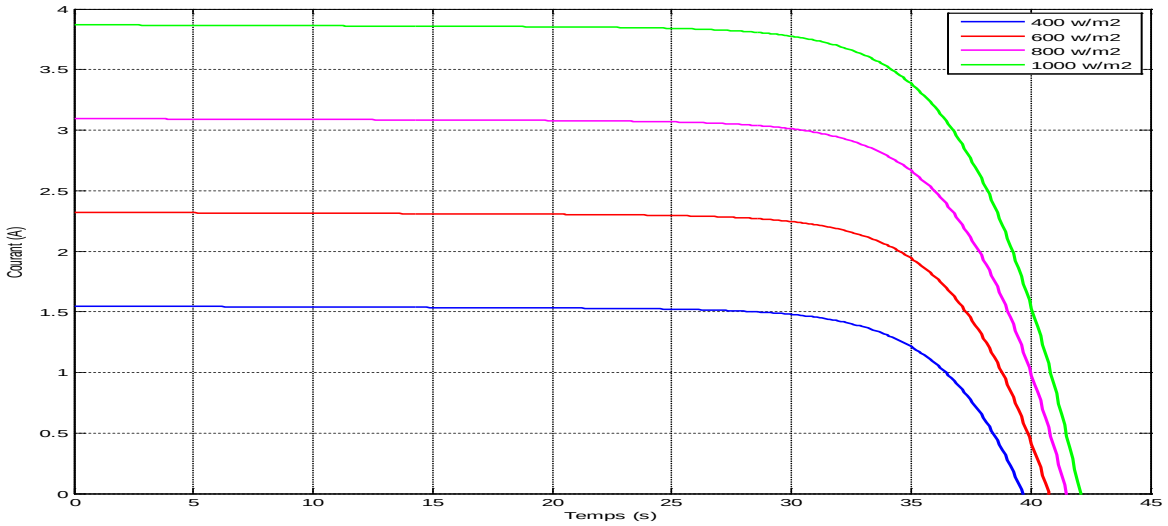


Figure 4.17. Résulta de simulation des Caractéristiques d'un module photovoltaïque I=f(V) pour déférente éclairement et une T=25C°.

Conclusion :

Au cours de ce chapitre on a procédé à la modélisation et la création sous forme de block sous Matlab/Simulink du système composé de : GPV, convertisseur DC-DC (hacheur BOOST) ainsi que la commande MPPT et la charge.

La simulation du module photovoltaïque à permet d'avoir les caractéristiques I-V et P-V ou on à vue que les changements dans la température et l'irradiation alterne directement les performances du générateur PV, et ainsi on a procédé a la validation de notre model a savoir le PB MX120.

CHAPITRE 5

Partie Simulation

Introduction

Le principe de Recherche du Point de Puissance Maximum ou bien « Maximum Power Point Tracking » en anglo-saxon (MPPT) est d'effectuer une recherche de ce point tout en assurant une parfaite adaptation entre le générateur et sa charge de façon à transférer le maximum de puissance.

La commande MPPT est nécessairement associée à un quadripôle possédant des degrés de liberté qui permettent de pouvoir faire une adaptation entre le GPV et la charge. Dans le cas de la conversion solaire, le quadripôle peut être réalisé à l'aide d'un convertisseur DC-DC de telle sorte que la puissance fournie par le GPV corresponde à la puissance maximale (PMAX) qu'il génère et qu'elle puisse ensuite être transférée directement à la charge.

La technique de contrôle communément utilisée consiste à agir sur le rapport cyclique de manière automatique pour amener le générateur à sa valeur optimale de fonctionnement qu'elles que soient les instabilités météorologiques ou variations brutales de charges qui peuvent survenir à tout moment.[57] [4].

Au cours de ce chapitre nous allons appliquer trois (03) techniques pour la recherche du PPM à savoir

- Algorithme de contrôle de PPM Perturbation et Observation (P&O).
- Algorithme de contrôle de la logique floue Type 1(FLCT1).
- Algorithme de contrôle de la logique floue Type 2(FLCT2).

Premièrement nous allons à l'aide du logiciel MATWORKS MATLAB-SIMULINK simulé ces commandes ensuite on va appliquer les différents tests afin de percevoir leurs robustesse et finalement on va faire une étude comparative entre ces trois commandes.

5.1. Simulation des trois commandes MPPT (P&O, Logique Floue Type1, Logique Floue Type2) :

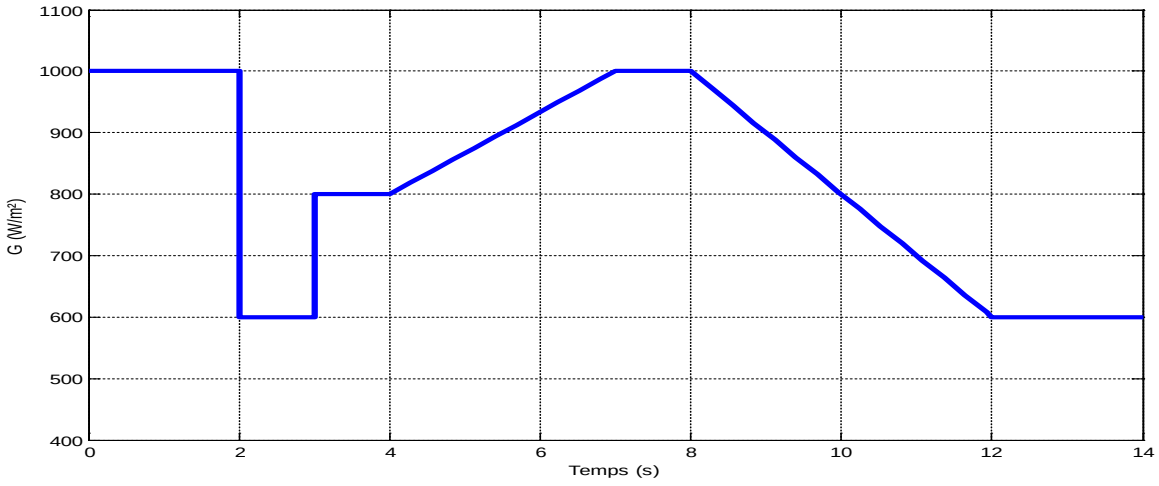
On a retenue trois tests à appliquer sur nos trois techniques de commandes, le premier se déroulera sous les conditions standard, le deuxième avec un changement d'irradiation et température constante et en fin le troisième avec un changement de température comme suite et l'irradiation constante.

TEST 1 : sous les conditions standard les valeurs de l'irradiation et la température sont stabilisés à G=1000W/m² et T=298°K (25°C).

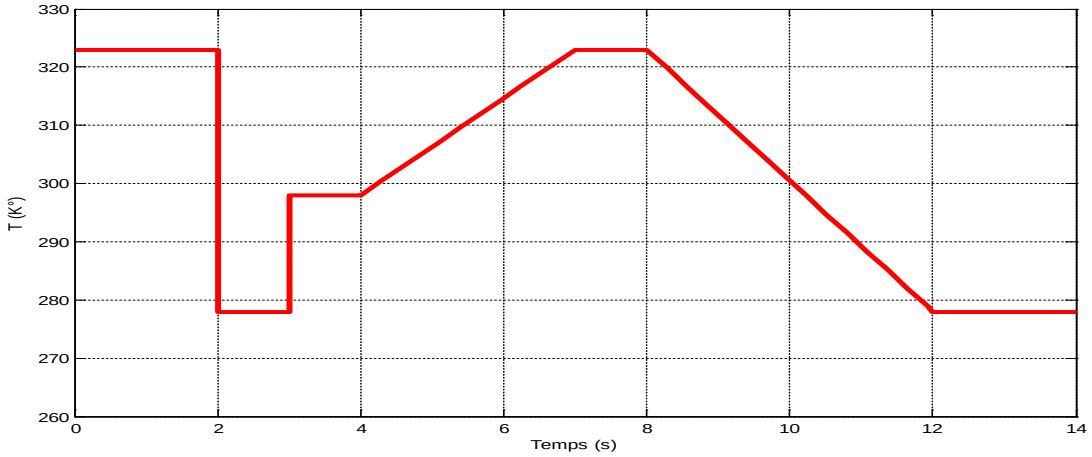
TEST 2 : changement d'irradiation : dans ce test la température étant considérée comme constante (T=298°K (25°C), l'irradiation est stabilisé à la valeur 1000W/m² pendant 2 secondes comme il est présenté dans la figure 5.1.a. ensuite elle diminue brusquement jusqu'à la valeur 600W/m² et se stabilise dans l'intervalle [2s-3s] et après, elle augmente rapidement jusqu'à la valeur 800W/m² et se stabilise encore dans l'intervalle[3s-4s] puis elle augmente lentement dans l'intervalle [4s-7s] jusqu'à la valeur 1000W/m² et puis se stabilise à cette valeur dans l'intervalle [7s-8s] ,après elle diminué lentement dans l'intervalle [8s-12s] jusqu'à 600W/m² . A la fin, elle s'immobilise dans l'intervalle [12s-14s] à la valeur 600W/m².

TEST 3 : changement de température : Dans ce cas l'irradiation est fixée à la valeur de 1000W/m²,

La température seras fixée à la valeur 323°K(50°C) pendant 2 secondes comme il est présenté dans la figure 5.1.b. puis elle diminue rapidement jusqu'à la valeur 278°K(5°C) et se stabilise pondant [2s-3s] et après, elle augmente rapidement jusqu'à la valeur 298°K(25°C) et se stabilise encore dans l'intervalle [3s-4s] puis augmente lentement dans l'intervalle [4s-7s] jusqu'à la valeur 323°K(50°C) et puis se stabilise dans cette valeur dans l'intervalle [7s-8s] ,après elle diminué lentement dans l'intervalle [8s-12s] jusqu'à 278°K(5°C) en fin, elle est figée sur l'intervalle [12s-14s] à la valeur 278°K.



a- L'irradiation



b- Température

Figure 5.1. Variation de l'Irradiation et de la Température

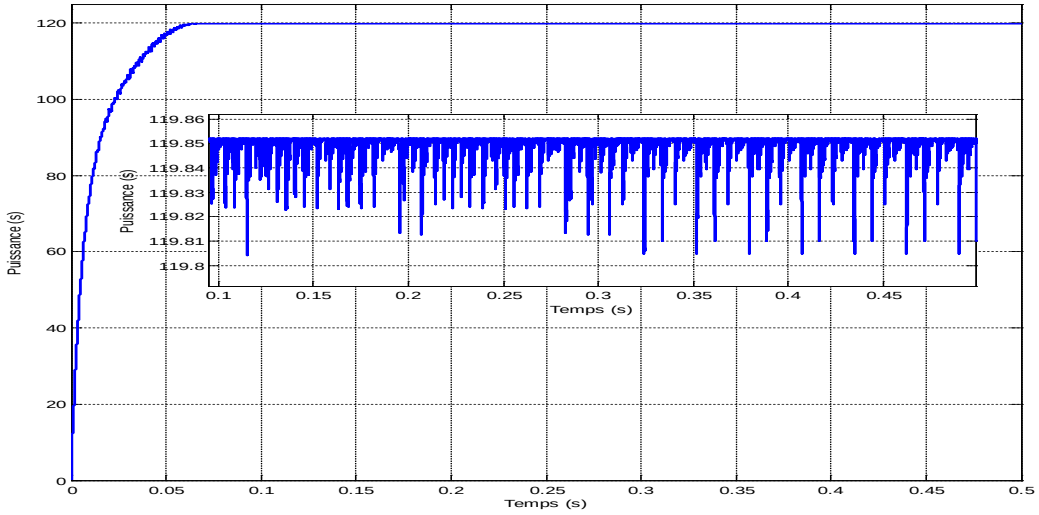
Afin de différencier les différentes technique de commandes MPPT utilisé lors de cette simulation on a préféré diviser cette dernière en deux partie, la première dite conventionnelle dans notre cas on ce basera juste sur la méthode Perturbation et Observation (P&O), et la deuxième dite intelligente comprenant les commandes Floue Type 1 et 2.

A- Techniques conventionnels

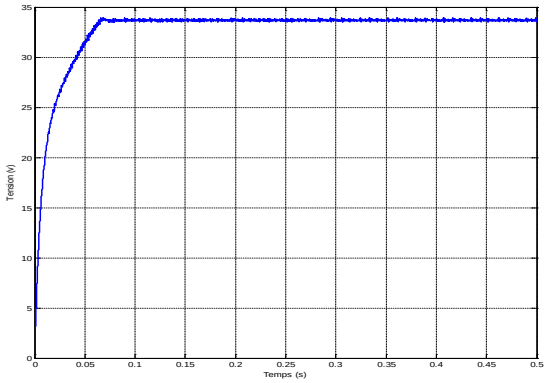
Simulation de l'algorithme P&O :

A-1- conditions standards ($T=25^0C$ & $G=1000W/m^2$) :

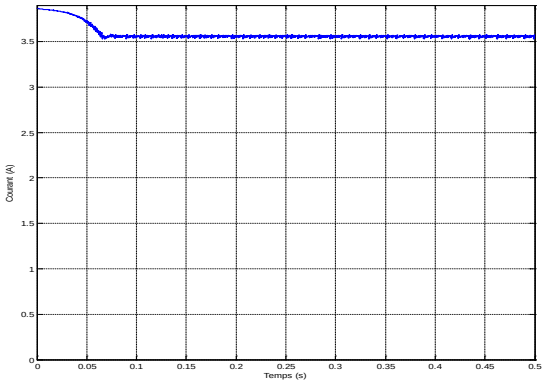
La figure 5.2 montre Les résultats de simulation du système photovoltaïque ajusté par la commande MPPT« Perturbation et observation » dans les conditions standards.



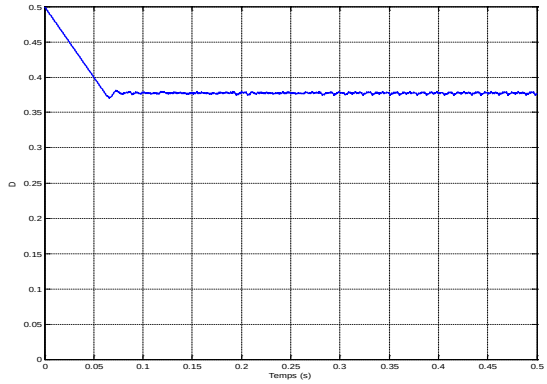
a- Puissance



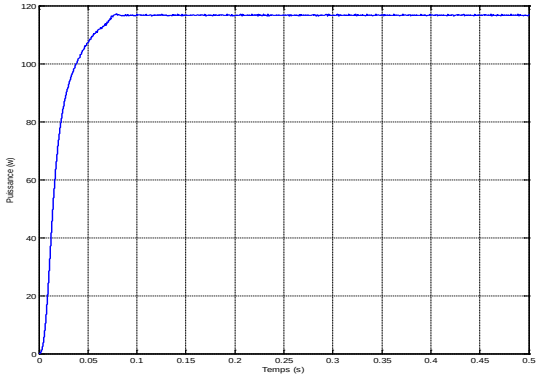
b- Tension



c- Courant



d- Rapport cyclique



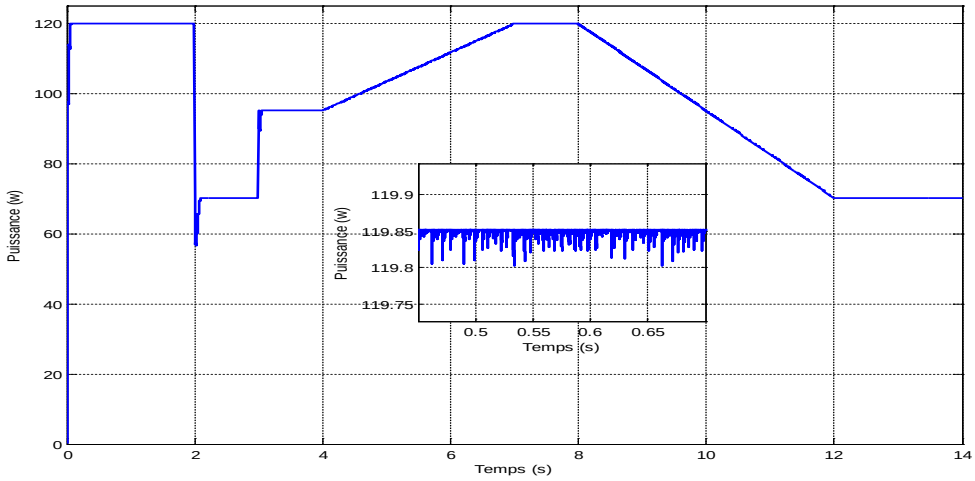
e- P charges

Figure 5.2. Réponse de l'algorithme P&O dans les conditions standards

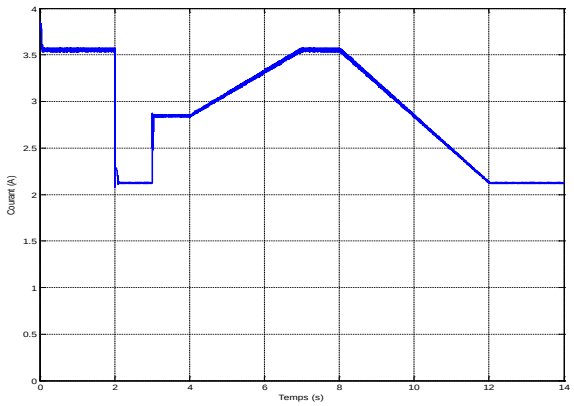
(T=25^{o}C & G=1000W/m^{2})

A-2- Comportement de la méthode à un changement d'irradiation :

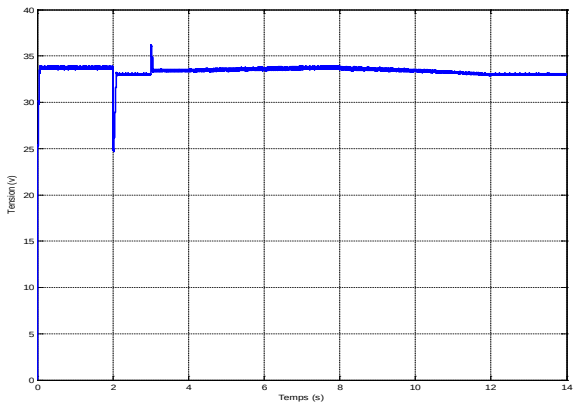
La figure 5.3 montre Les résultats de simulation du système photovoltaïque ajusté par la commande MPPT« Perturbation et observation » pour G variable et T constante 25 C°.



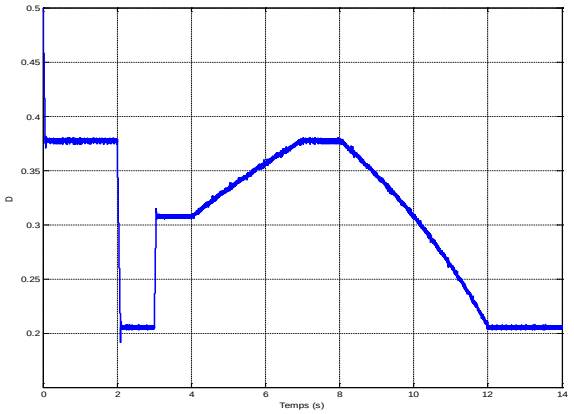
a- Puissance



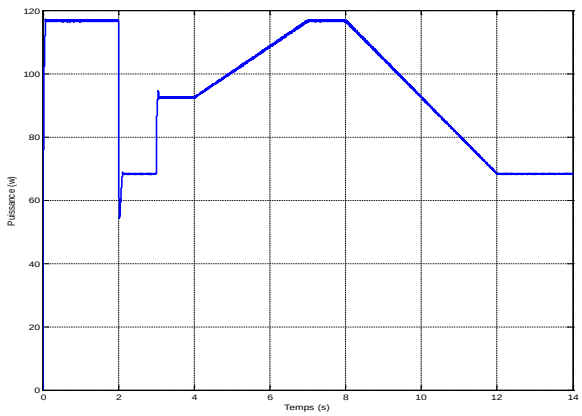
c- Courant



b- Tension



d- Rapport cyclique



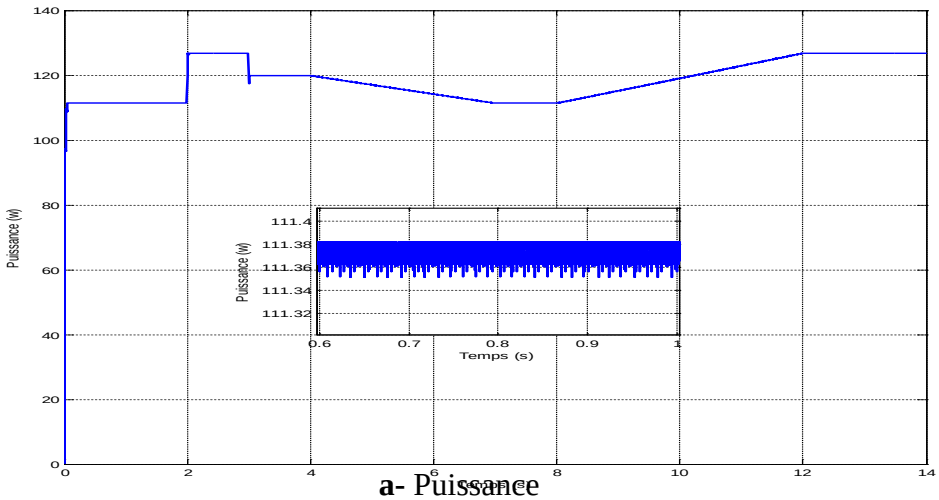
e- P charges

Figure5.3. Réponse du contrôle P&O pour une variation d'irradiation avec *(T=25C°)*.

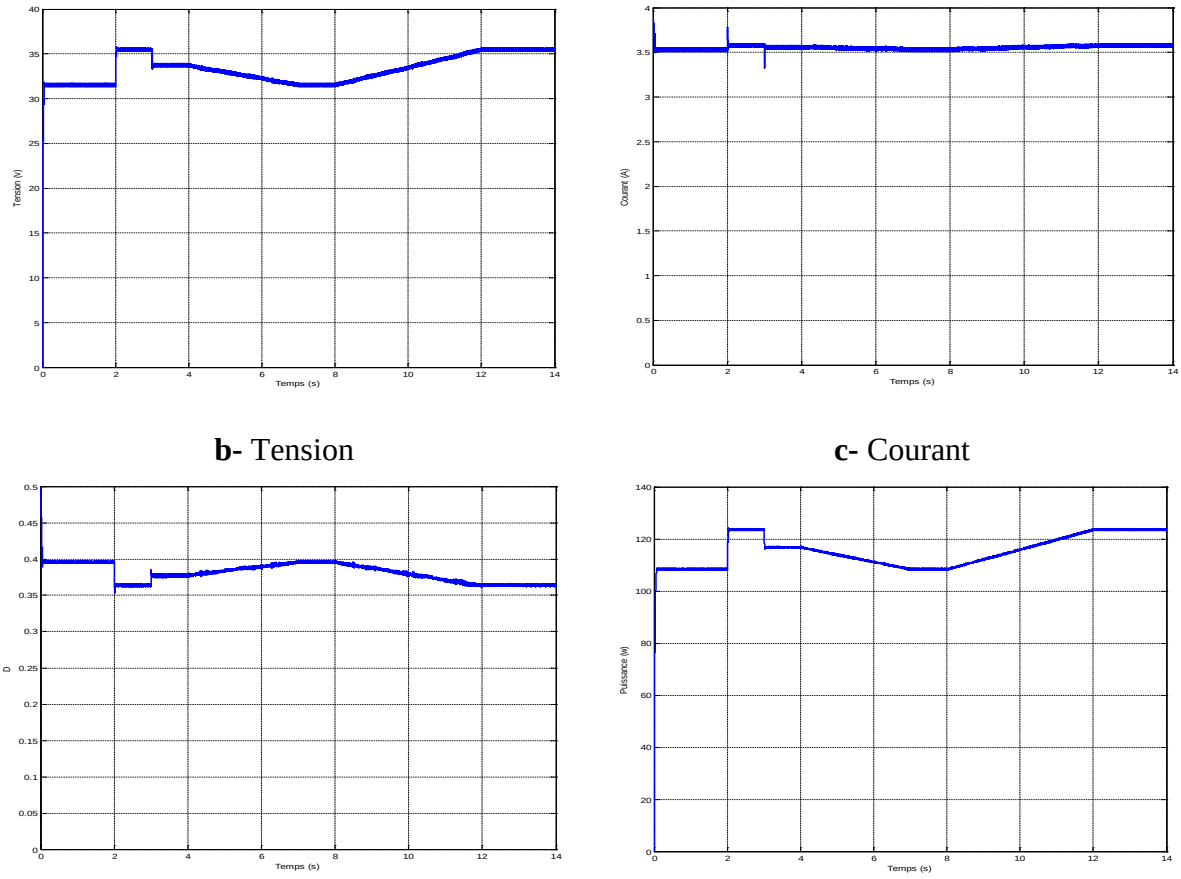
Pour ce test, on constate des fluctuations autour du point de puissance maximale (PPM) due à l'augmentation de la puissance qui est causé par l'augmentation de l'irradiation.

A-3-Comportement de la méthode à un changement de température :

La figure 5.4 montre Les résultats de simulation du système photovoltaïque ajusté par la commande MPPT« Perturbation et observation » pour G constant (1000w/m2) et T variable.



a- Puissance



b- Tension **c-** Courant

d- Rapport cyclique e- P charges

Figure5.4. Réponse du contrôle P&O pour une variation de température avec (G=1000W/m²)

Sous l'effet de l'augmentation de la température la puissance produite par le système PV diminue avec toujours des fluctuations autour du PPM.

B- Techniques intelligentes.

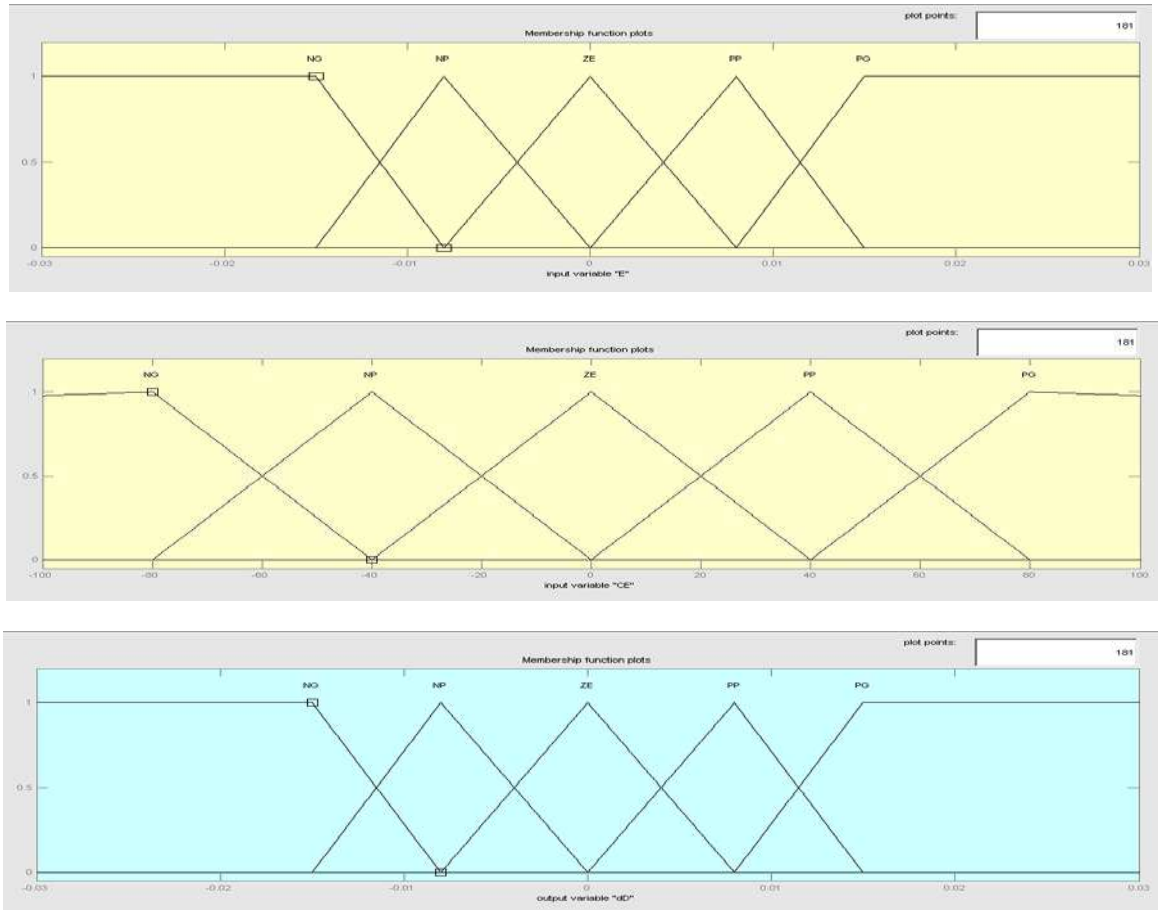
B-1-Simulation des algorithmes génétiques.

Au cours de nos travaux de simulation nous avant été confronté aux problèmes de déterminations par tâtonnement des gains statiques (GE, GdE, GdD) des contrôleurs Floue Type 1 et 2 confondues, pour cause cette méthode comporte trop d'incertitude et qui ne permettra pas d'avoir des résultats optimales, a cet effet il c'est avérer qu'il est nécessaires d'appliquer une méthode d'optimisation robuste pour déterminer ces gains. Notre choix c'est portait sur l'optimisation par Algorithme génétique [59].

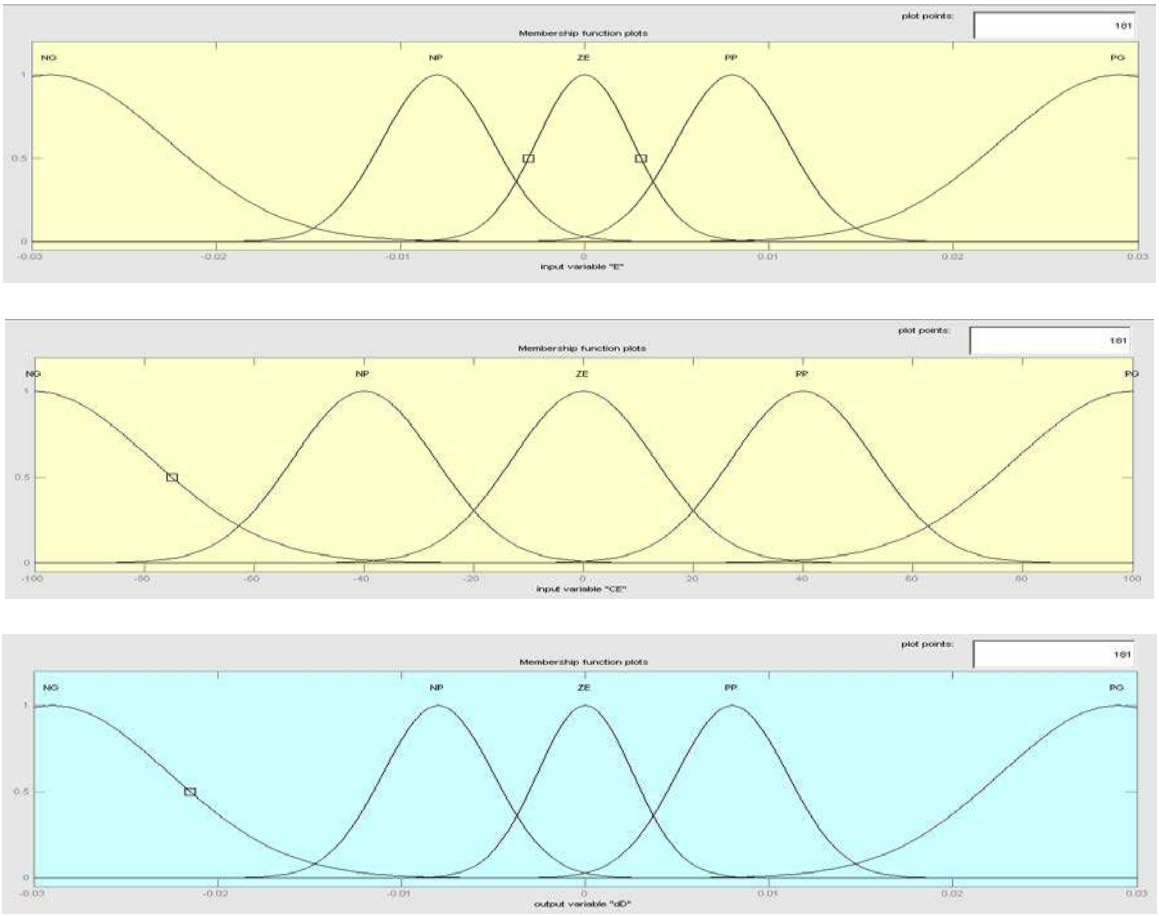
Compte tenue que le TOOLBOX (Annexe 3) utiliser pour la commande Floue Type 2 comporte uniquement des fonctions d'appartenance gaussienne Figure 5.5.cdans notre cas on a opter pour le moteur d'inférence Mamdani (NON-Singelton Type-2 Mamdani FIS) [60], pour cela nous somme

donc obligé d'utiliser les mêmes formes des fonctions pour la commande floue type 1 pour avoir les résultats les plus précises que possible, à cet effet une étude comparatives a été faite pour la commande floue type 1 entre les fonctions d'appartenances triangulaires Figure 5.5.a et gaussiennes Figure 5.5.b, la simulation a permet d'avoir les résultats suivants pour la puissance du générateur GPV Figure 5.5.d et le rapport cyclique Figure 5.5.e.

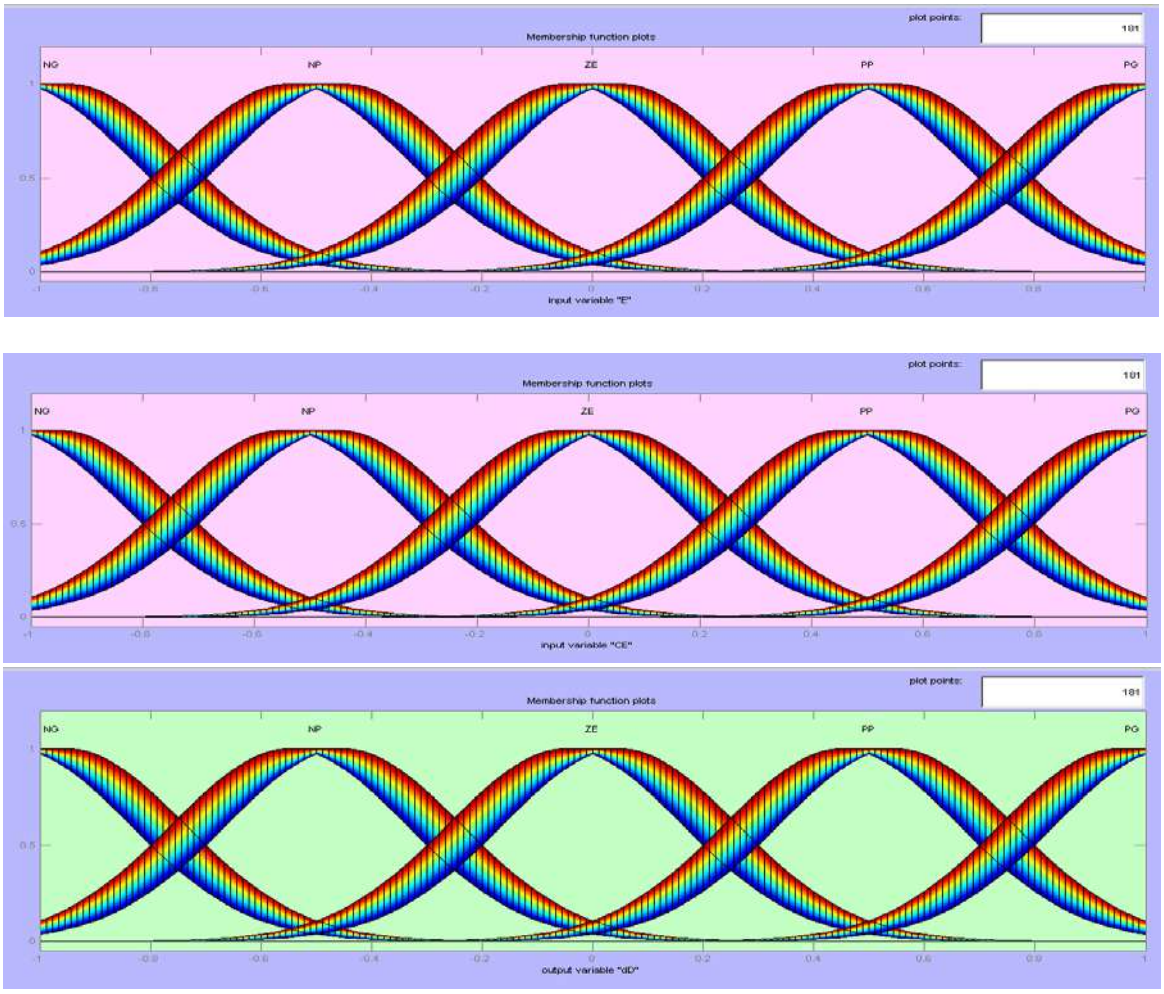
D'après les Figures 5.5 d et 5.5 e en voix clairement une différence entre les courbes de la puissance des contrôleurs utilisant des fonctions d'appartenances triangulaire et gaussienne. En effet pour la puissance la première présente un retard par rapport à l'autre coté régime transitoire et coté régime permanant en remarque l'absence des oscillations pour les deux, tandis la courbe du rapport cyclique en remarque toujours le retard en plus la présence des oscillations pour le contrôleur floue type 1 avec des fonctions triangulaire. Pour cela nous allons utiliser le contrôleur Floue Type 1 avec des fonctions d'appartenances gaussiennes pour le reste des tests. A noté que les gains statiques du contrôleur flou type 1 lors de cette simulation ont été calculés par les algorithmes génétiques [voir plus bas].



a- Fonction d'appartenance Triangulaire du contrôleur floue type 1

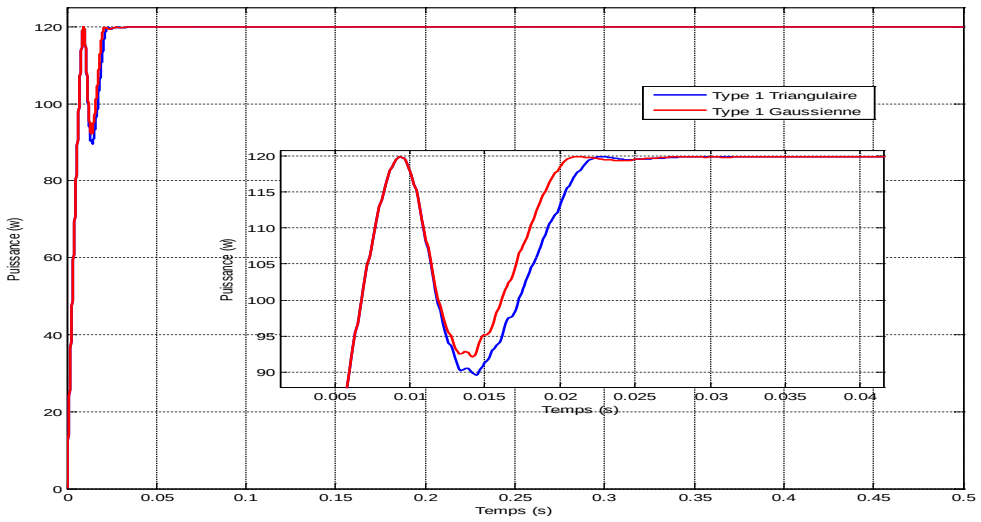


b- Fonction d'appartenance Gaussienne du contrôleur floue type 1

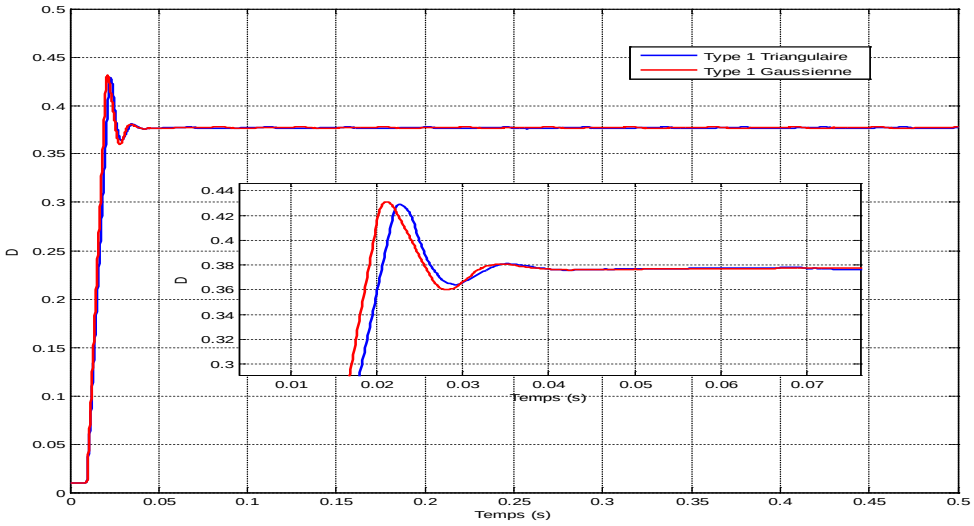


c- Fonction d'appartenance Gaussienne du contrôleur floue type 2

Figure 5.5. Fonction d'appartenance Gaussienne du contrôleur floue type 1 et 2



c- Puissance



e- Rapport cyclique

Figure 5.6. Différence entre fonctions d'appartenance triangulaire et gaussienne

Pour le contrôleur Floue type1

pour cette simulation nous avons utilisé le critère d'erreur quadratique à minimiser (Intégral Square Erreur ISE), ce choix a été fait dans le but d'améliorer le temps de réponse et de réduire les fluctuations comme le montre les équations (5.1) et (5.2), ou « **J** »représente la fonction de Fitness et « **e** » la différence entre la puissance maximale produite par le GPV et la puissance réel **[24][25][26][27]**.

- $\mathbf{J} = \int e^2(t)\, dt$ (5.1)
- $\mathbf{e} = P_{max} - P_{réel}$ (5.2)

La simulation des contrôleurs floue type 1 et 2 a permet d'avoir les résultats suivant.

*** Simulation par Algorithme Génétique du contrôleur Floue Type 1.**

a- <u>fonction d'appartenance triangulaire</u>.

LES GAINS obtenus

GE = 0.009964546404358

GdE = 0.065623960500315

GdD = 0.159941839144177

OPTIONS GAs.

n vars = 3;

Population Size_Data =50;

Crossover Fraction_Data =0.9;

Migration Fraction_Data=0.7;

Generations Data=50;

StallGenLimit_Data=50;

EliteCount_DATA=5;

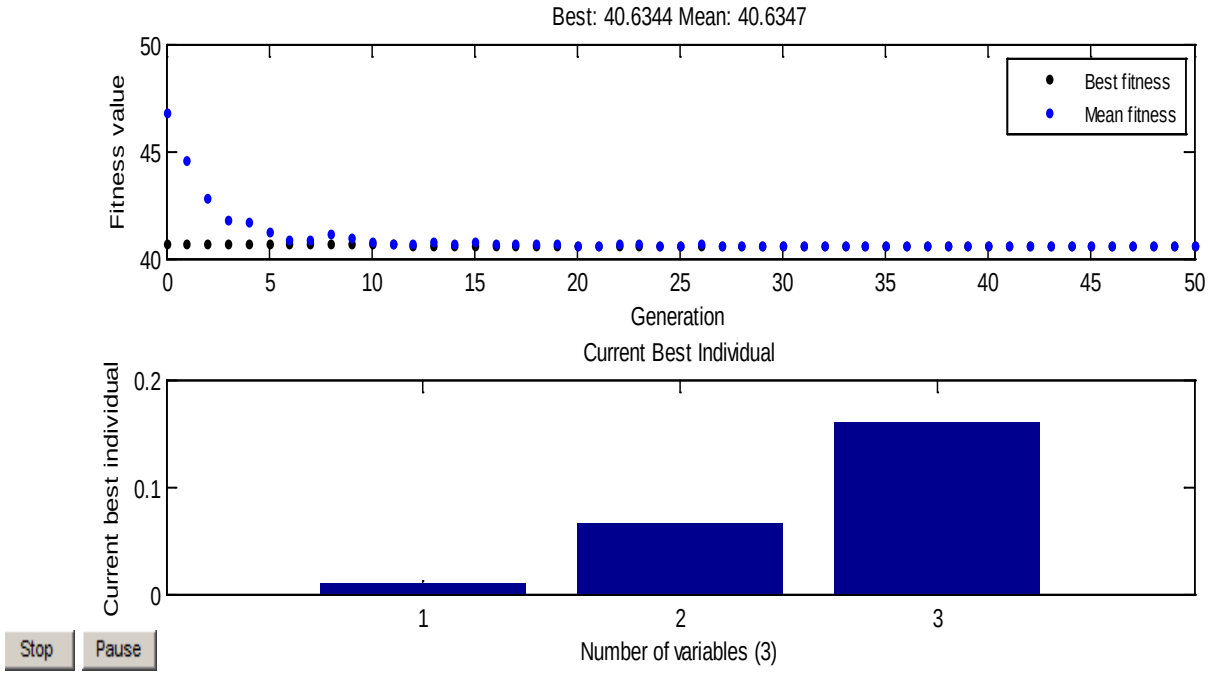


Figure5.7. Résultat de la simulation du contrôleur Floue type1 avec des fonctions d'appartenance triangulaire

La Figure 5.7 montre l'évolution de la best fitness et le mean fitness par rapport aux générations on remarque qu'il ya une stabilisation autour de trentième génération.

b- <u>fonction d'appartenance gaussienne</u>.

LES GAINS obtenus

GE = 0.009939564110079

GdE= 0.099498297581349

GdD = 0.159984800815582

OPTIONS GAs.

nvars = 3;

PopulationSize_Data =50;

CrossoverFraction_Data =0.9;

MigrationFraction_Data=0.7;

Generations_Data=50;

StallGenLimit_Data=50;

EliteCount_DATA=5;

La Figure 5.8 montre l'évolution de la best fitness et la mean fitness par rapport aux générations on remarque qu'il ya une stabilisation autour de trentième génération.

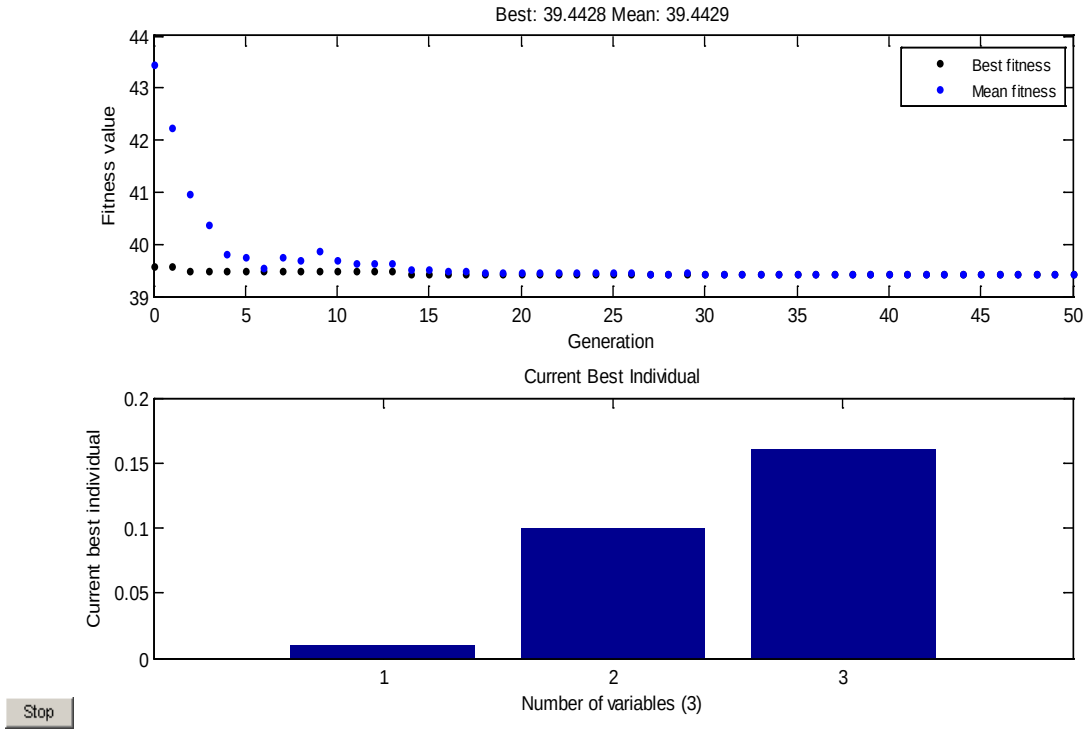


Figure5.8. Résultat de la simulation du contrôleur Floue type1 avec des fonctions d'appartenance gaussienne

***Simulation par Algorithme Génétique du contrôleur Floue Type 2.**

LES GAINS obtenus

GE = 0.079222003713837

GdE = 0.006600000000000

GdD= 0.053000000000000

OPTIONS GAs.

N vars = 3;

Population Size_Data =20;

Crossover Fraction_Data =0.9;

Migration Fraction_Data=0.7;

Generations_Data =20;

StallGenLimit_Data=50;

EliteCount_DATA =2;

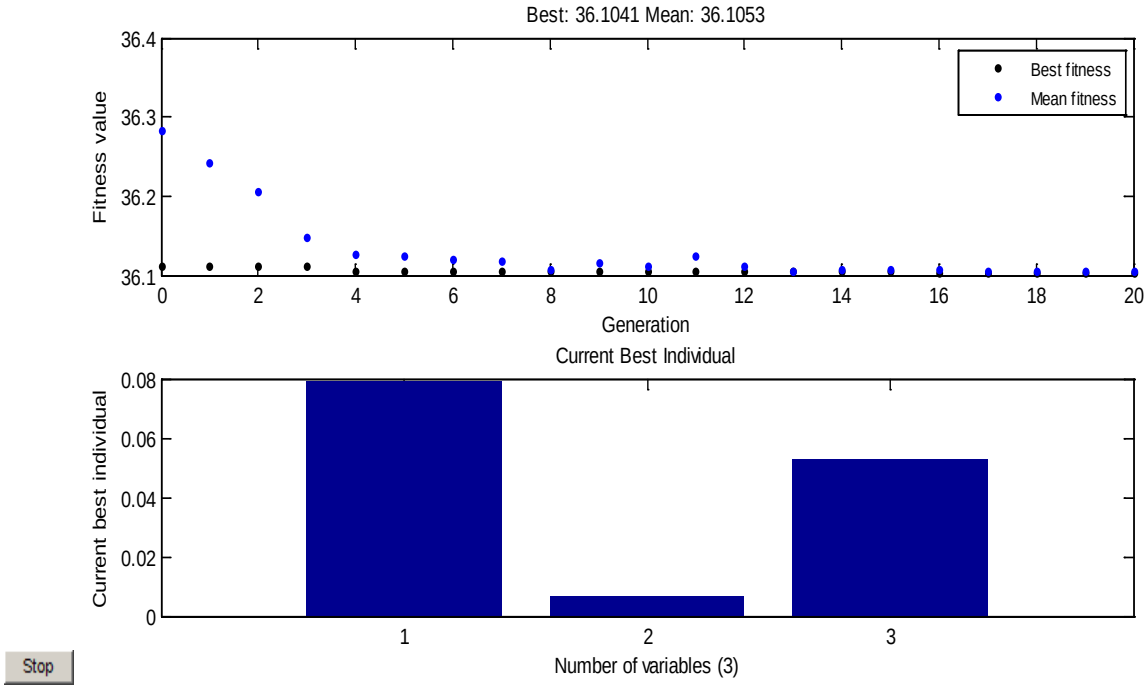


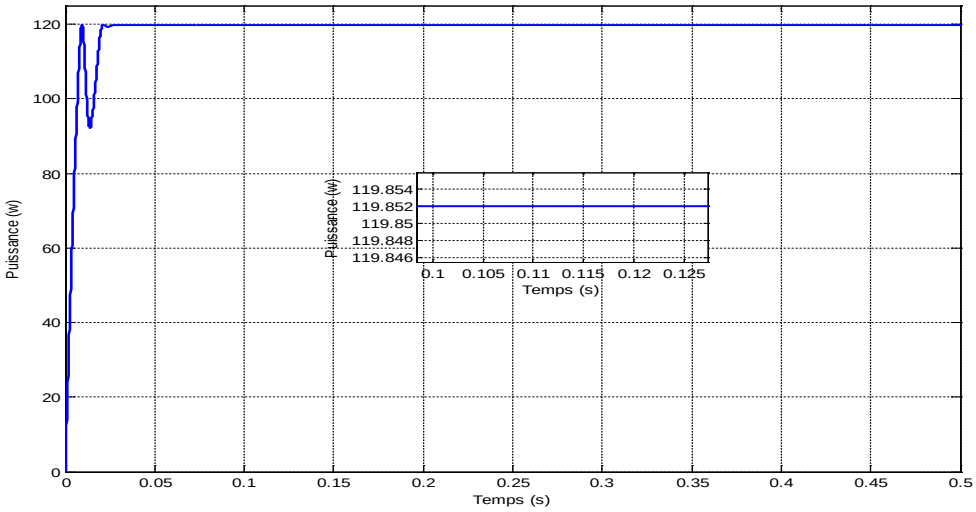
Figure5.9. Résultat de la simulation du contrôleur Floue type2

La Figure 5.9 montre l'évolution de la best fitness et la mean fitness par rapport aux générations on remarque qu'il ya une stabilisation autour de la treizième génération.

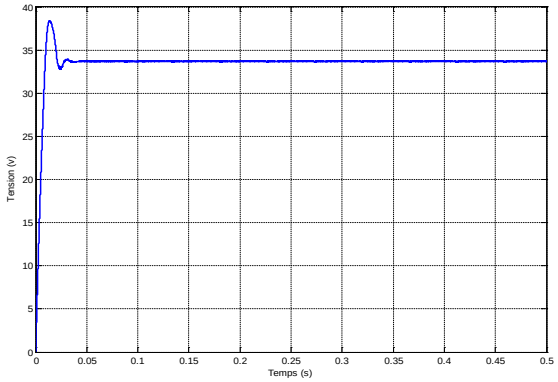
B-2-Simulation de l'algorithme de la logique floue Type1.

B-2-1- conditions standards ($T=25^0C$ & $G=1000W/m^2$) :

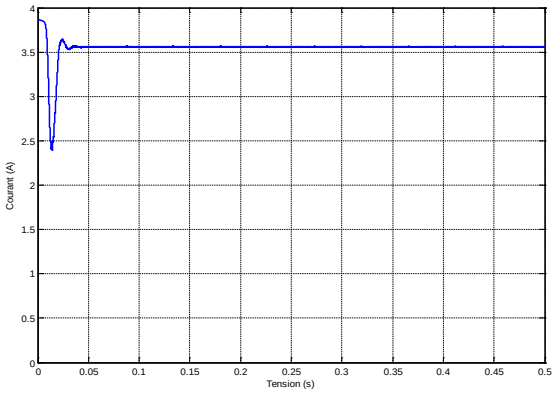
Les figures suivantes représentent l'algorithme flouetype1lors du fonctionnement du générateur photovoltaïque sous les conditions standards :



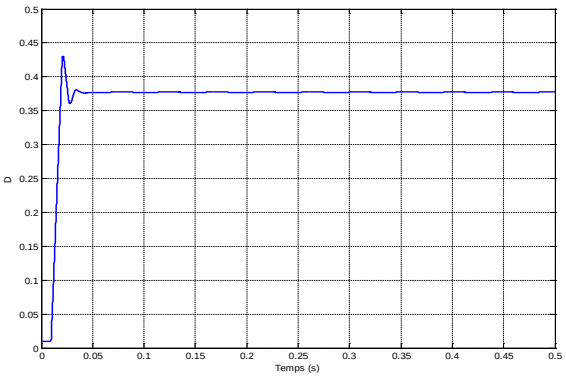
a- Puissance



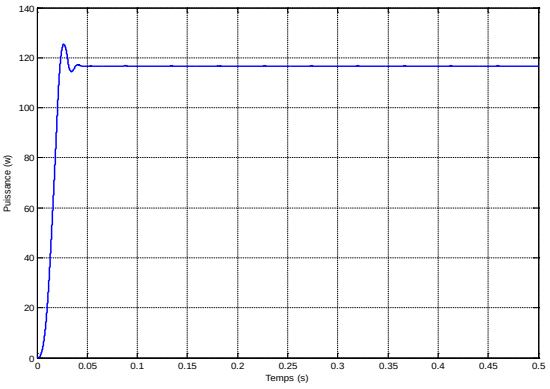
b- Tension



c- Courant



d- Rapport cyclique

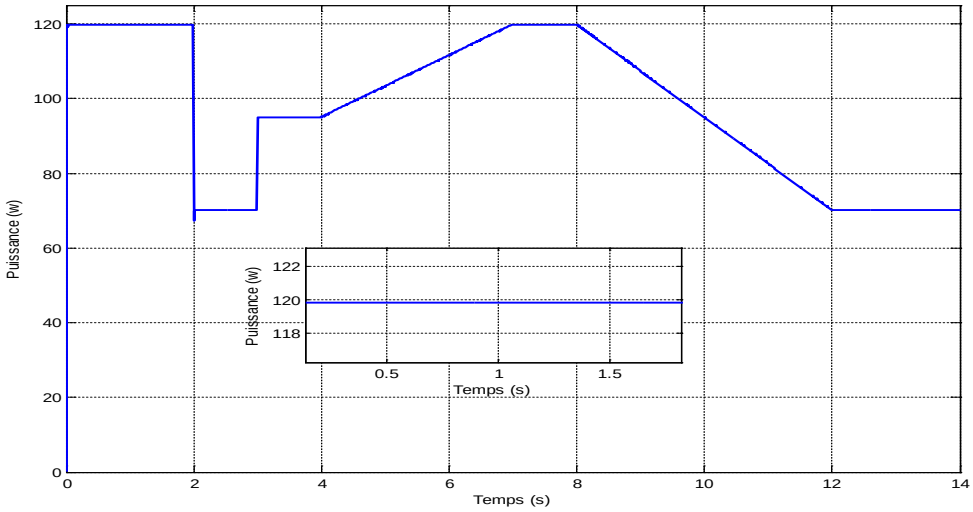


e- P charges

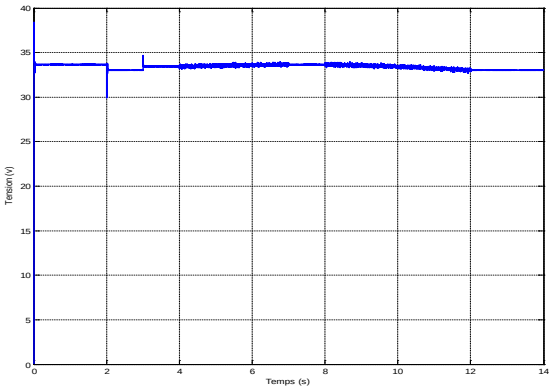
Figure5.10. Réponse de l'algorithme Floue type 1 dans les conditions standards (T=25^{o}C & G=1000W/m^{2})

B-2-2- Comportement de la méthode à un changement d'irradiation:

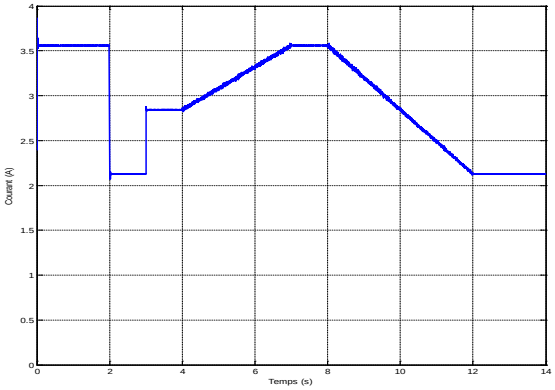
La figure 5.11 montre Les résultats de simulation du système photovoltaïque ajusté par la commande Floue Type 1 pour G variable et T constante 25 C°.



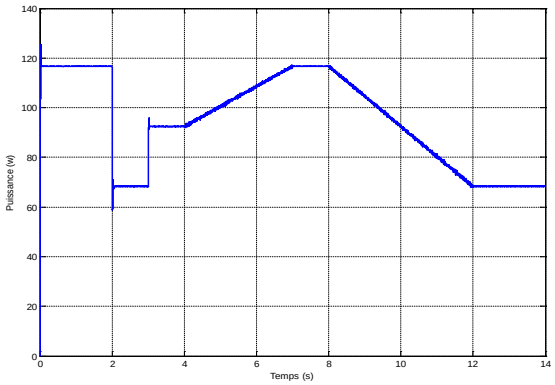
a- Puissance



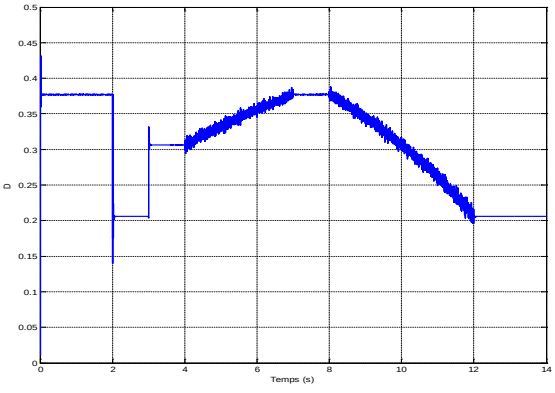
b- Tension



c- Courant



d- Rapport cyclique



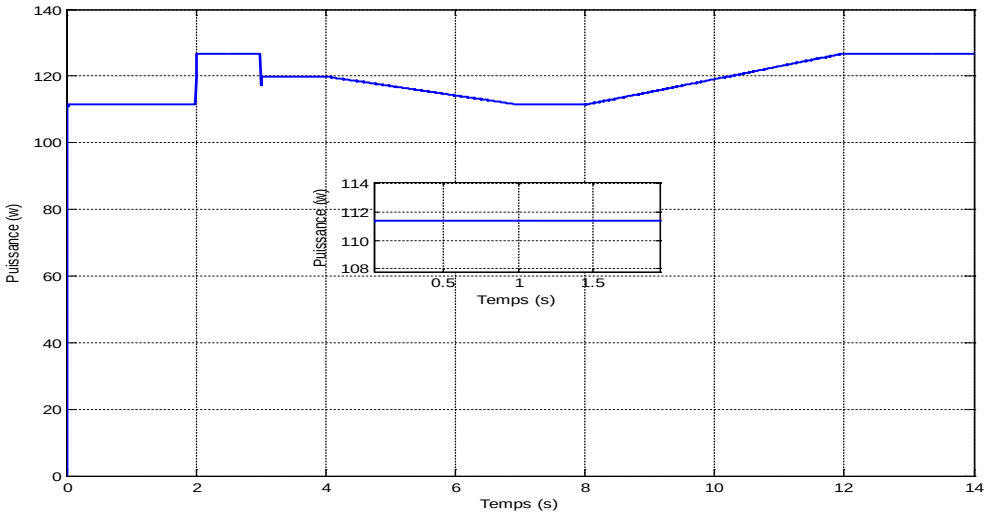
e- P charges

Figure5.11. Réponse du l'algorithme Floue Type 1 pour une variation d'irradiation avec(T=25C°).

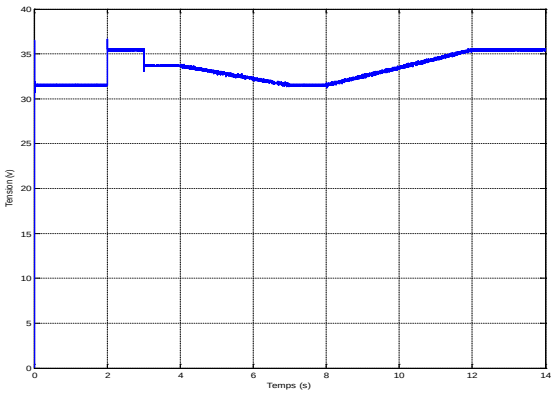
La commande floue type 1 suit très bienle MPP. Ces résultat montre que le contrôleur flou a une très bonne performance, il est stable dans des conditions d'irradiation changeantes.

B-2-3-Comportement de la méthode à un changement de température:

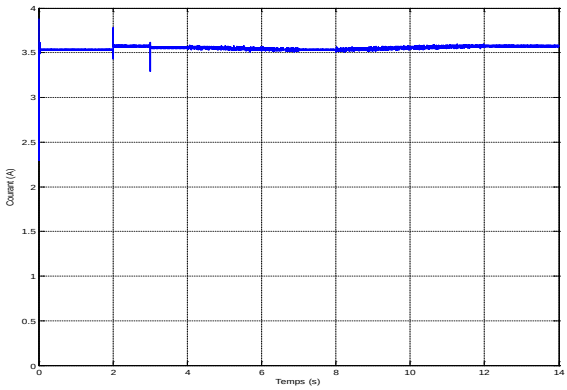
La figure 5.12 montre Les résultats de simulation du système photovoltaïque ajusté par la commande Floue Type 1 pour G constant (1000w/m2) et T variable.



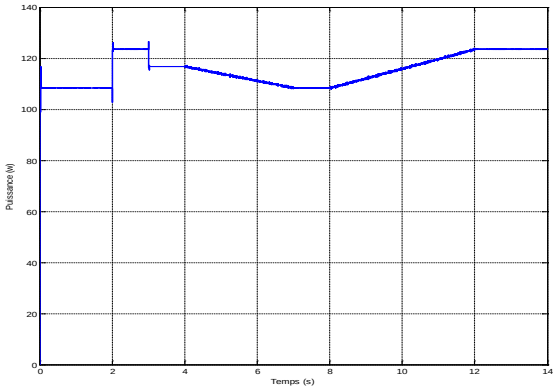
a- Puissance



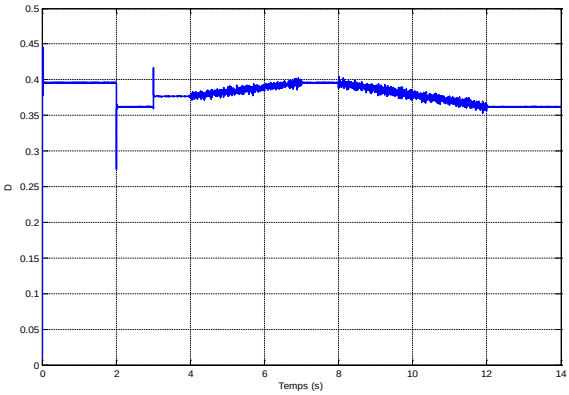
b- Tension



c- Courant



d- Rapport cyclique



e- P charges

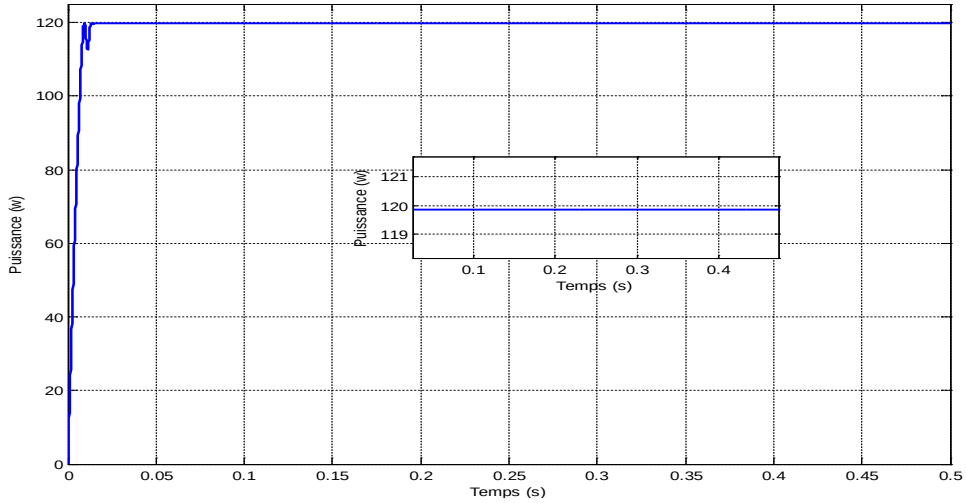
Figure5.12. Réponse du l'algorithme floue type1pour une variation de température avec (G=1000W/m²)

Sous l'effet de l'augmentation de la température la puissance produite par le système PV diminue avec une très bonne performance et bon stabilité autour du PPM.

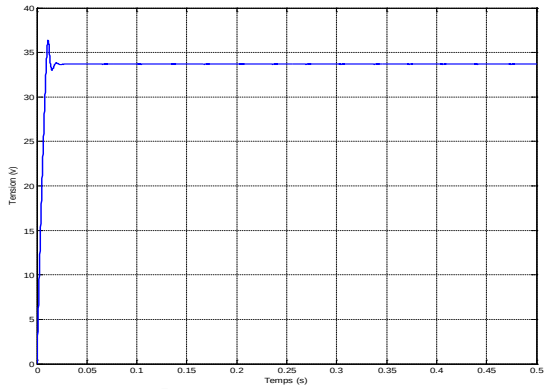
B-3-Simulation de l'algorithme de la logique floue Type2.

B-3-1- conditions standards (T=25^{0}C & G=1000W/m^2) :

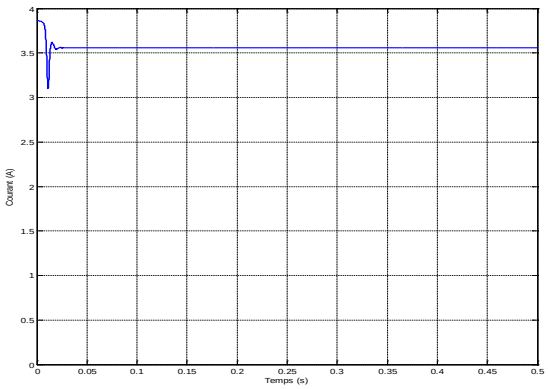
La Figure 5.13 illustre Les résultats de simulation du système photovoltaïque adapté par la commande Floue Type 2dans les conditions standard.



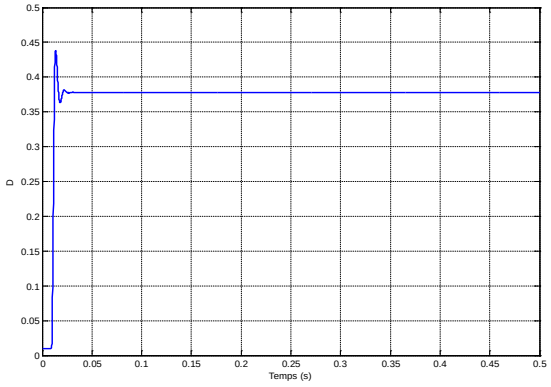
a- Puissance



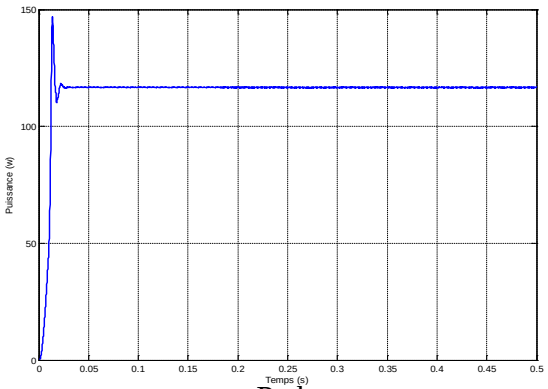
b- Tension



c- Courant



d- Rapport cyclique

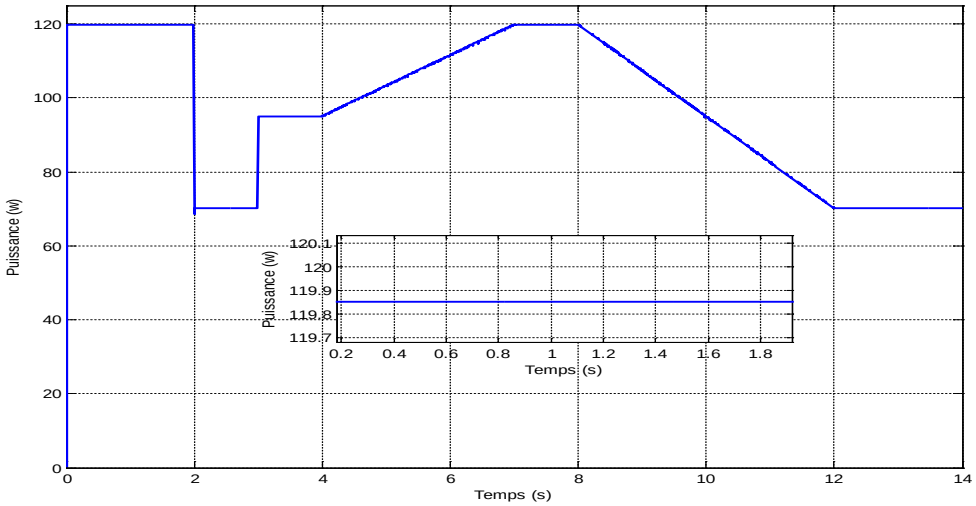


e- P charges

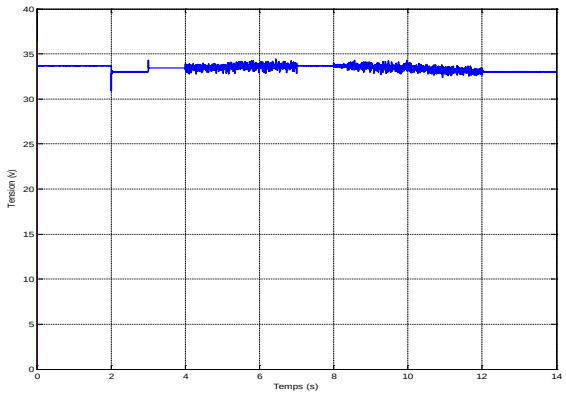
Figure5.13. Réponse de l'algorithme Floue type 2 dans les conditions standards (T=25^{o}C & G=1000W/m^2)

B-3-2- Comportement de la méthode à un changement d'irradiation :

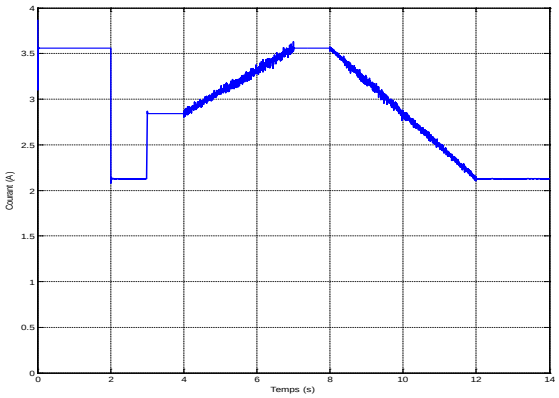
La figure 5.14 montre Les résultats de simulation du système photovoltaïque ajusté par la commande Floue Type 2 pour G variable et T constante 25 C°.



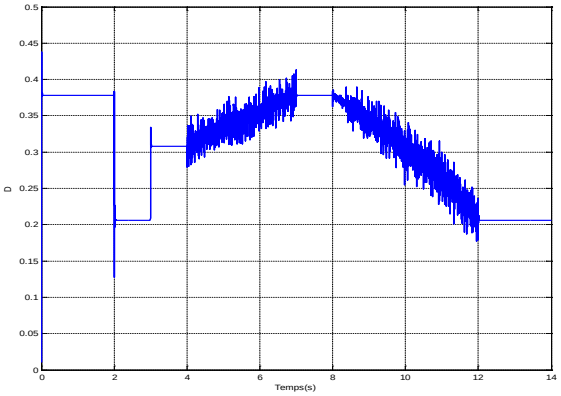
a- Puissance



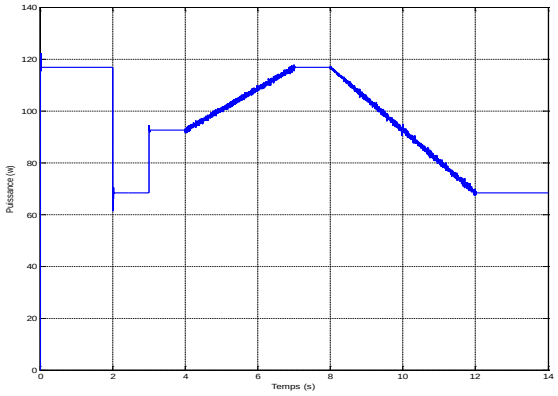
b- Tension



c- Courant



d- Rapport cyclique



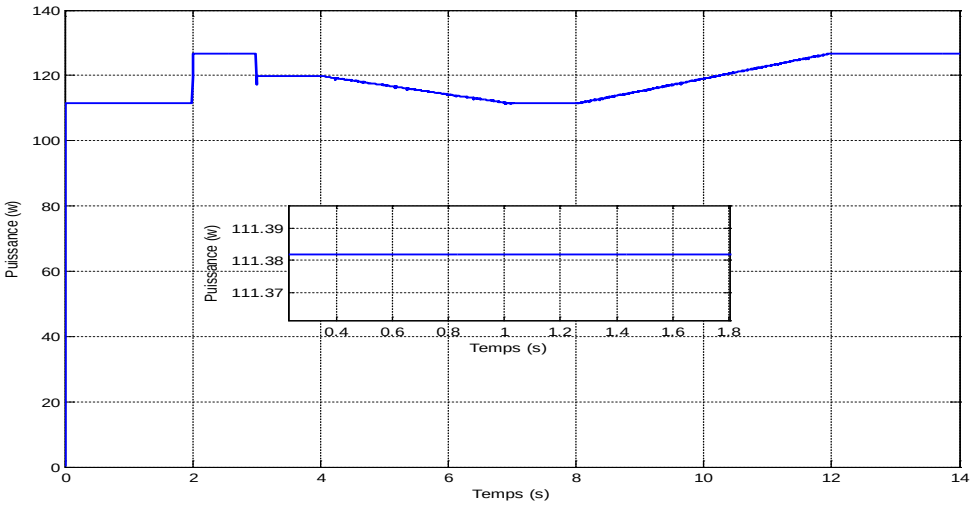
e- P charges

Figure5.14. Réponse du l'algorithme floue Type 2 pour une variation d'irradiation avec (T=25C°).

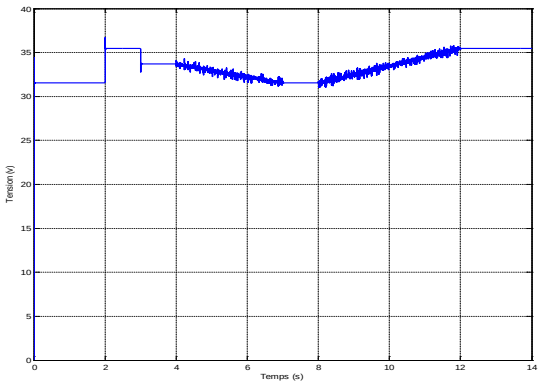
Similairement à la commande floue type 1, la commande floue type 2 suit très bien le MPP et présente des performances aussi bonnes au niveau de la stabilité.

B-3-3-Comportement de la méthode à un changement de température :

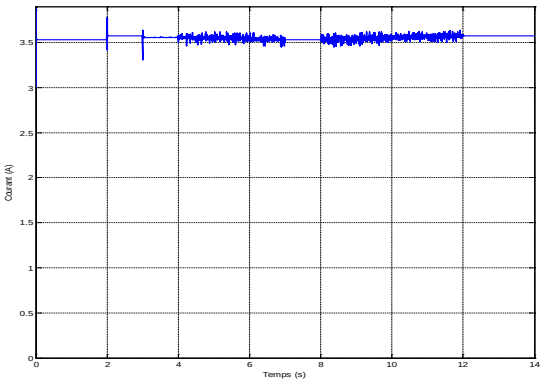
La figure 5.15 montre Les résultats de simulation du système photovoltaïque ajusté par la commande Floue Type 2 pour G constant (1000w/m2) et T variable.



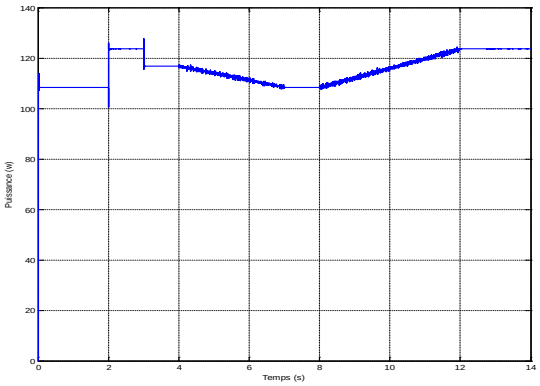
a- Puissance



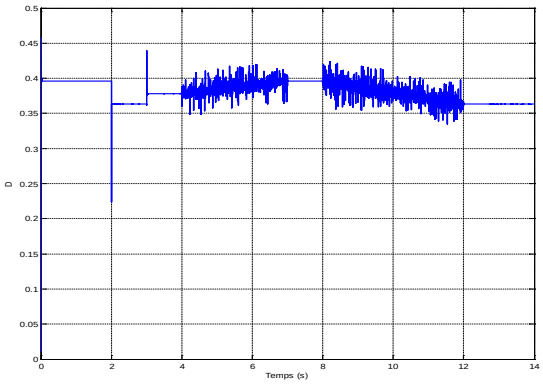
b- Tension



c- Courant



d- Rapport cyclique



e- P charges

Figure5.14. Réponse du l'algorithme floue type 2 pour une variation de température avec (G=1000W/m²)

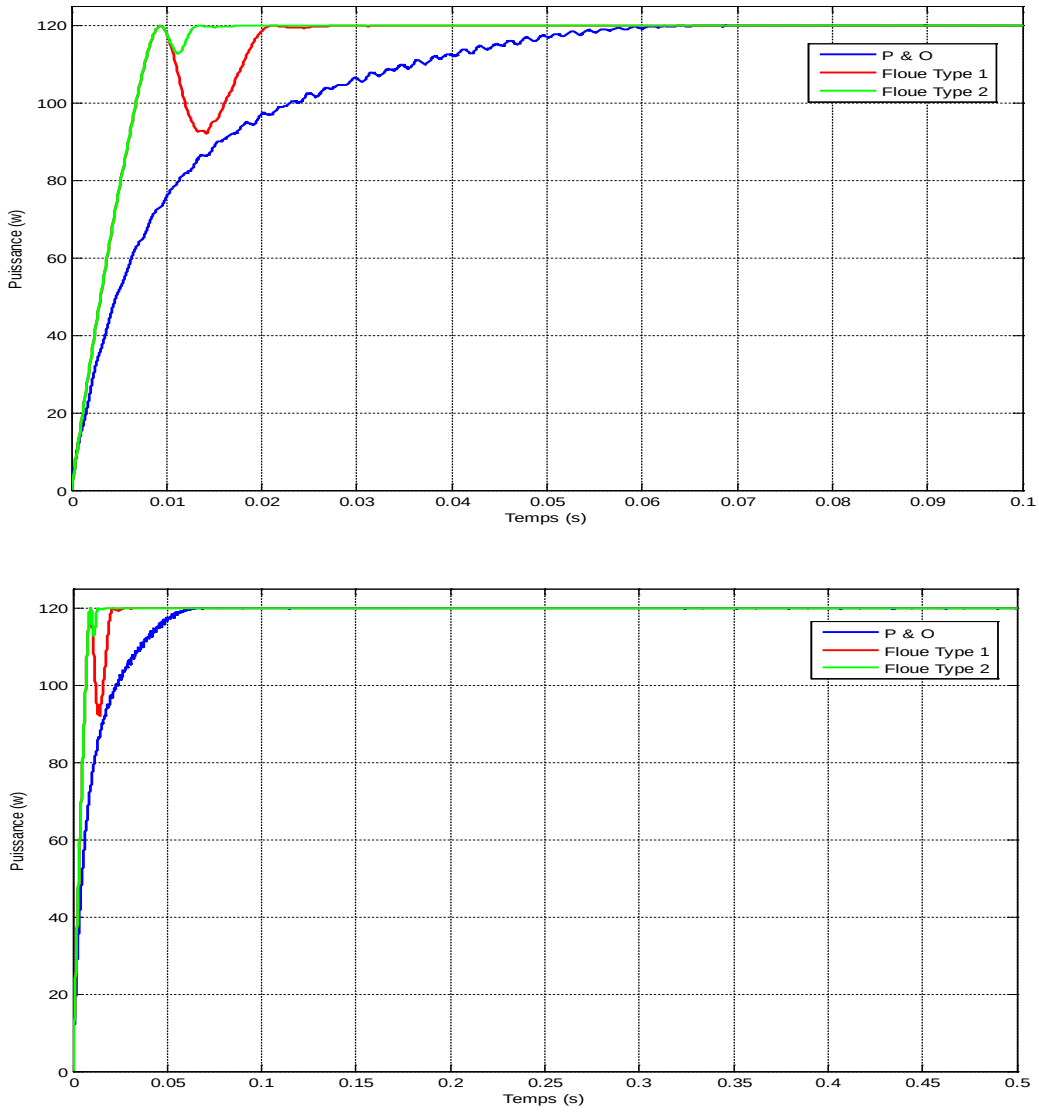
La commande floue type 2 suit très bien le MPP lors du changement de la Température avec de bonnes performances est stabilité.

5.2. Etude comparative de la puissance entre les trois contrôleurs :

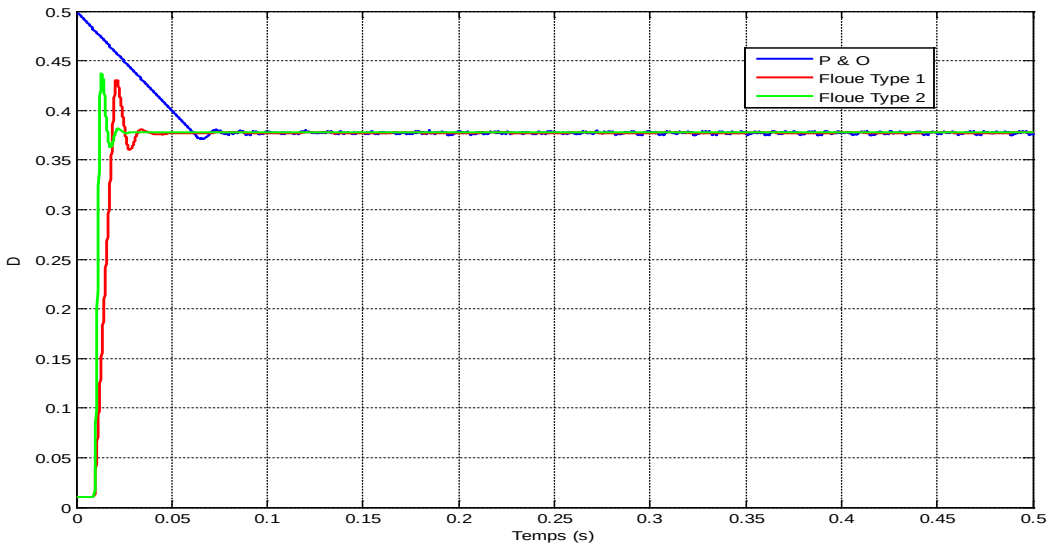
Pour savoir s'il ya eu une amélioration des performances on va simuler les trois commande en même temps premièrement dans les standard et en ensuite avec un changement d'irradiation.

5.2.1. Simulation des trois contrôleurs dans les conditions standard (T=25°C et G=1000 w/m^2) :

Les résultats de la simulation voir **Figure** 5.15 Ont prouvé la performance de la commande floue type 2 avec le meilleur temps de réponse et un minimum de perte de puissance dans le régime transitoire, suivi par le contrôleur floue type 1 et ensuite la commande P&O.



a- Puissance



b- Rapport cyclique

Figure 5.15. Réponse des algorithmes P&O, floue type 1 et Floue type 2 avec (T=25^{o}C & G=1000W/m^{2})

5.2.2. Simulation des trois contrôleurs dans les conditions (T=25°C et G variable):

Sur cette simulation en va comparer les trois contrôleurs dans les mêmes conditions à savoir un changement d'irradiation G (stable, rapide et lent) avec température fixe T=25°C .

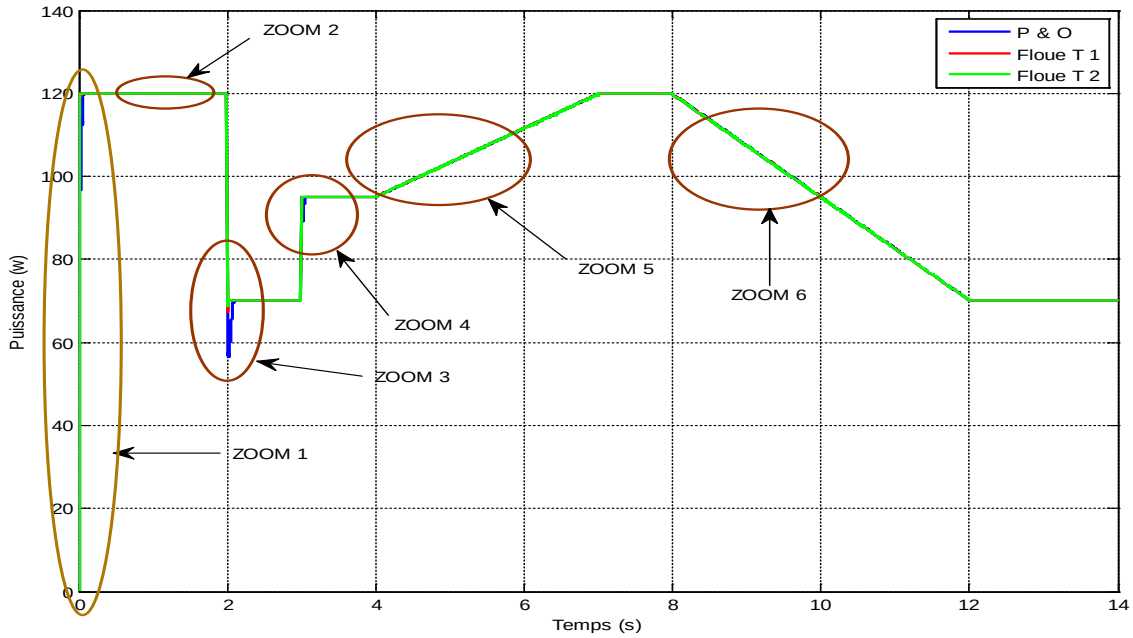
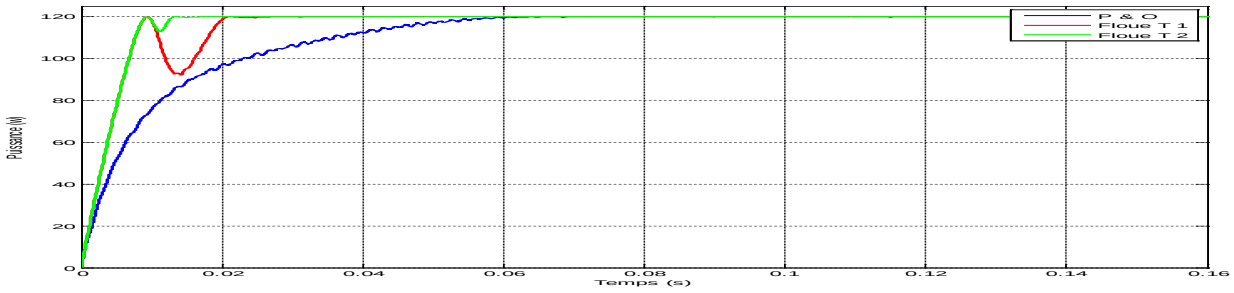
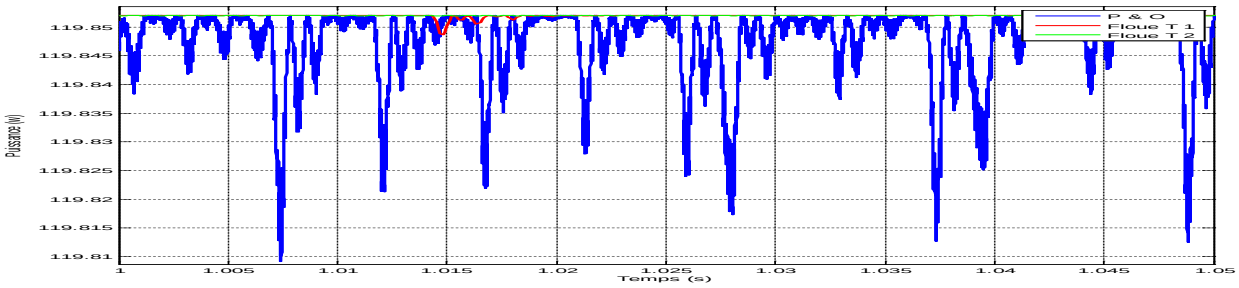


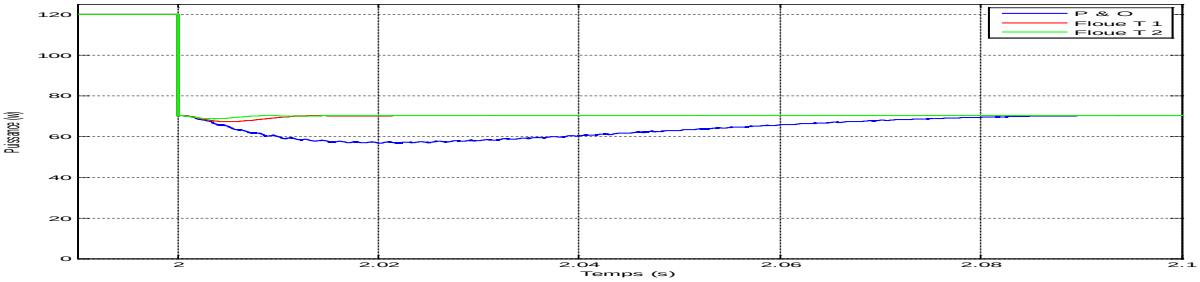
Figure5.16. Allure de la puissance des Trois contrôleurs dans les conditionsavec (T=25^{o}C & G=1000W/m^{2})



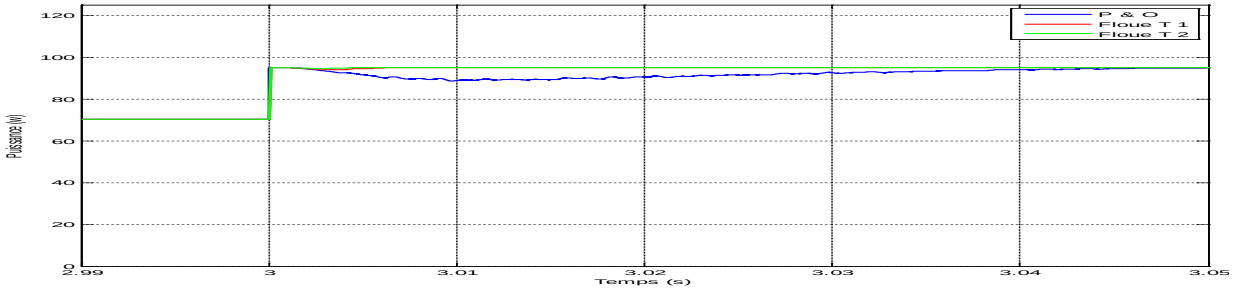
a- Zoom 1



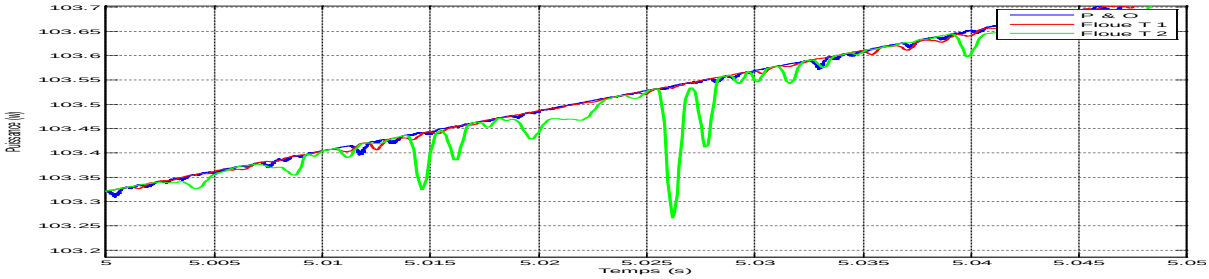
b- Zoom 2



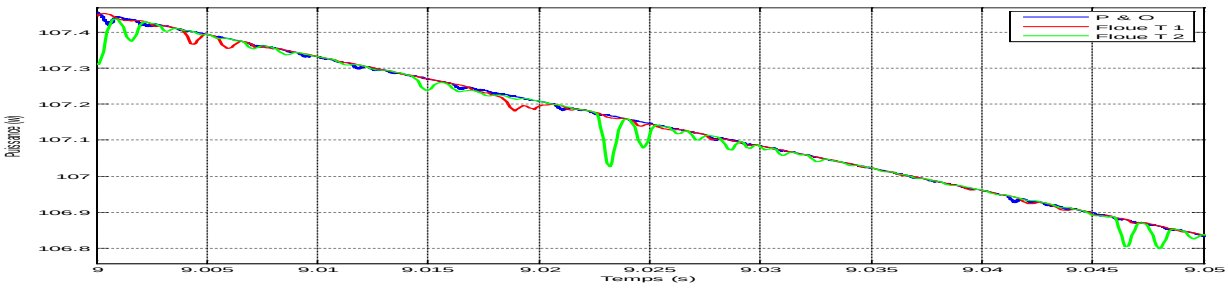
c- Zoom 3



d-Zoom 4



e- Zoom 5



f- Zoom 6

Figure 5.17. Zooms de l'évolution de la puissance des trois contrôleurs dans les conditions (T=25°C et G variable).

- ✓ Sur la Figure 5.17**(a)** on constate que le temps de réponse du contrôleur « floue Type 2 » est le plus rapideà0.012 s suivie par le contrôleur « Floue type 1 » à 0.025s en suite le dernier le contrôleur "P&O" à 0.06s.

- ✓ En remarque sur la Figure 5.17**(b)** que le contrôleur « Floue Type 2 » l'absence des oscillations autour du PPM, suivi du contrôleur « Floue Type 1 » qui reste très stable tandis le contrôleur « P&O » montre des oscillations importantes preuve de son imprécision a fonctionné dans le point optimal.

- ✓ Pour la Figure5.17**(c)**le contrôleur « floue type 2 » suit instantanément le PPM lorsque on applique un changement brusque de l'irradiation (G de 1000 à600W/m²) suivi par le contrôleur « Floue Type 1 » et enfin le contrôleur P&O avec une allure lente.

- ✓ Sur la Figure 5.17**(d)**en remarque le même constat que la Figure V.17**(c)**c.-à-d.le contrôleur « floue type 2 » suit instantanément le PPM lorsque on applique un changement brusque de l'irradiation (G de 600 à800W/m²) suivi par le contrôleur « Floue Type 1 » et enfin le contrôleur P&O avec une allure lente.

- ✓ Pour le zoom n°5(Figure 5.17**(e)**) quand en applique un changement lent d'irradiation (G de 800 à1000W/m²) on discerne clairement des oscillations plus au moine importantes autour du PPM pour le contrôleur « Floue Type 2 », tandis que les autres contrôleurs présente des fluctuations moins importante que le premier.

✓ Pour le dernier cas Figure 5.17**(f),** pour un changement lent d'irradiation (G de 1000 à600W/m²) on enregistre le même phénomène que pour le cas de la Figure 5.17**(e)**à savoir présence d'oscillations palpable pour le contrôleur « Floue Type 2 » et amoindri pour les autres.

5.3. Etude comparative de l'énergie produite des trois contrôleurs MPPT :

Maintenant nous allons aborder l'aspect quantitatif de notre système c.-à-d. Étudier la quantité de l'énergie produite par notre générateur photovoltaïque on lui appliquant nos trois contrôleurs dans des intervalles de temps bien définie.

Temps(s) / MPPT	t= (0- .16)	t= (1- 1.5)	t= (2- 2.1)	t= (3- .05)	t= (5- 5.5)	t= (9- 9.5)	Global t= 14
P & O	17.7763	59.9241	6.4103	4.6061	52.6932	52.1761	1.3656e+003
FLOUE TYPE 1	18.5348	59.9260	7.0068	4.7461	52.6923	52.1761	1.3671e+003
FLOUE TYPE 2	18.6865	59.9260	7.0201	4.7485	52.6875	52.1711	1.3672e+003

a- t = [(0s, 0.16s)] le contrôleur « Floue type 2 » a généré la plus grande quantité d'énergie suivie par les contrôleurs « Floue type 1 »et le dernier « P & O »qui a produit une énergie inferieur aux autres contrôleur à cause de son grand temps réponse.

b- t = [(1s, 1.5s)] les contrôleurs « Floue type 2 » et « Floue type 1 »ont donnés une meilleure quantité d'énergie à égalité et le contrôleur « P&O » sa production et moindre.

c- t = [(2s, 2.1s)] toujours le contrôleur « Floue type 2 » a généré la plus grande quantité d'énergie qui correspond au changement brusque d'irradiation (G de 1000 à600W/m²) à cause de son temps de réponse suivi par les contrôleurs « Floue Type 1 » et « P & O ».

d- t = [(3s ,3.05s)] pareillement aux autre intervalles le contrôleur « Floue type 2 » donne le meilleur résultat suivi par les contrôleurs « Floue Type 1 » et« P&O ».

d- t= [(5s, 5.5s)] au moment du changement lent l'irradiation (G de 800 à1000W/m²) le contrôleur « P & O » a donné la meilleure production d'énergie suivie par les contrôleurs « Floue type 1 » et « Floue Type 2 ».

f- t= [(9s, 9.5s)] les contrôleurs « Floue Type 1 » et« P&O » ont dégagé la plus grande valeur d'énergie a égalité suivi par le contrôleur « Floue type 2 » en dernier.

Conclusion :

A la fin de ce chapitre, et après avoir procédé à la simulation des trois algorithmes MPPT (P&O, Floue type 1, Floue type 2). Les résultats ont montré que l'algorithme 'Floue type 2' donne les meilleurs résultats de performance, stabilité et rapidité loin devant les algorithmes P&O et Floue type 1.

Néanmoins pour contrôleur Floue Type 2 en enregistre des oscillations plus importantes sur la courbe du rapport cyclique lors de l'augmentation et la dimunition lente de l'irradiation et la température par rapport à la commande floue 1.

Conclusion générale

Pour assurer le fonctionnement d'un générateur photovoltaïque à son point depuissance maximale, des contrôleurs MPPT sont souvent utilisés. Ces contrôleurs sontdestinés à la poursuite du point de puissance maximal afin de minimiser l'erreur entre la puissance defonctionnement et la puissance maximale de référence qui est variable en fonction de lacharge et des conditions climatiques.

En première partie, nous avons étudié le principe des systèmes photovoltaïques où on a présenté le modèle des différents éléments qui le constituent (module, générateur, …..) ainsi que les différents types de centrales solaires.

En deuxième partie, nous avons brièvement présenté les différentes configurations des convertisseurs de puissance DC/DC.

En troisième partie nous avons brièvement présenté les différentes commandes ainsi que les techniques d'optimisation de puissance des générateurs PV et nous avons détaillé la technique de maximisation de puissance P & O ainsi que les techniques de commandes par les contrôleurs floue type 1 et 2 ainsi que l'optimisation des gains par les algorithmes génétiques.

En quatrième partie nous avons modélisé notre système photovoltaïque composer du GPV, hacheur DC-DC, la commande MPPT et la charge sous forme de block à l'aide du logiciel Matlab/Simulink.

Dans la cinquième partie, nous avons exposé la simulation sous Matlab/Simulink de l'ensemble « générateur PV, convertisseurs DC/DC avec une commande MPPT »,Dans le même but, plusieurs techniques de contrôle MPPT ont été introduites, dansce travail, nous avons présenté trois techniques : la méthodeconventionnel, Perturbation etObservation (P&O), et la méthode intelligente incluant logique floue type 1 et 2, en vue d'élaborer un système de commandeet de poursuite du point de puissance maximale afin d'extraire le maximum de puissance.

De ce fait, quelques conclusions ont été déduites:

Les sources PV sont des sources non linéaires et très sensibles aux conditions métrologiques (Eclairement et Température), nous avons présenté un étage d'adaptation de puissance par la technique de commande P&O qui nous donne de bons résultats.

Ensuite nous avons appliqué la commande par logique floue type 1 ou en à constater que cette commande prouve l'efficacité de celle-ci.

Finalement nous avons appliqué la commande floue type 2 pour la poursuite du MPP ce qui a permet d'avoir de très bonne résultat loin devant la commande P&O et floue type 1 avec un temps de réponse très petit et l'absence des osculations autour du PPM osculations.

D'âpres ces résultats, on peut conclure que la commande floue type 2 fait apparaîtreun bon compris entre la caractérisation et l'efficacité des calculs.

Les résultats obtenus lors de notre travail encouragent la poursuite des recherches dans ce sens.

Ce travail ne recherche nullement à condamner les méthodes classiques, notamment l'application des commandes hybrides par exemple Neuro-Floue Type2 et autre.

ANNEXE

Annexe 1 : paramètres du convertisseur BOOST [4] :

Les paramètres du convertisseur BOOST est:

- V_{pv} : 33.7 V
- V_{ch} : 54V
- Puissance maximale PV : 120 W
- Fs : 10 KHz
- Maximum inducteur currentripple 10 %

L'équation de calcul de l'inducteurL :

$$L \geq \frac{V\ ch.Dm.(1-Dm)}{fs\ |\Delta IL\ ripple\ |}$$

l'équation de calcul de rapport cyclique :

$$\frac{V_0}{p_{pv}} = \frac{T}{t_{off}} = \frac{1}{1-D}$$

$$D = 1-\frac{V_{pv}}{V_{ch}}$$

D = 0.375

L'équation de calcul de courant de sortie de l'hacheur :

$$I_{ch} = \frac{p_{ch}}{V_{ch}}$$

Le courant de sortie de l'hacheur :

$$I_{ch} = \frac{120}{54} = 2.22\text{A}$$

La résistance charge est

$$R_{ch} = \frac{54}{2.22} = 24.3\ \text{ohm}$$

L'inducteur L est

$$L \geq \frac{54\times0.375\times(1-0.375)}{10000\times2\times3.56\times0.1}$$

L≥ 444 µH

La capacité d'entrée C_{in} utilisée la relation :

$$C_{in} \geq \frac{Iom.Dm^2}{0.02(1-Dm)fsVmp}$$

$$C_{in} \geq \frac{2.22\times0.37592}{0.02\times(1-0.375)\times10000\times33.7}$$

$C_{in} \geq 78.6$ µF

La capacité de sortie C_{out} utilisée la relation :

$$C_{out} \geq \frac{Vch.D}{\text{fs } \Delta\text{Vch } \text{Rch}}$$

$$C_{out} \geq \frac{540\times0.375}{10000\times0.54\times24.3}$$

$C_{out} \geq 154.69$ µF

Annexe2: Datasheet BP MSX120

bp solar

BP MSX 120

120-Watt Multicrystalline
Photovoltaic Module

BP Solar's MSX series is a premium line of PV modules with a 25-year performance warranty, tightly controlled electrical parameters, and labeling showing each module's tested electrical characteristics. Providing 120 watts of nominal maximum power, the MSX 120 is used primarily in large battery-equipped PV systems or—through an inverter—to provide AC power directly to a load. Typical applications include grid-supplemental residential and commercial systems, telecommunications, remote villages and clinics, pumping, and land-based navigation aids. Its attractive bronze-anodized frame also suits it well for architectural applications.

This product is available as a framed module or an unframed laminate, in 12V or 24V nominal configurations, with either:

- Dual high-volume junction boxes which allow on-site 12V/24V selection by rewiring (MSX 120);
- Installation-speeding DC-rated polarized connectors (MSX 120MC).

Proven Materials and Construction

BP Solar's quarter-century of field experience shows in every aspect of these module's construction and materials:

- 72 multicrystalline silicon solar cells configured as one series string or two 36-cell series strings (bypass diodes are included);
- Cells are laminated between sheets of ethylene vinyl acetate (EVA) and high-transmissivity low-iron 3mm tempered glass;
- Frame strength exceeds requirements of certifying agencies.



Weatherproof Connectors

MSX 120MC output is via heavy-duty (4mm²/AWG #12) output cables with polarized weatherproof DC-rated connectors which provide reliable low-resistance connections, eliminate wiring errors, and speed installation. Asymmetrical cables enable side-by-side or end-to-end module placement in arrays.

High-Capacity Versatile Junction Box

The junction boxes of the MSX 120 are raintight (IP54 rated) and accept PG13.5 or 1/2" nominal conduit or cable fittings. Their volume (411cc, 25 cubic inches) and 6-terminal



Bronze Anodized Universal Frame

connection blocks enable most system array connections (putting modules in series or parallel) to be made right in the boxes. Options include:

- an oversize terminal block which accepts conductors up to 25mm² (AWG #4); standard terminals accept up to 6mm² (AWG #10);
- a Solarstate™ charge regulator.

Products with junction boxes may be rewired to provide 12V or 24V output.

Limited Warranties

- Power output for 25 years;
- Freedom from defects in materials and workmanship for 5 years.

See our website or your local representative for full terms of these warranties.

Individually Tested and Labeled

Each module tested and labeled with its actual output—voltage, current, and power at maximum power point (P_{max})—at Standard Test Conditions and Standard Operating Conditions.



BP MSX 120

MSX 120 laminates also qualify for the above listings and certifications; MSX 120MC laminates are UL-recognized. MSX 120 modules and laminates with junction boxes are also certified by PowerMark Corporation and approved by Factory Mutual Research for application in NEC Class 1, Division 2, Groups C & D hazardous locations.

©2002 BP Solar Global Marketing

Quality and Safety

MSX 120 and MSX 120MC modules are manufactured in our ISO 9001-certified factories, listed by Underwriter's Laboratories for electrical and fire safety (Class C fire rating), certified by TÜV Rheinland as Class II equipment, and comply with the requirements of IEC 61215 including:

- repetitive cycling between -40°C and 85°C at 85% relative humidity;
- simulated impact of 25mm (one-inch) hail at terminal velocity;
- a "damp heat" test, consisting of 1000 hours of exposure to 85°C and 85% relative humidity;
- a "hot-spot" test, which determines a module's ability to tolerate localized shadowing (which can cause reverse-biased operation and localized heating);
- static loading, front and back, of 2400 pascals (50 psf); front loading (e.g. snow) of 5400 pascals (113 psf).

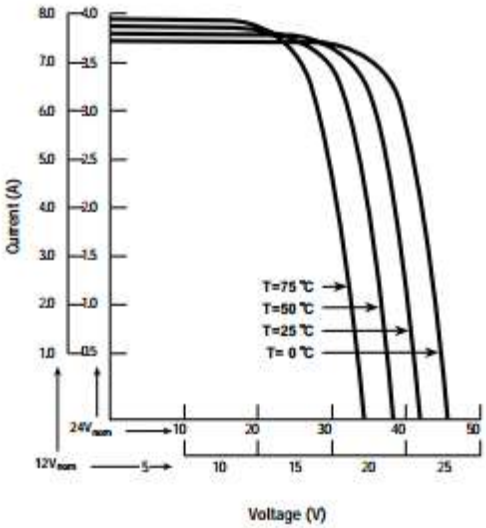
Electrical Characteristics[1]

	MSX 120	MSX 110[4]
Maximum power (P_{max})[2]	120W	110W
Voltage at P_{max} (V_{mp})	33.7V	33.6V
Current at P_{max} (I_{mp})	3.56A	3.3A
Minimum P_{max}	114W	105W
Short-circuit current (I_{sc})	3.87A	3.6A
Open-circuit voltage (V_{oc})	42.1V	41.6V
Temperature coefficient of I_{sc}	(0.065±0.015)%/°C	
Temperature coefficient of V_{oc}	-(80±10)mV/°C	
Temperature coefficient of power	-(0.5±0.05)%/°C	
NOCT[3]	47±2°C	
Maximum system voltage	600V (U.S. NEC rating) 1000V (TÜV Rheinland rating)	
Maximum series fuse rating	20A	

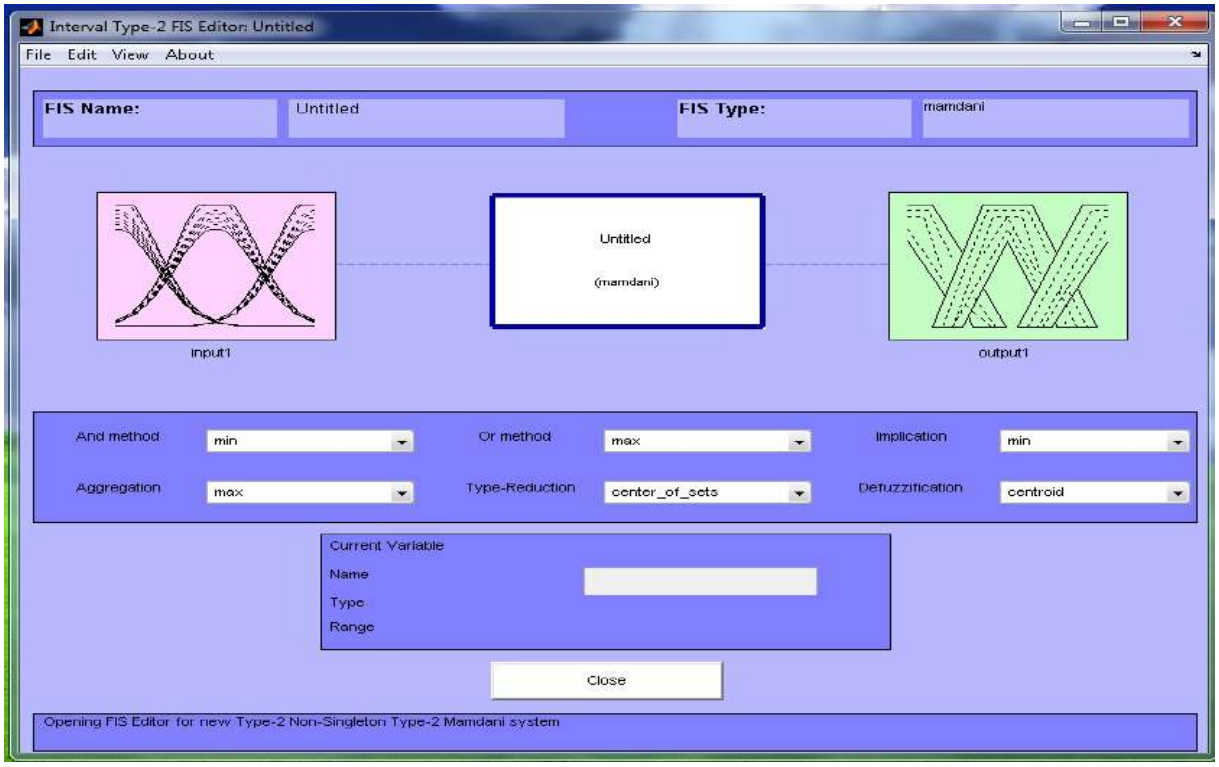
Notes

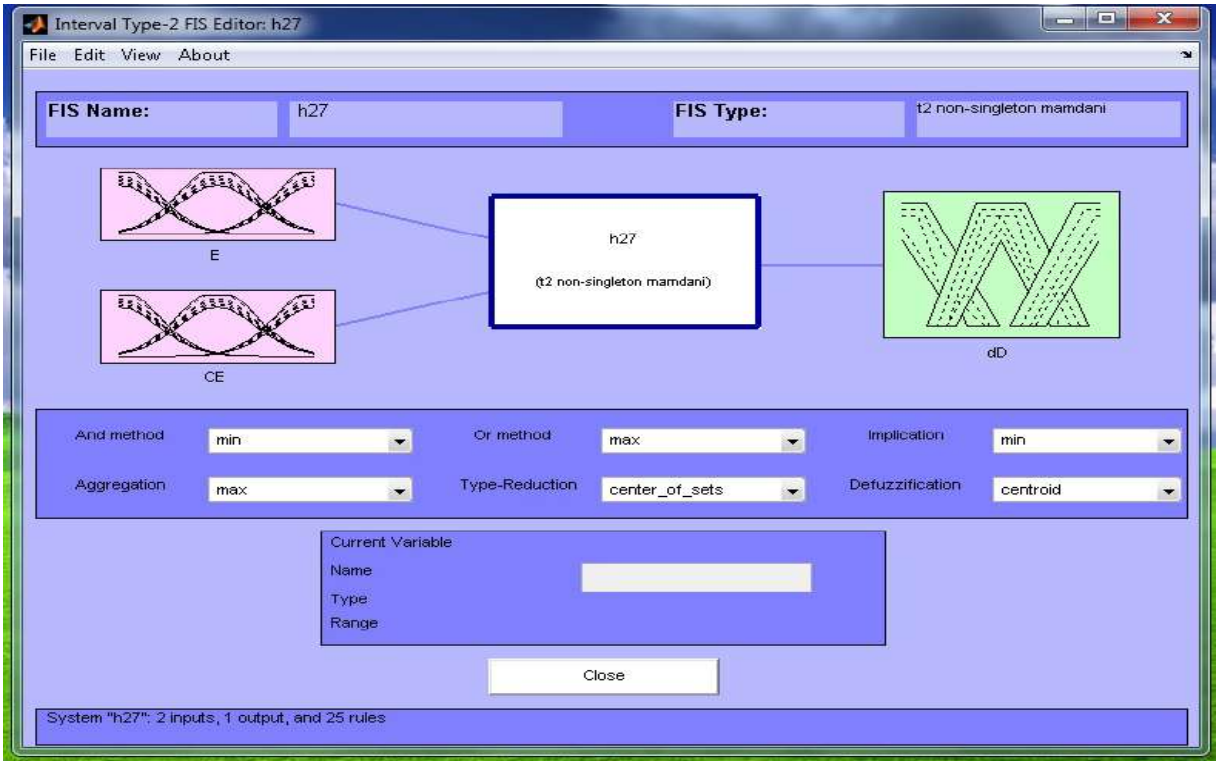
1. These data represent the performance of typical MSX 110 and MSX 120 products in 24V configuration. The data are based on measurements made in accordance with ASTM E1036 corrected to SRC (Standard Reporting Conditions, also known as STC or Standard Test Conditions), which are:
   - illumination of 1 kW/m² (1 sun) at spectral distribution of AM 1.5 (ASTM E892 global spectral irradiance);
   - cell temperature of 25°C.
2. During the stabilization process which occurs during the first few months of deployment, module power may decrease approximately 3% from typical P_{max}.
3. The cells in an illuminated module operate hotter than the ambient temperature. NOCT (Nominal Operating Cell Temperature) is an indicator of this temperature differential, and is the cell temperature under Standard Operating Conditions: ambient temperature of 20°C, solar irradiation of 0.8 kW/m², and wind speed of 1 m/s.
4. The power of solar cells varies in the normal course of production; the MSX 110 is assembled using cells of slightly lower power than the MSX 120.

MSX 120 I-V Curves



Annexe 3 : Interface du TOOLBOX Fuzzy Type 2 utilisé lors de la simulation:





Bibliographie

[1] **W.BENSACI,** « *Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque adapté par une commande MPPT* », mémoire de master en génie électrique, université KASDI MERBAH, 2011.

[2] **S. M. Ait-Cheikh,«** *Etude Investigation et conception d'algorithmes de commande appliqués aux systèmes photovoltaïques*», Thèse de Doctorat d'état, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, 2007.

[3] **A. Allali et N. Terfai,** « *Commande des puissances active et réactive de la Machine Asynchrone à Double Alimentation, en utilisant la logique floue type-2* », mémoire de Master, université Yahia Fares, Médéa, 2013.

[4] **S. OUDJOUADJ, M A. BENNINI**, « *Etude de la poursuite du point de puissance maximale (MPPT) d'un generateur photovoltaïque base sur l'intelligence artificielle* », mémoire de Master, université Yahia Fares, Médéa, 2015.

[5] **K. HELALI,** « *Modélisation d'une cellule photovoltaïque : E"tude comparative* », mémoire ingénieur d'état, université MOULOUD MAMMERI, Tizi-Ouzou, 2012.

[6] **Dr. Bent Sorensen**, « *Renewable Energy Focus Handbook* » . (Elsevier collection, e-Mega, Reference, 9780123747068, Academic Press, 2009.

[7] **F. Chekired**, « *Etude et implémentation d'une commande MPPT neuro-floue sur FPGA*», mémoire de magister, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, 2008.

[8] **B. DENDIB**,« *Technique conventionnelles et avanccée de poursuite MPPT pour des application photovoltaique : étude compartive* », Mémoire de Magister, Université Ferhat Abbes, Sétif, 2007.

[9] **S. NAOUAL**, « *Modélisation et Extraction Automatique des Paramètres d'un Générateur* », Mémoire de Magister, Université Ferhat Abbas de Sétif, 2010.

[10] **P. Wurfel,** « *Physics of Solar Cells: From Basic Principles to Advanced Concepts* », Edition Wiley & Sons, February 2009.

[11] **S. AOUFI**, « *Modélisation et commande d'un système de pompage photovoltaïque* », Université Ferhat Abbas de Sétif-1 Mémoire de Magister, septembre 2014.

[12] **S. Bellakehal**, « *Conception & Commande des Machines à Aimants Permanents Dédiées aux Energies Renouvelables* », thèse de Doctorat, Université de Constantine, 2010.

[13] **O.boukli-hacene**, « *conceptionet Réalisation d'un générateur photovoltaique muni d'un couvertisseur MPPT pour une meilleure Gestion énergétique* »,Mémoire d'ingéniorat, université de tlemcen, 2011.

[14] **A. BETTACHE, A .YAHIAOUI** « *Application de la technique du Mode Glissant pour la Poursuite du Point de Puissance Maximale (MPPT) d'un générateur photovoltaïque* » mémoire de master, université DR. YAHIA FARES DE MEDEA, 2014.

[15] **F. HANANOU, A. ROUABAH**, « *Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque* », Mémoire de Master acadimique, UNIVERSITE KASDI MERBAH, OUARGLA, 2014.

[16] **A. SOUALMIA**, « *Intégration de la Production Décentralisée dans un Système de Pompage Photovoltaïque* », de magistère, UNIVERSITE CONSTANTINE1, 201.

[17] **K. HELALI**, « Modélisation d'une cellule photovoltaïque, etude comparative », mémoire de magistère, UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI, TIZI-OUZOU, Algérie, 2012.

[18] **N. AOUN**, « *Etude et modélisation des différents modèles de la cellule photovoltaïque établis sur base de valeurs nominales* ». **mémoire de magistère, UNIVERSITE MENTOURI** CONSTANTINE, 2010.

[19] **Dalila BERIBER.** « *Optimisation et gestion d'Energie de Système de production Photovoltaïque-Eolienne avec stockage*», thèse de Doctorat, option : Instrumentation Electronique. USTHB 2010.

[20] **N. Abouchabana**, « *Etude d'une nouvelle topologie buck-boost appliquée à un MPPT* », Mémoire de Magistère, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, Algérie, 2009.

[21] **M. Moulay-Amar et M. Loghouini**, « *Etude et réalisation d'un système de poursuite de point de puissance maximale à base de microcontrôleur destiné a une installation photovoltaïque* », Mémoire d'ingéniorat, université de Ouargla, Algérie, 2005.

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

[23] **F. boujema**, *« commande par mode Glissant, applications aux convertisseurs Electriques»*, Mémoire de Magistère, Université de Tlemcen, Algérie, 2011.

[24] **M. MCHICHOU**, « *Etude et conception d'un onduleur photovoltaïque* », mémoire d'ingénieur d'état, Université' sidi mohamed ben abdellah, Fès, Maroc , 2015.

[25] **Y.LASMI,** « *Optimisation de la poursuite du point de puissancemaximale (MPPT) d'un système photovoltaïque par les techniques intelligentes* », mémoire de Magister, Université Sétif -1, Algérie 2013.

[26] **D. MOKEDDEM**, « *Contrôle Flou des Processus Biotechnologiques à Base d'Algorithmes Génétiques* », Diplôme de Doctorat, UNIVERSITE FERHAT ABBAS, SETIF, Algérie, 2010.

[27] **M. T .MESSAOUDI**, « *Simulation d'un système photovoltaïque autonome régulé par logique floue* », Mémoire de Master, UNIVERSITE KASDI MERBAH, OUARGLA, Algerie. 2015.

[28] **F. Chevrie et F. Guély** « *La logique floue, Cahier technique n° 191*», http://www2.schneider-electric.com/documents/technical-publications/fr/shared/automatismes/automatismes-reseaux-information/ct191.pdf Rubrique maîtrise de l'électricité. **Réf** [ct191].

[29] **A. KHEMIS** « *Application de la logique floue type-2 intervalle à la commande adaptative de la machine asynchrone* », Mémoire de Magister, Université Mohamed Khider – Biskra, Algérie, 2011.

[30] **P. Abhishek** « *TYPE-2 FUZZY LOGIC CONTROLLER BAESD MAXIMUM POWER POINT TRACKING ALGORITHM FOR SOLAR PHOTOVOLTAIC APPLICATION* », A Thesis degree of master, Jadavpur University, India, May 2014.

[31] **M. MEZAACHE**, « *Contribution à l'Etude du Choix Optimal de l'Emplacement du Dispositif UPFC dans les Réseaux Electriques en Utilisant une des Méthodes Artificielles* », Thèse de Doctorat, Université de Batna 2, Algérie, 2016.

[32] **A.TALEB**, « *contribution des réseaux neuro-flous et algorithmes génétiques à la reconnaissance de la parole* », Thèse Doctorat, UNIVERSITE DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE Mohamed BOUDIAF, ORAN, Algérie- 2010

[33] **F. ZIDANI**, "*Introduction à la logique floue / Conception d'un contrôleur flou*", Cours de Première Année Magister en Electrotechnique, Université de Batna, Algérie, 2008/2009.

[34] **A. HAMIZI**, « *Commande Adaptative Floue Type-2 d'un Bras Manipulateur* », Mémoire de Magistère, UNIVERSITÉ DE BATNA, Algérie. 2012

[35] **S. GRAIDIA**, « *COMMANDE ADAPTATIVE FLOUE TYPE-2 PAR MODE GLISSANT DES SYSTEMES CHAOTIQUES* », Mémoire de Master, Université Kasdi Merbah–Ouargla, Algérie. 2012.

[36] **J. M Mendel, Bob John. R. I**, « *Type-2 Fuzzy Sets Made Simple* », IEEE Trans. Fuzzy Syst, vol. 10, no. 2, pp. 117-127, April 2002.

[**37]** **M.M.ANNANE**, « *Analyse de stabilité et synthèse des systèmes flous de type-2* », Mémoire de Magister, UNIVERSITE FERHAT ABBAS — SETIF, ALGERIE. 2011.

[38] **N. N, Karnik. Mendel. J. M**, « *Type-2 fuzzy logic systems: Type-reduction* », IEEE Syst, Man, Cybern. Conf, Sandiago, CA, Octobre 1998.

[39] **Vincent BENAMARA, «** ÉTUDE ET SIMULATION D'UN PANNEAU SOLAIRE RACCORDÉ AU RÉSEAU AVEC PÉRIPHÉRIQUE DE STOCKAGE », Mémoire d'Ingénieur, Ecole De Technologie Supérieure Université Du Québec, Septembre 2012

[40] N.Talbi, « *Conception des Systèmes d'Inférence Floue par des Approches Hybrides: Application pour la Commande et la Modélisation des Systèmes Non-linéaires*, Thèse de Doctorat, Université de Constantine 1 Algérie. 2014.

[41] Wei WU, « *Synthèse d'un contrôleur flou par Algorithme Génétique Application au réglage dynamique des paramètres d'un système* », page 49, grade de Docteur, Université de Lille 1, France. 1998.

[42] Edmundo Bonilla Huerta, « *Logique floue et algorithmes génétiques pour le pré-traitement de données de biopuces et la selection de gènes* », THÈSE DE DOCTORAT, Laboratoire d'Étude et de Recherche en Informatique d'Angers, France. 2008.

[43] J.H. Holland. « *Adaptation in Natural and Artificial Systems: An Introductory Analysis with Applica-tions to Biology, Control, and Artificial Intelligence* ». Ann Arbor, MI: University of Michigan Press,1975.

[44] Goldberg, D.E. « *Genetic algorithms in search, optimization, and machine learning* ». Addison-Wesley, 1989.

[45] H. ABBES . H. ABID . K. LOUKIL, « *Etude comparative de cinq algorithmes de commande MPPT pour un système Photovoltaïque* », Revue des Energies Renouvelables Vol. 17 N°3 (2014).

[46] A. BELKAID, « *Conception et implémentation d'une commande MPPT de haute performance pour une chaine de conversion photovoltaïque autonome* », diplôme de Doctorat, Université Ferhat Abbas - Sétif 1, 2015

[47] W.C. Benmoussa, S. Amara, A. Zerga.'' Etude comparative des modèles de la caractéristique courant-tension d'une cellule solaire au silicium monocristallin''. Revue des Energies Renouvelables ICRESD-07 301 – 306, Tlemcen, 2007.

[48] Z. Ayache, A. Bendaoud, H. Slimani, B. Benazza, H. Miloudi, A. Bentaallah, « Commande MPPT et Contrôle d'un Système Photovoltaïque par la Logique Floue », 1 Laboratoire IRECOM, UNIVERSITE DJILALI LIABES, Sidi Bel Abbès 22000, Algeria, 2013.

[49] A .Zadah, « Fuzzy set », Information and control, vol.8, pp.338-354, 1965.

[50] Z. Zouaoui, "Commande des convertisseurs statiques DC/DC Par la logique floue", Mémoire de Magister, Université de Batna, Algérie, 2007.

[51] Stéphane Doncieux, « Algorithmes évolutionnistes: de l'optimisation de paramètres à la conception complète d'un système de contrôle ». Page 2, Université Pierre et Marie Curie LIP6 – AnimatLab. E-mail: Stephane.Doncieux@lip6.fr

[52] Thomas Vallée*J* **et Murat Yıldızoglu**, « Présentation des algorithmes génétiques et de leurs applications en économie », LEN-C3E Université de Nantes, LEA-CIL chemin de la Censive Du Tertre F-44312 NANTES, France, septembre 2001, v. 1.2

[53] **A. MEKHLOUFI M**, **«** *Etude et simulation de différant méthode MPPT par Matlab* ». Laboratoire de UKM-Ouargla Algérie.

[54] **SALAH MOHAMED AIT-CHEIKH**, « Etude, Investigation et conception d'algorithmes de commande appliqués aux systèmes photovoltaïques »,Magister en Automatique ENP Décembre 2007.

[55] **F. RAKOTOMANANANDRO.** «Study of Photovoltaic System», thèse Master. Graduate School of The Ohio State University, 2011.

[56] **Villalva, M.G., Gazoli, J.R. and Filho, E.R.**; « Modeling and circuit-based simulation of photovoltaic arrays, »Power Electronics Conference, IEEE 2009. COBEP '09. Brazilian, December 2009.

[57] **C.Cédric CABAL** « Optimisation énergétique de l'étage d'adaptation électronique dédié à la conversion photovoltaïque » mémoire Doctorat université de Toulouse 2008.

[58] **DATASHEET BP MSX 120** « https://docs.google.com/viewer?url=http://www.soltec-solar.com/html/cms/bp/product_msx_120.pdf »

[59] **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.2016.1514a. VIETNAM, TAIWAN.

[60] M- **B Ozek, Z-H Akpolat** « A Software Tool: Type-2FuzzyLogicToolbox » Firat University, Turkey, 15 January2007