

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne démocratique et populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

جامعة سعد حطاب البليدة
Université SAAD DAHLAB de BLIDA

كلية التكنولوجيا
Faculté de Technologie

قسم الإلكترونيك
Département d'Électronique



Mémoire de Projet de Fin d'Études

présenté par

DRAISSI Samiha

&

ABERKANE Amel

pour l'obtention du diplôme master en électronique option Automatique

Thème

Etude et implémentation sur FPGA d'un contrôleur MPPT flou appliqué à un générateur photovoltaïque

Proposé par : BRADAI Rafik

Année Universitaire 2014-2015

Tout d'abord, on remercie "ALLAH" le tout puissant, qui nous a donné de la santé, de moyens et de volonté ardente dans la quête du savoir.

Nos remerciements s'adressent aussi et en particulier à Monsieur BRADAI Rafik, qui, en tant que Promoteur de mémoire, s'est toujours montré très disponible tout au long de la réalisation de ce travail, ainsi que pour l'aide compétente qu'il nous a apporté, pour sa patience et son encouragement.

Aussi, c'est avec un profond bonheur qu'on saisit l'occasion pour adresser nos plus sincères remerciements à l'ensemble des membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre travail :

On adresse les plus sincères remerciements à tous les professeurs de la spécialité Automatique, pour leurs aides et leurs encouragements

Enfin, nos remerciements, mais pas les moindres, vont à toute personne ayant participé de près ou de loin à l'accomplissement de ce travail.

Je dédie ce mémoire :

À Mes parents, mon mari et mes chères filles pour leur amour inestimable, leur confiance, leur soutien, leurs sacrifices et toutes les valeurs qu'ils ont su m'inculquer.

À Mes sœurs ainsi qu'à mes frères pour leur tendresse, leur complicité et leur présence.

À Toute ma famille ainsi qu'à mes amis, mes collègues et mes camarades

Je dédie ce mémoire :

Je remercie ceux qui ont veillé sur moi depuis toujours, ceux qui m'ont fait confiance, qui m'ont soutenu sans faille dans tous mes projets et qui ont accepté mes choix sans pour autant toujours forcément les comprendre, merci mes parents !!

À Mes frères et sœurs ainsi qu'à mes nièces et mes neveux pour leur tendresse, leur complicité et leur présence.

À Toute ma famille ainsi qu'à mes amis, Razika, Iméne, Fella, Khadidja, mes collègues et mes camarades

Sans oublier Rachid qui nous a beaucoup aidé, ma chère binôme Amel et bien sur Fethi sympatico.

ملخص:

يندرج العمل المتناول في هاته الأطروحة ضمن الأطار العام الهادف الى تحسين الاداء الديناميكي و السكوني لنظام توليد الكهرباء عن طريق الألواح الشمسية. وانطلاقا من المبدء المقر بانه تحت شروط مناخية معينة لا يمكن للوح الشمسي ان ينتج الاستطاعة العظمى الا عند قيم معينة للجهد و التيار الكهربائيين، تمكننا من وضع التصميم الأمثل لمسيطر غامض مكرس للتتبع التلقائي والفوري لنقطة الاستطاعة العظمى **MPP**. هاته الخطوة كانت متبوعة ببرمجة المسيطر على دارة " مصفوفة البوابات المنطقية القابلة للبرمجة الحلقية" من نوع **FPGA**

كلمات المفاتيح: توليد الكهرباء بواسطة الطاقة الشمسية، تتبع نقطة الإستطاعة العظمى، تقنيات الذكاء الاصطناعي، مسيطر غامض، دارة رقمية قابلة للبرمجة الحلقية **FPGA** ، محول **DC/DC**.

Résumé :

Le travail décrit à travers se manuscrit verse dans le contexte global d'améliorations des performances d'un système photovoltaïque (PV). Et en partant du principe stipulant que dans des conditions environnementales données : un générateur photovoltaïque ne peut délivrer une puissance maximale que pour des valeurs particulières de courant et de tension, on est parvenu à mettre au point une conception optimisée, qui a été suivie d'une implémentation matérielle sur un circuit numérique programmable de type "FPGA", d'un contrôleur flou dédié à la poursuite automatique et instantanée de ce point de puissance maximale communément baptisé par : "MPPT"

Mots clés : Système photovoltaïque, Poursuite du point de puissance maximale : MPPT, techniques d'intelligence artificielles, contrôleur flou : FLC, optimisation, circuit logiques programmable de type : FPGA, convertisseur DC-DC.

Abstract:

The work described throughout this manuscript deal with the overall context of the improvement performance of a standalone photovoltaic (PV) system. And assuming that in given environmental conditions: a photovoltaic generator can deliver a maximum power only for particular values of voltage and current, we have developed an optimized design, which was followed by a hardware implementation non a programmable digital circuit:"FPGA", of a fuzzy controller dedicated to the automatic and instantaneous tracking of this maximum power point commonly called "MPPT".

Keywords: Photovoltaic system, Pursuit of Maximum Power Point: MPPT, artificial intelligence techniques, fuzzy controller: FLC, optimization, genetic algorithms, programmable logic circuit type: FPGA, DC-DC converter.

Abréviations

symboles	descriptions
MPPT	Maximum Power Point Tracking
GPV	Le terme générateur photovoltaïque
PV	un panneau Photovoltaïque
V_{co}	La tension en circuit ouvert
I_{cc}	Le courant de court-circuit
I_{cell}	courant fourni par la cellule [A]
N_p	cellules identiques associées en parallèle
N_s	cellules identiques associées en série.
P_{max}	Puissance maximale
V_{mp}	Tension à P _{max}
I_{mp}	Courant à P _{max}
P&O	Perturbation et observation
IC	Incrémentation de la conductance
FInc	contrôleur Flou incrémentale
FLC	flou logic contrôlor
DC / DC	convertisseur courant continu-continu
MLI	Modulation de largeur d'impulsion
e	Erreur
de	variation de l'erreur
D	Dutty (rapport cyclique)
STC	Les conditions de test standard
T	la température
G	Insolation (Irradiation)
FPGA	Field programmable gate array
CPLD	Complex Programmable Logic Device
CLB	Configurable Logic Blocs (blocs d'entrées/sorties)
LUT	Look-Up Tables
IOB	input output Blocs
XSG	XILINX SYSTEM GENERATOR
RLF	Régulateur logique floue

SOMMAIRE

Introduction générale	1
-----------------------------	---

Chapitre 1

I. Introduction.....	3
II. La cellule solaire.....	3
III. Principe de la conversion photovoltaïque.....	3
IV. Les différentes technologies et rendement des cellules photovoltaïques.....	4
V. Caractéristique et modélisation de la cellule solaire.....	5
V.1. Caractéristique électrique d'une cellule solaire	5
V.2. Modélisation d'une cellule solaire.....	5
VI. Constitution d'un générateur photovoltaïque (GPV).....	7
VI.1. Association des Cellules Photovoltaïques en Parallèle.....	7
VI.2. Association des Cellules Photovoltaïques en Série.....	8
VII. Caractéristique et modélisation d'un générateur photovoltaïque.....	9
VII.1. Caractéristiques électriques.....	9
VII.2. Modélisation d'un GPV.....	10
VIII. Protection des modules PV.....	12
VIII.1. Protection lors de la connexion en parallèle de plusieurs GPV.....	12
VIII.2. Protection du GPV constituée de la mise en série d'un grand nombre de cellules	12
IX. Fonctionnement à puissance maximale.....	13
X. Effets des variations climatiques sur un GPV.....	14
a A Influence de l'éclairement	14
b Influence de la température	14
XI. Les différentes méthodes de poursuite du MPP.....	15
XI.1. Algorithme perturbation et observation P&O	15
XI.2. Algorithme incrémentale et conductance INC.....	17
XII. Conclusion.....	20

Chapitre 2

I. Introduction.....	21
II. Définition et principe de la logique floue	21
III. Notions de base sur la logique floue.....	21
III.1. Univers de discours, et l'ensemble flou.....	21
III.2. Les variables linguistiques.....	21
III.3. Fonctions d'appartenance	22
III.4. Opérations sur les sous-ensembles	23
IV. Structure interne d'un contrôleur flou	23
V. Les étapes de conception d'un contrôleur flou.....	24
V.1. Interface de fuzzyfication.....	24
V.2. Interface d'inférence.....	24

V.3 Interface de défuzzification.....	25
VI. Les différents types de contrôleurs flous	25
VI. 1. Contrôleur de type MAMDANI.....	25
VI.2 Contrôleur de TAKAGI-SUGENO	26.
VII. Les types de structure d'un contrôleur flou.....	26
VIII. MPPT du générateur photovoltaïque utilisant la logique floue.....	27
a. Fuzzification	29
b. Mécanisme d'inférence.....	30
c. Méthode de défuzzification.....	32
IX. Convertisseurs continu-continu DC/DC.....	32
X. Conclusion.....	41

Chapitre 3

I. Introduction	42
II. Simulation du système sous MATLAB SIMULINK.....	43
a. Modélisation du PV pour la simulation.....	43
b. Modélisation de convertisseur DC/DC boost.....	44
c. Contrôleur MPPT.....	45
c-1) MPPT à base de la logique floue.....	45
C.2) MPPT à base de l'algorithme P&O.....	46
II.1 Simulation du système sous des conditions standards (STC).....	47
III. Résultats de simulation du MPPT P&O.....	47
A. Résultats de simulation MPPT flou.....	48
B. Comparaison entre les deux techniques	49
II.2 Simulation dans les conditions météorologiques variables.....	49
II.2.1. Simulation du système sous conditions variables de température.....	49
A. Résultat de simulations en utilisant MPPT P&O.....	50
B. Résultat de simulations en utilisant MPPT P&O.....	51
II.2.2 . Simulation du système sous conditions variables de l'insolation.....	52
A.Résultats de simulation en utilisant MPPT P&O.....	52
B.Résultats de simulation en utilisant MPPT flou.....	53
II.2.3 Simulation du système sous conditions variables de température et de l'insolation.....	54
A.Résultats de simulation en utilisant MPPT P&O.....	55
B.Résultats de simulation en utilisant MPPT flou.....	56
III.Conclusion.....	57

Chapitre 4

I. Introduction.....	58
a. Les FPGAs.....	58

II.1. Architecture interne des FPGAs	58
II.2. Flot de conception sur FPGA.....	59
II.2.1. Introduction de l’algorithme à implémenter.....	60
A. Le VHDL	60
b. Environnement de développement Simulink-XSG (XILINX SYSTEM GENERATOR)	
II.2.2. Simulation fonctionnelle n° 1.....	60
II.2.3. Simulation fonctionnelle n 2.....	60
II.2.4. Placement / routage.....	60
II.2.5.Simulation temporelle	61
b. Outils de conception par le XSG	61
A. La communication entre les blocs SIMULINK et les blocs XSG	62
III. Implantation sur FPGA.....	63
IV.1 Module de calcul d’une fonction d’appartenance.....	65
IV.2. Méthode de calcul des nombres de bit.....	67
IV.2.2.Module de calcul de l’inférence.....	68
B. Module de calcul des règles d’inférences.....	68
C. Module de réalisation de la fonction ‘ou’.....	69
D. Module de réalisation de la défuzzification.....	70
v.Conclusion	70
Conclusion générale.....	72

Liste des figures

Figures	Titres	Pages
Figure (I. 1)	Schéma de fonctionnement d'une cellule solaire	4
Figure (I. 2)	Silicium polycris-tallin	5
Figure (I. 3)	Types de cellules photovoltaïques.	5
Figure (I. 4)	Schéma du circuit électrique équivalent d'une cellule solaire réelle connectée à une Charge	6
Figure (I. 4.bis)	Schéma de 3 cellules photovoltaïques associées en parallèle.	7
Figure (I. 5)	Caractéristique P-V des cellules PV raccordées en parallèle.	8
Figure (I. 6)	Caractéristique I-V des cellules PV raccordées en parallèle.	8
Figure (I. 6.bis)	Schéma de 3 cellules photovoltaïques associées en série.	8
Figure (I. 7)	Caractéristique P-V des cellules PV raccordées en série.	9
Figure (I. 8)	Caractéristique I-V des cellules PV raccordées en série.	9
Figure (I. 9)	Représentation d'un module Photovoltaïque	11
Figure (I. 10)	Représentation d'un champ photovoltaïque.	11
Figure (I. 11)	Les diodes de protections des modules PV.	12
Figure (I. 12)	Caractéristique I/V d'un module PV	13
Figure (I.13)	Courbe de puissance d'un module PV	13
Figure (I.14)	Influence de l'irradiation solaire.	14
Figure (I.15)	Influence de la température.	14
Figure (I.16)	Organigramme fonctionnel de l'algorithme de P and O	16
Figure (I.17)	Schéma explicatif du fonctionnement de INC	18
Figure (I.18)	Organigramme de l'algorithme de l'INC	19
Figure (II.1)	Fonction d'appartenance type	22
Figure (II. 2)	Les formes de fonction d'appartenance.	22
Figure (II. 3)	Structure interne d'un contrôleur flou	23
La figure (II.4)	Illustration de la méthode de Mamdani. Max-Min	25
Figure (II. 5)	Les types de structure d'un contrôleur flou	27
Figure (II.6)	Système MPPT flou	28
Figure (II.7)	Caractéristique puissance-tension du module PV	28
Figure (II.8)	Fonctions d'appartenance de la première variable d'entrée (erreur)	30
Figure (II. 9)	Fonctions d'appartenance de la deuxième variable d'entrée (variation de l'erreur)	30
Figure (II. 10)	Fonctions d'appartenance de la variable de sortie (D rapport cyclique)	30
Figure (II. 11)	Circuit électrique idéalisé du convertisseur DC-DC "boost".	33
Figure (II.12)	Forme du signal de commande du commutateur S.	33
Figure (II. 13)	Interrupteur (Switch) fermé pendant un intervalle de temps DT.	34
Figure (II. 14)	Switch ouvert pendant un intervalle de temps $(1 - D)T$.	35
Figure (II.15)	Variation du courant de l'inducteur I_L en fonction du temps.	36
Figure (II .16)	Allures de la tension aux bornes de la bobine et le courant qui la traverse pendant une période de conduction T.	38

Liste des figures

Figure (II.17)	Allures des tensions d'entrée et au bornes de la bobine pendant une période de conduction T .	39
Figure (II.18)	Allures de la tension aux bornes de la diode et le courant qui la traverse pendant une période de conduction T .	41
Figure (III.1)	Schéma fonctionnel sous Simulink du système photovoltaïque avec MPPT flou	43
Figure (III.2)	Schéma fonctionnel sous Simulink du système photovoltaïque avec MPPT P&O	43
Figure (III.3)	Le modèle Simulink du module photovoltaïque.	44
Figure (III.4)	Le Modèle Simulink du convertisseur survolteur (boost).	44
Figure (III.5)	Montre le schéma fonctionnel sous Simulink du contrôleur MPPT.	45
Figure (III.6)	Schéma fonctionnel sous Simulink du système photovoltaïque avec MPPT flou	46
Figure (III.7)	Schéma bloc du c ontrôleur MPPT P&O sous Matlab Simulink	46
Figure (III.8)	Les résultats de simulation de la technique P&O sous des conditions standards	47
Figure (III.9)	Les résultats de simulation de la technique basée sur la logique floue sous des conditions standards	48
Figure (III.10)	La tension de sortie du système solaire obtenue par MPPT flou et P&O	49
Figure (III.11)	La puissance générée par le module solaire obtenue par simulation du MPPT flou et P&O	49
Figure (III.12)	le signal d'ensoleillement et de température appliqué au GPV	50
Figure (III.13)	Les résultats de simulation de la technique basée sur la logique floue sous des conditions de température variables	50
Figure (III.14)	Les résultats de simulation de la technique basée sur la logique floue sous des conditions de température variables	51
Figure (III.15)	Le signal d'ensoleillement et de température appliqué au GPV	52
Figure (III.16)	Les résultats de simulation de la technique P&O sous des conditions variables de l'insolation	53
Figure (III.17)	Les résultats de simulation de la technique basée sur la logique floue sous des conditions variables de l'insolation	54
Figure (III.18)	le signal d'ensoleillement et de température appliqué au GPV	55
Figure (III.19)	Les résultats de simulation de la technique P&O sous des conditions d'insolation et de température variables	55
Figure (III.20)	Les résultats de simulation de la technique basée sur la logique floue sous des conditions d'insolation et de température variables	56
Figure IV.1	Architecture interne d'un FPGA de type Virtex.	59
Figure IV.2	Les étapes de conception d'un programme sur FPGA	59
Figure IV.3	Les bibliothèques de XSG	61
Figure IV.4.a	propriétés de Gateway In	62
Figure IV.4.b	propriétés de bloc Gateway Out	62

Liste des figures

Figure IV.5	Algorithme proposé pour l'implémentation du régulateur flou	63
Figure IV.6	Schéma bloqué de l'implémentation du régulateur flou	64
Figure IV.6.a	Implémentation du module des fonctions d'appartenance	65
Figure IV.7.	L'algorithme de la fonction d'appartenance NB	65
Figure IV.8.	L'algorithme de la fonction d'appartenance NM	66
Figure IV.9.a	Fonction d'appartenance du régulateur flou synthétisé	66
Figure IV.9.b	Fonction d'appartenance du régulateur flou synthétisé après décalage de l'univers de discours.	66
Figure IV.10.	Implémentation de deux fonctions d'appartenance	67
Figure IV.11.	Implémentation de la fonction d'appartenance de l'erreur	68
Figure IV.12.	Implémentation de la fonction d'appartenance de la variation d'erreur	68
Figure IV.13.	Réalisation de « If e is NB and de is Nb...Pb»	69
Figure IV.14.	Implémentation du module fonction «ou»,(conséquence PBS)	69
Figure IV.15.	Réalisation de la défuzzification	70

Liste des tableaux

Tableau	Titre	Page
Tableau I.1	caractéristiques électriques du module PV	10
Tableau II.1	Méthode d'inférence pour un réglage par logique floue	24
Tableau II.2	la représentation des variables linguistiques	29
Tableau II.3	Table de décision	31
Tableau III.1	Paramètres de simulation en mode régulation	45
Tableau IV.1	Caractéristiques du régulateur flou	64

Les systèmes photovoltaïques (PV) sont rapidement développés et ont de plus en plus de rôle dans les technologies de l'énergie électrique, fournissant des sources d'énergie plus sûres et sans pollution. Les panneaux solaires sont des sources d'énergie dans des applications photovoltaïques. Mais malheureusement, ils ont des coûts de fabrication élevés et une faible efficacité de conversion d'énergie. Comme l'électricité photovoltaïque est chère par rapport à l'électricité fournie par le réseau électrique, l'utilisation de toute la puissance de sortie de panneaux solaires accessible est souhaitée.

Par conséquent, les systèmes photovoltaïques doivent être conçus pour fonctionner à leurs puissances de sortie maximales dans toutes les conditions environnementales.

Les applications de l'énergie solaire ont augmentés, ce qui fait le besoin d'améliorer les matériaux et les méthodes utilisés pour exploiter cette source d'énergie. Les principaux facteurs qui influent sur l'efficacité du procédé de collecte sont l'efficacité de la cellule solaire, l'intensité du rayonnement de la source et les techniques de stockage. L'efficacité d'une cellule solaire est limitée par les matériaux utilisés dans leurs fabrications. Il est particulièrement difficile d'apporter des améliorations considérables sur la performance de la cellule, donc limite le rendement de l'ensemble du processus de collecte. Par conséquent, l'augmentation de l'intensité du rayonnement reçu du soleil est la méthode la plus susceptible d'atteindre pour améliorer la performance du système solaire. La cellule solaire a un point de fonctionnement optimal pour être en mesure d'obtenir la puissance maximale. Pour obtenir le maximum de puissance du générateur photovoltaïque, le système d'alimentation photovoltaïque nécessite généralement un contrôleur de suivi du point de puissance maximale [1].

Il existe trois grandes approches pour maximiser l'extraction d'énergie dans les systèmes solaires sont : le suivi du soleil, le suivi du point maximal de la puissance ou les deux [2]. Ces méthodes nécessitent des contrôleurs intelligents tels que le contrôleur basé sur la logique floue ou le contrôleur classique comme le contrôleur PID. Dans la littérature, de nombreux systèmes de suivi du point de puissance maximale (MPPT) ont été proposés et mis en œuvre, tels que la technique classique P&O, incrémentale et la théorie floueetc [3]. Dans notre travail nous nous intéressons à la théorie floue, qui est basée sur l'expertise humain, elle offre l'avantage d'être une commande robuste et relativement simple à élaborer et elle ne nécessite pas la connaissance exacte du modèle à réguler.

D'autre part, les circuits FPGA (Field Programmable Gate Array), qui sont des circuits programmables standards, et qui peuvent être adaptés à des besoins divers, deviennent incontournables dans les applications nécessitant un temps de développement rapide et une modularité garantie. Ils sont surtout utilisés dans les systèmes embarqués (avionique, automobile, espace, ...) et tendent à se généraliser dans le domaine des applications on chip.

L'objet de ce projet de fin d'études consiste à l'implémentation de la méthode MPPT suscitée sur circuit FPGA. Ce travail nécessite plusieurs étapes, il commence par la conception du contrôleur, l'étude de comportement de ce dernier sous Matlab/Simulink enfin une description en langage VHDL est nécessaire afin de charger le programme sur la carte FPGA.

Notre mémoire est organisée comme suit :

Le premier chapitre sera entièrement consacré à une généralité sur les générateurs photovoltaïques GPV et des différents groupements possibles des cellules. Par la suite, nous allons élucider le principe de conversion dans les systèmes photovoltaïques. Ensuite nous allons effectuer la modélisation mathématique du GPV qui est essentielle à l'analyse du système photovoltaïque, en se basant sur le modèle de la cellule.

Dans le deuxième chapitre, on fait un survol général des éléments de base de la logique floue. Ensuite, nous détaillerons les principales étapes, généralement suivies, dans la conception d'un contrôleur flou dédié à une application donnée. D'une autre part nous allons modéliser le convertisseur DC/DC boost vu la nécessité d'un étage d'adaptation d'impédance entre le GPV et la charge.

Le troisième chapitre contient principalement les résultats obtenus en simulant un contrôleur MPPT flou sous des conditions atmosphériques standards et variables, ces résultats vont être comparés à celles du contrôleur P&O, afin de démontrer les performances de la théorie floue synthétisée.

Le quatrième chapitre sera dédié à l'implémentation hardware du contrôleur, conçu lors du deuxième chapitre, sur un circuit reconfigurable *FPGA*. Nous allons traiter tout d'abord l'architecture interne, avant de passer à l'implémentation. Cette tâche sera précédée d'une petite introduction des outils logiciels utilisés. Il s'agira du langage de description matériel *VHDL* et l'environnement de développement Simulink – XSG (Xilinx System Generator).

A la fin, on termine ce mémoire par une conclusion générale.

I. Introduction

La cellule solaire, de forme ronde ou carrée est l'élément de base d'un système solaire. Un ensemble de cellules forme un module solaire, dans un module les cellules sont reliées électriquement entre elles et encapsulées, donc protégées des agents extérieurs. Plusieurs modules forment un panneau solaire. Plusieurs panneaux forment un système ou champ solaire, auxquels viennent s'ajouter des protections, un régulateur, un système de stockage de l'énergie (batterie) des appareils de contrôle et de mesure, un onduleur [4] ...

Le terme générateur photovoltaïque GPV est utilisé pour désigner, selon l'application considérée, un module ou un panneau PV. Toutefois, il peut faire allusion au système PV tout entier. Pour la suite de ce document, on utilisera le terme GPV pour désigner un module ou un panneau PV.

II. La cellule solaire

En découvrant la délivrance d'une petite quantité d'électricité par certains matériaux, quand exposés à la lumière, *E. Becquerel* a mis en évidence l'effet photovoltaïque en 1839. Par la suite, en 1912, Albert Einstein expliqua le phénomène photoélectrique, qui n'était pas mis en application que 50 ans plus tard, en 1954, par la réalisation d'une première cellule photovoltaïque (ou photopile) en silicium aux États-Unis par les chercheurs des laboratoires Bell qui ont découvert que la photosensibilité du silicium pouvait être augmentée en dopant ce semi-conducteur par des "impuretés" appropriées. Cette cellule photovoltaïque peut être définie comme étant une diode constituée d'un matériau semi-conducteur absorbant l'énergie lumineuse et la transformant directement en courant électrique.

III. Principe de la conversion photovoltaïque

L'effet photovoltaïque dans une cellule solaire est basé sur les caractéristiques de la production et le transport des charges positives et négatives dans un matériau semi-conducteur (généralement le silicium) sous l'effet de la lumière. La cellule comporte deux couches différentes de ce matériau, superposées l'une sur l'autre créant une jonction p-n (figure I.1), la première est dopée par des atomes accepteurs d'électrons tels que le bore qui possède un électron de moins par rapport au silicium pour construire la couche positive (zone p), et la deuxième dopée par des atomes donneurs tels que le phosphore qui possède un électron de plus par rapport au silicium pour avoir une couche négative (zone n), ces deux couches présentent ainsi une différence de potentiel [5], [6].

L'énergie des photons lumineux captés par les électrons périphériques (couche N) leur permet de franchir la barrière de potentiel et d'engendrer un courant électrique continu.

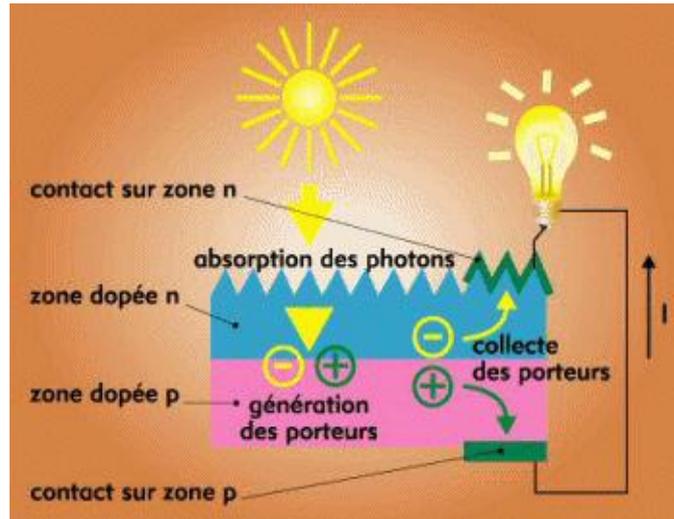


Figure I.1. Schéma de fonctionnement d'une cellule solaire

IV. Les différentes technologies et rendement des cellules photovoltaïques :

Les cellules photovoltaïques sont constituées de semi-conducteurs à base de silicium (Si), de germanium (Ge), de sélénium (Se), de sulfure de cadmium (CdS), de tellure de cadmium (CdTe) ou d'arséniure de gallium (GaAs). Le silicium (Figure I.2) est actuellement le matériau le plus utilisé pour fabriquer les cellules photovoltaïques, car il est très abondant dans la nature. On le trouve dans la nature sous forme de pierre de silice. La silice est un composé chimique (dioxyde de silicium) et un minéral de formule SiO_2 . Il est le principal constituant des roches sédimentaires détritiques (sables, grès) [7].

Les différents types de cellules PV existants sont :

- Cellule en silicium amorphe (rendement : 6 à 10%)
- Cellule en silicium monocristallin (rendement : 13 à 17%)
- Cellule en silicium poly cristallin (rendement : 11 à 15%)
- Cellule Tandem
 - Cellule en matériaux organiques (rendement : 3.6%)



Figure I.2 : Silicium polycristallin



a



b



c

Figure I.3 : Types de cellules photovoltaïques. (a) silicium monocristallin, (b) silicium polycristallin, (c) silicium amorphe

V. Caractéristique et modélisation de la cellule solaire

V.1. Caractéristique électrique d'une cellule solaire

La cellule photovoltaïque est caractérisée par :

La tension en circuit ouvert (V_{co}) :

On place une photopile sous une source lumineuse constante, sans aucun récepteur à ses bornes, elle va produire une tension continue comprise entre 0.3 et 0.7 selon le matériau semi-conducteur utilisé, la température de la cellule et son état de vieillissement.

Le courant de court-circuit I_{cc} :

Si on court-circuite une photopile, elle va débiter un courant maximal à tension nulle ce courant est dit courant de court-circuit.

La caractéristique courant – tension

La caractéristique $I=f(V)$ d'une cellule solaire représente la variation du courant qu'elle produit à ses bornes

La caractéristique puissance – tension

La caractéristique $P=f(V)$ d'une cellule solaire représente le produit de courant par la tension délivrée par une cellule solaire $P=V.I$

V.2. Modélisation d'une cellule solaire

Dans le but d'obtenir la caractéristique courant-tension $I=f(V)$, et pour analyser et évaluer les performances des systèmes photovoltaïques ; plusieurs modèles de cellules solaires ont été proposés. La différence entre ces modèles réside dans la procédure et le nombre des paramètres intervenants dans le calcul de la paire courant-tension.

Pour la modélisation du capteur solaire nous avons choisi le modèle à une exponentielle. C'est le modèle qui décrit le mieux la caractéristique courant-tension d'une cellule photovoltaïque.

Le schéma électrique équivalent du modèle à une exponentielle d'une cellule solaire peut être schématisé comme suit :

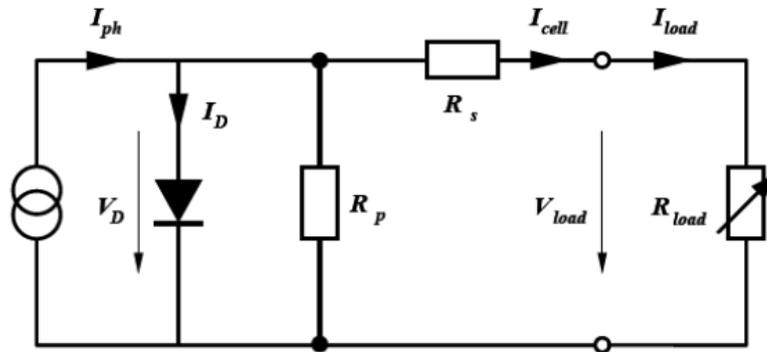


Figure I.4 Schéma du circuit électrique équivalent d'une cellule solaire réelle connectée à une Charge

Avec :

I_{ph} : photo-courant

V_{cell} : tension aux bornes de la cellule

I_D : courant à travers la diode

I_{cell} : courant délivré par la cellule

I_{load} : courant à travers la charge

V_{load} : tension aux bornes de la charge

R_p : résistance parallèle caractérisant le courant de fuite à la surface de la cellule dû au non idéalité de la jonction P-N et des impuretés près de la jonction.

R_s : résistance série représentant les diverses résistances de contact et la résistance du semi-conducteur.

En pratique, la résistance parallèle R_p est très importante (de l'ordre du méga Ohm) et la résistance série R_s est très faible (de l'ordre de quelques milli-ohms).

Avec un tel circuit électrique équivalent, on peut écrire :

$$I_{cell} = I_{ph} - I_D - \frac{V_D}{R_p} \tag{I-01}$$

$$I_D = I_s \left(e^{\frac{V_D}{V_{th}}} - 1 \right) \tag{I-02}$$

$$V_D = V_{cell} + R_s I_{cell} \tag{I-03}$$

D'ou

$$I_{cell} = I_{ph} - I_s \left(e^{\frac{V_{cell} + R_s I_{cell}}{V_{th}}} - 1 \right) - \frac{V_{cell} + R_s I_{cell}}{R_p} \tag{I-04}$$

Avec :

I_{cell} : courant fourni par la cellule [A]

V_{cell} : tension aux bornes de la cellule [V]

q : charge électrique élémentaire [$1,6 \cdot 10^{-19}$ As]

k : constante de Boltzmann [$8,65 \cdot 10^{-5}$ eV/K = $1,381 \cdot 10^{-23}$ J/K]

T : température absolue de la cellule [K]

I_s : courant de saturation de la jonction non éclairée [A]

n : facteur d'idéalité de la jonction

VI. Constitution d'un générateur photovoltaïque (GPV)

L'association de plusieurs cellules photovoltaïques en série/parallèle donne lieu à un générateur photovoltaïque. Si les cellules se connectent en série, les tensions de chaque cellule s'additionnent, augmentant la tension totale du générateur. D'une autre part, si les cellules se connectent en parallèle, c'est l'ampérage qui augmentera comme représentés sur les figures suivantes.

VI.1. Association des Cellules Photovoltaïques en Parallèle

Les propriétés du groupement en parallèle des cellules sont duales de celles du groupement en série. Ainsi, dans un groupement des cellules connectées en parallèle, les cellules sont soumises à la même tension et la caractéristique résultante du groupement est obtenue par addition des courants à tension donnée. Les figures (I. (5;6)) montrent les caractéristiques résultantes (I_{PCC} , V_{PCO}) obtenues en associant en parallèle (indice p) N_p cellules identiques:

$$I_{pcc} = N_p * I_{cc} \quad \text{et} \quad V_{pco} = V_{co}$$

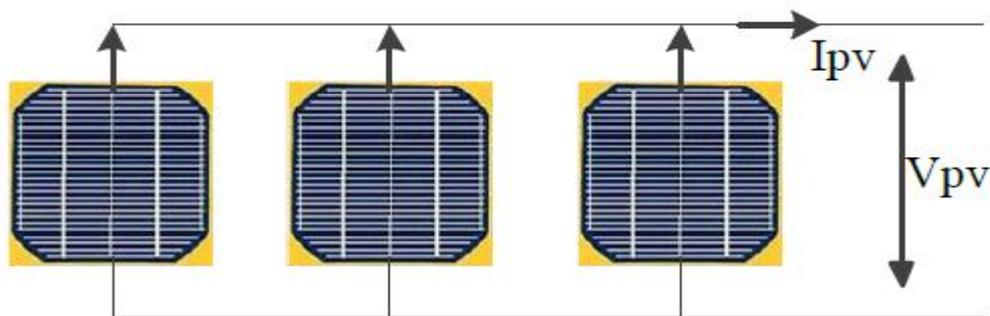


Figure I.4.bis .Schéma de 3 cellules photovoltaïques associées en parallèle

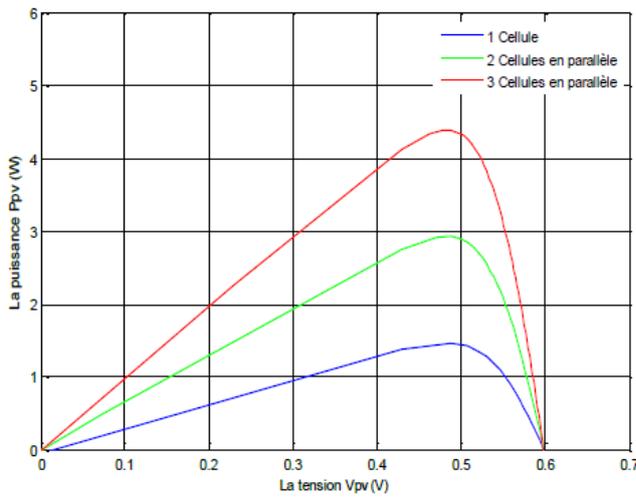


Figure I.5 Caractéristique P-V des cellules PV raccordées en parallèle.

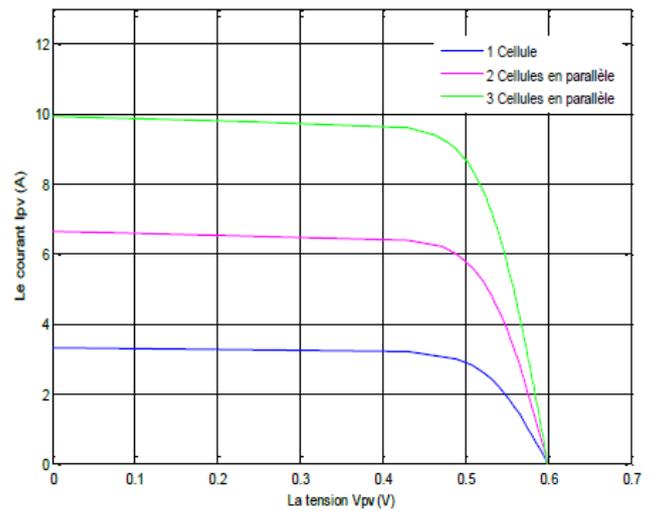


Figure I.6. Caractéristique I-V des cellules PV raccordées en parallèle.

VI.2. Association des Cellules Photovoltaïques en Série

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. Les figures (I. (7 ; 8)) montrent la caractéristique résultante (I_{sc} , V_{sc}) obtenue en associant en série (indice s) N_s cellules identiques (I_{cc} , V_{co}) :

$$I_{sc} = I_{cc} \quad \text{et} \quad V_{sc} = N_s \cdot V_{co}$$

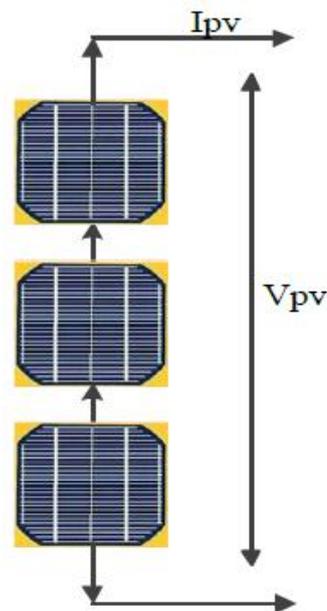


Figure I.6.bis .Schéma de 3 cellules photovoltaïques associées en série.

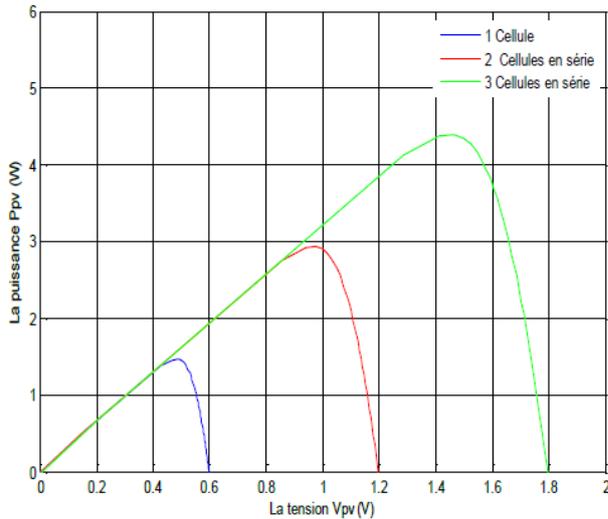


Figure I.7. Caractéristique P-V des cellules PV raccordées en série.

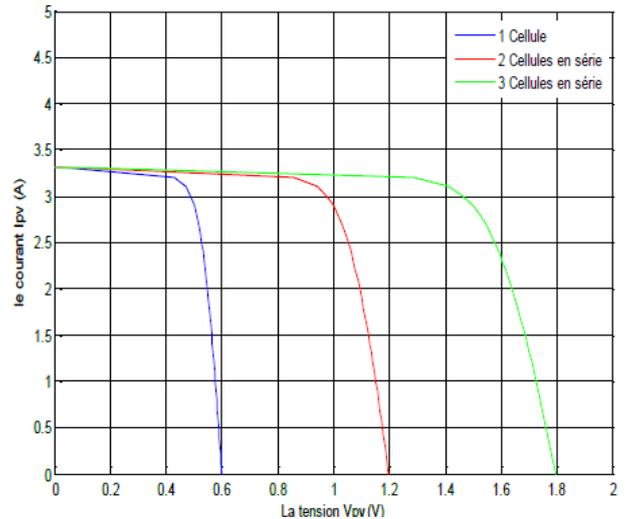


Figure I.8. Caractéristique I-V des cellules PV raccordées en série.

La plupart des panneaux photovoltaïques commerciaux sont constitués par des sous-réseaux de cellules connectées en série. Chacun de ces sous-réseaux est lui-même constitué d'un groupe de cellules photovoltaïques connectés en série. Le nombre de cellules par sous-réseaux est le fruit d'un compromis économique entre protection et pertes d'une partie importante du générateur photovoltaïque en cas de défaut partie

VII. Caractéristique et modélisation d'un générateur photovoltaïque

VII.1. Caractéristiques électriques

La prédiction du comportement électrique d'un GPV est primordiale, car elle est à la base de la prédiction de l'énergie qui sera délivrée. Ceci est une étape cruciale de la conception de n'importe quel système PV. Les données disponibles généralement pour faire cette prédiction sont les informations données par le fabricant du module ou panneau PV, l'emplacement géographique et le climat local. Comme pour la cellule PV, les caractéristiques électriques d'un module données par le fabricant correspondent aux dites, conditions de test standard (STC : Standard Test Conditions, ensoleillement 1000 W/m^2 , AM 1.5, température 25°C). Dans ce qui suit, on utilisera l'exposant (*) pour se référer à ces conditions. Les caractéristiques électrique se résument généralement par le courant de court-circuit I_{cc} , la tension de circuit ouvert V_{co} et la puissance maximale P_{max} [8].

Le tableau suivant présente les caractéristiques électriques du module PV fabriqué avec 72 cellules poly-cristallines en série. Ce module sera utilisé pour la simulation.

Caractéristiques électriques	Valeurs
Puissance maximale (Pmax)	150W
Tension à Pmax (Vmp)	34,5V
Courant à Pmax (Imp)	4,35A
Tension de circuit ouvert (Vco)	43,5V
Courant de court-circuit (Icc)	4,75V
Coefficient de température de Icc	0,065 ± 0,015% /°C
Coefficient de température de Vco	160± 20 mV /°C
Coefficient de température de puissance	0,5± 0:05% /°C

Tableau I.1. Caractéristiques électriques du module PV

VII.2. Modélisation d'un GPV

Nous avons vu que le modèle mathématique d'une cellule PV est donné par :

$$I = I_{ph} - I_s \left(e^{\frac{V+IR_s}{V_{th}}} - 1 \right) - (V + IR_s)/R_p \quad I-05$$

Cette expression donne une représentation adéquate du comportement intrinsèque d'une cellule solaire au silicium typique. Néanmoins, elle ne peut être utilisée directement pour prédire le comportement du GPV, car quelques paramètres, I_{ph} et I_s en particulier, ne peuvent être établies à partir des informations habituellement disponibles. Ces dernières sont restreintes aux valeurs de I_{sc}^* , V_{co}^* et P_{max}^* qui sont toujours incluses dans le catalogue du fabricant.

Pour pallier à ce problème, des simplifications peuvent être faites en faisant les suppositions suivantes, qui sont généralement valides pour les cellules au silicium [8]:

- L'effet de la résistance parallèle est négligé,
- La photo courant et le courant de court-circuit sont égaux,
- $\exp \frac{V+R_s I}{V_{th}} \gg 1$ pour toutes les conditions de fonctionnement.

Par conséquent, l'équation (I.5) devient :

$$I = I_{cc} - I_s e^{\frac{V+IR_s}{V_{th}}} \quad I-06$$

Et la tension de circuit ouvert est donnée par:

$$V_{co} = V_{th} \ln\left(\frac{I_{cc}}{I_s}\right) \quad I-07$$

D'où:

$$I_s = I_{cc} e^{-\frac{V_{co}}{V_{th}}} \quad I-08$$

Finalement, on obtient :

$$I = I_{cc} \left[1 - \exp\left(\frac{V-V_{co}+IR_s}{V_{th}}\right) \right] \quad I-09$$

Cette expression est très pratique, car les paramètres à droite sont facilement déterminés, ce qui permet l'application directe de cette dernière.

Nous avons vu que plusieurs cellules PV sont groupées pour constituer des modules ou des panneaux PV. Ces derniers contiennent N_p cellules connectées en série (Figure I.9).

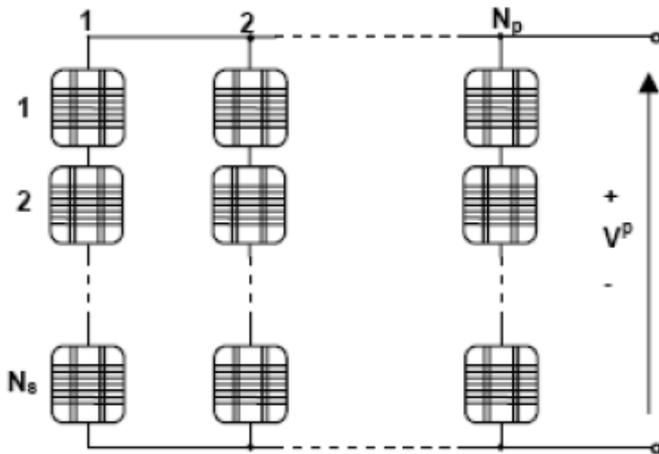


Figure I.09. Représentation d'un module Photovoltaïque

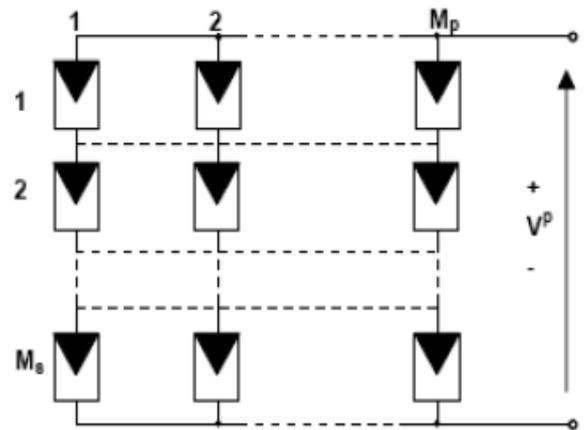


Figure I.10. Représentation d'un champ photovoltaïque.

Le module du panneau photovoltaïque est obtenu en remplaçant chaque cellule dans la figure I.09 par le schéma équivalent présenté dans la figure I.4 (en considérant que les cellules sont semblables et sont soumises aux mêmes conditions). Dans le modèle mathématique du panneau PV, qui sera présenté par la suite, les paramètres du panneau portent l'indice "P" et les paramètres de la cellule PV, l'indice « C ». Ainsi, le courant I^P , généré par le module PV, dans des conditions de fonctionnement arbitraires, peut être exprimé par:

$$I^P = I_{cc}^P \left[1 - \frac{\exp(V_p - V_{co}^P + I^P R_s^P)}{N_s V_{th}^C} \right] \quad \text{I-10}$$

L'expression du courant du panneau est une fonction implicite qui répond :

- du courant de court-circuit du panneau : $I_{cc}^P = N_p I_{cc}^C$
- de la tension de fonctionnement à vide du panneau : $V_{co}^P = N_s V_{co}^C$
- de la résistance série équivalente du panneau PV : $R_s^P = \frac{N_s}{N_p} R_s^C$
- la tension thermique du semi-conducteur d'une cellule PV : $V_{th}^C = \frac{nkT^C}{q}$

Pour délivrer des courants et des tensions adaptées aux applications courantes, plusieurs panneaux PV sont connectés en série et/ou en parallèle (figure I.10). Dans ce cas, le courant total généré par la configuration est donné par:

$$I = \sum_{i=1}^{M_p} I_i$$

VIII. Protection des modules PV

Lorsque nous concevons une installation photovoltaïque, nous devons assurer la protection électrique de cette installation afin d'augmenter sa durée de vie en évitant notamment des pannes destructrices liées à l'association des cellules et de leur fonctionnement en cas d'ombrage. Deux types de protection sont généralement indispensables au bon fonctionnement d'un module photovoltaïque :

VIII.1. Protection lors de la connexion en parallèle de plusieurs GPV

Dans le cas de plusieurs chaînes de cellules mises en parallèle sur une charge, le risque est que des chaînes de cellule éclairées débitent dans des chaînes ombrées ou que la charge ne se décharge à travers le générateur. On dispose pour cela des diodes anti-retour mises en série avec le GPV (diode de blocage). Cette diode est indispensable quand la charge du module PV est une batterie. En fait, Ces diodes évitent que la batterie ne débite sur le module PV pendant la nuit.

VIII.2. Protection du GPV constituée de la mise en série d'un grand nombre de cellules PV.

La mise en série de cellules PV implique que le courant traversant chaque cellule soit le même que celui de l'ensemble du GPV associé. Ainsi, quand un GPV ou une partie de ce GPV (par exemple, une cellule) est ombragée, cette partie sous-irradiée du module peut se trouver polarisée en inverse et devenir réceptrice, dissipant alors la puissance. Cette dissipation a comme effet immédiat un échauffement de la zone sous-irradiée. Cet échauffement local peut donner lieu à des points chauds (hot spot en anglais) qui peuvent endommager la zone affectée et dégrader définitivement les performances du module PV entier. Pour éviter ces effets indésirables, des diodes by-pass sont associées à un sous-réseau de cellules.

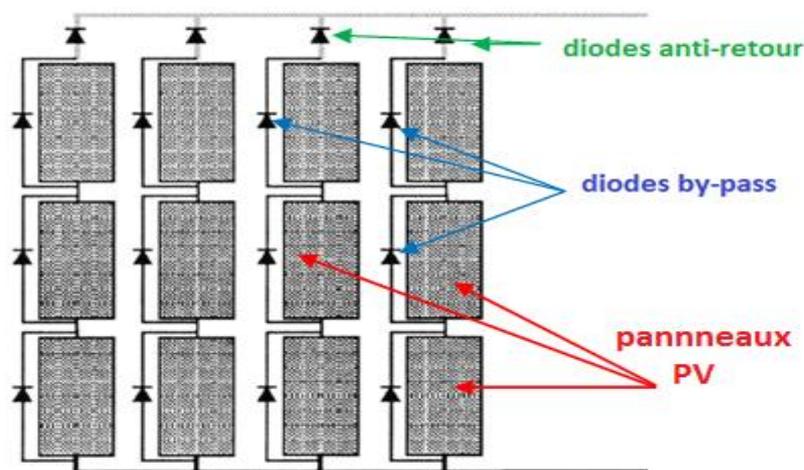


Figure II.11. Les diodes de protections des modules PV.

IX. Fonctionnement à puissance maximale

Comme pour une cellule PV, la caractéristique (I/V) d'un GPV est non linéaire (figure I.12). Le module PV produit une puissance à un point appelé point de fonctionnement qui appartient à la courbe caractéristique. Les coordonnées de ce point sont la tension et le courant de fonctionnement. De même que pour la cellule, le MPP correspond au point de fonctionnement pour lequel le GPV opère avec un maximum de rendement et de puissance [9].

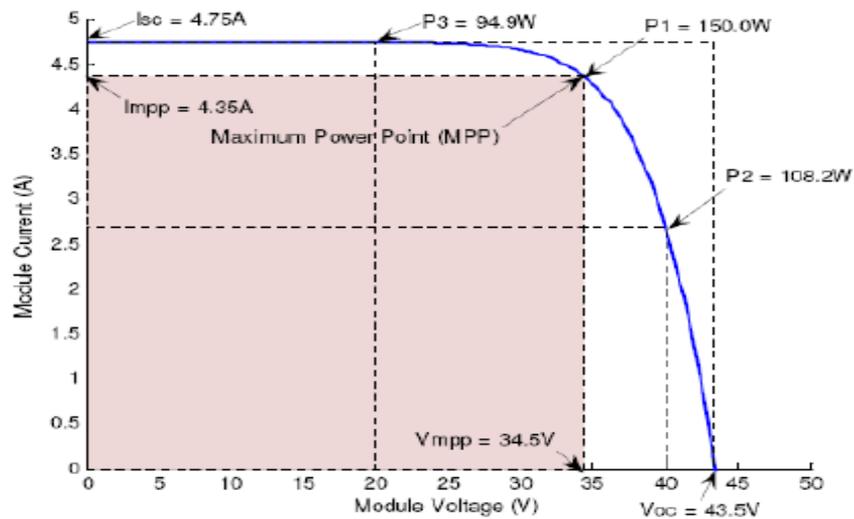


Figure I.12 : Caractéristique I/V d'un module PV

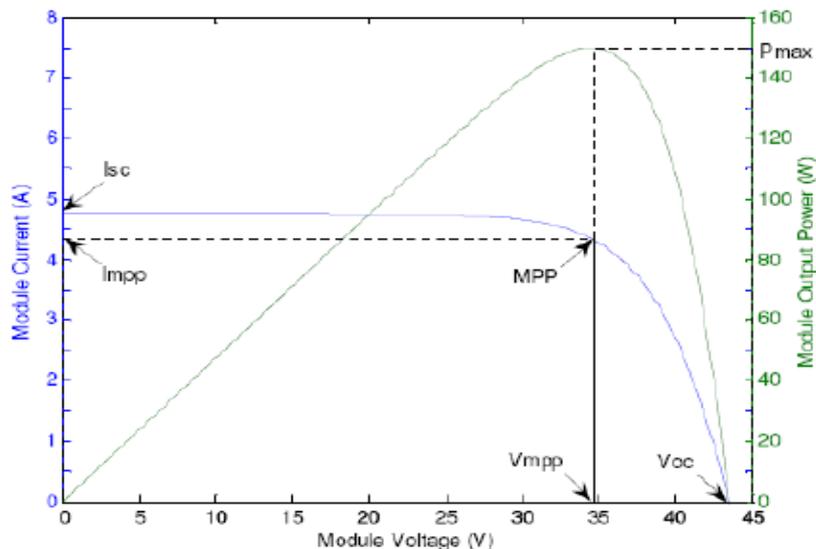


Figure I.13 : Courbe de puissance d'un module PV

La (figure I.13) présente un exemple de la caractéristique (P/V) et (I/V) d'un module PV. Elle illustre l'importance de faire fonctionner le système au MPP pour tirer le maximum de la puissance disponible [9]

X. Effets des variations climatiques sur un GPV

a) Influence de l'éclairement

En faisant varier l'éclairement entre 200 w/m² et 1000 w/m² avec un pas de 200, la caractéristique ($I_{pv}=f(V_{pv})$) est donnée par les (figures I. 14). On remarque que la valeur du courant de court-circuit est directement proportionnelle à l'intensité du rayonnement. Par contre, la tension en circuit ouvert ne varie pas dans les mêmes proportions, elle reste quasiment identique même à faible éclairement.

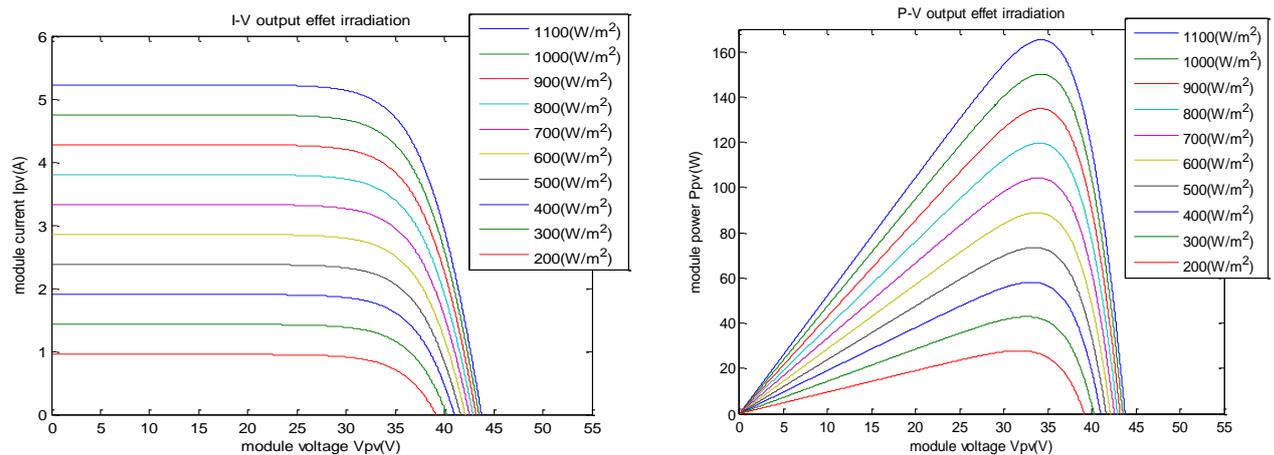


Figure I.14 : Influence de l'irradiation solaire.

b) Influence de la température :

En faisant varier la température de 25°C jusqu'à 50°C, la caractéristique ($I_{pv}=f(V_{pv})$) est donnée par les (figures I.15). On remarque que la température à une influence négligeable sur la valeur du courant de court-circuit. Par contre, la tension en circuit ouvert baisse assez fortement lorsque la température augmente, par conséquent la puissance extractible diminue. Lors du dimensionnement d'une installation, la variation de la température du site sera impérativement prise en compte.

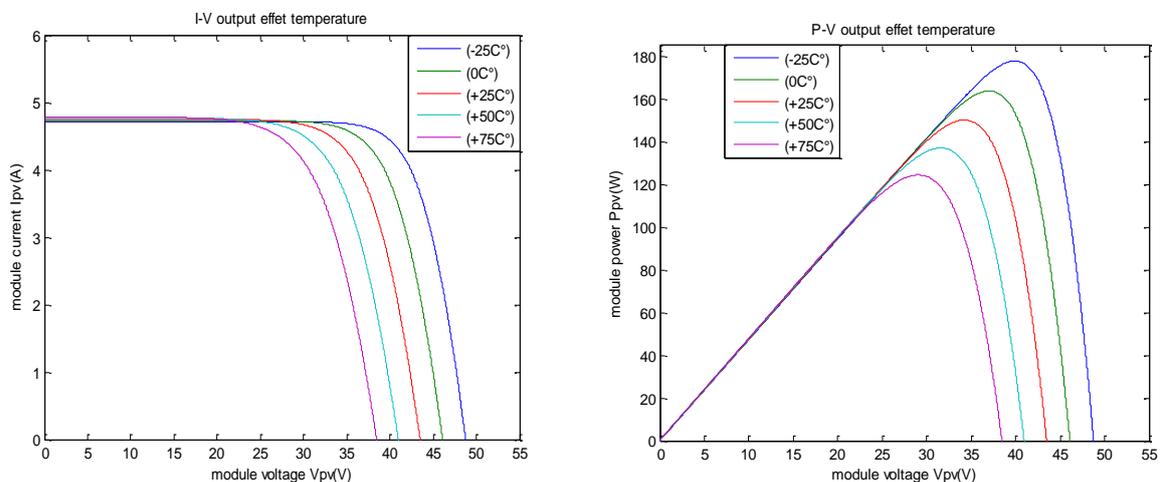


Figure I.15. Influence de la température

XI. Les différentes méthodes de poursuite du MPP

Le branchement d'une charge à un générateur photovoltaïque est le mode de couplage le plus simple qui soit. Le point de fonctionnement dans ce cas se situe à l'intersection de la droite de charge et de la caractéristique I-V du générateur. Ce point ne peut pas coïncider avec le point de puissance maximale, il s'ensuit une perte de puissance maximale du système. Ce problème peut être résolu soit par le changement de configuration du générateur photovoltaïque, soit par l'adjonction d'un mécanisme de poursuite de point de puissance maximale (MPPT) placé entre le générateur et la charge pour assurer l'adaptation d'impédance. L'exploitation optimale de l'énergie électrique disponible aux bornes du générateur photovoltaïque peut contribuer à la réduction du coût global du système.

Il existe plusieurs techniques pour satisfaire ce but tel que :

- Le contrôle du MPP à base des réseaux de neurones
- Méthode de retour de l'information de tension
- Méthode à contre réaction
- Perturbation et observation (P&O)
- Incrémentation de la conductance (IC)
- MPPT à base de la logique floue

Dans cette catégorie, l'une des méthodes les plus efficaces est de la logique floue, qui est présentée dans le chapitre suivant

XI.1. Algorithme perturbation et observation P&O

La méthode P&O est une approche largement répandue dans le domaine de la poursuite de point de puissance maximale, elle exige seulement les mesure sur la tension et le courant du sortie du panneau solaire comme son nom indique cette méthode fonctionne par la perturbation de la tension V de système en agissant directement sur le rapport cyclique puis l'observation de l'effet de cette perturbation sur la puissance de sortie de panneau solaire [10]

La tension aux bornes de panneau solaire est volontairement perturbée (i.e augmentée ou diminuée) puis la puissance est comparée à celle obtenue avant perturbation.

Si la puissance aux bornes du panneau est augmentée du fait de la perturbation, la perturbation suivante est faite dans la même direction. Réciproquement si la puissance diminue, la nouvelle perturbation est réalisée dans le sens opposé.

L'organigramme fonctionnel de cet algorithme est le suivant :

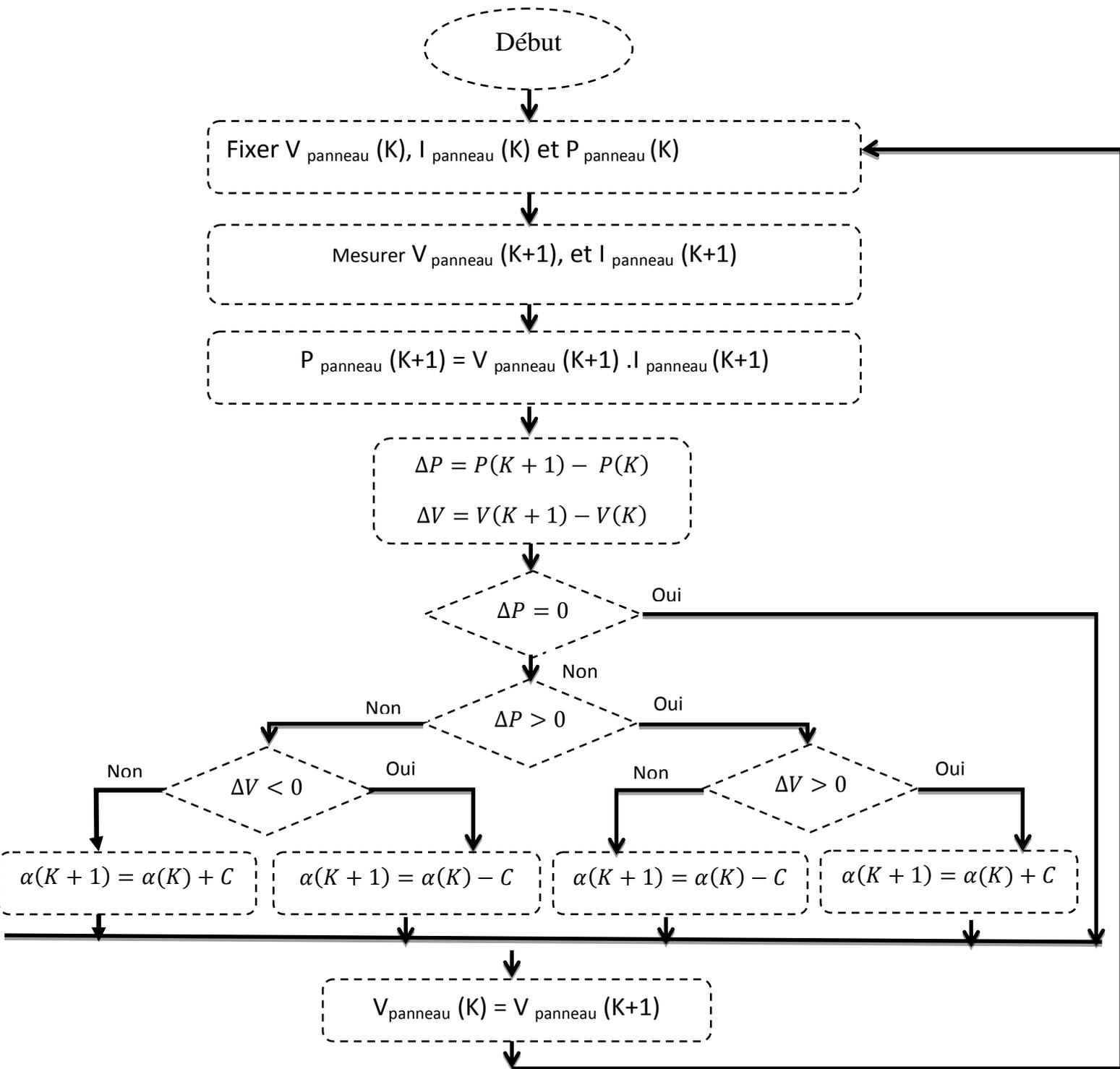


Figure I.16. Organigramme fonctionnel de l’algorithme de P and O

Où C : est la constante d’incrémention

- Si la constante d'incrémentation est grande, l'algorithme de P&O répondra rapidement aux changements soudains des conditions de fonctionnement (variation de la température et de l'éclairement), mais les pertes seront accrues dans les conditions stables (la température et l'éclairement sont fixes) ou lentement changeantes
- Si la constante d'incrémentation est très petite, les pertes dans les conditions stables ou lentement changeantes seront réduites, mais le système ne pourra plus suivre les changements rapides de la température et de l'éclairement.

La valeur idéale de C est déterminée expérimentalement

XI.2. Algorithme incrémentale et conductance INC

Le gradient $\frac{dP}{dV}$ est traité autrement dans cet algorithme par la comparaison des deux grandeurs qu'on va définir ci-dessous :

La puissance de sortie du panneau solaire est donnée par :

$$P = V \cdot I \quad \text{I-12}$$

$$\frac{dP}{dV} = \frac{d(V \cdot I)}{dV} \quad \text{I-13}$$

$$= I \frac{dV}{dV} + V \cdot \frac{dI}{dV} \quad \text{I-14}$$

$$= I + V \cdot \frac{dI}{dV} \quad \text{I-15}$$

Donc

$$\frac{1}{V} \frac{dP}{dV} = \frac{1}{V} + \frac{dI}{dV} \quad \text{I-16}$$

On définit la conductance de la source $G = \frac{1}{V}$ et l'incrémentale conductance $\Delta G = \frac{dI}{dV}$

La tension de sortie du panneau solaire étant positive, on peut écrire :

$$\frac{dP}{dV} = 0 \quad \text{si} \quad G \begin{cases} > -\Delta G \\ = -\Delta G \\ < -\Delta G \end{cases} \quad \text{I-17}$$

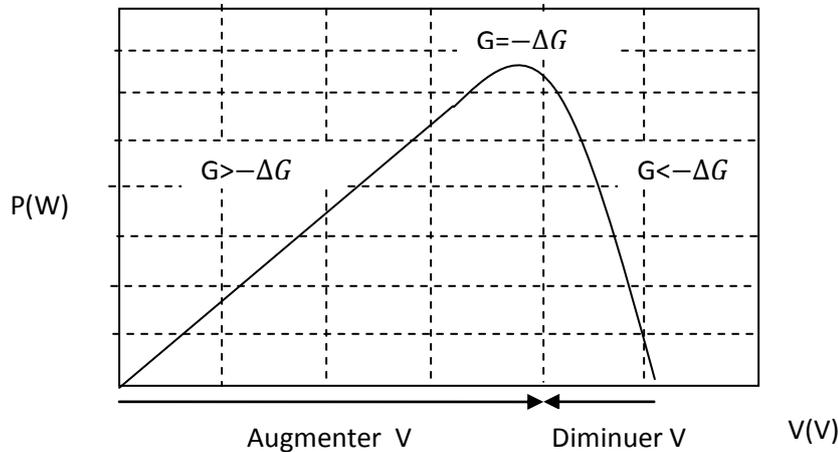


Figure I.17. Schéma explicatif du fonctionnement de INC

On déduit ;

$G > -\Delta G \Leftrightarrow$ On augmente la tension $V \Leftrightarrow$ On diminue α

$G = -\Delta G \Leftrightarrow$ On garde la tension V constante \Leftrightarrow On ne modifie pas α

$G < -\Delta G \Leftrightarrow$ On diminue la tension $V \Leftrightarrow$ On augmente α

Il existe un cas dans lequel on ne peut pas comparer les conductances, lorsque le système était au MPP à l'itération précédente. Dans ce cas, le rapport cyclique n'a pas été modifié et la tension V reste constante ($dV=0$). La conductance incrémentale n'est pas définie il suffit d'observer les variations de I . On déduit ainsi les variations à provoquer.

$dI = 0 \Leftrightarrow$ On garde V constante \Leftrightarrow On ne modifie pas α .

$dI > 0 \Leftrightarrow$ On augmente la tension $V \Leftrightarrow$ On diminue α .

$dI < 0 \Leftrightarrow$ On diminue la tension $V \Leftrightarrow$ On augmente α .

Ceci explique le premier test de l'algorithme $dV=0$ comme l'on peut constater dans le schéma fonctionnel de la (figure I.17)

Mais à cause de l'approximation des dérivées dV et dI et l'utilisation d'un pas constant,

la condition $\frac{I}{V} = -\frac{dI}{dV}$ est rarement vraie ce qui conditionne à des oscillations autour du MPP, pour remédier à ce problème une erreur est ajoutée au conditions du MPP c'est-à-dire que le MPP est atteint

si : $\left| \frac{I}{V} + \frac{dI}{dV} \right| \leq \xi$ [10].

Remarque :

Dans cet algorithme, une approximation a été faite :
 $dV = \Delta V$ et $dI = \Delta I$.

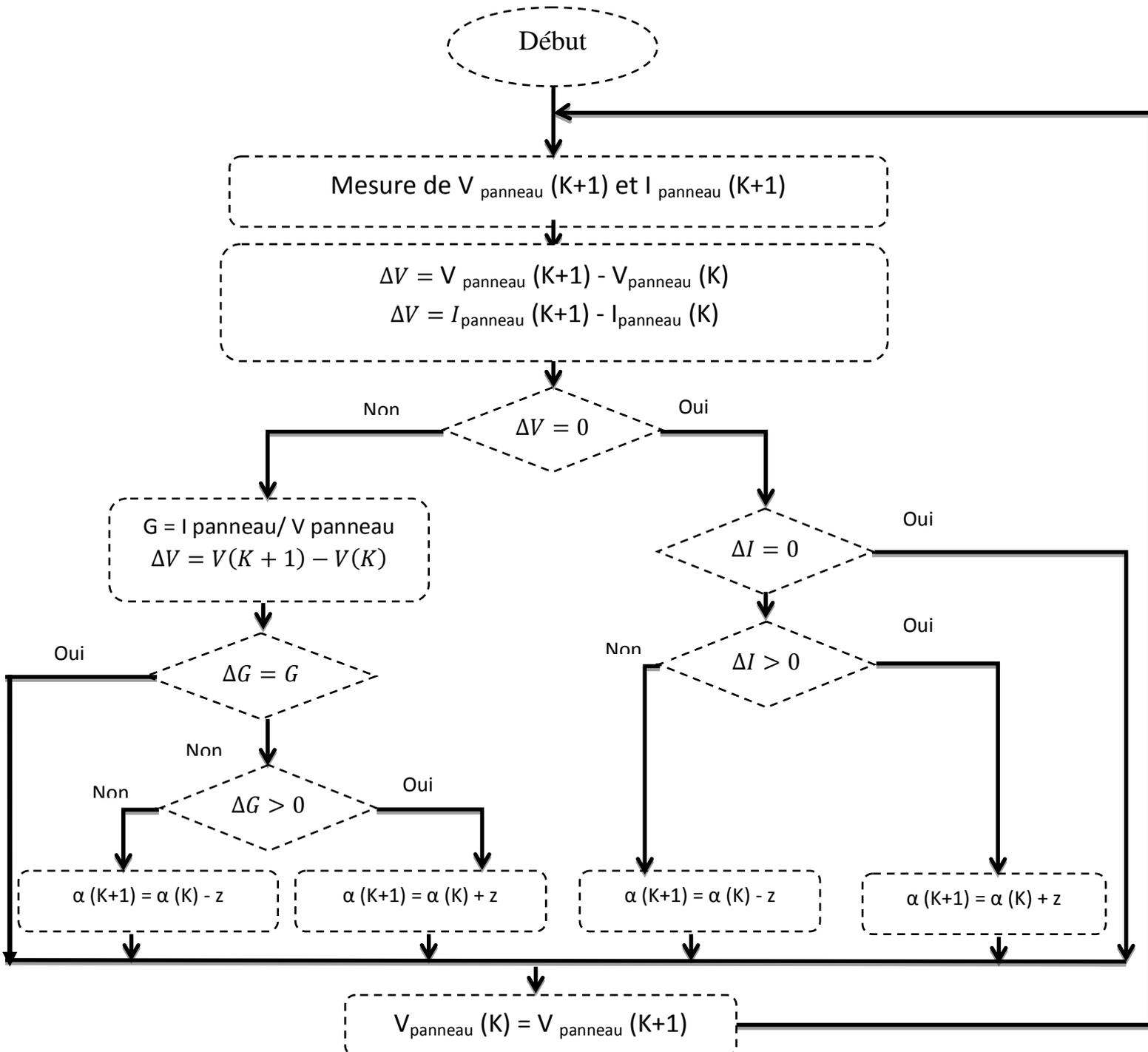


Figure I.18. Organigramme de l'algorithme de l'INC

z : pas d'incrémentation de l'algorithme de l'INC

Conclusion

Dans cette partie, nous avons abordé l'analyse du générateur photovoltaïque GPV et des différents groupements possibles des cellules. Par la suite, nous avons élucidé le principe de conversion dans les systèmes photovoltaïques. Nous avons ensuite effectué la modélisation mathématique du GPV qui est essentielle à l'analyse, en se basant sur le modèle de la cellule.

Une simulation du GPV sous Matlab a été faite afin de montrer l'effet des changements climatiques sur l'énergie produite par le GPV.

Finalement, différentes méthodes de poursuite de point de puissance maximale ont été exposées.

Le deuxième chapitre a pour objet de présenter le contrôleur flou synthétisé.

I. Introduction

Récemment, la commande par logique floue a été utilisée dans les systèmes de poursuite du point de puissance maximale MPPT, cette commande offre l'avantage d'être une commande robuste et relativement simple à élaborer et elle ne nécessite pas la connaissance exacte du modèle à réguler. La mise en place d'un contrôleur flou se réalise en trois étapes, qui sont : la fuzzification, l'inférence et la défuzzification.

Nous allons synthétiser un contrôleur flou à deux entrées et une sortie qui commande l'ouverture et la fermeture d'un convertisseur DC/DC au travers un signal MLI

II. Définition et principe de la logique floue

La logique floue, est l'une des caractéristiques du raisonnement humain qui est généralement fondé sur des données imprécises ou incomplètes. Les connaissances dont nous disposons sur un système quelconque sont généralement incertaines ou vagues pour extraire des solutions précises. La logique floue nous permet d'exprimer le comportement d'un système très complexe symboliquement par des mots (des qualifications linguistiques).

La logique floue repose sur deux théories mathématiques: théorie des sous-ensembles et théorie des possibilités. La logique classique prend deux valeurs : vrai (1) ou faux (0) par contre la logique floue permet à une condition d'être en situations intermédiaires entre le vrai et le faux. La logique floue fonctionne selon le principe suivant : plus la condition sur les entrées est vraie, plus l'action préconisée pour les sorties doit être respecter.

III. Notions de base sur la logique floue

Les notions relatives à la logique floue sont : l'univers de discours, l'ensemble flou, la variable linguistique, les fonctions d'appartenances et les règles floues.

III.1. Univers de discours, et l'ensemble flou

Un univers de discours, ou domaine de discours (U) d'une variable χ est l'ensemble de toutes les valeurs possibles de U . Un ensemble flou est un ensemble de valeurs qui prennent leurs degrés d'appartenance entre 0 et 1. Mathématiquement, on peut l'écrire de la manière suivante :

$$A = \{(\chi, \mu_A(\chi)) / \chi \in U\} \text{ Avec : } \mu_A \rightarrow \chi: [0,1] \text{ (II.1)}$$

III.2. Les variables linguistiques

La logique floue permet la formalisation des imprécisions dues à une connaissance globale d'un système très complexe et l'expression du comportement d'un système par des mots. Ces mots

sont appelés variables linguistiques ou variables floues. Une variable linguistique représente un état dans le système à régler, sa valeur est définie dans des termes linguistiques qui peuvent être des mots ou des phrases d'un langage naturel.

Chaque variable linguistique est caractérisée par un ensemble tel que : $\{\chi, T(\chi), U\}$

Où :

- χ est le nom de la variable.
- $T(\chi)$ est l'ensemble des valeurs linguistiques que peut prendre U .
- U est l'univers de discours associé avec la valeur de base.

III.3. Fonctions d'appartenance

Chaque sous-ensemble flou est défini par sa « fonction d'appartenance ». Ce dernier permet de mettre en évidence les nuances d'appartenance pour les éléments de l'univers de discours [11].

Définition : Soit X un ensemble. Un sous-ensemble flou A de X est défini par une fonction d'appartenance $\mu_A(x)$ sur X à valeurs dans l'intervalle $[0,1]$ [12].

Exemple : Une fonction d'appartenance pour définir le sous-ensemble flou « vitesse moyenne ».

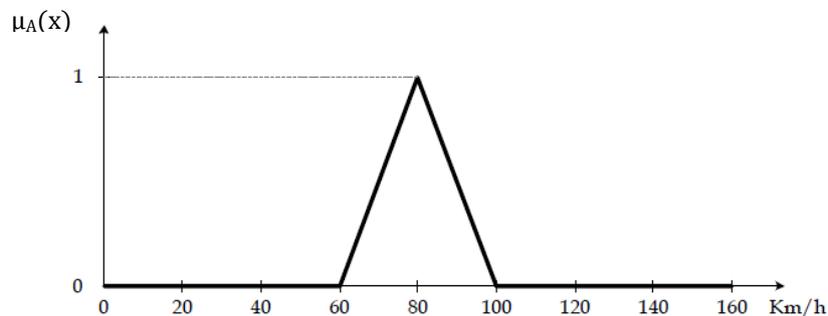


Figure II.1. Fonction d'appartenance type

Il existe plusieurs types de fonction d'appartenance, parmi lesquelles on cite les fonctions les plus utilisées :

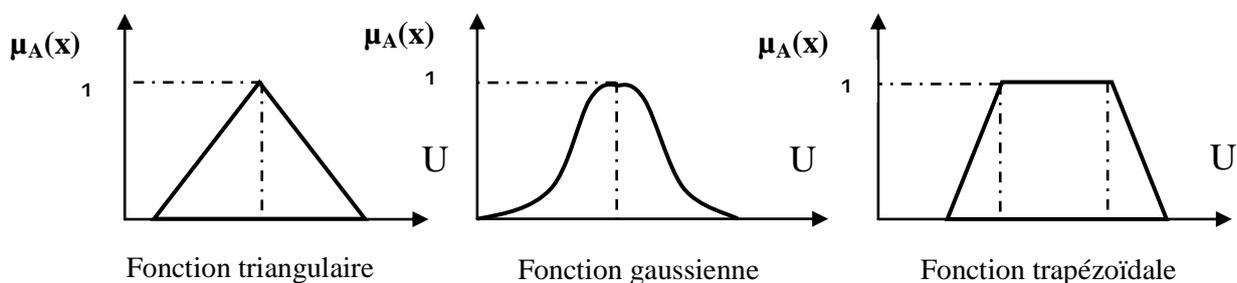


Figure II.2: Les formes de fonction d'appartenance.

III.4. Opérations sur les sous-ensembles

Les variables linguistiques sont liées entre elles au niveau des inférences par des opérateurs **ET** ou **OU**. Il s'agit d'opérateurs de la logique floue qui interviennent sur les fonctions d'appartenance représentant les variables linguistiques. Soit A et B deux ensembles flous définis dans le référentiel U avec les fonctions d'appartenance μ_A et μ_B respectivement.

Les opérateurs les plus importantes sont : **L'intersection**, **l'union** et **le complément** qui sont généralement réalisés respectivement par **MIN** et **MAX**.

Intersection : L'opérateur logique correspondant à l'intersection d'ensembles est appelé « ET ». Le degré de vérité de la proposition « A ET B » représente le minimum des degrés de vérité de A et de B.

$$\mu_{A \cap B}(x) = \min(\mu_A, \mu_B)$$

Union : L'opérateur logique correspondant à l'union d'ensembles est le OU. Le degré de vérité de la proposition « A OU B » est le maximum des degrés de vérité de A et de B.

$$\mu_{A \cup B}(x) = \max(\mu_A, \mu_B)$$

Complément : L'opérateur logique correspondant au complément d'un ensemble est défini par la négation

$$\mu_{\bar{A}} = 1 - \mu_A$$

IV. Structure interne d'un contrôleur flou

Les régulateurs flous utilisent généralement une expertise exprimée sous la forme de règles. La forme générique pour un régulateur à deux entrées et une sortie est la suivante :

Si « χ_1 est A_1 et χ_2 est A_2 » alors « S est B ». Un Régulateur par Logique Floue RLF ne diffère pas d'un contrôleur traditionnel. On trouve à chaque fois un bloc d'entrée (quantification, calculs préalables...), un bloc de traitement et un bloc de sortie (pour la détermination de la commande S) [13]. La figure (II.3) montre la structure interne d'un contrôleur flou.

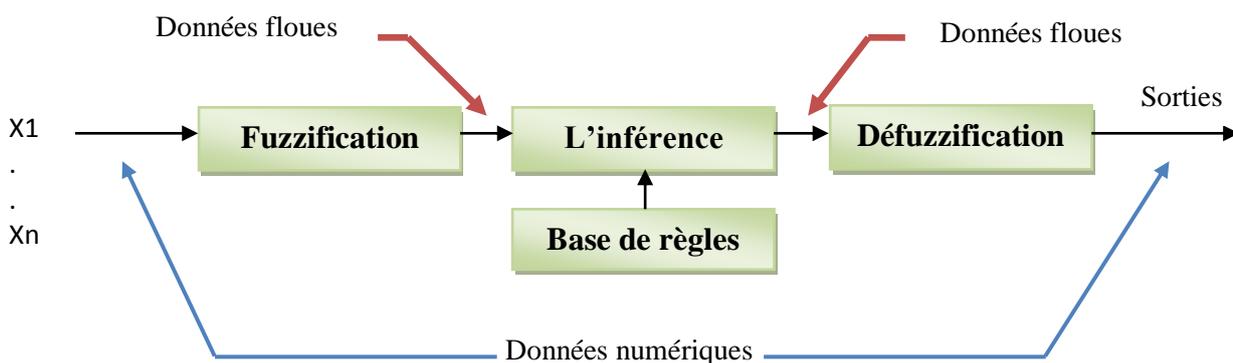


Figure II.3 : Structure interne d'un contrôleur flou

V. Les étapes de conception d'un contrôleur flou

La synthèse d'un contrôleur flou nécessite le passage par trois étapes: une interface de fuzzyfication, le moteur d'inférence et une interface de défuzzyfication.

V.1. Interface de fuzzyfication

Dans les problèmes de la commande quantitative des systèmes, les données issues des capteurs sont de nature physique (réelle), mais dans le cas de la logique floue ces données seront traitées par l'utilisation de la théorie des ensembles flous alors ce traitement présente l'étape ou la procédure de fuzzification. À la base, l'opération de fuzzification présente le passage des grandeurs réelles (physique) aux valeurs floues, c'est une conversion des données des entrées/sorties au temps t en degré d'appartenance par le biais des fonctions d'appartenances [13]. Pour ces dernières, on utilise en générale des formes triangulaires, trapézoïdales, ou gaussienne.

V.2. Interface d'inférence

Dans cette interface, il s'agit de donner des règles floues de type « Si condition 1 Et Si condition 2, alors conséquence » qui permettent de passer d'un degré d'appartenance d'une grandeur d'entrée à un degré d'appartenance d'une commande. Ces règles doivent tenir compte du comportement statique et dynamique du système à régler. Plusieurs règles peuvent être activées en même temps. Il n'est pas possible d'indiquer des règles précises, l'expérience joue un rôle primordial.

Il existe trois méthodes d'inférence :Méthode d'inférence max-min (MAMDANI), Méthode d'inférence max-prod (LARSEN), Méthode d'inférence som-prod (SUGENO). Le nom de la méthode désigne les opérateurs utilisés. Le tableau suivant indique la manière de leur utilisation [13]:

Tableau II.1 : Méthode d'inférence pour un réglage par logique floue

Méthodes	Opérateurs sur Prémises		Opérateur Implication	Opérateur Agrégation
	Ou	Et	Imp	
Max-min	Max	Min	Min	Max
Max-prod	Max	Min	Prod	Max
Som-prod	Som	Prod	Prod	Som

La figure II.4 Montre la méthode d'inférence Max-Min

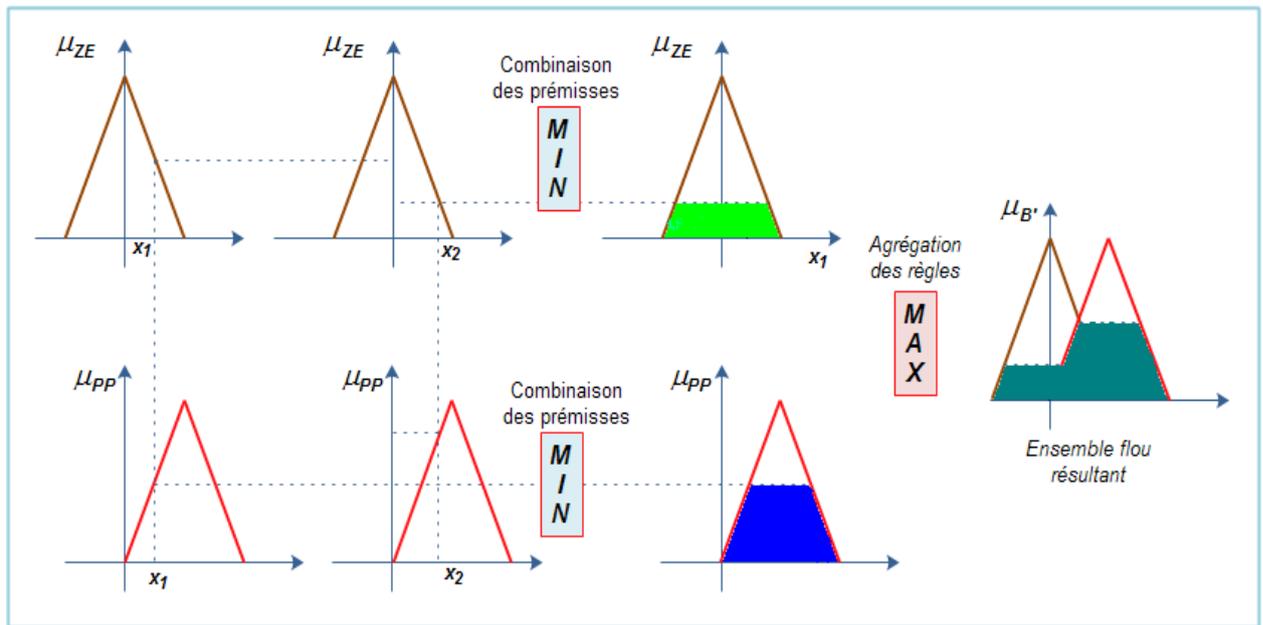


Figure II.4. Illustration de la méthode de Mamdani. Max-Min

V.3 Interface de défuzzification

C'est la dernière étape du contrôle dans le RLF. Elle consiste à transformer la fonction d'appartenance de sortie μ_u en une valeur x_u précise présentée sur la grandeur de sortie. C'est de transformer les valeurs de la commande du domaine flou vers le domaine réel, contrairement à la fuzzification). Pour cela, il existe certaines méthodes pour la déterminer. Le choix d'une méthode de défuzzification est très délicat lors de l'élaboration d'une technique de contrôle par logique floue. En effet, Celui-ci conditionnera l'évolution dynamique de la commande. Ces méthodes sont Méthode du maxima, Méthode de la moyenne des maxima, Méthode du centre de gravité, Méthode de la moyenne pondérée [13].

VI. Les différents types de contrôleurs flous

Dans la littérature, il existe deux types de contrôleurs qui sont fréquemment utilisé, celui de MAMDANI et celui de SUGENO.

VI.1. Contrôleur de type MAMDANI

Les règles floues de ce contrôleur s'expriment selon la forme suivante : «**Si** χ est A_i **Et** Y est B_i **ALORS** S est C_i » tel que la conclusion de chaque règle est symbolique, la commande est floue elle est incertaine.

Ces contrôleurs font explicitement intervenir les interfaces de Fuzzification, d'inférence et de défuzzification.

VI.2. Contrôleur de TAKAGI-SUGENO

L'originalité de cette méthode réside dans le fait que la conclusion de chaque règle n'appartient pas au domaine symbolique mais elle est définie sous forme numérique comme une combinaison linéaire des entrées, ce genre de contrôleur ne comporte pas l'étape de défuzzification. Il est décrit par des règles floues «**Si** χ est A_i **Et** Y est B_i **ALORS** S est C_i »

« **Si** χ est A_i **Et** Y est B_i **ALORS** $S = P_0 + P_1.X + P_2.Y$ » dans ce cas, on parle d'un contrôleur de type Sugeno d'ordre 1.

« **Si** χ est A_i **Et** Y est B_i **ALORS** $S = P_0$ » dans ce cas, on parle d'un contrôleur de type Sugeno d'ordre 0.

La sortie du régulateur est donnée par :

$$S = \frac{\sum_{i=1}^n \mu_i \cdot P_i}{\sum_{i=1}^n \mu_i} \quad (\text{II.2})$$

Notons que la sortie donnée par le régulateur est la variation du signal de commande.

VII. Les types de structure d'un contrôleur flou

Il existe trois types de structure d'un contrôleur flou [14] : Le contrôleur P flou peut être utilisé comme point de départ mais parfois il n'est pas suffisant. Pour améliorer le temps de stabilisation et réduire le dépassement, Le PD flou est le recommandé. S'il y a une erreur statique, un contrôleur Flou incrémentale (FInc) ou PID flou est le mieux adapté. La figure suivante montre les trois contrôleurs.

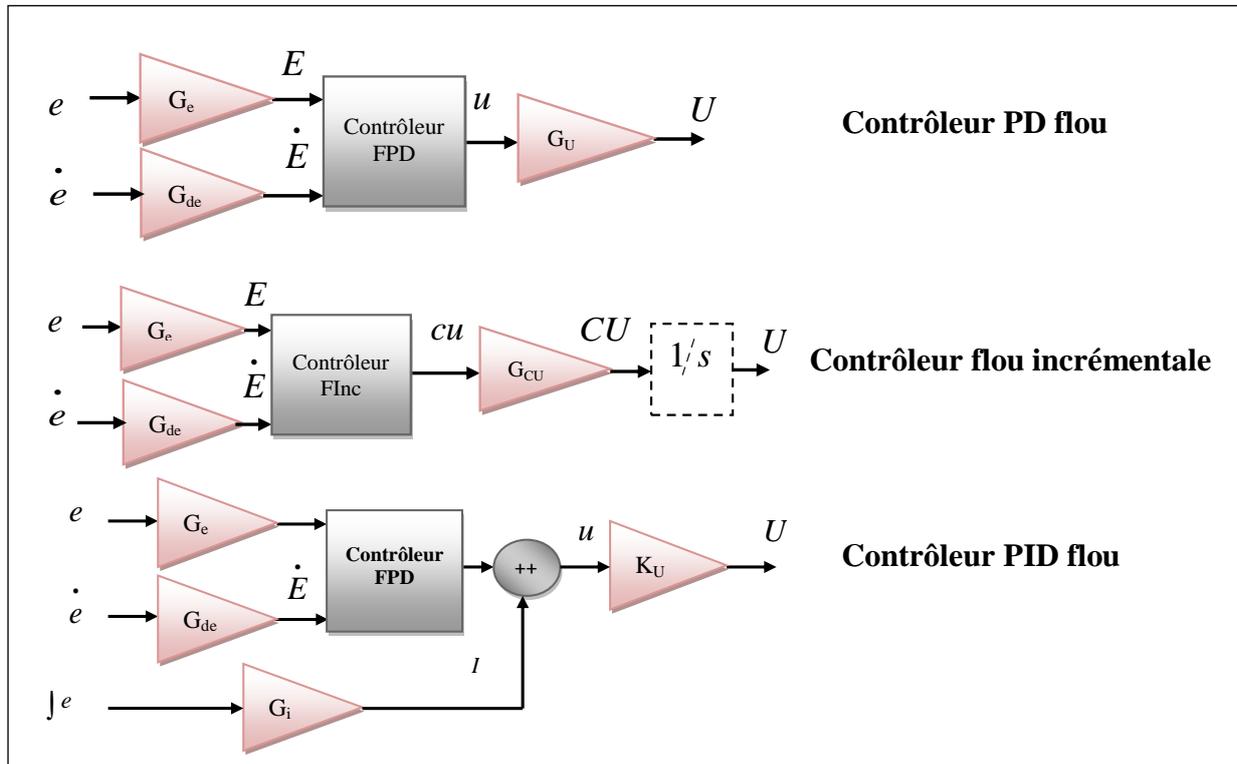


Figure II.5. Les types de structure d'un contrôleur fluo

Dans notre travail nous avons opté à utiliser la structure PD fluo ou les facteurs d'échelle (les gains de normalisation et de dé normalisation) : G_e , G_{de} et G_u font changer les valeurs des entrées et de sorties du contrôleur proportionnellement.

VIII. MPPT du générateur photovoltaïque utilisant la logique floue

Le mécanisme de poursuite du point maximum (MPPT) suit le nouveau point de puissance maximale modifié dans sa courbe correspondante à la variation de température et / ou l'insolation. Il est utilisé pour extraire la puissance maximale du module PV et transférer cette énergie à la charge. Un convertisseur DC / DC (survolteur ou abaisseur) agit comme une interface entre la charge et le module. La MPPT changera le rapport cyclique pour maintenir la puissance transférée à partir du module solaire photovoltaïque à la charge au point maximum.[14].

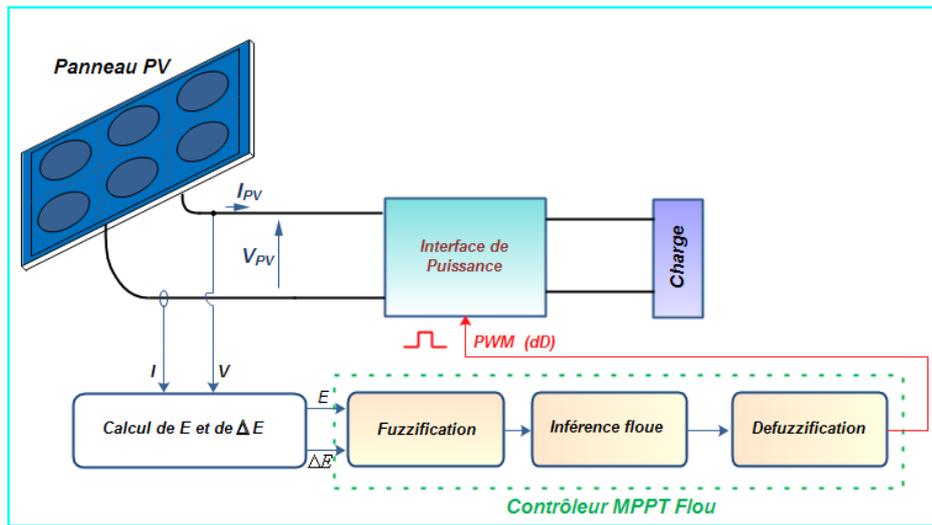


Figure II.6. Système MPPT flou

MPP par logique floue mesure les valeurs de tension et de courant à la sortie du module PV, ensuite il calcule la puissance par la relation ($P=VI$) pour extraire les entrées du contrôleur. La sortie du contrôleur représente le rapport cyclique de la modulation de largeur d'impulsion (MLI) pour commander l'ouverture et la fermeture du convertisseur DC/DC. La figure II.6 présente le schéma bloc d'un système MPPT flou.

MPPT à base de la logique floue

Le contrôleur flou examine la puissance PV à chaque échantillon (sample time k), et détermine la variation de la puissance par rapport à la tension (dp/dv). Si cette valeur est supérieure à zéro, le dispositif de commande modifie le rapport cyclique de la modulation de largeur d'impulsion (MLI) pour augmenter la tension jusqu'à ce que la puissance soit maximale ou la valeur ($dp/dv = 0$), si cette valeur est inférieure à zéro, le contrôleur modifie le rapport cyclique de la MLI pour diminuer la tension jusqu'à ce que la puissance soit maximale, comme indiqué sur la figure II.7

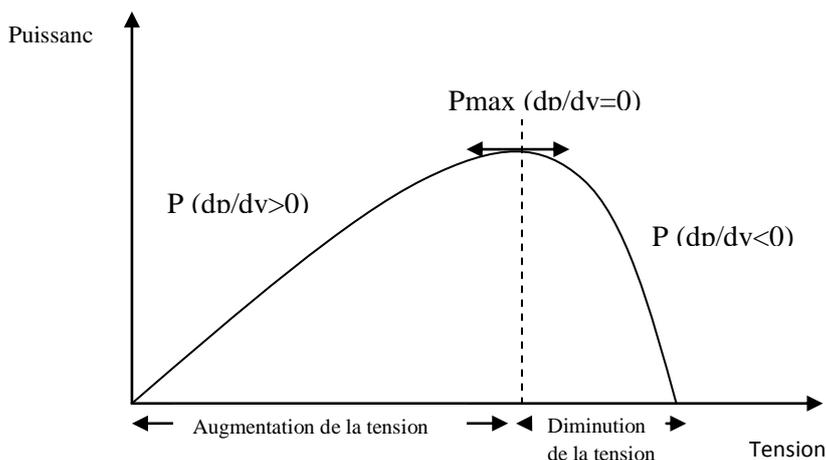


Figure II.7. Caractéristique puissance-tension du module PV

Conception optimisée d'un contrôleur MPPT flou

Notre contrôleur a deux entrées sont: l'erreur et la variation de l'erreur, et une sortie (rapport cyclique) afin de générer la MLI pour la commande de convertisseur DC/DC.

Les deux variables d'entrées **e** (erreur) et **de** (variation d'erreur) à l'échantillon K sont définie par :

$$e(k) = \frac{P(k) - P(k-1)}{V(k) - V(k-1)} \quad (\text{II.3})$$

$$de(k) = e(k) - e(k-1) \quad (\text{II.4})$$

Où **P (k)** est la puissance instantanée du générateur photovoltaïque.

$e(k)$ Indique si le point de fonctionnement à l'instant k est situé à gauche ou à droite du point de puissance maximale sur la courbe caractéristique du PV, tandis que $de(k)$ exprime la direction de déplacement de ce point voir figure II.7.

Le contrôleur flou contient trois éléments de base: Fuzzification, règles de base, et Défuzzification.

a) Fuzzification

Les variables d'entrées et de sortie seront présentées par les valeurs linguistiques regroupées dans la table qui suit:

<i>Erreur</i>	<i>variation d'erreur</i>	<i>Commande (rapport cyclique)</i>
<i>NB : négative grande</i>	<i>Nb : négative grande</i>	<i>NBS : négative grande</i>
<i>NM: négative moyenne</i>	<i>Nm: négative moyenne</i>	<i>NMS: négative moyenne</i>
<i>NS: négative petite</i>	<i>Ns: négative petite</i>	<i>NSS: négative petite</i>
<i>ZE : nulle</i>	<i>Ze : nulle</i>	<i>ZES : nulle</i>
<i>PS: positive petite</i>	<i>Ps: positive petite</i>	<i>PSS: positive petite</i>
<i>PM : positive moyenne</i>	<i>Pm : positive moyenne</i>	<i>PMS : positive moyenne</i>
<i>PB: positive grande</i>	<i>Pb: positive grande</i>	<i>PBS: positive grande</i>

Tableau II.2: la représentation des variables linguistiques

Chacune de ces valeurs est un sous ensemble flou défini par une fonction d'appartenance de type triangulaire et trapézoïdal pour les variables d'entrées et de sortie, comme le montre les figures (8, 9, 10).

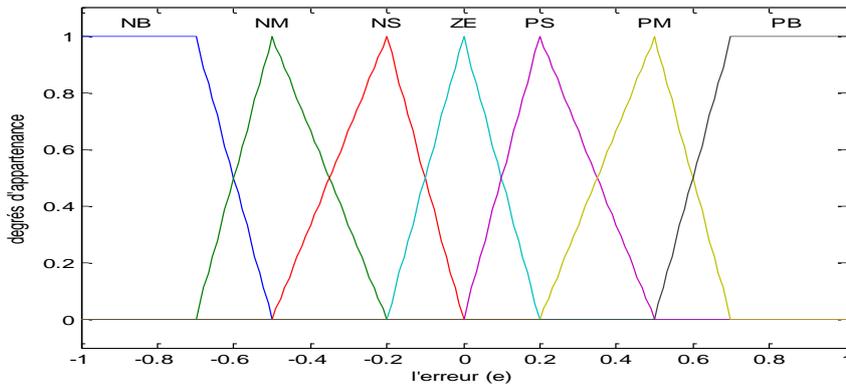


Figure II.8. Fonctions d'appartenance de la première variable d'entrée (erreur)

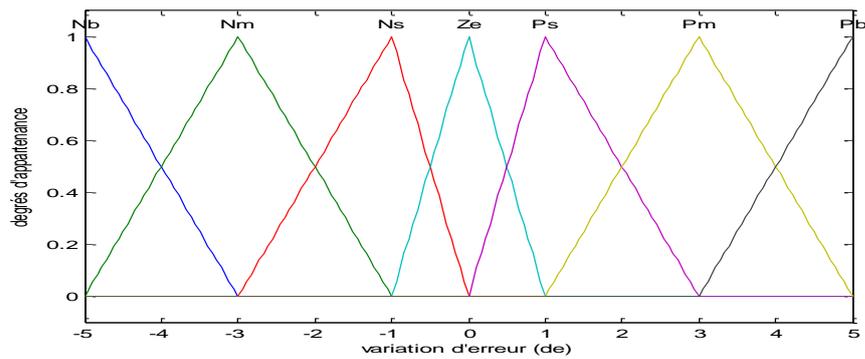


Figure II.9. Fonctions d'appartenance de la deuxième variable d'entrée (variation de l'erreur)

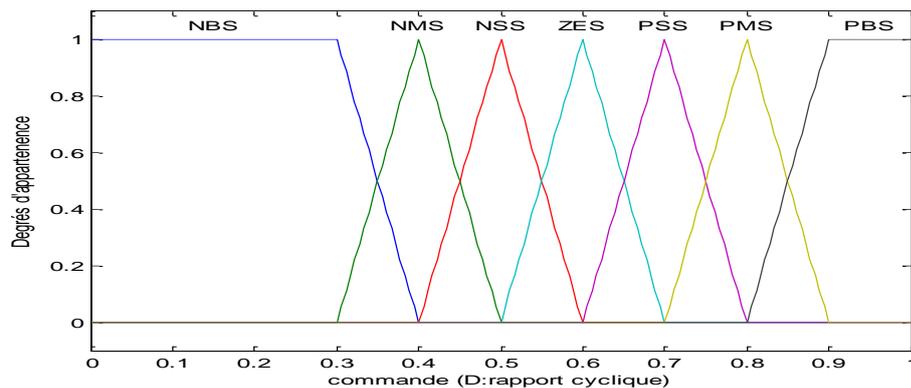


Figure II.10. Fonctions d'appartenance de la variable de sortie (D : rapport cyclique)

b) Mécanisme d'inférence :

L'inférence est une étape qui consiste à définir un rapport logique entre les entrées et la sortie. En effet, des règles d'appartenance vont être définies pour la sortie comme ça était fait pour les entrées, grâce à ces règles un tableau d'inférence en utilisant la méthode de Mamdani, peut être dressé (Tableau II.3) [15].

Il est évident qu'une bonne connaissance du système est requise pour le développement d'un tel régulateur. En effet, en règle générale, une valeur d'entrée est définie par deux fonctions floues

Conception optimisée d'un contrôleur MPPT flou

avec des degrés différents, ainsi la sortie sera elle aussi définie par plusieurs fonctions, la question étant de savoir avec quels degrés d'appartenance. Plusieurs méthodes peuvent répondre à cette question. De notre part, nous avons utilisé la méthode MAX-MIN.

		Erreur						
		NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
Variation d'erreur	Nb	PBS	PBS	PBS	NMS	NBS	NBS	NBS
	Nm	PBS	PMS	PMS	NSS	NMS	NMS	NBS
	Ns	PBS	PMS	PSS	NSS	NSS	NMS	NBS
	Ze	PMS	PSS	PSS	ZES	NSS	NSS	NMS
	Ps	PBS	PMS	PSS	PSS	NSS	NMS	NBS
	Pm	PBS	PMS	PMS	PSS	NMS	NMS	NBS
	Pb	PBS	PBS	PBS	PMS	NBS	NBS	NBS

Tableau II.3: Table de décision

Donc nous avons :

R1 Si $e(k)$ est NB et $de(k)$ est Nb alors $D(k)$ est PBS ou

R2 Si $e(k)$ est NB et $de(k)$ est Nm alors $D(k)$ est PBS ou

R3

R4 Si $e(k)$ est NB et $de(k)$ est Ze alors $D(k)$ est PMS ou

⋮

R49 Si $e(k)$ est PB et $de(k)$ est Pb alors $D(k)$ est NBS ou

Pour la méthode d'agrégation Max-min, Ceci est équivalent à

*R1 = ($e(k)$ est NB **min** $de(k)$ est Nb)*

*R2 = ($e(k)$ est NB **min** $de(k)$ est Nm)*

R3 =

*R4 = ($e(k)$ est NB **min** $de(k)$ est Ze)*

⋮

*R4 = ($e(k)$ est PB **min** $de(k)$ est Pb)*

L'opérateur **ou** appliqué sur les règles qui donnent les mêmes variables floues donne

$$\mu_{D(PBS)} = \text{Max}(R1, R2, R3, R5, R6, R7, R8, R14, R15, R21)$$

$$\mu_{D(PMS)} = \text{Max}(R4, R9, R10, R12, R13, R16, R20, R28)$$

$$\mu_{D(PSS)} = \text{Max}(R11, R17, R18, R19, R26, R27)$$

$$\mu_{D(ZES)} = R25$$

$$\mu_{D(NBS)} = \text{Max}(R29, R35, R36, R42, R43, R44, R45, R47, R48, R49)$$

$$\mu_{D(NMS)} = \text{Max}(R22, R30, R33, R34, R37, R38, R40, R41, R46)$$

$$\mu_{D(NSS)} = \text{Max}(R23, R24, R31, R32, R33, R39)$$

Enfin, il nous faut réaliser l'opération inverse de la fuzzification, ici nous devons calculer une valeur numérique compréhensible par l'environnement extérieur à partir d'une définition floue est c'est le but de la défuzzification.

c) Méthode de défuzzification

Nous avons utilisé dans cette partie la méthode de la moyenne pondérée. La sortie du régulateur est donnée par l'équation (II.5):

$$D = \frac{(PBS)\mu(PBS) + (PMS)\mu(PMS) + (ZES)\mu(ZES) + (NBS)\mu(NBS) + (NMS)\mu(NMS) + (NSS)\mu(NSS)}{\mu(PBS) + \mu(PMS) + \mu(ZES) + \mu(NBS) + \mu(NMS) + \mu(NSS)}$$

Où PBS, PMS, PSS, ZES, NBS, NMS, NSS sont les valeurs de la variable de sortie

$$PBS=0.9$$

$$NBS=0.3$$

$$PMS=0.8$$

$$NMS=0.4$$

$$PSS=0.7$$

$$NSS=0.5$$

$$ZES=0.6$$

La sortie D (rapport cyclique) du contrôleur MPPT flou, c.-à-d. la valeur réelle est utilisée à son tour pour commander un simple générateur "PWM". Le signal issu de cette sortie sera utilisé pour piloter la fermeture et l'ouverture d'un transistor MOSFET utilisé en tant que « switch » électronique dans un convertisseur DC/DC approprié voir figure II.6.

IX. Convertisseurs continu-continu DC/DC

Les hacheurs sont des convertisseurs statiques continu-continu permettant de générer une source de tension continue variable à partir d'une source de tension continue fixe. Le hacheur se compose de condensateurs, d'inductances et de commutateurs. Tous ces dispositifs dans le cas idéal

Conception optimisée d'un contrôleur MPPT flou

neconsomment pas de puissance, c'est la raison pour laquelle les hacheurs ont de bons rendements. On peut distinguer trois sous-types: Convertisseur DC-DC abaisseur de tension (Buck), convertisseur DC-DC élévateur de tension (boost), et aussi convertisseur DC-DC à la fois abaisseur et élévateur de tension (buck-boost). Dans cette section on va s'intéresser à la modélisation mathématique d'un convertisseur survolteur (DC/DC).

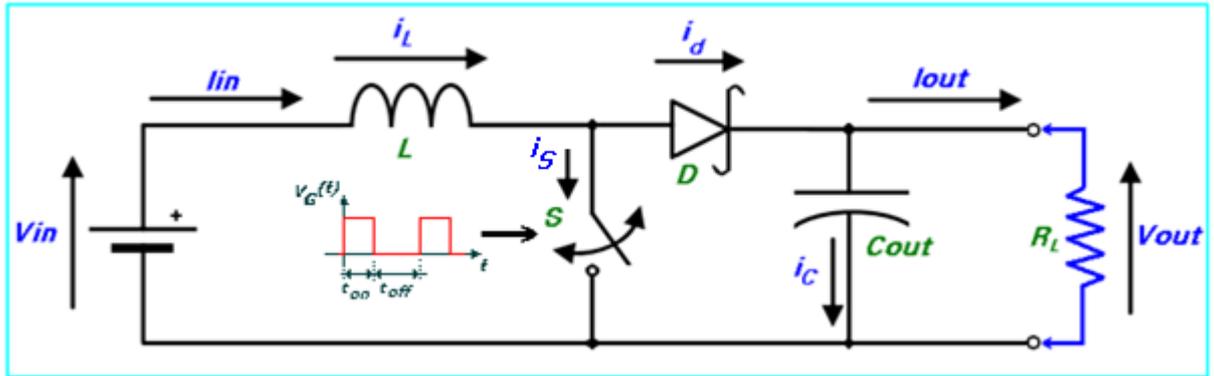


Figure II.11. Circuit électrique idéalisé du convertisseur DC-DC "boost".

Ici, le commutateur S , qui est souvent un transistor MOSFET, est commandé via un signal MLI qui est un train d'impulsion à fréquence fixe et à largeur d'impulsion variable. Cependant, la largeur des impulsions (rapport cyclique) change d'une impulsion à une autre en fonction du signal de modulation voir figure (II.12).

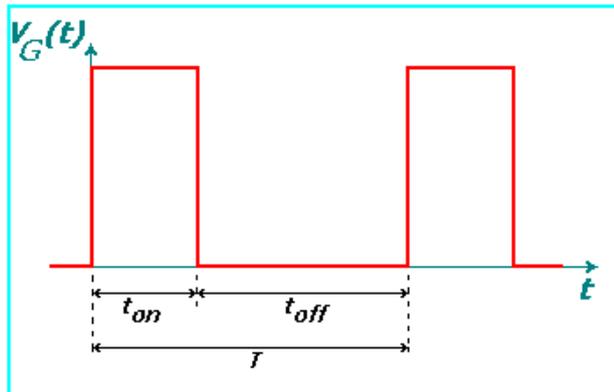


Figure II.12. Forme du signal de commande du commutateur S .

$$f_S = \frac{1}{T} \text{ est la fréquence de commutation}$$

T : étant la période du signal de commande.

D : rapport cyclique

$$t_{on} = D * T \quad t_{off} = T - t_{on}$$

En appliquant la loi de kirchhoff sur le circuit précédent on distingue deux cas selon l'état de commutateur durant la période T du signale de commande soit commutateur fermé ou ouvert voir figure ci-dessous.

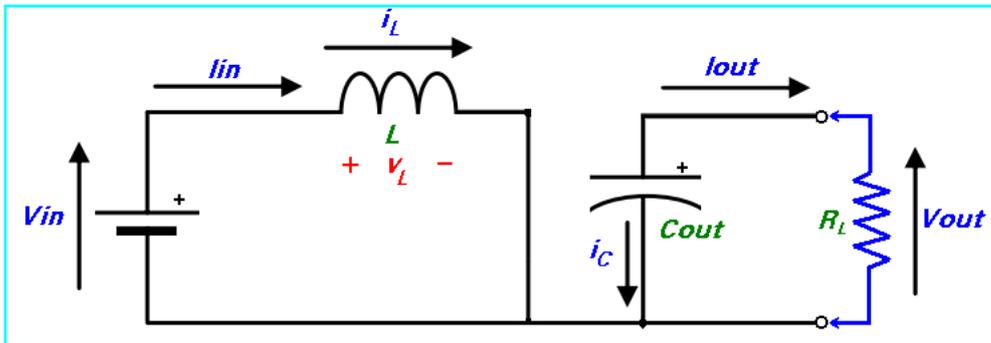


Figure II.13. Interrupteur (Switch) fermé pendant un intervalle de temps DT.

- pour $0 \leq t \leq DT$ ou $(0 \leq t \leq t_{on})$: phase d'accumulation d'énergie

L'interrupteur "S" est fermé (état passant), cela entraîne l'augmentation du courant dans l'inductance donc le stockage d'une quantité d'énergie sous forme d'énergie magnétique. La diode D est alors bloquée et la charge est alors déconnectée de la source, dans ce cas I_L augmente à un taux de:

$$\frac{dI_L}{dt} = \frac{V_L}{L} = \frac{V_{in}}{L} \text{ (II.6)}$$

En intégrant les deux partie de l'égalité, on trouve que :

$$I_{L1}(t) = \frac{V_{in}}{L} t + I_{Lmin} \text{ (II.7)}$$

On voit bien que $I_L(t)$ a une pente positive, ce qui prouve que durant cette phase l'inducteur se charge.

À la fin de l'état passant le courant I_L , a augmenté de :

$$\Delta I_{Lon} = \int_0^{DT} dI_L = \int_0^{DT} \frac{V_{in} dt}{L} = \frac{V_{in} \cdot D \cdot T}{L} \text{ (II.8)}$$

- Comme définit en haut, D étant le rapport cyclique. Il représente la durée de la période T pendant laquelle l'interrupteur "S" conduit. Il est compris entre 0 ("S" ne conduit jamais) et 1 ("S" conduit tout le temps). pour $DT \leq t \leq (1 - D)T$ ou $(t_{on} \leq t \leq t_{off})$: phase de roue libre.

Conception optimisée d'un contrôleur MPPT flou

L'interrupteur "S" est ouvert, l'inductance se trouve alors en série avec la source d'énergie. Sa *f.é.m.* s'additionne à celle du générateur (effet survolteur). Le courant traversant l'inductance traverse ensuite la diode D, le condensateur C et la charge R. Il en résulte un transfert de l'énergie accumulée dans l'inductance vers la capacité, qui va fixer la tension de sortie. Le circuit électrique équivalent dans ce cas est donné par la Figure (II.14).

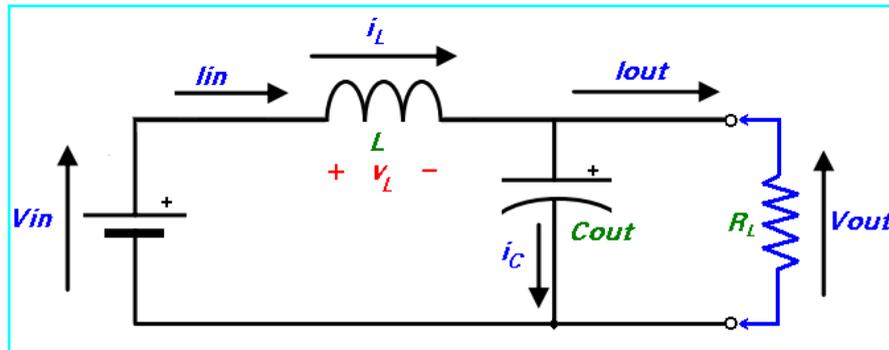


Figure II.14. Switch ouvert pendant un intervalle de temps $(1 - D)T$.

Dans ce cas, I_L diminue avec un taux de :

$$\frac{dI_L}{dt} = \frac{V_L}{L} = \frac{V_{in} - V_{out}}{L} \quad (\text{II.9})$$

En intégrant les deux parties de l'égalité, on trouve que :

$$I_{L2}(t) = \frac{(V_{in} - V_{out})}{L} t + I_{LMAX} \quad (\text{II.10})$$

Dans le cas d'un convertisseur DC/DC "boost" l'inégalité $V_{out} \geq V_{in}$ est toujours vérifiée. Donc, dans ce cas $I_L(t)$ a une pente négative, ce qui prouve que durant cette phase la self se décharge.

La variation de I_L durant cet état bloqué est :

$$\Delta I_{Loff} = \int_{DT}^{(1-D)T} dI_L = \int_{DT}^{(1-D)T} \frac{(V_{in} - V_{out})}{L} dt = \frac{(V_{in} - V_{out})(1-D)T}{L} \quad (\text{II.11})$$

On remarque que durant les deux phases de conduction (selon que le commutateur "S" est fermé ou ouvert) I_L oscille (augmente puis diminue) dans une bande de largeur ΔI_L autour d'une valeur moyenne $I_{Lmoy} = I_{in}$ voir figure ci-dessous

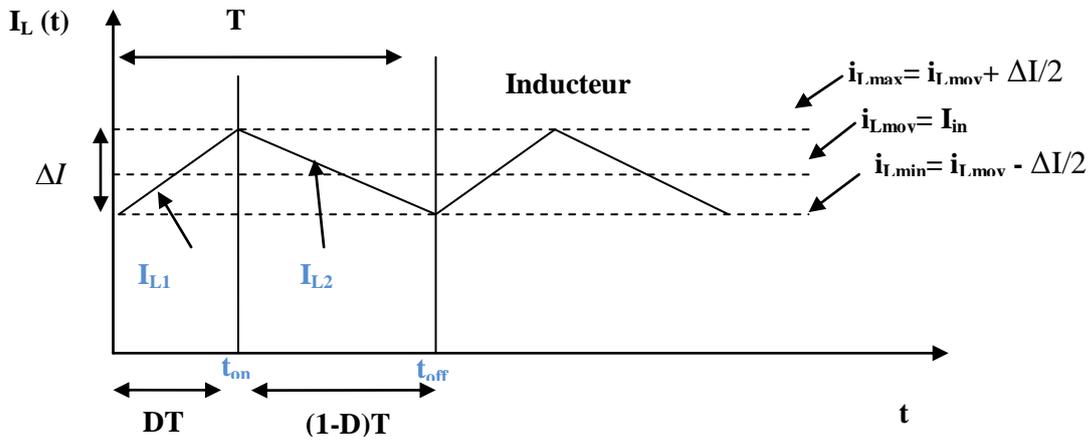


Figure II.15. Variation du courant de l'inducteur I_L en fonction du temps.

A travers la courbe d'évolution de $I_L(t)$, on voit bien que pour garantir un fonctionnement en mode de conduction continu, i.e. un courant d'inducteur non nul, il faut toujours respecter la condition suivante :

$$i_{Lmin} \geq 0 \quad (II.12)$$

Ce qui est équivalent à :

$$I_{in} \geq \frac{\Delta I_L}{2} \quad (II.13)$$

b) Fonction de transfert (Gain) du convertisseur DC/DC :

En considérant que le régime permanent est atteint, l'énergie stockée dans l'inductance est donnée par :

$$E = \frac{1}{2} \cdot L \cdot I_L^2 \quad (II.14)$$

En conséquence, le courant traversant l'inductance est le même au début et à la fin de chaque cycle de commutation. Il advient donc :

$$\Delta I_{Lon} + \Delta I_{Loff} = 0 \quad (II.15)$$

Soit :

$$\Delta I_{Lon} + \Delta I_{Loff} = \frac{V_{in} \cdot D \cdot T}{L} + \frac{(V_{in} - V_{out})(1-D)T}{L} = 0. \quad (II.16)$$

Après simplifications, nous pouvons réécrire cette équation de la façon suivante :

$$V_{out} = \frac{V_{in}}{(1-D)} \quad (\text{II.17})$$

Ce qui donne la valeur moyenne de la tension de sortie V_{out} .

Le circuit est supposé être sans pertes électriques (idéalisé avec un rendement de 100 %), ce qui nous permet d'écrire :

$$P_{in} = P_{out} \quad (\eta = 100\%, \eta = \frac{P_{out}}{P_{in}}) \quad (\text{II.18})$$

D'ou

$$V_{in} \cdot I_{Lmoy} = I_{out} \cdot V_{out}$$

$$\text{Nous aurons également : } I_{out} = (1 - d) \cdot I_{in} \quad (\text{II.19})$$

Dans le cas où: le rendement énergétique de l'étage est : $\eta \neq 1$, chose qui est trop proche de la réalité pratique. Nous pourrions également écrire:

$$V_{out} = \eta \cdot \frac{V_{in}}{(1-D)} \quad (\text{II.20})$$

$$\text{et } I_{out} = \eta \cdot (1 - D) \cdot I_{in} \quad (4. 21)$$

Grâce à cette dernière expression, on peut voir que la tension de sortie est toujours supérieure à celle d'entrée (le rapport cyclique variant entre 0 et 1), qu'elle augmente avec D , et que théoriquement elle peut être infinie lorsque D se rapproche de 1.

Les figures ci-dessous représentent l'allure des principaux signaux dans le convertisseur en mode de fonctionnement CCM.

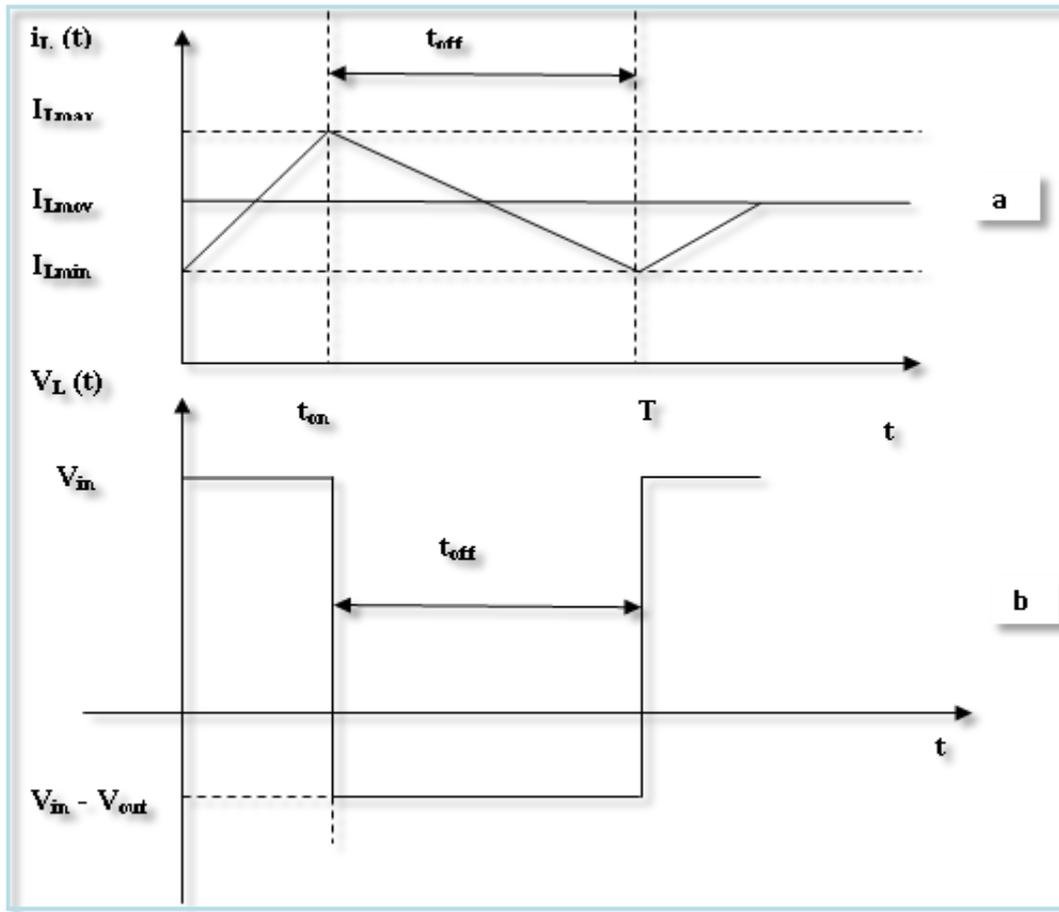


Figure II.16. Allures de la tension aux bornes de la bobine et le courant qui la traverse pendant une période de conduction T .

Courant circulant dans les éléments semi-conducteurs:

c) Courant dans la Diode (D) :

- Pour $0 \leq t \leq DT$ ou $(0 \leq t \leq t_{on})$: phase d'accumulation d'énergie

Dans cette phase, le switch "S" est fermé et conformément au schéma électrique de la Figure (II.13), la diode est polarisée en sens inverse: le courant moyen la traversant est nul.

$$I_D(t) = 0 \quad (II.22)$$

- Pour $DT \leq t \leq (1 - D)T$ ou $(t_{on} \leq t \leq t_{off})$: phase de roue libre.

Conformément au schéma électrique de la Figure (II.14) et selon la loi des mailles, nous avons :

$$I_D(t) = I_{L2}(t) = \frac{(V_{in} - V_{out})}{L} t + I_{LMAX} \quad (II.23)$$

d) Courant dans le switch "S" :

- Pour $0 \leq t \leq DT$ ou $(0 \leq t \leq t_{on})$: phase d'accumulation d'énergie

En suivant le même raisonnement que le précédent, et si on admet La résistance de commutation R_{DS_on} est nulle, nous avons:

$$I_S(t) = I_{L1}(t) = \frac{V_{in}}{L} t + I_{Lmin} \quad (II.24)$$

- Pour $DT \leq t \leq (1 - D)T$ ou $(t_{on} \leq t \leq t_{off})$: phase de roue libre.

Le switch "S" est ouvert et si on maintient la supposition: La résistance de commutation R_{DS_off} est infinie, donc :

$$I_S(t) = 0 \quad (II.25)$$

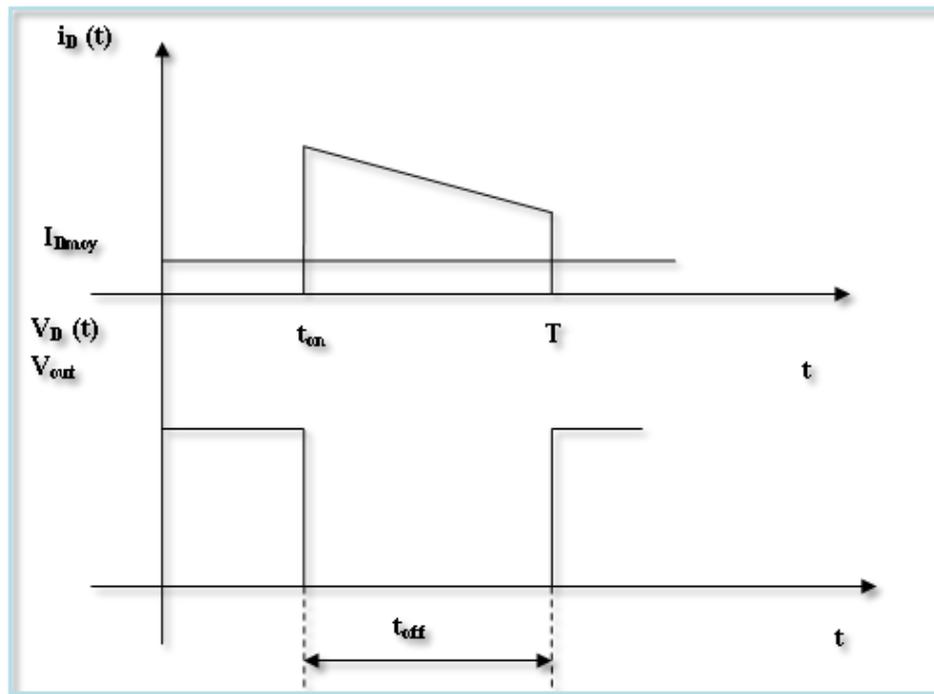


Figure II. 17. Allures de la tension aux bornes de la diode et le courant qui la traverse pendant une période de conduction T .

e) Courant dans le condensateur de sortie C_{out} :

Pour $0 \leq t \leq DT$ ou $(0 \leq t \leq t_{on})$: phase d'accumulation d'énergie

Se référant au schéma de la Figure (II.10II.11), on voit bien que la diode est non conductrice, le condensateur mis en parallèle avec la charge RL alimente celle-ci, en se déchargeant, avec un courant constant I_{out} et dont l'expression est donnée par:

$$I_{out}(t) = (V_{out}/R_L) = cste \text{ donc:}$$

$$I_{Cout}(t) = I_{out}(t) = V_{out}/R_L = cste \text{ (II.26)}$$

• Pour $DT \leq t \leq (1 - D)T$ ou $(t_{on} \leq t \leq t_{off})$: phase de roue libre.

Le condensateur est connecté à la source, via la bobine L, selon la loi des nœuds, nous avons:

$$I_{Cout}(t) = I_{L2}(t) - I_{out} \text{ ou:}$$

$$I_{Cout}(t) = \frac{(V_{in} - V_{out})}{L} t + I_{LMAX} - V_{out}/R_L \text{ (II.27)}$$

L'allure du courant circulant dans le condensateur C_{out} est illustrée dans la Figure (II.18.c).

On note également par ici que seule la composante variable de $I_L(t)$ passe à travers C_{out} , l'autre composante, i.e. la composante continue sera directement transférée à la charge. Et selon le principe d'équilibre de la charge d'un condensateur au cours d'une période de commutation, le courant moyen circulant dans le condensateur est nul.

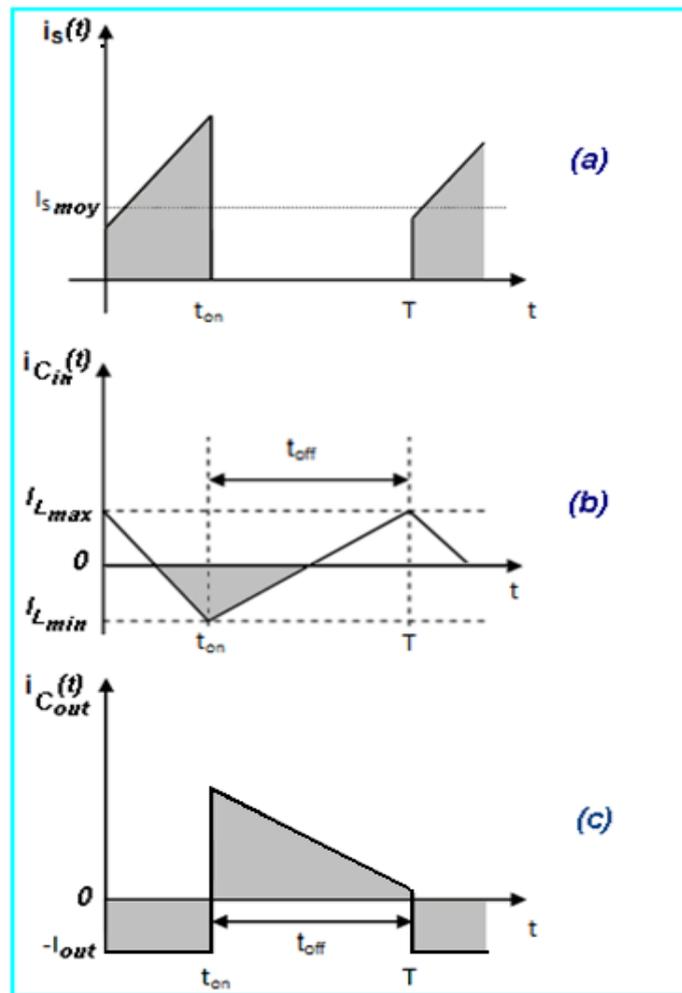


Figure II.18. Allures des tensions d'entrée et au bornes de la bobine pendant une période de conduction T .

X. Conclusion

Dans une première partie, nous avons synthétisé un MPPT flou en rappelant les éléments de base relatifs à la théorie de lalogique floue, les définitions de base sur les variables linguistiques, les sous-ensembles flous, ainsi les différentes étapes de conception d'un contrôleur flou.

Alors que dans une deuxième partie on s'est rendu compte qu'on doit impérativement réaliser une adaptation d'impédance entre le *GPV* et sa charge lorsque le panneau *PV* est à sa puissance maximale pour une irradiation solaire et température données. Cette puissance maximale est alors quasiment transférée à la charge en ajustant le rapport cyclique D du signal de commande de l'interface d'énergie (DC/DC boost).

Le chapitre suivant fera l'objet d'une simulation sous matlab du système photovoltaïque afin de démontrer les performances du contrôleur synthétisé.

I. Introduction

La puissance maximale qui correspond au point de fonctionnement optimal est déterminée pour différentes insolation des rayons solaires, ainsi que pour différentes variations de température. Nous avons utilisé le convertisseur de type DC/DC dans la partie contrôle du système photovoltaïque car il est faciles à contrôler, par leurs rapports cyclique en utilisant un signal MLI. Dans ce projet, nous allons utiliser le hacheur Boost comme interface de puissance à contrôler par le régulateur MPPT, afin d'adapter la tension de sortie du hacheur à la tension requise par la charge. A partir de cette règle et selon le type de contrôleur, on peut raisonner sur plusieurs et différentes méthodes, afin d'extraire le maximum de puissance d'un panneau solaire. Certains des concepts sont très robustes et simples, tandis que d'autres approches exigent des dispositifs de logique très sophistiqués tels que des microprocesseurs combinés avec des circuits de puissance, de convertisseurs de commutation.

Plus d'une trentaine de méthode de poursuite du MPP ont été proposées, mais la plus en vue est le fameux algorithme P&O (perturbe and Observe) qui prédomine, cela nous ramène à comparer les résultats obtenus par cette approche à celles du MPPT flou synthétisée dans le chapitre précédent afin de démontrer ces performances. Les deux systèmes sont simulés avec l'outil de simulation MATLAB/Simulions inclus dans le logiciel de Math works Matlab sous les conditions environnementales stables et de nombreux changements des conditions atmosphériques : (changement de l'ensoleillement et de température).

II. Simulation du système sous MATLAB-SIMULINK

On établit avec Simulink les sous ensembles physiques tels que le module solaire, le hacheur et le contrôleur MPPT en tant qu'unités indépendantes pour vérifier leur fonctionnalité appropriée. Enfin ces sous ensembles peuvent être combinés pour former un système photovoltaïque complet avec control MPPT comme représente les figures (III.1, III.2)

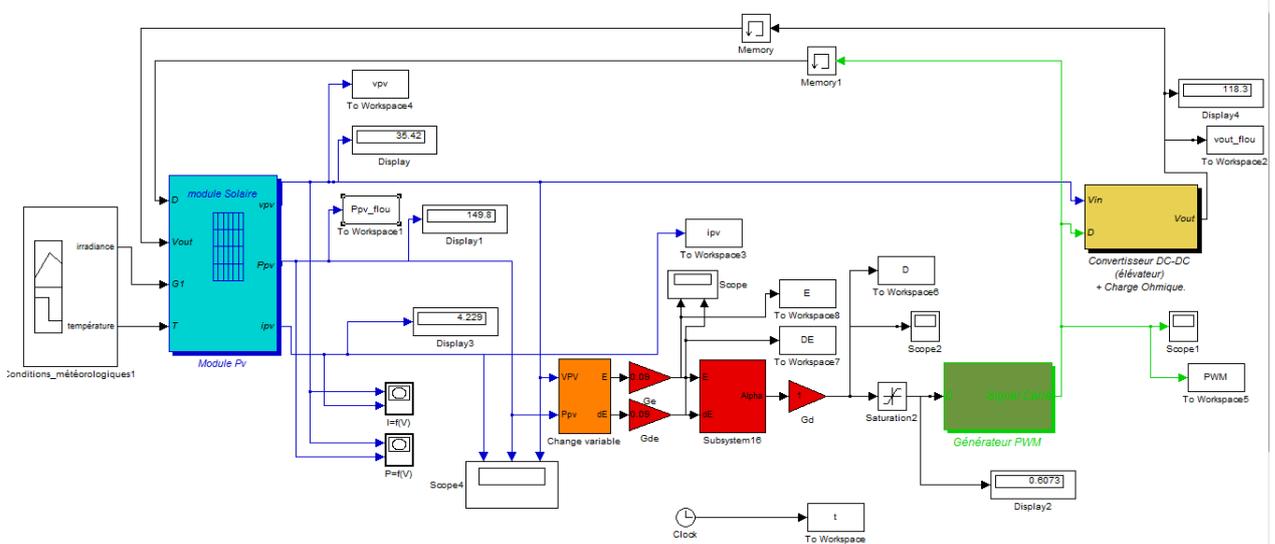


Figure III.1 Schéma fonctionnel sous Simulink du système photovoltaïque avec MPPT fluo

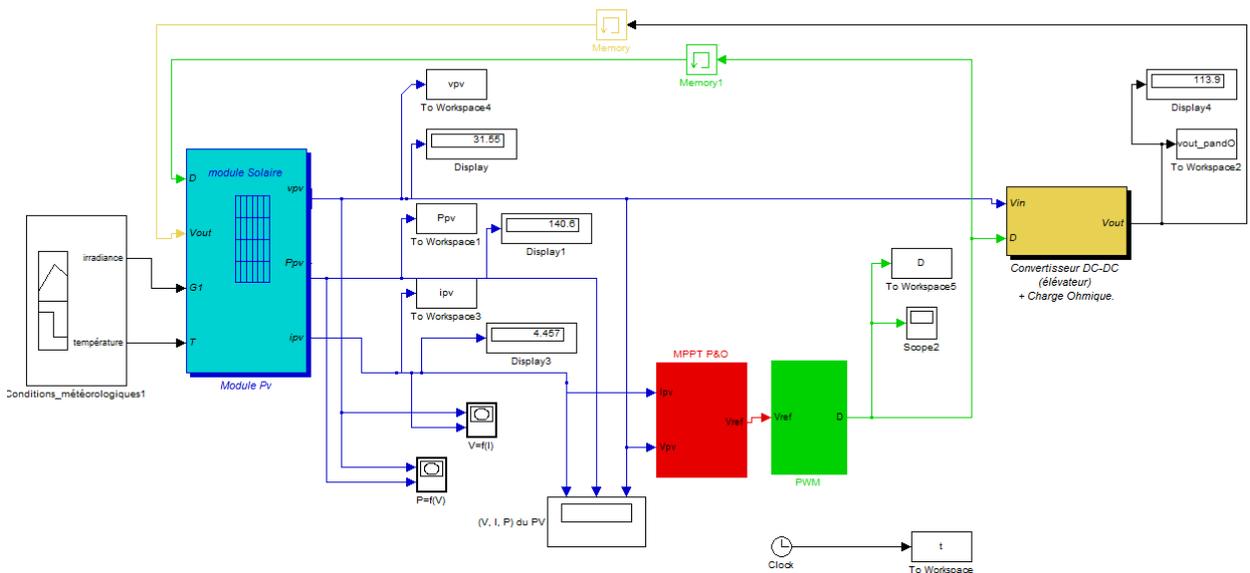


Figure III.2 Schéma fonctionnel sous Simulink du système photovoltaïque avec MPPT P&O

a) Modélisation du PV pour la simulation

Le panneau solaire est simulé sous MATLAB / SIMULINK par le schéma de la (Figure III.3). Son modèle est basé sur les équations caractéristiques dérivées dans le chapitre 1.

Le module solaire est représenté par un sous système à deux entrées ; la température « T » des cellules et l'insolation « G », ces dernier sont accessibles en tant que variables externes et peuvent être changées à n'importe quel moment pendant le processus de simulation. Ceci permet d'observer et d'évaluer le comportement du système aux changements soudains des conditions atmosphériques.

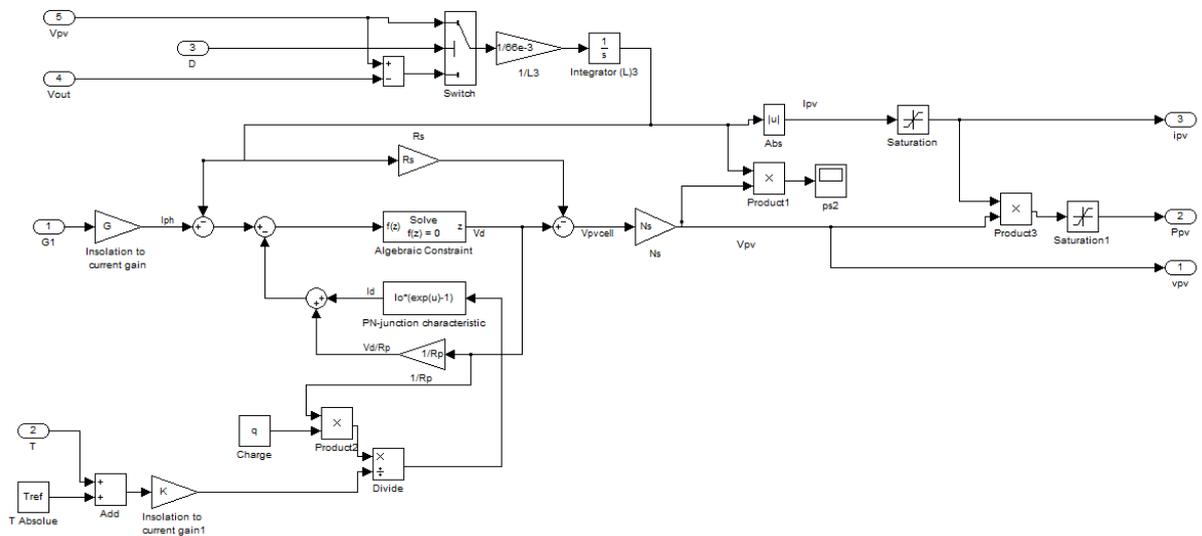


Figure III.3 Le modèle Simulink du module photovoltaïque.

b) Modélisation de convertisseur DC/DC boost

Le convertisseur DC/DC boost est simulé sous MATLAB / SIMULINK par le schéma de la figure III.4 Son modèle mathématique a été donné au chapitre 2.

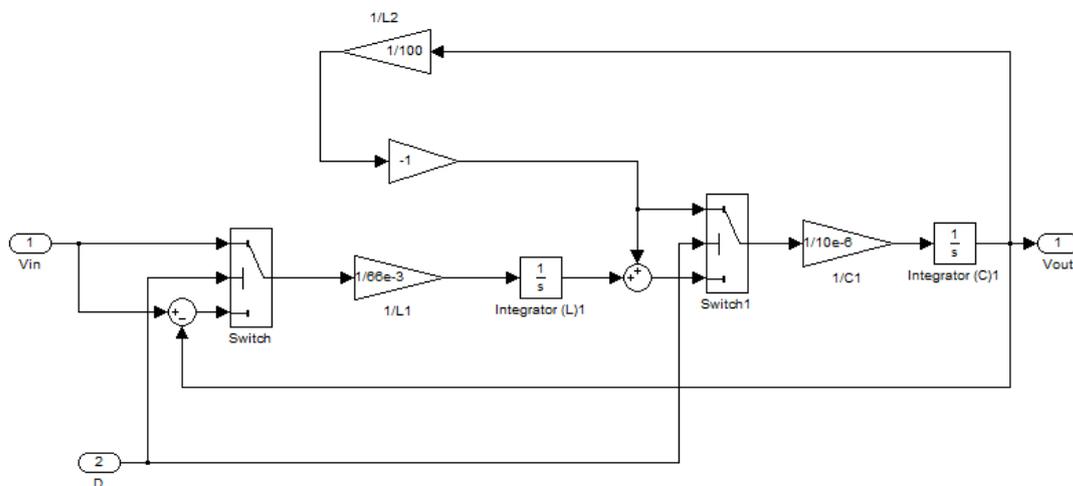


Figure III.4. Le modèle Simulink du convertisseur survolteur (boost)

c) Contrôleur MPPT

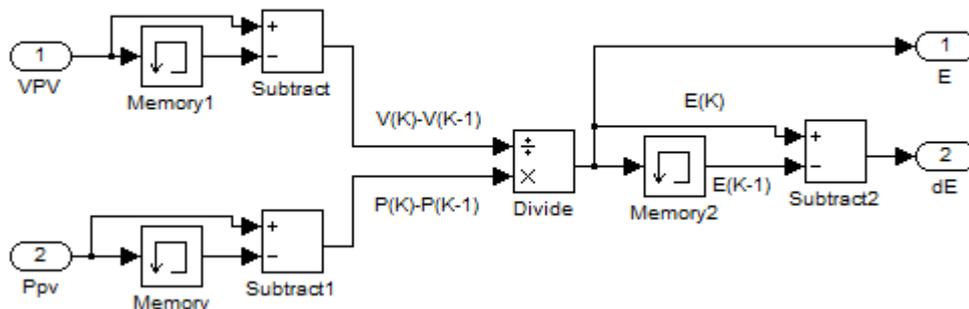
Les techniques MPPT; la méthode p&o et la méthode basée sur la logique floue qui sont déjà présentées dans le chapitre (1 et 2) sont qualifiés par la rapidité la manière de réagir et leur capacité de synthétiser la variable de commande d (rapport cyclique), à partir de certaines variables d'états, (S : ensoleillement, T : température) qui ont un effet direct sur la dynamique du MPP. En conséquence la techniques de perturbation & observation et la technique flou sont modélisées sous (Matlab-Simulink) à partir des blocs mathématiques basiques présent dans la bibliothèque de Simulink, les montages sont illustrés dans les figures ci-dessous.

c-1) MPPT à base de la logique floue

A la sortie du générateur photovoltaïque on obtient la puissance et la tension or les entrées du contrôleur sont l'erreur et la variation de l'erreur, alors il nous faut un bloc intermédiaire pour changer les variables à travers les deux équations suivantes :

$$e(k) = \frac{P(k) - P(k-1)}{V(k) - V(k-1)}$$

$$de(k) = e(k) - e(k-1)$$



La figure III.5. Montre le schéma fonctionnel sous Simulink du contrôleur MPPT.

Après un réglage adéquat, les paramètres optimaux de la simulation du contrôleur flou sont donnés par le tableau III.1

Tableau III.1 : Paramètres de simulation en mode régulation

Gains	G_e	G_{de}	G_D
	0.09	0.09	1

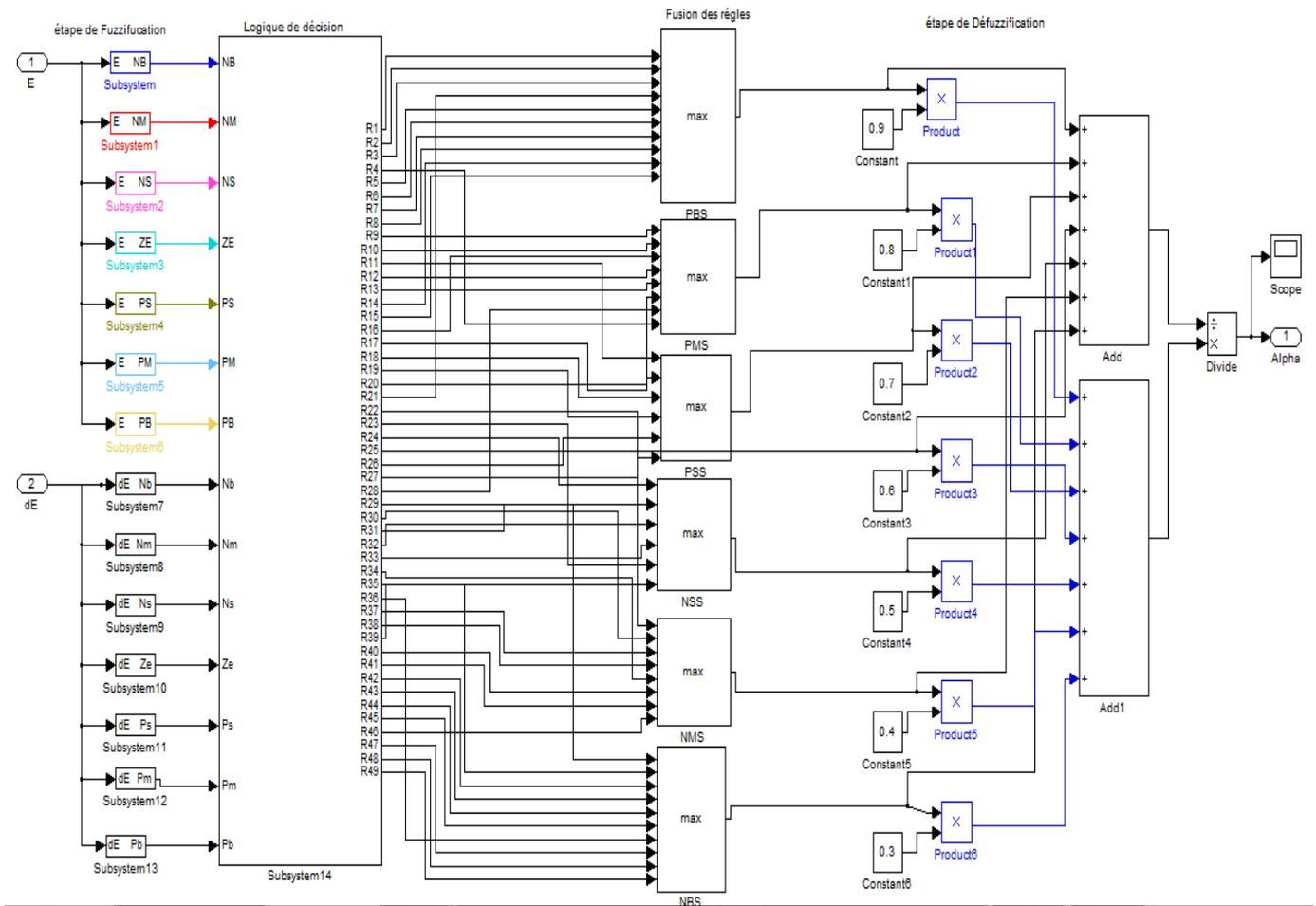


Figure III.6. Schéma fonctionnel sous Simulink du système photovoltaïque avec MPPT flou

C.2) MPPT à base de l'algorithme P&O

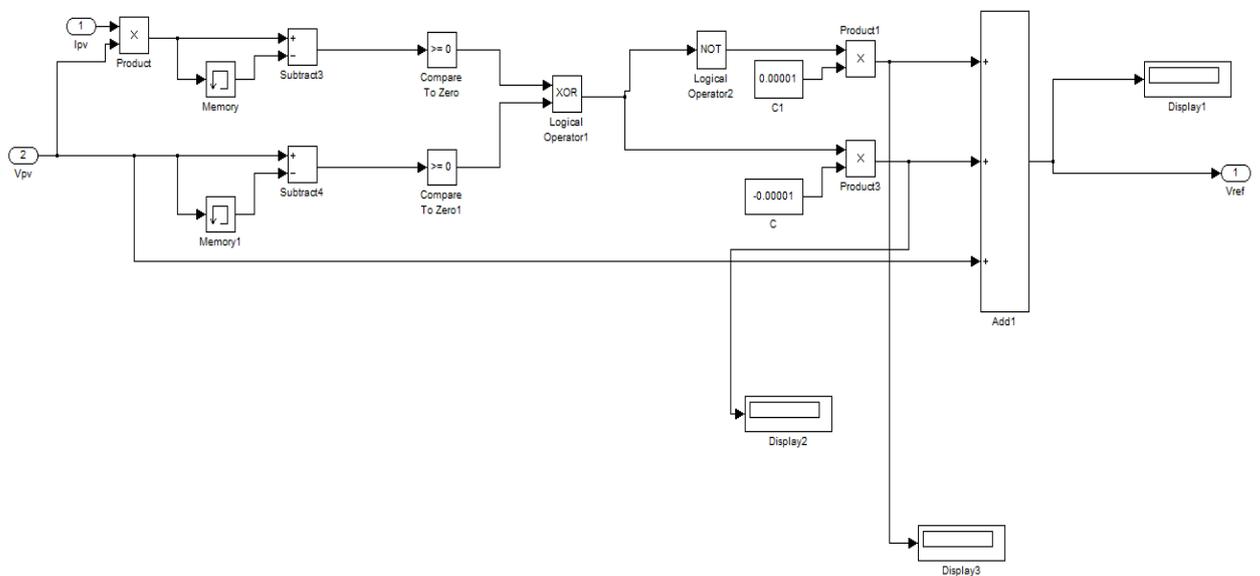


Figure III.7 Schéma bloc du contrôleur MPPT P&O sous Matlab Simulink

II.1 Simulation du système sous des conditions standards (STC)

Les conditions de test standard (STC) fournissent un environnement stable, où l'insolation G est égale à 1000 W/m^2 et la température T égale à 25°C . Les figures III.8 représentent le signal de la tension à la sortie du DC/DC ($V_{out_P\&O}$), le signal de la puissance ($P_{pv_P\&O}$), et l'évolution du signal de commande MLI.

A- Résultats de simulation du MPPT P&O

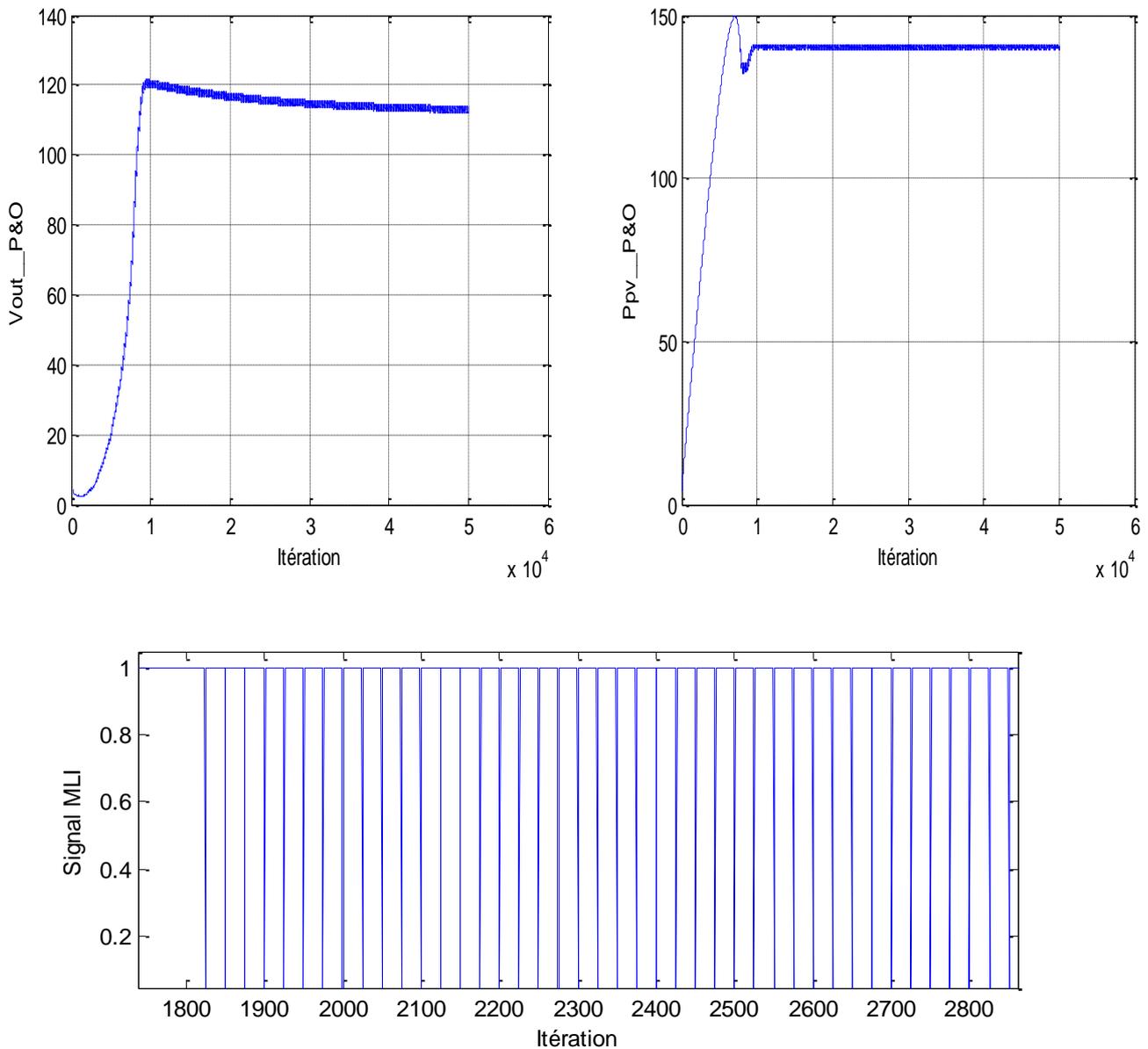


Figure III.8. Les résultats de simulation de la technique P&O sous des conditions standards

B- Résultats de simulation MPPT flou

La simulation a été faite sous les mêmes conditions standards, les résultats sont illustrés par Les figures III.9, qui représente le signal de la tension à la sortie du convertisseur DC/DC ($V_{out_P\&O}$), le signal de la puissance ($P_{pv_P\&O}$), et l'évolution du signal de commande rapport cyclique et le signal MLI.

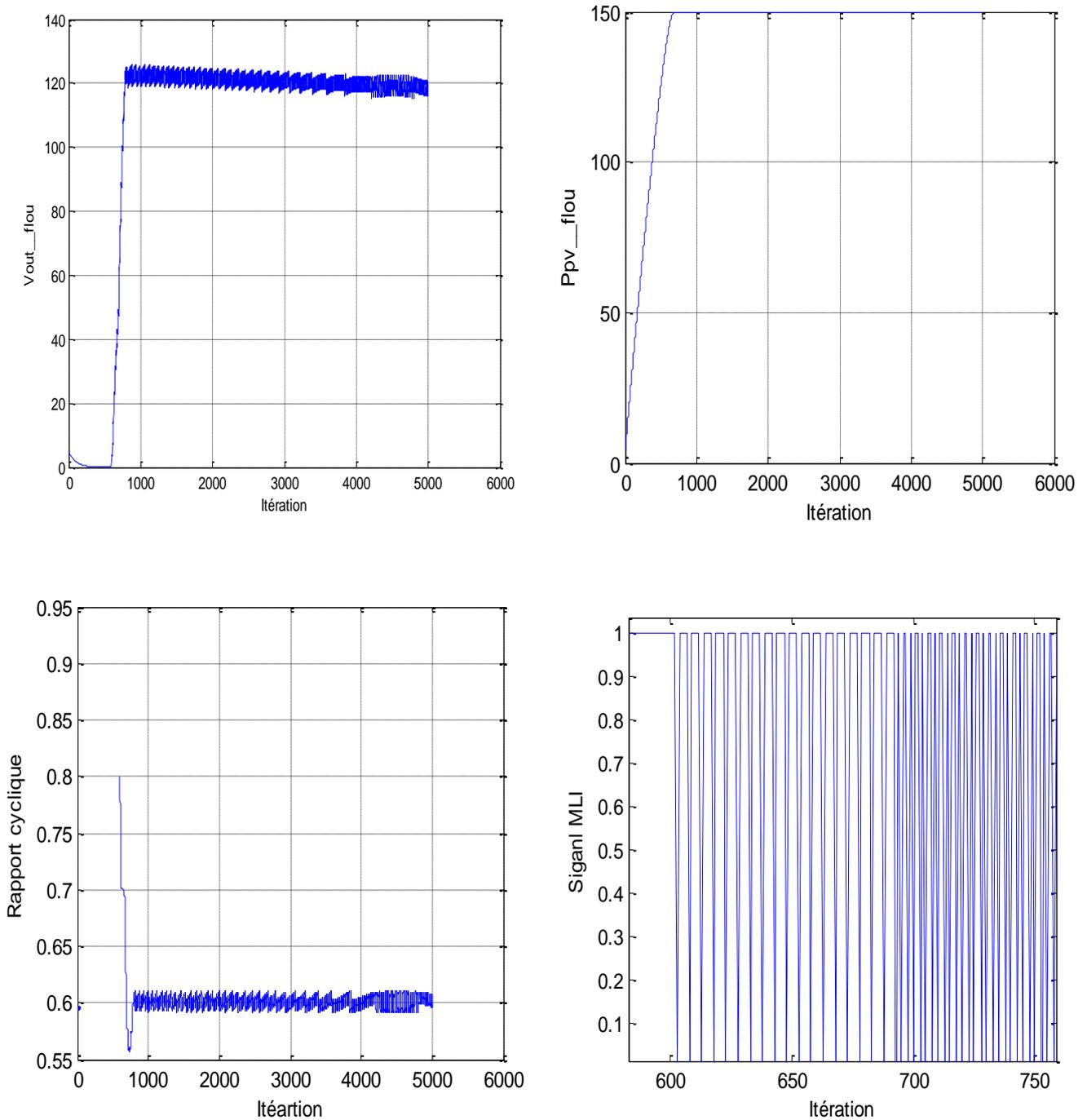


Figure III.9. Les résultats de simulation de la technique basée sur la logique floue sous des conditions standards

Comparaison entre les deux techniques

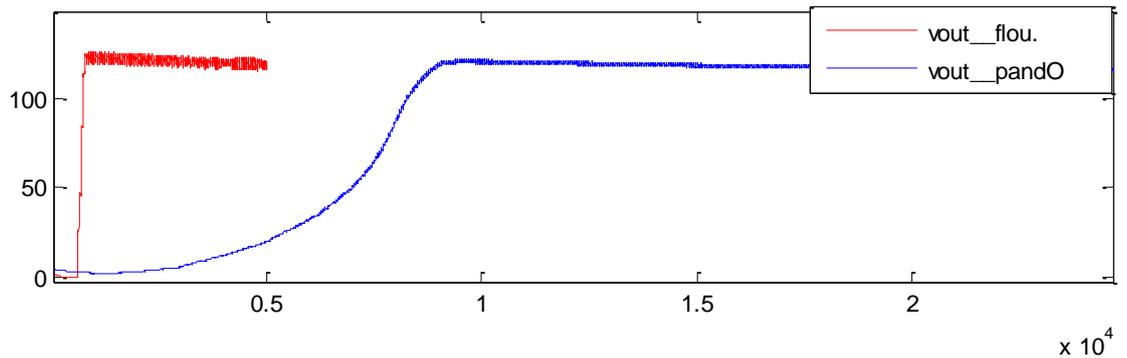


Figure III.10 La tension de sortie du système solaire obtenue par MPPT flou et P&O

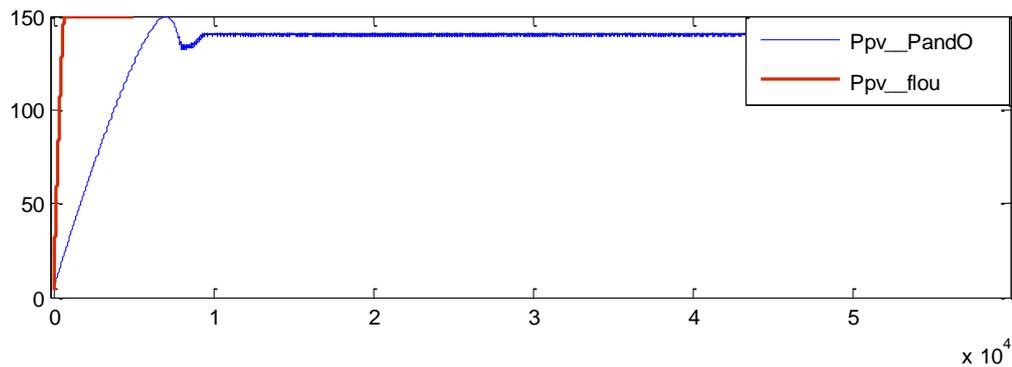


Figure III.11 La puissance générée par le module solaire obtenue par simulation du MPPT flou et P&O

Les résultats obtenus en simulant les contrôleurs MPPT flou et (P and O) pour des conditions standards d’insolation et de température, ont prouvé que le contrôleur flou a de meilleures performances par rapport au contrôleur P&O en termes de temps de réponse et l’erreur à l’état permanent,

II.2 Simulation dans les conditions météorologiques variables

Dans cette partie nous allons présenter trois scénarios:

II.2.1. Simulation du système sous conditions variables de température

Dans cette section on montre l’effet de la variation de température sur le système photovoltaïque, La température est au début standard (25°C) pour que le processus atteinte son MPP, ensuite elle décroît légèrement jusqu’à 18°C, en fin une augmentation jusqu’à 35°C (voir figure III.12).

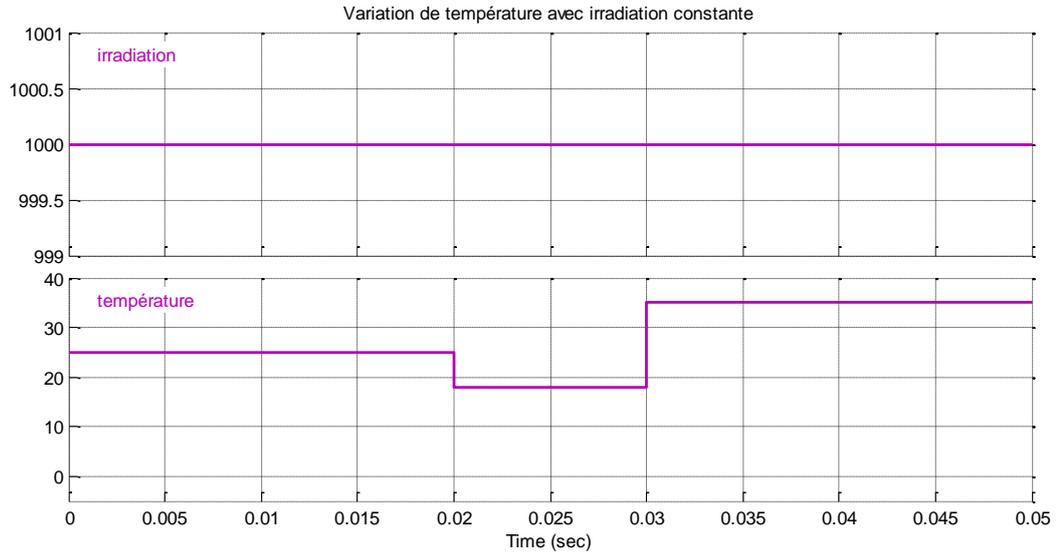


Figure III.12 le signal d'ensoleillement et de température appliqué au GPV

A) Résultat de simulations en utilisant MPPT P&O

La figure III.13 Montre les résultats obtenus en utilisant la technique P&O; la tension à la sortie du convertisseur DC/DC du système PV ($V_{out_P\&O}$) et la puissance générée par le module PV ($P_{pv_P\&O}$).

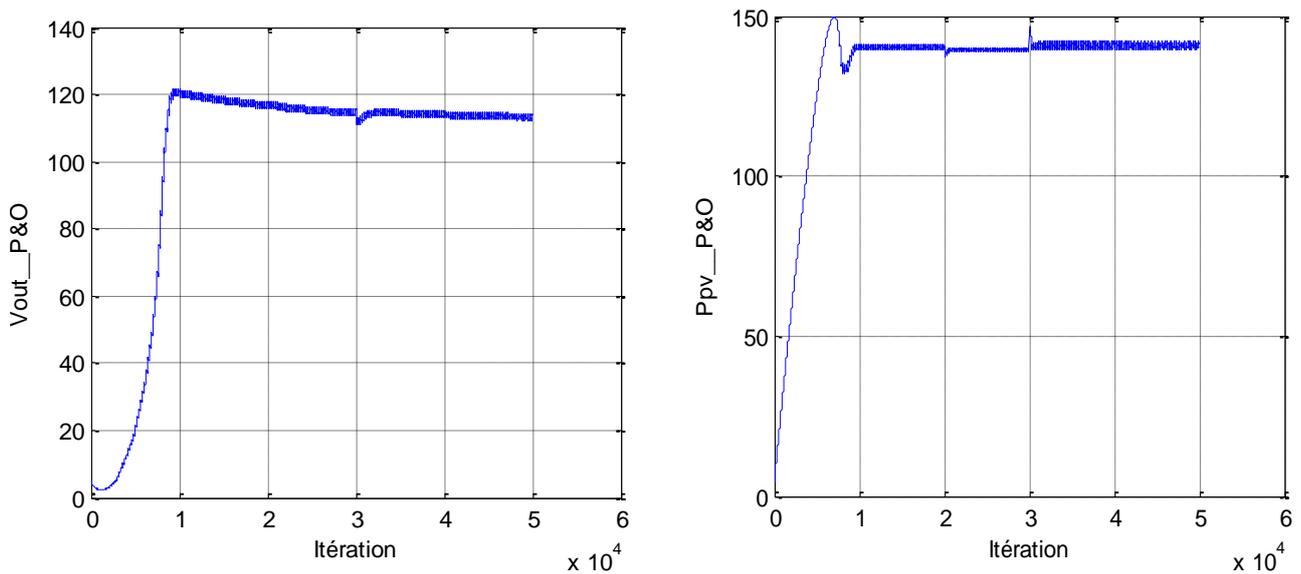


Figure III.13. Les résultats de simulation de la technique basée sur la logique floue sous des conditions de température variables

B) Résultat de simulations en utilisant MPPT P&O

La figure III.14 représente (V_{out_flou}) la tension à la sortie du convertisseur DC/DC du système PV, la puissance générée par le module PV (P_{pv_flou}), l'évolution du signal de commande (rapport cyclique) et le signal MLI.

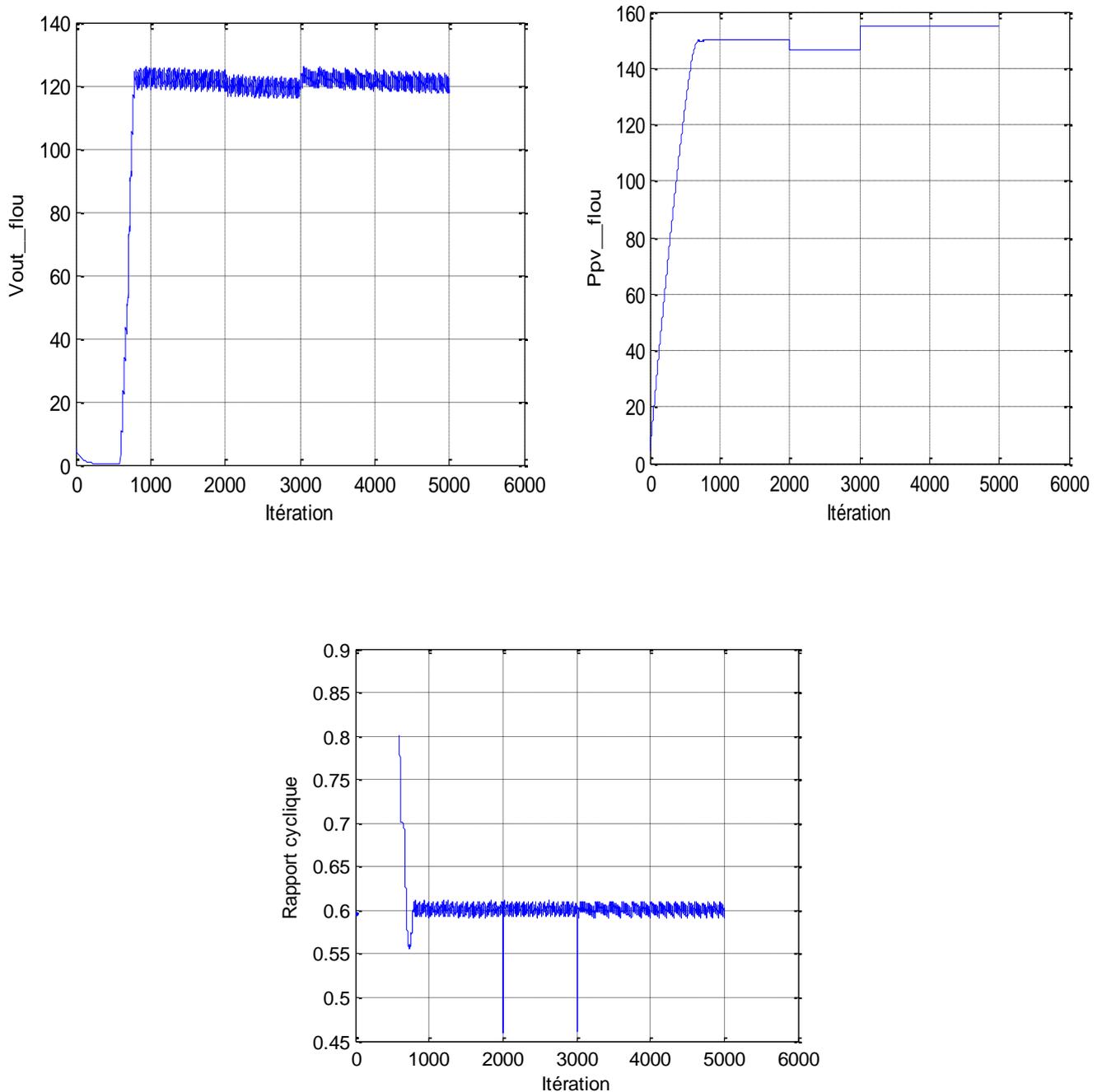


Figure III.14. Les résultats de simulation de la technique basée sur la logique floue sous des conditions de température variables

Les figures III.13-III.14 (Ppv_flou et Ppv_P&O) représente le comportement des contrôleurs qui suivent le MPP, en premier temps ils cherchent le premier point de puissance maximale « 150 w » qui correspondant à la température 25°C, d'après les résultats nous constatons que le contrôleur flou arrive à atteindre la puissance maximale or ce n'est pas le cas pour le contrôleur P&O. Sous l'effet des nouvelles variations de la température les deux contrôleurs Continuent à chercher le deuxième et le troisième point maximal qui correspond respectivement à 18°C et 35 °C.

II.2.2 Simulation du système sous conditions variables de l'insolation

On va maintenant jouer sur le signal représentant l'irradiation pour étudier l'influence de cette dernière sur le système.

L'irradiation est au début standard 1000 w/m² pour que le processus atteinte son MPP, ensuite elle décroît légèrement jusqu'à 700 w/m², après nous revenons à l'état initial (voir figure III.15).

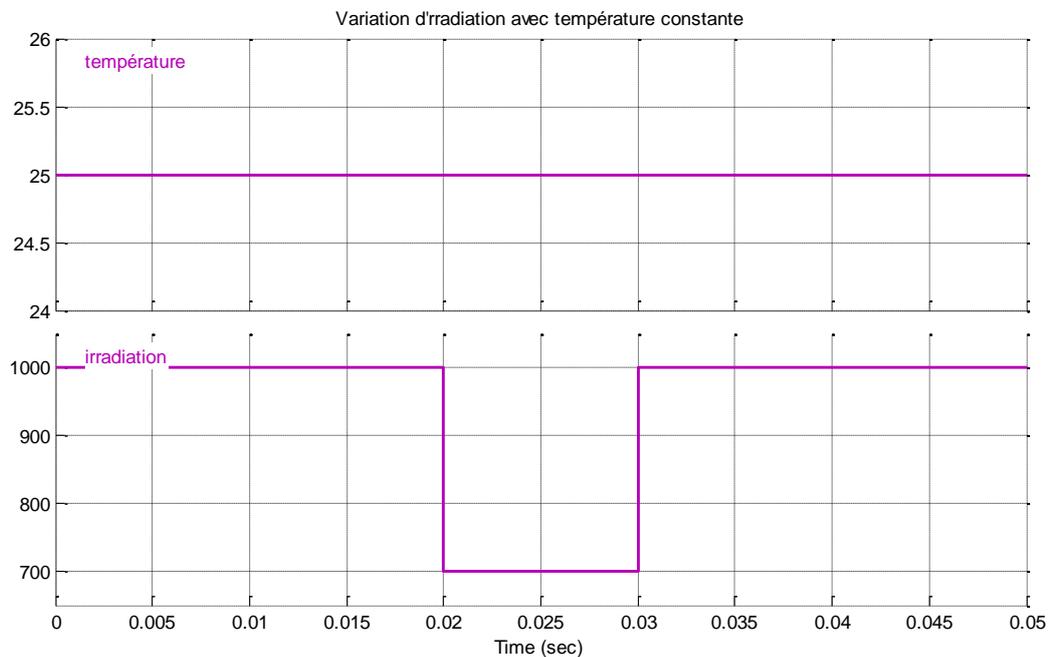


Figure III.15. Le signal d'ensoleillement et de température appliqué au GPV

A) Résultats de simulation en utilisant MPPT P&O

La figure III.16 montre les résultats obtenus en utilisant la technique P&O ; Vout_P&O qui représente la tension à la sortie du convertisseur DC/DC du système PV et la puissance générée par le module PV.

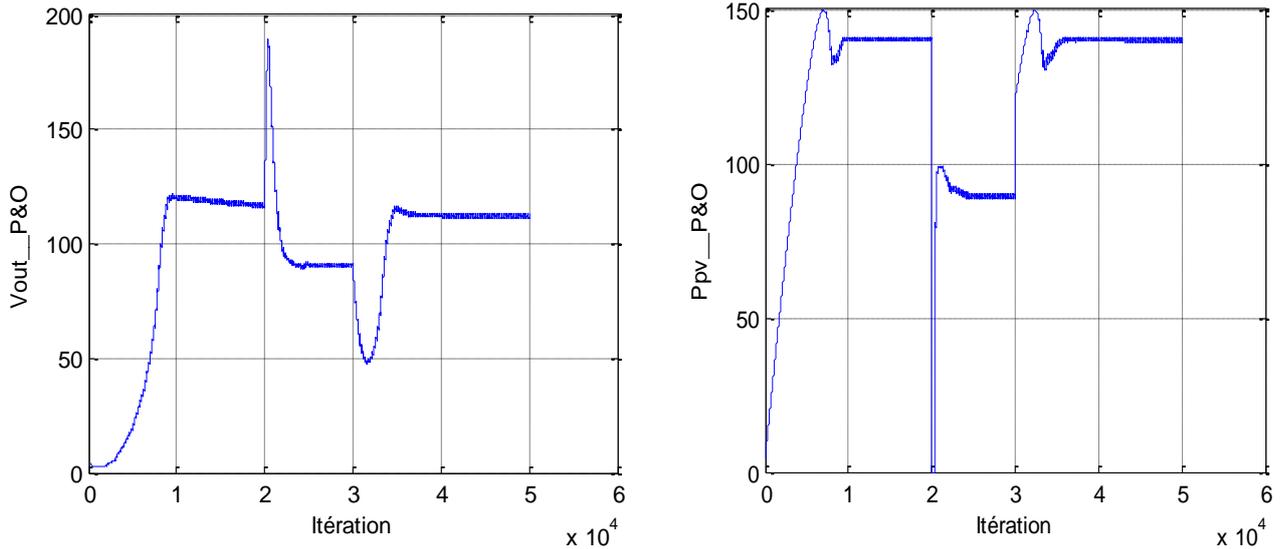
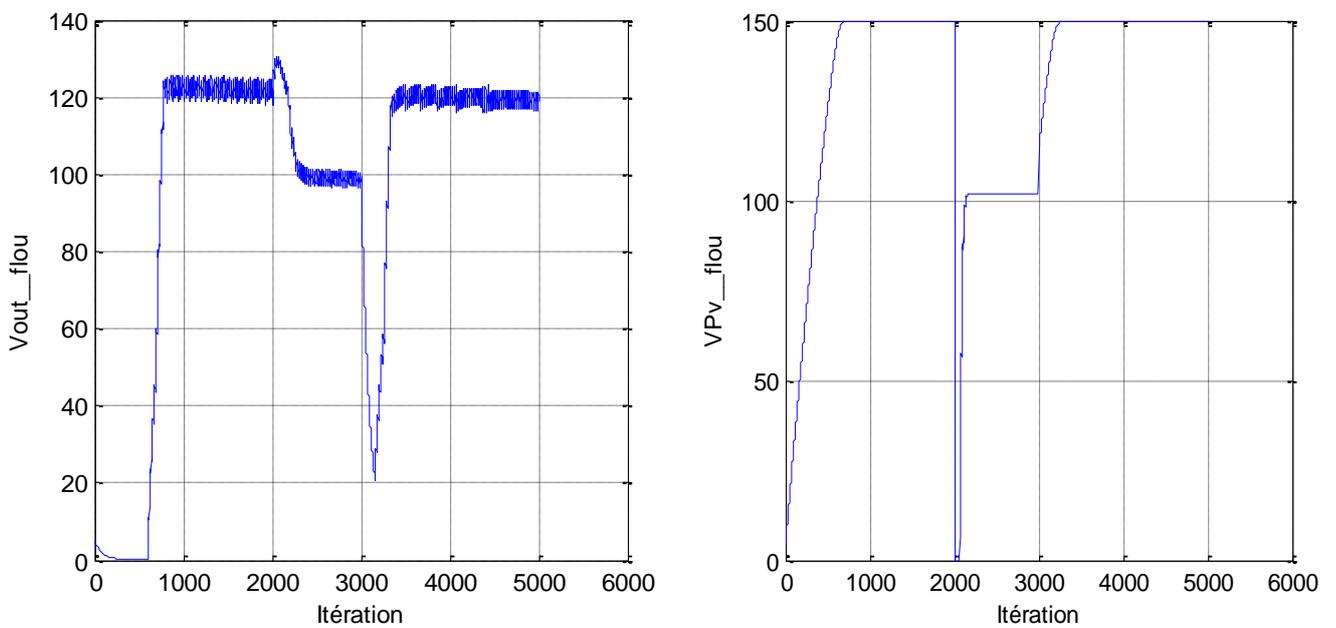


Figure III.16. Les résultats de simulation de la technique P&O sous des conditions variables de l'insolation

B) Résultats de simulation en utilisant MPPT flou

Sous les mêmes conditions, les résultats de simulation en utilisant un contrôleur flou sont montrés dans la figure III.17, qui représente respectivement (V_{out_flou}) la tension à la sortie du convertisseur DC/DC du système PV, la puissance obtenue par le module PV (P_{pv_flou}), l'évolution de signal de commande (rapport cyclique) et le signal MLI.



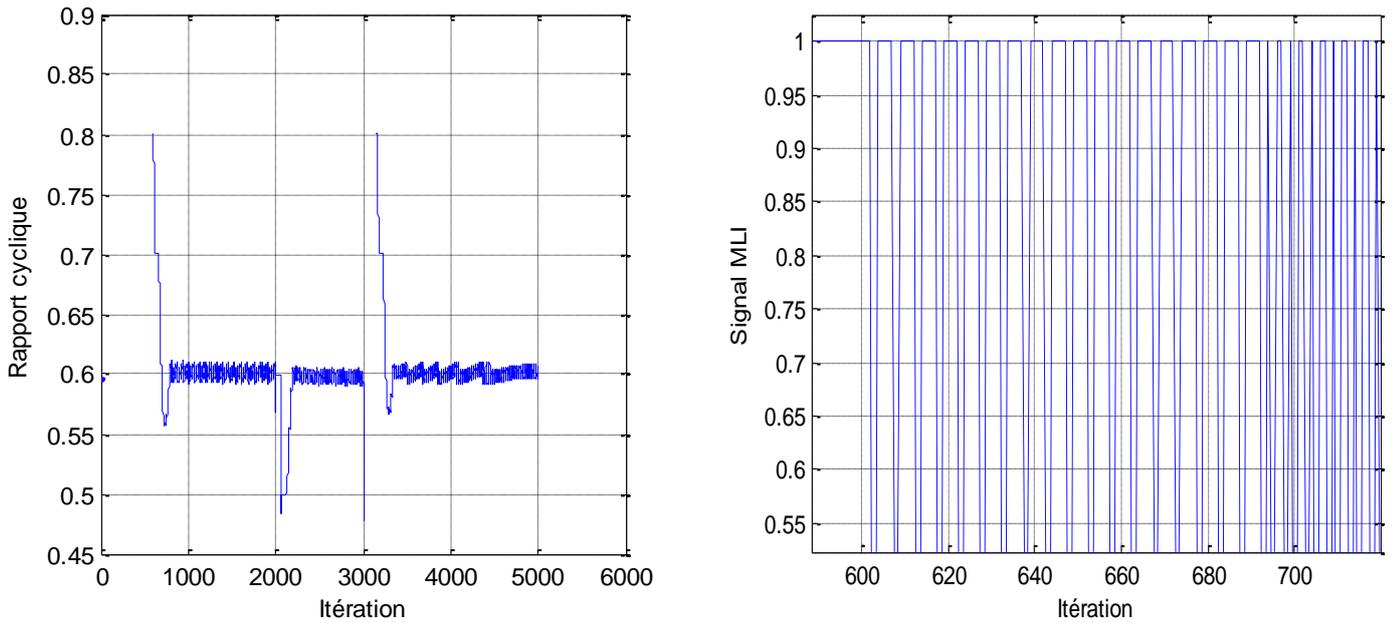


Figure III.17. Les résultats de simulation de la technique basée sur la logique floue sous des conditions variables de l'insolation

De même que la variation de température, le changement de l'insolation affecte aussi la puissance de sortie du panneau. Les figures III.13-III.14 représentent le processus de suivi de MPP pendant le changement de l'insolation.

Les deux expériences nous permettent de conclure que l'effet du changement de l'insolation est plus intéressant que celui de la température.

II.2.3 Simulation du système sous conditions variables de température et de l'insolation

Dans cette section, nous étudions l'effet de la variation de la température et de l'irradiation sur la réponse du système photovoltaïque (voir figure III.18).

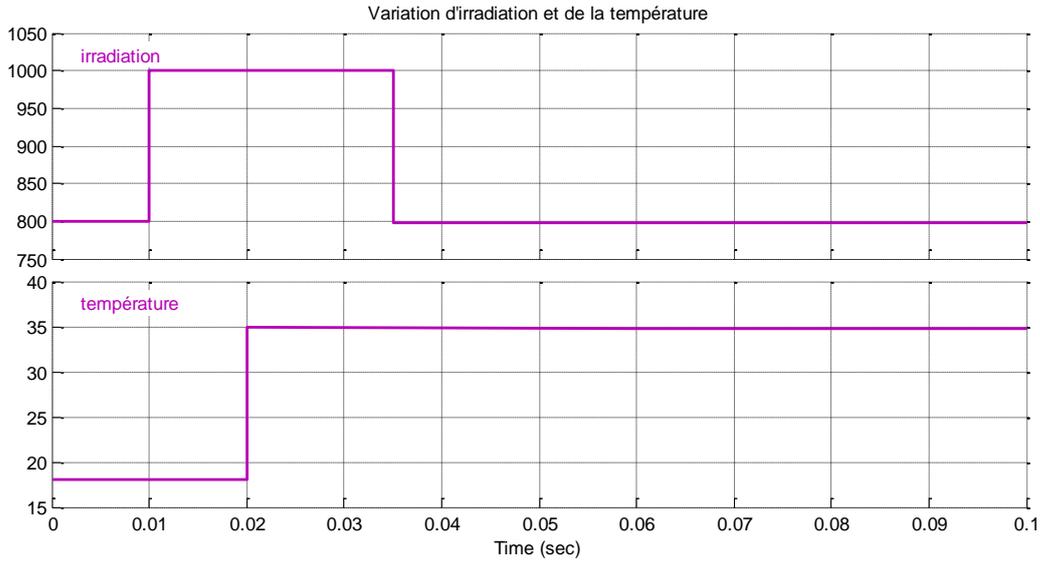


Figure III.18 le signal d'enseillement et de température appliqué au GPV

A) Résultats de simulation en utilisant MPPT P&O

La figure III.19 montre les résultats obtenus en utilisant un contrôleur MPPT P&O ; $V_{out_P\&O}$ qui représente la tension à la sortie du convertisseur DC/DC du système PV et $P_{pv_P\&O}$ est la puissance obtenue par le module PV.

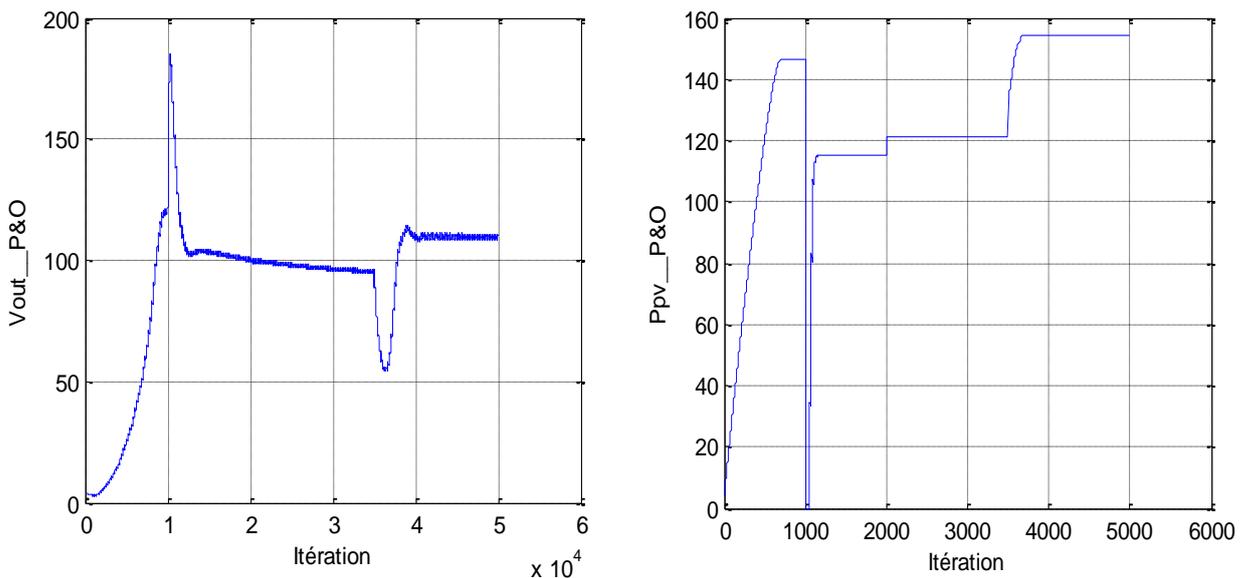


Figure III.19. Les résultats de simulation de la technique P&O sous des conditions d'insolation et de température variables

B) Résultats de simulation en utilisant MPPT flou

La figure III.20 montre les résultats obtenus en utilisant un contrôleur MPPT flou ; (V_{out_flou}) qui représente la tension à la sortie du convertisseur DC/DC du système PV, la puissance obtenue par le module PV (P_{pv_flou}) et l'évolution du signal de commande (rapport cyclique).

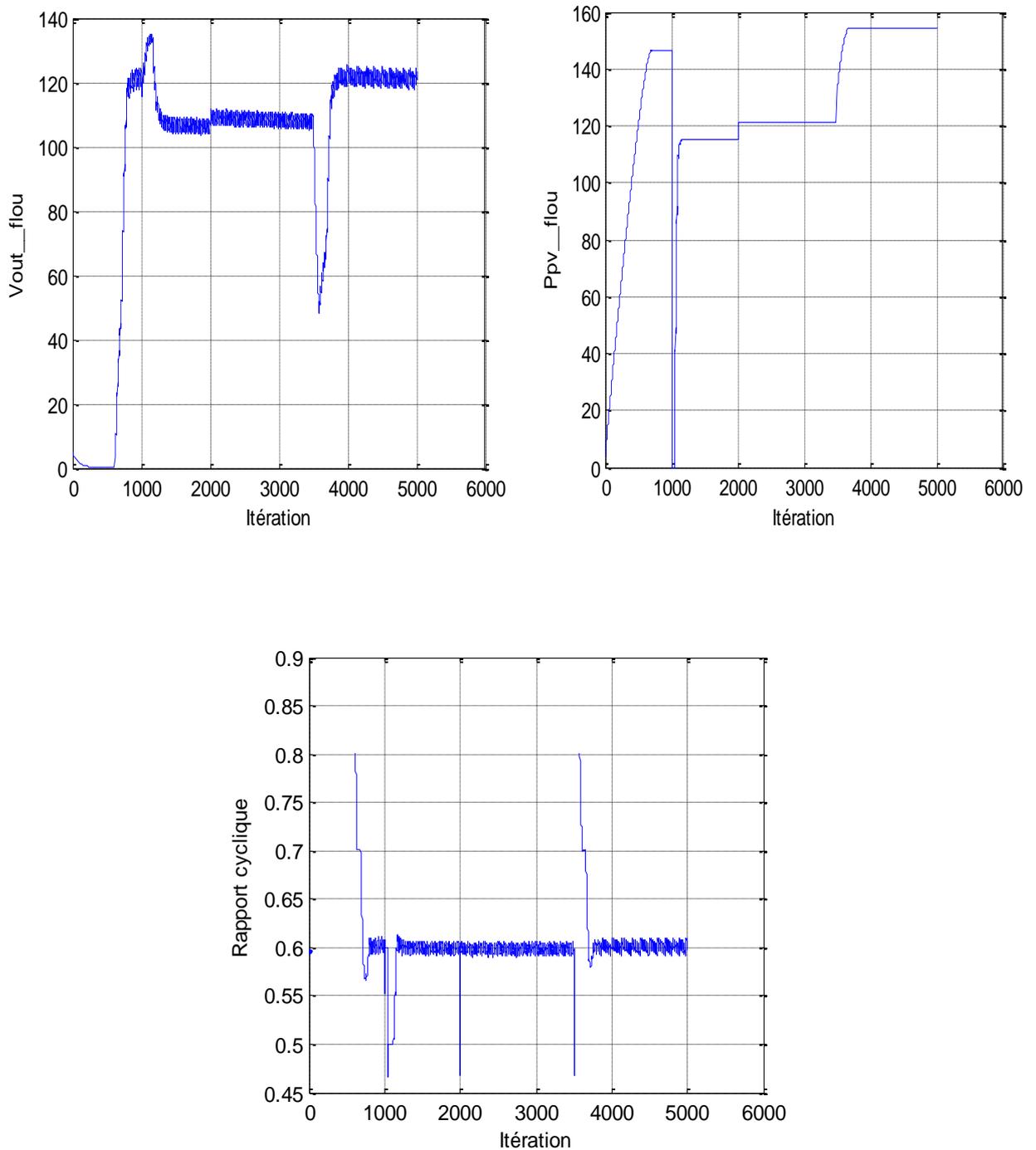


Figure III.20. Les résultats de simulation de la technique basée sur la logique floue sous des conditions d'insolation et de température variables

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons constaté que le choix du nombre et la forme des fonctions d'appartenance des sous ensembles flous à utiliser pour chaque variable linguistique ainsi la répartition de ces valeurs sur l'univers de discours influent explicitement sur les performances du contrôleur. Les gains de normalisations affectent aussi les performances de la réponse du système en régime transitoire. De plus, les gains de sorties du contrôleur jouent un rôle très important dans la stabilité du système et l'élimination de l'erreur en régime permanent.

Les résultats obtenus issus d'un ensemble de simulations du système en utilisant les contrôleurs MPPT flou et (P and O) pour différentes valeurs d'insolation et de température, ces résultats confirment le bon fonctionnement du contrôleur (P and O) mais montrent un meilleur fonctionnement du contrôleur flou. Ce dernier a prouvé qu'il a de meilleures performances, temps de réponse rapide et erreur à l'état permanent très faible, et qu'il est robuste vis-à-vis les perturbations atmosphériques.

I. Introduction

L'évolution technologique de la microelectronique a permis la naissance d'un nouveau type de composants électroniques, dits circuits programmables. Cette évolution, aujourd'hui en pleine expansion et progression, offre de plus en plus des circuits programmables puissants avec une grande flexibilité et rapidité de fonctionnement. Cet avantage apporte à ces circuits une solution technologique (support physique) incontournable pour l'implémentation des différents algorithmes de commande caractérisés par leur grande complexité.

De plus, les circuits programmables qui sont d'une grande simplicité de conception bénéficient des avantages de l'électronique analogique et ceux des microprocesseurs.

Nous traitons dans ce chapitre les différents supports physiques permettant de construire à partir des caractéristiques du régulateur flou de nouveaux régulateurs simples à implémenter. Cependant, notre étude sera orientée vers les circuits programmables du fait que les FPGA sont choisis comme technologie cible pour la réalisation du présent travail.

II. Les FPGAs:

Les FPGA sont des circuits intégrés constitués d'une matrice de cellules logiques identiques interconnectées par programmation (reliées par des bus de communication configurables). Le principe de base est simple: afin d'implanter une fonction logique dans un FPGA, il suffit de configurer les cellules logiques et de les relier correctement en utilisant les bus internes. En effet, les FPGA sont les descendants des CPLD (Complex Programmable Logic Device), ils sont simplement beaucoup plus complexes et plus puissants.

II.1. Architecture interne des FPGAs :

L'architecture typique d'un FPGA est représentée sur la figure IV.1. L'unité logique de base d'un FPGA est le CLB (Configurable Logic Blocs). Les unités sont arrangées en matrice, et chaque CLB est divisée en plusieurs sections identiques nommées tranches (slices). Ces éléments logiques se basent sur des multiplexeurs (MUX), ou sur des tables de conversion LUT (Look-Up Tables). A cet effet, ces unités logiques sont typiquement capables de réaliser la logique combinatoire ou séquentielle de différentes complexités.

En outre, des ressources d'interconnexion permettent de créer (d'assurer) des liaisons programmables entre les entrées/sorties des CLBs et les blocs d'entrées/sorties IOB (input output Blocs).

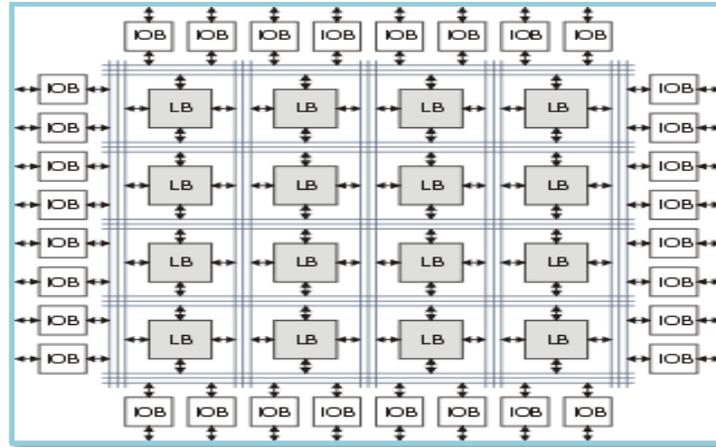


Figure IV.1 : Architecture interne d'un FPGA de type Virtex.

II.2.Flout de conception sur FPGA

Afin de programmer un FPGA d'une façon optimale, le concepteur doit respecter certaines étapes (voir fig IV.2) [16]

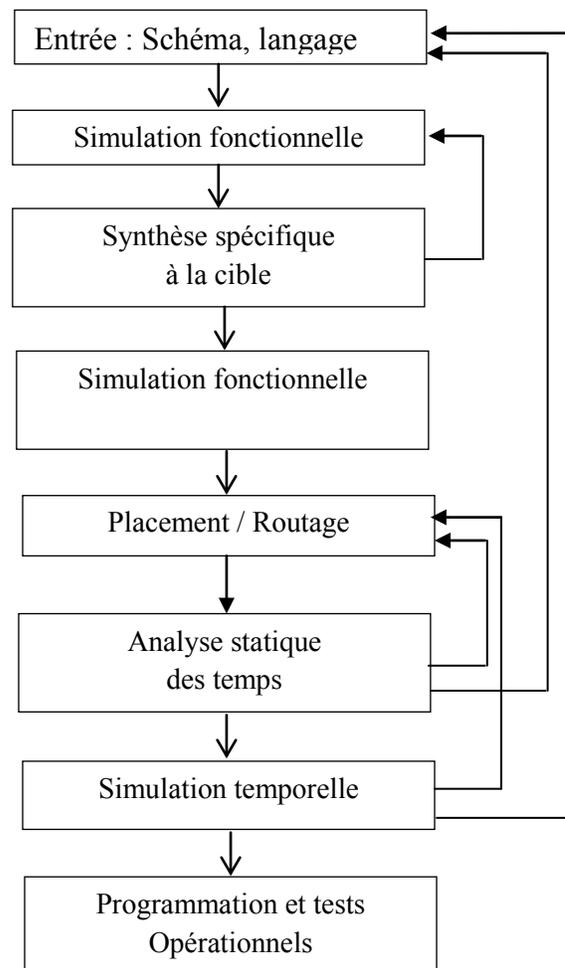


Figure IV.2: Les étapes de conception d'un programme sur FPGA

II.2.1. Introduction de l'algorithme à implémenter: pour programmer les FPGA, le langage de description matérielle, telles que : le VHDL, le VERILOG ou ABEL sont généralement utilisés. Dans notre travail nous nous intéressons au programme VHDL.

a) Le VHDL : le VHDL est un langage de programmation de haut niveau permettant de faire la spécification, la simulation, la synthèse logique, la preuve formelle.

On note aussi que la simulation d'un code VHDL est très longue. A cet effet, xilinx commercialise un outil de conception de haut niveau nommé system Generator (SG).

b. Environnement de développement Simulink-XSG (XILINX SYSTEM GENERATOR):

Le System Generator est un outil de design de DSP fournit par xilinx qui permet l'utilisation de l'environnement Simulink pour la programmation et la conception des applications sur circuits FPGA. Autrement dit, c'est une interface entre MATLAB/Simulink et ISE-xilinx. Parmi les principales tâches pouvant être exécutées dans cet environnement, on peut citer :

- Conception et simulation des systèmes dans un environnement graphique (Simulink).
- Co-simulation logicielle (Simulink)- matérielle (FPGA) par communication JTAG.
- Génération automatique du code VHDL ou Verilog.
- Co-design logiciel.

II.2.2. Simulation fonctionnelle n° 1 : elle permet la vérification globale de l'algorithme programmé, dans ce cas les contraintes physiques des composants ne sont pas prises en compte. Les simulateurs de xilinx ou modelsim de la compagnie montor graphic peuvent être utilisés.

II.2.3. Simulation fonctionnelle n 2 : Le temps nécessaire pour le fonctionnement de chaque opération dans l'algorithme est pris en compte. En cas de conflit, le concepteur doit revoir son programme.

II.2.4. Placement / routage: c'est une phase de synthèse logique, placement et routage. Cette phase peut être effectuée d'une façon manuelle pour les très petits designs, ou par le logiciel « xilinx Design Manager » pour les schémas plus importants. Cependant, cette tâche peut être très difficile (même pour le meilleur processeur existant) lorsque le design occupe presque la totalité du circuit. En effet, des modules interconnectés doivent être placés en étant les plus proches possibles, afin de limiter les délais sur les fils et le logiciel doit trouver le moyen pour les connectés avec l'ensemble des fils de routage existant. Ou par le logiciel (Xilinx Design Manager), c'est ce dernier qui est généralement utilisé.

II.2.5.Simulation temporelle :elle consiste à faire une simulation en prenant compte les contraintes de fonctionnement ainsi que des composants à utiliser. Après cette vérification le programme peut être implémenté sur FPGA et tester,

a. Outils de conception par le XSG :

Pour avoir la possibilité de faire la conception hardware des systèmes sous l'environnement Matlab-Simulink, Xilinx a développé un Toolbox spécifique qui est intégré dans le Simulink, Cette Toolbox contient les bibliothèques suivantes (voir figure IV.3):

- Xilinx Blockset.
- Xilinx Reference Blockset.
- Xilinx Xtreme DSP Kit.
- XPC Target.

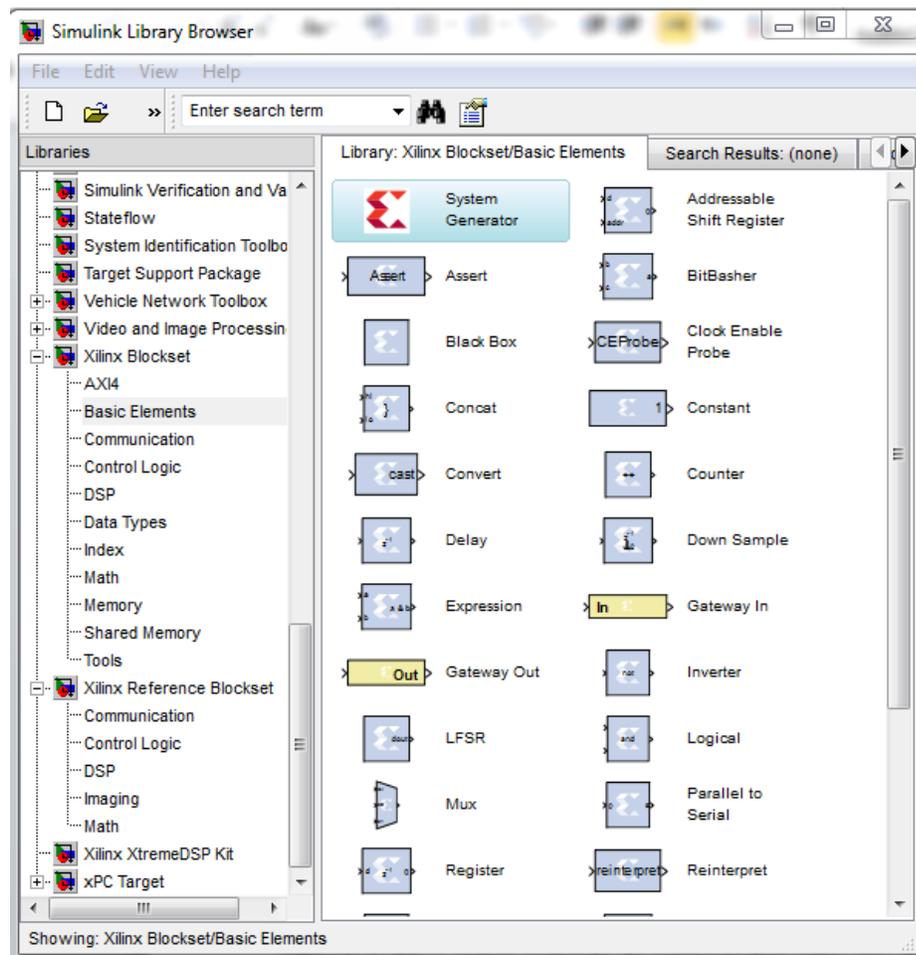


Figure IV.3 : Les bibliothèques de XSG

b. La communication entre les blocs SIMULINK et les blocs XSG :

Étant donné que les données des deux environnements Simulink et XSG sont de forme Différent il doit y avoir certain protocole de communication entre eux. En effet, les signaux dans Simulink sont de type à virgule flottante (double), tandis qu'ils sont de type à virgule fixe (Point fixe) dans le XSG. Pour assurer la communication, certains genres de convertisseurs Sont utilisés. Il existe deux convertisseurs ou 'Gateway'.

- **Un Gateway-IN** : c'est un convertisseur analogique numérique (double =>fixe), Permettent le passage de Simulink vers l'environnement XSG.il faut bien spécifier le Nombre total de bits et la position du point fixe
- **Un Gateway-out** : c'est un convertisseur numérique analogique (fixe=>double), Permettent le passage de l'environnement XSG à l'environnement Simulink.

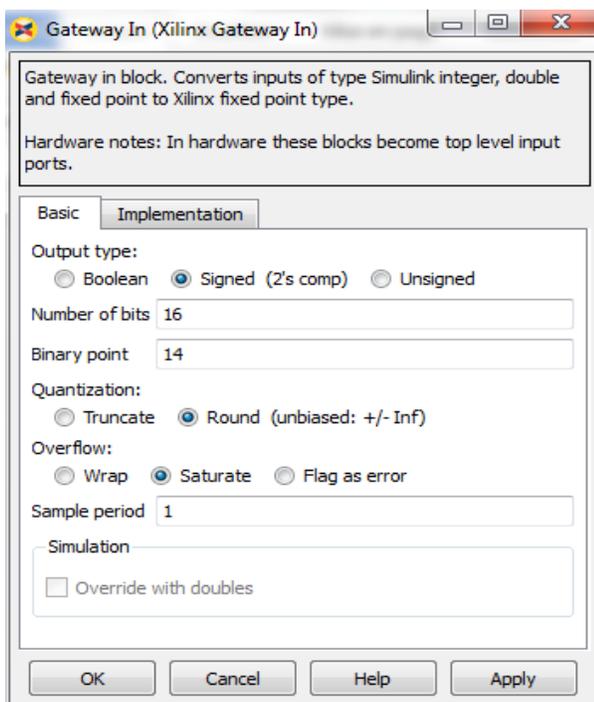


Figure IV.4.a: propriétés de Gateway In

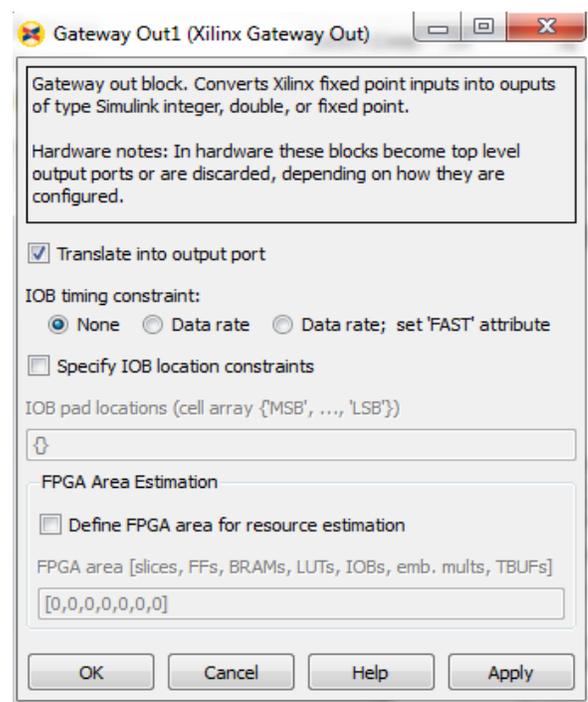


Figure IV.4.b:propriétés de bloc Gateway Out

III. Implantation sur FPGA

Dans cette partie nous allons implémenter le régulateur flou synthétisé dans le chapitre 2 sur un circuit FPGA utilisant le langage VHDL et le system generator

La structure générale de l'algorithme du régulateur flou est représentée sur la figure IV.5. On note que l'horloge est égale à celle de la carte FPGA utilisé.

Cette implémentation contient essentiellement 3 modules nommés comme suit :

- ✚ Module de calcul des fonctions d'appartenances;
- ✚ Module de calcul de l'inférence;
- ✚ Module de réalisation de la défuzzification.

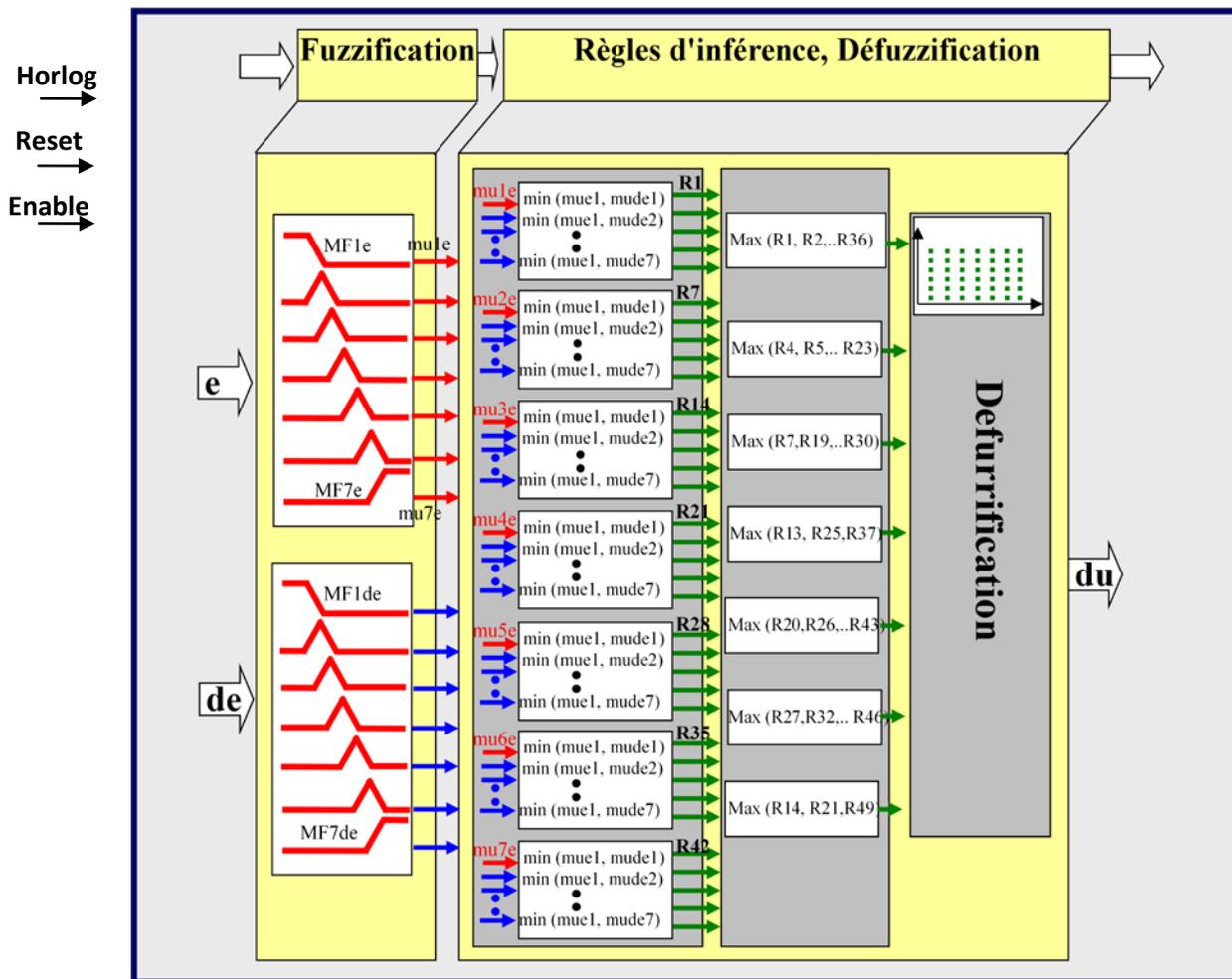


Figure IV.5. Algorithme proposé pour l'implémentation du régulateur flou

La figure IV.6. Représente le schéma bloqe sous system generator utilisé pour l'implémentation du contrôleur flou sur la carte FPGA

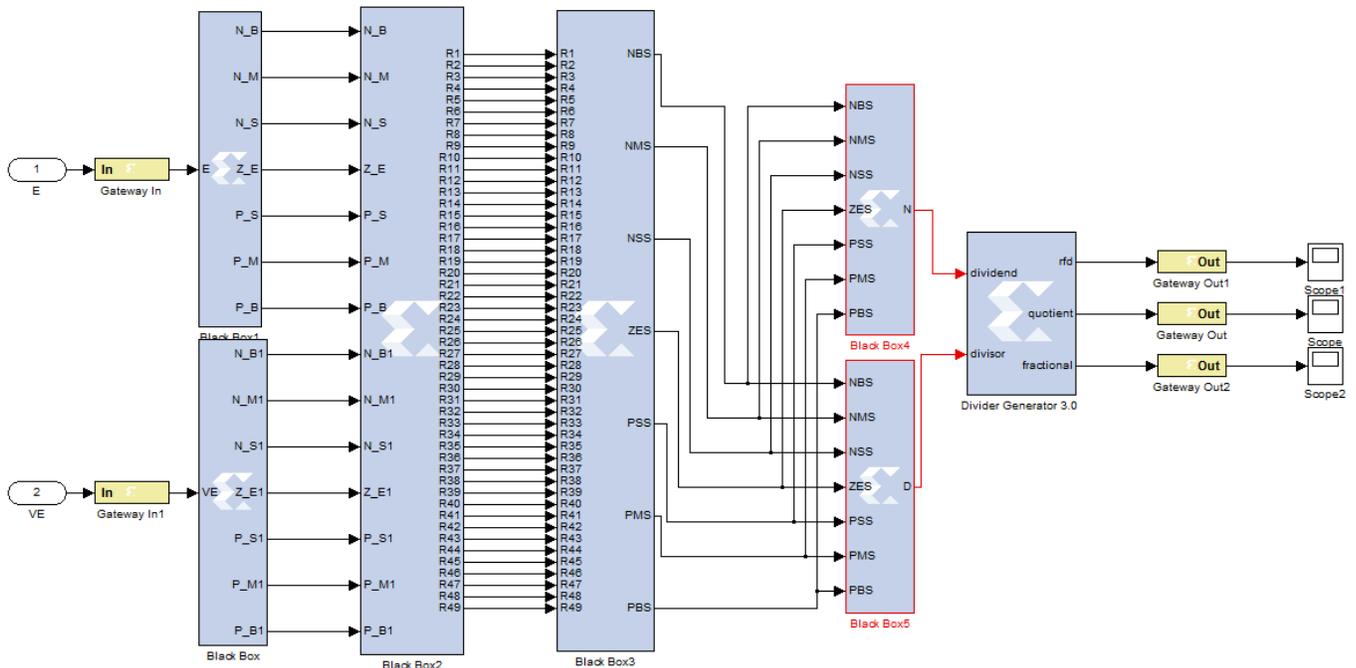


Figure IV. 6. Schéma bloqe de l'implémentation du régulateur flou

Le Tableau IV.1 résume le choix des caractéristiques du régulateur flou à implémenter.

Système d'inférence floue	Caractéristique
Nombre de variables d'entées	2
Résolution de chaque entrée	12bits
Nombres de variables de sorties	1
Résolution de la variable de sortie	12bits
nombre de fonction d'appartenance pour chaque variable.	7
Résolution de chaque fonction d'appartenance d'entrée.	12bits
Résolution de la fonction d'appartenance de sortie.	19bits
Méthode d'agrégation	Min, Max.
Méthode de défuzzification	Moyenne pondérés

Tableau IV.1. Caractéristiques du régulateur flou

IV.1 Module de calcul d'une fonction d'appartenance

Ce module réalise les sept fonctions d'appartenances pour les deux variables d'entrées. Chaque variable d'entrée est codée sur 12 bits, le bit signe n'est pas pris en compte, nous avons décalé la plage de variation de la fonction d'appartenance de l'Erreur pour obtenir que des valeurs positives.

Les algorithmes ci-dessous montrent la réalisation de la fonction d'appartenance NB (trapézoïdale) et NM (triangulaire) implémentées sur le System Generator à travers un black box. (voir figure IV.6.a)

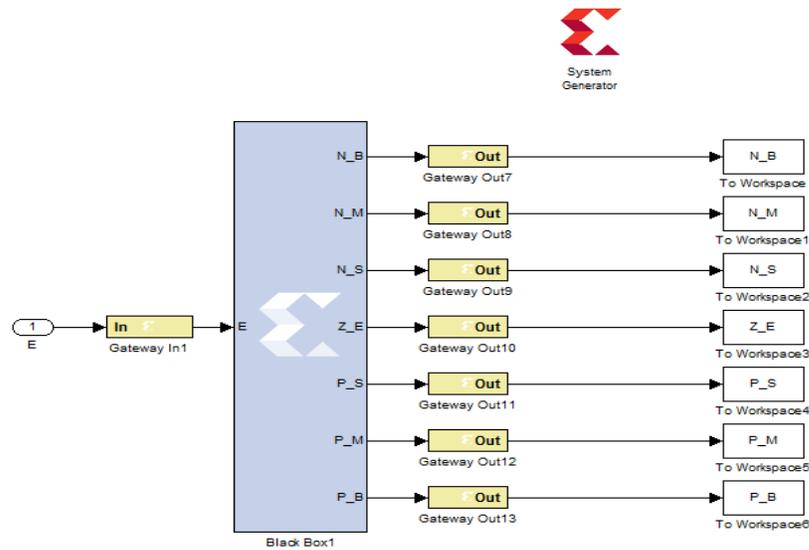


Figure IV.6.a. Implémentation du module des fonctions d'appartenance

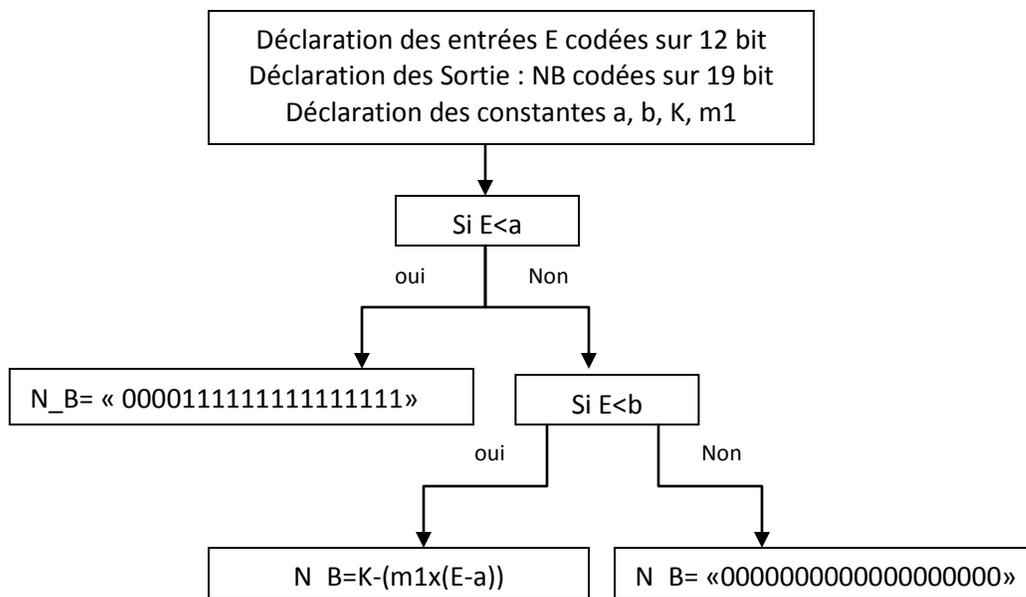


Figure IV.7. L'algorithme de la fonction d'appartenance NB

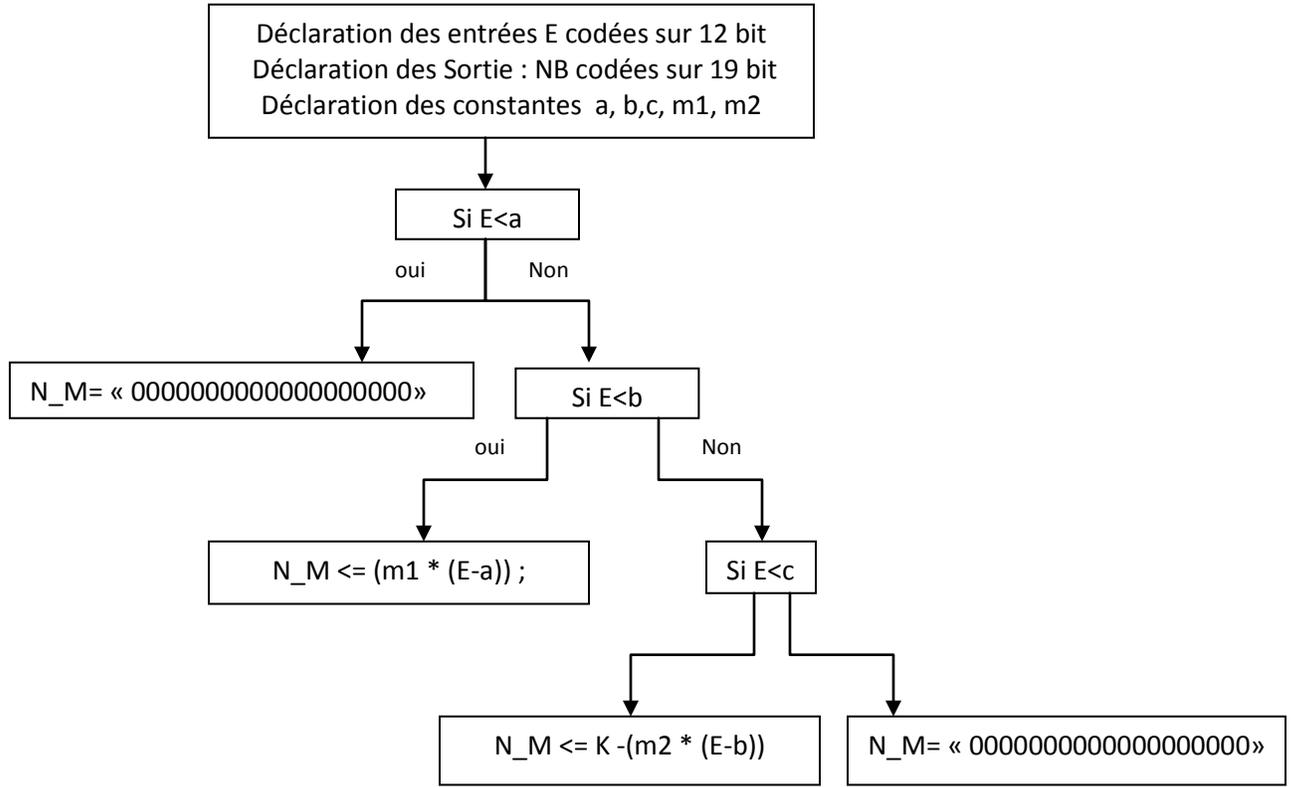


Figure IV.8. L'algorithme de la fonction d'appartenance NM

Les constante a, b, c sont codées sur 12 bit, ces nombre sont converties en binaire par un petit calcul

Rappelant la fonction d'appartenance de l'erreur

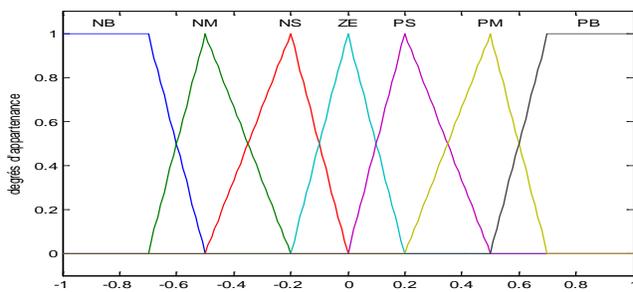


Figure IV.9.a. Fonction d'appartenance du régulateur flou synthétisé

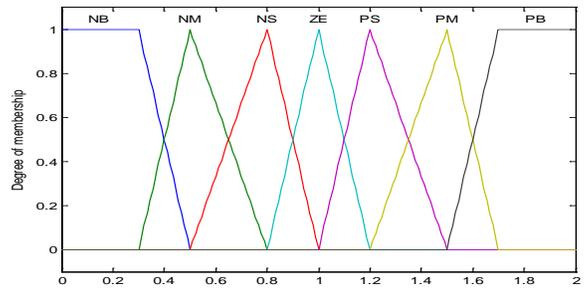


Figure IV.9.b. Fonction d'appartenance du régulateur flou synthétisé après décalage de

IV.2. Méthode de calcul des nombres de bit

La plus grande valeur qui peut prendre E est la valeur 2, On sait que la variable d'erreur est codée sur 12 bits alors la valeur « 2 » = $2^{12}=4096$: « 111111111111 »

Exemple de calcul:

$$a(\text{bin}) = (4096 \times 0.3)/2 = 614$$

$a=0.3$ convertie en binaire ça nous donne 614 : « 001001100110 »

$b=0.7$ convertie en binaire ça nous donne 1023 : « 001111111111 »

$c=0.8$ convertie en binaire ça nous donne 1638 : « 011001100110 »

La constante K c'est la valeur maximale qui peut prendre le degré d'appartenance, elle est codée sur 19 bit alors $K = \ll 00001111111111111111 \gg$.

m_1, m_2 : pente d'une droite codée sur 7 bit

$m_1 = 80$: « 1010000 »

$m_2 = 53$: « 0110101 »

La simulation comportementale de ce system est représentée sur la figure IV.10

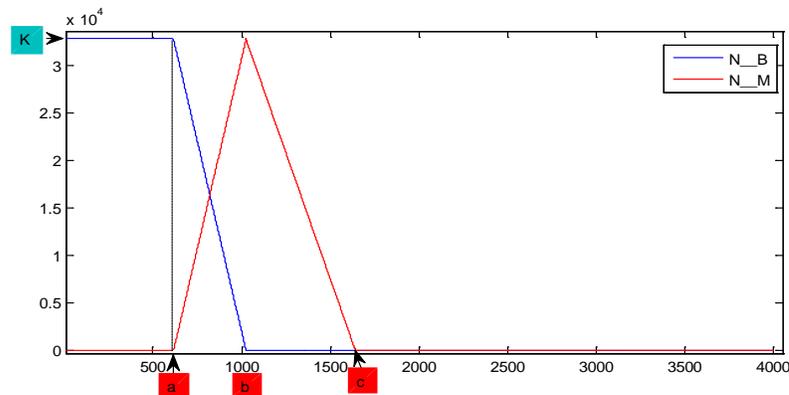


Figure IV.10. Implémentation de deux fonctions d'appartenance

Les résultats d'implémentations obtenus sur system generator de la variable d'entrée « erreur » est représentés sur la figure IV.11.

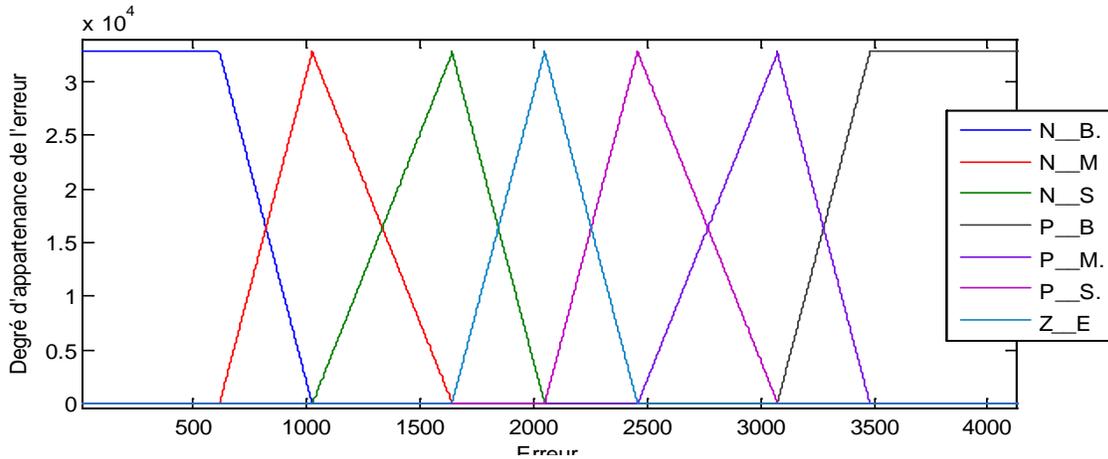


Figure IV.11. Implémentation de la fonction d'appartenance de l'erreur

Les résultats d'implémentations obtenus sur system generator de la deuxième variable d'entrée « variation de l'erreur » est représentés sur la figure IV.12.

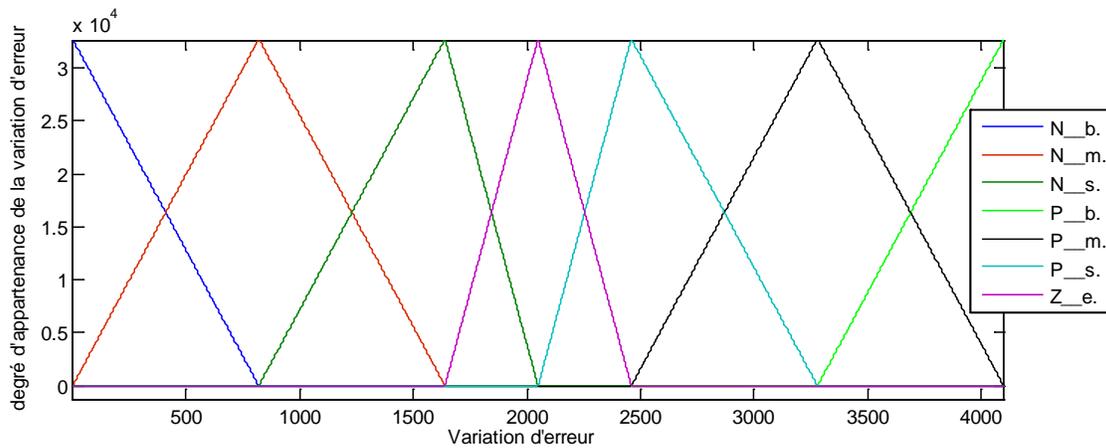


Figure IV.12. Implémentation de la fonction d'appartenance de la variation d'erreur

IV.2.2. Module de calcul de l'inférence

A. Module de calcul des règles d'inférences

Ce module réalise l'opérateur *ET*, c'est la combinaison des différentes règles par une agrégation Min. La Figure IV.13 donne la réalisation de la première fonction d'appartenance de la variable erreur e combinée aux différentes fonctions de la variable dérivée d'erreur de .

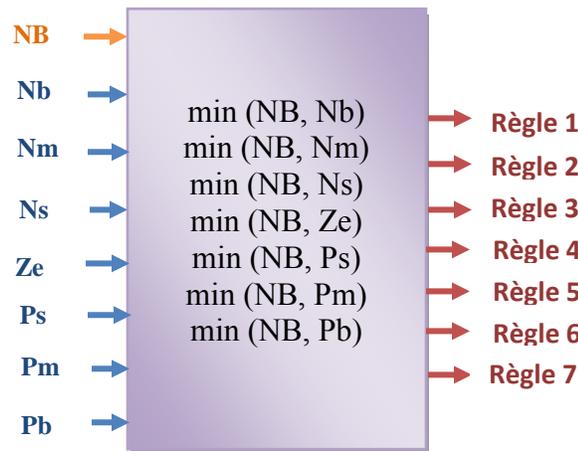


Figure IV.13. Réalisation de « If e is NB and de is Nb..... Pb »

B. Module de réalisation de la fonction 'ou'

Ce module réalise l'agrégation de l'opérateur *ou*, appliqué sur les règles qui donnent les mêmes variables floues. La figure (IV.14) illustre l'algorithme de réalisation de la fonction Max pour le résultat PBS

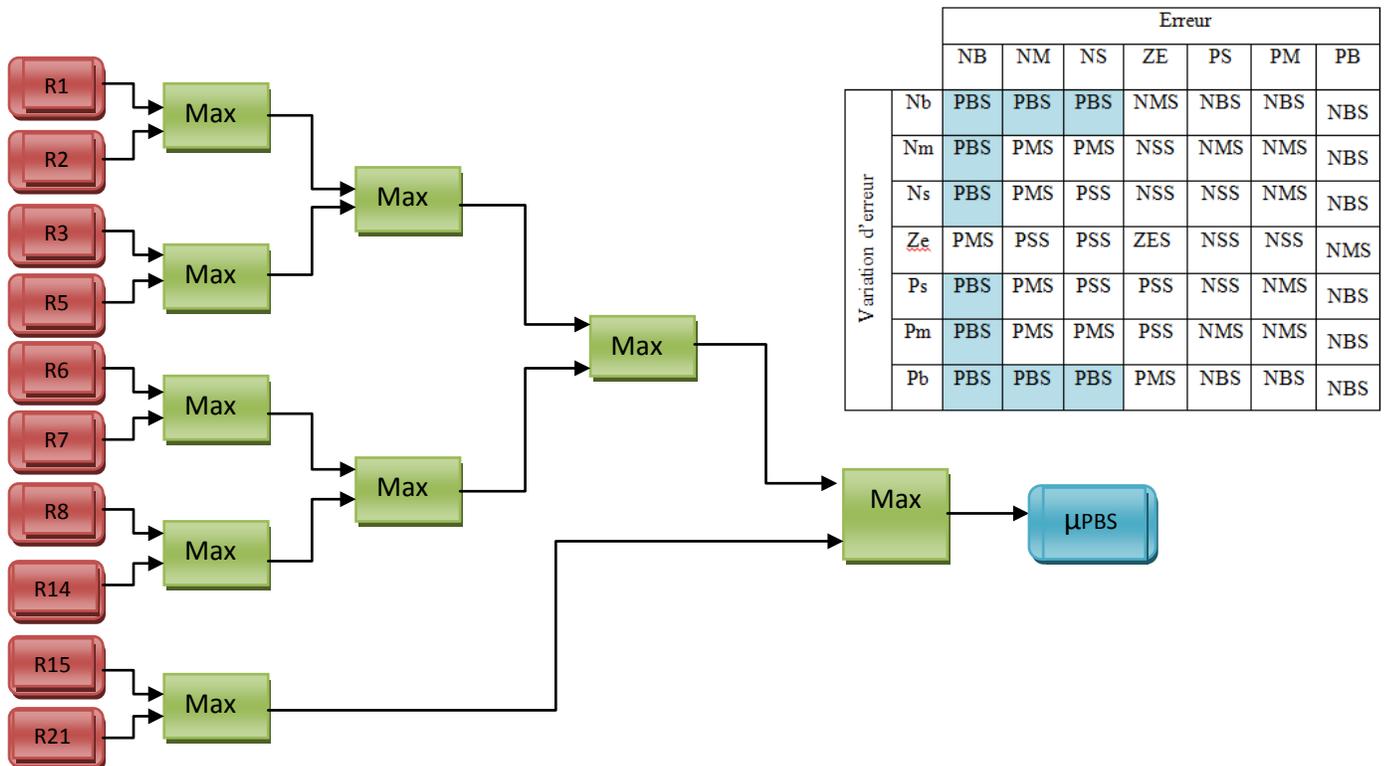


Figure IV.14. Implémentation du module fonction « ou », (conséquence PBS)

C. Module de réalisation de la défuzzification

L'architecture interne de l'étage de défuzzification implémenté contient deux additionneurs (12 et 24 bits respectivement), sept multiplicateurs et un diviseur comme représenté sur la figure (IV.15).

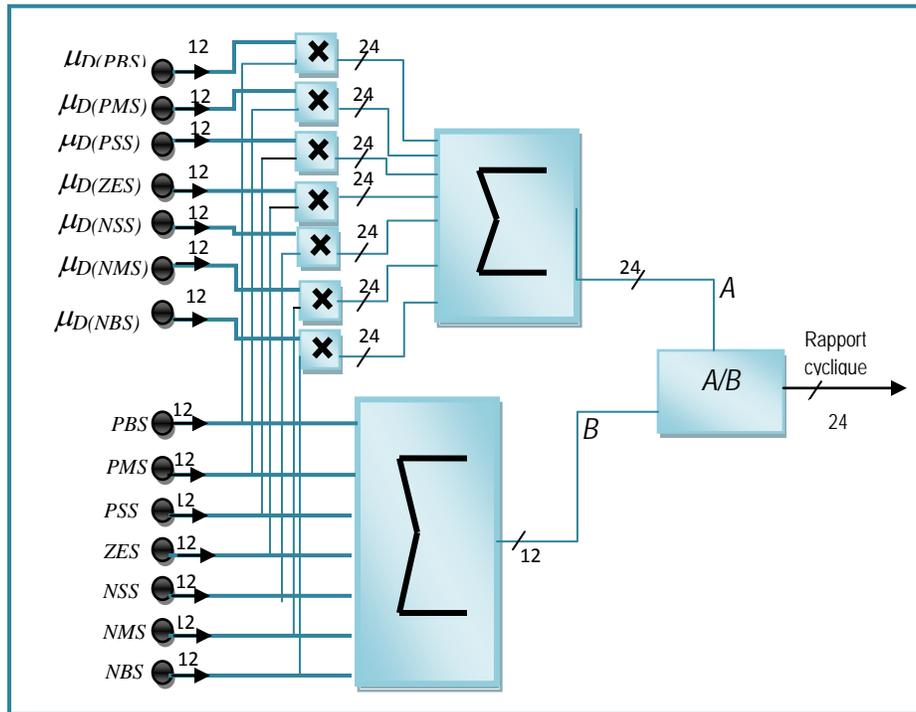


Figure IV.15. Réalisation de la défuzzification

III. Conclusion :

Nous avons proposé une architecture simple pour l'implémentation de l'algorithme du régulateur flou à sept fonctions d'appartenance. Cette implémentation contient essentiellement 3 modules : module de calcul des fonctions d'appartenances, module de calcul de l'inférence, module de réalisation de la défuzzification.

La synthèse matériel de l'algorithme proposé est effectué par le System Generator en utilisant le code VHDL à travers des black box. Le routage et l'implantation sur FPGA de type Spartan3E a été effectué par le ISE fundation.

L'utilisation de l'outil de conception haut niveau 'System Generator' est très bénéfique pour la vérification du comportement de l'algorithme sur Simulink. Les simulations effectuées permettent de concevoir un algorithme efficace avec un minimum possible de porte logique.

Enfin nous avons constaté que l'architecture proposée pour l'implémentation du contrôleur MPPT flou reproduit les résultats obtenus par simulation.

Cette étude a été centrée sur l'amélioration des performances et du rendement d'un système photovoltaïque. L'objectif principal était de trouver un algorithme efficace et optimal permettant d'extraire le maximum de puissance disponible à partir du générateur photovoltaïque et de l'implémenter sur un circuit FPGA.

Ce présent travail est divisé en quatre chapitres :

Dans le premier chapitre, nous avons étudié l'effet photovoltaïque où nous avons expliqué le principe de conversion ainsi l'analyse du générateur photovoltaïque GPV et les différents groupements possibles des cellules photopiles. Ensuite, nous avons cité les différents systèmes de protection du GPV lors d'une non-homogénéité de l'éclairement sur ces cellules. La modélisation mathématique du GPV était essentielle dans l'étude du système photovoltaïque en se basant sur le modèle de la cellule à une seule diode. Par la suite, une simulation du comportement du GPV a été faite sous Matlab et une interface graphique a été développée afin de montrer l'influence des changements climatiques sur l'énergie produite par le GPV. A cet effet, différentes méthodes de poursuite du point de puissance maximale ont été exposées.

Le deuxième chapitre a été réparti en deux parties, dans la première partie nous avons synthétisé le MPPT flou en rappelant les éléments de base relatifs à la théorie de la logique floue, les définitions de base sur les variables linguistiques, les sous-ensembles flous, ainsi les différentes étapes de conception d'un contrôleur flou.

Par la suite, nous avons constaté la nécessité d'une adaptation d'impédance entre le *GPV* et sa charge lorsque le panneau *PV* est à sa puissance maximale pour une irradiation solaire et température données, Cette puissance est alors quasiment transférée à la charge en ajustant le rapport cyclique *D* du signal de commande de l'interface d'énergie d'un convertisseur DC/DC boost, ce dernier était l'objet de la deuxième partie de ce chapitre, où nous avons étudié son principe de fonctionnement, ainsi nous avons traité de manière approfondie son modèle mathématique linéarisé.

Dans le troisième chapitre une panoplie de tests a été présentée pour mettre l'algorithme MPPT en épreuve dans le cas de conditions climatiques standards et variables. Les résultats des tests ont alors exhibé le défaut principal de l'algorithme P&O qui est sa mauvaise interprétation de la localisation du MPP lors d'un changement brusque des conditions

climatiques. Par contre les résultats montrent que MPPT flou a permis de passer outre ce problème, cela est démontré par sa robustesse, sa réponse rapide et sa faible erreur en régime permanent.

Nous avons constaté que le choix du nombre et la forme des fonctions d'appartenance des sous-ensembles flous utilisés pour chaque variable linguistique ainsi la répartition de ces valeurs sur l'univers de discours influent explicitement sur les performances du contrôleur. Les gains de normalisations affectent aussi les performances de la réponse du système en régime transitoire. De plus, les gains de sorties du contrôleur jouent un rôle très important dans la stabilité du système et l'élimination de l'erreur en régime permanent.

Dans le quatrième chapitre, nous avons proposé une architecture simple pour l'implémentation de l'algorithme du régulateur flou à sept fonctions d'appartenance. Cette implémentation contient essentiellement 3 modules : module de calcul des fonctions d'appartenances, module de calcul de l'inférence, module de réalisation de la défuzzification.

La synthèse matériel de l'algorithme proposé est effectuée par le System Generator en utilisant le code VHDL à travers des black box. Le routage et l'implantation sur FPGA de type Spartan3E a été effectuée par le ISE foundation.

L'utilisation de l'outil de conception haut niveau 'System Generator' est très bénéfique pour la vérification du comportement de l'algorithme sur Simulink. Les simulations effectuées permettent de concevoir un algorithme efficace avec un minimum possible de porte logique.

- [1]: Z. Salameh and D. Taylor, : “Step-up Maximum Power Point Tracker for Photovoltaic Arrays,” Solar Energy, Vol.44, No.1, pp.57-61(1990) [3] T. Ohnishi, S. Takata: “Comparisons of Maximum Power Tracking Strategy of Solar Cell Output and Control Characteristics Using Step Up/Down Chopper Circuit”, Trans. IEEJ, 112-D, 3, 250/257(1992)
- [2]: K. K. Tse, M. T. Ho, H. Chung, and S. Y. Hui, "A Novel Maximum Power Point Tracker for PV Panels Using Switching Frequency Modulation". IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS, VOL. 17, NO. 6, NOVEMBER 2002
- [3]: M.A.S Masoum and M.Sarvi, "Design, simulation and construction of a new fuzzy-based maximum power point tracker for photovoltaic applications" et C.Y. Won, D.H.Kim, S.C.Kim, W.S.Kim, H.S.Kim, " A New Maximum Power Point Tracker of Photovoltaic Arrays using Fuzzy Controller", Proceedings of the IEEE Power Elec. Specialist Temp Conference, pp.396-403, 1994
- [4] : W.Xiao, "A Modified Adaptive Hill Climbing Maximum Power Point Tracking (MPPT) Control Method For Photovoltaic Power Systems", The University of British Columbia, 2003
- [5] : H. MOURAD, «Mise en œuvre d’une méthodologie pour l’étude de rayonnement parasite basse fréquence de panneaux solaires sur des capteurs situés en zone proche », Thèse de Doctorat, Université de Limoges, 2007.
- [6] : b. Adrien, e. Jeremy, f. Celine, j. Mathieu, m. Sullivan, m. Aurelie, p. Van cang thomas, p. Valentin, t. Clement, v. Noemie, « les panneaux solaires », mémoire scientifique, polytech (paris-sud), 2009
- [7]: Antonio Luque and Steven Hegedus, "Handbook of Photovoltaic Science and Engineering", John Wiley & Sons Ltd, 2003
- [8]: M. BOUKLI Hacnomar, thèse de magister, «Conception et réalisation d’un générateur photovoltaïque muni d’un convertisseur MPPT pour une meilleure gestion énergétique
- [9]: Akihiro Oi, "Design and Simulation of Photovoltaic Water Pumping System", Faculty of California Polytechnic State University, 2005
- [10] : Oudia mohamed, boutiche ahmed «étude d’un système photovoltaïque connecté aux réseaux locaux», mémoire d’ingénieur, USTHB 2007
- [11] : **B. M. Bernadette**, « Logique Floue Principes Aide à la Décision ».
- [12] : **F. Sur**, « Présentation de La Logique Floue ».
- [13] : F.ALOUAN « Commande par Logique Floue Appliquée aux pendules inversés et au Simulateur de Vol d’Hélicoptère : Simulation et Expérimentation » Thèse de magistère. U.M.B.M, juin 2006.
- [14]: Ait,M. Cheikh,S. C.Larbes, “Maximum power point tracking using a fuzzy logic control scheme”. September 2007
- [15]: Salas V, Olias E, Barrado A, Lazaro A. *Review of the maximum power point tracking algorithms for standalone photovoltaic systems*. Solar Energy Materials & Solar Cells 2006;90:1555–78.,2

[16]: BRASAI.R Elaboration d'éléments optimisés de commandes vectorielles d'une machine asynchrone et leur implémentation sur un circuit à architecture reconfigurable de type FPGA, université de boumerdés 2007 .