

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

جامعة سعد دحلب البليدة
UNIVERSITE SAAD DAHLEB DE BLIDA



كلية الهندسة - دائرة الإلكترونيك
FACULTE DES SCIENCES DE L'INGENIEUR
DEPARTEMENT D'ELECTRONIQUE

**MEMOIRE DE
PROJET DE FIN D'ETUDES
POUR L'OBTENTION DU DIPLOME DE
Master en Electronique
Option : Système de Vision Robotique**

Présenté par : KABACHE SAMIRA

Thème :

IMPLÉMENTATION DU CONTROLEUR LOGIQUE

FLOU D'UNE

COMMANDE MPPT SUR CIRCUIT FPGA

Proposé par:

❖ Mr R.BRADAI

2012/2013

REMERCIEMENTS

Je remercie en premier lieu Dieu qui m'a donné ce bien là et pour que je vie ce jour et la force et la patience pour terminer ce travail.

Je tiens à exprimer mes remerciements à mon encadreur Dr : R. BARADA qui a proposé et a dirigé ce travail.

Je remercie également tous les membres du jury qui ont accepté de juger notre travail.

Au département d'électronique de l'université de BLIDA qui ont accepté de participer à la valorisation de ce travail.

Nos vifs remerciements à tous mes enseignants du primaire à l'université.

Enfin, je remercie tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à ma formation et à l'élaboration de ce modeste mémoire.

Samira Kabache

*A mes chers parents
A mon cher frère Nadir et sa femme
A mon cher frère Khaled et mes sœurs :
Noura, saliha, anissa
A mes amiessurtout :
Hadjira, noussiba, sihem
Je dédie ce travail*

Résumé

Ce travail se concentre sur la poursuite de suivi du point de puissance maximale (MPPT) pour les générateurs photovoltaïques. Pour cela, nous allons utiliser une technique intelligente: commande floue. Le principal objectif de ces contrôles est d'extraire, pour des conditions de chargement et de données atmosphériques, la puissance maximale des modules photovoltaïques.

Dans ce travail, nous présentons le développement de ces contrôles et de leur mise en œuvre sur un circuit "FPGA Xilinx SPARTRAN 3E". En effet, au cours de ce travail, toutes les étapes utiles pour implémenter le contrôleur logique sur la cible FPGA.

Mots clés : Système photovoltaïque, Poursuite du point de puissance maximale : MPPT, contrôleur flou : FLC, circuit logiques programmable de type : FPGA.

Abstract:

This work focuses on the pursuit of maximum power point tracking (MPPT) for photovoltaic generators. For this, we will use intelligent technique: fuzzy control. The main objective of these controls is to extract, for loading conditions and atmospheric data, the maximum power of photovoltaic modules.

In this work, we present the development of these controls and their implementation on a "FPGA Xilinx SPARTRAN 3E". In did, we will represent all steps taken to implement the fuzzy control on the circuit FPGA.

Keywords: Photovoltaic, MPPT, Neuronal networks, Fuzzy logic: FLC, FPGA circuit.

ملخص:

يركز هذا العمل على السعي لتتبع نقطة الإستطاعة الأعظمية المفرغة عن طريق المولد الكهروضوئي. لهذا فإننا نستخدم تقنية ذكية : مسيطر غامض، و الغرض الرئيسي لهذه التقنية هو التتبع التلقائي و الفوري لنقطة الإستطاعة العظمى "MMP" في هذا العمل نقوم ببرمجة المسيطر الغامض على دارة " مصفوفة البوابات المنطقية القابلة للبرمجة الحلقية" من نوع FPGA. محتوى هذا العمل يمثل جميع الخطوات المتبعة لتنفيذ المسيطر الغامض على دارة FPGA.

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

Table des matières

Remerciement

Dédicace

Résumé

Sommaire

Liste des figures

Liste des tableaux

Notations et Symboles

Introduction Générale1

Chapitre I : Générateur photovoltaïque et commande MPPT

I.1. Introduction 5

I.2. Cellule Solaire et panneaux photovoltaïque 5

I.2.1 Principe de la conversion photovoltaïque5

I.2.2. Caractéristique électrique étendue et modélisation mathématique7

I.2.3. Technologie et rendement des cellules photovoltaïques..... 13

I.2.3.1. Technologie des cellules photovoltaïques13

I.2.3.2. Rendement des cellules photovoltaïques 14

I.2.4. Le générateur photovoltaïque (mise en "série/parallèle" des cellules)...15

I.2.5. Influence des paramètres externes sur la caractéristique d'un *GPV*....16

I.2.6. Fonctionnement à puissance maximale18

I.3. Techniques et plateformes d'implémentation pour les méthodes de commande MPPT.....	21
I. 3. 1. Spécification des performances des Systèmes du Contrôle MPPT...	22
I.3.2. Les méthodes de poursuite du point de puissance maximale.....	23
I.3.2.1. La méthode de perturbation et d'observation (P & O) améliorée ...	24
I.3.2.2. La méthode de perturbation et d'observation (P & O) améliorée.....	28
I.3.2.3. Méthode "MPPT" basée sur la logique flou.....	29
I.4. conclusion.....	32

Chapitre II : Conception optimisée d'un contrôleur « MPPT » flou

II.1. Introduction.....	33
II.2. Notions de bases de la logique floue.....	34
II.2.1. La théorie des ensembles flous	34
II.2.2. Différence entre ensemble flou et ensemble booléen.....	34
II.2.3. Variables linguistiques.....	35
II.2.4. définition.....	36
II.2.5. Caractéristiques d'un ensemble flou.....	36
II.2.6. Opérations sur les ensembles flous.....	36
II.2.7. relations floues.....	40
II. 3. La Commande En Logique Floue.....	41
II.3.1. Les différentes étapes de la commande floue.....	42
II. 3. 1. a. Mise en forme des entrées, normalisation	44
II. 3. 1. b. Fuzzification.....	44
II. 3. 1. c. Traitement des prémisses composées.....	46

II. 3. 1. d. Inférence floue	46
II. 3. 1. e. Agrégation des règles	48
II. 3. 1. f. Défuzzification.....	49
II. 3. 2. g. Dénormalisation.....	51
II.4. Conclusion.....	51
Chapitre III : Implémentation RLF sur FPGA	
III.1. Introduction.....	52
III.2. Technologie et circuits FPGA.....	52
III.2.1. Caractéristiques des circuits FPGAs.....	53
III.2.2. Architecture interne des FPGAs.....	53
III.3. Langage de programmation " <i>VHDL</i> " et outils de développements.....	55
III.3.1. langage de programmation " <i>VHDL</i> ".....	55
III.3.1. a. Applications du langage <i>VHDL</i>	55
III. 3. 1. b. Utilisation du langage <i>VHDL</i> pour la synthèse.....	56
III.4. Implémentation du régulateur flou sur FPGA.....	58
III.4.1. synthèse de régulateur flou.....	58
III. 4. 1. a. Fuzzification.....	58
III. 4. 1. b. Règles d'inférence, agrégation.....	62
III.4 .1.c. Defuzzification.....	65
III.5. Implantation sur FPGA.....	65
III.5.1. Module de calcul des fonctions d'appartenances.....	66
III.5.1. Module de calcul de l'inférence.....	73
III.5.1.a. Module de calcule des règles d'inférences.....	70

III.5.1.b. Module de réalisation de la fonction ‘ou’	73
III.5.1.c. Module de réalisation de la défuzzification.....	75
III.6. Conclusion	78
Conclusion générale	79
Bibliographie	

Introduction générale

Au cours du dernier siècle, la consommation d'énergie a considérablement augmenté suite à une l'industrialisation massive. Les prévisions des besoins en énergie pour les années à venir ne font que confirmer, voire amplifier, cette tendance. Le secteur de la génération électrique est le premier consommateur de cette énergie et plus de 80% de ses sources actuelles sont soit d'origine *nucléaire* ou tirée des combustibles *fossiles* (pétrole, charbon, gaz naturel) [1]. Ces ressources-là, communément baptisées : "conventionnelles" et, desquelles notre mode de vie est devenu dépendant, sont non-renouvelables. C'est-à-dire qu'elles ne peuvent se régénérer par elles-mêmes à un rythme plus rapide que la consommation qui en est faite par les humains. Ce qui fait que les besoins, inexorablement croissants qu'observe la planète, entraîneront à la raréfaction rapide de ces ressources d'ici quelques temps. Parallèlement à cela, d'autres problèmes, intrinsèquement liés à cette consommation frénétique d'énergie, ont marqué leur émergence durant les deux dernières décennies et qui deviennent de plus en plus pressants à savoir:

- La flambée des cours du brut,
- Les difficultés d'extraction et d'acheminement en partie liés aux problèmes géopolitiques,
- La demande importante des économies émergentes,
- Les dangers que font courir à l'environnement la production et la consommation de ces sources d'énergie: Les énergies fossiles sont également responsables de grandes pollutions : pollutions des sols et des nappes phréatiques, pollutions des eaux (contamination, marées noires...) et pollutions atmosphériques (pluies acides, rupture de la couche d'ozone, changements climatiques liés à l'augmentation de l'effet de serre...); le nucléaire n'échappe tout de même pas à ces préoccupations d'ordre

environnemental : contamination, stockage des déchets radioactifs, risques d'accidents...

Ces éléments alarmistes ou pour le moins préoccupants ont contribué à une prise de conscience généralisée des dirigeants de nombreux pays dans le monde, et nous invite à réfléchir, chacun à son niveau, sur les différentes pistes d'énergies alternatives susceptibles d'assouvir les besoins croissants de l'humanité en matière d'énergie et plus précisément d'électricité, tout en limitant les impacts négatifs sur l'environnement et la sécurité énergétique. Cette nouvelle situation était naturellement propice à l'essor d'autres types d'énergies dites "renouvelables" à la fois propres, illimitées (renouvelable) et sans danger et dont on suit désormais les promesses et les progrès avec une acuité et une bienveillance redoublées. Certaines de ces nouvelles énergies ont commencé à être mises en œuvre de façon significative ; d'autres sont à l'état de recherche et développement. Toutes sont susceptibles de progrès techniques et économiques dans les décennies à venir.

Dans ce contexte, l'énergie photovoltaïque apparaît comme une source d'énergie renouvelable incontournable et apte à couvrir dans l'avenir une proportion significative et croissante des besoins énergétiques, aux côtés d'autres sources d'énergie. D'autant plus que des projets de centrales solaires pourraient produire autant d'électricité que le nucléaire et les hydrocarbures.

De nos jours, la filière photovoltaïque a atteint un certain stade de maturité et de crédibilité industrielle avec des atouts importants au niveau de la technologie. Sur le plan de la recherche, il reste encore des efforts à faire pour résoudre quelques problèmes d'ordre techniques qui sont souvent avancée comme un frein important au développement de cette ressource énergétique, il s'agit surtout de :

- **Le faible rendement de la cellule photovoltaïque** : Le rendement de la conversion énergétique d'une cellule qui est à près de 25% en laboratoire

et de 16 à 17% en production industrielle sans concentration optique [3]. Pour essayer d'amenuiser cette tare, les chercheurs essayent généralement de suivre les deux pistes:

- Soit augmenter le rendement énergétique des panneaux solaires et ce en adoptant des technologies récentes de très haut niveau lors de la fabrication des cellules photovoltaïques,
- Ou maximiser la puissance instantanée délivrée par le panneau solaire.

Les systèmes photovoltaïques (PV) offrent une solution très concurrentielle. Pour surmonter le problème de rendement des panneaux solaires et obtenir un rendement maximum, il est nécessaire d'optimiser la conception de toutes les parties du système PV.

Une caractéristique importante des modules photovoltaïques est que la puissance maximale disponible est fournie seulement en un seul point de fonctionnement, appelé Maximum Power Point (MPP), localisé par une tension et un courant connus.

Par ailleurs, la position de ce point MPP n'est pas fixe mais elle se déplace en fonction de l'ensoleillement et de la température des cellules solaires du module ainsi que de l'utilisation. A cause du coût relativement onéreux de ce genre d'énergie on doit à tout instant extraire le maximum possible de la puissance disponible des modules photovoltaïques. Cela nécessite un mécanisme de poursuite (Tracking) de l'MPP appelé 'maximum power point tracking' (MPPT) afin que la puissance maximale soit générée en permanence.

Un nombre important de technique de commande MPPT ont été élaboré depuis les années 70, commençant par des techniques simples comme les contrôleurs MPPT basés sur le retour d'état de la tension et du courant, aux contrôleurs plus performant utilisant des algorithmes pour calculer MPP du GPV, parmi les techniques les plus utilisées :

- Perturbation et Observation (P&O).
- Incrémentation de la Conductance (IC).

Ces dernières années des techniques de commandes plus robuste ont été associées à la commande MPPT telle que la logique floue afin d'augmenter le rendement des panneaux solaires.

L'objectif de ce mémoire est l'implémentation de la commande MMPT sur circuit FPGA utilisant le contrôleur logique flou.

Le mémoire est structuré de la manière suivante:

- ✚ Dans le premier chapitre, on fait une généralité sur les générateurs photovoltaïques. On présente le principe de l'effet photovoltaïque, la cellule PV et ses paramètres, en suite on fait un rappel sur les générateurs PV et leurs performances, et nous mettrons l'accent sur les différents types de commandes MPPT rencontrées dans la littérature, tout en soulignant celles basées sur les techniques de contrôleur logique floue.
- ✚ 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.
- ✚ Le troisième chapitre sera dédié à l'implémentation hardware du contrôleur, conçu lors du deuxième chapitre, sur un circuit reconfigurable *FPGA*. On traitera tout d'abord l'architecture interne et les caractéristiques électriques de ce dernier, avant de passer à l'implémentation. Cette tâche d'implémentation sera précédée d'une petite introduction des outils logiciels utilisés pour faire réussir cette étape. Il s'agira surtout du langage de description matériel *VHDL* et de l'outil de développement *ISE* de Xilinx.
- ✚ A la fin, on termine ce mémoire par une conclusion générale.

Liste des figures

Figure	Titre	Page
Figure (I. 1)	Processus qui ont lieu dans une cellule PV irradiée.	06
Figure (I. 2)	caractéristique étendue d'une cellule photovoltaïque.	07
Figure (I. 3)	Schéma électrique équivalent d'une cellule PV.	08
Figure (I. 4)	Schéma électrique équivalent d'une cellule PV.	10
Figure (I. 5)	Association des cellules PV.	16
Figure (I. 6)	Caractéristique d'un groupement de n cellules identiques. (a) en série, (b) parallèle.	16
Figure (I. 7)	Influence de l'irradiation solaire.	17
Figure (I. 8)	Influence de la température.	18
Figure (I. 9)	Intersection de la caractéristique de charge et de génération.	18
Figure (I. 10)	Variation des positions des points de puissance maximale en fonction de l'irradiation solaire.	20
Figure (I. 11)	Variation des positions des points de puissance maximale en fonction de la température.	21
Figure (I. 12)	Le schéma bloc du système de contrôle avec rétroaction de puissance.	25
Figure (I.13)	Organigramme de l'algorithme (P & O).	27
Figure (I.14)	Écart par rapport au chemin réel du "PPM" causé par l'algorithme P & O suite à une augmentation rapide d'irradiation solaire.	27
Figure (I.15)	Organigramme de la méthode "MPPT" à base d'algorithme (P&O) amélioré.	28
Figure (I.16)	Fonctions d'appartenance pour les entrées/sorties d'un contrôleur flou.	29

Figure (II. 1)	Ensemble booléen et ensemble flou.	35
Figure (II. 2)	Une personne mesurant 1.36 m est petite avec un degré d'appartenance 0.4 et moyenne avec un degré de 0.6	36
Figure (II. 3)	Support, noyau, hauteur et α -coupe d'un ensemble flou.	37
Figure (II. 4)	Singleton flou.	37
Figure (II. 5)	Exemple de partition floue.	38
Figure (II. 6)	Structure de base d'un contrôleur flou.	42
Figure (II. 7)	Conversion numérique symbolique.	45
Figure (II. 8)	Exemple de fonctions d'appartenance.	45
Figure (II. 9)	Exemple de modificateurs linguistiques.	46
Figure (II.10)	Illustration de la méthode de Mamdani.	49
Figure (II. 11)	Défuzzification par un centre de gravité.	50
Figure (II. 12)	Défuzzification par un centre des aires.	50
Figure (II. 13)	Défuzzification par un centre des maxima.	51
Figure (III. 1)	Architecture interne d'un FPGA.	54
Figure (III. 2)	Structure interne d'un bloc circuit configurable (CLB).	54
Figure (III. 3)	Structure interne d'un bloc d'entrée sortie (<i>IOB</i>).	55
Figure (III. 4)	Déroulement des différentes étapes de développement d'un projet en <i>VHDL</i> .	57
Figure (III .5)	Algorithme proposé pour l'implémentation du régulateur flou.	66
Figure (III.6)	Implémentation de la fonction d'appartenance DP.	67
Figure (III.7)	Simulation comportementale de la fonction d'appartenance DP sur FPGA.	68
Figure (III .8)	Simulation comportementale de la fonction d'appartenance DP sous MATLAB.	68

Liste des figures

Figure (III.9)	Implémentation de la fonction d'appartenance DI.	69
Figure (III.10)	Simulation comportementale de la fonction d'appartenance DI sur FPGA.	70
Figure (III.11)	Simulation comportementale de la fonction d'appartenance DI sous MATLAB.	70
Figure (III.12)	Implémentation de la fonction d'appartenance DPM.	71
Figure (III.13)	Implémentation de la fonction d'appartenance DPM sur FPGA.	72
Figure (III.14)	Simulation comportementale de la fonction d'appartenance DPM sous MATLAB.	72
Figure (III.15)	Organigramme représente la fonction MIN pour le résultat règle 1.	73
Figure (III.16)	Organigramme représente la fonction Max pour le résultat MP.	73
Figure (III.17)	Implémentation du module de calcul de l'inférence.	74
Figure (III.18)	Fonctions d'appartenances de la grandeur de sortie.	75
Figure (III.19)	Organigramme représente le module de la défuzzification.	76
Figure (III.20)	Résultat de simulation sur FPGA.	77
Figure (III.21)	Résultat de simulation sous MATLAB.	77

Notation et symbole :

ASIC : Application Specific Integrated Circuit.

BLC : Bloc de logique combinatoire.

CLB : Configurable Logical Blocks

COG : Centre of Gravity

D : The duty cycle ratio

DC/DC: DC to DC Converter

E, ΔE :Error and Change in Error

FLC : Fuzzy Logic Controller

FPGA: Field Programmable Gate Array.

G : Solar Irradiation (W/m^2)

GPV : Générateur Photovoltaïque

I_m : Measured current (A)

IOB : Input/Output Blocks

ISE : Integrated Software Environment

LCA : (logic cells arrays)

MOSFET: Metal-Oxide Semiconductor Field-Effect Transistor

MPPT : Maximum Power Point Tracking

NEF : Nombre d'ensemble flous

P : Proportionnel.

P & O : Perturb and Observe

PD : Proportionnel Dérivatif.

PE : Processeur Élémentaire.

PI : Proportionnel Intégral.

PID : Proportionnel Intégral Dérivatif.

P_{max} : Maximum power (W)

PPM : Point correspondant à la Puissance Maximale

PV : Photovoltaic

PWM : Pulse Width Modulation

T : Temperature (°C)

VHDL : Very high speed Hardware Description Language

V_m: Measured voltage (V)

V_{max} : Maximum voltage (V)

V_o: Output voltage (V)

V_P : Tension délivrée à la sortie du panneau photovoltaïque (V)

I_{PV} : Courant délivré à la sortie du panneau photovoltaïque (A)

II.1. Introduction

Comme on a vu dans le chapitre précédent, les caractéristiques d'un module solaire montrent bien que la puissance maximale générée dépend fortement de l'intensité des radiations solaires ainsi que de la température.

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

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

II.2. Techniques et plateformes d'implémentation pour les méthodes de commande MPPT

La maximisation de la puissance extraite du générateur photovoltaïque est généralement effectuée au moyen des systèmes mécaniques et/ou électroniques. Dans le premier cas, les systèmes de poursuite solaire essayent d'optimiser l'angle d'incidence du rayonnement solaire sur le panneau PV, alors que dans l'approche électronique, des contrôleurs électronique assure la poursuite du point de fonctionnement correspondant à la puissance maximale produite par le panneau à un moment donné et réalise en conséquence une adaptation d'impédance apparente entre le générateur et la charge qui lui est associée. Les systèmes mécaniques et électroniques de maximisation de la puissance sont compatibles et complémentaires et nécessitent souvent une mesure des conditions environnementales externes pour accomplir la tâche qui leur est

confiée. Dans cette deuxième partie de ce chapitre, nous allons essayer de faire le point sur l'aspect électronique de cette question en abordant Le concept de la *poursuite du point de puissance maximale* (MPPT : Maximum Power Point Tracking) d'un panneau photovoltaïque donné, a commencé à susciter l'intérêt des scientifiques et des exploitants de l'énergie solaire depuis 1968.

II. 2. 1. Spécification des performances des Systèmes du Contrôle MPPT

Avant d'entamer les détails techniques des différentes commandes "*MPPT*" publiées dans la littérature spécialisée et partant du principe que toute commande "*MPPT*" est un système du contrôle au sens propre du terme, nous avons apprécié l'idée d'introduire les concepts et les exigences suivants. Durant le reste de ce chapitre, on va y revenir souvent, vu que c'est des notions cruciales pour la description et la conception efficace du système "*MPPT*" qui seront examinées dès lors.

a) stabilité :

L'exigence la plus fondamentale durant la conception d'un système du contrôle dynamique est la stabilité du système. Les convertisseurs "*DC-DC*" en mode de commutation sont des systèmes non-linéaires et se comportent très différemment de systèmes linéaires. La caractéristique de sortie du panneau solaire est aussi non-linéaire. Donc la stabilité est un facteur très important pour évaluer un système de contrôle PV-MPPT qui a trait avec la non-linéarité.

b) Réponse dynamique :

Un bon l'algorithme de contrôle "*MPPT*" a besoin d'une réponse rapide vis-à-vis du changement rapide des conditions atmosphériques, température de la cellule et l'irradiation solaire. Plus est la poursuite rapide, plus les pertes en termes d'énergie solaire sont minimales.

c) Erreur du régime établi :

Au moment où le "PPM" est localisé, ça serait idéal de maintenir le système en opération statique exactement sur ce point. Dans un système "MPPT" réel, une telle situation est impossible à cause de l'algorithme de contrôle MPPT actif et la variation continue des valeurs d'insolation et de température. Donc une faible variation de la puissance de sortie est acceptable (préférée). Elle est directement liée à la valeur efficace de la puissance de conversion du système.

d) Robustesse vis à vis des perturbations :

Les systèmes de contrôle "MPPT" ont besoin de réponse exacte sous des conditions incertaines. Habituellement, les perturbations du système de contrôle, qui sont principalement du bruit d'entrée, l'erreur de la mesure et variation des paramètres, peuvent rendre le système instable. De ce fait, il apparaît qu'il est important de concevoir un système de contrôle "MPPT" robuste par rapport à toutes sortes de perturbations.

e) efficacité dans une large plage de puissance:

Le rapport entre la puissance actuelle du générateur photovoltaïque et la puissance délivrée à la charge est une indication de la réussite de l'installation de génération photovoltaïque utilisée. L'efficacité au niveau éclairage faible est un problème grave pour les conceptions de nombreux "MPPT". Beaucoup de produits ne fonctionnent efficacement que durant la livraison de puissance nominale. Mais en réalité, durant une journée, la puissance PV fournie par le panneau varie dans une large gamme. Un système de contrôle "MPPT" conçu avec succès, doit montrer une bonne performance dans les différents niveaux de puissance.

II.2.2. Les méthodes de poursuite du point de puissance maximale

Il existe environ une vingtaine de méthodes de recherche du point de puissance maximale (MPPT) d'un champ de modules photovoltaïque, dont l'efficacité et la rapidité varient. Parmi ces méthodes on cite :

La méthode dite de la tension de circuit ouvert fractionnaire (Fractional Open-Circuit Voltage) ;

- La méthode dite du courant de court-circuit fractionnaire (Fractional Short-Circuit Current) ;
- Le contrôle du MPP à base de réseaux neuronaux (Neural Network)
- La méthode de retour de l'information de tension (voltage-feedback) ;
- Méthodes à contre réaction de puissance : La puissance extraite du panneau est calculée à partir des mesures de courant I et de tension V du panneau et la multiplication de ces deux grandeurs $P=V.I$. Les méthodes à contre réaction de puissance se basent sur des algorithmes de recherche itérative pour trouver le point de fonctionnement du panneau afin que la puissance générée soit maximale sans interruption de fonctionnement du système.
- La méthode IncCond (Incremental Conductance);
- La méthode de perturbation et d'observation (P&O) ;
- Le contrôle du MPPT à base de logique floue (FuzzyLogic Control)

Dans ce chapitre nous basons sur la méthode de perturbation et d'observation (P&O) et la méthode de logique floue.

II.2.2.1. La méthode de perturbation et d'observation (P & O)

En analysant de près les caractéristiques $P-V$ d'un panneau solaire illustré dans la figure (I. 10), on remarquera facilement que le point de la puissance maximale peut toujours être suivi dans la condition où on garde l'entité (dP/dV) égale à zéro, peu importe ce que soit les valeurs de l'insolation et de la tension de sortie du panneau. Tous les points de puissance maximale locales doivent respecter la même obligation mathématique: $(dP/dV) = 0$. Et la pente de puissance (dP/dV) peut être calculée numériquement via un échantillonnage du courant I et de la tension V à la sortie du panneau et à des intervalles de temps consécutifs $(n - 1)$ et (n) comme suit :

$$\frac{dP(n)}{dV(n)} = \frac{P(n)-P(n-1)}{V(n)-V(n-1)} \quad (\text{II.1})$$

Avec $P(n) = V(n) \cdot I(n)$

La méthode perturbation et observation (*P&O*) est une approche numérique largement utilisée en tant que commande "MPPT". En effet, la méthode *P&O* essaye toujours de faire osciller l'entité (dP/dV) autour de zéro en procédant périodiquement à incrémenter ou décrémenter la tension de sortie du panneau solaire. Si une perturbation donnée conduit à une augmentation (*diminution*) de la puissance de sortie du panneau, la perturbation subséquente est faite de façon à aller dans le même (*contraire*) sens. De cette manière, le suiveur de la crête de la puissance ainsi décrit, cherche en permanence le point de puissance maximale de fonctionnement.

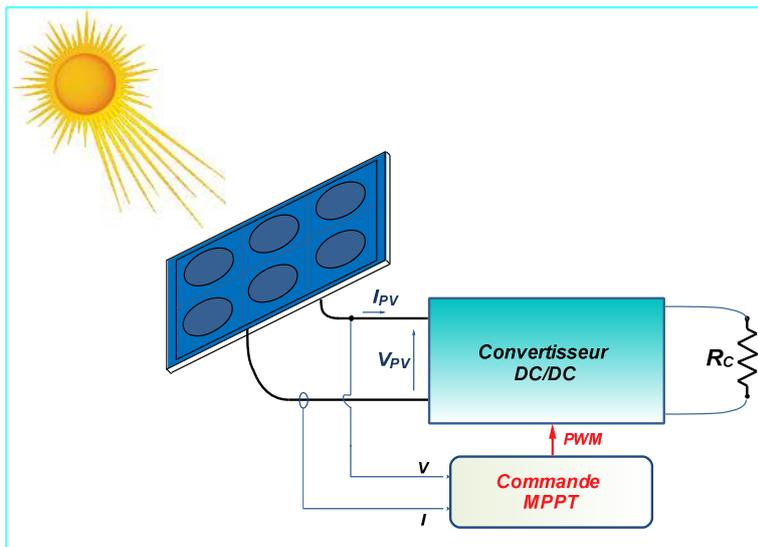


Figure (II. 1) : Le schéma bloc du système de contrôle avec rétroaction de puissance.

Le schéma bloc du système de contrôle peut être illustré par la Figure(II. 1). L'algorithme de contrôle MPPT est basé sur le calcul de la puissance de sortie PV et de la variation de puissance détectée en comparant les niveaux de tension actuelle et les précédentes, afin de calculer une tension de référence (V_{ref}), qui

sert de point de consigne de tension pour la régulation de la tension de sortie du panneau. L'organigramme de la méthode du contrôle de ($P \& O$) est schématisé dans la figure (II.2). Cette méthode de poursuite est très facile pour l'implémentation en tant que commande numérique. Mais il faut toutefois noter que la tension du panneau est perturbée à chaque cycle de contrôle. Par conséquent, le point de fonctionnement va osciller autour du point correspondant à la puissance maximale une fois celui-ci est atteint. Il en résulte une perte dans l'énergie photovoltaïque produite, qui dépend de la largeur du pas d'incrémentations "c", cette dernière entité est considérée comme étant le pas constant de la perturbation. Si la largeur de ce pas est sélectionnée grande, l'algorithme *MPPT* va répondre rapidement aux brusques changements de conditions de fonctionnement, mais ça sera avec de mauvaises performances à l'état d'équilibre. Et dans le cas où la largeur de ce pas est très faible, la perte d'énergie dans des conditions environnementales stables ou qui changent lentement sera réduite, mais le système ne peut pas répondre aux changements rapides de l'ensoleillement ou de la température. Il s'en suit qu'une largeur adaptée de ce pas a besoin d'être réglé expérimentalement dans le cas des systèmes et d'environnements spécifiques.

Cette méthode présente un inconvénient majeur qui se résume au fait que la réponse dynamique est lente en cas de variation rapide des conditions atmosphériques. Quand on a une augmentation soudaine d'insolation solaire, l'algorithme de $P \& O$ réagit comme si l'augmentation est survenue suite à la perturbation précédente de la tension de fonctionnement du panneau. Par conséquent, la perturbation suivante, sera dans le même sens que la précédente. En supposant qu'à un moment donné, le système oscillait autour du "*PPM*", il se peut qu'une perturbation continue dans une même direction conduise à un point de fonctionnement loin du "*PPM*" réel recherché (voir figure ci-dessous). Ce processus continue jusqu'à ce que l'augmentation de l'insolation ralentisse ou prenne fin. La raison de ce problème est que l'augmentation de la puissance de sortie est

dominée par l'insolation plutôt que du signal de contrôle, et à ce moment, le contrôle passe à la mauvaise direction.

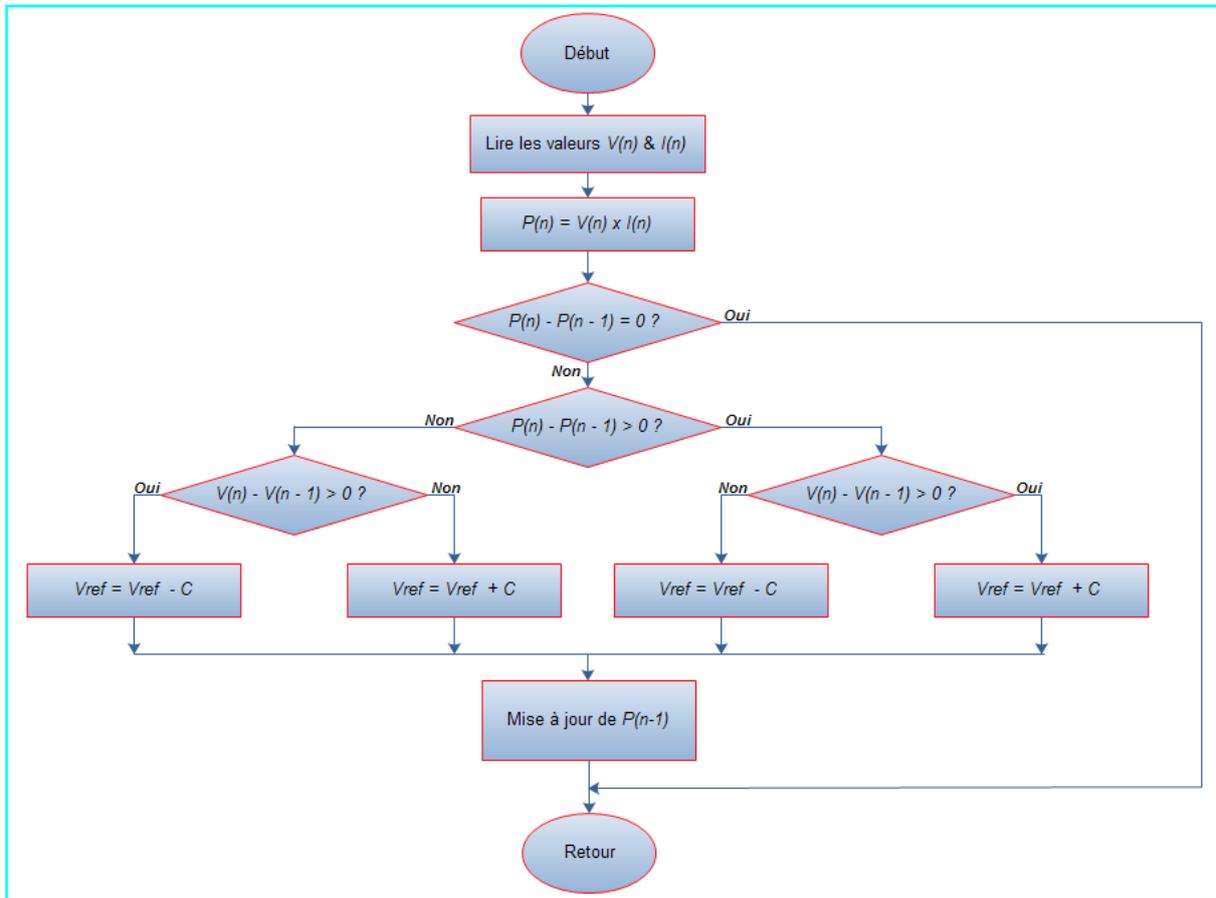


Figure (II.2) : Organigramme de l'algorithme (P & O).

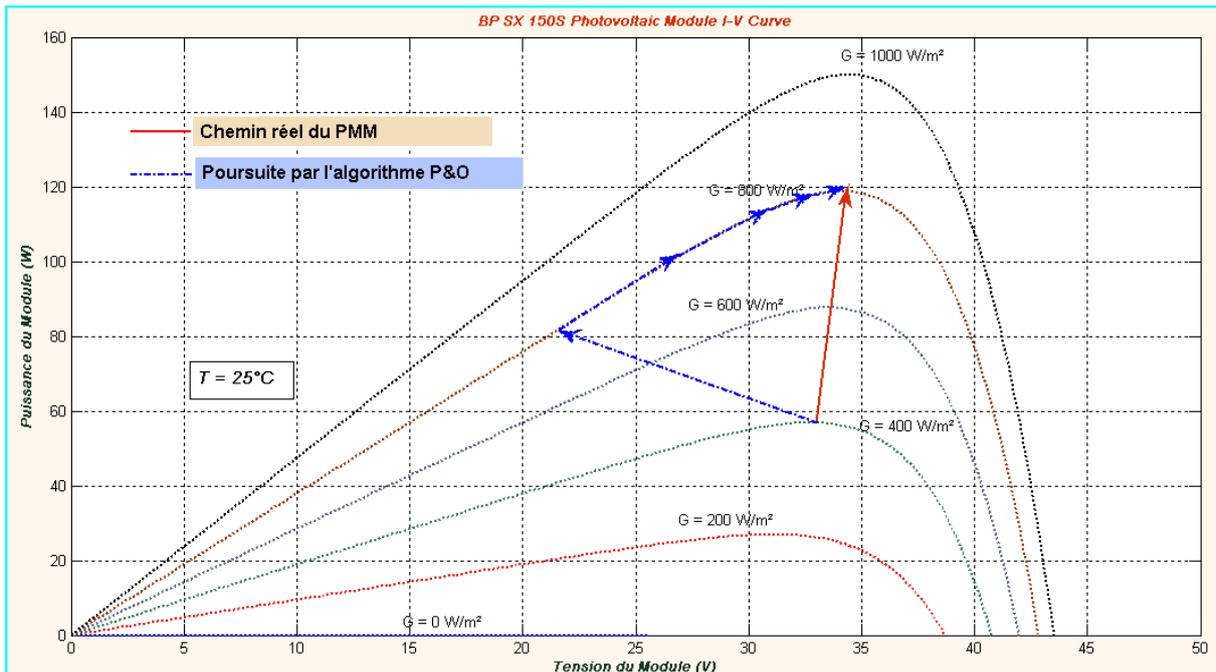


Figure (I.3) : Écart par rapport au chemin réel du "PPM" causé par l'algorithme P & O suite à une augmentation rapide d'irradiation solaire.

II.2.2.2. La méthode de perturbation et d'observation (P & O) améliorée

En 2001, une méthode MPPT basée sur un algorithme (P&O) modifié a été présentée. Elle peut être définie comme une amélioration d'un algorithme (*P&O*) de base, qui ne parvient pas à suivre rapidement le point de puissance maximale. La figure (I.4) présente l'organigramme de l'algorithme de contrôle correspondant. Dans cette version modifiée, une boucle de contrôle d'ensoleillement supplémentaire est ajoutée. S'il y'a un changement soudain et important dans le courant de sortie du panneau, on admet que cela est dû à un changement soudain de l'insolation, qui est causée par un mouvement brusque des nuages. Pour l'aboutissement de la méthode. Un seuil de changement du courant «*e*» doit être défini comme un autre paramètre du système. La direction du courant de sortie du panneau est utilisée pour contrôler directement la direction de perturbation de la tension de sortie du panneau. Avec cette boucle de contrôle supplémentaire, la rapidité de la poursuite a été atteinte. Mais des difficultés concernant le choix du pas de l'incrément de la tension "*c*" et le seuil de variation du courant «*e*» restent toujours non résolues.

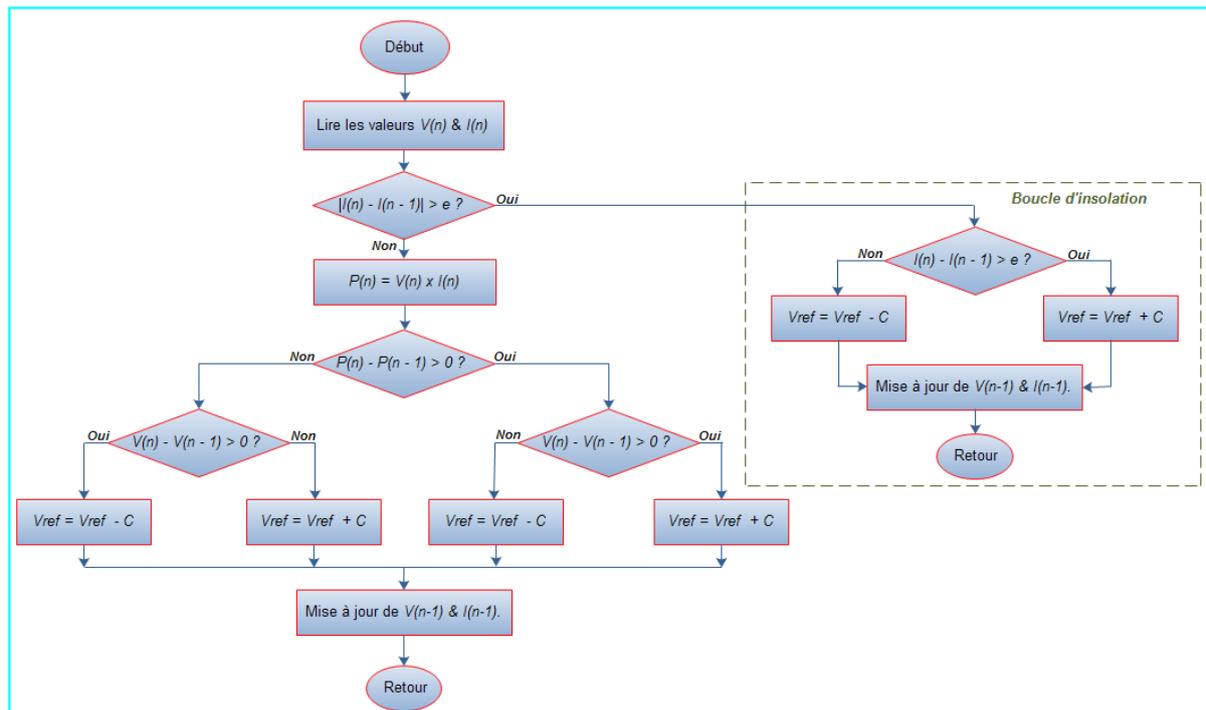


Figure (I.4) : Organigramme de la méthode "MPPT" à base d'algorithme (P&O) amélioré.

II.2.2.3. Méthode "MPPT" basée sur la logique floue

Le contrôle *MPPT* par logique floue a connu un essor considérable durant ces deux dernières années et ce en raison de l'évolution des technologies relatives aux microcontrôleurs et aux DSPs. Les contrôleurs par logique floue ont l'avantage de pouvoir traiter des systèmes non-linéaires sans avoir besoin d'un modèle précis du système pris en considération.

Un contrôleur flou se compose généralement de trois unités de traitement consécutives :

L'étape de fuzzification transforme les variables d'entrée en variables linguistique out en se basant sur les fonctions d'appartenance dont on montre un exemple sur la figure (II.5). Dans ce cas de figure, on distingue cinq niveaux flous, qui sont : **NB** (grand négatif), **NS**(petit négatif), **ZE** (zéro), **PS**(petit positive), et **PB** (grand positif). On note ici, que pour augmenter la précision, un plus grand nombre de niveaux de flou peut être utilisé. Dans cette même figure, le choix des valeurs de a et b est basé sur la gamme de variation des valeurs des

grandeurs d'entrée. Lors de la conception des fonctions d'appartenance, certains niveaux flous spécifiques peuvent être conçu comme étant asymétrique et ce pour leur confier une certaine dominance par rapport aux autres niveaux, en d'autres termes : pour leur donner plus d'importance.

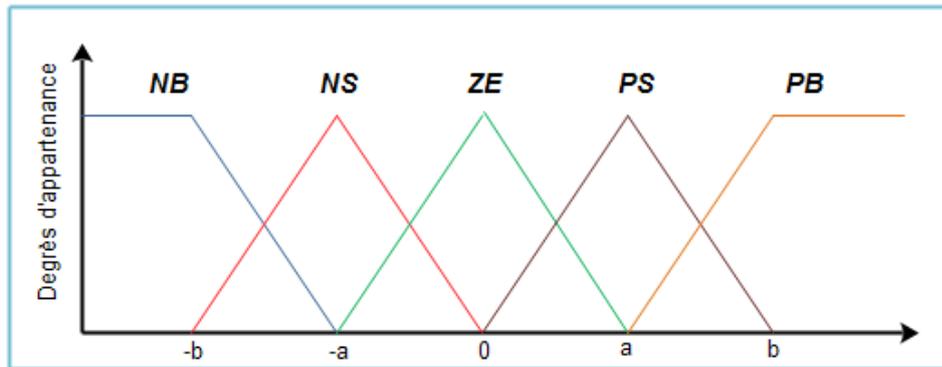


Figure (II.5) : Fonctions d'appartenance pour les entrées/sorties d'un contrôleur flou. D'une manière générale, L'erreur (E) et sa variation (ΔE) sont les deux entrées au contrôleur *MPPT* flou. Ces deux variables, peuvent être calculées selon les préférences des utilisateurs. Mais, puisque (dP/dV) se rapproche de zéro quand le point de fonctionnement s'approche du "*PPM*", l'approximation donnée par l'équation (II.2) est souvent adopté:

$$E(n) = \frac{P(n) - p(n-1)}{V(n) - v(n-1)} \quad (\text{II.2})$$

$$\text{Et } \Delta E(n) = E(n) - E(n-1). \quad (\text{II.3})$$

Alternativement, le signal d'erreur peut également être calculé comme :

$$e = \frac{I}{V} + \frac{dI}{dV} \quad (\text{II.4})$$

La variation d'erreur dans l'équation (II.3) peut également être appliquée à cette dernière équation. L'erreur exprimée dans cette équation n'est que la somme de la conductance instantanée et incrémentale qui s'annule également en se rapprochant du point "*PPM*".

Généralement, la sortie du contrôleur *MPPT* flou est la variation de rapport cyclique du signal de commande du convertisseur de puissance. Cette valeur de

variation dans le rapport cyclique peut être prise dans une table de recherche tels que le tableau (II. 1), juste après à ce que (E) et sa variation (ΔE) sont calculées et converties en variables linguistiques.

E	NB	NB	NB	NB	NB
ΔE					
NB	ZE	ZE	NB	NB	NB
NS	ZE	ZE	NS	NS	NS
ZE	NS	ZE	ZE	ZE	PS
PS	PS	PS	PS	ZE	ZE
PB	PB	PB	PB	ZE	AE

Tableau (II. 1) : Table des règles de base.

Différentes combinaisons de l'erreur (E) et sa variation (ΔE) peuvent être utilisées comme variables linguistiques assignées à (ΔD). Pour un convertisseur élévateur de tension, le tableau (II. 1) peut par exemple être utilisé à cette fin. Sur cette table, on peut à titre indicatif, lire l'information suivante : si le point de fonctionnement est loin à droite du "PPM" actuel, et (E) est NB et (ΔE) est ZE, donc une diminution importante du rapport cyclique est requise pour diminuer la tension de sortie du panneau, ce qui veut dire que (ΔD) devrait être NB pour atteindre le nouveau "PPM".

La valeur de la sortie du contrôleur *MPPT* flou est convertie d'une variable linguistique en une variable numérique en utilisant une fonction d'appartenance des variables de sortie, comme indiqué à la figure (II.5), lors de l'étape de défuzzification. Via l'opération de défuzzification, le contrôleur produit un signal de sortie analogique, celui-ci est par la suite convertie en un signal carré à rapport cyclique variable et ce pour contrôler le convertisseur de puissance du système *MPPT* considéré.

La figure ci-dessous, montre un exemple de mise en œuvre d'un contrôleur *MPPT* à base de logique floue. La tension et le courant à la sortie du panneau, sont mesurés continuellement pour calculer l'erreur (E) et sa variation

(ΔE) conformément à ce qui a été mentionné dans les équations (II.3) et (II.4). Ensuite, ces valeurs réelles sont converties en valeurs floues avant d'être évaluées par une table des règles de base similaire à celle reproduite au tableau(II.1). La sortie produite par ce dernier traitement est sous formes de variables floues reflétant le changement correspondant du rapport-cyclique. Dans l'étape de défuzzification, la valeur numérique (réelle) du rapport-cyclique est déterminée par une dernière conversion de valeurs linguistiques en valeurs réelles exploitables. Enfin, le signal de commutation nécessaire est appliqué au convertisseur *DC-DC* de puissance du système PV pris en compte.

Sous différentes conditions atmosphériques, les contrôleurs *MPPT* flous montrent de bonnes performances. D'autre part, on note que l'efficacité de ce type de contrôleurs dépend de la précision du calcul d'erreur et de ses variations et de la table des règles de base à élaborer par l'utilisateur.

Pour une meilleure efficacité de poursuite du PPM, les fonctions d'appartenance et la table des règles de base doivent être continuellement mis à jour et/ou raffinées si l'on veut atteindre les performances optimales qui peuvent être offertes par ce type de contrôleur. De cette façon, une convergence rapide de vers le "PPM" et une fluctuation minimale autour de ce point peuvent être facilement obtenues. En outre, le suivi de la puissance dépend également du type de fonction d'appartenance choisie.

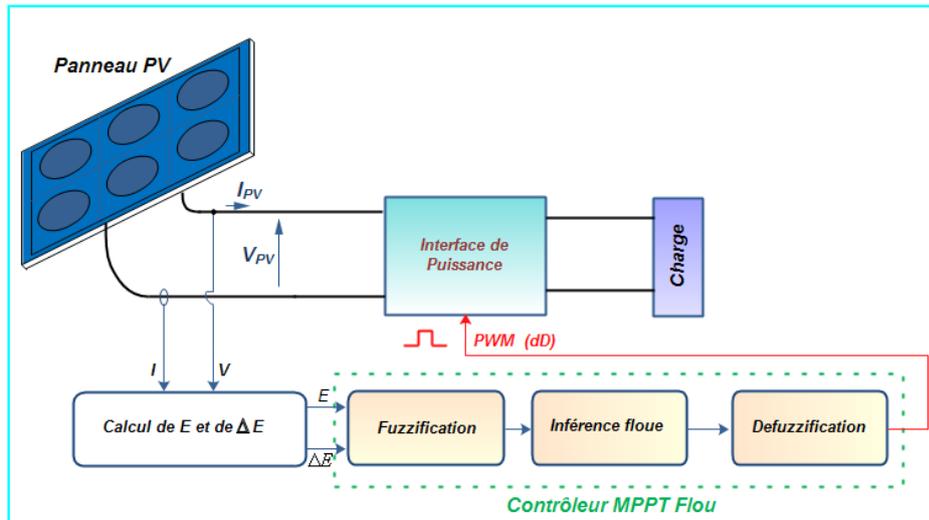
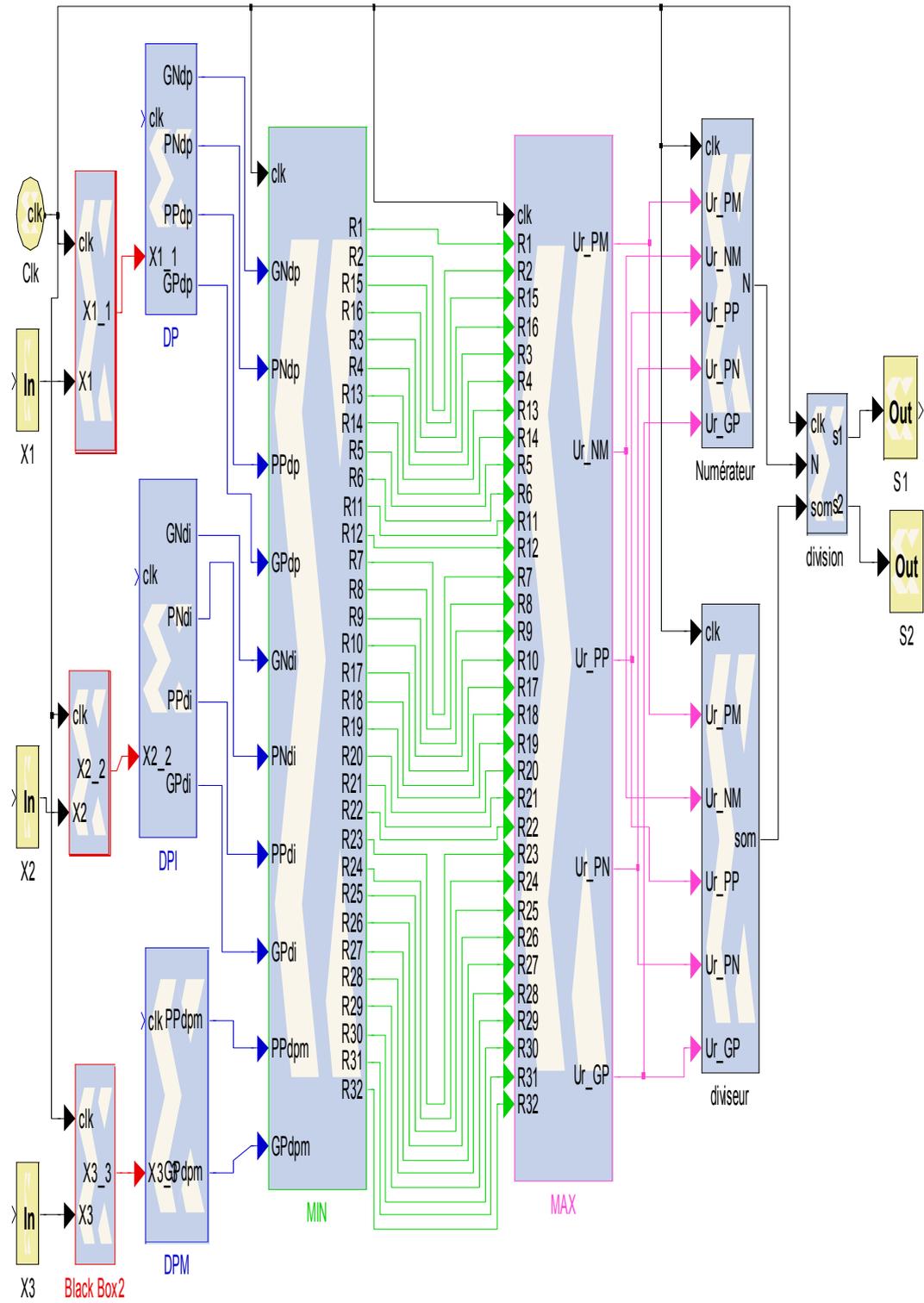


Figure (II.6) : Implémentation type d'un contrôleur "MPPT" flou.

On note par cette fin, que vu les caractéristiques intéressantes dont jouis ce type de contrôleurs et les maintes avantages qu'il peut garantir dans le domaine du solaire photovoltaïque, celui-ci va être examiné avec plus de détails au cours du chapitre N°3.

II.3. Conclusion

Dans ce chapitre, On a étudié quelques méthodes MPPT basées sur contre réaction de puissance, comme la méthode de perturbation et observation. Certes, il y'en a beaucoup d'autres méthodes intéressante qu'on n'a pas cité dans ce rapport mais pour le travail courant, c'est largement suffisant. Ceci a constitué la base théorique pour nos travaux sur une éventuelle contribution d'amélioration dans ce domaine. Nous nous sommes attardés sur la commande MPPT utilisant les contrôleurs flous du fait que le chapitre suivant de ce travail de mémoire, feront l'objet de d'une contribution à l'amélioration de cette technique sur les deux plans : conception et implémentation.



System
Generator

Conclusion générale

L'énergie photovoltaïque apparaît comme une source d'énergie renouvelable incontournable et apte à couvrir dans l'avenir une proportion significative et croissante des besoins énergétiques, aux cotés d'autres sources d'énergie. D'autant plus que des projets de centrales solaires pourraient produire autant d'électricité que le nucléaire et les hydrocarbures.

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

A l'issu d'une étude bibliographique préliminaire, on s'est rendu compte que l'énergie électrique fournie par les générateurs photovoltaïques est caractérisée par un point où la puissance est maximale. Ce point se déplace en fonction des conditions atmosphériques, un mécanisme de poursuite s'avère indispensable pour une efficacité meilleure du générateur. Ce mécanisme de poursuite est le contrôleur *MPPT* qui recueille des informations du panneau et génère en conséquence un signal PWM pour commander un hacheur intercalé entre le générateur photovoltaïque et sa charge. Suite à cela, nous avons investi le monde des contrôleurs *MPPT* et leur rôle et importance dans un système photovoltaïque. Au cours de cette dernière phase, une commande *MPPT* bien particulière a attiré notre attention, c'était la commande MPPT en logique floue.

Les méthodes utilisant cette commande n'ont besoin d'aucun paramètre additionnel en provenance du panneau *PV*. Elle consiste en une recherche adaptative, menant à une convergence rapide sans l'adjonction de capteur de mesures environnementales (température et irradiation). Une étude profonde de

cette méthode, nous a permis d'affirmer que la commande pourrait bien être améliorée via le raffinement des fonctions d'appartenance et de la table des règles de base et ce afin d'augmenter les performances du contrôleur flou qui la concrétise et c'est ce qui va faire le sujet du deuxième chapitre.

Au deuxième chapitre, nous avons donné un aperçu sur la logique floue et la commande floue, une technique intelligente devenue très populaire ces dernières années. Puis, nous avons présenté les différentes étapes de conception d'un contrôleur flou donné.

Stimulés par les résultats exposés aux deuxième chapitre et dans un souci d'améliorer d'avantage les performances de la commande MPPT flou déjà figolée, nous avons pensé à combiner l'efficacité de cette commande floue, avec la flexibilité des circuits logiques programmables récents tels les circuits : "FPGA". Pour arriver à cela, nous avons investi et présenté l'outil, le support et le langage de description avant d'arriver à l'implémentation hardware proprement dite de notre contrôleur MPPT flou. Les différents blocs fonctionnels constituant ce dernier ont été modélisés en langage de haut niveau : «*VHDL*», simulées à l'aide de «*SystemGenerator*».

I.1. Introduction

Le soleil est une source énergétique quasiment illimitée, il pourrait couvrir plusieurs milliers de fois notre consommation globale d'énergie. C'est pourquoi, l'homme cherche depuis longtemps à mettre à profit cette énergie importante et diffusée sur l'ensemble de la planète, il est arrivé à réaliser ce but par le moyen dit cellule photovoltaïque.

Cette énergie solaire est disponible en abondance sur toute la surface terrestre, et malgré une atténuation importante lorsqu'elle traverse l'atmosphère, la quantité qui reste est encore assez importante quand elle arrive au sol. On peut ainsi compter sur 10 000 w/m² crête dans les zones tempérées et jusqu'à 14 000 W/m² lorsque l'atmosphère est faiblement polluée.

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

Dans une seconde partie, nous réaliserons une étude bibliographique sur les techniques de commandes "*MPPT*" existantes et dédiées aux installations *PV* isolées. Ça va être une sorte de synthèse des principaux modes de recherche du "*PPM*" existants ce qui nous permettra par la suite d'identifier les travaux existants et les pistes d'amélioration susceptibles d'être exploré dans ce domaine.

I.2. Cellule Solaire et panneaux photovoltaïque

I.2.1. Principe de la conversion photovoltaïque

L'effet photovoltaïque a été mis en évidence pour la première fois par **EdmondBecquerel** en 1839 : il découvrit que certains matériaux délivraient une petite quantité d'électricité quand ils étaient exposés à la lumière. Albert Einstein expliqua le phénomène photoélectrique en 1912, mais il fallut

attendre le début des années 50 pour sa mise en application pratique dans la réalisation d'une cellule photovoltaïque en silicium d'un rendement de 4,5%. En effet, la première cellule photovoltaïque (ou photopile) a été développée aux Etats-Unis en 1954 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.

Par définition, une cellule photovoltaïque est une diode constituée d'un matériau semi-conducteur absorbant l'énergie lumineuse et la transformant directement en courant électrique. Le principe de fonctionnement de cette cellule fait appel aux propriétés d'absorption du rayonnement lumineux par des matériaux semi-conducteurs.

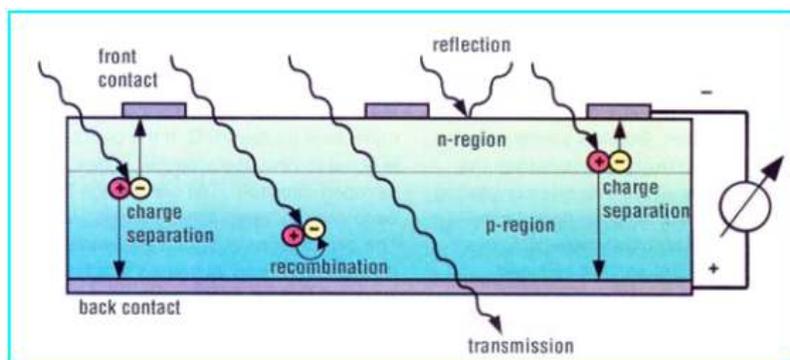


Figure (I. 1) : Processus qui ont lieu dans une cellule PV irradiée.

La lumière du soleil, qui brille sur une cellule (PV), peut être réfléchie, absorbée, ou passe à travers la cellule, mais seulement la lumière absorbée génère de l'électricité par l'effet photovoltaïque. La lumière du soleil, qui brille sur une cellule (PV), peut être réfléchie, absorbée, ou passe à travers la cellule, mais seulement la lumière absorbée génère de l'électricité par cet effet. L'énergie de la lumière absorbée, est transférée aux électrons dans les atomes de la cellule. Avec leur nouveau gain en énergie, ces électrons quittent leur bande énergétique initiale pour atteindre la bande de conduction et participent au flux électrique, ou au courant, dans un circuit électrique préétabli. Une propriété particulière électrique de la cellule PV, appelé «Champs électrique

interne : built-in electric field», fournit la force ou la tension nécessaire pour véhiculer le courant à travers une charge externe connectée au panneau.

I.2.2. Caractéristique électrique étendue et modélisation mathématique

➤ Caractéristique

Une cellule photovoltaïque possède une caractéristique $I(V)$ non linéaire (cf. Figure (1. 2)). Sa caractéristique étendue couvre 3 zones de fonctionnement sur les 4 existantes. La cellule PV est assimilée à un récepteur dans les zones 2 et 4. Le fonctionnement dans ces deux quadrants est à éviter car un risque de destruction par phénomène d'échauffement local (hot spot) est fort probable. Le fonctionnement dans la zone 1 est le fonctionnement normal, en effet dans ce cas la cellule est un générateur, elle produit donc de l'énergie. Ça sera la seule partie de la caractéristique étendue qui sera considéré tout au long de ce manuscrit.

La tension en circuit ouvert (V_{oc}) d'une cellule PV est comprise entre 0,3V et 0,7V selon le matériau semi-conducteur utilisé, la température de la cellule et son état de vieillissement. Alors que son courant de court-circuit (I_{cc}) varie principalement selon le niveau d'irradiation solaire et selon les technologies et les tailles des cellules considérées.

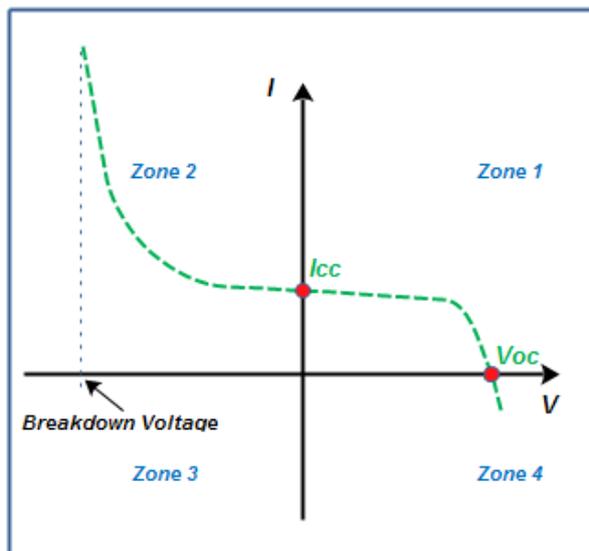


Figure (I. 2) : caractéristique étendue d'une cellule photovoltaïque.

➤ Modélisation

On rencontre dans la littérature, traitant le problème de modélisation des cellules PV , deux modèles mathématiques du générateur photovoltaïque : modèle à une diode et/ou à deux diodes. Ceux-ci ont été développés dans le but d'obtenir les caractéristique courant-tension servant à l'analyse et l'évaluation des performances des systèmes photovoltaïques. La figure ci-dessous propose un modèle électrique (modèle à une diode) de la cellule photovoltaïque prenant en compte les différents facteurs limitatifs. On y retrouve le générateur de courant I_{ph} , correspondant au courant photo-généré ainsi que des résistances complémentaires, r_s et r_p , et une diode D .

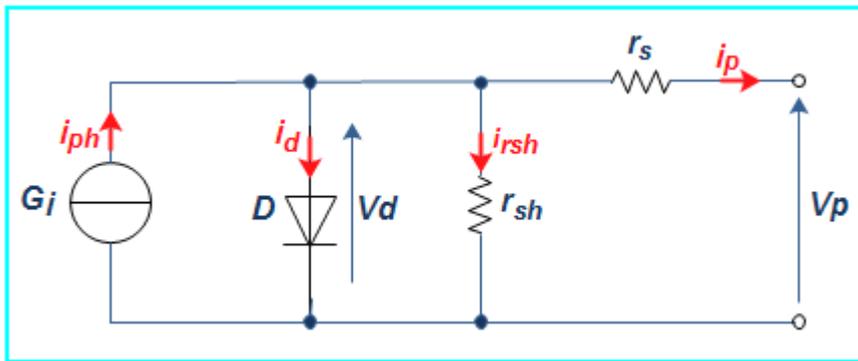


Figure (I. 3) : Schéma électrique équivalent d'une cellule PV.

En plus des spécifications suivantes :

G_i : source de courant parfaite.

D : diode matérialisant le fait que le courant circule que dans un seul sens.

r_{sh} : La résistance shunt, ou la résistance parallèle. Elle traduit la présence d'un courant de fuite à travers l'émetteur, causé par un défaut. Ceci est le cas lorsque la diffusion des contacts métalliques à haute température perce l'émetteur. Elle peut aussi être due à un court-circuit sur les bords de la cellule. Cette valeur devra être la plus élevée possible.

r_s : La résistance série. Elle est due à la résistivité des différentes couches de la cellule : émetteur, base et contacts métalliques (en particulier leur interface avec

le semi-conducteur). Ce terme doit idéalement être le plus faible possible pour limiter son influence sur le courant de la cellule.

On se basant sur ce schéma électrique, nous pourrions écrire :

$$I_p = I_{ph} - I_d - I_{rsh} \text{ (I. 1)}$$

Avec :

I_p : Le courant délivré par la photopile.

I_{ph} : Le photo courant.

I_d : Le courant direct de la diode.

I_{rsh} : Le courant shunt.

Pratiquement, la valeur de la résistance (r_{sh}) est élevée donc on peut négliger le courant I_{rsh} donc l'équation (I. 1) peut s'écrire de la manière :

$$I_p = I_{ph} - I_d \text{ (I. 2)}$$

D'autre part le courant I_{ph} est proportionnel à l'éclairement donc :

$$I_{ph} = a_1 \cdot S \text{ (I. 3)}$$

Tel que a_1 : coefficient de proportionnalité et S : pourcentage d'insolation.

Le courant de polarisation est de la forme :

$$I_d = a_2 [\exp(a_3 \cdot V_D) - 1] \text{ (I.4)}$$

Les paramètres a_1 , a_2 , a_3 sont en fonction de la température T , leurs expression est donnée par [1]:

$$- a_1 = 2.5 * 10^{-7} T + 2 * 10^{-4} \quad [A / (\frac{W}{m^2})].$$

$$- a_2 = 4 * 10^{-6} \cdot T \cdot \exp(-a_3) \quad [A]$$

$$- a_3 = \frac{q}{K.T} = \frac{-1.6 * 10^{-19}}{1.38} * 10^{-23} T. \quad [A/W]$$

Donc l'équation finale du courant de sortie est :

$$I_p = a_1 \cdot S - a_2 [\exp(a_3 V_d) - 1] \quad (\text{I.5})$$

Avec :

T : La température absolue de la cellule ($^{\circ}k$).

q : La charge d'électron (*coulomb*).

K : La constante de Boltzmann ($j/^{\circ}k$).

Dans le cas d'un panneau photovoltaïque qui est une association (série/parallèle) de n_s , n_p cellules élémentaire (n_s étant le nombre de cellules en séries sur une branche et n_p le nombre de branches en parallèles). Et si on considère que toutes les cellules sont identiques et fonctionnent dans les mêmes conditions, nous obtenons un modèle d'un générateur photovoltaïque présenté par le circuit électrique équivalent suivant:

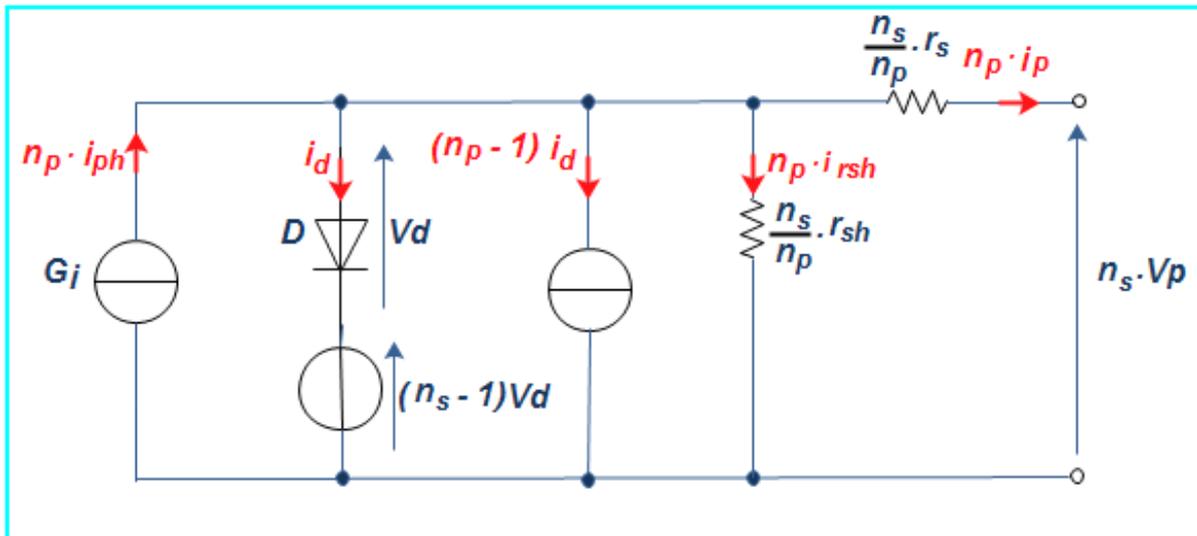


Figure (I. 4) : Schéma électrique équivalent d'une cellule PV.

Pour exprimer le courant de sortie d'un tel générateur, nous utiliserons les modifications et les notations suivantes :

$$\left\{ \begin{array}{l} I_{ph} = n_p \cdot i_{ph} \\ I_G = n_p \cdot i_p \\ I_d = n_p \cdot i_d \\ I_{rsh} = n_p \cdot i_{rsh} \\ V_d = n_s \cdot v_d \\ V_G = n_s \cdot v_p \\ R_s = \frac{n_s}{n_p} \cdot r_s \\ R_{sh} = \frac{n_s}{n_p} \cdot r_{sh} \end{array} \right.$$

Ce modèle comporte quatre variables. Les deux variables d'entrée sont :

- E_s : Ensoleillement dans le plan des panneaux [w/m²] ;
- T_j : Température de jonction des cellules [°C].

Et les deux variables de sortie sont :

- I_G : Courant fourni par le panneau [A] ;
- V_G : Tension aux bornes du panneau [V].

Nous obtenons alors l'équation caractéristique pour un panneau photovoltaïque, déduite du schéma électrique équivalent de la figure (I. 4).

$$I_G = I_{ph} - I_d - I_{rsh} \quad (\text{I. 6})$$

Le photo-courant, I_{ph} est directement lié à l'ensoleillement et à la température du panneau et peut se mettre sous la forme :

$$I_{ph} = p_1 \cdot E_s [1 + p_2 (E_s - E_{ref}) + p_3 (T_j - T_{ref})] \quad (\text{I. 7})$$

Avec :

E_{ref} : L'ensoleillement de référence correspondant à : 1000 W/m².

T_{ref} : La température de référence correspondant à : 25°C.

p_1, p_2, p_3 : sont des paramètres constants.

Au même titre, le courant de polarisation de la jonction PN : I_d , est donné par l'expression suivante :

$$I_d = I_{sat} \cdot \left\{ \exp \left[q \cdot \frac{V_G + R_S \cdot I_G}{k \cdot A \cdot n_S \cdot T_j} \right] - 1 \right\}. \quad (\text{I. 8})$$

Où :

I_{sat} : Le courant de saturation ;

k : La constante de Boltzmann ($1.38 \cdot 10^{-23}$ J/k) ;

q : La charge élémentaire ($1.6 \cdot 10^{-19}$ C) ;

A : Le facteur d'idéalité de la diode.

On a aussi le courant de saturation qui est fortement dépendant de la température ; Celui-ci s'écrit sous la forme:

$$I_{sat} = p_4 \cdot T_j \cdot \exp \left(-\frac{E_g}{k \cdot T_j} \right) \quad (\text{I. 9})$$

Sachant que :

E_g : L'énergie de gap (pour le silicium $E_g = 1.1$ eV)

P_4 : paramètre constant lié au panneau utilisé.

L'équation de courant qui traverse la résistance shunt est donnée par :

$$I_{sh} = V_G / R_{sh}$$

Ceci nous permet finalement d'écrire :

$$I_G = p_1 \cdot E_S \left[1 + p_2 (E_S - E_{ref}) + p_3 (T_j - T_{ref}) \right] - \frac{V_G}{R_{sh}} - p_4 \cdot T_j \cdot \exp \left(-\frac{E_g}{k \cdot T_j} \right) \cdot \left\{ \exp \left[q \cdot \frac{V_G + R_S \cdot I_G}{k \cdot A \cdot n_S \cdot T_j} \right] - 1 \right\} \quad (\text{I. 10})$$

En examinant de près cette dernière écriture, on remarquera que l'expression du courant I_G peut se mettre sous la forme fonctionnelle suivante :

$$I_G = f(V_G, E_S, T_j)$$

Avec 07 paramètres $p_1, p_2, p_3, p_4, A, R_s$ et R_{sh} à déterminer via une méthode de calcul appropriée.

I.2.3. Technologie et rendement des cellules photovoltaïques

I.2.3.1. Technologie des cellules photovoltaïques

Différentes technologies de cellules photovoltaïques sont aujourd'hui utilisées. Elles reposent toutes sur les propriétés photo-électriques des matériaux semi-conducteurs. Afin d'avoir une vision globale de ces technologies du point de vue de l'évolution de leur rendement en fonction des améliorations apportées. Le choix d'une technologie relève d'un compromis entre rendement énergétique, encombrement associé et coût. Il est possible de distinguer plusieurs grandes familles de cellules PV selon les technologies utilisées :

a) La filière Silicium

Actuellement c'est la filière plus utilisée et ce depuis les années 50. Elle offre, à l'heure actuelle, l'un des meilleurs compromis rendement énergétique / coût. On peut distinguer diverses technologies de modules selon la synthèse du matériau silicium.

- *Le silicium mono-cristallin* : Le silicium sous cette forme présente une très grande pureté. Si le cristal est obtenu par la méthode dite de « Czochralsky », la structure cristalline est parfaite. Pour arriver à ce résultat, la fabrication est complexe et coûteuse en énergie. Les rendements de conversion obtenus sont parmi les meilleurs par rapport à la filière silicium.
- *Le silicium poly-cristallin* : La pureté du réseau cristallin est moindre que précédemment. Les rendements de conversion alors obtenus sont plus faibles mais le coût de fabrication de ces cellules est moins élevé. Les filières dites « Couches Minces » : Ces technologies reposent sur

des matériaux possédant un fort coefficient d'absorption du spectre solaire, par exemple :

- *Le silicium Amorphe (a-Si)* : L'utilisation de silicium à l'état amorphe remonte au début des années 70. Son utilisation en couches minces limitant les coûts forme actuellement des générateurs à moindre coût concurrençant les filières précédentes.
- *Le Tellurure de Cadmium (CdTe)* : Le rendement de conversion obtenu pour cette filière est nettement plus satisfaisant. Cependant la limite principale au déploiement de grande ampleur de cette technologie reste la toxicité du cadmium.

b) La filière Cuivre-Indium-Sélénium (CIS)

Cette filière plus complexe à maîtriser présente un fort potentiel de développement dans le futur (jusqu'à 20% de rendement en laboratoire). Cependant, les matériaux nécessaires à la fabrication de ce type de cellule ne sont pas disponibles en grande quantité. D'autres technologies prometteuses comme les matériaux organiques, les matériaux nanocristallins ou les structures multi-jonctions laissent présager d'excellentes performances futures et sont aujourd'hui au stade de la recherche.

1.2.3.2. Rendement des cellules photovoltaïques

Le rendement d'une cellule photovoltaïque est le rapport entre l'énergie électrique qu'elle fournit et l'énergie du rayonnement lumineux (solaire) qu'elle reçoit. Le rendement effectif dans les conditions de laboratoire varie de 15% à 13% suivant la nature et le matériau de la cellule.

Plusieurs études ont montrées qu'un certain nombre d'améliorations pouvaient être faites pour augmenter le rendement et la fiabilité d'une cellule photovoltaïque. En effet, si l'on considère le fonctionnement d'un générateur

PV à base de cellules en silicium, comme il est décrit en haut, les premières améliorations à effectuer pour gagner en rendement sont :

- a) Améliorer le refroidissement des cellules *PV* qui permettrait de gagner environ 20% de rendement sur la totalité des capteurs *PV* par un refroidissement judicieux. En effet, le rendement de conversion photons-électrons décroît rapidement au fur et à mesure que la température interne de la cellule augmente.
- b) Améliorer la connectique entre les différents panneaux *PV* par une architecture appropriée. En effet, une perte de rendement de 20% supplémentaire est à noter sur les systèmes existants entre la puissance qu'ils pourraient théoriquement délivrer et celle effectivement transférée à la charge. Cette perte est communément imputée à l'interface de puissance entre les panneaux et la charge.

I.2.4. Le générateur photovoltaïque (mise en "série/parallèle" des cellules)

La cellule photovoltaïque élémentaire constitue un générateur de très faible puissance vis-à-vis des besoins de la plupart des applications domestiques ou industrielles. Une cellule élémentaire de quelques dizaines de centimètres carrés délivre, au maximum, quelques watts sous une tension inférieure au volt typiquement liée à une tension de jonction PN.

Pour produire davantage de puissance, plusieurs cellules doivent être assemblées afin de créer un module photovoltaïque complet (générateur d'énergie). Ainsi, la connexion en série de cellules identiques permet d'augmenter la tension de l'ensemble (figure I. 6-a), tandis que la mise en parallèle permet d'accroître le courant (figure I. 6-b).

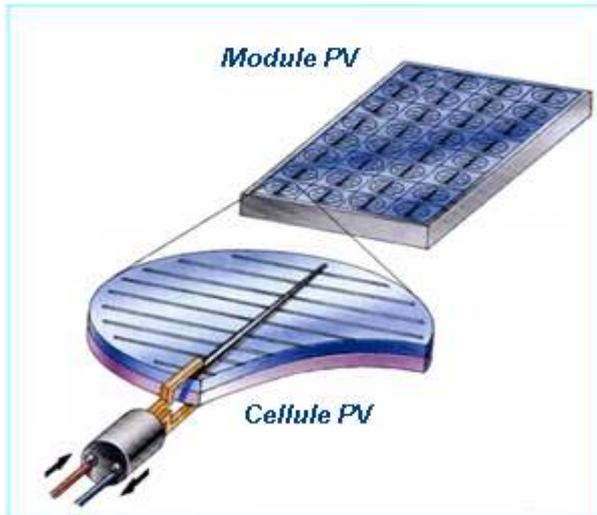


Figure (1. 5) : Association des cellules PV.

Le câblage série/parallèle est possible et souvent utilisé pour obtenir globalement un générateur *PV* aux caractéristiques souhaitées afin d'adapter théoriquement la production d'énergie photovoltaïque à la demande.

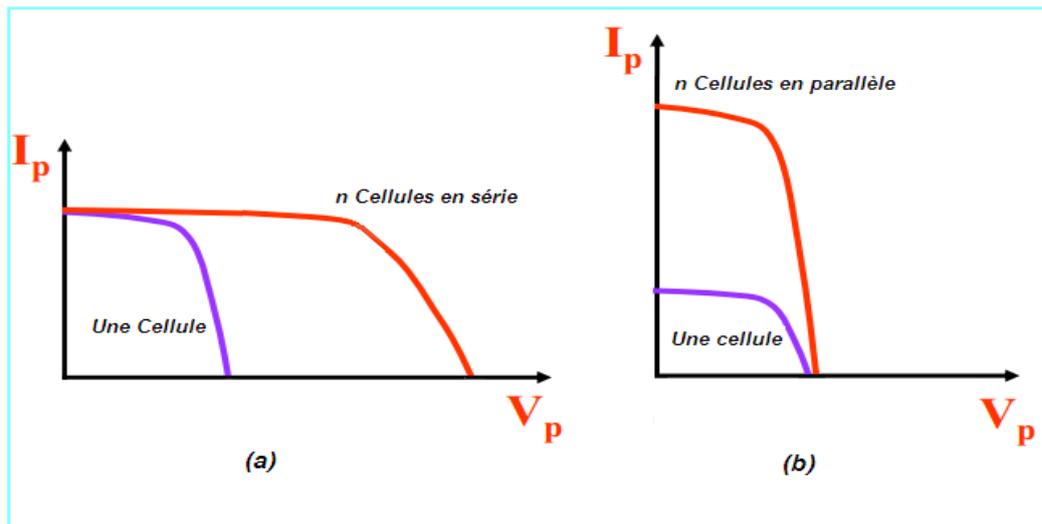


Figure (I. 6) : Caractéristique d'un groupement de n cellules identiques. (a) en série, (b) parallèle.

I.2.5. Influence des paramètres externes sur la caractéristique d'un *GPV*

a) Influence de l'éclairement

La caractéristique $I(V)$ d'une cellule *PV* en mode générateur (zone1) est directement dépendante de l'éclairement et de la température. La puissance

délivrée par un générateur *PV* dépend de l'irradiation qu'il reçoit. Par exemple pour un module référencié : BPSX150S; Nous remarquons que, à température donnée (typiquement 25°C, température normalisée pour les fabricants), l'augmentation du flux lumineux fait accroître le courant de court-circuit (I_{sc}), ainsi que la tension à circuit ouvert (V_{oc}), comme le montre la figures (I. 7).

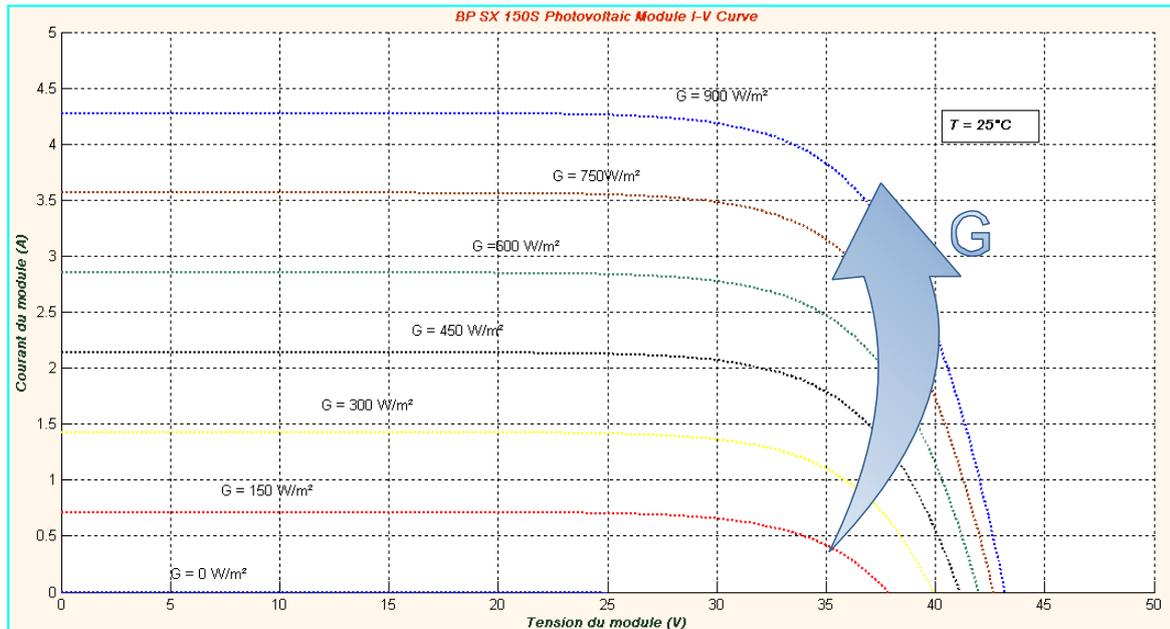


Figure (I. 7) : Influence de l'irradiation solaire.

b) Influence de la température

La température a également une influence importante sur la caractéristique $I(V)$ du générateur *PV*. La figure (I.8) montre que l'augmentation de la température entraîne une diminution nette de la tension du circuit ouvert (V_{oc}), ainsi qu'une diminution de la puissance maximale (une variation 20° C entraîne une diminution de 10 watts de la puissance maximale).

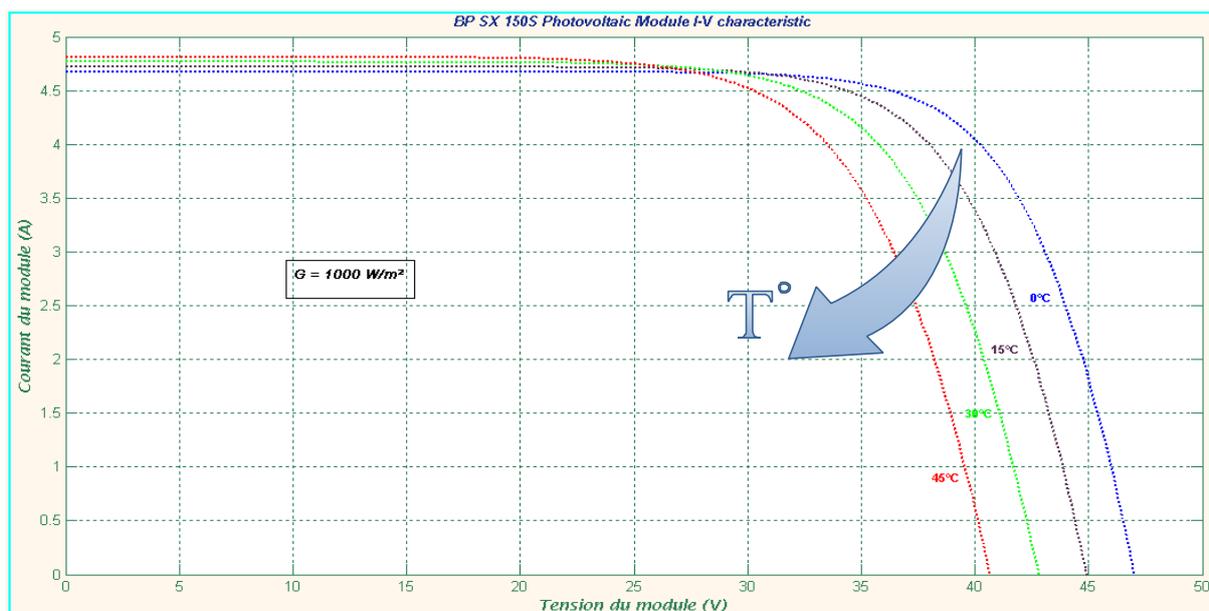


Figure (I. 8) : Influence de la température.

I.2.6. Fonctionnement à puissance maximale

Il y a généralement un point unique sur la courbe $I(V)$ ou $P(V)$, qu'on appelle souvent: Le point de puissance maximale (PPM), à ce point le système photovoltaïque global (panneau, convertisseur, ... etc.) fonctionne avec un rendement maximum et produit une puissance de sortie maximale.

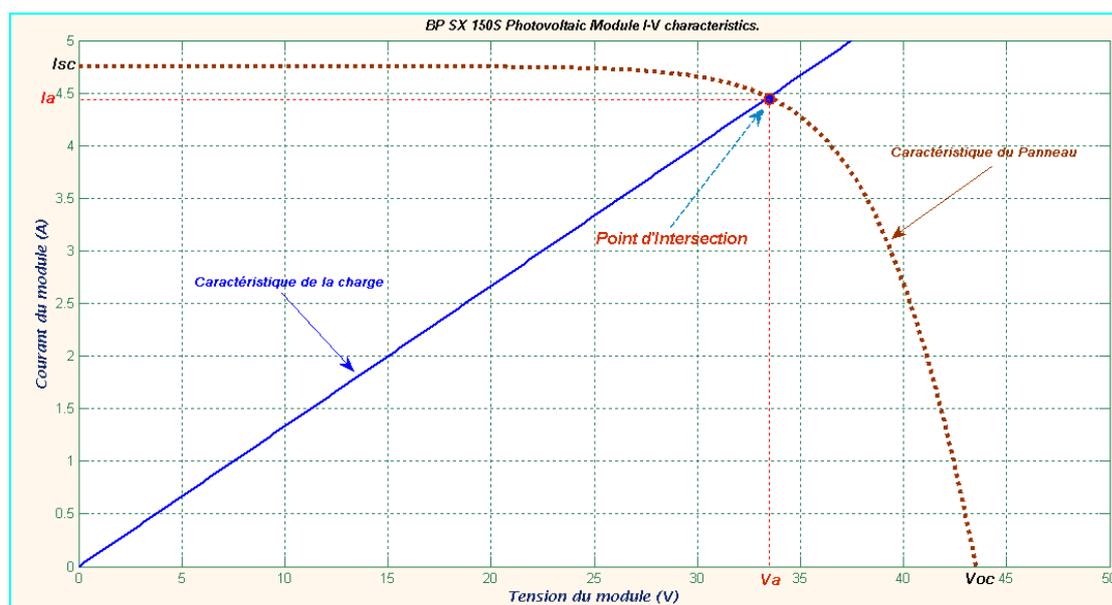


Figure (I. 9) : Intersection de la caractéristique de charge et de génération.

Quand un panneau *PV* est connecté directement à une charge, le système opère au point représenté par l'intersection de la caractéristique $I(V)$ du panneau et celle de la charge. Souvent, ce point du fonctionnement ne correspond pas au point de la puissance maximale que peut extraire la charge à des conditions données. En outre, les caractéristiques de sortie des cellules photovoltaïques sont non-linéaires, et les coordonnées du point du fonctionnement optimum varient constamment avec les changements dans les conditions d'irradiation solaire et la température de la cellule. Voir figure ci-dessus.

Pour assurer le fonctionnement d'un générateur photovoltaïque à son point de fonctionnement maximal "*PPM*", des contrôleurs *MPPT* sont souvent utilisés. Ces contrôleurs sont destinés à minimiser l'erreur entre la puissance de fonctionnement et la puissance maximale de référence variable en fonction des conditions climatiques.

La courbe de la figure (I. 11) montre les variations des positions des *PPMs* avec le changement de la température de la cellule, au moment où la figure (I. 10) représente l'évolution de ces points avec le changement de l'insolation solaire. En fait, le changement de la température du panneau déplace le MPP dans une large gamme le long de l'axe des x tandis que la variation de l'irradiation produit une légère excursion de ces *PPMs* le long de ce même axe.

Dans ces courbes et même dans des analyses antérieures, l'irradiation solaire et la température de la cellule photovoltaïque ont été considérées séparément. Dans la réalité, c'est impossible de rencontrer l'une sans la présence de l'autre parce qu'ils sont très associés sous les conditions d'un fonctionnement ordinaires. Cette déclaration implique qu'une augmentation de la valeur de l'irradiation sur le module *PV* sera également accompagnée par une augmentation de la température des cellules *PV* de celui-ci. Par conséquent, il paraît que le contrôle de la poursuite de la puissance maximale est assez compliqué.

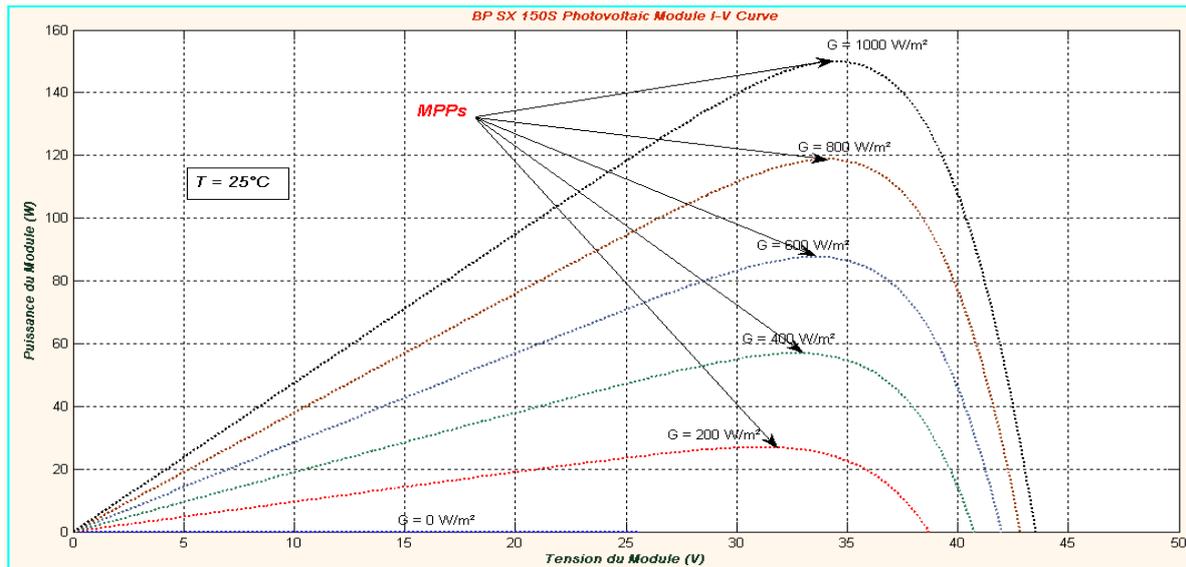


Figure (I. 10) : Variation des positions des points de puissance maximale en fonction de l'irradiation solaire.

Pour pallier à ces problèmes, une interface de puissance (tel un convertisseur de *DC/DC* ou un onduleur *DC/AC*) commandé par un contrôleur (*MPPT*) doit être utilisée pour assurer un fonctionnement à la puissance maximale au panneau PV. Cependant, l'emplacement du point MPP dans la courbe caractéristique *I-V* n'est pas a priori connu.

Une façon de procéder à la résolution de ce problème consiste à utiliser le modèle mathématique de panneau *PV* et les mesures directs de l'irradiation solaire et la température du panneau *PV*. Mais, il apparaît que la mesure de ces paramètres est habituellement trop chère pour ce type d'application, et souvent les paramètres requis pour la modélisation précise du panneau ne sont pas suffisamment connus. Donc, une bonne solution consiste à suivre le "*PPM*" d'une manière automatique et continue via d'autres mesures dont les prix et les techniques sont à la portée de la majorité des utilisateurs. C'est ce qu'on va examiner de près lors de la deuxième partie de ce chapitre.

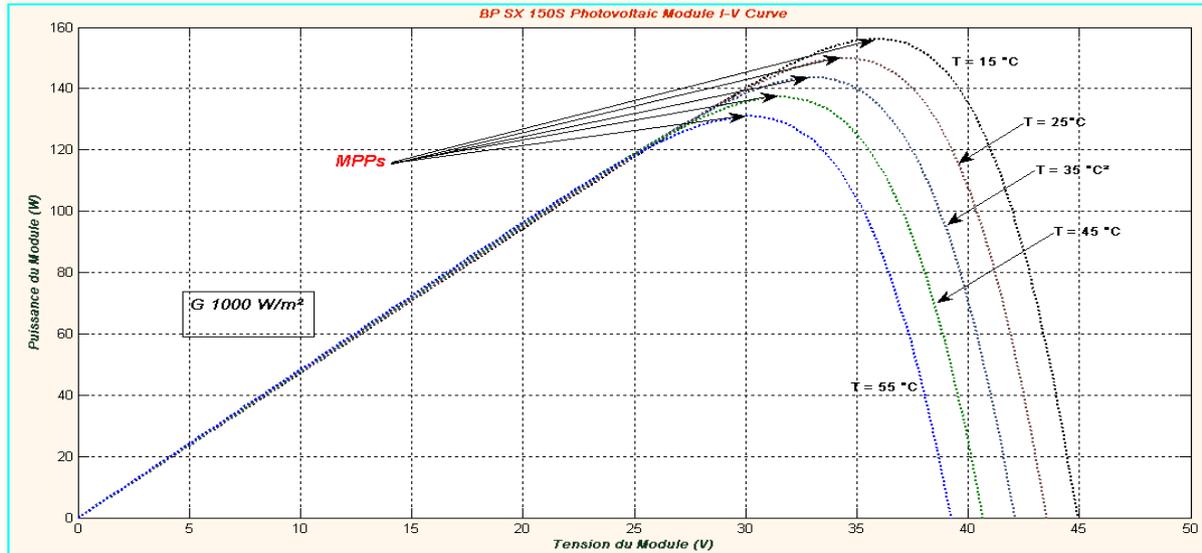


Figure (I. 11) : Variation des positions des points de puissance maximale en fonction de la température.

I.3. Techniques et plateformes d'implémentation pour les méthodes de commande MPPT

La maximisation de la puissance extraite du générateur photovoltaïque est généralement effectuée au moyen des systèmes mécaniques et/ou électroniques. Dans le premier cas, les systèmes de poursuite solaire essaient d'optimiser l'angle d'incidence du rayonnement solaire sur le panneau PV, alors que dans l'approche électronique, des contrôleurs électronique assure la poursuite du point de fonctionnement correspondant à la puissance maximale produite par le panneau à un moment donné et réalise en conséquence une adaptation d'impédance apparente entre le générateur et la charge qui lui est associée. Les systèmes mécaniques et électroniques de maximisation de la puissance sont compatibles et complémentaires et nécessitent souvent une mesure des conditions environnementales externes pour accomplir la tâche qui leur est confiée. Dans cette deuxième partie de ce chapitre, nous allons essayer de faire le point sur l'aspect électronique de cette question en abordant Le concept de la poursuite du point de puissance maximale (MPPT : Maximum Power Point

Tracking) d'un panneau photovoltaïque donné, a commencé à susciter l'intérêt des scientifiques et des exploitants de l'énergie solaire depuis 1968.

II. 3. 1. Spécification des performances des Systèmes du Contrôle MPPT

Avant d'entamer les détails techniques des différentes commandes "*MPPT*" publiées dans la littérature spécialisée et partant du principe que toute commande "*MPPT*" est un système du contrôle au sens propre du terme, nous avons apprécié l'idée d'introduire les concepts et les exigences suivants. Durant le reste de ce chapitre, on va y revenir souvent, vu que c'est des notions cruciales pour la description et la conception efficace du système "*MPPT*" qui seront examinées dès lors.

a) Stabilité :

L'exigence la plus fondamentale durant la conception d'un système de contrôle dynamique est la stabilité du système. Les convertisseurs "*DC-DC*" en mode de commutation sont des systèmes non-linéaires et se comportent très différemment de systèmes linéaires. La caractéristique de sortie du panneau solaire est aussi non-linéaire. Donc la stabilité est un facteur très important pour évaluer un système de contrôle PV-*MPPT* qui a trait avec la non-linéarité.

b) Réponse dynamique :

Un bon l'algorithme de contrôle "*MPPT*" a besoin d'une réponse rapide vis-à-vis du changement rapide des conditions atmosphériques, température de la cellule et l'irradiation solaire. Plus est la poursuite rapide, plus les pertes en termes d'énergie solaire sont minimales.

c) Erreur du régime établi

Au moment où le "*PPM*" est localisé, ça serait idéal de maintenir le système en opération statique exactement sur ce point. Dans un système "*MPPT*" réel, une telle situation est impossible à cause de l'algorithme de

contrôle MPPT actif et la variation continue des valeurs d'insolation et de température. Donc une faible variation de la puissance de sortie est acceptable (préférée). Elle est directement liée à la valeur efficace de la puissance de conversion du système.

d) Robustesse vis à vis des perturbations

Les systèmes de contrôle "*MPPT*" ont besoin de réponse exacte sous des conditions incertaines. Habituellement, les perturbations du système de contrôle, qui sont principalement du bruit d'entrée, l'erreur de la mesure et variation des paramètres, peuvent rendre le système instable. De ce fait, il apparaît qu'il est important de concevoir un système de contrôle "*MPPT*" robuste par rapport à toutes sortes de perturbations.

e) Efficacité dans une large plage de puissance

Le rapport entre la puissance actuelle du générateur photovoltaïque et la puissance délivrée à la charge est une indication de la réussite de l'installation de génération photovoltaïque utilisée. L'efficacité au niveau éclairage faible est un problème grave pour les conceptions de nombreux "*MPPT*". Beaucoup de produits ne fonctionnent efficacement que durant la livraison de puissance nominale. Mais en réalité, durant une journée, la puissance PV fournie par le panneau varie dans une large gamme. Un système de contrôle "*MPPT*" conçu avec succès, doit montrer une bonne performance dans les différents niveaux de puissance.

II.3.2. Les méthodes de poursuite du point de puissance maximale

Il existe environ une vingtaine de méthodes de recherche du point de puissance maximale (MPPT) d'un champ de modules photovoltaïque, dont l'efficacité et la rapidité varient. Parmi ces méthodes on cite :

La méthode dite de la tension de circuit ouvert fractionnaire (Fractional Open-Circuit Voltage) ;

- La méthode dite du courant de court-circuit fractionnaire (Fractional Short-Circuit Current) ;
- Le contrôle du MPP à base de réseaux neuronaux (Neural Network)
- La méthode de retour de l'information de tension (voltage-feedback) ;
- Méthodes à contre réaction de puissance : La puissance extraite du panneau est calculée à partir des mesures de courant I et de tension V du panneau et la multiplication de ces deux grandeurs $P=V.I$. Les méthodes à contre réaction de puissance se basent sur des algorithmes de recherche itérative pour trouver le point de fonctionnement du panneau afin que la puissance générée soit maximale sans interruption de fonctionnement du système.
- La méthode Inc Cond (Incremental Conductance);
- La méthode de perturbation et d'observation (P&O) ;
- Le contrôle du MPPT à base de logique floue (FuzzyLogic Control).

Dans le paragraphe suivant on donne une étude théorique pour la méthode de perturbation et d'observation et le contrôle du MPPT à base logique floue.

II.3.2.1. La méthode de perturbation et d'observation (P & O)

En analysant de près les caractéristiques $P-V$ d'un panneau solaire illustré dans la figure (I. 10), on remarquera facilement que le point de la puissance maximale peut toujours être suivi dans la condition où on garde l'entité (dP/dV) égale à zéro, peu importe ce que soit les valeurs de l'insolation et de la tension de sortie du panneau .Tous les points de puissance maximale locales doivent respecter la même obligation mathématique: $(dP/dV) = 0$. Et la pente de puissance (dP/dV) peut être calculée numériquement via un échantillonnage du courant I et de la tension V à la sortie du panneau et à des intervalles de temps consécutifs $(n - 1)$ et (n) comme suit :

$$\frac{dP(n)}{dV(n)} = \frac{P(n)-P(n-1)}{V(n)-V(n-1)} \quad (\text{I.11})$$

Avec $P(n) = V(n) \cdot I(n)$

La méthode perturbation et observation (*P&O*) est une approche numérique largement utilisée en tant que commande "MPPT". En effet, la méthode *P&O* essaye toujours de faire osciller l'entité (dP/dV) autour de zéro en procédant périodiquement à incrémenter ou décrémenter la tension de sortie du panneau solaire. Si une perturbation donnée conduit à une augmentation (*diminution*) de la puissance de sortie du panneau, la perturbation subséquente est faite de façon à aller dans le même (*contraire*) sens. De cette manière, le suiveur de la crête de la puissance ainsi décrit, cherche en permanence le point de puissance maximale de fonctionnement.

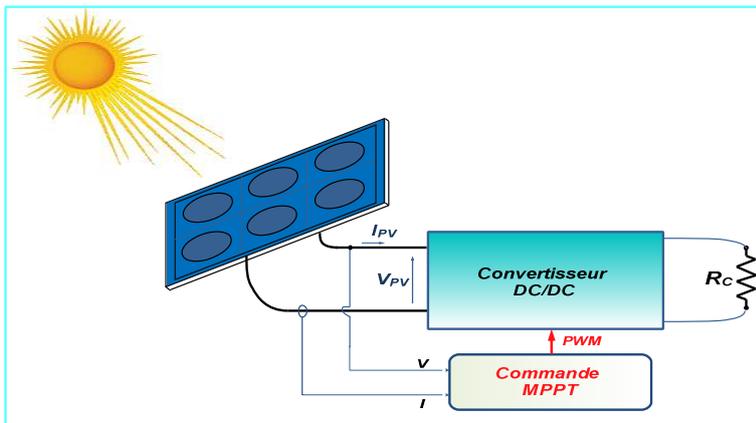


Figure (II. 12) : Le schéma bloc du système de contrôle avec rétroaction de puissance.

Le schéma bloc du système de contrôle peut être illustré par la Figure(I. 12). L'algorithme de contrôle MPPT est basé sur le calcul de la puissance de sortie *PV* et de la variation de puissance détectée en comparant les niveaux de tension actuelle et les précédentes, afin de calculer une tension de référence (V_{ref}), qui sert de point de consigne de tension pour la régulation de la tension de sortie du panneau. L'organigramme de la méthode du contrôle de (*P & O*) est

schématisé dans la figure (II.2). Cette méthode de poursuite est très facile pour l'implémentation en tant que commande numérique. Mais il faut toutefois noter que la tension du panneau est perturbée à chaque cycle de contrôle. Par conséquent, le point de fonctionnement va osciller autour du point correspondant à la puissance maximale une fois celui-ci est atteint. Il en résulte une perte dans l'énergie photovoltaïque produite, qui dépend de la largeur du pas d'incrémentation "c", cette dernière entité est considérée comme étant le pas constant de la perturbation. Si la largeur de ce pas est sélectionnée grande, l'algorithme *MPPT* va répondre rapidement aux brusques changements de conditions de fonctionnement, mais ça sera avec de mauvaises performances à état d'équilibre. Et dans le cas où la largeur de ce pas est très faible, la perte d'énergie dans des conditions environnementales stables ou qui changent lentement sera réduite, mais le système ne peut pas répondre aux changements rapides de l'ensoleillement ou de la température. Il s'en suit qu'une largeur adaptée de ce pas à besoin d'être réglé expérimentalement dans le cas des systèmes et d'environnements spécifiques.

Cette méthode présente un inconvénient majeur qui se résume au fait que la réponse dynamique est lent en cas de variation rapide des conditions atmosphériques. Quand on a une augmentation soudaine d'insolation solaire, l'algorithme de *P & O* réagit comme si l'augmentation est survenue suite à la perturbation précédente de la tension de fonctionnement du panneau. Par conséquent, la perturbation suivante, sera dans le même sens que la précédente. En supposant qu'à un moment donné, le système oscillait autour du "*PPM*", il se peut qu'une perturbation continue dans une même direction conduise à un point de fonctionnement loin du "*PPM*" réel recherché (voir figure ci-dessous). Ce processus continue jusqu'à ce que l'augmentation de l'insolation ralentit ou prend fin. La raison de ce problème est que l'augmentation de la puissance de sortie est dominée par l'insolation plutôt que du signal de contrôle, et à ce moment, le contrôle passe à la mauvaise direction.

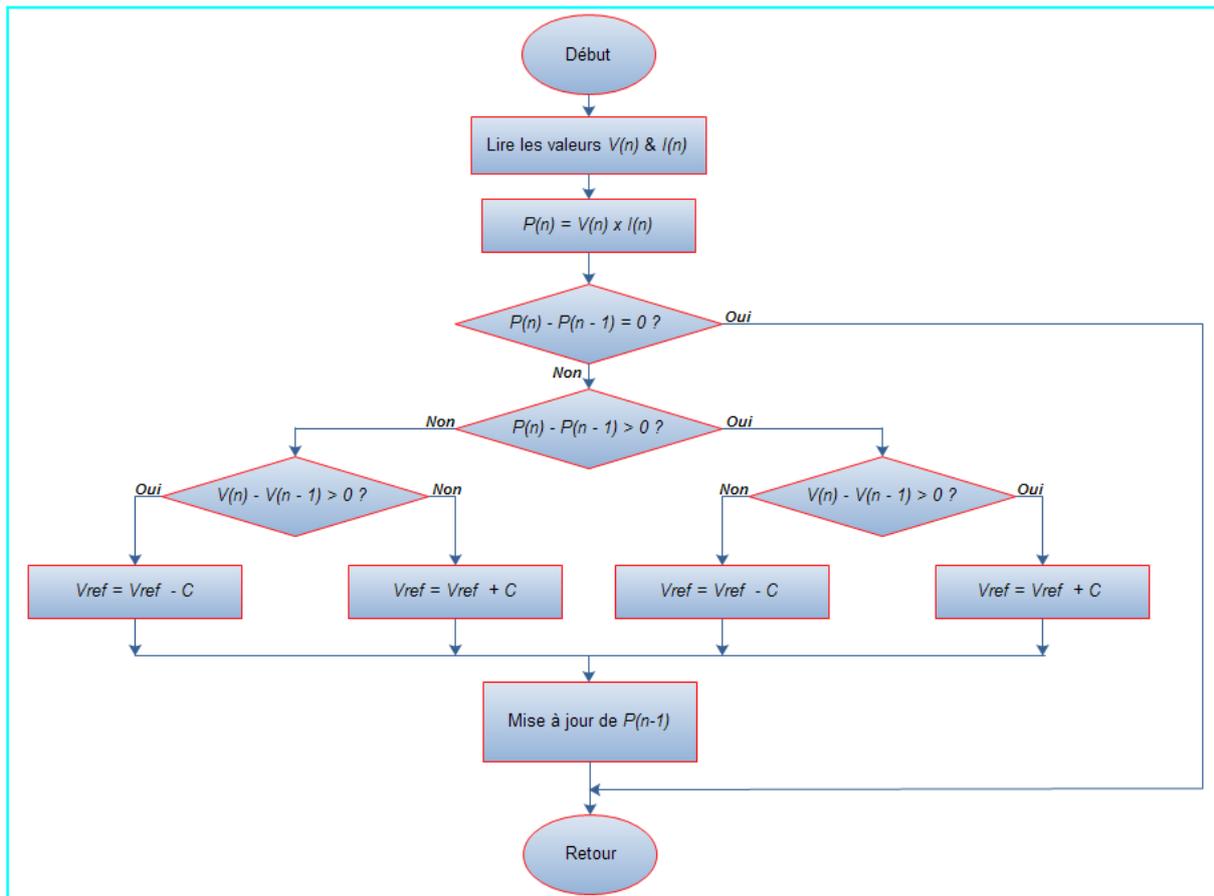


Figure (I.13) : Organigramme de l'algorithme (P & O).

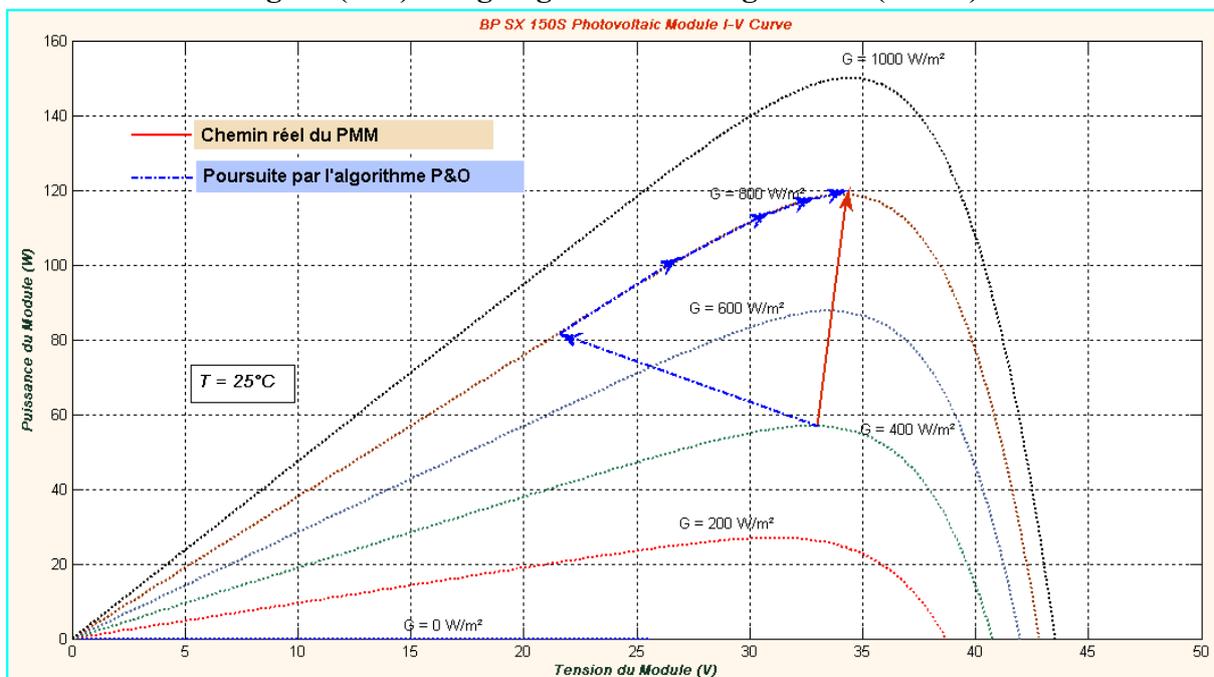


Figure (I.14) : Écart par rapport au chemin réel du "PPM" causé par l'algorithme P & O suite à une augmentation rapide d'irradiation solaire.

II.3.2.2. La méthode de perturbation et d'observation (P & O) améliorée

En 2001, une méthode MPPT basée sur un algorithme (P&O) modifié a été présentée. Elle peut être définie comme une amélioration d'un algorithme (P&O) de base, qui ne parvient pas à suivre rapidement le point de puissance maximale. La figure (I.4) présente l'organigramme de l'algorithme de contrôle correspondant. Dans cette version modifiée, une boucle de contrôle d'ensoleillement supplémentaire est ajoutée. S'il y'a un changement soudain et important dans le courant de sortie du panneau, on admet que cela est dû à un changement soudain de l'insolation, qui est causée par un mouvement brusque des nuages. Pour l'aboutissement de la méthode. Un seuil de changement du courant « e » doit être défini comme un autre paramètre du système. La direction du courant de sortie du panneau est utilisée pour contrôler directement la direction de perturbation de la tension de sortie du panneau. Avec cette boucle de contrôle supplémentaire, la rapidité de la poursuite a été atteinte. Mais des difficultés concernant le choix du pas de l'incrément de la tension " c " et le seuil de variation du courant « e » restent toujours non résolues.

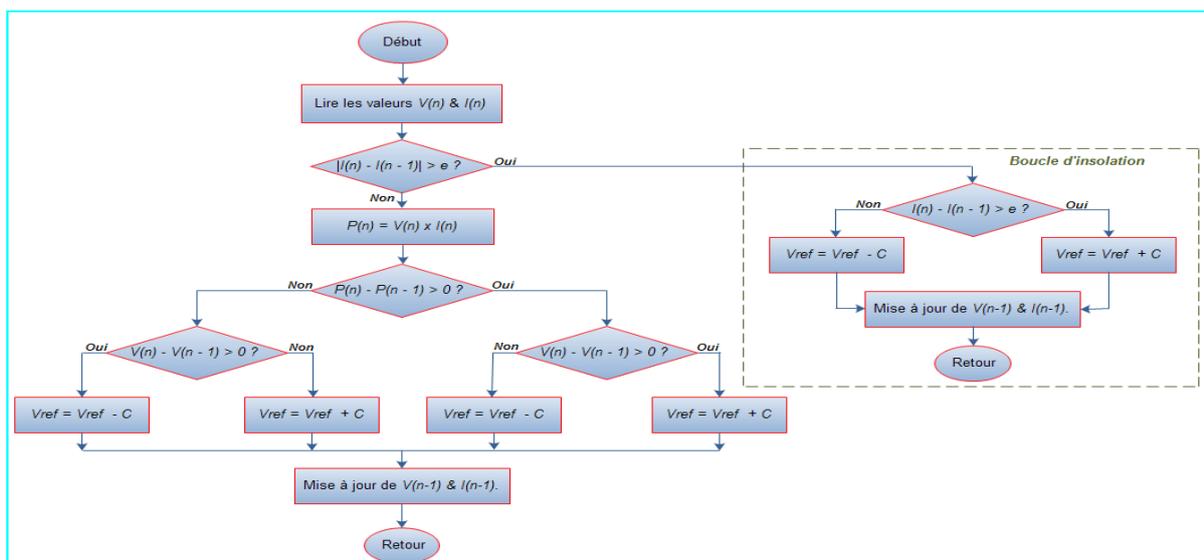


Figure (I.15) : Organigramme de la méthode "MPPT" à base d'algorithme (P&O) amélioré.

II.3.2.3. Méthode "MPPT" basée sur la logique flou

Le contrôle *MPPT* par logique floue a connu un essor considérable durant ces deux dernières années et ce en raison de l'évolution des technologies relatives aux microcontrôleurs et aux DSPs. Les contrôleurs par logique floue ont l'avantage de pouvoir traiter des systèmes non-linéaires sans avoir besoin d'un modèle précis du système pris en considération.

Un contrôleur flou se compose généralement de trois unités de traitement consécutives :

L'étape de fuzzification transforme les variables d'entrée en variables linguistique out en se basant sur les fonctions d'appartenance dont on montre un exemple sur la figure (II.5). Dans ce cas de figure, on distingue cinq niveaux flous, qui sont : *NB* (grand négatif), *NS*(petit négatif), *ZE* (zéro), *PS*(petit positive), et *PB* (grand positif). On note ici, que pour augmenter la précision, un plus grand nombre de niveaux de flou peut être utilisé. Dans cette même figure, le choix des valeurs de *a* et *b* est basé sur la gamme de variation des valeurs des grandeurs d'entrée. Lors de la conception des fonctions d'appartenance, certains niveaux flous spécifiques peuvent être conçu comme étant asymétrique et ce pour leur confier une certaine dominance par rapport aux autres niveaux, en d'autres termes : pour leur donner plus d'importance.

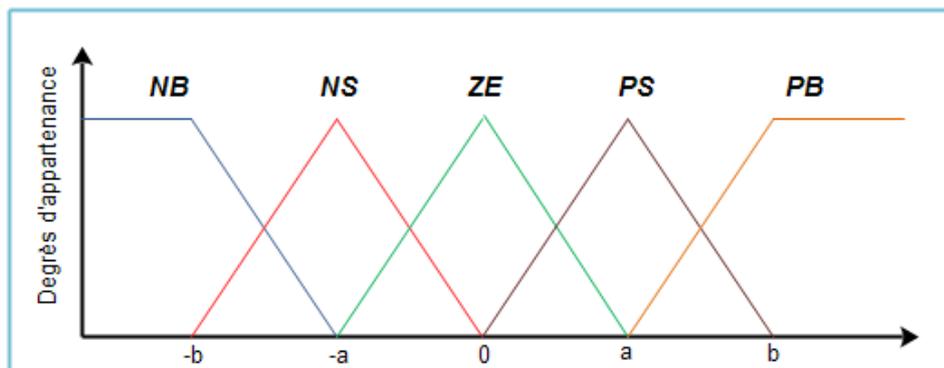


Figure (I.16) : Fonctions d'appartenance pour les entrées/sorties d'un contrôleur flou.

D'une manière générale, L'erreur (E) et sa variation(ΔE)sont les deux entrées au contrôleur *MPPT* flou. Ces deux variables, peuvent être calculées selon les préférences des utilisateurs. Mais, puisque(dP/dV) se rapproche de zéro quand le point de fonctionnement s'approche du "*PPM*", l'approximation donnée par l'équation (II.2) est souvent adopté:

$$E(n) = \frac{P(n)-p(n-1)}{V(n)-V(n-1)} \text{(I.12)}$$

$$\text{Et } \Delta E(n) = E(n) - E(n - 1). \text{(I.13)}$$

Alternativement, le signal d'erreur peut également être calculé comme :

$$e = \frac{I}{V} + \frac{dI}{dV} \text{(I.14)}$$

La variation d'erreur dans l'équation (I.14) peut également être appliquée à cette dernière équation. L'erreur exprimée dans cette équation n'est que la somme de la conductance instantanée et incrémentale qui s'annule également en se rapprochant du point "*PPM*".

Généralement, la sortie du contrôleur *MPPT* flou est la variation de rapport cyclique du signal de commande du convertisseur de puissance. Cette valeur de variation dans le rapport cyclique peut être prise dans une table de recherche tels que le tableau (I. 16), juste après à ce que (E)et sa variation(ΔE)sont calculée set converties en variables linguistiques.

E	NB	NB	NB	NB	NB
ΔE					
NB	ZE	ZE	NB	NB	NB
NS	ZE	ZE	NS	NS	NS
ZE	NS	ZE	ZE	ZE	PS
PS	PS	PS	PS	ZE	ZE
PB	PB	PB	PB	ZE	AE

Tableau (I. 1) : Table des règles de base.

Différentes combinaisons de l'erreur (E) et sa variation (ΔE) peuvent être utilisées comme variables linguistiques assignés à (ΔD). Pour un convertisseur élévateur de tension, le tableau (II. 1) peut par exemple être utilisé à cette fin. Sur cette table, on peut à titre indicatif, lire l'information suivante : si le point de fonctionnement est loin à droite du "PPM" actuel, et (E) est NB et (ΔE) est ZE, donc une diminution importante du rapport cyclique est requise pour diminuer la tension de sortie du panneau, ce qui veut dire que (ΔD) devrait être NB pour atteindre le nouveau "PPM".

La valeur de la sortie du contrôleur *MPPT* flou est convertie d'une variable linguistique en une variable numérique en utilisant une fonction d'appartenance des variables de sortie, comme indiqué à la figure (I.16), lors de l'étape de défuzzification. Via l'opération de défuzzification, le contrôleur produit un signal de sortie analogique, celui-ci est par la suite convertie en un signal carré à rapport cyclique variable et ce pour contrôler le convertisseur de puissance du système *MPPT* considéré.

La figure ci-dessous, montre un exemple de mise en œuvre d'un contrôleur *MPPT* à base de logique flou. La tension et le courant à la sortie du panneau, sont mesurés continuellement pour calculer l'erreur (E) et sa variation (ΔE) conformément à ce qui a été mentionné dans les équations (I.12) et (I.13). Ensuite, ces valeurs réelles sont converties en valeurs floues avant d'être évaluées par une table des règles de base similaire à celle reproduite au tableau(II.1). La sortie produite par ce dernier traitement est sous formes de variables floues reflétant le changement correspondant du rapport-cyclique. Dans l'étape de défuzzification, la valeur numérique (réelle) du rapport-cyclique est déterminée par une dernière conversion de valeurs linguistiques en valeurs réelles exploitables. Enfin, le signal de commutation nécessaire est appliqué au convertisseur *DC-DC* de puissance du système PV pris en compte.

Sous différentes conditions atmosphériques, les contrôleurs *MPPT* flous montrent de bonnes performances. D'autre part, on note que l'efficacité de ce

type de contrôleurs dépend de la précision du calcul d'erreur et de ses variations et de la table des règles de base à élaborer par l'utilisateur.

Pour une meilleure efficacité de poursuite du PPM, les fonctions d'appartenance et la table des règles de base doivent être continuellement mis à jour et/ou raffinées si l'on veut atteindre les performances optimales qui peuvent être offertes par ce type de contrôleur. De cette façon, une convergence rapide de vers le "PPM" et une fluctuation minimale autour de ce point peuvent être facilement obtenues. En outre, le suivi de la puissance dépend également du type de fonction d'appartenance choisie.

I.4. Conclusion

Ce chapitre, plutôt abstrait, représente l'état d'art de la connectique entre un panneau solaire et la charge associé dans un contexte de système photovoltaïque isolé. Nous avons présenté une étude plus au moins exhaustive couvrant les différents concepts servant à parvenir à poursuivre efficacement le point de puissance maximale dans une installation PV donnée.

Ainsi, dans une deuxième partie, nous avons fait Une synthèse des principaux modes de recherche du "PPM" existants. Ce qui nous a permis de bien identifier l'existant et les points qu'il restait à améliorer. Certes, il y'en a beaucoup d'autres méthodes intéressante qu'on n'a pas cité dans ce rapport mais pour le travail courant, c'est largement suffisant. Ceci a constitué la base théorique pour nos travaux sur une éventuelle contribution d'amélioration dans ce domaine. Nous nous sommes attardés sur la commande MPPT utilisant les contrôleurs flous du fait que les deux chapitres suivants de ce travail de notre mémoire, feront l'objet de d'une contribution à l'amélioration de cette technique sur les deux plans : conception et implémentation.

III.1. Introduction

L'objectif de ce chapitre est l'implémentation du correcteur flou à 3 entrées sur un circuit FPGA.

On entamera ce chapitre avec une brève présentation des circuits *FPGA*, leur architecture ainsi que les différentes méthodes de leur programmation, le langage *VHDL* et l'outil de développement ISE de *Xilinx*. La section suivante nous décrirons les différentes étapes suivies pour implémenter le régulateur flou sur une carte FPGA.

En effet, pour implémenter le régulateur flou sur le circuit FPGA on utilisant le langage VHDL et le système Genearor pour la simulation.

Une conclusion fera partie de la dernière section qui mettra fin au chapitre.

III.2. Technologie et circuits FPGA

Le concept de logique programmable a été proposé par G. Estrin en 1963. L'apparition des *FPGAs* s'est d'abord fait au travers des circuits logiques programmables de type PAL (*Programmable ArrayLogic*) et avec les évolutions en électronique, différentes familles de circuits programmables ont commencé à apparaître : les *CPLD* (*ComplexLogic Programmable Device*), puis les *FPGA* (*Field Programmable GateArrays*).

Les premiers circuits *FPGA* ont été commercialisés par la firme *XILINX* en 1985 et c'est un marché qui n'a pas cessé de croître depuis. Au fur et à mesure que la complexité des *FPGA* s'est développée, leurs possibilités d'emploi se sont accrues jusqu'à concurrencer sérieusement les circuits *ASIC* pour des petits volumes de production. Le recours aux *ASIC* impose en effet des temps de développement et de fabrication de l'ordre de plusieurs mois. Les *FPGA*, par contre, permettent une reconfiguration à volonté dans un temps très court (de l'ordre de quelques millisecondes) et donc une évolution des circuits au cours de leur période d'exploitation.

II.2.1. Caractéristiques des circuits FPGAs

Le premier avantage apporté par les circuits *FPGA* est la souplesse de la programmation, ce qui permet de multiplier les essais, d'optimiser de diverses manières l'architecture développée et de vérifier à divers niveaux de la simulation la fonctionnalité de cette architecture. Le second avantage des *FPGA* est la possibilité de la reconfiguration dynamique partielle ou totale des circuits, ce qui permet, d'une part, une meilleure exploitation du composant et une réduction de la surface de silicium employé, d'autre part la programmation en temps réel (quelques microsecondes) tout ou une partie du circuit.

II.2.2. Architecture interne des FPGAs

Les circuits FPGA possèdent une structure matricielle de deux types de blocs (ou cellules). Des blocs d'entrée sortie et des blocs logiques programmables. Le passage d'un bloc logique à un autre se fait par un routage programmable. Certains circuits *FPGA* intègrent également des mémoires *RAM*, des multiplieurs et même des noyaux de processeur. Actuellement deux fabricants mondiaux se disputent le marché des *FPGA* : **Xilinx** et **Altera**.

De nombreux autres fabricants, de moindre envergure, proposent également leurs propres produits. Nous ferons une description de l'architecture utilisée par Xilinx, qui se présente sous forme de deux blocs :

- Un bloc appelé circuit configurable.
- Un bloc appelé réseau mémoire SRAM. La couche dite "circuit configurable" est constituée d'une matrice de blocs logiques configurables CLB permettant de réaliser des fonctions combinatoires et des fonctions séquentielles. Tout autour de ces blocs logiques configurables, nous trouvons des blocs entrées/sorties *IOB* dont le rôle est de gérer les entrées sorties réalisant l'interface avec les modules extérieurs Figure (III.1).

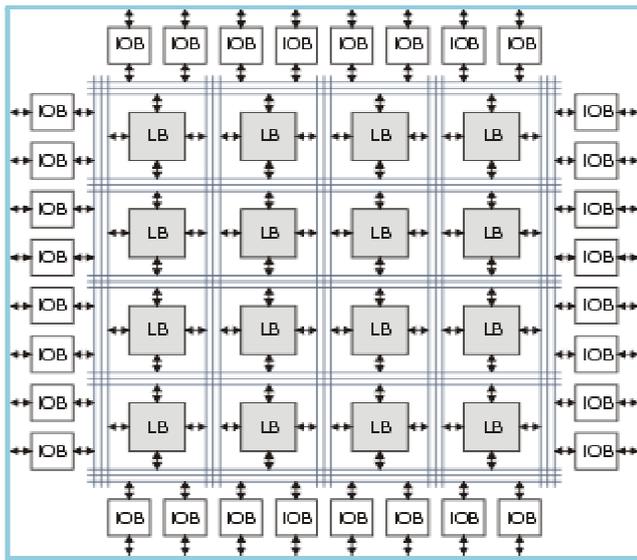


Figure (III. 1) : Architecture interne d'un FPGA.

La programmation du circuit *FPGA* appelé aussi *LCA* (logiccellsarrays) consistera, par le biais de l'application d'un potentiel adéquat sur la grille de certains transistors à effet de champ, à interconnecter les éléments des *CLB* et des *IOB* afin de réaliser les fonctions souhaitées et d'assurer la propagation des signaux. Ces potentiels sont tout simplement mémorisés dans le réseau mémoire *SRAM*.

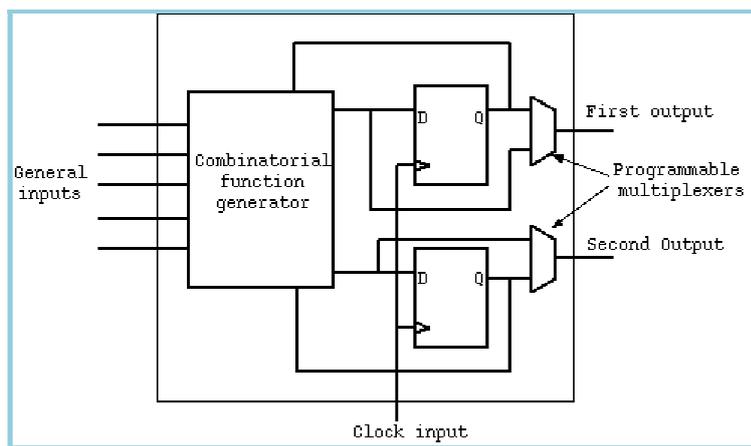


Figure (III. 2) : Structure interne d'un bloc circuit configurable (CLB).

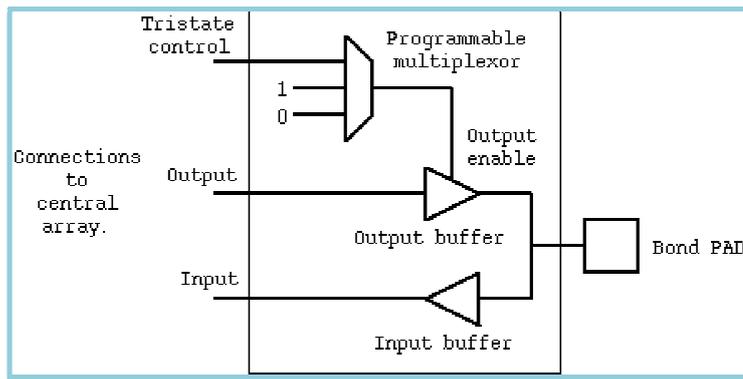


Figure (III. 3) : Structure interne d'un bloc d'entrée sortie (IOB).

III.3. Langage de programmation "VHDL" et outils de développements

III.3.1. langage de programmation "VHDL"

Le *VHDL* (*Very-high-speed-integrated-circuit Hardware Description Language*) a été commandé par le DOD (Département de la défense américaine) pour décrire les circuits complexes, de manière à établir un langage commun avec ses fournisseurs. C'est un langage, standard *IEEE1076* depuis 1987, qui aurait dû assurer la portabilité du code pour les différents outils de travail (simulation, synthèse pour tous les circuits et tous les fabricants). La mise à jour du langage *VHDL* s'est faite en 1993 (*IEEE 1164*) et en 1996, la norme *1076.3* a permis de standardiser la synthèse *VHDL*.

III.3.1. a. Applications du langage *VHDL* :

Le *VHDL* est un langage de programmation de haut niveau permettant de faire :

- *La spécification*: le langage *VHDL* est très bien adapté à la modélisation des systèmes numériques complexes grâce à son niveau élevé d'abstraction. Le partitionnement en plusieurs sous ensembles permet de subdiviser un modèle complexe en plusieurs éléments prêts à être développés séparément.

- *La simulation*: la notion du temps, présente dans le langage, permet son utilisation pour décrire des fichiers de simulation (Test-Bench). Le modèle comportemental avec les fichiers de simulation peut constituer, ensemble, un cahier de charges. Les fichiers de simulation peuvent également être utilisés avec un banc de tests de production.
- *La synthèse logique*: les logiciels de synthèse permettent de traduire la description *VHDL* en logique. Il est ainsi possible d'intégrer la description dans un composant programmable (*CPLD*, *FPGA*) ou dans un circuit *ASIC*.
- *La preuve formelle*: le langage permet de prouver formellement que 2 descriptions sont parfaitement identiques au niveau de leur fonctionnalité.

III. 3. 1. b. Utilisation du langage *VHDL* pour la synthèse

Les débuts de son utilisation en synthèse furent assez difficiles. Chaque société ayant adapté le langage *VHDL* à sa manière. De 1993 à 1997, différentes adaptations de la norme IEEE définissent sa conception numérique : description *VHDL* et synthèse, utilisation pour la synthèse. Il faut attendre la fin des années 90 pour que tous les outils intègrent ces nouvelles modifications. Parallèlement, la forte évolution des circuits logiques programmables dans les années 1990, nécessite de disposer d'un langage de haut niveau afin de maîtriser la complexité toujours plus importante. Aujourd'hui, le *VHDL* s'est imposé comme un standard reconnu par tous les principaux vendeurs d'outils de développement.

Le développement en *VHDL* nécessite l'utilisation de deux outils : le simulateur et le synthétiseur. Le premier va nous permettre de simuler notre description *VHDL* avec un fichier de simulation appelé "Test-Bench". Cet outil interprète directement le langage *VHDL*. Le simulateur comprend l'ensemble du langage. L'objectif du synthétiseur est très différent. Il doit traduire le

comportement décrit en *VHDL* en fonctions logiques de bases. Celles-ci dépendent de la technologie choisie. Cette étape est nommée : "synthèse". Le langage *VHDL* permet d'écrire des descriptions d'un niveau comportemental élevé.

La question est de savoir si n'importe quelle description comportementale peut être traduite en logique ? L'intégration finale dans le circuit ciblé est réalisée par l'outil de placement et routage. Celui-ci est fourni par le fabricant de la technologie choisie. Avec les outils actuels, il est possible de disposer des fichiers *VHDL* à chaque étape. Le même fichier de simulation "Test-Bench" est ainsi utilisable pour vérifier le fonctionnement de la description à chaque étape.

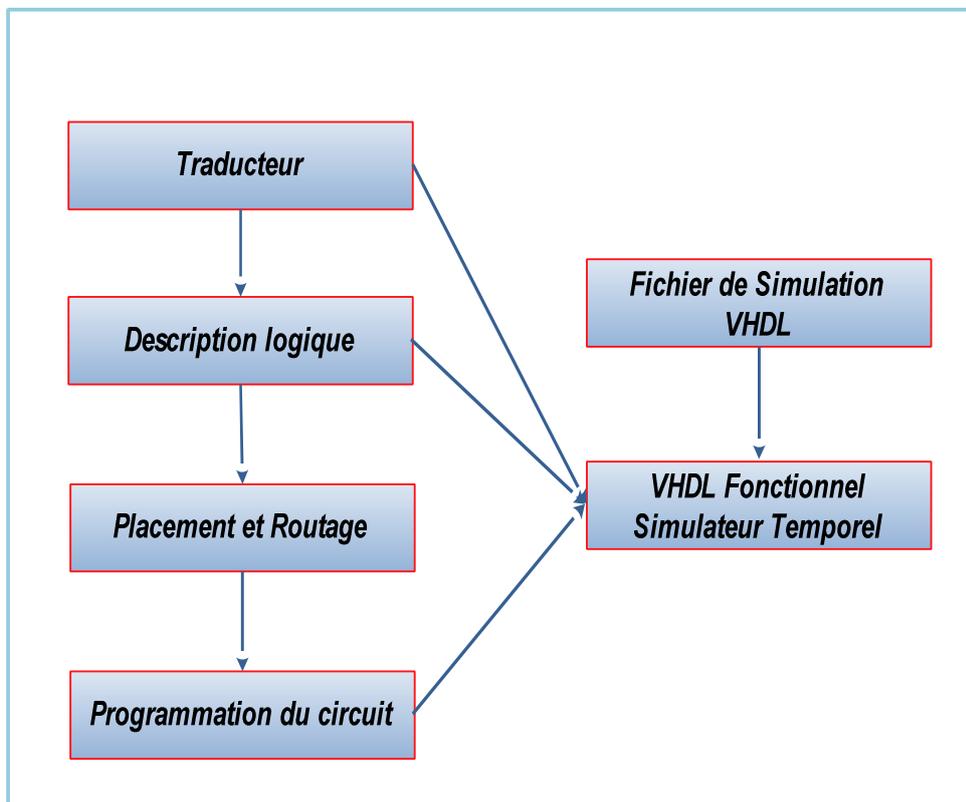


Figure (III. 4) : Déroulement des différentes étapes de développement d'un projet en *VHDL*.

La figure (III. 4) montre le déroulement des différentes étapes de développement d'un projet en *VHDL*.

III.4. Implémentation du régulateur flou sur FPGA

Afin que l'implémentation du régulateur flou soit rationnelle et simple, nous avons établi le model de cette commande suivante :

III.4.1. synthèse de régulateur flou

III. 4. 1. a. Fuzzification

Le régulateur flou de notre projet contient 3 entrées et une seule sortie.

Les entrées de régulateur flou sont :

$$\Delta P = P(k) - P(k - 1)$$

$$\Delta I = I(k) - I(k - 1)$$

$$\Delta Pm = Pm(k) - Pm(k - 1)$$

Et l'équation de sortie est :

$$\Delta D = D(k) - D(k - 1)$$

Où ΔP et ΔI sont le changement de puissance et la variation de courant respectivement, ΔPm représente la différence entre la puissance maximale stockée (Pm) et l'alimentation en courant.

Les variables d'entrée ΔP et ΔI sont divisées en quatre sous-ensembles flous : grand positif (GP), petit positif (PP), grand négatif (GN), et petit négatif (PN) de forme trapézoïdale avec une distribution uniforme pour les variables d'entrées.

La variable d'entrée ΔPm est divisée en deux sous-ensembles flous : grand positif (GP) de forme trapézoïdale et petit positif (PP) de forme triangulaire avec une distribution uniforme pour les variables d'entrées.

Dans la première étape, nous générons le code VHDL des fonctions d'appartenances (DP, DI, DPM) ; on utilise les opérations de la multiplication, l'addition et on utilise aussi les nombres réelles.

Dans la deuxième étape, pour la simulation on utilise le system Generator pour avoir les fonctions d'appartenances.

	Désignation des fonctions
GN	Grand Négatif
PN	Petit Négatif
PP	Petit Positif
GP	Grand Positif

Tableau (III.1) : Définitions des noms des différentes fonctions d'appartenance en entrée du système flou.

L'entrée DP est définie comme suit :

$$\text{If } -5 \leq e \leq -3 \text{ then : } \left\{ \begin{array}{l} GN = 1 \\ PN = 0 \\ PP = 0 \\ GP = 0 \end{array} \right.$$

$$\text{If } -3 \leq e \leq -0.5 \text{ then: } \left\{ \begin{array}{l} GN = \frac{-2}{5} * e - \frac{1}{5} \\ PN = \frac{2}{5} * e + \frac{6}{5} \\ PP = 0 \\ GP = 0 \end{array} \right.$$

$$\text{If } -0.5 \leq e \leq 0 \text{ then: } \left\{ \begin{array}{l} GN = 0 \\ PN = 1 \\ PP = 0 \\ GP = 0 \end{array} \right.$$

$$\text{If } 0 \leq e \leq 0.5 \text{ then: } \left\{ \begin{array}{l} GN = 0 \\ PN = 0 \\ PP = 1 \\ GP = 0 \end{array} \right.$$

$$\text{If } 0.5 \leq e \leq 3 \text{ then: } \left\{ \begin{array}{l} GN = 0 \\ PN = 0 \\ PP = \frac{-2}{5} * e + \frac{6}{5} \\ GP = \frac{2}{5} * e - \frac{1}{5} \end{array} \right.$$

$$\text{If } 3 \leq e \leq 5 \text{ then: } \left\{ \begin{array}{l} GN = 0 \\ PN = 0 \\ PP = 0 \\ GP = 1 \end{array} \right.$$

L'entrée DI est définie comme suit :

$$\text{If } -0.1 \leq e \leq -0.07 \left\{ \begin{array}{l} GN = 1 \\ PN = 0 \\ PP = 0 \\ GP = 0 \end{array} \right.$$

$$\text{If } -0.07 \leq e \leq -0.02 \text{ then:} \left\{ \begin{array}{l} GN = -20 * e - 0.4 \\ PN = 20 * e + 1.4 \\ PP = 0 \\ GP = 0 \end{array} \right.$$

$$\text{If } -0.02 \leq e \leq 0 \text{ then:} \left\{ \begin{array}{l} GN = 0 \\ PN = 1 \\ PP = 0 \\ GP = 0 \end{array} \right.$$

$$\text{If } 0 \leq e \leq 0.02 \text{ then:} \left\{ \begin{array}{l} GN = 0 \\ PN = 0 \\ PP = 1 \\ GP = 0 \end{array} \right.$$

$$\text{If } 0.02 \leq e \leq 0.07 \text{ then:} \left\{ \begin{array}{l} GN = 0 \\ PN = 0 \\ PP = -20 * e + 1.4 \\ GP = 20 * e - 0.4 \end{array} \right.$$

$$\text{If } \geq 0.07 \text{ then :} \left\{ \begin{array}{l} GN = 0 \\ PN = 0 \\ PP = 0 \\ GP = 1 \end{array} \right.$$

L'entrée DPM est définie comme suit :

If $0 \leq e \leq 0.1$ then :

$$\left\{ \begin{array}{l} PP = 10 * e \\ GP = 0 \end{array} \right.$$

If $0.1 \leq e \leq 0.5$ then:

$$\left\{ \begin{array}{l} PP = -2.5 * e + 1.25 \\ GP = 2.5 * e - 0.25 \end{array} \right.$$

If $e \geq 0.5$ then:

$$\left\{ \begin{array}{l} PP = 0 \\ GP = 1 \end{array} \right.$$

III. 4. 1. b. Règles d'inférence, agrégation

La table de règle utilisée est constituée de 32 règles, décrite sur le tableau suivant :

ΔI ΔP	GN	PN	PP	GP	ΔP_m
GN	MP	MP	MN	MN	PP
PN	PP	PP	PN	PN	
PP	PN	PN	PP	PP	
GP	MN	MN	MP	MP	
GN	GP	GP	GP	GP	GP
PN	GP	GP	GP	GP	
PP	GP	GP	GP	GP	
GP	GP	GP	GP	GP	

Table (III.2) : Table règle d'inférence du régulateur flou.

Donc nous avons :

R1 : Si ΔP est GN et ΔI est GN et ΔP_m est PP alors ΔD est MP

R2 : Si ΔP est GN et ΔI est PN et ΔP_m est PP alors ΔD est MP

.

•

•

R8 : Si ΔP_{estPN} et $\Delta I_{est GP}$ et $\Delta P_{mest PP}$ alors ΔD_{PN} ou

•

•

R12 : Si ΔP_{estPP} et $\Delta I_{est GP}$ et $\Delta P_{mest PP}$ alors ΔD_{PP} ou

•

•

R14 : Si ΔP_{estGP} et $\Delta I_{est PN}$ et $\Delta P_{mest PP}$ alors ΔD_{MN} ou

•

•

•

R32 : Si ΔP_{estGP} et $\Delta I_{est GP}$ et $\Delta P_{mest GP}$ alors ΔD_{GP}

Pour la méthode d'agrégation max-min, ceci est équivalent à

R1 : $(\Delta P_{estGN} \min \Delta I_{est GN} \min \Delta P_{mest PP}) \min \Delta D_{MP}$

R2 : $(\Delta P_{estGN} \min \Delta I_{est PN} \min \Delta P_{mest PP}) \min \Delta D_{MP}$

•

•

R32 : $(\Delta P_{estGP} \min \Delta I_{est GP} \min \Delta P_{mest GP}) \min \Delta D_{GP}$

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

$$U_{r(MP)} = \max (R1, R2, R15, R16)$$

$$U_{r(MN)} = \max (R3, R4, R13, R14)$$

$$U_{r(PP)} = \max (R5, R6, R11, R12)$$

$$U_{r(PN)} =$$

$$\max (R7, R8, R9, R10) U_{r(GP)} = \max (R17, R18, R19, R20, R21, R22, R23, R24, R25, R26, R27, R28, R29, R30, R31, R32).$$

III.4 .1.c. Defuzzification

Ladéfuzzification se fait par la méthode des hauteurs pondérées.

$$\Delta U_n(k) = \frac{x1 * U_{r(MP)} + x2 * U_{r(MN)} + x3 * U_{r(PP)} + x4 * U_{r(PN)} + x5 * U_{r(GP)}}{U_{r(MP)} + U_{r(MN)} + U_{r(PP)} + U_{r(PN)} + U_{r(GP)}}$$

III.5. Implantation sur FPGA

Dans notre étude, nous utilisons le langage VHDL et le System Generator de Xilinx pour la description de l'implantation FPGA, de l'algorithme décrit.

La structure générale de l'algorithme du régulateur flou est représentée sur la figure (III.5).

Cette implémentation contient essentiellement 3 modules nommés comme suit :

1. Module de calcul des fonctions d'appartenances ;
2. Module de calcul de l'inférence ;
3. Module de réalisation de défuzzification.

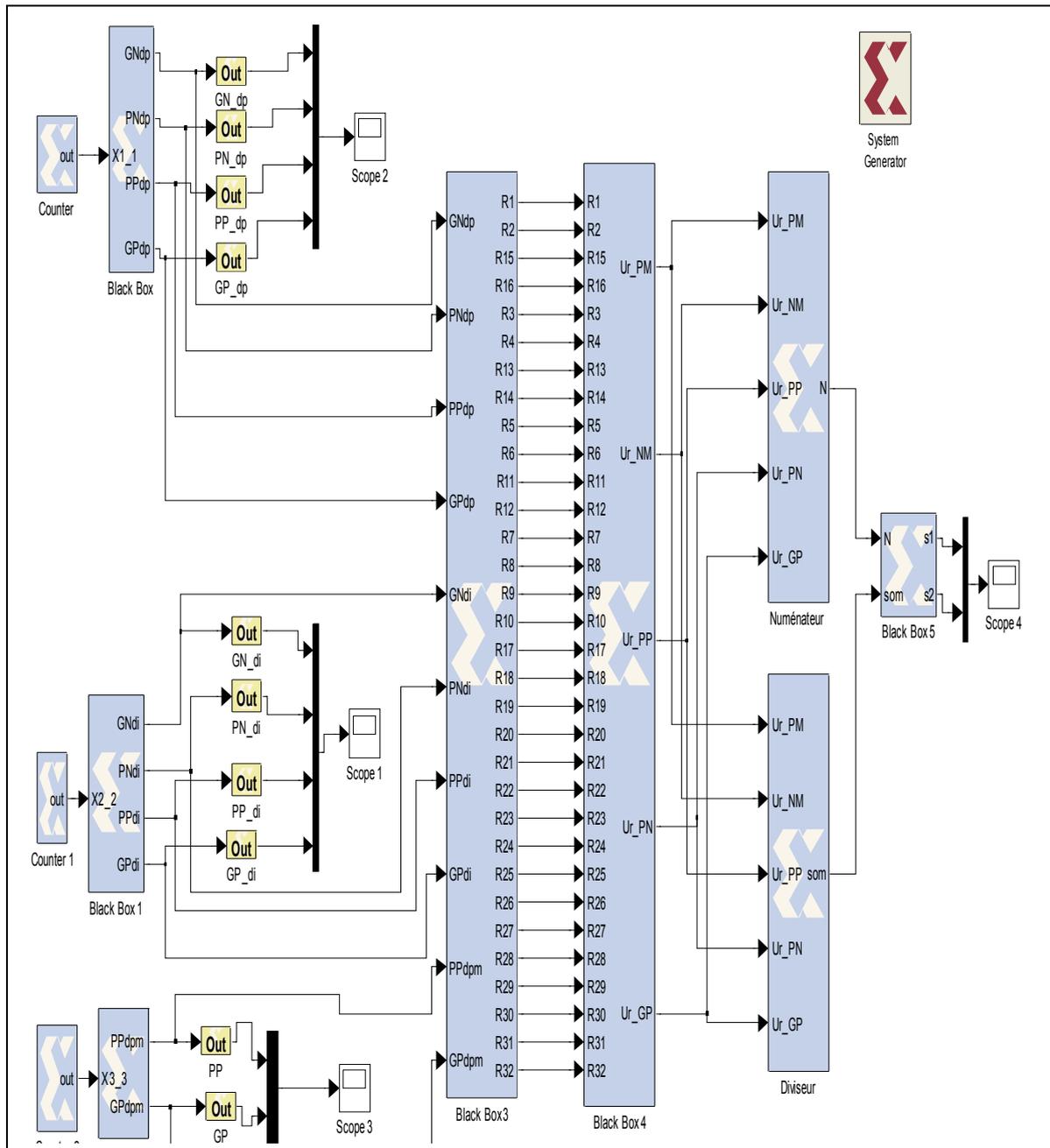


Figure (III.5) : Algorithme proposé pour l'implémentation du régulateur flou.

III.5.1. Module de calcul des fonctions d'appartenance

Le module de calcul des fonctions d'appartenance ou bien lafuzzification permet de convertirles entrées réelles en un ensemble de variables floues ;

Ce module réalise les quatre fonctions d'appartenances pour les deux variables d'entrées (ΔP , ΔI) et les deux fonctions d'appartenances pour la variable d'entrée ΔPm .

La simulation comportementale de ce système est représentée sur les figures (III.7,III.9 ,III.11).

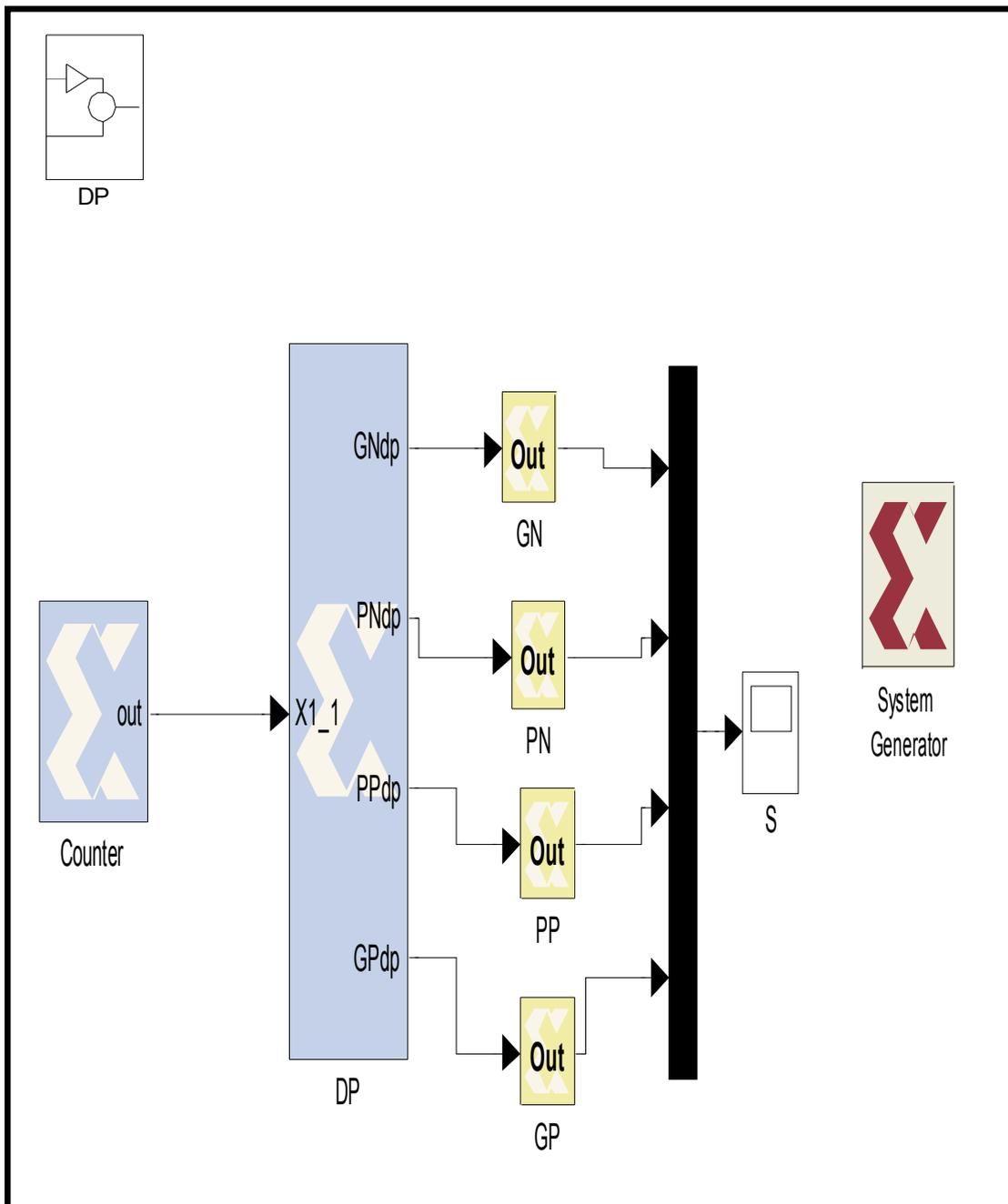


Figure (III.6) : Implémentation de la fonction d'appartenance DP.

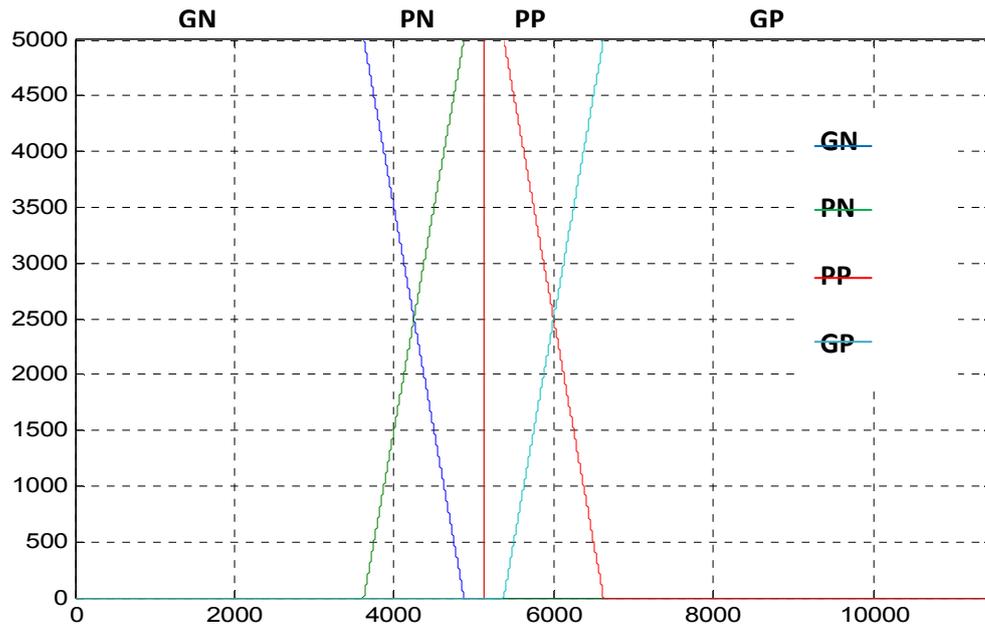


Figure (III.7) : Simulation comportementale de la fonction d'appartenance DP sur FPGA.

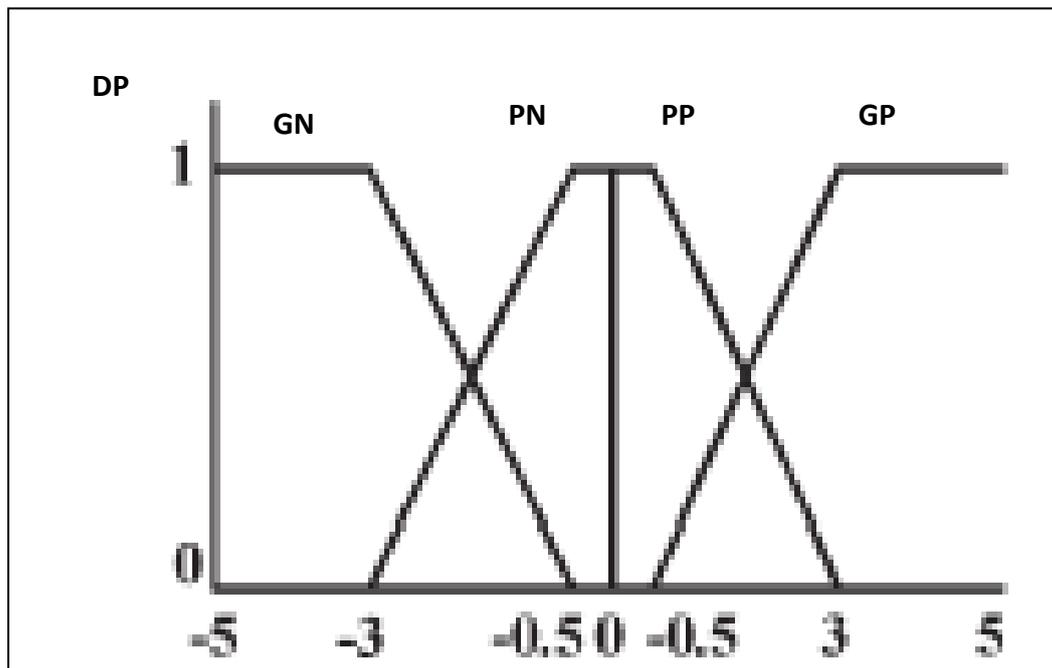


Figure (III.8) : Simulation comportementale de la fonction d'appartenance DP sous MATLAB.

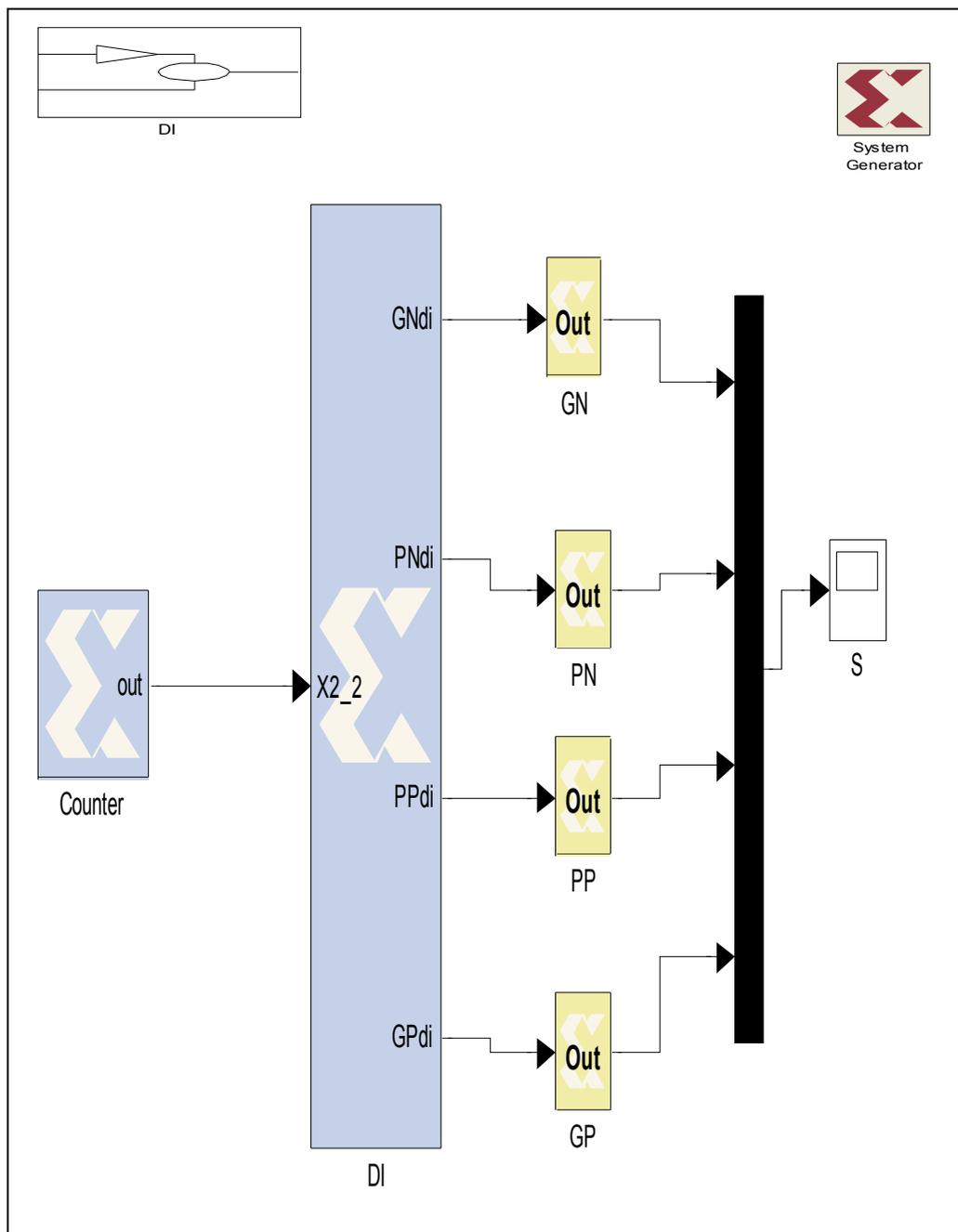


Figure (III.9) : Implémentation de la fonction d'appartenance DI.

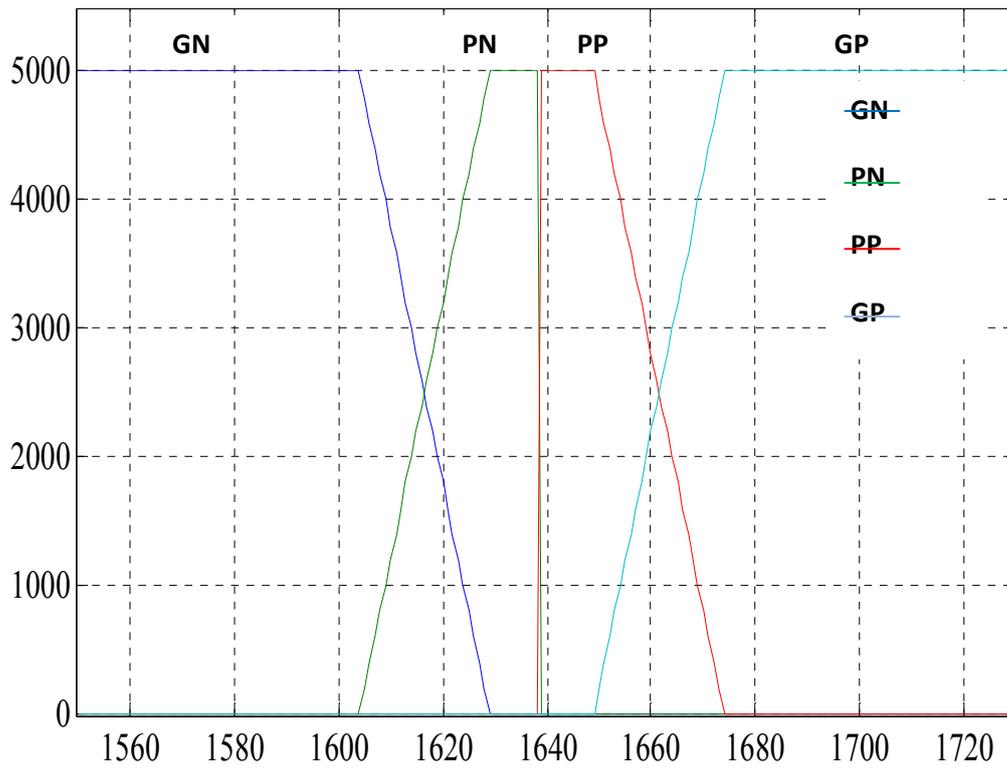


Figure (III.10) : Simulation comportementale de la fonction d'appartenance DI sur FPGA.

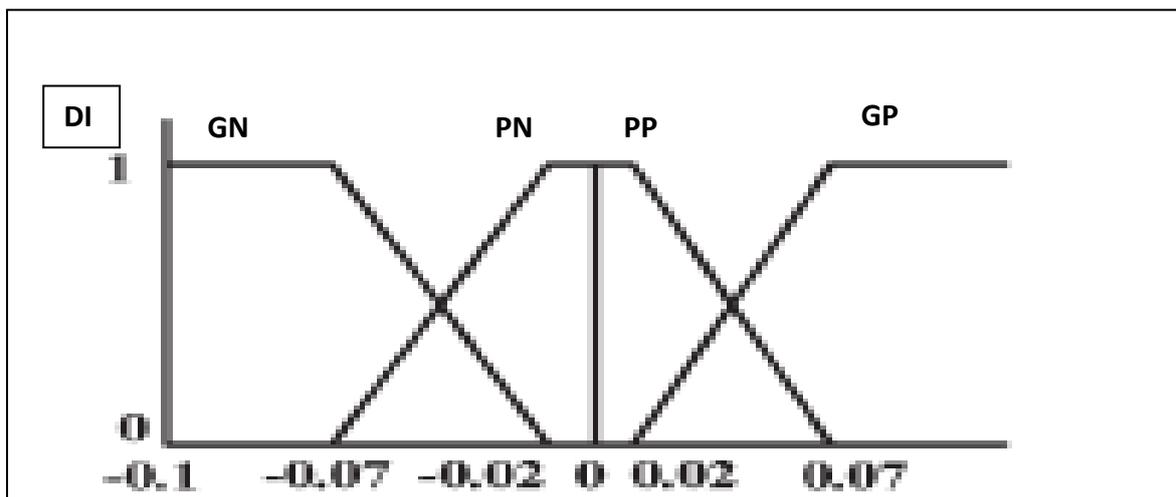


Figure (III.11) : Simulation comportementale de la fonction d'appartenance DI sous MATLAB.

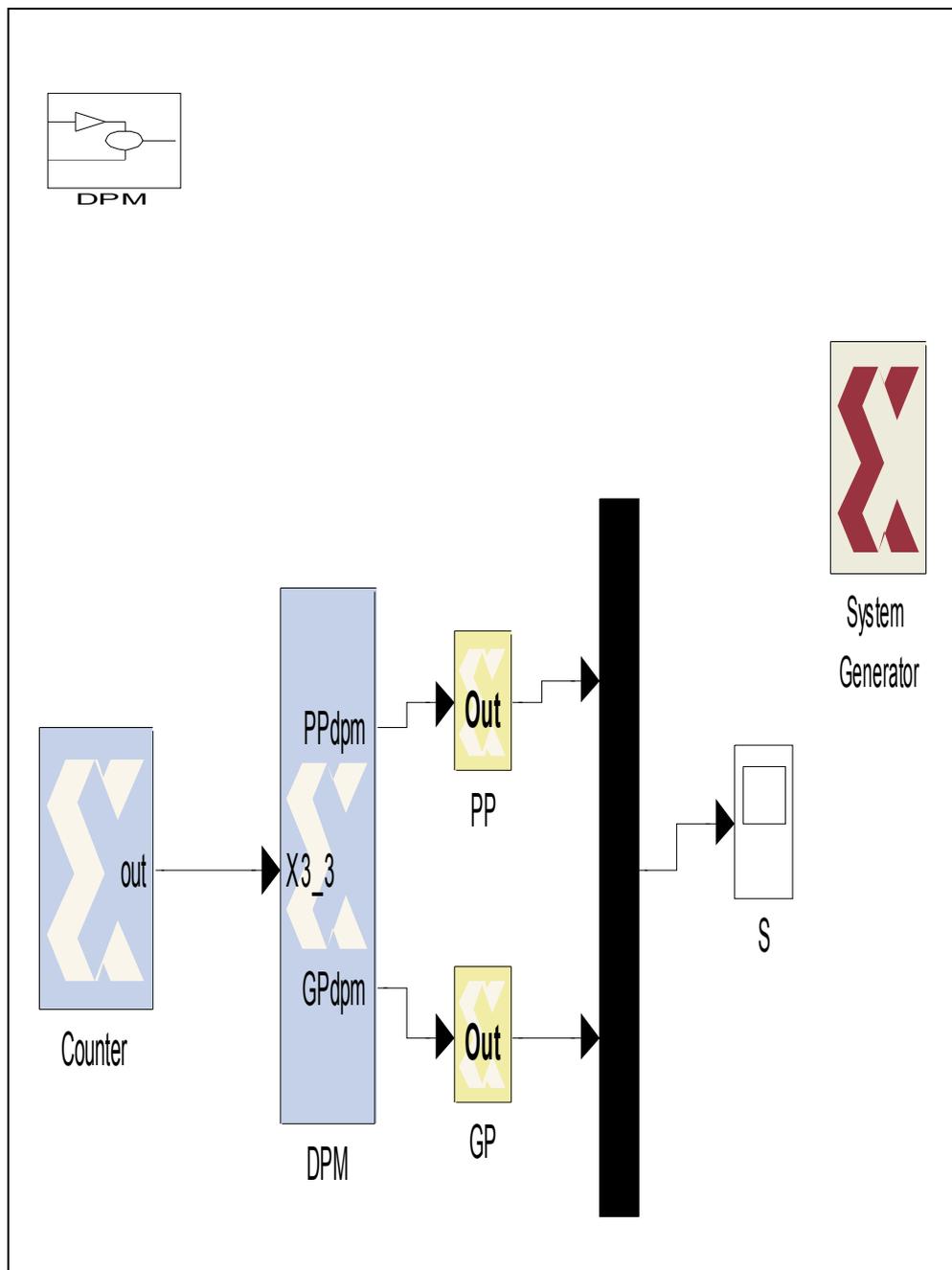


Figure (III.12) : Implémentation de la fonction d'appartenance DPM.

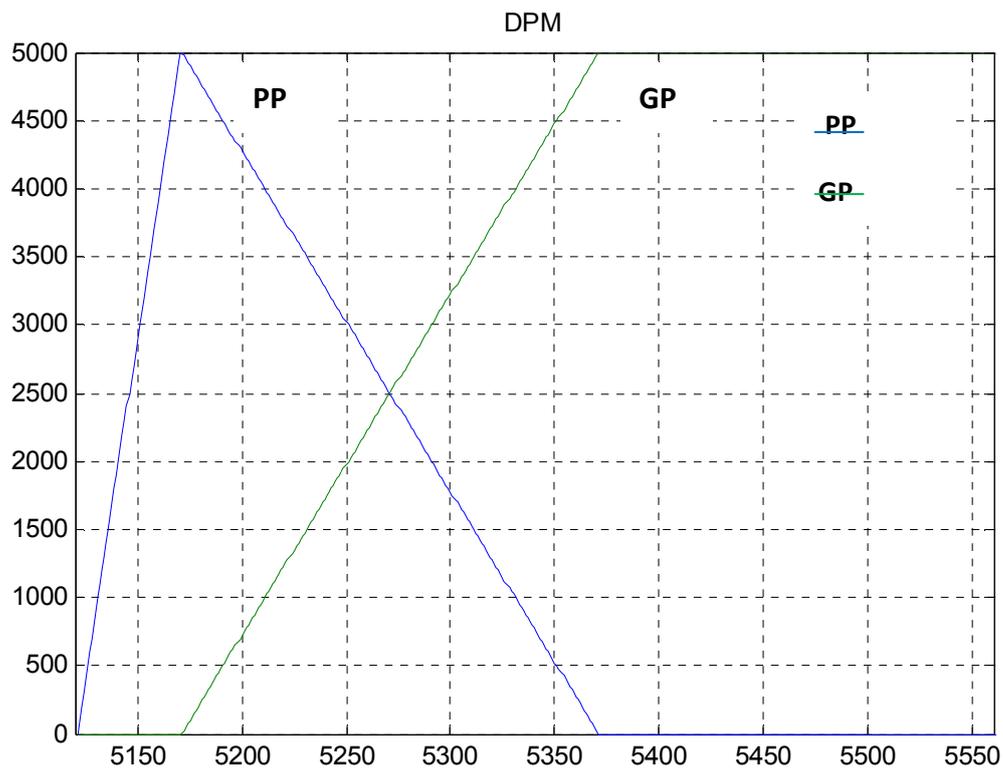


Figure (III.13) : Simulation comportementale de la fonction d'appartenance DPM sur FPGA.

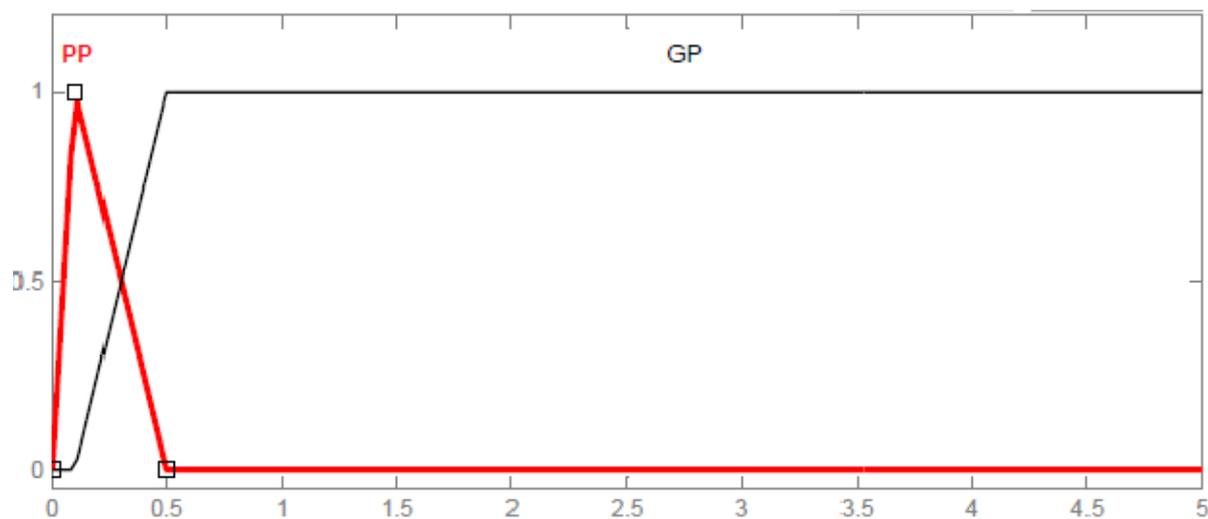


Figure (III.14) : Simulation comportementale de la fonction d'appartenance DPM sous MATLAB.

III.5.1. Module de calcul de l'inférence

III.5.1.a. Module de calcul des règles d'inférences

Ce module réalise l'opérateur **ET**, c'est la combinaison des différences règles par une agrégation **Min**. la figure (III.11) résume un organigramme simple pour la réalisation de la fonction MIN pour le résultat règle 1.

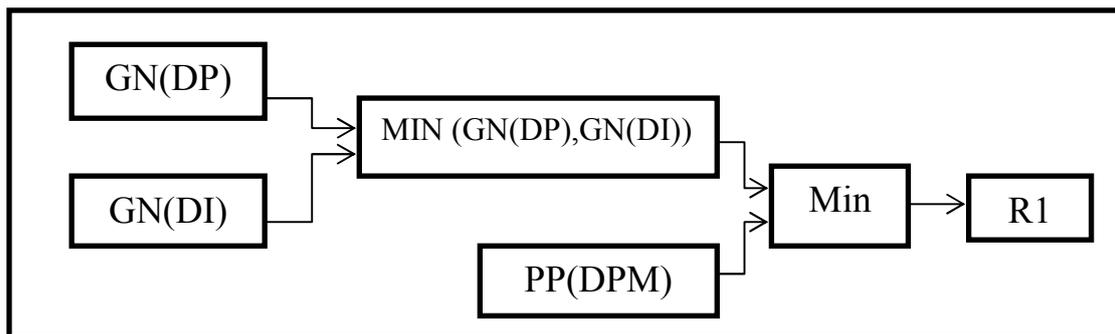


Figure (III.15) : Organigramme représente la fonction MIN pour le résultat règle 1.

III.5.1.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 flous. La figure (III.12) résume un organigramme simple pour la réalisation de la fonction Max pour le résultat règle MP.

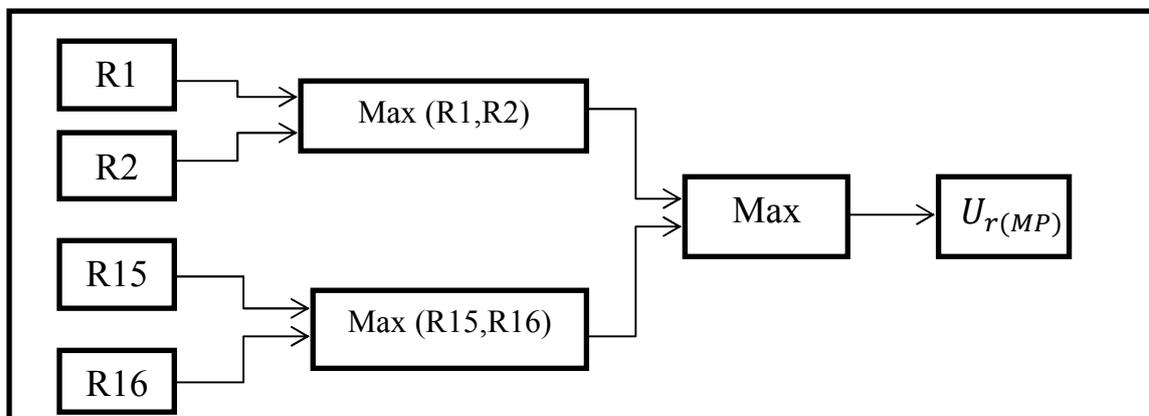
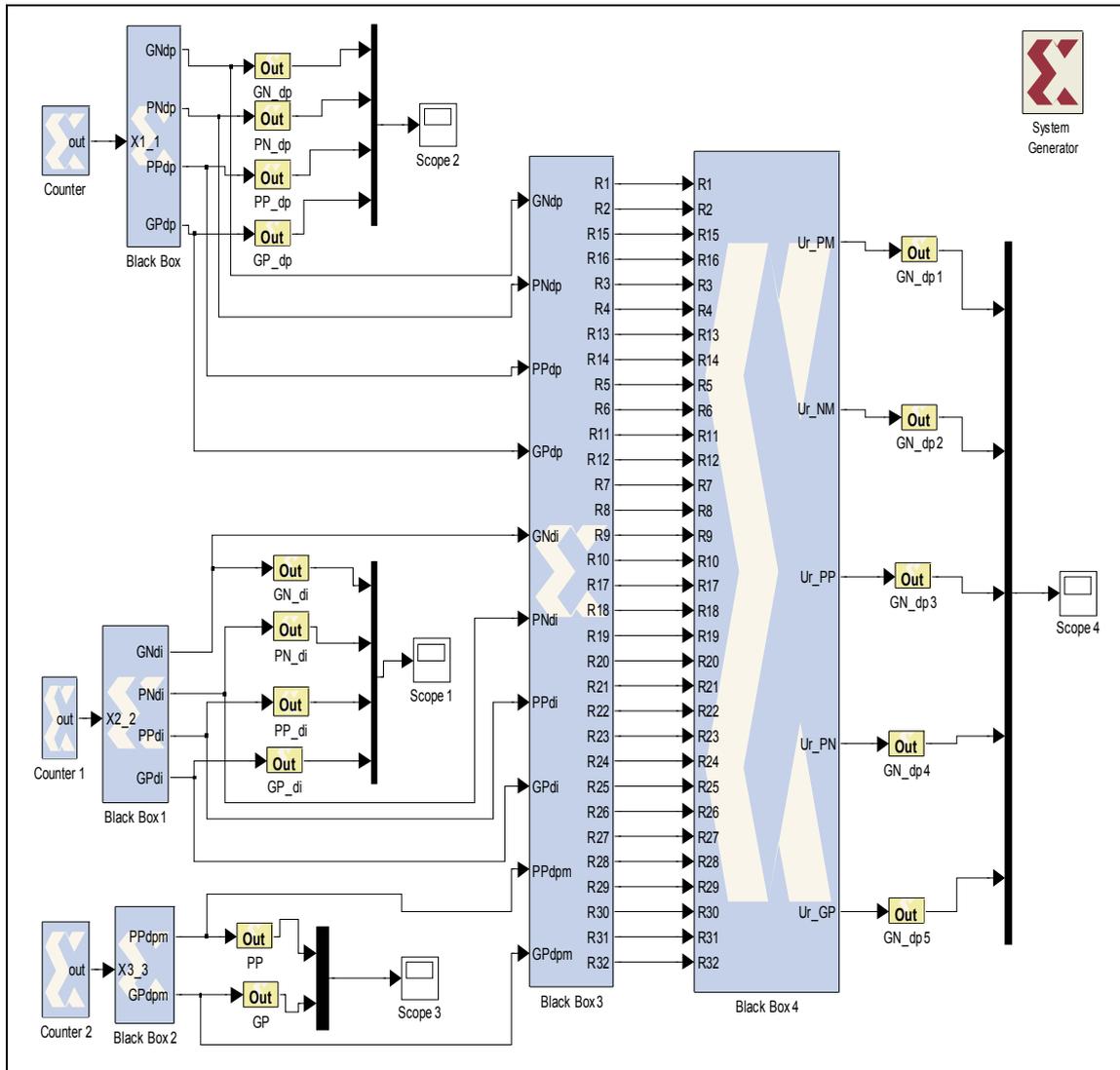


Figure (III.16) : Organigramme représente fonction Max pour le résultat MP.



Figure(III.17) : Implémentation du module de calcul de l'inférence.

	Désignation des fonctions
MN	Moyen Négatif
PN	Petit Négatif
PP	Petit positif
MP	Moyen Positif
GP	Grand Positif

Table (III.3) : fonctions d'appartenance de la grandeur de sortie.

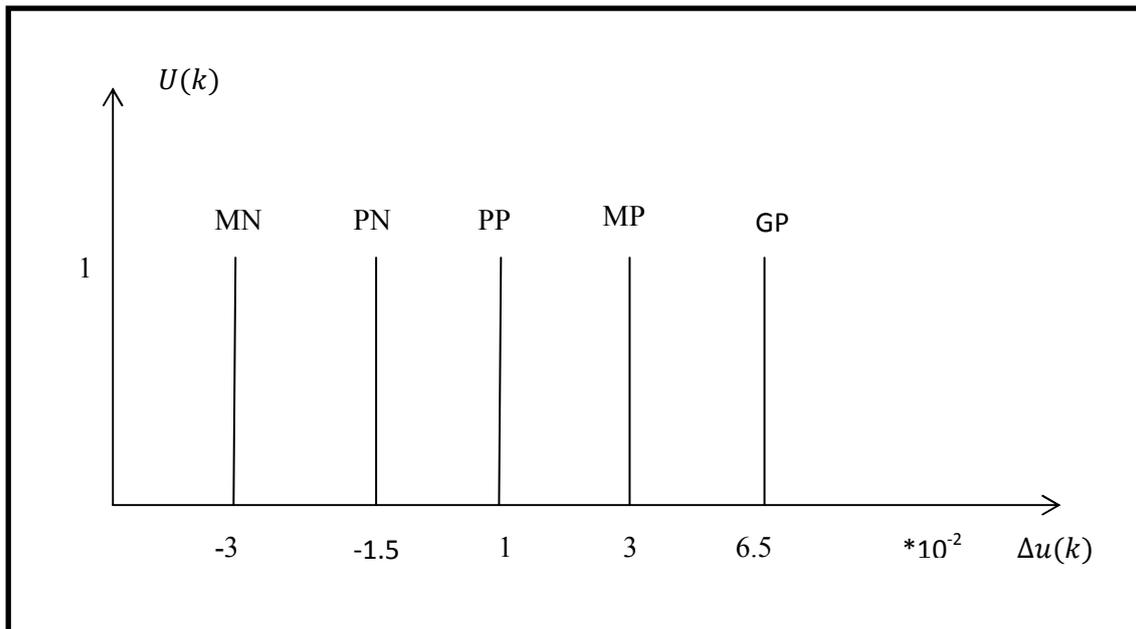


Figure (III.18) : Fonctions d'appartenances de la grandeur de sortie.

III.5.1.c. Module de réalisation de la défuzzification

Ce module est divisé en trois blocs ; bloque du calcul du numérateur, bloque de calcul dénominateur et bloque de calcul de la division.

Le bloque de numérateur réalise la multiplication et addition, alors que le dénominateur réalise la somme des degrés d'appartenances. La division numérique se réduit à des soustractions et des décalages.

La figure (III.19) représente un organigramme simple représente le module de la défuzzification.

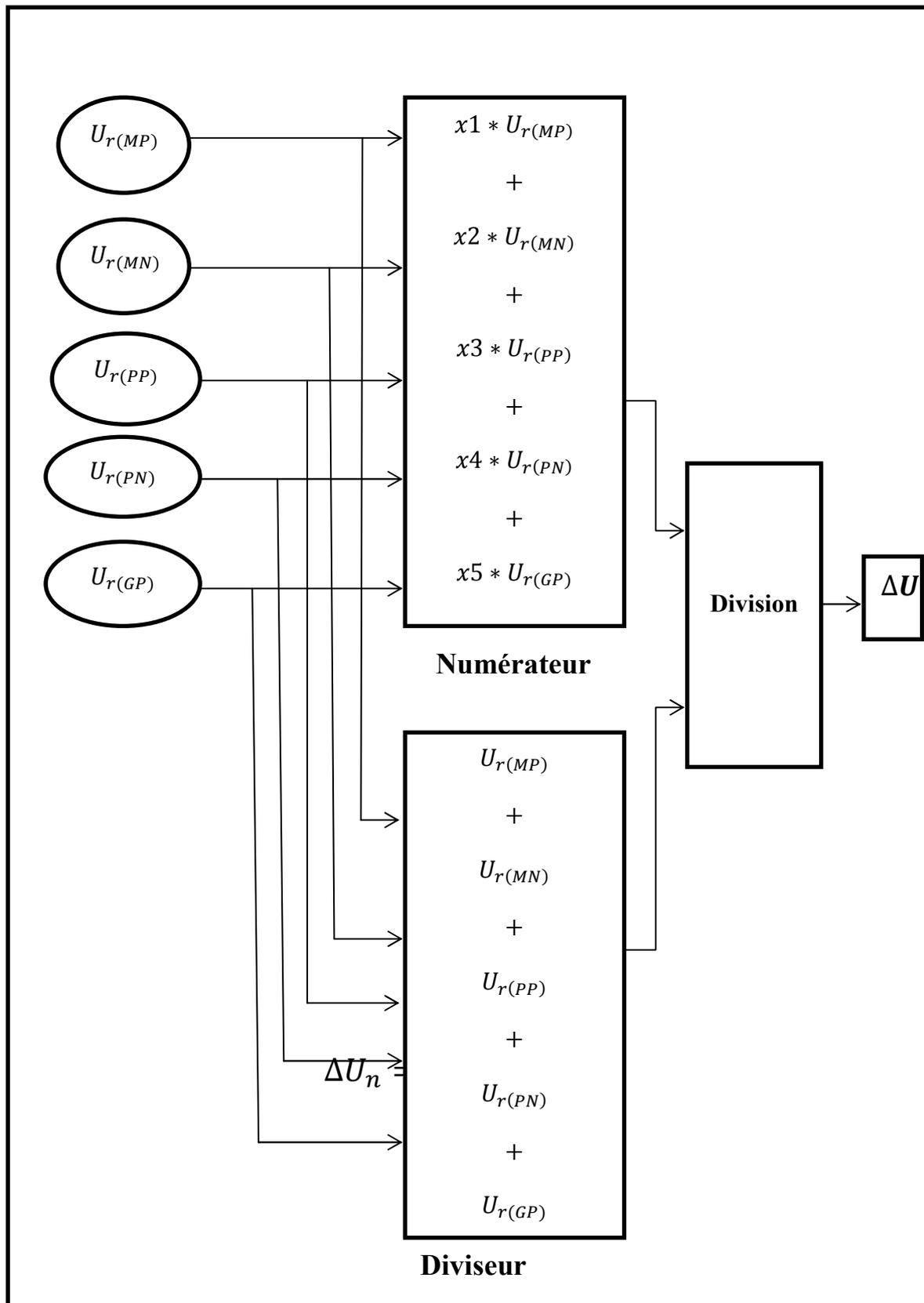


Figure (III.19) : Organigramme représente le module de la défuzzification.

La figure (III.19) représente la simulation pour : $DP = -3, DI = -0.01$ et $DPM = 0.05$.

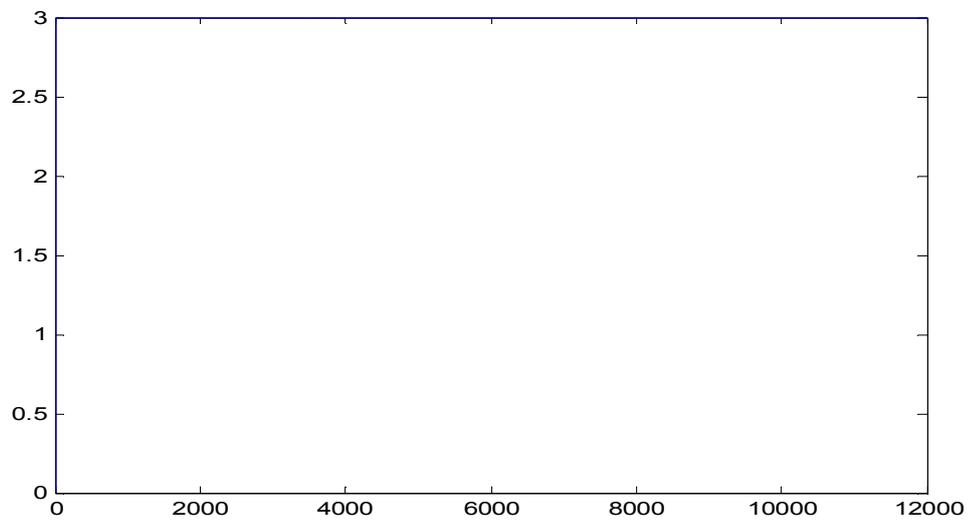


Figure (III.20) : Résultat de simulation sur FPGA.

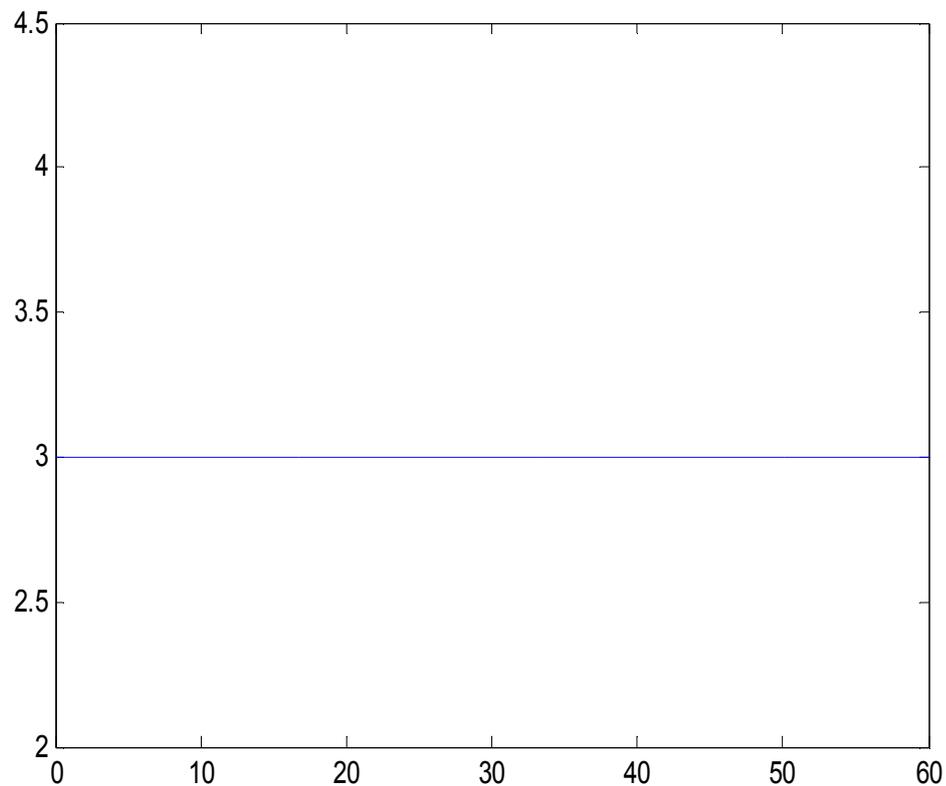


Figure (III.21) : Résultat de simulation sous MATLAB.

III.6. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons proposé une architecture simple pour l'implémentation de l'algorithme du régulateur flou.

Avant d'implémenter ce programme sur la carte on l'a simulé par le fondation-ISE 10.1, et pour vérifier le fonctionnement de notre régulateur flou il suffit d'implémenté sur un circuit FPGA, puis en les comparants avec la simulation MATLAB pour validation. Dans ce cas, une grande correspondance est trouvée entre les résultats théoriques et les résultats réels.

II.1. Introduction

En raison de leur nature heuristique, liée à la simplicité et à l'efficacité, que ça soit pour les systèmes linéaires et non linéaires, les méthodes de contrôle par logique floue ont montré leurs utilités pour l'implémentation des commandes *MPPT* dans un système *PV* isolé ou connecté au réseau électrique. De ce fait, plusieurs études et applications associant la logique floue et la poursuite du *PPMont* ont été proposées durant toutes ces dernières années. Ce type de commande a été employé par *Won et al.* en 1994, dans un article où on a fait apparaître les bonnes performances d'une la commande *MPPT* basée sur le contrôle flou, et ce sous différentes conditions atmosphériques externes. Dans une approche semblable, les résultats expérimentaux obtenus via une commande *MPPT* floue, par *Khaehintung et Sirisuk* en 2004, ont prouvé que la nouvelle commande. Ainsi, dans une première partie, était huit (08) fois plus rapide qu'une commande *MPPT* conventionnel à base d'algorithme *P&O*. Les résultats obtenus dans ce contexte, ont également montré qu'un système *PV*, utilisant ce type de contrôleur *MPPT*, peut atteindre un rendement en terme de puissance d'environ de 85%. *Gounden et al* a également présenté une application, lors de laquelle un contrôleur *MPPT* flou a été associé avec succès à un système *PV* connecté à un réseau électrique. C'était un exemple représentatif de cette catégorie de système *kgfsettyjkngfaqèbf&-jirfjPV* qui montrés que la commande *MPPT* floue est un outil très efficace pour extraire le maximum de puissance vers le réseau électrique.

Le présent chapitre renfermera, entre autres, 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. Par la fin, ça sera : les étapes et les outils de conception utilisés pour la concrétisation de notre propre commande *MPPT* floue.

II.2. Notions de bases de la logique floue

Dans cette partie, nous présenterons quelques aspects théoriques de la logique floue, ainsi que les bases de son application pour la commande de processus.

L'intérêt de la logique floue réside dans sa capacité à traiter, l'imprécis, l'incertitude et le vague. Elle est issue de la capacité de l'homme à décider et agir de façon pertinente malgré le flou des connaissances disponibles et a été introduite dans le but d'approcher le raisonnement humain à l'aide d'une représentation adéquate des connaissances. Aussi, le succès de la commande floue trouve en grande partie son origine dans sa capacité à traduire une stratégie de contrôle d'un opérateur qualifié en un ensemble de règles linguistiques « *si ... alors* » facilement interprétables.

II.2.1. La théorie des ensembles flous

Ce n'est qu'à partir de 1965 que L. A. Zadeh, professeur à l'université de Berkeley, jeta les bases de ce qu'il dénomma «*fuzzy set*» (ensemble flou), prenant ainsi en considération le problème posé par les connaissances imprécises ou vagues. La notion d'ensemble flou permet alors des graduations dans l'appartenance d'un élément à une classe, c'est-à-dire autorise un élément à appartenir plus ou moins fortement à cette classe.

II.2.2. Différence entre ensemble flou et ensemble booléen

Alors qu'un ensemble booléen est défini par sa fonction caractéristique f à valeurs 0 ou 1, un ensemble flou est défini par sa fonction d'appartenance μ à valeurs dans l'intervalle $[0, 1]$. Considérons l'exemple suivant :

L'ensemble des tailles possibles d'un individu représente *l'univers de discours* de la variable « *taille* ». « *Grand* » est une *valeur linguistique* de cette variable. Soit 1.65 m la taille de X . dans le cas de l'ensemble booléen X n'appartient pas à la classe des « *Grands* ». Dans le cas de l'ensemble flou X appartient à la classe des « *Grands* » avec un certain degré d'appartenance. La notion d'ensemble flou évite l'utilisation arbitraire des limites rigides d'appartenance à des classes, il serait aberrant de considérer qu'un individu de 1.70 m est grand, mais qu'un individu de 1.695 m ne l'est pas.

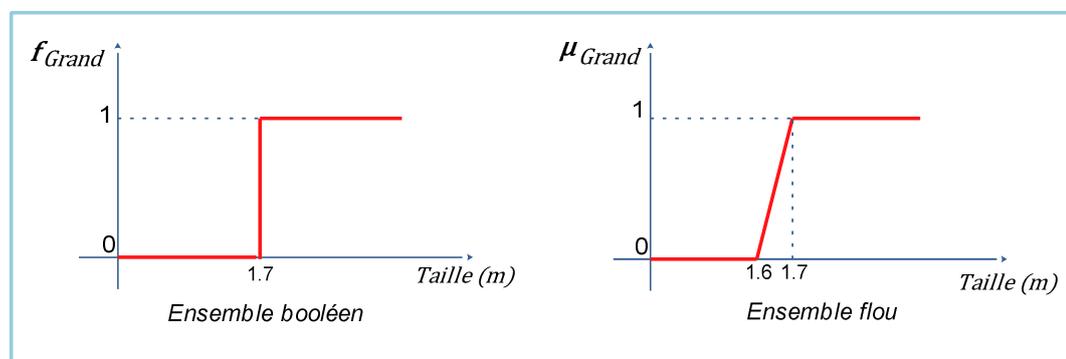


Figure (II. 1) : Ensemble booléen et ensemble flou.

II.2.3. Variables linguistiques

Une variable linguistique est représentée par un triplet (V, U, TV) où V est la variable linguistique elle-même, U est l'univers de discours et TV l'ensemble des caractérisations floues de la variable.

Considérons par exemple la variable *taille* définie sur l'ensemble des entiers positifs et caractérisée par les ensembles flous *petit*, *moyen*, *grand*. La variable *taille* est alors représentée par le triplet suivant : $\{(petit, moyen, grand)\}$.

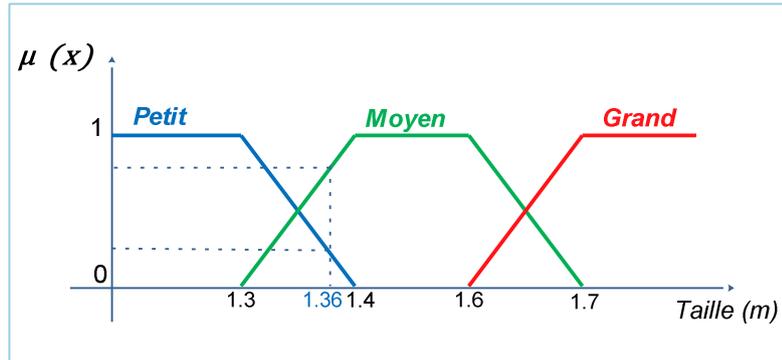


Figure (II. 2) : Une personne mesurant 1.36 m est petite avec un degré d'appartenance 0.4 et moyenne avec un degré de 0.6

II.2.4. définition

Un ensemble flou A est défini sur l'univers de discours X est noté :

$$A = \int_u^n \mu_A(x)/x. \quad \text{Dans le cas continu,} \quad (\text{II. 1})$$

$$A = \sum_{i=1}^n \mu_A(x_i)/x_i, \quad \text{Dans le cas discret.} \quad (\text{II. 2})$$

II.2.5. Caractéristiques d'un ensemble flou

Ce sont essentiellement celles qui montrent dans quelle mesure l'ensemble flou diffère de l'ensemble booléen.

- **Support** : $\text{supp}(A) = \{x \in X / f_A(x) \neq 0\}$, c'est l'ensemble booléen des éléments de X qui appartiennent au moins un peu à l'ensemble flou.
- **Hauteur** : $h(A) = \sup_{x \in X} f_A(x)$, c'est le plus fort degré d'appartenance avec lequel un élément de X appartient à l'ensemble flou, ce dernier est dit normalisé si sa hauteur est de 1.
- **Noyau** : $\text{noy}(A) = \{x \in X / f_A(x) = 1\}$, c'est l'ensemble booléen de tous les éléments appartenant de façon absolue à l'ensemble flou.
- **Coupe de niveau α ou α -coupe** :

➤ α - coupe(F) = $F_0 = \{x \in X / f\mu_A(x) \geq \alpha\}$, c'est l'ensemble booléen des éléments de X qui appartiennent à A avec un degré d'appartenance au moins égal à α .

➤ Singleton flou de :

➤ $\mu_{\{x\}}(x) = 1$ et $\mu_{\{x\}}(y) = 0, \forall x \neq y$. (II.3)

➤ Ensemble flou convexe : un ensemble flou A est convexe si :

$\mu_A(\lambda x_1 + (1 - \lambda)x_2) \geq \min(\mu_A(x_1), \mu_A(x_2))$, tel que $x_1, x_2 \in X, \lambda \in [0, 1]$

(II.4)

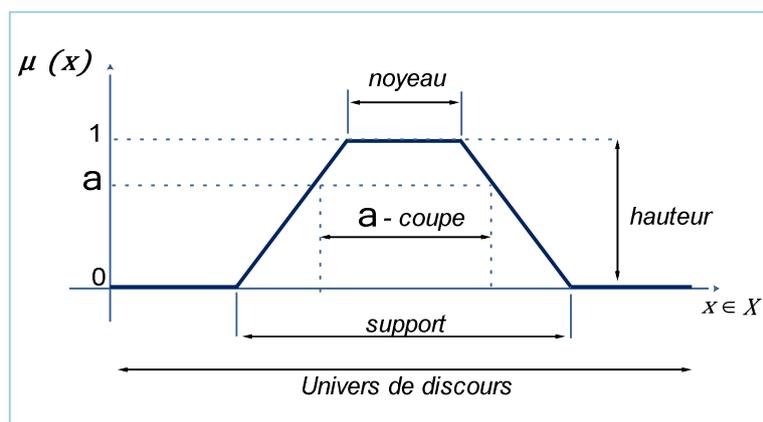


Figure (II. 3) : Support, noyau, hauteur et α -coupe d'un ensemble flou.

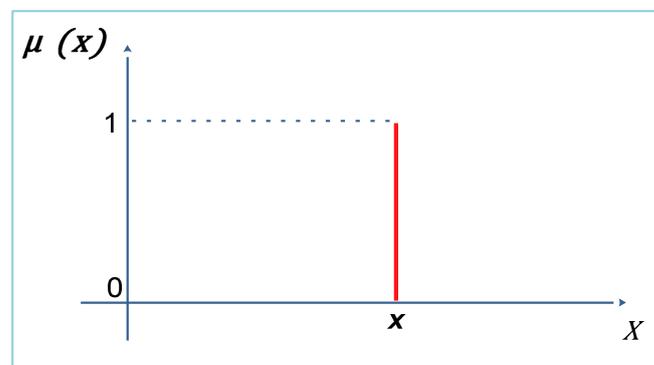


Figure (II. 4) : Singleton flou.

➤ **Partition floue** : N ensembles flous (A_1, A_2, \dots, A_N) définis sur l'univers de discours X forment une partition floue si :

$$\text{➤ } \forall x \in X, \sum_{i=1}^N \mu_{A_i}(x) = 1 \quad (\text{II.5})$$

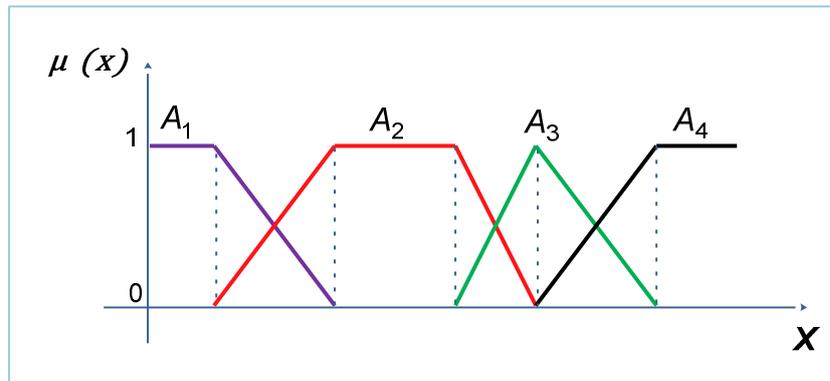


Figure (II.5) : Exemple de partition floue.

Une partition floue composée d'ensembles flous convexes normaux implique que pas plus de deux fonctions d'appartenance se recouvrent.

II.2.6. Opérations sur les ensembles flous

Nous définissons, ci-dessous, les notions d'intersection, d'union et de complémentation d'ensembles flous.

- Soient A et B deux ensembles flous décrits par leurs fonctions d'appartenance $\mu_A(x)$ et $\mu_B(x)$. Une définition de l'union flou mène à la fonction d'appartenance donnée par :

$$\mu_{A \cup B}(x) = \max[\mu_A(x), \mu_B(x)] \quad (\text{II.6})$$

- Et une définition de l'intersection flou mène à la fonction d'appartenance donnée par :

$$\mu_{A \cap B}(x) = \min[\mu_A(x), \mu_B(x)] \quad (\text{II.7})$$

- En ajoutant la définition de la fonction d'appartenance du complément flou :

$$\mu_{\bar{A}}(x) = 1 - \mu_A(x) \quad (\text{II.8})$$

Il existe d'autres opérateurs qui sont les normes triangulaires (t-normes) pour l'intersection et les conormes triangulaires (t-conormes) pour l'union.

	t-normes	t-conormes
Zadeh (1973)	$\min(x, y)$	$\max(x, y)$
Lukasiewicz, Giles (1976)	$\max(x + y - 1, 0)$	$\max(x + y, 1)$
Hamacher (1978) $\gamma > 1$	$\frac{x \cdot y}{\gamma + (1 - \gamma)(x + y - xy)}$	$\frac{x + y - (2 - \gamma)x \cdot y}{1 - (1 - \gamma)x \cdot y}$
Bendler et Kahout (1980)	$x \cdot y$	$x + y - x \cdot y$
Weber (1983)	$\begin{cases} x, \text{ si } y = 1 \\ y, \text{ si } x = 1 \\ 0, \text{ ailleurs} \end{cases}$	$\begin{cases} x, \text{ si } y = 0 \\ y, \text{ si } x = 0 \\ 0, \text{ ailleurs} \end{cases}$
Dubois et Prade (1986) $\alpha \in [0, 1]$	$\frac{x \cdot y}{\max(x, y, \alpha)}$	$\frac{x + y + x \cdot y - \min(x, y, 1 - \alpha)}{\max(1 - \alpha, 1 - y, \alpha)}$

Tableau (II. 1) : Principales t-normes et t-conormes

➤ **Complémentation** : $\mu_{\bar{A}}(x) = 1 - \mu_A(x)$ (II. 9)

Avec : $A \cap \bar{A} \neq \emptyset$

➤ **Le principe d'extension** :

Le principe d'extension a été introduit par **L. A. Zadeh** en 1975 et constitue l'un des concepts les plus importants de la théorie des ensembles flous. Il permet l'extension de référence Y , éventuellement identique au premier. Il est alors possible de définir un ensemble flou B de Y de la donnée d'un ensemble flou A de X :

$$\forall y \in Y, \mu_B(y) = \begin{cases} \sup_{\{x \in X | y = f(x)\}} \mu_A(x) & \text{si } \{x \in X | y = f(x)\} \neq \emptyset \\ 0 & \text{si non} \end{cases} \quad \text{(II.10)}$$

II.2.7. relations floues

Jusqu'à présent nous avons considéré des ensembles flous monodimensionnels. Lorsque ceux-ci sont multidimensionnels, leur fonction d'appartenance est aussi communément appelée relation floue.

Une relation floue R définie sur le produit cartésien $X_1 \times \dots \times X_n$ est un ensemble flou (n-dimensionnel) et est noté :

$$R = \int_{X_1 \times \dots \times X_n} \frac{\mu_R(x_1, \dots, x_n)}{(x_1, \dots, x_n)} \text{ Dans le cas continu,}$$

$$R = \sum_{X_1 \times \dots \times X_n} \frac{\mu_R(x_1, \dots, x_n)}{(x_1, \dots, x_n)} \text{ Dans le cas discret.}$$

➤ **Produit cartésien :**

Considérons différents ensembles flous A_1, A_2, \dots, A_n , respectivement sur X_1, X_2, \dots, X_n . On peut définir, à partir de ces ensembles flous, un ensemble flou global multidimensionnel, $A = A_1 \times A_2 \times \dots \times A_n$, considéré comme leur *produit cartésien*, de fonction d'appartenance :

$$\forall x = (x_1, \dots, x_n) \in X, \mu_A(x) = \min(\mu_{A_1}(x_1), \dots, \mu_{A_n}(x_n)) \quad (\text{II.11})$$

➤ **Projection :**

De façon inverse, à partir d'un ensemble flou multidimensionnel défini sur un univers complexe, il est possible, à l'aide d'une projection mathématique, d'obtenir des informations sur chacune des différentes composantes de cet univers.

Soit un ensemble flou A défini sur un univers $X = X_1 \times X_2$. La projection de A sur X_1 est définie par :

$$\forall x_1 \in X_1, \text{proj}(A; X_1)(x_1) = \sup_{x_2 \in X_2} [\mu_A(x_1, x_2)] \quad (\text{II.12})$$

On définit de façon analogue la projection de A sur X_2 .

En particulier, si A est le produit cartésien des ensembles flous A_1 de X_1 et A_2 de X_2 , ses projections $\text{proj}(A; X_1)$ et $\text{proj}(A; X_2)$ sont respectivement A_1 et A_2 .

➤ **Extension cylindrique :**

L'extension cylindrique de l'ensemble flou B de X_a, X_b, \dots, X_k , avec : $1 \leq a < b < \dots < k \leq n$ est l'ensemble flou $B^c = extc(B; X)$ de X_1, X_2, \dots, X_n de fonction d'appartenance :

$$\forall x = (x_1, \dots, x_n) \in X, \mu_{B^c}(x) = \mu_B(x_a, \dots, x_k) \quad (\text{II.13})$$

➤ **Composition de relations floues :**

Soit R une relation floue définie sur $X \times Y$ et A un ensemble flou de X ; l'ensemble flou B de Y est déduit de la composition de A par R :

$$B = A \circ R = proj(R \cap extc(A, X \times Y); Y) \quad (\text{II.14})$$

En considérant l'extension cylindrique comme implicite, la composition de relations floues comporte deux phases : combinaison et projection. L.A. Zadeh propose l'opérateur de composition *sup-min*:

$$\forall y \in Y, \mu_B(y) = \sup_{x \in X} \min(\mu_A(x), \mu_R(x, y)) \quad (\text{II.15})$$

II. 3. La Commande En Logique Floue

Bien que la logique floue possède un champ d'application extrêmement vaste (commande, classification, aide à la décision, base de données imprécises,...) nous nous intéressons à son utilisation dans le domaine de la commande. Cette partie a comme objectif la présentation des principes de base de la commande floue.

L'objectif d'une commande floue est de traiter des problèmes de commande de processus, le plus souvent à partir des connaissances des experts ou d'opérateurs qualifiés travaillant sur le processus.

II.3.1. Les différentes étapes de la commande floue

Un contrôleur flou est un système à base de connaissances particulier, utilisant un raisonnement en profondeur limité, dans une procédure de chaînage avant règles (activation des règles par les prémisses). Toutes les règles activables (prémisse caractérisée par un degré d'appartenance non nul) sont activées. On considère ensuite une « moyenne » sur le résultat de ces règles pour engendrer une décision finale.

On peut distinguer plusieurs étapes dans le traitement des règles. Un schéma représentatif peut être celui de la figure (II.6) :

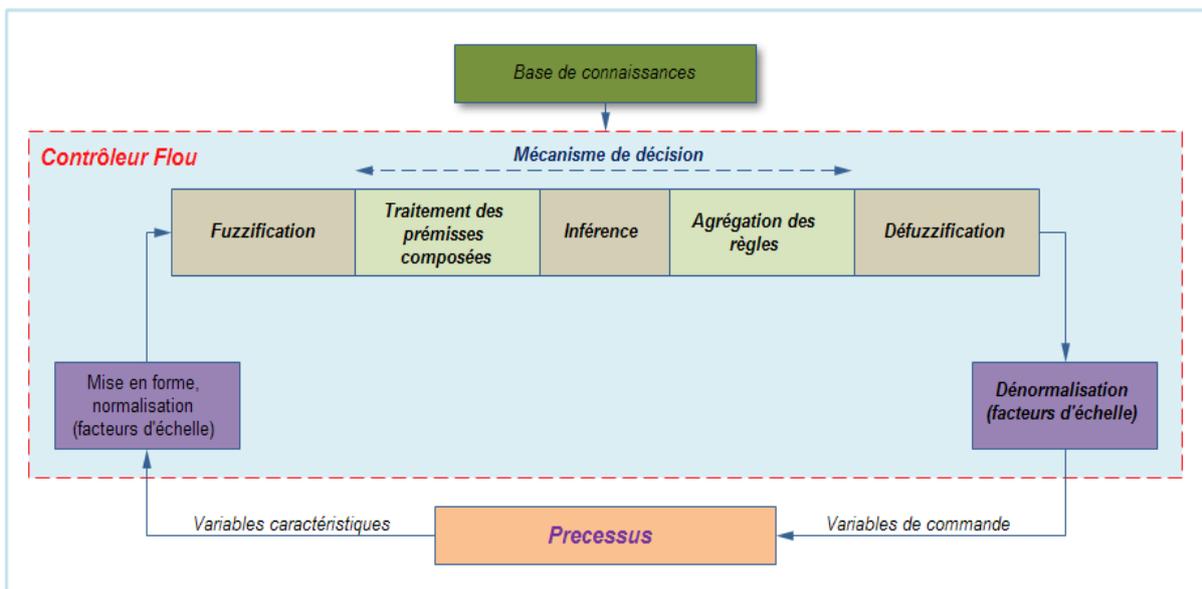


Figure (II. 6) : Structure de base d'un contrôleur flou.

Les variables caractéristiques du système à commander et les consignes définissent les variables d'entrée du contrôleur flou. Les variables caractéristiques sont en général, les grandeurs de sortie du processus et, le cas échéant, d'autres mesures déterminantes pour saisir l'évolution dynamique du processus. Les variables de sortie du contrôleur flou sont les commandes à appliquer au processus. La base de connaissances est composée d'une base de données et d'une base de règles. La base de données regroupe :

- les ensembles flous associés aux variables d'entrée et de sortie du contrôleur flou, les facteurs d'échelle (gains) en entrée (normalisation) et en sortie (dénormalisation).

La base de règles contient des règles de la forme :

$$\text{" Si}(X_1 \text{ est } A_1 \text{ et } X_2 \text{ est } A_2 \text{) Alors } (Y \text{ est } B) \text{"} \quad (\text{II.16})$$

X_1 , X_2 , et Y sont des grandeurs physiques caractéristiques du système et du problème de commande. A_1 , et A_2 sont des labels linguistiques.

Suivant la nature de B on parlera de :

- règles à conclusion symbolique (contrôleur de type Mamdani) : B est une valeur linguistique. Exemple : *Si l'erreur est « Négatif Moyen » et la variation de l'erreur est « Positif Petit » Alors la commande est « Négatif Petit ».*
- règles à conclusion algébrique (contrôleur de Sugeno) : B est une valeur numérique (singleton) ou une équation mathématique bien précise (non floue). Exemple : *Si l'erreur est « Négatif Moyen » et la variation de l'erreur est « Positif Petit » Alors la commande est -0.3.* Lorsque B est une valeur numérique on parle de règles de Takagi-Sugeno « d'ordre zéro », sinon, de règles à conclusion polynomiale.

Bien que les sorties des contrôleurs flous de type Sugeno soient généralement des fonctions non linéaires statiques de leurs entrées, il ne faut pas oublier de mentionner les contrôleurs dits « flous dynamiques » de Sugeno, où B est un modèle dynamique, certain ou incertain, à temps continu ou discret. L'utilisation de tels contrôleurs permet d'étendre certains résultats de l'automatique classique à la commande floue.

On distingue classiquement trois parties dans la structure d'un contrôleur flou : la fuzzification, le mécanisme de décision et la défuzzification.

- La fuzzification est l'étape qui permet de transformer une grandeur mesurée sur le processus en un ensemble flou.
- Le mécanisme de décision permet de calculer l'ensemble flou associé à la commande.
- La défuzzification est l'étape qui permet de transformer l'ensemble flou, obtenu par le calcul précédent, en une grandeur de commande à appliquer au processus.

Les opérations de normalisation et de dénormalisation sont des étapes optionnelles. Nous allons maintenant revenir en détail sur les différentes étapes dans le traitement des règles.

II. 3. 1. a. Mise en forme des entrées, normalisation

Cette première étape permet le traitement des variables d'entrée du contrôleur flou, par exemple, calcul d'erreurs et de variations d'erreurs. L'utilisation de domaines normalisés (univers de discours compris entre -1 et 1) nécessite une transformation d'échelle transformant les grandeurs physiques des entrées en des valeurs normalisées appartenant à l'intervalle $[-1, 1]$.

II. 3. 1. b. Fuzzification

C'est l'opération de *projection* de variables physiques réelles sur des ensembles flous caractérisant les valeurs linguistiques prises par ces variables. Deux cas peuvent se présenter selon que la mesure d'une variable physique réelle est précise (valeur numérique) ou pas (issue par exemple d'un capteur flou) :

Le choix de la forme des fonctions d'appartenance (triangulaires, trapézoïdales, exponentielles, gaussiennes,...) est arbitraire. Des études

comparatives ont montré, selon différentes formes de fonctions d'appartenance, des résultats pratiquement similaires en boucle fermée mais les formes triangulaires facilitent la programmation ce qui explique qu'elles soient le plus fréquemment utilisées.

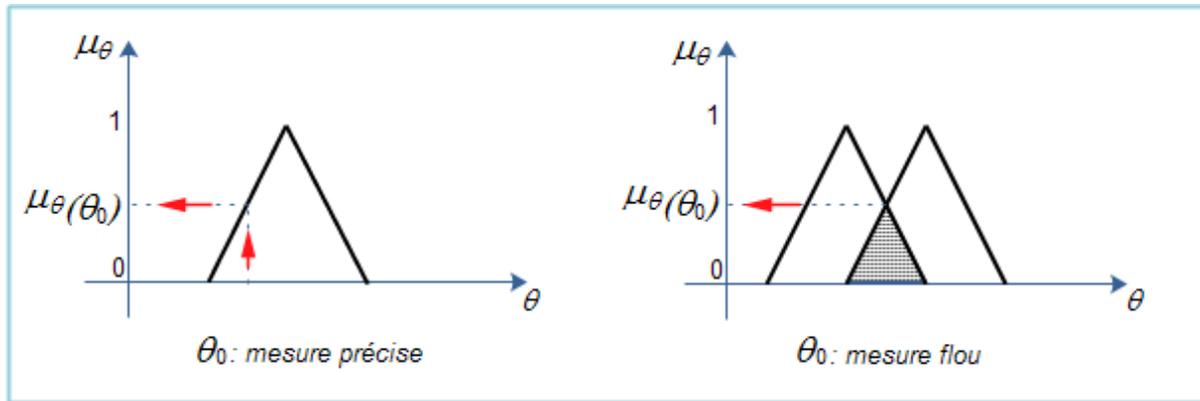


Figure (II. 7) : Conversion numérique symbolique.

Quant au nombre de fonctions d'appartenance, il est généralement impair car elles se répartissent autour de zéro. Un exemple de fonctions d'appartenance triangulaires est donné dans la figure (II. 8).

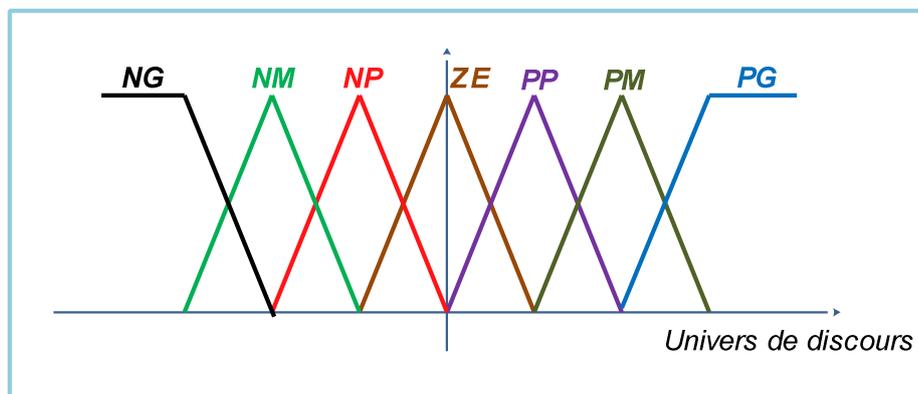


Figure (II. 8) : Exemple de fonctions d'appartenance.

NG, NM, \dots, PG sont des valeurs linguistiques, avec :

- NG : « Négatif Grand »,
- NM : « Négatif Moyen »,
- NP : « Négatif Petit »,

- *ZE* : « Zéro »,
- *PP* : « Positif Petit »,
- *PM* : « Positif Moyen »,
- *PG* : « Positif Grand ».

II. 3. 1. c. Traitement des prémisses composées

En général, les prémisses des règles vont comporter plusieurs clauses liées par des connecteurs « *ET* », « *OU* » et « *NON* ». Dans la pratique, pour les opérations de conjonction et de disjonction, on a souvent recours, parmi les normes et conormes triangulaires, aux opérateurs *min* et *max*. quant à la négation A^C d'un ensemble flou A , elle est caractérisée par : $\mu_{A^C}(x) = 1 - \mu_A(x)$.

Des modificateurs linguistiques peuvent aussi être utilisés dans l'écriture des règles, par exemples :

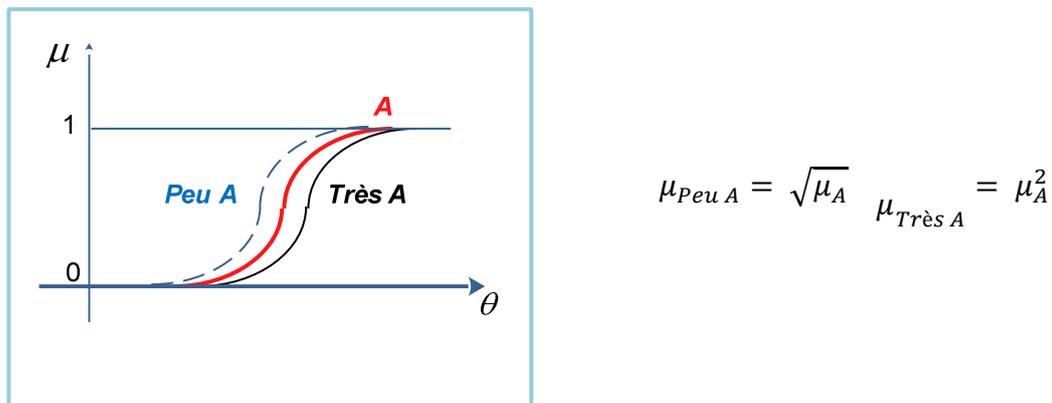


Figure (II. 9) : Exemple de modificateurs linguistiques.

II. 3. 1. d. Inférence floue

Elle repose sur l'utilisation d'un opérateur d'implication, lequel permet d'évaluer un degré de vérité d'une règle R de la forme « *Si X est A alors Y est B* ». En d'autres termes, cet opérateur quantifie la force de la liaison entre la prémisse et la conclusion de la règle.

Il existe de nombreux et différents opérateurs d'implication selon l'interprétation logique que l'on donne à l'implication « *A implique B* » ($A \rightarrow B$). On distingue ainsi l'implication classique où « *A implique B* » est définie par « *Non A ou B* » ($\bar{A} \cup B$) de l'implication dite conjonctive où « *A implique B* » est définie par « *A et B* » ($A \cap B$).

Les opérateurs les plus courants en commande sont de type conjonctif :

$$\begin{cases} \text{L'implication de Mamdani (1974): } \mu_R(x, y) = \min(\mu_A(x), \mu_B(y)) \\ \text{L'implication de Larsen (1980): } \mu_R(x, y) = \mu_A(x) \cdot \mu_B(y) \end{cases}$$

Soit la règle : « *Si la cylindrée du véhicule est importante, alors sa consommation en carburant est élevée* ». Cette règle doit pouvoir être utilisée pour un véhicule donné dont on connaît précisément la cylindrée, qui n'est pas forcément typique de la caractérisation « *importante* », et doit également fournir une conclusion relative à sa consommation en carburant si la cylindrée du moteur n'est que relativement importante, par exemple. Dans la logique classique, le modus ponens ne permettrait pas d'obtenir une conclusion que si l'on savait exactement que la cylindrée du véhicule considérée est importante. Il faut donc modifier le modus ponens pour atteindre la souplesse de raisonnement souhaitée.

Le modus-ponens trouve son équivalent flou dans le cadre du raisonnement approximatif sous la forme du *modus ponens généralisé* que nous présentons formellement ci-après :

	Logique classique	Logique floue
Fait	<i>X est A</i>	X est A'
Règle	<i>Si X est A alors Y est B</i>	<i>Si X est A alors Y est B</i>
Déduction	<i>Y est B</i>	<i>Y est B'</i>

La logique floue permet ainsi de déduire un nouveau fait B' caractérisé par :

$$\mu_{B'}(y) = \underbrace{\sup}_{x \in X} T(\mu_{A'}(y), \mu_R(x, y)) \quad (\text{II. 17})$$

Pour une t-norme T appelé *opérateur de modus-ponens généralisé*.

En commande, l'opérateur de "Zadeh" est couramment utilisé :

$$\mu_{B'}(y) = \underbrace{\sup}_{x \in X} \min(\mu_{A'}(x), \mu_R(x, y)) \quad (\text{II. 18})$$

Si A' est un singleton x_0 , alors : $\mu_{B'}(y) = \underbrace{\sup}_{x \in X} \min(\mu_{A'}(x), \mu_R(x, y)) = \mu_R(x_0, y)$

Pour l'implication de "Mamdani", on obtient : $\mu_{B'}(y) = \min(\mu_A(x_0), \mu_B(y))$

II. 3. 1. e. Agrégation des règles

Selon le type de l'implication, classique ou conjonctive, l'opérateur utilisé pour agréger les règles est, respectivement, de type conjonctif ou disjonctif. Ainsi, en commande, l'implication étant généralement de type conjonctif, cela revient à considérer que les règles sont liées par un opérateur *OU*. En pratique, on utilise l'opérateur *max* :

$$\mu_{B'}(y) = \underbrace{\max}_{i=1 \text{ à } N} (\mu_{B'_i}(y)) \quad (\text{II. 19})$$

Avant de décrire la prochaine étape consistant à transformer le résultat de l'agrégation des règles en une valeur précise de commande, considérons d'abord un exemple classique illustrant le raisonnement de Mamdani.

L'exemple illustré par la figure (II-8) considère les deux règles suivantes :

R_1 : **Si** (x_1 est ZE et x_2 est ZE) **alors** y est ZE

R_2 : **Si** (x_1 est PP et x_2 est PP) **alors** y est PP

La méthode de Mamdani repose sur l'utilisation de l'opérateur *min* pour la combinaison des prémisses et pour l'implication. Chaque règle est activée séparément et les conclusions sont agrégées pour définir l'ensemble flou associé à la variable de sortie y . l'agrégation des règles est réalisée par l'opérateur : *max*.

II. 3. 1. f. Défuzzification

La défuzzification consiste à transformer l'ensemble flou résultant de l'agrégation des règles en une grandeur de commande précise. Là aussi il existe plusieurs méthodes, parmi lesquelles :

- La méthode de la hauteur,
- Le premier des maxima,
- Le dernier des maxima,
- La moyenne des maxima,
- Le centre de gravité,
- Le centre des aires,
- Le centre de la plus grande surface,
- Le centre des maxima.

Les méthodes de défuzzification les plus utilisées en commande floue sont le centre de gravité, le centre des aires et le centre des maxima.

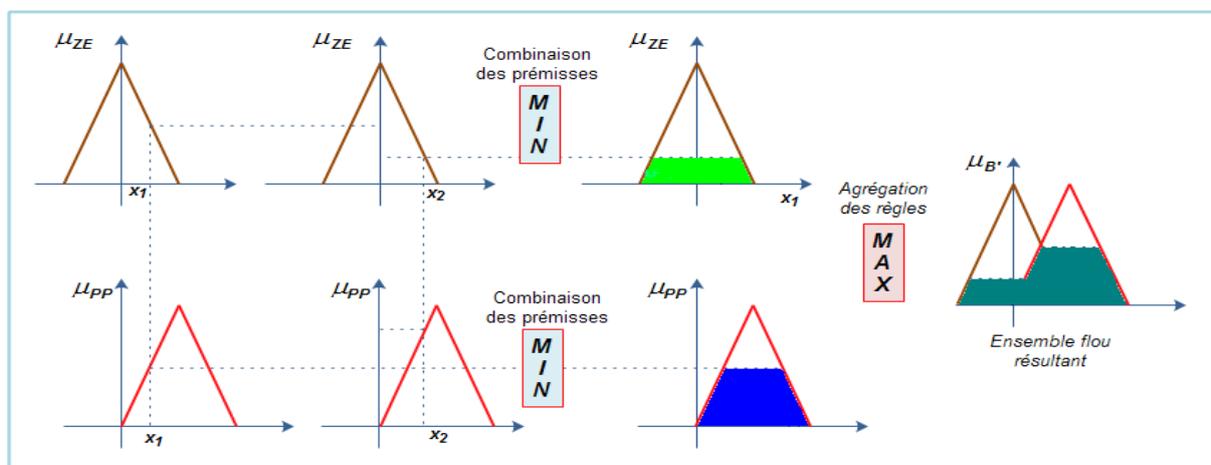
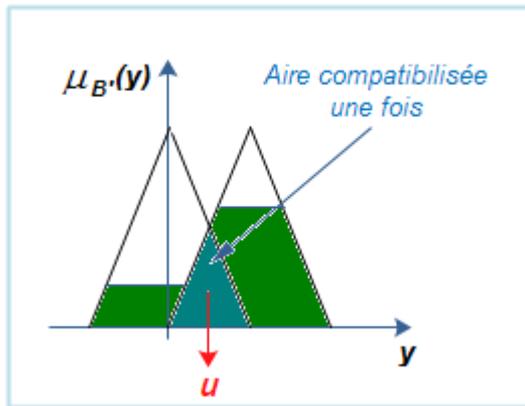


Figure (II.10) : Illustration de la méthode de Mamdani.

➤ **La méthode de centre de gravité :**



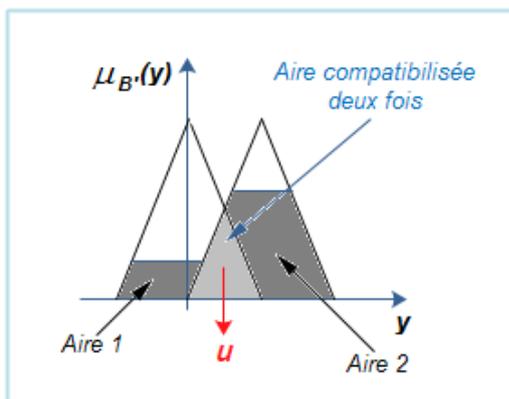
$$u = \frac{\int_y \mu_{B'}(y) \cdot y \cdot dy}{\int_y \mu_{B'}(y) \cdot dy}$$

Figure (II. 11) : Défuzzification par un centre de gravité.

C'est la méthode de défuzzification la plus connue en commande floue. Cette méthode fournit intuitivement la valeur la plus représentative de l'ensemble flou issu de l'agrégation des règles. C'est aussi la méthode la plus coûteuse en temps de calcul.

➤ **Le centre des aires (centre des sommes) :**

Cette méthode est similaire à la précédente mais ne nécessite pas le calcul de: $\mu_{B'}(y)$. L'idée est de considérer la contribution de chaque aire individuellement. L'ensemble B' est alors construit à partir de la somme de chaque aire. Ainsi, les aires qui se recouvrent, si elles existent, sont comptabilisées plus d'une fois.



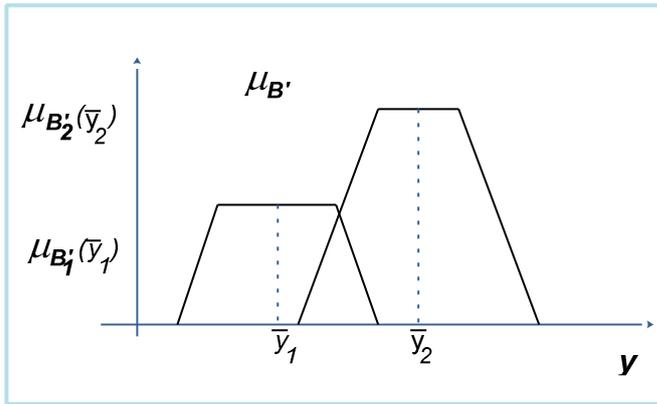
$$u = \frac{\int_y y \cdot \sum_{i=1}^n \mu_{B_i}(y) \cdot dy}{\int_y \sum_{i=1}^n \mu_{B_i}(y) \cdot dy}$$

Avec n : nombre d'aires

Figure (II. 12) : Défuzzification par un centre des aires.

➤ **Le centre des maxima :**

Cette méthode considère le maximum de chacune des contributions et en fait la moyenne pondérée.



$$u = \frac{\sum_{i=1}^n \mu_{B'}(\bar{y}_i) \cdot \bar{y}_i}{\sum_{i=1}^n \mu_{B'}(\bar{y}_i)}$$

Avec n : nombre d'aires

Figure (II. 13) : Défuzzification par un centre des maxima.

II. 3. 2. g. Dénormalisation

Cette dernière étape transforme les valeurs normalisées des variables de commande en des valeurs appartenant à leur domaine physique respectif.

II.4. Conclusion

Lors de ce chapitre, nous avons introduit les concepts de base de la logique et la commande floue. Ces notions ont été suivies par une brève présentation des différentes étapes de conception d'un contrôleur *MPPT* Flou.

Au cours de chapitre suivant, toutes les étapes utiles pour implémenter le contrôleur logique sur la cible FPGA sont présentées.

Bibliographie :

[1] : M.Hatti, IEEE Member ; “Controleur Flou pour la Poursuite du Point de Puissance Maximum d’un Système Photovoltaïque”. Centre de Recherche Nucleaire de Birine, B.P 180 Ain Oussera 17200, Djelfa Algerie.

[2] : Z. Ayache, A. Bendaoud, H. Slimani, B. Benazza, H. Miloudi, A. Bentaallah,” Commande MPPT et Contrôle d’un Système Photovoltaïque par la Logique Floue” ; Z. Ayache, A. Bendaoud, H. Slimani, B. Benazza, H. Miloudi, A. Bentaallah.¹Laboratoire IRECOM, Université Djilali Liabès SidiBelAbbès 22000, Algeria.

[3] : “ FPGA Implementation of Fuzzy Logic Controller for Temperature Control”.Tukaram R. Kumbhar ; Sunil S. Nirmale ; R. R. Mudholkar .

[4] :RadoslavRaychev, AbdellatifMtibaa, Mohamed Abid” Vhdl Modelling of a Fuzzy Co-processor Architecture”.

[5]: Chung-Yuen Won, Duk-Heon Kim, Sei-Chan Kim,Won-Sam Kim, and Hack-Sung Kim, “ A New Maximum Power Point Tracker of Photovoltaic Arrays Using Fuzzy Controller”.

Department of Electrical Engineering, Sung Kyun Kwan University CheonCheon Dong, Jang AnGu, Su Won City, Kyung Ki Do, #440-746 Seoul, Korea.

[6]: Maximum power point tracking using a fuzzy logic control scheme. M.S. AïtCheikh*, C. Larbes†, G.F. TchoketchKebir and A. Zerguerras
Laboratoire des Dispositifs de Communication et de Conversion Photovoltaïque
Département d’Electronique, Ecole Nationale Polytechnique 10, Avenue Hassen Badi, El Harrach, 16200, Alger, Algérie.

- [7] : M.S. Aït Cheikh¹, B. Hadj Aïssa¹, A. Malek² et M. Becherif³. “ Mise au point d’une régulation floue pour serre agricole à énergie solaire. (reçu le 20 Mai 2010 – accepté le 25 Septembre 2010).
- [8] : M.F. Yaden, M. El Ouariachi, T. Mrabti , Ka. Kassmi, B. Tidhaf, E. Chadli et K. Kassmi*.” Conception et réalisation d’un système photovoltaïquemuni d’une commande MPPT numérique”.
- M.F. Yaden, M. El Ouariachi, T. Mrabti ,Ka. Kassmi, B. Tidhaf, E. Chadli et K. Kassmi*
- Université Mohamed Premier, Faculté des Sciences, Laboratoire LEPAS, Oujda, Maroc. (reçu le 15 Novembre 2010 – accepté le 25 Juin 2011)
- [9] : A. Brahmi, A. Abounada* et M. Ramzi.” Application de la commande ‘Perturb and Observe’ pour l’extraction de la puissance maximale des cellules photovoltaïques”.
- [10] : “Logique floue, principes, aide à la décision”. Sous la direction de Bernadette Bouchon-Meunier Christophe Marcala.
- [11] : M^r Bradai Rafik. “Elaboration d’éléments optimisés de commandes vectorielles d’une machine asynchrone et leur implémentation sur un circuit à architecture reconfigurable de type FPGA “.
- [13] : Sabeur ELKOSANTINI.” Introduction à la logique floue:Les concepts fondamentaux et applications “.
- [14] :Philip T. Vuong, Asad M. Madni and Jim B. Vuong. “ VHDL Implementation For a Fuzzy Logic Controller”.
- [15]:PongsakorTakun, SomyotKaitwanidvilai and ChaiyanJettanasen,” Maximum Power Point Tracking using Fuzzy Logic Control for Photovoltaic Systems”.
- [16]: “Commande Directe du Couple du Moteur Asynchrone-Apport de la Logique Floue”. ChikhiAbdesselem ;Ingénieur d’État en Électrotechnique de l’Université de Batna.

[17] : ‘‘Contrôleur Flou pour la Poursuite du Point de Puissance Maximum d’un Système Photovoltaïque’’. M.Hatti, IEEE Member Centre de Recherche Nucleaire de Birine, B.P 180 Ain Oussera 17200, Djelfa Algerie.

[18] :F. Chekired*, C. Larbes**, D. Bendib*, Z. Samara*.’’ Implémentation de la commande MPPT sur circuit FPGA utilisant les techniques intelligentes’’.

*Unité de développement des équipements solaires, Bousmail, Algérie., Email: chekiredfathya@yahoo.fr, ** Laboratoire de dispositifs de Communication et de conversion Photovoltaïque, Ecole Nationale Supérieure Polytechnique, Alger, Algérie.

[19] : Bader N. Alajmi, Khaled H. Ahmed, *Member, IEEE*, Stephen J. Finney, and Barry W. Williams; ‘‘ A Maximum Power Point Tracking Technique for Partially Shaded Photovoltaic Systems in Microgrids’’.

[20] : BOUVRY Colin, BONIFACE Laurent, « Traitement d’image à base de FPGA», 2003-2004.

[21] : Alain Vachoux, « Modélisation des systèmes intégrés numériques _ introduction à VHDL », Laboratoire de Systèmes Microélectroniques, STI-LSM, Alain.vachoux@epfl.ch

[22] : R.Airiau, J.M.Berge, V.Olive. kluwerAcademipublishss, «Circuit Synthesis with VHDL», 1994.

[23] :kluwerAcademipublishss, 1970.S.Mazo.P. Langstart, «A Guide To VHDL».

[24] : R.Airiau, J.M.Berge, V.Olive, J.Rouillard, «VHDL langage à la modélisation» », (Presses Polytechniques et universitaires Romandes et CNEST-ENST, 1990).

[25] : ‘‘ Modélisation multiphysique des flux énergétiques d’un Couplage Photovoltaïque-Electrolyseur PEM–Pile à Combustible PEM en vue

d'une application stationnaire.», Doctorat Thèse Unique de Physique Option Signaux et Systèmes Spécialité : Energies par Kréhi Serge AGBLI

[26] : "Réalisation d'un module d'éclairage et de chauffage pour la technique de Hg-Photo-CVD ", Tarik GUELLAH & Halima IDRISSE & Redouane MAHER.

[27] : "Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque adapté par une commande MPPT", BENSACI Wafa, Diplôme de Master en Génie électrique.

[28] : A. MOUSSI, A. SAADI, "Etude comparative entre les techniques d'optimisation des systèmes de pompage photovoltaïque ".

[28] : "Caractérisation et analyse des cellules solaires à de silicium multicristallin", ZOHRABENMOHAMED, THESE Présentée pour obtenir le diplôme de DOCTORAT ES SCIENCES.

[29] : « Contrôle flou : de l'interpolation numérique au codage de l'expertise » ; Sylvie Galichet.

[30] : "Optimisation énergétique de l'étage d'adaptation électronique dédiée à la conversion photovoltaïque", CABAL CEDRIC.

CHAPITRE I

Générateur photovoltaïque et commande MPPT

CHAPITRE II

Conception optimisée d'un

contrôleur « MPPT » flou

CHAPITRE III

Implémentation RLF sur FPGA

BIBLIOGRAPHIE

INTRODUCTION GÉNÉRALE

CONCLUSION GÉNÉRALE

Liste des tableaux

Tableau	Titre	Page
Tableau(I. 1)	Table des règles de base.	30
Tableau(II. 1)	Principales t-normes et t-conormes.	39
Tableau (III. 1)	Définitions des noms des différentes fonctions d'appartenance en entrée du système flou.	59
Tableau (III. 2)	Table règle d'inférence du régulateur flou.	63
Tableau (III. 3)	fonctions d'appartenance de la grandeur de sortie.	74

