

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université A MIRA-BEJAIA



Faculté de Technologie



Département d'Automatique, Télécommunication et d'Electronique

Mémoire de fin d'études

Pour l'obtention du diplôme de Master

Filière : Automatique

Spécialité : Automatique et informatique industriel

Automatique et systèmes

Thème :

Optimisation de la commande MPPT par les algorithmes compacts

Réalisé par :

AGUENI Kouçaila

BEZOUH Adel

Encadré par :

Mr. TIGHZERT

Examiné par :

Mme .IDJDARENE

Mr .HADJI

Année universitaire : 2020/2021

Remerciements

*Au terme de ce modeste travail, nous tenons à exprimer notre
profonde gratitude et nos vifs remerciements :*

*Avant tous, nous remercions ALLAH le tout puissant pour nous
avoir donné la force et la patience pour mener à terme ce travail.*

*A nos familles : qui nous ont toujours encouragés et soutenus durant
toutes nos études.*

*A M^r. L .tighzert : notre promoteur, pour avoir accepté de nous
guider sur le bon chemin du travail.*

Aux membres de jury : pour avoir accepté de juger notre travail.

*A tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de
ce mémoire.*

Dédicace

Rien n'est aussi beau à offrir que le fruit d'un labeur qu'on dédie du fond du cœur à ceux qu'on aime et qu'on remercie en exprimant la gratitude et la reconnaissance durant toute notre existence.

Je dédie ce modeste travail

A mes très chers parents qui ont consacré toute leurs vie pour mon éducation et mes études, je leurs souhaite tout le bonheur

A tous mes amis et mes proches

Sommaire

Sommaire

Remerciements

Dédicace

Sommaire

Acronymes 9

Liste des tableaux 11

Liste des figures 12

Introduction Générale 1

Chapitre I

Généralités sur l'énergie Photovoltaïque

I. Introduction 6

I.1. L'énergie photovoltaïque en Algérie 6

I.2. Système photovoltaïque 7

I.2.1. L'effet photovoltaïque 7

I.2.2. Description de la cellule 7

I.2.3. Type de cellules 8

I.3. Association des cellules 10

I.3.1. Association en série 10

I.3.2. Association en parallèle 11

I.4. Modélisation du générateur photovoltaïque 12

I.4.1. Modèle idéale 12

I.4.2. Modèle à 5 paramètres 12

I.5. Module photovoltaïque 15

I.5.1. Caractéristiques d'un module photovoltaïque 15

I.5.2. Influence de la température et l'éclairement sur un module PV 16

I.6. Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque 18

I.6.1. Avantages 18

I.6.2. Inconvénients 18

Conclusion	19
Chapitre II	
Les techniques de poursuite du point de puissances maximale	
II. Introduction	21
II.1. Commandes MPPT	21
II.1.1. Principe de la commande MPPT	22
II.1.2. Processus de poursuite du point de puissance maximale	22
II.2. Modélisation du convertisseur statique DC/DC	23
II.2.1. Types de hacheurs	23
II.2.1.1. Hacheur Buck (série/abaisseur)	24
II.2.1.2. Hacheur Boost (parallèle/élévateur)	25
II.2.1.3. Hacheur Buck-Boost (abaisseur-élévateur)	25
II.2.2. Signal modulé en largeur d'impulsion (MLI)	26
II.3. Techniques de poursuite du point de puissance maximale MPPT	27
II.3.1. Algorithme Perturber et Observer (P&O)	28
II.3.2. Méthode conductance incrémental	31
II.4. Logique floue	34
II.4.1.1. Principe historique de la logique floue	34
II.4.1.2. Application de la logique floue	35
II.4.1.3. Ensemble flou et variables linguistiques	35
II.4.1.4. Formes des fonctions d'appartenance	37
II.4.1.5. Régulateur flou	39
II.4.6. Exemple d'application du contrôleur floue pour la commande MPPT	41
Conclusion	45

Sommaire

Chapitre III

Simulation et résultats

III. Introduction	47
III.1. Présentation du module étudié	47
III.2. Caractéristiques du GPV	47
III.2.1. Influence de l'éclairement	48
III.2.2. Influence de la température	49
III.3. Résultats et discussion	49
III.4. Simulation du système avec la commande P&O	49
III.5. Simulation du système avec la commande Inc-Cond	51
III.6. Comparaison entre la méthode P&O et Inc-Cond	54
III.7. Simulation avec la méthode Floue	54
III.7.1.1. Les fonctions d'appartenances	55
III.7.1.2. Les règles d'inférences	56
III.7.1.3. Simulation du système commandé par la MPPT FLOU	56
III.7.1.4. Conclusion sur résultats de la technique MPPT Flou par rapport aux résultats de la commande P&O et Inc-Cond	57
Conclusion	58

Chapitre IV

Optimisation du contrôleur flou avec une approche compact

IV. Introduction	60
IV.1. Optimisation compact	60
IV.1.1. Compacter une population ou un essaim	60
IV.1.2. Générer un individu dans une population compactée	61
IV.1.3. Adaptation de la PDF	61
IV.2. Pseudo-code	62
IV.3. Résultats obtenus	65
IV.3.1. Evolution de la Fit best	65

Sommaire

IV.3.2. Contrôleur flou optimisé	66
IV.4. Simulation du système commandé par la compact Fuzzy MPPT	67
Conclusion	70
Conclusion Générale	71
Liste bibliographie	74

Acronymes

I_s : Le courant de saturation inverse d'une diode.

λ_x : est un scalaire qui représente la pente de la surface de glissement.

ΔE : Changement d'erreur

Δi : L'ondulation du courant dans l'inductance

ΔV :L'ondulation de la tension de sortie

$\Delta \alpha$: Changement du Rapport cyclique du convertisseur

n: Facteur d'idéalité de la jonction

CIS : cuivre-indium-sélénium

CZTS : cuivre zinc étain soufre

d : Rapport cyclique du convertisseur

DC/AC : Conversion continu/alternatif

DC/DC : Conversion continu/continu

E : Erreur

e(x): Écart de la variable à régler

G : Eclairage

GPV: Générateurs photovoltaïques

I_o, V_o : Courant et tension du bus continu

I_{ppm} : courant au PPM

I_{pv} : Courant du GPV

I-V: Courant-tension

K: Constante de Boltzmann

MPPT: Maximum Power Point Tracking

Acronymes

N : la borne négative

P : la borne positive

P&O: Perturbation et observation

PPM : Point de puissance maximale

P_{ppm} : Puissance maximale

P_{pv} : Puissance de la cellule photovoltaïque

PV : Photovoltaïque

P-V : Puissance-tension

r: Degré relatif, nombre de fois qu'il faut dériver la sortie pour apparaître la commande.

S: Surface de glissement

SMC: Sliding Mode Control

STC : Standard Test Conditions

Symboles

U_{eq} : Commande équivalente

U_n : Commande discontinue

V_{ppm} : Tension au PPM

v_{pv} : Tension de cellule PV

V_{pv} : Tension du GPV

X: Variable d'état

I_{pv}: Le courant fourni par la cellule.

V_{pv} : La tension à la borne de la cellule PV.

e : Charge d'électron.

Liste des tableaux

Liste des tableaux

Tableau II.2 : Résumé L'algorithme de la P&O	31
Tableau III.1 : Règles d'inférences utilisées dans le contrôleur flou	56
TableauIV.1 : Les paramètres de l'algorithme compact	65
Tableau IV.2 : Les règles d'inférence du contrôleur flou optimisé	67

Liste des figures

Liste des figures

Figure (I.1) : La coupe transversale d'une cellule PV typique	8
Figure (I.2) : Cellule au Silicium Monocristallin	8
Figure (I.3) : Cellule au Silicium Poly-cristallin	9
Figure (I.4) : Cellule au Silicium amorphe (couche mince)	9
Figure (I.5) : Cellule au Silicium nanocristallin	10
Figure (I.6) : Caractéristique d'une cellule et des cellules en série	11
Figure (I.7) : Caractéristique d'une cellule et des cellules en parallèle	11
Figure (I.8) : Caractéristique d'un générateur totalement éclairé et générateur partiellement éclairé	11
Figure (I.9) : Schéma équivalent d'une cellule PV idéale	12
Figure (I.10) : Circuit équivalent du modèle à 5 paramètres	12
Figure (I.11) : Courbe courant- tension (I-V) et puissance- tension (P-V)	15
Figure (I.12) : Caractéristique I (V) d'un module pour différentes valeurs de température	16
Figure (I.13) : Caractéristique P(V) d'un module pour différentes valeurs de température	16
Figure (I.14) : Caractéristique I (V) d'un module pour différentes valeurs de l'éclairement	17
Figure (I.15) : Caractéristique P(V) d'un module pour différentes valeurs de l'éclairement	17
Figure (II.1) : Schéma synoptique d'un système photovoltaïque avec la commande MPPT	22
Figure (II.2) : Caractéristiques électriques d'un GPV	23
Figure (II.3) : Schéma électrique du hacheur buck	24

Liste des figures

<i>Figure (II.4) : Schéma électrique du hacheur boost.....</i>	<i>25</i>
<i>Figure (II.5) : Schéma électrique du hacheur buck-boost.....</i>	<i>26</i>
<i>Figure (II.6) : Signal PWM</i>	<i>27</i>
<i>Figure (II.7) : Obtention d'un signal MLI (PWM).....</i>	<i>27</i>
<i>Figure (II.8) : Schéma de principe de la méthode P&O</i>	<i>28</i>
<i>Figure (II.9) : L'organigramme de la méthode P&O</i>	<i>29</i>
<i>Figure (II.10) : Caractéristique P(V) d'un générateur photovoltaïque.....</i>	<i>32</i>
<i>Figure (II.11) : l'organigramme de la méthode Incrémentale conductance.....</i>	<i>33</i>
<i>Figure (II.12) : Comparaison entre un ensemble classique et un ensemble flou.....</i>	<i>36</i>
<i>Figure (II.13) : Exemple d'une variable linguistique 'vitesse'</i>	<i>37</i>
<i>Figure (II.14) : Fonctions d'appartenance de formes trapézoïdales et triangulaires</i>	<i>37</i>
<i>Figure (II.15) : Différentes formes de fonctions d'appartenance</i>	<i>39</i>
<i>Figure (II.16) : Configuration générale d'un système flou</i>	<i>40</i>
<i>Figure (II.17) : Fuzzification en utilisant un seul sous-ensemble flou.....</i>	<i>42</i>
<i>Figure (II.18) : Editeur de fichier FIS.....</i>	<i>42</i>
<i>Figure (II.19) : Fonction d'appartenance pour les entrées E et CE.....</i>	<i>42</i>
<i>Figure (II.20) : Fonction d'appartenance pour la sortie D.....</i>	<i>43</i>
<i>Figure (II.21) : Principe de MPPT floue.....</i>	<i>44</i>
<i>Figure (II.22) : Surface de la variation des fonctions d'appartenance</i>	<i>44</i>
<i>Figure (III.1).paramètres du panneau utilisé</i>	<i>47</i>
<i>Figure (III.2). Caractéristiques électriques du GPV</i>	<i>48</i>
<i>Figure (III.3). Caractéristiques électriques du GPV en variant l'éclairement</i>	<i>48</i>
<i>Figure (III.4). Caractéristiques électriques du GPV en variant la température</i>	<i>49</i>

Liste des figures

<i>Figure (III.5). Schéma MATLAB SIMULINK d'un système photovoltaïque avec la commande MPPT (P&O)</i>	<i>49</i>
<i>Figure (III.6). Courbe de puissance du module PV dans les conditions STC pour un rapport cyclique de 0.000125</i>	<i>50</i>
<i>Figure (III.7) courbe de puissance du module PV dans les conditions STC pour un rapport cyclique de 0.01</i>	<i>51</i>
<i>Figure (III.8) Courbe de puissance du module PV avec un éclairement variable en fonction du temps</i>	<i>51</i>
<i>Figure (III.9). Schéma MATLAB SIMULINK d'un système photovoltaïque avec la commande MPPT Inc-Cond</i>	<i>52</i>
<i>Figure (III.10). Courbe de la puissance de sortie dans les conditions STC pour un rapport cyclique de 0.00005</i>	<i>52</i>
<i>Figure (III.11). Courbe de la puissance de sortie dans les conditions STC pour un rapport cyclique de 0.01</i>	<i>53</i>
<i>Figure (III.12) courbe de puissance du module PV avec un éclairement variable en fonction du temps</i>	<i>53</i>
<i>Figure (III.13).Schéma MATLAB SIMULINK avec la commande FLOU</i>	<i>55</i>
<i>Figure (III.14). La fonction d'appartenance de la logique Flou</i>	<i>55</i>
<i>Figure (III.15). Allure de la puissance de sortie dans les conditions STC</i>	<i>56</i>
<i>Figure (III.16). Allure de la puissance de sortie en variant E</i>	<i>57</i>
<i>Figure (IV.1) : Génération d'une variable de décision (gène) à partir de la PDF</i>	<i>61</i>
<i>Figure(IV.2) Pseudocode de l'algorithme utilisé</i>	<i>63</i>
<i>Figure (IV.3) Evolution de la fitness du meilleur contrôleur</i>	<i>65</i>
<i>Figure (IV.4) : Fonctions d'appartenances des entrées et sortie du contrôleur optimisé .</i>	<i>66</i>
<i>Figure (IV.5) : Allure de la puissance de sortie dans les conditions STC</i>	<i>68</i>
<i>Figure (IV.6) Allure de la puissance de sortie en variant E</i>	<i>68</i>

Introduction Générale

Introduction Générale

La production d'énergie est un défi de grande importance pour les années à venir. Les pays en voie de développement auront besoin de plus en plus d'énergie pour mener à bien leur développement. La consommation de ces sources fossiles donne lieu à des émissions de gaz à effet de serre et donc une augmentation de la pollution de l'atmosphère, en plus elles sont épuisables.

Plusieurs pays se sont engagés à trouver d'autres sources d'énergies fiables, rentables et renouvelables. Parmi ces sources on compte : l'énergie éolienne, l'énergie solaire, l'énergie hydraulique, la géothermie et la biomasse. Contrairement aux énergies fossiles, les énergies nouvelles ne sont pas polluantes, pas d'émissions de gaz à effet de serre et non dangereuse pour les futures générations. A l'exception de l'énergie géothermique ; les autres sources proviennent directement ou indirectement du soleil, elles sont donc inépuisables tant que ce dernier rayonne.

L'énergie solaire photovoltaïque se développe très rapidement. Elle est durable, propre et sans pollution de l'environnement. Elle provient de la transformation directe d'une partie du rayonnement solaire en énergie électrique. Cette conversion d'énergie s'effectue par le biais d'une cellule dite photovoltaïque (PV) basée sur un phénomène physique appelé effet photovoltaïque qui consiste à produire une force électromotrice lorsque la surface de cette cellule est exposée à la lumière. La tension générée peut varier en fonction du matériau utilisé pour la fabrication de la cellule. L'association de plusieurs cellules PV en série/parallèle donnent lieu à un générateur photovoltaïque (GPV) qui a une caractéristique non linéaire présentant un point de puissance maximale [1].

La caractéristique de la puissance générée par un GPV dépend du niveau d'éclairement et de la température. De plus, son point de fonctionnement dépend directement de la charge qu'il alimente. Afin d'extraire à chaque instant le maximum de puissance disponible aux bornes du GPV, nous introduisons un étage d'adaptation entre le générateur et la charge pour les coupler le plus parfaitement possible [2].

Les systèmes PV génèrent une puissance dépendante du changement des conditions climatiques telles que le rayonnement solaire et la température des panneaux et de la variation de la charge. Par conséquent, une technique de recherche du point de puissance maximale (PPM) destinée à contrôler le rapport cyclique du convertisseur DC/DC est

nécessaire pour garantir un fonctionnement optimal du système PV dans différentes conditions d'exploitation

Plusieurs travaux ont abordé le problème de la recherche du point de fonctionnement permettant de tirer le maximum d'énergie des modules PV en utilisant différentes méthodes classiques, intelligentes, ou évolutionnaires. Parmi ces méthodes on peut citer la méthode perturbe observe, la méthode incrémental conductance, et la méthode de la logique floue. Cette dernière est récemment très utilisée et exploitée car l'optimisation du contrôleur flou reste un domaine ouvert [2].

Problématique et méthodes

Ce travail a pour but d'optimiser un contrôleur flou avec les algorithmes compacts pour améliorer ses performances et de maximiser l'énergie produite. Ces algorithmes qui ne nécessitent qu'un strict minimum de mémoire ont été conçus dans l'objectif de réduire les capacités de calcul que nécessite un algorithme basé sur une population. L'idée de base de cette méthode consiste à utiliser une population compactée : d'où le nom des algorithmes compacts.

Méthodes employées

Pour atteindre cet objectif il faut réaliser les étapes suivantes :

- Présentation de l'aspect théorique des générateurs photovoltaïques et des commandes MPPT et faire un travail de modélisation mathématique.
- Application de trois algorithmes de commandes MPPT, la méthode perturbe et Observe, la méthode conductance incrémentale et la méthode de la logique floue sur notre système PV.
- Etude comparative des résultats obtenus par les trois méthodes.
- Optimisation du contrôleur flou par une approche compact.
- Etude comparative des résultats obtenus.

Organisation du mémoire

Ce mémoire est partagé en quatre chapitres :

- Le premier chapitre porte une introduction au monde de l'énergie photovoltaïque en général et du module photovoltaïque et ses caractéristiques en particulier.
- Dans le deuxième chapitre, nous nous sommes intéressés plus à la modélisation de convertisseur statique et à la présentation des différentes méthodes de recherche du point de puissance maximale.
- Dans le troisième chapitre nous allons appliquer les trois stratégies de commande MPPT à notre système photovoltaïque, les résultats de simulation vont nous permettre de les comparer du point de vue qualité et amplitude des grandeurs électriques générées, rapidité (temps de réponse), complexité de la méthode et convergence.
- Dans le dernier chapitre, un contrôleur flou est optimisé afin d'en tirer la puissance maximale du panneau en utilisant une nouvelle approche compact. Un nouvel algorithme appelé *compact Fuzzy MPPT* est proposé. Une étude comparative entre la méthode de la logique floue classique et la nouvelle approche est faite. Les résultats obtenus montrent que l'approche proposée est efficace et compétitive.

Chapitre I
Généralités sur l'énergie
Photovoltaïque

Introduction

L'énergie solaire est la plus dominante de toutes les énergies renouvelables, elle est l'une des plus facilement exploitables, elle donne à l'utilisateur la possibilité de subvenir à une partie de ses besoins [1]. Ces dernières décennies, la technologie photovoltaïque a connu un développement important en tant que moyen de production d'électricité. A titre d'exemple, en 2017, la capacité du parc solaire photovoltaïque installé en France métropolitaine atteint 7660 MW. Il est en progression de 887 MW par rapport à 2016 [2].

Dans ce chapitre, on s'intéresse à la modélisation mathématique des panneaux photovoltaïques (PV). Précisément, la puissance produite en fonction des paramètres environnementaux, à savoir, l'éclairement et la température. Ceci nous permettra d'obtenir un modèle exploitable en vue de faire de la commande automatique. Les caractéristiques de puissance et de courants des PV sont aussi présentées.

1.1. L'énergie photovoltaïque en Algérie

Le secteur économique de l'énergie en Algérie occupe une place prédominante dans l'économie du pays, les hydrocarbures à eux seuls représentent 60 % des recettes du budget et 98 % des recettes d'exportation.

L'Algérie est en 2019 le 16e producteur de pétrole, le 10e producteur de gaz naturel et le 7e exportateur de gaz naturel au monde. La production et la consommation d'énergie, y compris dans le secteur de l'électricité, sont tirées des hydrocarbures à plus de 99 %.

Cependant, l'état algérien commence à envisager des solutions écologiques en investissant dans les énergies renouvelables. Selon le Programme algérien de développement des énergies renouvelables et d'efficacité énergétique (PENREE) de 2012, l'Algérie visait une puissance installée d'origine renouvelable de 22 000 MW d'ici 2030. Mais sept ans après ce plan, les réalisations sont très modestes : le solaire n'a produit que 0,7 % de l'électricité du pays en 2017, et l'éolien 0,01 %. L'Algérie comptait, en mai 2018, 24 centrales photovoltaïques d'une puissance totale de 344 MW [3].

1.2. Système photovoltaïque

Dans cette section, on s'intéresse à l'effet photovoltaïque et à la description de la cellule. Nous allons présenter les différents types des cellules par rapport à leur structure physique suivie d'une explication du phénomène qui régit les jonctions PN. Les différents modèles de la cellule photovoltaïque et ses caractéristiques électriques sont présentés plus loin.

1.2.1. L'effet photovoltaïque

L'effet photovoltaïque est un phénomène physique propre à certains matériaux appelés "semi-conducteurs" (le plus connu est le silicium utilisé pour les composants électroniques). Cet effet photovoltaïque a été découvert pour la première fois en 1839 par le physicien Alexandre-Edmond Becquerel. En fait, lorsque les "grains de lumière" (les photons) heurtent une surface mince de ces matériaux, ils transfèrent leur énergie aux électrons de la matière. Ceux-ci se mettent alors en mouvement dans une direction particulière, créant ainsi un courant électrique qui est recueilli par des fils métalliques très fins. Ce courant peut être ajouté à celui provenant d'autres dispositifs semblables de façon à atteindre la puissance désirée pour un usage donné [4].

1.2.2. Description de la cellule

La cellule est l'élément de base qui assure la conversion de l'énergie solaire en énergie électrique. L'assemblage de plusieurs cellules permet d'atteindre la puissance réalisable que l'on souhaite.

Les photopiles ou cellules photovoltaïques sont des composants optoélectroniques qui transforment directement la lumière solaire en électricité. Elles sont réalisées à l'aide des matériaux semi-conducteurs ayant des propriétés intermédiaires entre conducteurs et isolants.

Le matériau de base est dans la plupart des cas le silicium. D'autres matériaux sont utilisables : Arséniure de Gallium (AsGa), Tellure de Cadmium (CdTe) [5].

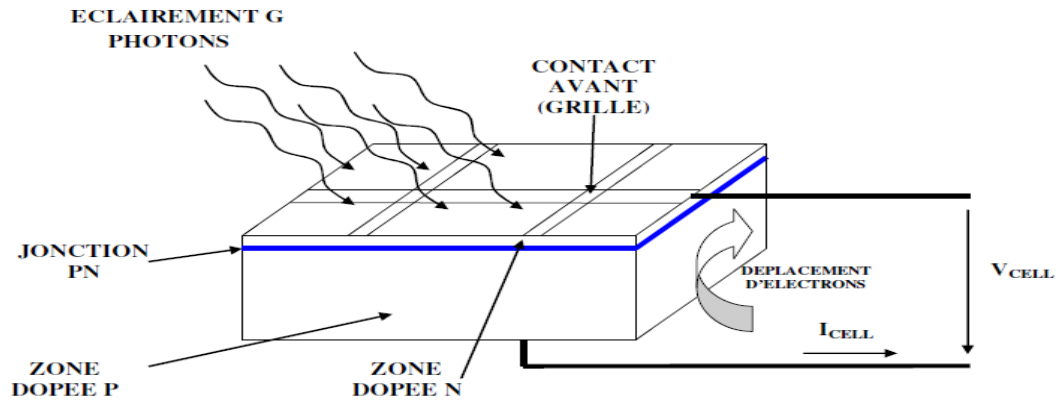


Figure (I.1) : La coupe transversale d'une cellule PV typique

I.2.3.Type de cellules

Il existe différents types de cellules en fonction de la nature et des caractéristiques des matériaux utilisés. Le type le plus commun est la cellule de silicium cristallin (Si). Ce matériau est coupé en tranches minces en forme de disque, monocristallin, poly-cristallin, amorphe ou nanocristallin en fonction du procédé de fabrication de la barre de silicium [6].

- **Les cellules monocristallines** : voir figure (I.2)
- ✓ La première génération de photopiles.
- ✓ Un taux de rendement excellent (12-16%) (23% en Laboratoire).
- ✓ Une méthode de fabrication laborieuse et difficile, donc très chère.
- ✓ Il faut une grande quantité d'énergie pour obtenir du cristal pur [7].

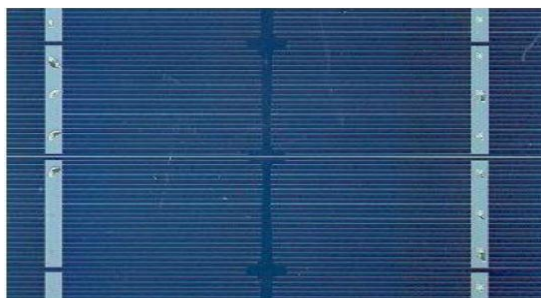


Figure (I.2) : Cellule au Silicium Monocristallin

- **Les cellules poly-cristallines** : voir figure (I.3)
- ✓ Coût de production moins élevé.
- ✓ Procédé nécessitant moins d'énergie.
- ✓ Rendement 11-13% (18% en Labo) [7].

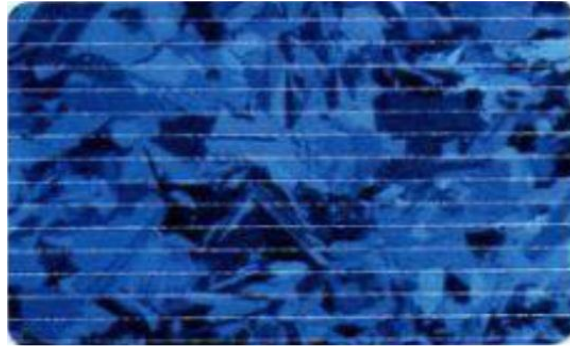


Figure (I.3) : Cellule au Silicium Poly-cristallin

- **Les cellules amorphes (cellules de calculatrices par exemple) :** voir figure (I.4)
- ✓ Coût de production plus bas.
- ✓ Rendement plus bas : 8-10% (13% en labo).
- ✓ Durée de vie plus faible.

Les cellules mono et poly-cristallines sont les types de cellules les plus répandues sur le marché du photovoltaïque (environ 60% de la production) [7].

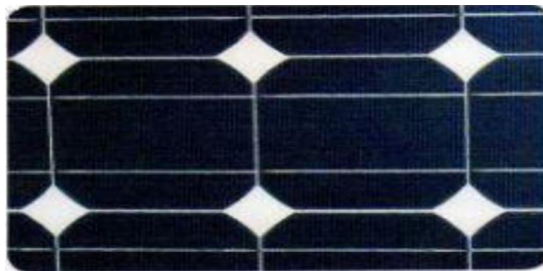


Figure (I.4) : Cellule au Silicium amorphe (couche mince)

- **Les cellules nanocristallines :** voir figure (I.5)
- ✓ Une des dernières générations de photopiles.
- ✓ Fonctionnent selon un principe qui différencie les fonctions d'absorption de la lumière et de séparation des charges électriques.
- ✓ Rendement global de 10,4 %, confirmé par des mesures au laboratoire.
- ✓ Procédé et coût de production bas [7].



Figure (I.5) : Cellule au Silicium nanocristallin

I.3. Association des cellules

Dans les conditions standardisées de test, la puissance maximale pour une cellule Si (silicium) de 100 cm² (10 sur 10) est aux alentours de 1,25 W. Cette cellule constitue donc un générateur de très faible puissance, insuffisant pour les applications électriques courantes. Les modules sont donc réalisés par association, en série et/ou en parallèle, de cellules élémentaires. La connexion en série augmente la tension pour un même courant alors que la connexion en parallèle augmente le courant pour une tension identique. Pour que l'électricité générée soit utilisable pour nos applications électriques, il est donc nécessaire d'associer entre elles un grand nombre de cellules.

Les modules (généralement présentés sous forme de panneaux) sont constitués d'un certain nombre de cellules élémentaires placées en série afin de rendre la tension à la sortie utilisable. Ces modules sont ensuite associés en réseau (série-parallèle) de façon à obtenir les tensions/courants désirés [9].

I.3.1. Association en série

Par association en série (appelée "String"), les cellules sont traversées par le même courant et la tension résultante correspond à la somme des tensions générées par chacune des cellules.

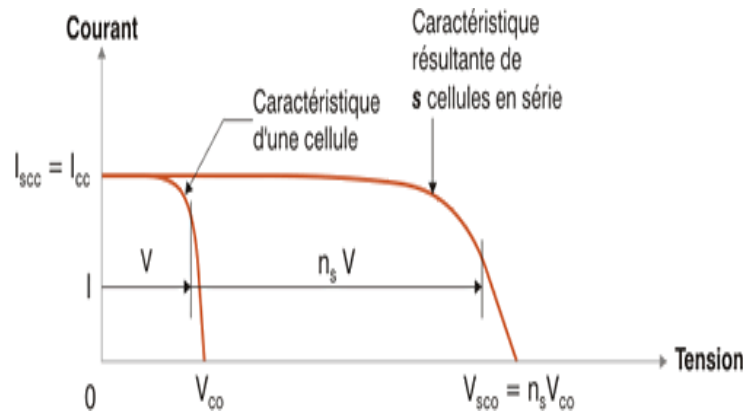


Figure (I.6) : Caractéristique d'une cellule et des cellules en série.

I.3.2. Association en parallèle

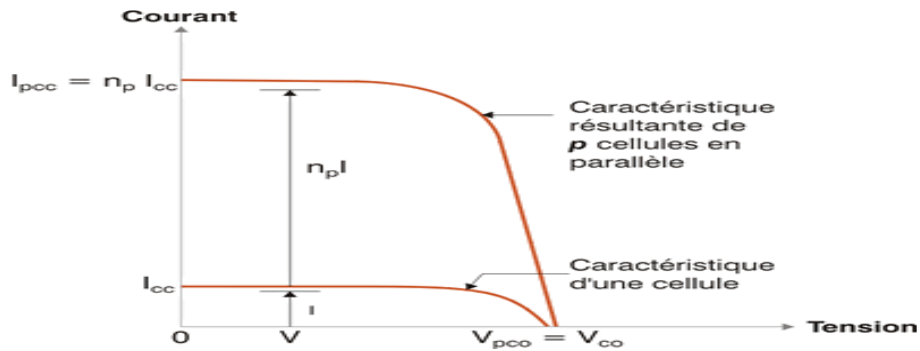


Figure (I.7) : Caractéristique d'une cellule et des cellules en parallèle.

Par association en parallèle, les cellules sont soumises à la même tension et le courant résultant correspond à la somme des courants générés par chacune des cellules. Les caractéristiques globales d'une installation se déduisent à une combinaison des caractéristiques des constituants [9].

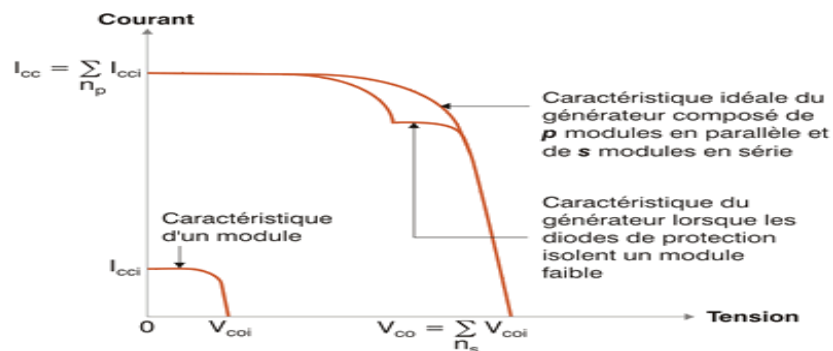


Figure (I.8) : Caractéristique d'un générateur totalement éclairé et générateur partiellement éclairé.

1.4. Modélisation du générateur photovoltaïque

1.4.1. Modèle idéal

Une cellule photovoltaïque peut être décrite de manière simple comme une source idéale de courant qui produit un courant proportionnel à la puissance lumineuse incidente en parallèle avec une diode. Il est connu aussi sous le nom L3P, la tension aux bornes de la résistance est égale à celle aux bornes de la diode.

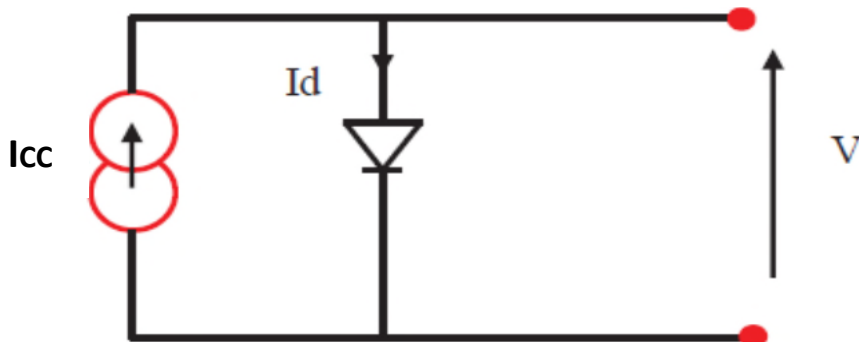


Figure (I.9) : Schéma équivalent d'une cellule PV idéale

1.4.2. Modèle à 5 paramètres

C'est le modèle le plus classique dans la littérature, il est représenté par le circuit électrique qui se compose d'une source de courant et une diode. Les phénomènes physique de polarisation sont modélisés par deux résistances, une résistance shunt et une résistance série. Ce modèle est connu sous le nom L5p, le modèle fait donc intervenir les cinq paramètres suivants (Figure I.10).

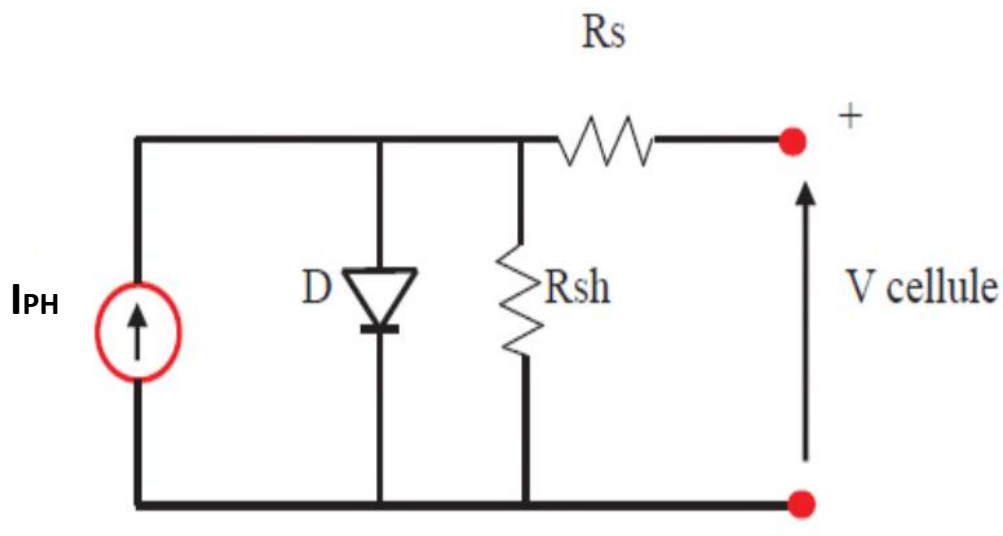


Figure (I.10) : Circuit équivalent du modèle à 5 paramètres

La résistance R_s représente les dévers résistances de contact et de connexion, R_{sh} caractérise les courants de fuite.

D'après la loi des nœuds :

$$I = I_{ph} - I_d - I_{sh} \quad (I-1)$$

Où :

I : Courant de la cellule [A]

I_{ph} : Le photo-courant [A]

I_{sh} : Le courant traversant la résistance shunt [A]

Avec

$$I_d = I_{rs} \left\{ e^{\left(\frac{V_d}{v_t}\right)} - 1 \right\} \quad (I-2)$$

$$V = V_d - R_s I \quad (I-3)$$

$$I_{sh} = \frac{V_d}{R_{sh}} \quad (I-4)$$

Ce qui donne :

$$I = I_{ph} - I_{rs} \left[e^{\left(\frac{V+R_s I}{v_t}\right)} - 1 \right] - \frac{V+R_s I}{R_{sh}} \quad (I-5)$$

I_{rs} : Courant de saturation de la diode [A]

V_d : Tension aux bornes de la diode [V]

V_t : Potentiel thermique [V], donné par :

$$V_t = \frac{nKT}{q} \quad (I-6)$$

q : Charge d'électron ($1.602 \cdot 10^{-19} C$)

K : Constante de Boltzmann ($1.38e^{-23} J/k$)

T : Température de la cellule [K]

n : Facteur d'idéalité de la diode

Le photo-courant généré par la cellule peut être exprimé en fonction de l'ensoleillement avec l'équation suivante :

$$I_{ph} = [I_{sc} + K_i(T - T_{ref})] \frac{G}{G_{ref}} \quad (I-7)$$

Où :

G : L'irradiation [W/m^2]

G_{ref} : L'irradiation de référence (=1000W/m²)

T_{ref} : La température référence (=25°C=298K)

I_{sc} : Le courant de court-circuit de la cellule [A].

K_i : Constante représentant la variation du courant avec la température [A/K]

D'une façon générale, on peut mettre le circuit électrique équivalent d'une cellule solaire en schéma bloc (sous Simulink) comportant tous les paramètres précédents, ce qui permet de tracer les caractéristiques de la cellule [10].

Les modules PV sont habituellement branchés en série-parallèle pour augmenter la tension et l'intensité du courant à la sortie du générateur. Ces derniers sont interconnectés pour former une unité produisant une puissance continue, élevée et compatible avec le matériel électrique usuel.

L'expression du courant total peut s'exprimer par :

$$I_{PV} = N_p \cdot [I_{ph} - I_{rs} (e^{\frac{V_{pv} + R_s I_{pv}}{N_s n V_t}} - 1) - \frac{V_{PV} + R_s I_{PV}}{R_{sh}}] \quad (I-8)$$

Où :

I_{PV} : Courant du GPV [A],

V_{PV} : Tension du GPV [V],

N_s : Nombre de cellules connectées en série par module.

N_p : Nombre de modules connectés en parallèle.

1.5. Module photovoltaïque

Les modules sont composés de plusieurs cellules photovoltaïques connectées en série ou en parallèle pour former un champ photovoltaïque d'une puissance crête définie selon des conditions spécifiques d'éclairement, de température et de spectre solaire. Les cellules connectées en série augmentent la tension et les cellules connectées en parallèles augmentent le courant. Pour produire plus de puissance, plusieurs cellules doivent être assemblées afin de créer un module photovoltaïque.

1.5.1. Caractéristiques d'un module photovoltaïque

Sous un éclairement donné, toute cellule photovoltaïque est caractérisée par une courbe courant-tension (I-V) et puissance-tension (P-V) représentant l'ensemble des configurations électriques que peut prendre la cellule. Trois grandeurs physiques définissent cette courbe :

- Sa tension à vide : V_{co} . Cette valeur représenterait la tension générée par une cellule éclairée non raccordée.
- Son courant court-circuit : I_{cc} . Cette valeur représenterait le courant généré par une cellule éclairée raccordée à elle-même.
- Son point de puissance maximal : MPP (en anglais : maximal power point) obtenu pour une tension et un courant optimaux : V_{opt} , I_{opt} (parfois appelés aussi V_{mpp} , I_{mpp}).

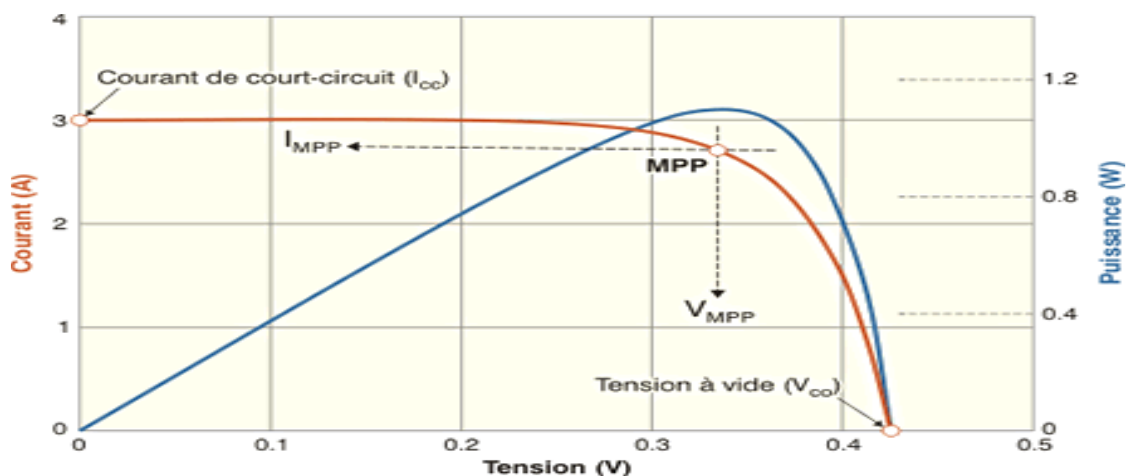


Figure (I.11) : Courbe courant- tension (I-V) et puissance- tension (P-V).

I.5.2. Influence de la température et l'éclairement sur un module PV

➤ Influence de la température

La température est un paramètre très important dans le comportement des cellules PV. Les figures ci-dessous décrivent le comportement du module sous un éclairement fixe de 1KW/m^2 , et à des températures comprises entre 0°C et 75°C . Nous remarquons que le courant augmente avec la température ; par contre la tension de circuit ouvert diminue. Ceci entraîne une diminution de la puissance maximale disponible.

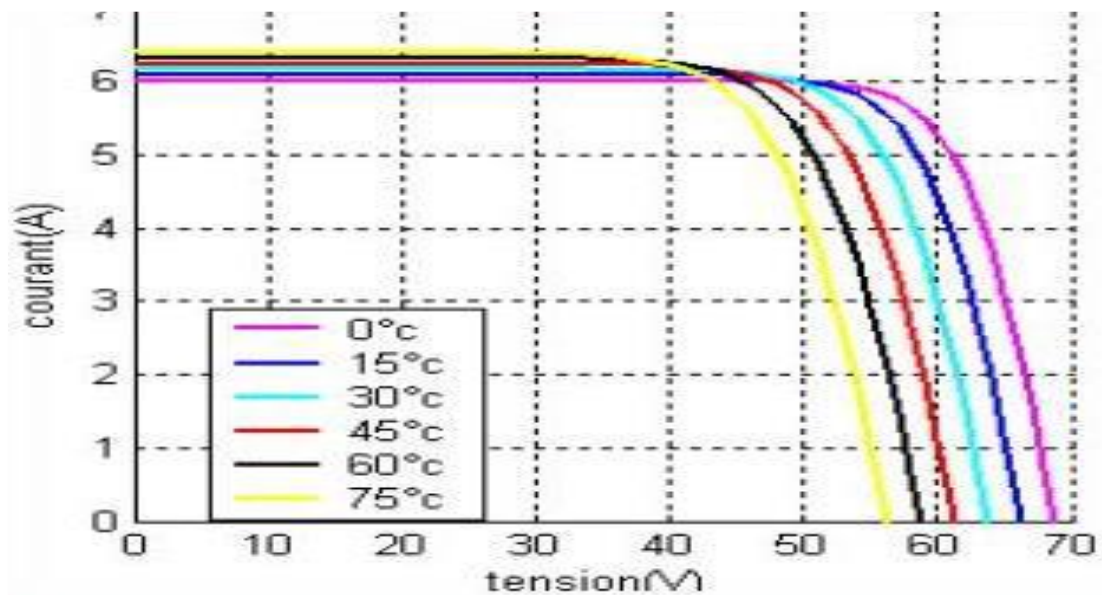


Figure (I.12) : Caractéristique I (V) d'un module pour différentes valeurs de température.

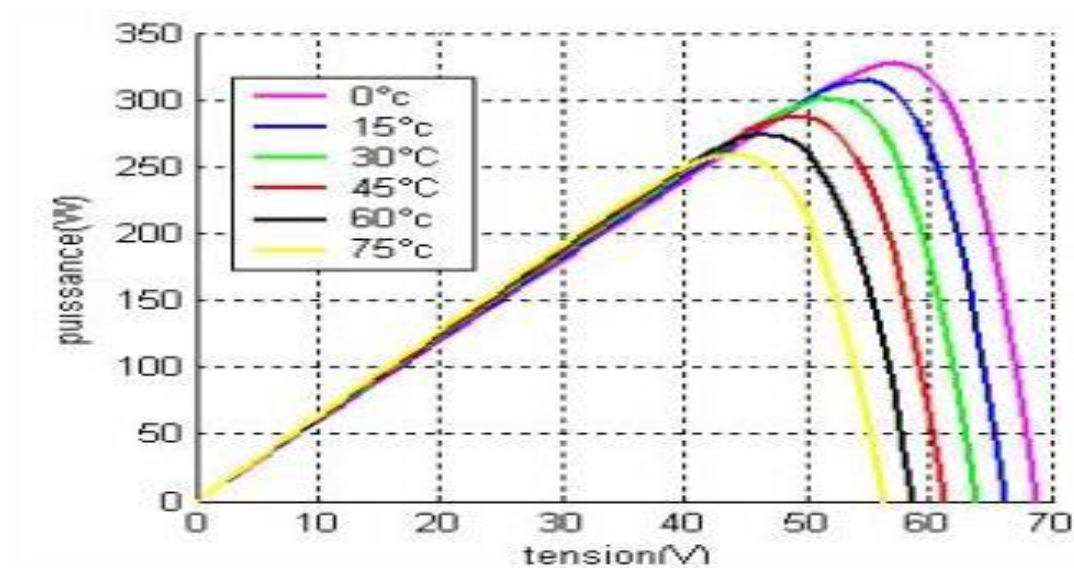


Figure (I.13) : Caractéristique P (V) d'un module pour différentes valeurs de température.

➤ Influence de l'éclairement :

Dans la Figure I.14 et la Figure I.15, nous représentons les caractéristiques I(V) et P(V) du panneau à 25° obtenus pour diverses valeurs de l'éclairement

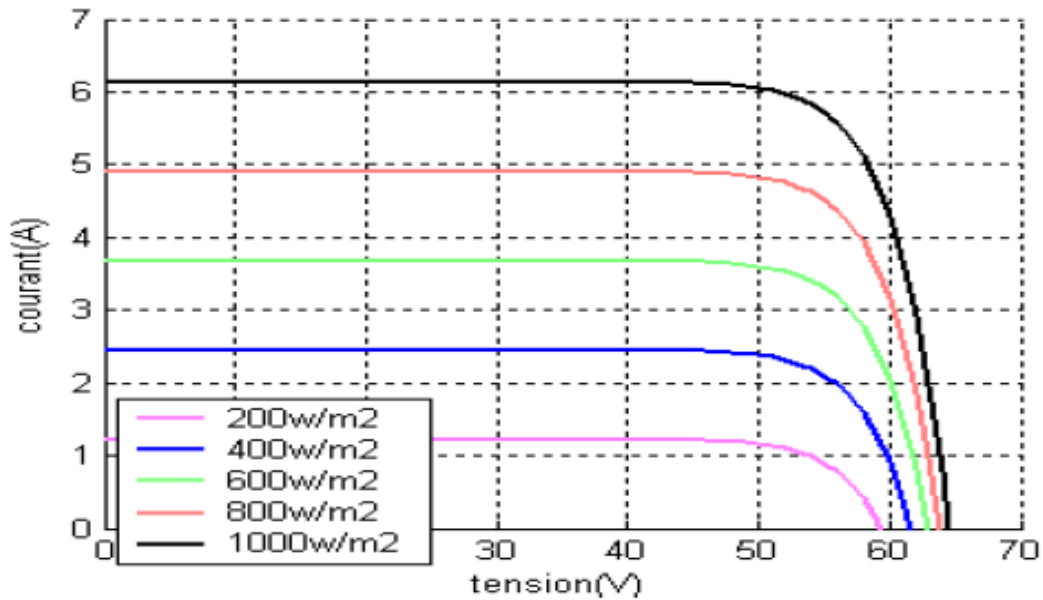


Figure (I.14) : Caractéristique I (V) d'un module pour différentes valeurs de l'éclairement.

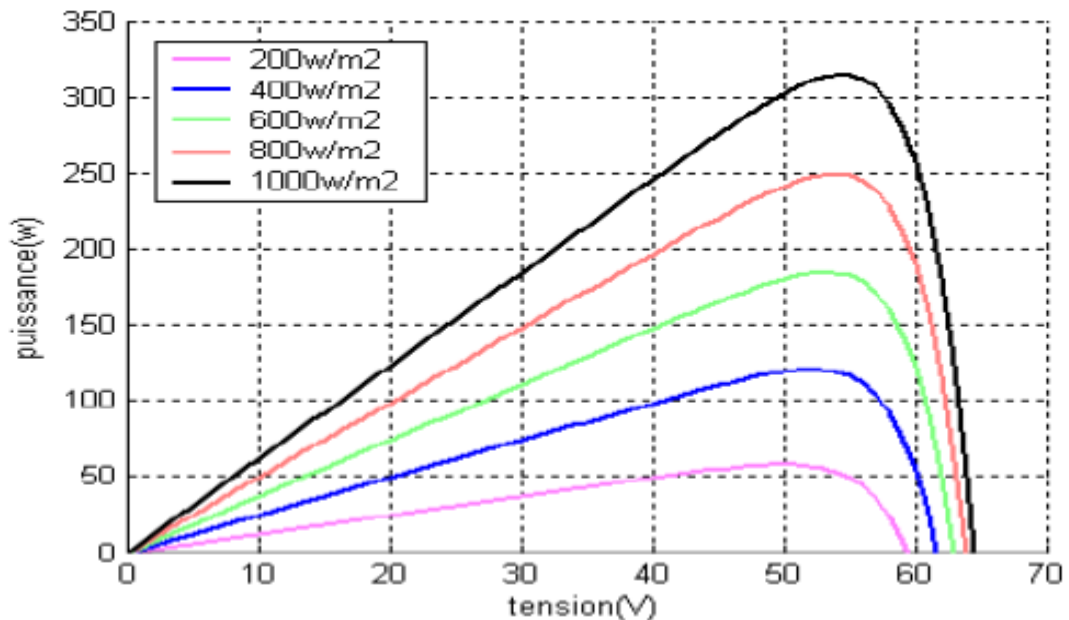


Figure (I.15) : Caractéristique P(V) d'un module pour différentes valeurs de l'éclairement

Pour chacune de différentes caractéristiques, correspond une puissance que pourrait fournir le panneau. Notons aussi la légère diminution de la tension du circuit ouvert suite à la diminution du flux lumineux. Aussi, nous remarquons que le courant est directement proportionnel à l'irradiation à ces niveaux d'éclairement [9].

1.6. Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque

1.6.1. Avantages

L'énergie photovoltaïque offre de multiples avantages [1] :

- La production de cette électricité renouvelable est propre.
- Les systèmes photovoltaïques sont extrêmement fiables.
- L'énergie photovoltaïque est particulièrement attractive pour les sites urbains, dus à leurs petites tailles, et leur opération silencieuse.
- La lumière du soleil étant disponible partout, l'énergie photovoltaïque est exploitable aussi bien en montagne dans un village isolé que dans le centre d'une grande ville et même dans l'espace.
- L'électricité photovoltaïque peut être produite au plus près de son lieu de consommation, de manière décentralisée, directement chez l'utilisateur.
- Les matériaux employés (verre, aluminium) résistent aux pires conditions climatiques notamment à la grêle).
- La durée de vie des panneaux photovoltaïques est très longue. Certains producteurs garantissent les panneaux solaires pour une durée de 25 ans.

1.6.2. Inconvénients

- Production d'énergie qui dépend de l'ensoleillement, toujours variable.
- Le coût très élevé.
- Faible rendement de conversion.
- S'il faut stocker l'énergie avec des batteries, le coût de l'installation augmente.
- Pollution à la fabrication.

Malgré ces inconvénients, le marché photovoltaïque ne cesse pas de trouver des applications et de s'agrandir. En plus, la technologie photovoltaïque est dans un processus de maturation dans laquelle les inconvénients pourraient s'atténuer, surtout en ce qui concerne les coûts de fabrication [8].

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté quelques généralités sur les systèmes photovoltaïques. Nous avons brièvement décrit les cellules solaires les plus couramment utilisées ; les avantages et les inconvénients de l'énergie photovoltaïque. L'association des cellules photovoltaïques a été détaillée.

Nous avons ensuite présenté et détaillé les différents modèles d'un GPV et ses caractéristiques. Les générateurs PV ont un point de fonctionnement optimal appelé MPP. Ce dernier ne peut être atteint que par l'usage d'un algorithme sophistiqué. Dans le chapitre suivant, consacré à la commande MPPT, nous allons nous intéresser à l'étude des algorithmes de poursuite du point de puissance maximale les plus utilisés dans les systèmes de conversion photovoltaïques.

Chapitre II

Les techniques de poursuite du point de puissances maximale

Introduction

Un générateur photovoltaïque peut fonctionner dans une large gamme de tension et de courant de sortie, mais il ne peut délivrer une puissance maximale que pour des valeurs particulières du courant et de la tension. En effet la caractéristique $I(V)$ du générateur dépend de l'éclairement solaire et de la température. Ces variations climatiques entraînent la fluctuation du point de puissance maximale.

A cause de cette fluctuation, on intercale souvent entre le générateur et le récepteur un ou plusieurs convertisseurs statiques commandés permettant de poursuivre le point de puissance maximale.

Ces commandes sont, connus sous le nom MPPT (Maximum Power Point Tracking) c-à-d poursuite du point à puissance maximale, associées à la commande du hacheur, lequel assure le couplage entre le générateur PV et le récepteur en forçant le premier à délivrer sa puissance maximale.

Les techniques MPPT sont utilisées dans les systèmes photovoltaïques pour maximiser la puissance délivrée par le panneau photovoltaïques en poursuivant continuellement le point de puissance maximale, ce qui n'est pas évident à atteindre ; En effet, ce problème de poursuite fait jusqu'à nos jours l'objet de plusieurs recherches. Aussi, plusieurs méthodes ont été élaborées et utilisées.

Dans ce chapitre, on présentera l'aspect théorique de trois méthodes pour le suivie du point de fonctionnement à puissance maximale du système photovoltaïque et qui sont la méthode « perturbation et observation », la méthode « conductance incrémentale » et la méthode « logique flou ».

II.1. Commandes MPPT

Les cellules photovoltaïques sont utilisées pour fournir de l'énergie dans de nombreuses applications. Pour obtenir la puissance maximale du panneau solaire, un suiveur du point de puissance maximum (MPPT : Maximum Power Point Tracking) est utilisé pour la commande de le hacheur [11].

La technique de suivi du point à puissance maximal (Maximum Power Point Cracking : MPPT) a été développée depuis 1968 [11], cette commande est essentielle pour un fonctionnement optimal du système photovoltaïque.

Le principe de cette commande est basé sur la variation automatique du rapport cyclique α en l'amenant à la valeur optimale de manière à maximiser la puissance délivrée par le panneau PV. Pour cette raison, on va présenter et étudier par la suite deux algorithmes de commande celui de la méthode « perturbation et observation » et la méthode « conductance incrémentale » [12].

II.1.1. Principe de la commande MPPT

La figure (II.1) donne le schéma fonctionnel d'un système de convertisseur d'énergie. Le système se compose d'un panneau PV, d'un convertisseur DC-DC, d'une commande de poursuite du point de puissance maximale et d'une charge. La commande MPPT agit sur le rapport cyclique du convertisseur utilisé.

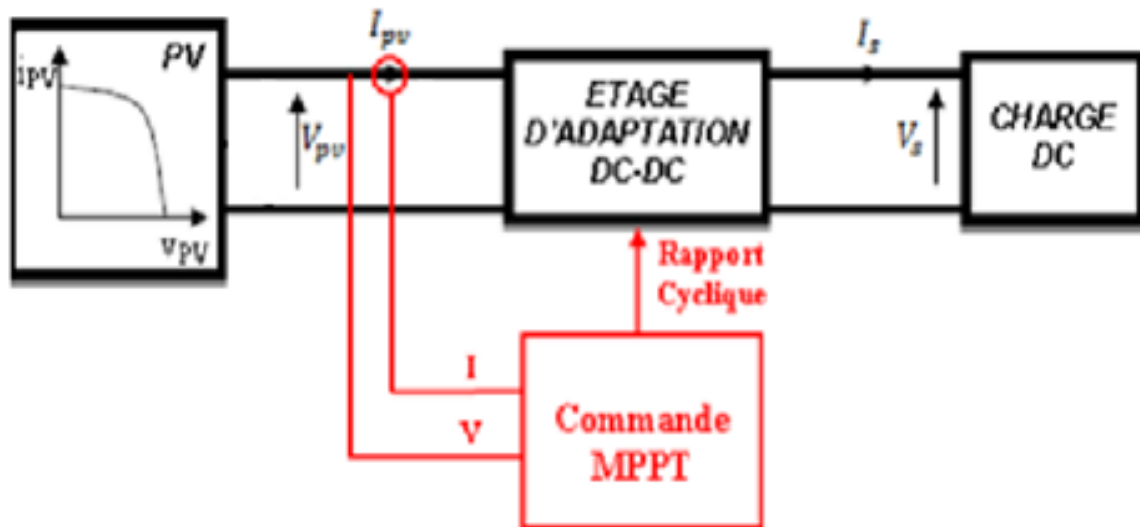


Figure (II.1) : Schéma synoptique d'un système photovoltaïque avec la commande MPPT

II.1.2. Processus de poursuite du point de puissance maximale

La figure (II.2) illustre les caractéristiques électriques d'un GPV sous des conditions climatiques constantes. La commande MPPT fait varier le rapport cyclique du convertisseur statique (CS) à l'aide d'un signal électrique approprié pour tirer le maximum de puissance que le GPV peut fournir (voir la figure II.2). L'algorithme MPPT peut être plus ou moins compliqué pour rechercher le MPP. En général, il est basé sur la variation du rapport cyclique

du CS en fonction de l'évolution des paramètres d'entrée de ce dernier (I et V et par conséquent de la puissance du GPV) jusqu'à se placer sur le MPP.

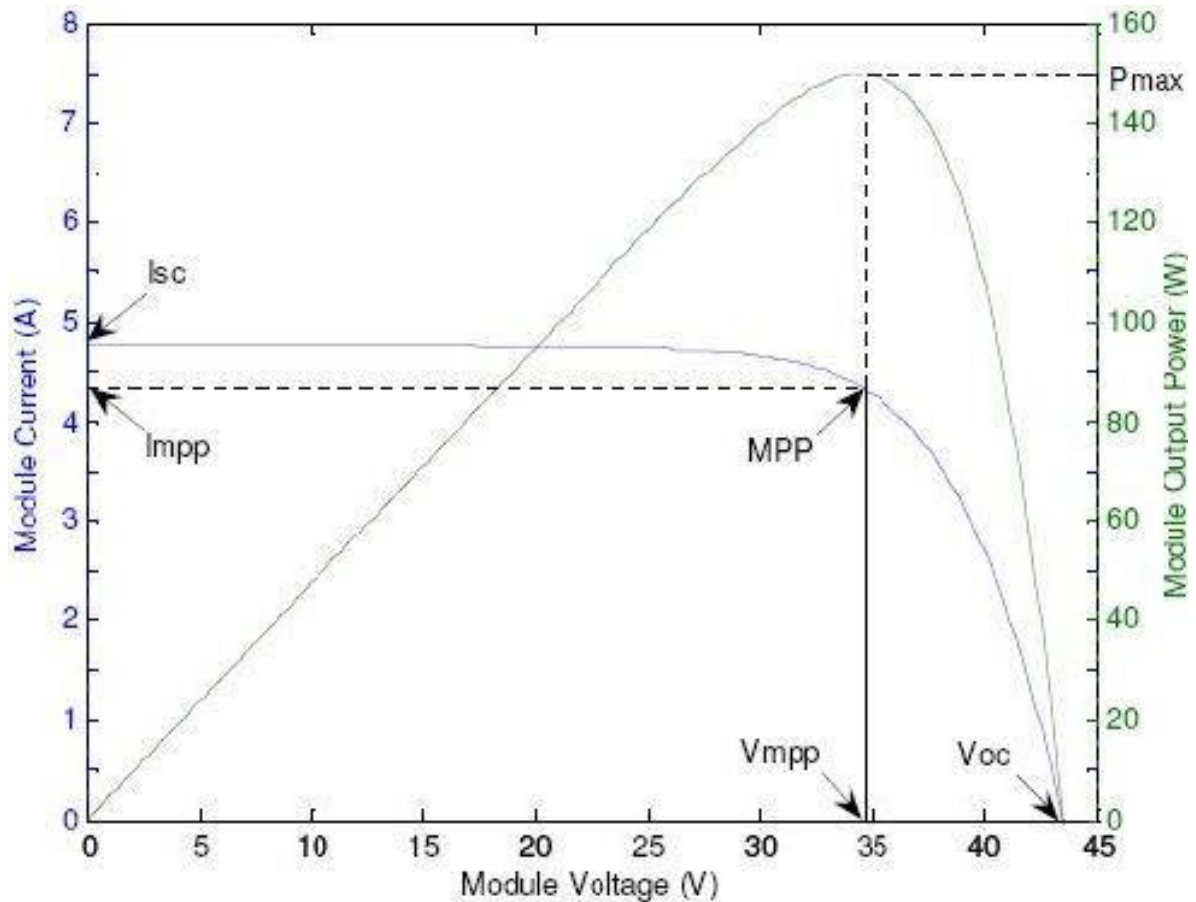


Figure (II.2) : Caractéristiques électriques d'un GPV

II.2. Modélisation du convertisseur statique DC/DC

Les convertisseurs statiques servent à transformer la tension continue fournie par les panneaux ou les batteries pour l'adapter à des récepteurs fonctionnant en une tension continue différente.

II.2.1. Types de hacheurs

Le hacheur est un convertisseur continue/continue permettant de convertir une énergie continue à un niveau donné de tension (ou de courant) en une énergie continue à un autre niveau de tension (ou de courant). Son utilisation s'avère nécessaire pour stocker l'énergie photovoltaïque dans des batteries, ou pour alimenter une charge continue.

On distingue trois types des de convertisseur DC/DC :

- Hacheur abaisseur « Buck Converter ».
- Hacheur élévateur « Boost Converter ».
- Hacheur abaisseur élévateur « Buck-Boost Converter ».

II.2.1.1. Hacheur Buck (série/abaisseur)

Ce hacheur commande le débit d'une source de tension dans une charge de courant [21]. Il permet de convertir la tension d'entrée en une tension de sortie inférieure.

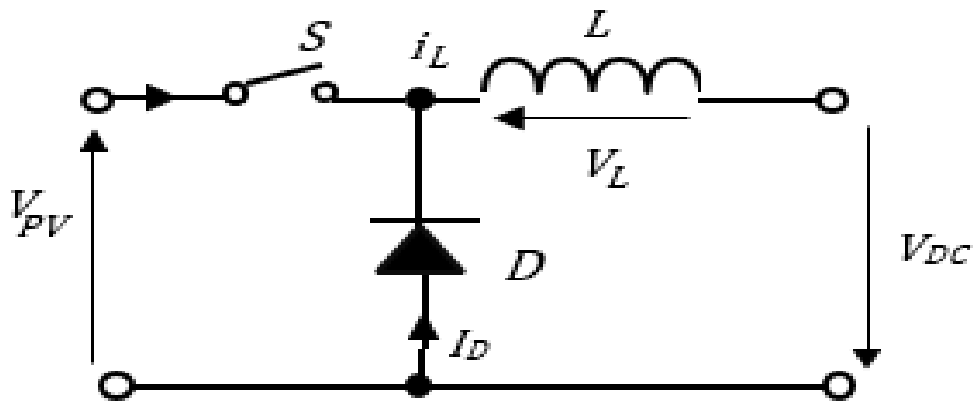


Figure (II.3) : Schéma électrique du hacheur buck

Le cycle de fonctionnement, de période de hachage T , comporte deux étapes :

Lors de la première, on ferme l'interrupteur et la diode, polarisée en inverse, est bloquée. La source v_{PV} fournit de l'énergie à la charge et à l'inductance. Cette phase dure de 0 à αT , avec α compris entre 0 et 1 (aussi appelé rapport cyclique).

Lors de la seconde, on ouvre l'interrupteur. La diode devient passante, car l'énergie emmagasinée dans l'inductance commande la circulation du courant dans la diode de roue libre (D). Cette phase dure de αT à T .

La relation entre la tension d'entrée et celle de sortie est la suivante :

$$V_{DC} = \frac{1}{T} \int_0^{\alpha T} v_{DC} d\tau = \frac{1}{T} \int_0^{\alpha T} V_{PV} dT = \alpha V_{PV} \quad (\text{II.1})$$

A pertes minimales on a :

$$p_{PV} = p_{DC} \Leftrightarrow V_{PV}I_{PV} = V_{DC}I_{DC} \Leftrightarrow I_{PV} = \frac{V_{DC}}{V_{PV}}I_{DC} \Leftrightarrow I_{PV} = \alpha I_{DC} \Leftrightarrow \alpha = \frac{V_{DC}}{V_{PV}} = \frac{I_{PV}}{I_{DC}} \quad (\text{II.2})$$

II.2.1.2. Hacheur Boost (parallèle/élevateur)

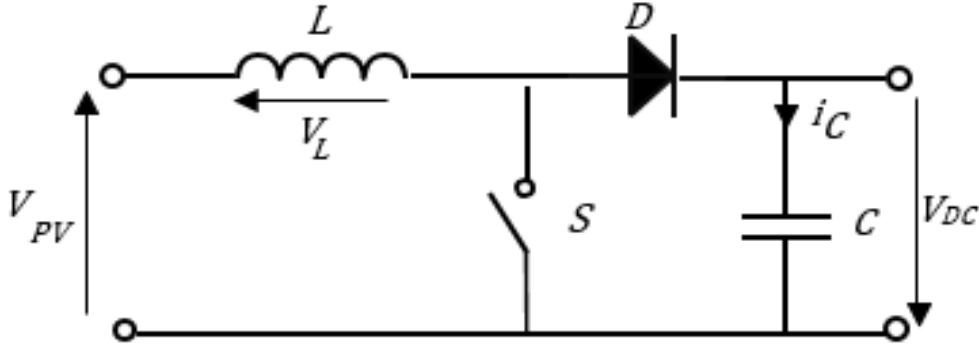


Figure (II.4) : Schéma électrique du hacheur boost

Le hacheur parallèle commande le débit d'une source de courant dans une charge de tension. La tension moyenne de sortie est supérieure à la tension d'entrée.

Dans la phase qui dure de 0 à αT , l'interrupteur commandé est fermé, la tension à ses bornes est nulle. La source et la charge ne sont pas en contact durant cette phase. La diode est alors bloquée et le courant dans l'inductance croît linéairement.

Pour la seconde phase, de αT à T , on ouvre l'interrupteur commandé et l'énergie emmagasinée dans l'inductance commande la circulation du courant dans la diode qui devient passante.

$$V_{PV} = \frac{1}{T} \int_{\alpha T}^T v_{PV} d\tau = \frac{1}{T} \int_{\alpha T}^T V_{DC} dT = (1 - \alpha)V_{DC} \Leftrightarrow V_{DC} = \frac{V_{PV}}{(1-\alpha)} \quad (\text{II.3})$$

A pertes minimales on a :

$$p_{PV} = p_{DC} \Leftrightarrow V_{PV}I_{PV} = V_{DC}I_{DC} \Leftrightarrow I_{DC} = \frac{V_{PV}}{V_{DC}}I_{PV} \Leftrightarrow I_{PV} = (1 - \alpha)I_{DC} \Leftrightarrow (1 - \alpha) = \frac{V_{PV}}{V_{DC}} = \frac{I_{DC}}{I_{PV}} \quad (\text{II.4})$$

II.2.1.3. Hacheur Buck-Boost (abaisseur-élevateur)

Ce convertisseur statique permet d'avoir une tension continue variable supérieure ou inférieure à la tension d'entrée qui est fixe. Lors de la première phase de conduction, de 0 à αT , l'interrupteur commandé est fermé. La diode n'est pas passante et l'inductance stocke

l'énergie fournie par le générateur d'entrée. Lors de la seconde phase, de αT à T , on ouvre l'interrupteur commandé et la diode devient passante. L'inductance restitue son énergie à la charge.

En conduction continue et sachant que la valeur moyenne aux bornes de l'inductance est nulle, on a :

$$V_{pv}\alpha T = V_{DC}(1 - \alpha)T \quad (\text{II.5})$$

$$\text{Donc : } V_{DC} = \frac{\alpha}{1-\alpha} V_{PV} \quad (\text{II.6})$$

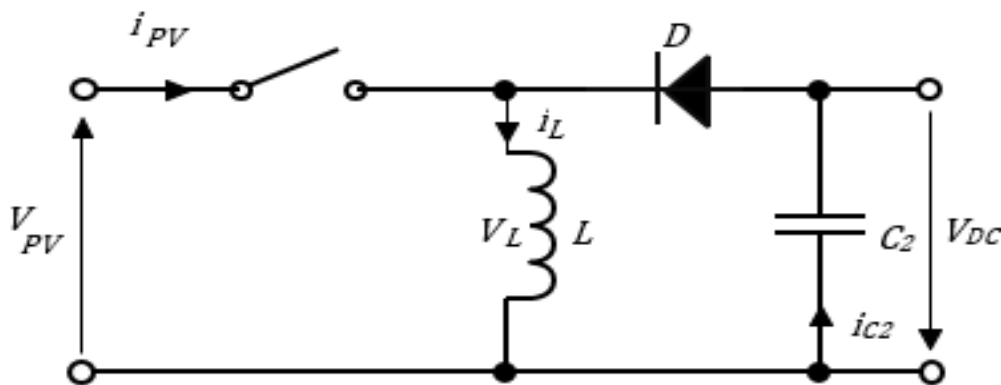


Figure (II.5) : Schéma électrique du hacheur buck-boost

Suivant la valeur du rapport cyclique α , la tension moyenne de sortie peut être supérieure ou inférieure à la tension d'entrée :

- lorsque $\alpha > 0.5$, le hacheur buck-boost fonctionne comme un hacheur boost (élévateur).
- Lorsque $\alpha < 0.5$, le hacheur buck-boost fonctionne comme un hacheur buck (abaisseur).

II.2.2. Signal modulé en largeur d'impulsion (MLI)

De nombreuses applications industrielles utilisent des signaux de commande MLI (ou PWM, Pulse width modulation), car ces signaux sont robustes en présence de bruit. La technique de modulation de largeur d'impulsion (PWM) consiste à générer un signal carré avec un rapport cyclique modulé en fonction d'un signal de commande. La valeur moyenne de la tension commandée dépend du rapport cyclique.

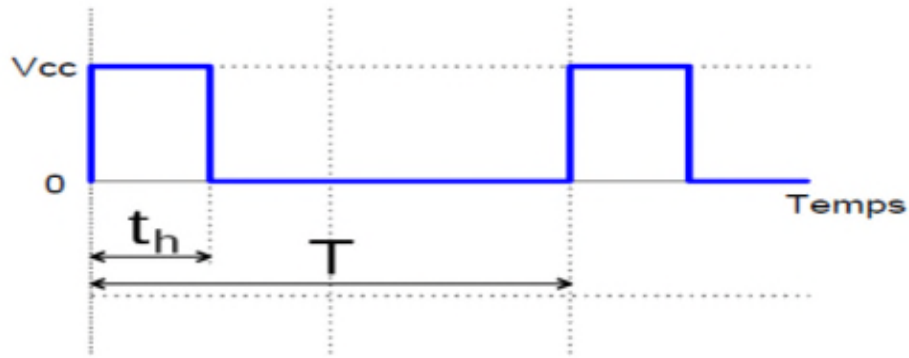


Figure (II.6) : Signal PWM.

Figure II.7 suivante montre l'obtention d'un signal PWM. Dans le diagramme supérieur, un signal en dents de scie et le rapport cyclique variable (en rouge), et dans le graphe du bas, une représentation d'un signal carré PWM.

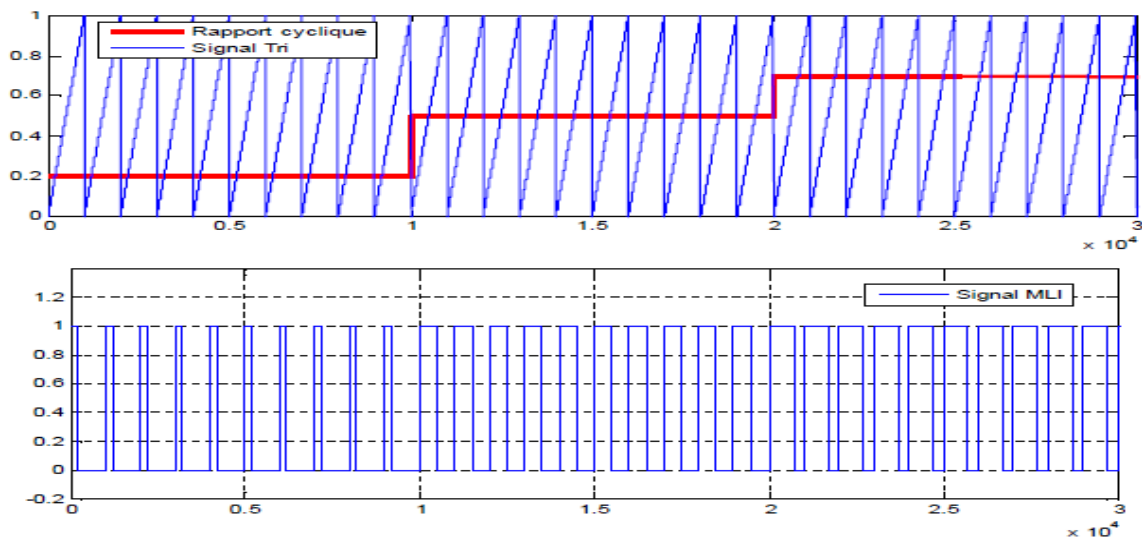


Figure (II.7) : Obtention d'un signal MLI (PWM).

II.3. Techniques de poursuite du point de puissance maximale MPPT

Des chercheurs ont développé les différentes méthodes de commande MPPT dans le but d'améliorer le fonctionnement des systèmes photovoltaïques.

Chaque méthode a ses algorithmes de contrôle, permettant de maintenir le système à son point de puissance maximale en tenant compte des variables des paramètres du système donné et le climat (le changement brusque de la température et l'éclairement).

Sur ce qui suit de ce chapitre, on va présenter les différentes méthodes de la commande MPPT comme :

- Perturbation et Observation (P&O, Perturbe and Observe)
- Conductance Incrémentale (IncCond, Incrémental Conductance)
- Algorithme à base de logique floue

II.3.1. Algorithme Perturber et Observer (P&O)

L'algorithme consiste à perturber la tension V_{pv} d'une faible amplitude autour de sa valeur initiale et d'analyser le comportement de la variation de puissance P_{pv} qui en résulte [13].

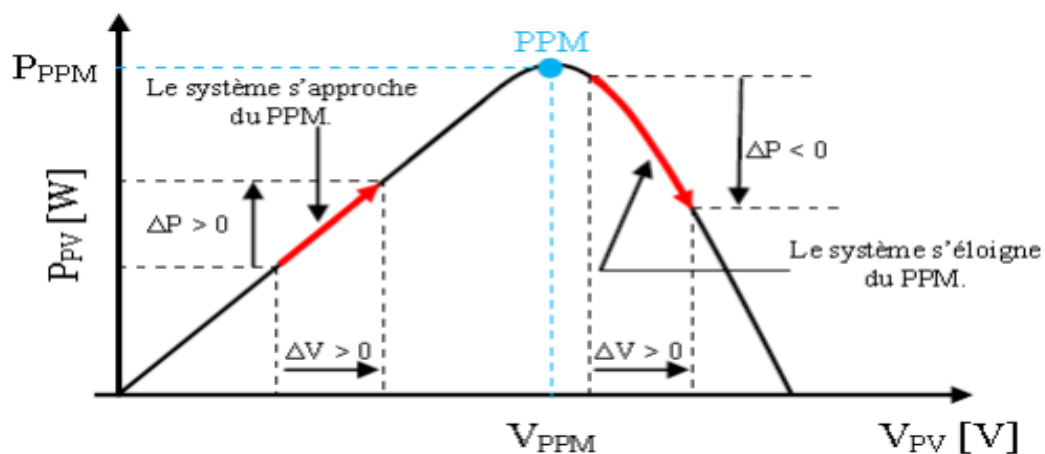


Figure (II.8) : Schéma de principe de la méthode P&O

Comme illustré à la figure (II.8), on peut observer que si une incrémentation positive de la tension V_{pv} engendre un accroissement de la puissance P_{pv} , le point de fonctionnement se trouve à gauche du PPM. Par contre, si la puissance décroît, le point de fonctionnement se trouve à droite du PPM. Un raisonnement similaire peut être effectué lorsque la tension décroît. À partir de ces analyses sur les conséquences d'une variation de tension sur la caractéristique $P_{pv}(V_{pv})$, on peut facilement situer le point de fonctionnement par rapport au PPM, et de le faire converger vers le maximum de puissance en imposant une valeur appropriée au courant de sortie du module PV [14].

Organigramme : la figure (II.9) montre l'organigramme de la méthode P&O

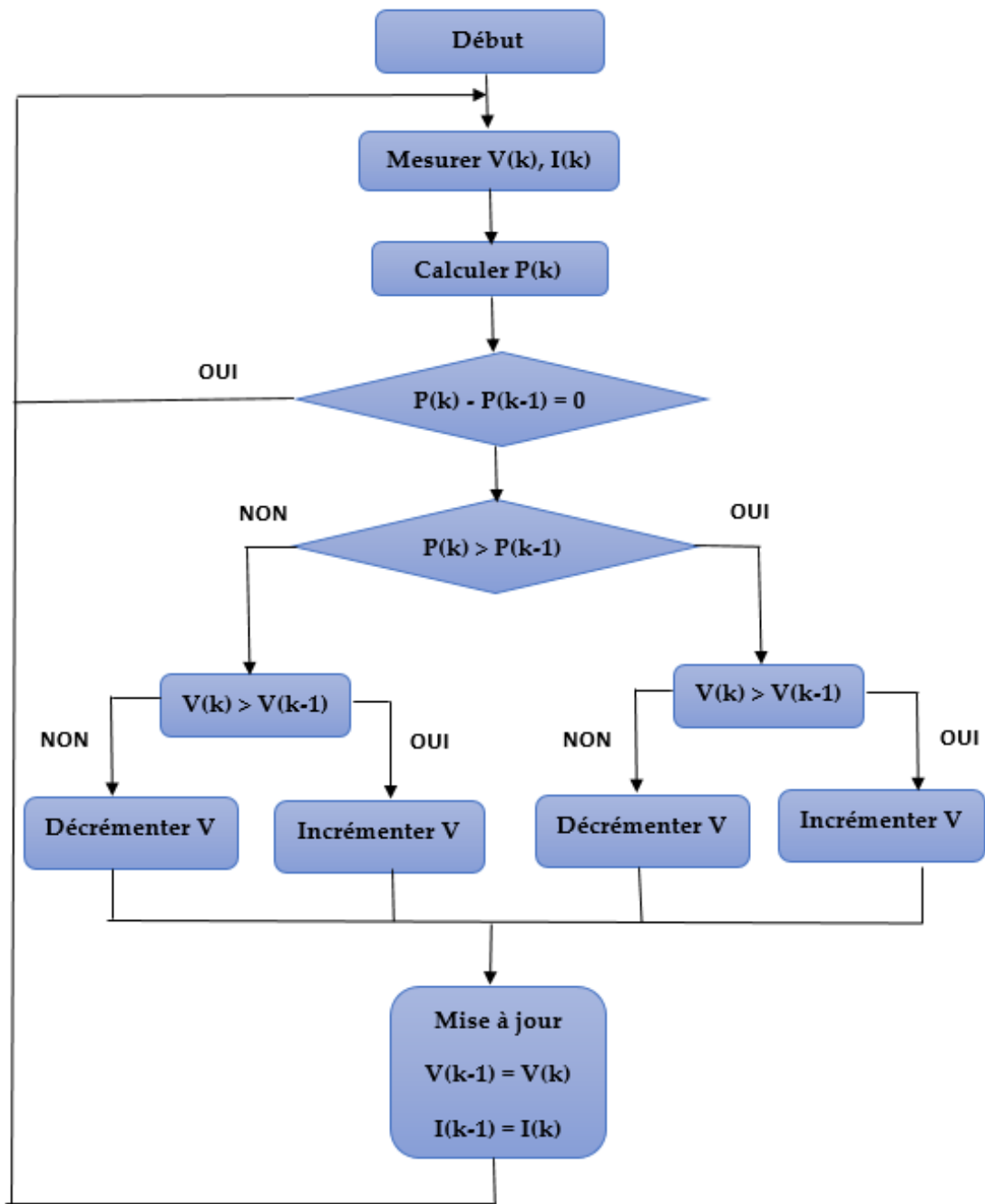


Figure (II.9) : L'organigramme de la méthode P&O

Chapitre II Les techniques de poursuite du point de puissances maximale

Le principe de cet algorithme est d'effectuer une perturbation sur la tension du générateur photovoltaïque tout en agissant sur le rapport cyclique α . En effet, suite à cette perturbation, on calcule la puissance fournie par le générateur photovoltaïque à l'instant k , puis on la compare à la précédente de l'instant $(k-1)$. Si la puissance augmente, on s'approche du point de puissance maximale (MPP) et la variation du rapport cyclique est maintenue dans le même sens. Au contraire, si la puissance diminue, on s'éloigne du MPP. Alors, on doit inverser le sens de la variation du rapport cyclique [3].

Le système oscille alors autour du MPP, ce qui provoque des pertes de puissance. L'oscillation peut être minimisée en diminuant la taille de la perturbation. Cependant, un pas de perturbation trop petite ralentit considérablement la poursuite du MPP. Il existe alors un compromis entre précision et rapidité. La méthode P&O est généralement la plus utilisée en raison de sa simplicité et sa facilité de réalisation [3].

Il est important de noter qu'avec l'algorithme P&O, la variable à contrôler peut être soit la tension soit le courant du GPV. Cependant, la variable idéale qui caractérise le MPP est celle qui varie peu lors d'un changement climatique GPV. La dynamique de la température est lente et varie sur une plage réduite. Par conséquent, il est préférable de contrôler la tension du GPV.

Un inconvénient de la méthode P&O est qu'elle peut échouer lors d'un rapide changement des conditions atmosphériques.

L'algorithme de la P&O est résumé dans le tableau (II.1) [10] et dans l'organigramme précédent [6] [9]. L'algorithme peut être représenté mathématiquement par l'expression :

$$V(k) = V(k - 1) + \Delta V \cdot \text{sign}\left(\frac{dP}{dV} \Big|_{V=V_{k-1}}\right) \quad (\text{II.7})$$

Tableau II.1 : résumé L'algorithme de la P&O

Perturbation de la Puissance	Observation de la Puissance	Prochaine Perturbation
Positive (+)	Positive (+)	Positive (+)
Positive (+)	Négative (-)	Négative (-)
Négative (-)	Positive (+)	Négative (-)
Négative (-)	Négative (-)	Positive (+)

II .3.2. Méthode conductance incrémental

Une autre alternative à la commande P&O, est la commande à incrémentation de conductance qui se base sur la dérivée de la conductance du générateur PV ($dG = dI/dV$) pour connaître la position relative du MPP, ce qui permet d'appliquer une action de contrôle adéquate poursuivant le MPP.

La puissance en sortie de la source peut s'écrire:

$$P = I * V \tag{II.8}$$

D'où en dérivant :

$$\frac{dP}{dV} = I * \frac{dV}{dV} + V * \frac{dI}{dV} \tag{II.9}$$

$$\frac{dP}{dV} = I + V * \frac{dI}{dV} \tag{II.10}$$

Donc

$$\left(\frac{I}{V}\right) \frac{dP}{dV} = \frac{I}{V} + \frac{dI}{dV} \tag{II.11}$$

$$\left(\frac{I}{V}\right) \frac{dP}{dV} = G + dG \tag{II.12}$$

Chapitre II Les techniques de poursuite du point de puissances maximale

En général la tension issue de la source est positive, c'est pourquoi, nous pouvons déduire les résultats clés de la méthode de la conductance incrémental.

$\frac{dP}{dV} > 0$ donc, $G > -dG$ Le point *max* se trouve à gauche donc il faut incrémenter

$\frac{dP}{dV} = 0$ donc, $G = -dG$ On est sur le point maximal

$\frac{dP}{dV} < 0$ donc, $G < -dG$ Le point maximal se trouve à droite donc il faut décrémenter

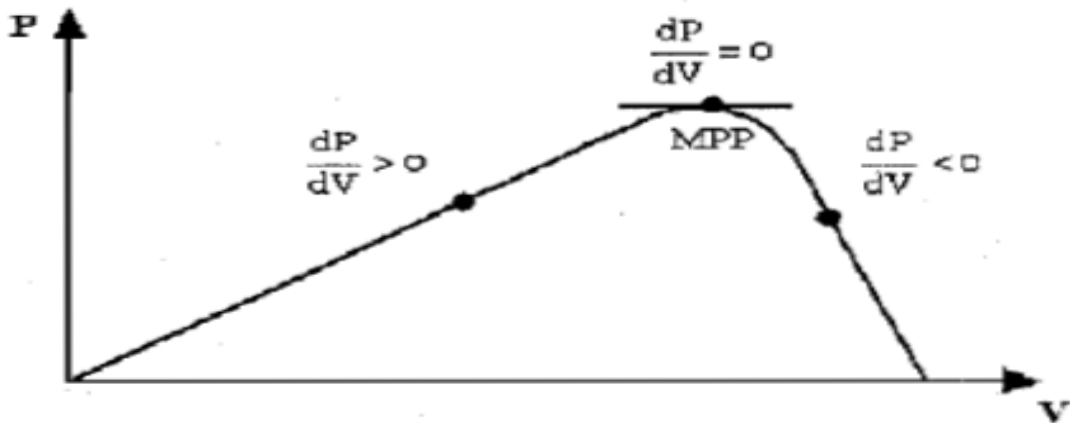


Figure (II.10) : Caractéristique $P(V)$ d'un générateur photovoltaïque.

Le principe de cet algorithme est basé sur la connaissance de la valeur de la conductance $G=I/V$ et l'incrément de la conductance (dG) pour en déduire la position du point de fonctionnement par rapport au MPPT.

Si l'incrément de conductance (dG) est supérieur à l'opposé de la conductance ($-G$), on diminue le rapport cyclique. Par contre, si l'incrément de conductance est inférieur à l'opposé de la conductance, on augmente le rapport cyclique. Ce processus est répété jusqu'à atteindre le MPP [15].

Organigramme : la figure (II.11) montre l'organigramme de la méthode Incremental conductance

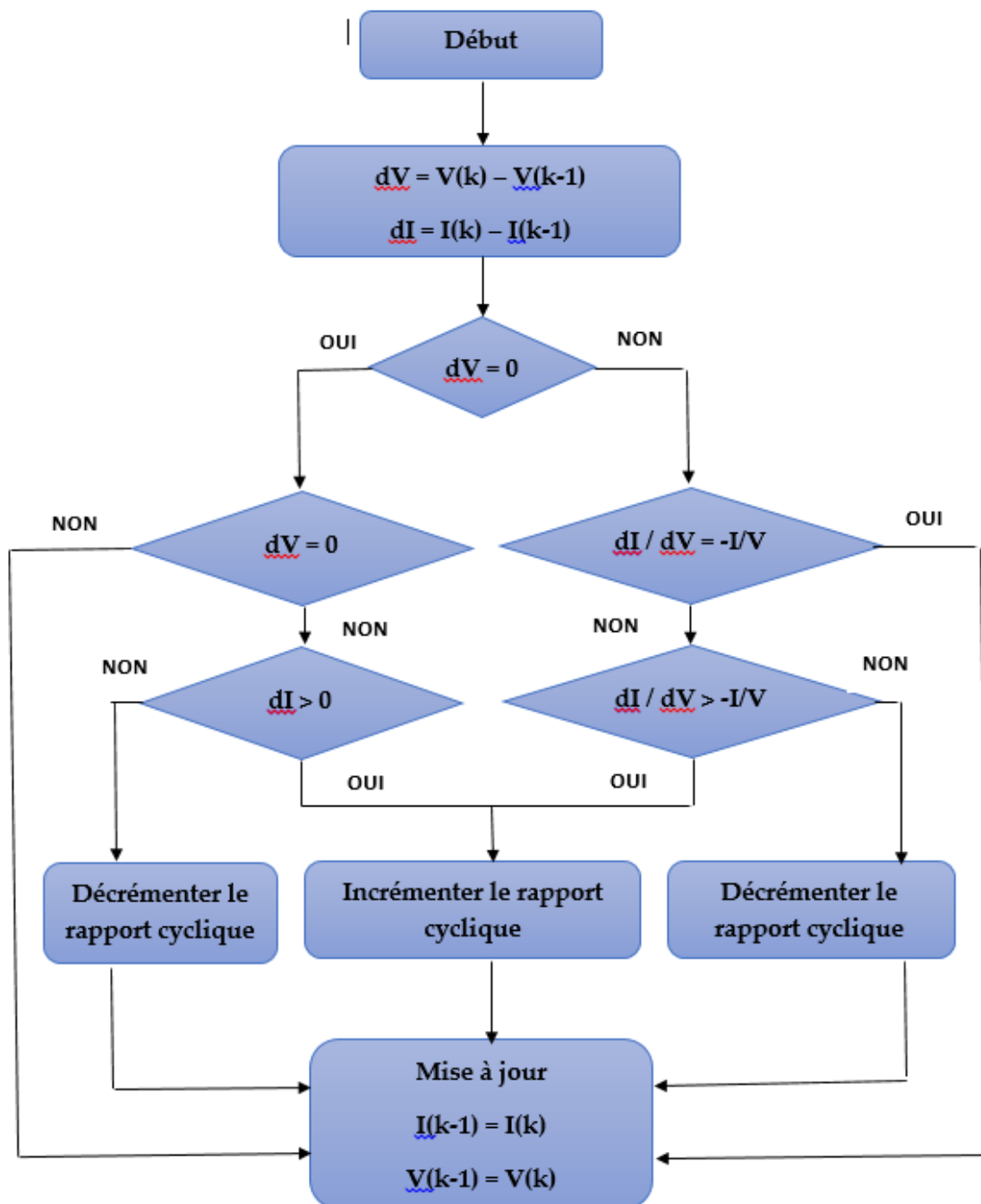


Figure (II.11) : l'organigramme de la méthode Incrementale conductance

II.4. Logique floue

Le développement des techniques intelligentes connaît un grand essor actuellement, que ce soit pour la modélisation, l'identification ou la commande des systèmes complexes tels que les robots, les procédés biologique, les véhicules routiers..., ceci grâce à leurs adaptabilités face aux changements des paramètres des systèmes, et leurs robustesses envers les perturbations et les erreurs de modélisation. Les systèmes photovoltaïques présentent des caractéristiques fortement non linéaires, ajouté à cela leurs dépendances des conditions climatiques qui sont hautement aléatoires, cela a incité la publication de beaucoup de travaux concernant l'optimisation de ces systèmes en utilisant des techniques intelligentes.

Dans ce chapitre, on va présenter le principe général et la théorie de base de la logique floue. Cela englobe des aspects de la théorie des possibilités qui fait intervenir des ensembles d'appartenance appelés ensembles flous caractérisant les différentes grandeurs du système à commander ; et le raisonnement flou qui emploie un ensemble de règles floues établies par le savoir-faire humain et dont la manipulation permet la génération de la commande adéquate ou la prise de la décision [16]. Ensuite, on va décrire les notions générales et l'architecture algorithmique et structurelle d'une commande floue, ou nous mettons le point sur [16] :

- La fuzzification ;
- Les inférences floues ;
- La défuzzification.

II.4.1.1. Principe historique de la logique floue

L'imposition des contraintes sévères sur les performances des équipements industriels impose la recherche d'un fonctionnement optimal des systèmes. La démarche de l'automatique classique (approche algorithmique) consistait à construire un modèle mathématique du système à piloter. A partir de ce modèle, une commande est déterminé (PID, commande par retour d'état, commande optimal...) afin d'amener ce système dans les états désirés tout en respectant les critères des performances [17].

La logique floue (fuzzylogic) est de grande actualité aujourd'hui. En réalité, elle existait déjà depuis longtemps et nous pouvons diviser son histoire de développement en trois étapes.

Ce sont les paradoxes logiques et les principes de l'incertitude d'Heisenberg qui ont conduit durant les années 1920 et 1930 au développement de la logique à valeurs multiples ou logique floue. En 1937, le philosophe M.Black a appliqué la logique continue, qui se base sur l'échelle des valeurs vraies (0, 1/2, 1) pour classer les éléments ou symboles [18].

A partir des années soixante l'automaticien célèbre Zadeh appréhende l'aspect douteux que ce type d'approche soit toujours viable pour les systèmes complexes. En effet, l'obtention d'un modèle mathématique précis et simple à exploiter s'avère parfois difficile.

Cette constatation a été à l'origine du développement des commandes à base de la logique floue. Ainsi, l'auteur s'est intéressé aux règles floues reposant sur la représentation du savoir des experts pour décrire l'état du système et eut ainsi l'idée d'élargir la notion d'appartenance normalement traduite par "oui" ou "non" aux critères "peut-être", "sans doute", "à peu-près".....etc. Il a ainsi fixé la notion des sous-ensembles flous et a fourni le point de départ d'une nouvelle théorie [19].

II.4.1.2. Application de la logique floue

Au cours des années soixante-dix, différentes équipes de recherche ont contribué à faire connaître cette nouvelle technique, de ces recherches ont découlé divers concepts nouveaux tels que : langage flou, système flou, relation floue...etc. Parallèlement aux travaux de recherche, différentes applications industrielles ont été menées, la plus importante est sans doute celle menée dans les années quatre-vingt par Hitachi consistant à faire la commande automatisée du métro de Sendai (ville située à 300 Km de Tokyo), ce dispositif géré par un ordinateur utilisant des algorithmes flous a permis une réduction de 10% de la consommation d'énergie, de plus la conduite était tellement douce [20].

II.4.1.3. Ensemble flou et variables linguistiques

A. Ensemble flou

Dans la théorie classique des ensembles, c'est la fonction caractéristique qui définit l'ensemble. Cette fonction ne prend que les deux valeurs discrètes 0 (l'élément n'appartient pas ...) ou 1 (...appartient à l'ensemble). Alors qu'en logique floue, il peut admettre les deux propositions avec un degré de vérité pour chacune (voir figure II.12).

L'idée est de remplacer l'ensemble binaire $\{0,1\}$ par un intervalle $[0, 1]$ ceci permet des graduations dans l'appartenance d'un élément à une situation, ce qui permet la modélisation de l'observation humaine exprimée par des expressions linguistiques.

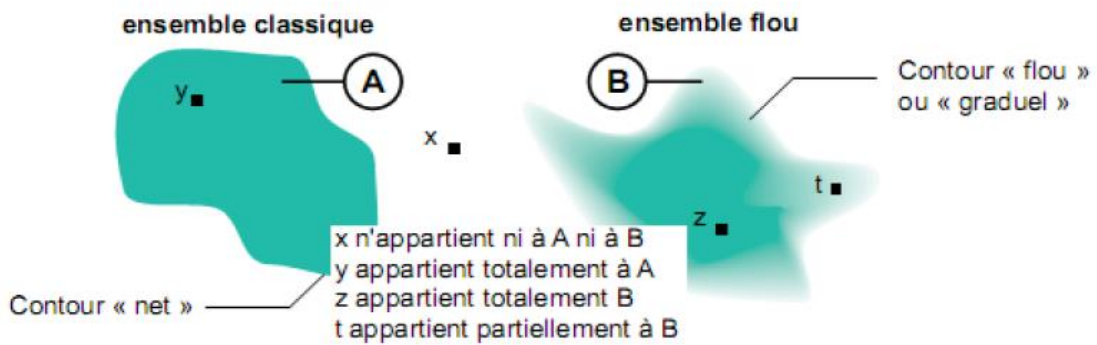


Figure (II.12) : Comparaison entre un ensemble classique et un ensemble flou.

B. Variable linguistique

La description d'une certaine situation imprécise ou incertaine peut contenir des expressions floue comme : très grand, grand, moyen, petit, ...etc. Ces expressions forment les valeurs d'une variable x , appelée "variable linguistique".

Une variable linguistique est caractérisée par un triplé (x, U, T_x) où x est une variable définie sur l'univers de discours U et $T_x = \{A_1, A_2, \dots\}$ est un ensemble composé de sous-ensembles flous de U qui caractérise x . On associe souvent à chaque sous ensemble flou de T_x une valeur ou un terme linguistique (étiquette).

La figure (II.13) illustre un exemple de la variable linguistique 'vitesse', l'univers de discours est un ensemble réel de l'intervalle $[1000, 3000]$ et on attribue à cette variable trois sous ensemble : petite, moyenne, grande. Chaque sous ensemble est caractérisé par une fonction d'appartenance $\mu_{petite}(x)$, $\mu_{moyenne}(x)$, $\mu_{grande}(x)$.

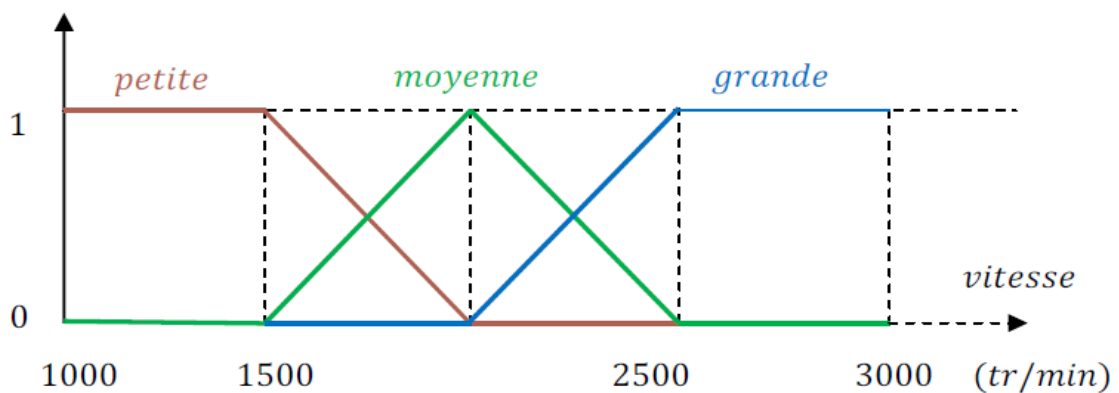


Figure (II.13) : Exemple d'une variable linguistique 'vitesse'.

II.4.1.4. Formes des fonctions d'appartenance

Le plus souvent, on utilise des fonctions d'appartenance de formes trapézoïdales ou triangulaires. Il s'agit des formes les plus simples, composées par morceaux de droites. L'allure est complètement définie par 3 points P1, P2 et P3 pour la forme triangulaire, voire 4 points P1, P2, P3 et P4 pour la forme trapézoïdale (figure II.14). La forme rectangulaire est utilisée pour représenter la logique classique. Dans la plupart des cas, en particulier pour le réglage par logique floue, ces deux formes sont suffisantes pour délimiter les ensembles flous [16].

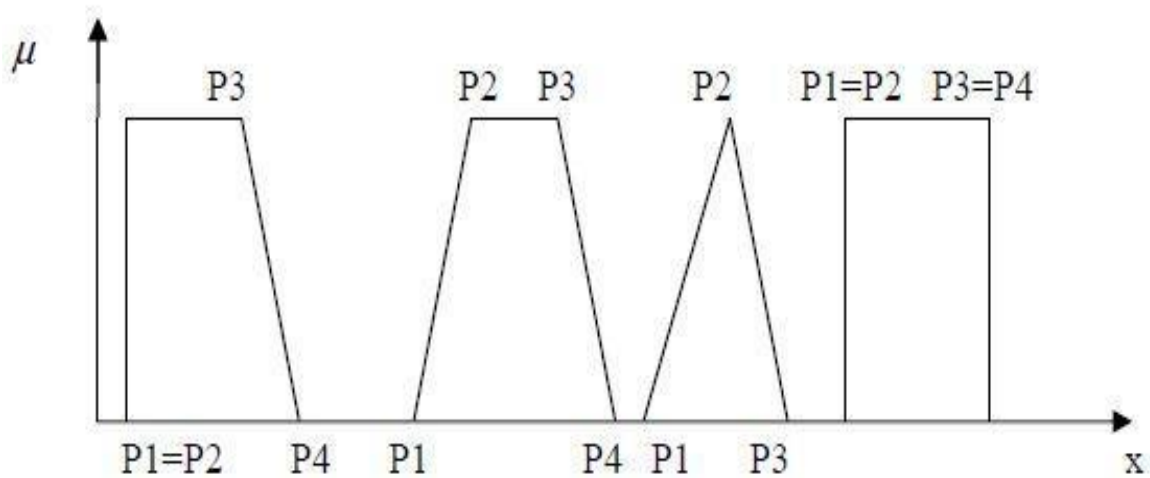


Figure (II.14) : Fonctions d'appartenance de formes trapézoïdales et triangulaires

Les courbes d'appartenance prennent différentes formes en fonction de la nature de la grandeur à modéliser (figure II.15).

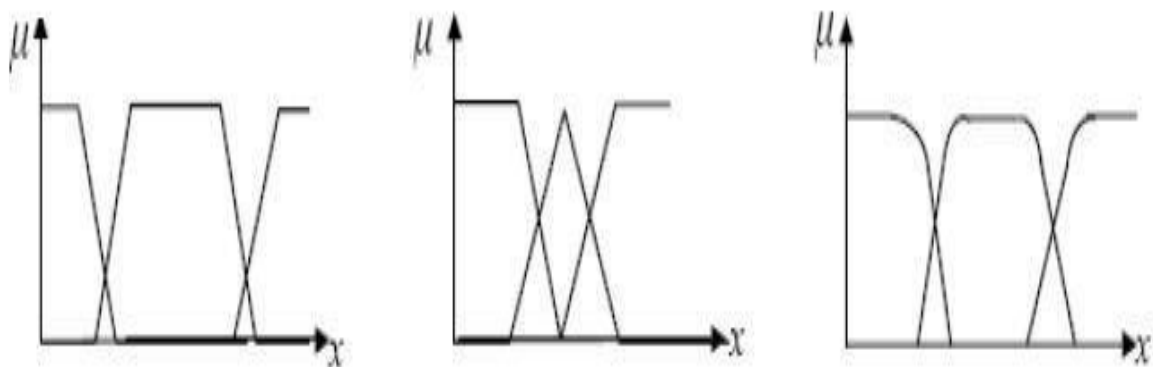


Figure (II.15) : Différentes formes de fonctions d'appartenance

Pour obtenir le degré d'appartenance d'une valeur donnée de la variable linguistique, relatif à un ensemble flou, il suffit de projeter verticalement cette valeur sur la fonction d'appartenance correspondant à cet ensemble flou.

➤ **Opérateurs de la logique floue**

Dans la théorie des ensembles classique, l'ensemble flou est traduit par les opérateurs d'union, d'intersection aussi de négation, et des opérations habituelles telles que addition, soustraction et multiplication.

Opérateur NON:

$$c = \bar{a} = NON(a) \quad (II-13)$$

$$\mu_c(x) = 1 - \mu_a(x) \quad (II-14)$$

Opérateur ET:

C'est l'intersection de deux ensembles $a \cap b$ mais dans la logique floue l'opérateur ET est représenté par une fonction de minimum appliquée aux fonctions d'appartenances.

$$\mu_c(x) = \min \{ \mu_a(x), \mu_b(x) \} \quad (II-15)$$

Où:

μ_a, μ_b, μ_c Signifient respectivement les degrés d'appartenance aux ensembles a, b et c . On parle alors d'opérateur minimum.

Opérateur OU:

C'est l'union de deux ensembles $a \cup b$ mais dans la logique floue l'opérateur OU est représenté par une formation maximale appliquée aux fonctions d'appartenances.

$$\mu_c(x) = \max \{ \mu_a(x), \mu_b(x) \} \quad (II-16)$$

On constate que la logique classique est un cas particulier de la logique floue.

Autrement dit, la logique floue est une extension de la logique classique.

II.4.1.5. Régulateur flou

Le schéma synoptique général d'un système flou est illustré par la figure (II.16). Quel que soit le type d'application, on retrouve généralement la même configuration répartie en quatre blocs :

- Une interface de fuzzification à l'entrée.
- Une base de règles.
- Un mécanisme d'inférence.
- Une interface de défuzzification à la sortie.

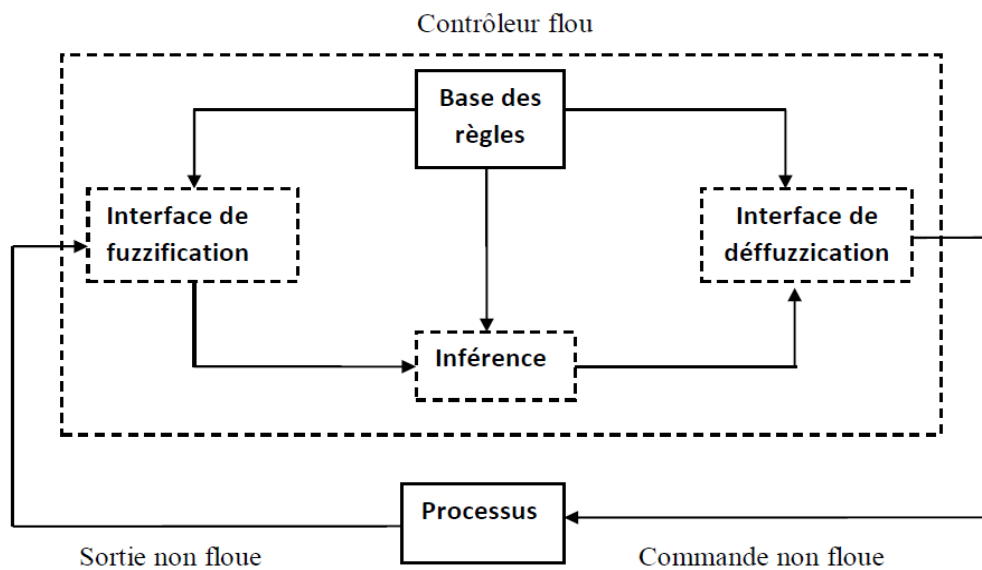


Figure (II.16) : Configuration générale d'un système flou.

A. Fuzzification

L'opération de fuzzification permet d'assurer le passage des grandeurs physiques à l'entrée du régulateur flou en variables linguistiques qui peuvent être traitées par le mécanisme d'inférence. Il s'agit de calculer les degrés d'appartenance des variables d'entrée aux sous-ensembles qui leur sont associés. Par exemple, si la valeur courante de la variable d'entrée vitesse est de 1700 (tr/min), le degré d'appartenance au sous ensemble « petite » est égal à 0.4 (voir figure II.17) :

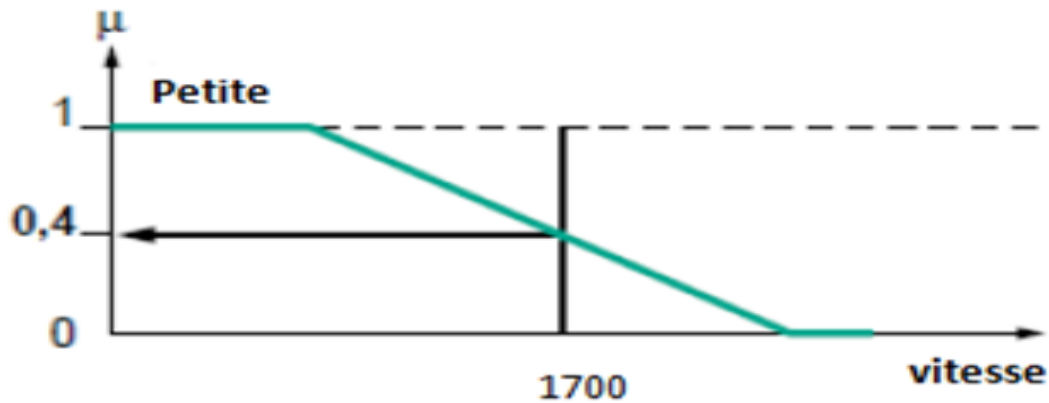


Figure (II.17) : Fuzzification en utilisant un seul sous-ensemble flou.

B. Base de règles

Une règle floue peut être définie comme étant l'ensemble d'implications. Elle exprime le lien entre les variables linguistiques d'entrée et celles de la sortie. La forme typique d'une règle floue est :

Si <Conditions liées par des opérateurs flous> **Alors** <Action >

La première partie (conditions de la règle) teste la validité de certaines conditions, et la deuxième (conclusion de la règle) exprime la réaction souhaitée en fonction de la validité de la première partie.

On peut écrire les règles d'inférence sous forme d'une matrice appelée Matrice d'inférence. A titre d'exemple, si on considère un contrôleur flou à deux entrées (x et y) et une seule sortie (z), caractérisées par cinq ensembles flous { **NG**: Négatif Grand, **NP** : Négatif Petit, **ZE** : Zéro, **PP** : Positif Petit, **PG**: Positif Grand.

C. Mécanisme d'inférence

C'est la logique de prise de décision, elle est capable de simuler la prise de décision de l'être humain et consiste d'une part à calculer le degré de vérité des différentes règles du système et d'autre part à associer à chacune de ces règles une valeur de sortie. Cette valeur de sortie dépend de la partie conclusion des règles qui peut prendre plusieurs formes. Il peut s'agir d'une proposition floue et on utilise en général l'une des trois méthodes suivantes :

- Méthode d'inférence Max-Min (Méthode de Mamdani)
- Méthode d'inférence Max-Produit (Méthode de Larsen)
- Méthode d'inférence Somme-Produit (Sugeno).

D. Défuzzification

Cette étape sert à convertir la conclusion résultante du le mécanisme d'inférence en une variable physique applicable sur le système à commander. Plusieurs méthodes ont été proposées, parmi elles on distingue :

- **Méthode du maximum**

La méthode la plus simple et la plus approximative. La sortie correspond à l'abscisse du maximum de la fonction d'appartenance résultante.

- **Méthode de la moyenne des maxima**

Elle permet de considérer la moyenne des abscisses des maximums de la fonction résultante.

- **Méthode du centre de gravité**

C'est la méthode la plus utilisée. Son principe est l'extraction barycentrique de la commande, qui consiste à faire la moyenne des valeurs du référentiel pondérées par leurs degrés d'appartenance.

II.4.6. Exemple d'application du contrôleur flou pour la commande MPPT

A. La Fuzzification

À partir de la relation de point de puissance maximal ($\Delta P/\Delta V = 0$) le contrôleur flou possède deux entres la première sera la variation de la puissance par rapport à la tension nommée l'erreur E , la deuxième est la variation ΔE qui représente le sens et la vitesse de convergence. En sortie ΔD qui est la variation du rapport cyclique du convertisseur.

Les deux entres de contrôleur sont définies par les équations suivantes:

$$\mu_c(x) = \max \{ \mu_a(x), \mu_b(x) \} \quad (\text{II-17})$$

$$\Delta E(f) = E(f) - E(f - 1) \quad (\text{II-18})$$

Chapitre II Les techniques de poursuite du point de puissances maximale

Les variables d'entrées E et CE sont définies par les termes linguistiques, Négatif

Grand (NG), Erreur nulle ou bien Zéro (EZ), Positif Grand (PG).

La variable de sortie D partitionne' en plusieurs classes pour plus de précision, Négatif Petit (NP), Négatif Grand (NG), Erreur nul ou bien Zéro (EZ), Positif Grand (PG), Positif Petit (PP).

La figure suivante montre l'interface d'accueil du fichier FIS:

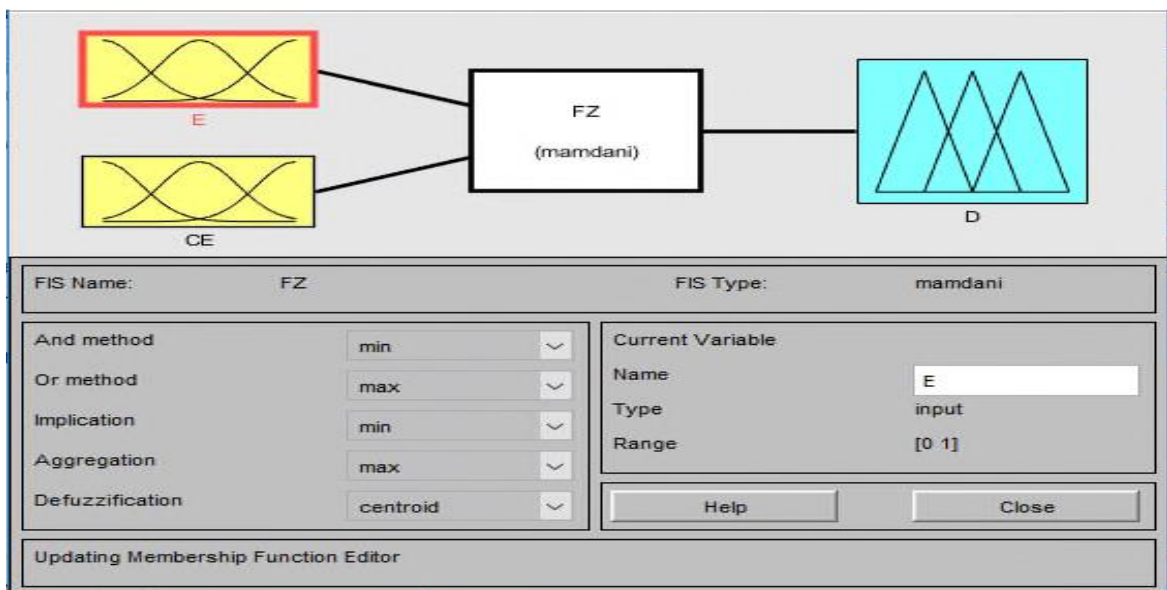


Figure (II.18) : Editeur de fichier FIS.

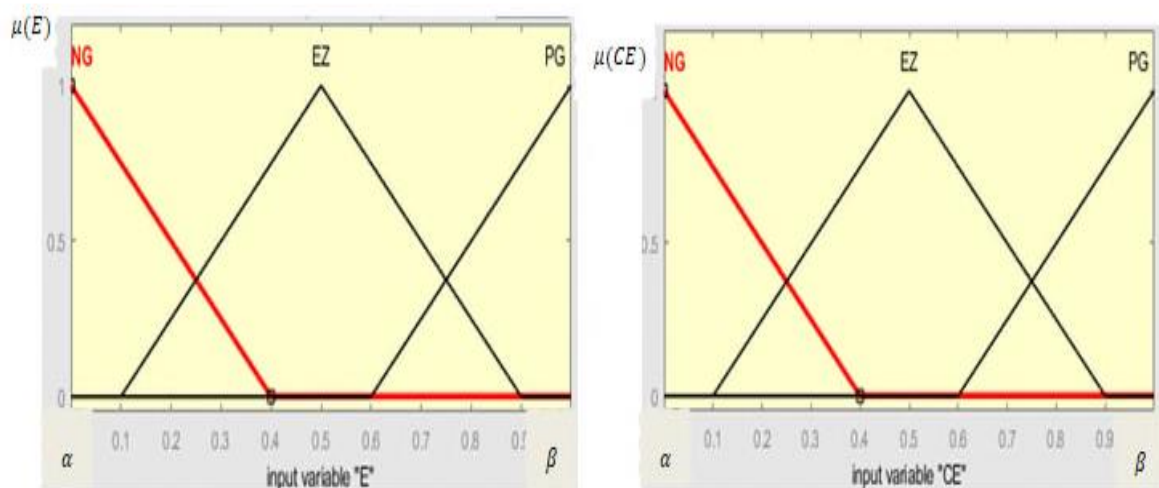


Figure (II.19) : Fonction d'appartenance pour les entrées E et CE .

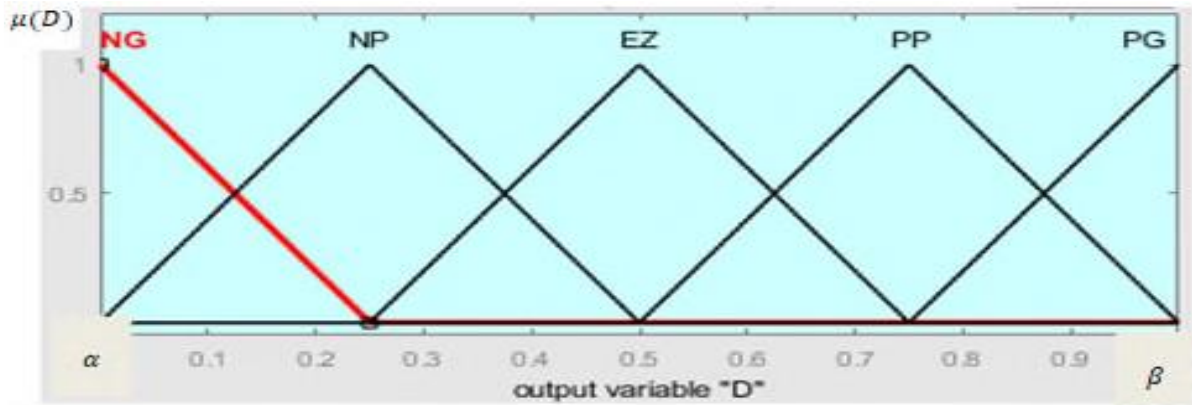


Figure (II.20) : Fonction d'appartenance pour la sortie D.

Avec $[D, \beta]$: Intervalle de variation des variables d'entrées et de sortie.

$\mu(E)$: Fonction d'appartenance de la variable E.

$\mu(CE)$: Fonction d'appartenance de la variable CE.

$\mu(D)$: Fonction d'appartenance de D.

B. Inférence

Consiste à définir un rapport logique entre les entrées et la sortie, utilisant des règles de type IF...AND... THEN, par exemple :

IF E est Positif Grand AND CE est Zéro THEN D est Positif Grand.

Ce qui veut dire que :

"Si le point de fonctionnement est loin du point de puissance maximale (MPP), vers l'écôté gauche, et le changement de la pente de la courbe P(V) est environ de Zéro ; Alors en augment le rapport cyclique largement pour atteindre le MPP [10].

La figure suivante montre le principe de MPPT avec la logique floue :

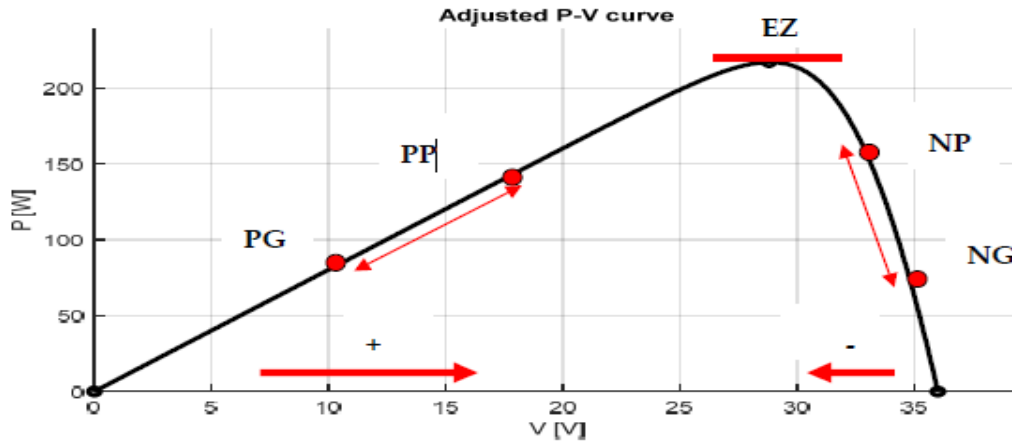


Figure (II.21) : Principe de MPPT floue.

Pour les différentes méthodes d'inférence, la méthode MAX-MIN c'est la méthode la plus couramment utilisée pour cette commande, elle consiste à utiliser l'opérateur MIN pour ET et l'opérateur MAX pour OU.

C. Défuzzification

C'est une étape vers laquelle on attribue pour D des valeurs numériques. Il existe plusieurs méthodes de Défuzzification l'une de ces méthodes les plus utilisées est la méthode de centre de gravité. Son principe est l'extraction barycentrique de la commande, qui consiste à faire la moyenne des valeurs du référentiel pondérées par leurs degrés d'appartenance.

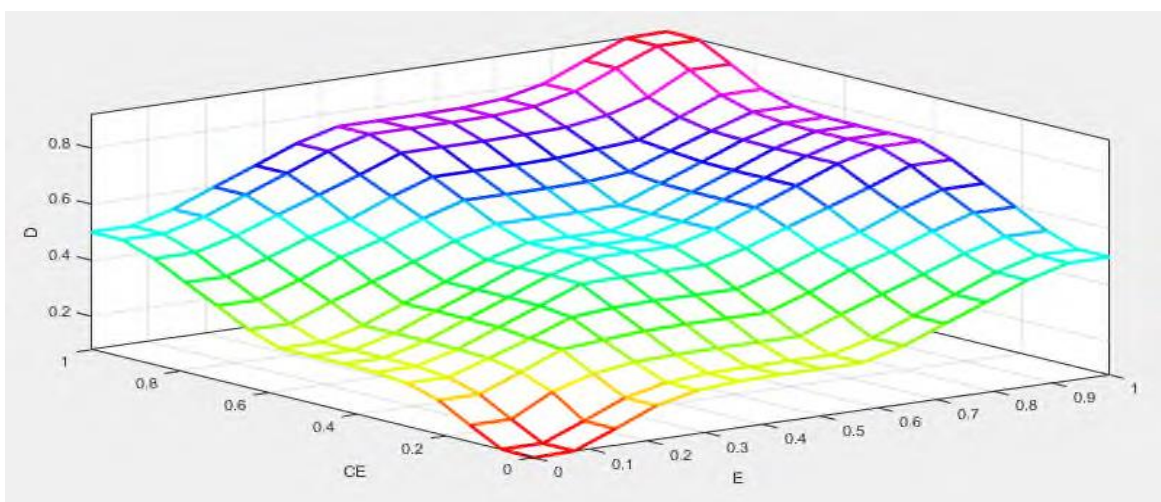


Figure (II.22) : Surface de la variation des fonctions d'appartenance.

Conclusion

Dans ce chapitre, on a présenté en détail le fonctionnement de la commande MPPT. On a présenté le principe de fonctionnement de la commande P&O, INC et celle basée sur la logique floue. Afin d'évaluer les performances de ces méthodes, dans le chapitre suivant, on va réaliser une étude comparative entre ces différentes techniques et discuter les résultats obtenus.

Chapitre III
Simulation et résultats

Introduction

Nous avons présenté les techniques de commande MPPT dans le chapitre précédent. Ce troisième chapitre est consacré à l’analyse des performances des techniques MPPT présentés précédemment. En fait, une étude comparative entre les trois méthodes PO, INC et logique floue est présentée. Les résultats sont générés et discutés pour différentes conditions climatiques.

III.1. Présentation du module étudié

Le panneau de type ARRAY utilisé pour la simulation est du modèle de cellule à une diode. La figure (III.1) montre ses paramètres.

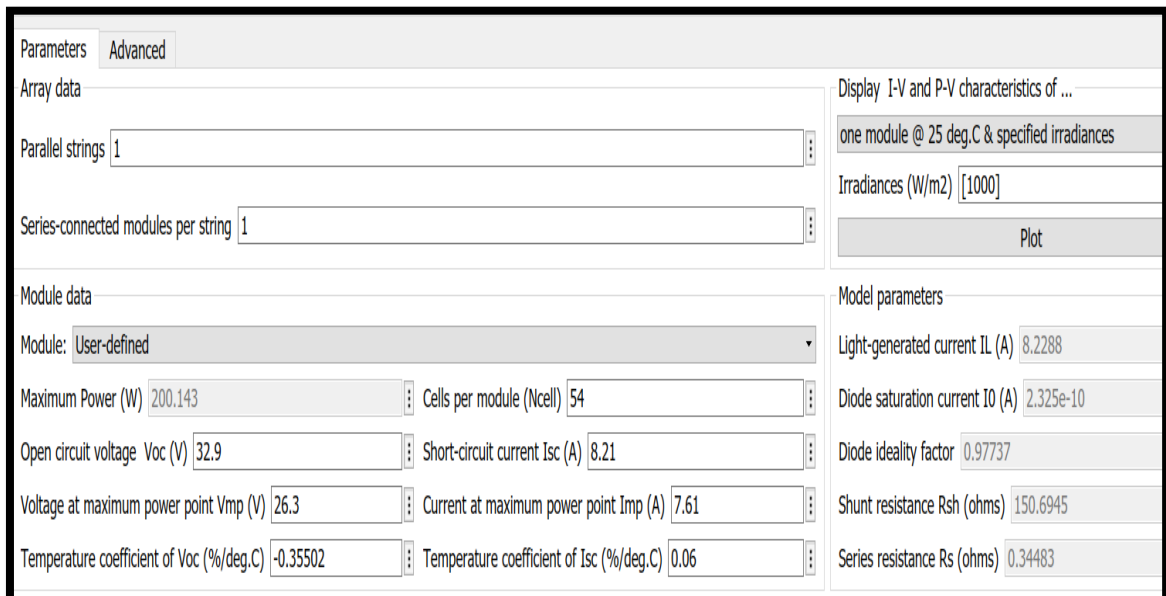


Figure (III.1).paramètres du panneau utilisé.

III.2. Caractéristiques du GPV

On va simuler le générateur PV sous les conditions atmosphériques standards ($E_r=1000W/m^2$, $T= 25^\circ C$)

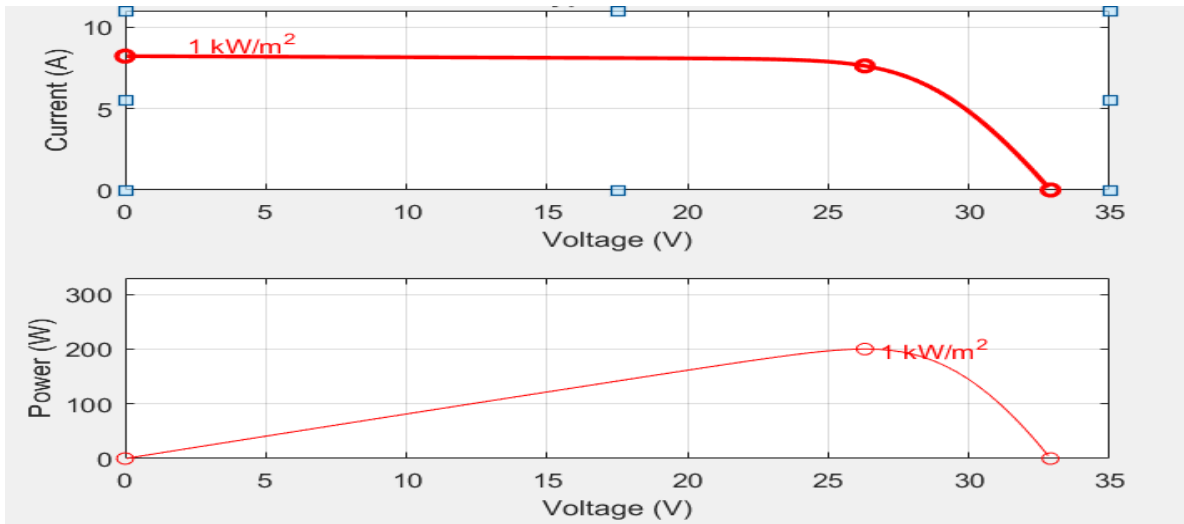


Figure (III.2). Caractéristiques électriques du GPV

(a) : le courant I_{pv}

(b) la puissance P_{pv}

III.2.1. Influence de l'éclairement

On va fixer la température à $T=25^{\circ}\text{C}$ et on fait varier l'éclairement. La figure III.3 présente le courant I_{pv} et la puissance P_{pv} .

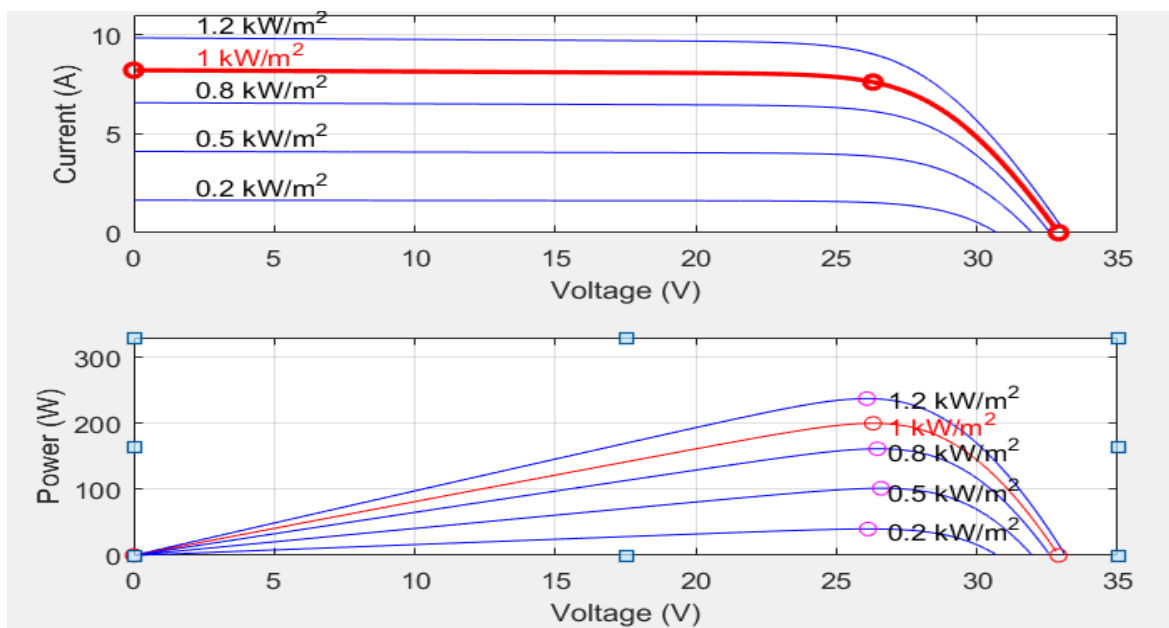


Figure (III.3). Caractéristiques électriques du GPV en variant l'éclairement

III.2.2. Influence de la température

On va fixer l'éclairement à $E_r=1000\text{W/m}^2$, et on fait varier la température. La figure III.4 présente le courant I_{pv} et la puissance P_{pv} .

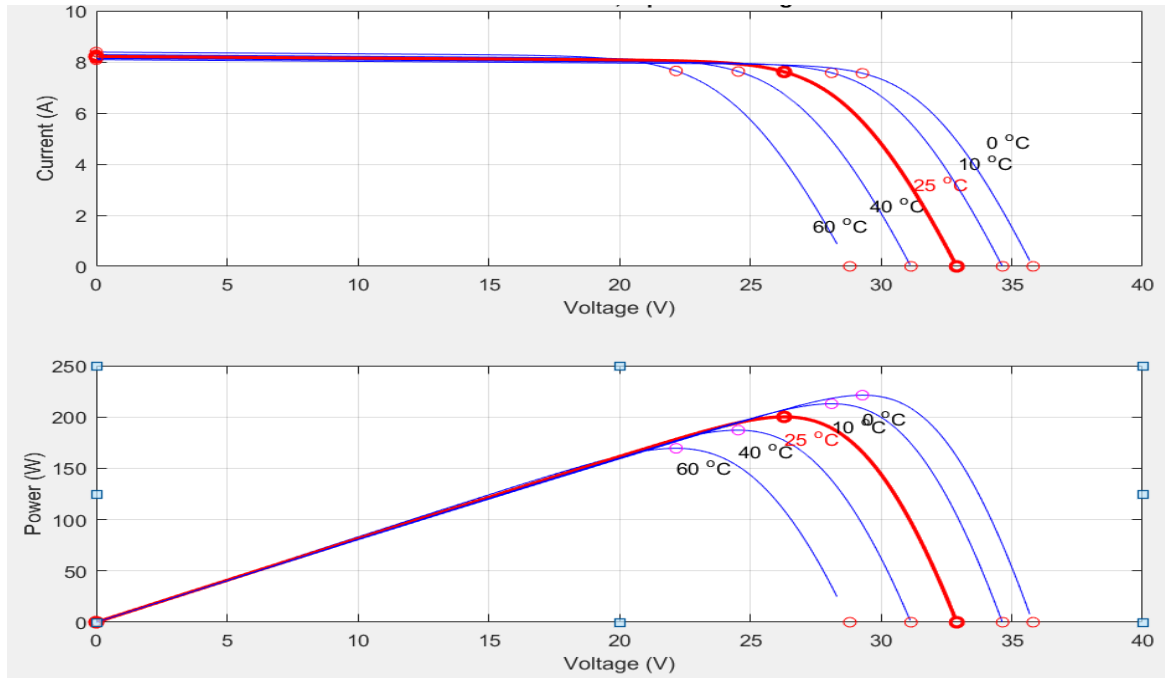


Figure (III.4). Caractéristiques électriques du GPV en variant la température

III.3. Résultats et discussion

Le système photovoltaïque est constitué de quatre blocs. Le premier bloc représente la source d'énergie (panneau photovoltaïque), le deuxième bloc est un convertisseur statique DC-DC appelé « Hacheur », le troisième bloc représente la charge et le quatrième bloc représente le système de commande.

III.4. Simulation du système avec la commande P&O

Pour la première simulation, on l'a fait pour des conditions STC et la deuxième on l'a fait pour une température maintenue à une valeur constante de 25°C et un éclairement variable E_r [0 400 800 1000 1200].

La figure (III.5) illustre le bloc schématique de SIMULINK du système photovoltaïque adapté par la commande MPPT « perturbation et observation » :

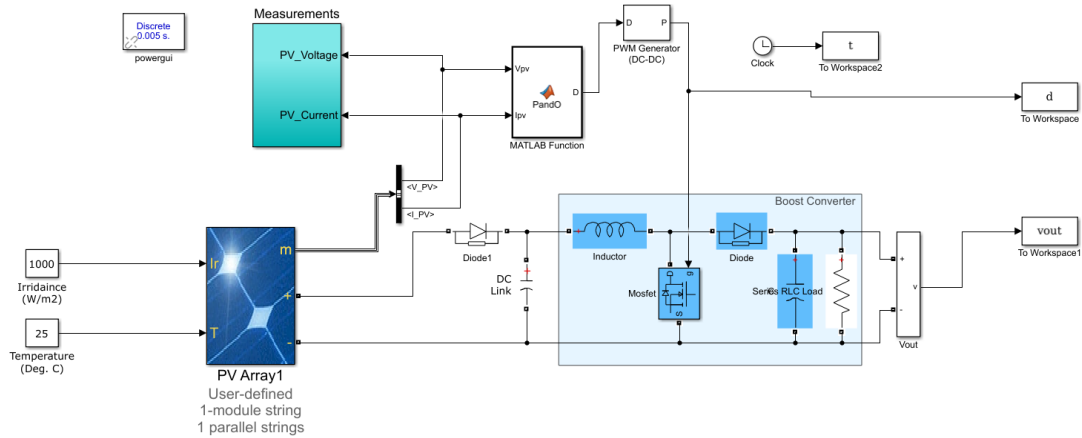


Figure (III.5). Schéma MATLAB SIMULINK d'un système photovoltaïque avec la commande MPPT (P&O)

Les résultats obtenus sont illustrés respectivement figure (III.6.III.7) et figure (III.8)

▪ Rapport cyclique (0.000125) :

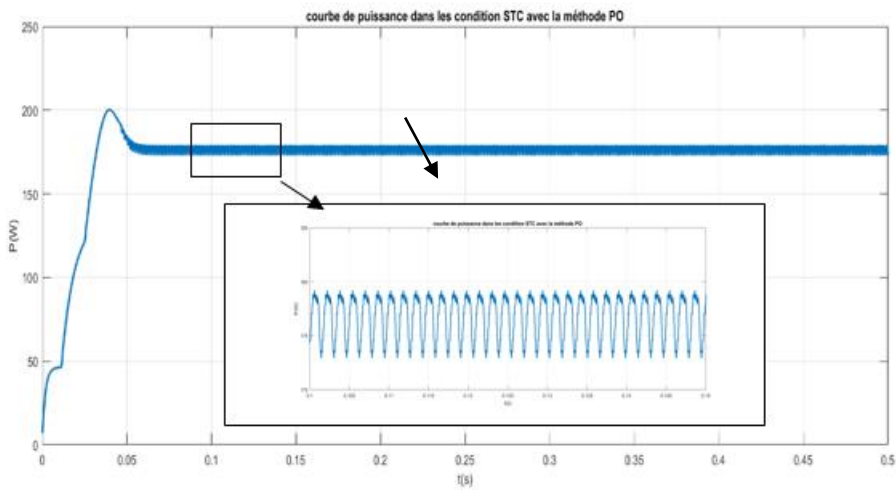


Figure (III.6). Courbe de puissance du module PV dans les conditions STC pour un rapport cyclique de 0.000125

▪ **Rapport cyclique (0.01) :**

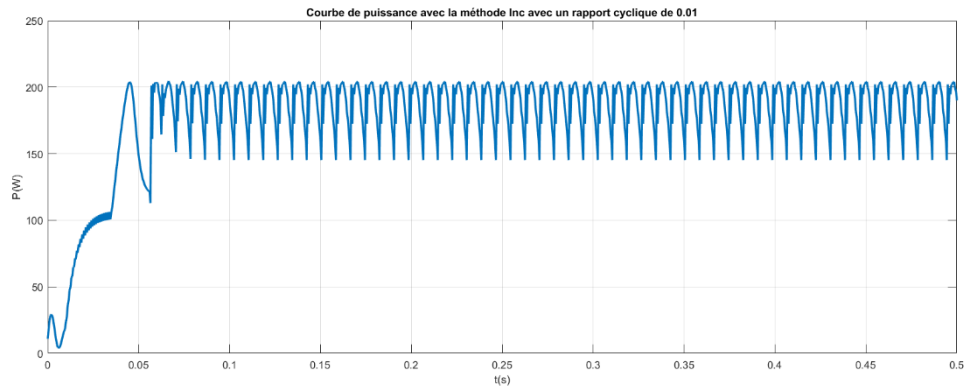


Figure (III.7) courbe de puissance du module PV dans les conditions STC pour un rapport cyclique de 0.01

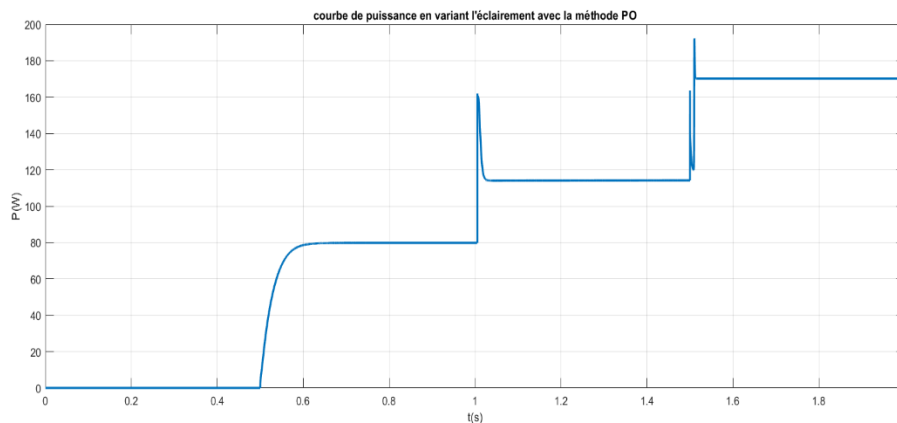


Figure (III.8) Courbe de puissance du module PV avec un éclairage variable en fonction du temps

Le but de cette simulation est d'observer la réaction du système face aux changements climatiques. On remarque que le système répond aux changements instantanés de l'éclairement, converge le plus rapide possible pour atteindre le PPM. On voit aussi que la variation du pas d'incrément ΔD influe sur les oscillations autour du point de puissance maximale (PPM).

III.5. Simulation du système avec la commande Inc-Cond

On remplace la commande P&O par la commande Inc-Cond (voir figure III.9). La simulation est faite dans les conditions STC (la figure III.10 montre le résultat) et en variant l'éclairement, la figure III.12 illustre le résultat de la simulation.

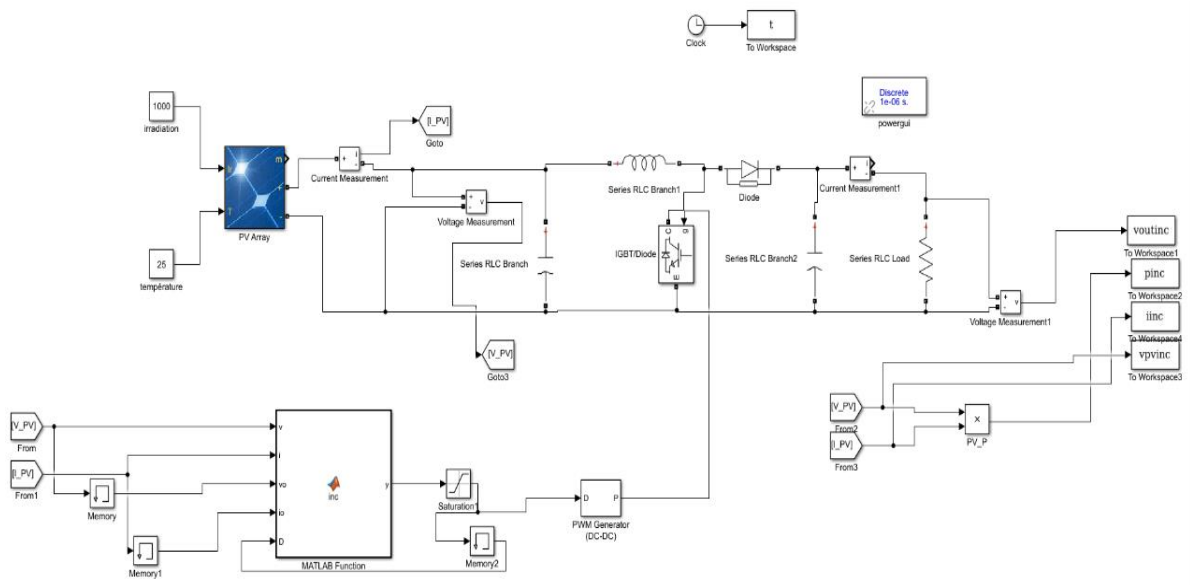


Figure (III.9). Schéma MATLAB SIMULINK d'un système photovoltaïque avec la commande MPPT Inc-Cond.

▪ Rapport cyclique (0.00005) :

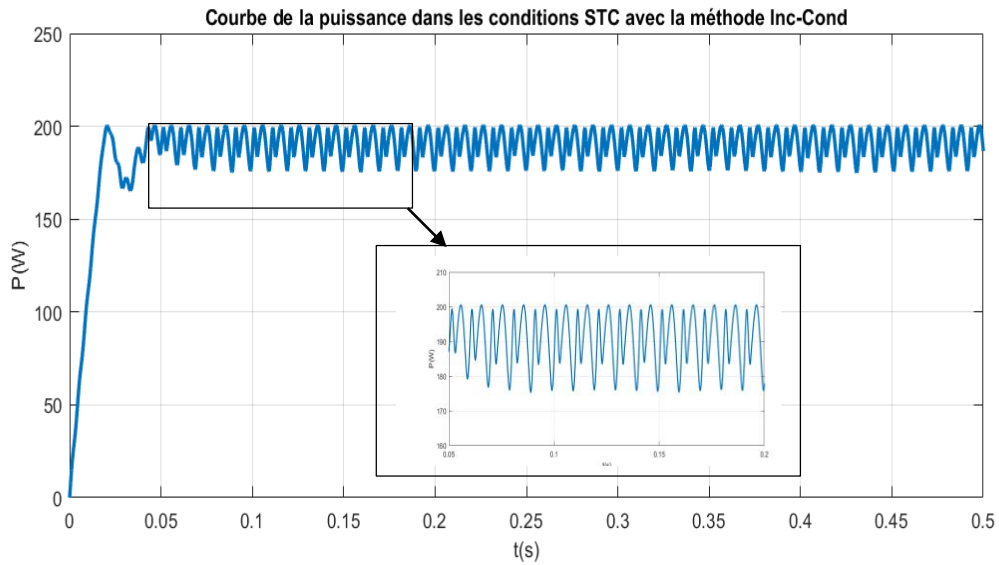


Figure (III.10). Courbe de la puissance de sortie dans les conditions STC pour un rapport cyclique de 0.00005

▪ Rapport cyclique (0.01) :

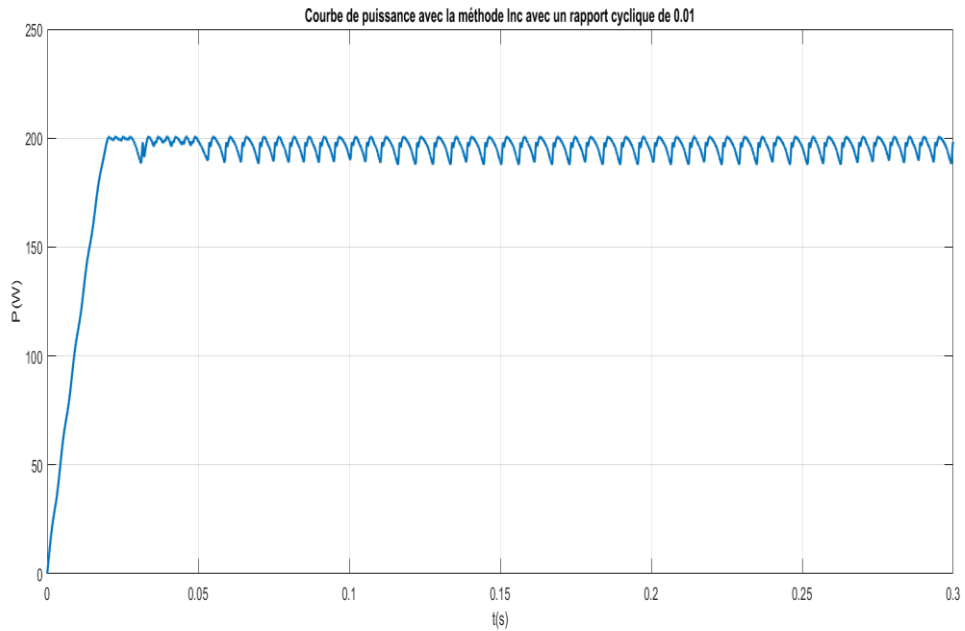


Figure (III.11). Courbe de la puissance de sortie dans les conditions STC pour un rapport cyclique de 0.01

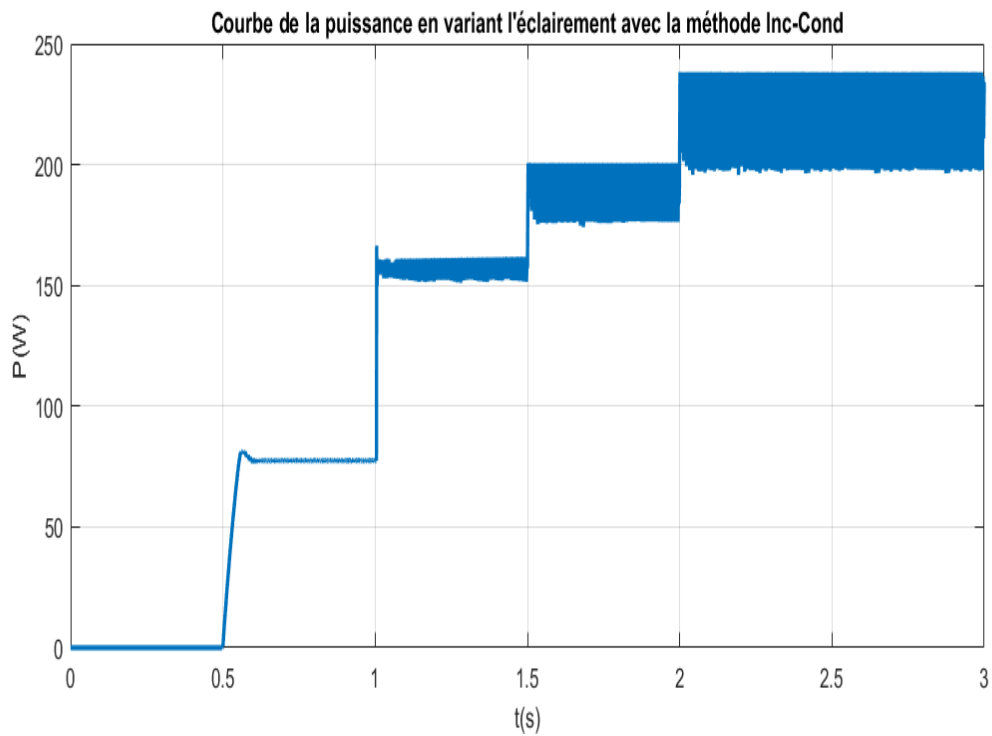


Figure (III.12). courbe de puissance du module PV avec un éclairement variable en fonction du temps

Au régime permanent, On note qu'avec la diminution du pas du rapport cyclique, les oscillations autour du point de puissance maximale diminuent ce qui rend le système plus stable ce qui a permis au système d'exploiter la puissance maximale que le panneau puisse générer.

Aussi, on remarque que la durée du régime transitoire est très faible ce qui confirme la rapidité de l'algorithme de l'incrémental conductance et son efficacité.

III.6. Comparaison entre la méthode P&O et Inc-Cond

On a utilisé le même panneau du système PV pour les deux méthodes, on a constaté qu'elles répondent parfaitement au changement de l'éclairement et de la température.

Avec la méthode Inc-Cond, le système atteint et converge vers la puissance maximale plus rapidement par rapport à la méthode P&O.

Le fonctionnement du système est stable au régime permanent mais ça engendre des pertes, autour du PPM, on note que la méthode Inc-Cond est plus précise que la méthode P&O.

Nous constatons aussi que la méthode P&O est simple et classique mais pour atteindre le PPM la méthode Inc-Cond est plus précise.

III.7. Simulation avec la méthode Floue

Nous allons discuter dans cette partie, l'utilisation de MPPT basée totalement sur la théorie de la logique floue. L'avantage de cette méthode est qu'elle peut fonctionner avec des valeurs d'entrées peu précises et qu'elle n'a pas besoin de modèle mathématique de grande précision. De plus, elle peut traiter des non linéarités.

Dans notre cas, le principe est basé sur deux variables d'entrées qui sont la puissance P_{pv} et le courant I_{pv} et une variable de sortie D qui représente le rapport cyclique servant à piloter le convertisseur statique pour chercher le PPM.

Cette méthode est performante surtout pendant le changement des conditions climatiques. La figure (III.13) représente le schéma synoptique de base de l'algorithme MPPT basé sur la logique floue.

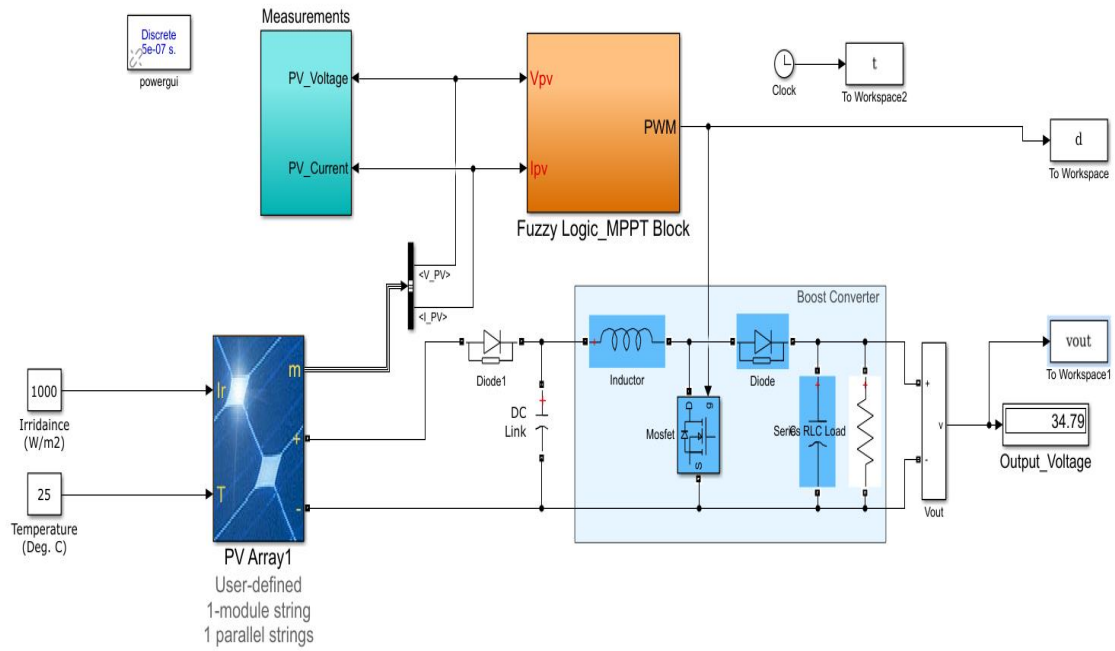


Figure (III.13). Schéma MATLAB SIMULINK avec la commande FLOU.

III.7.1.1. Les fonctions d'appartenances

Pour chaque variable, on a défini cinq fonctions qui sont représentées par des fonctions triangulaires.

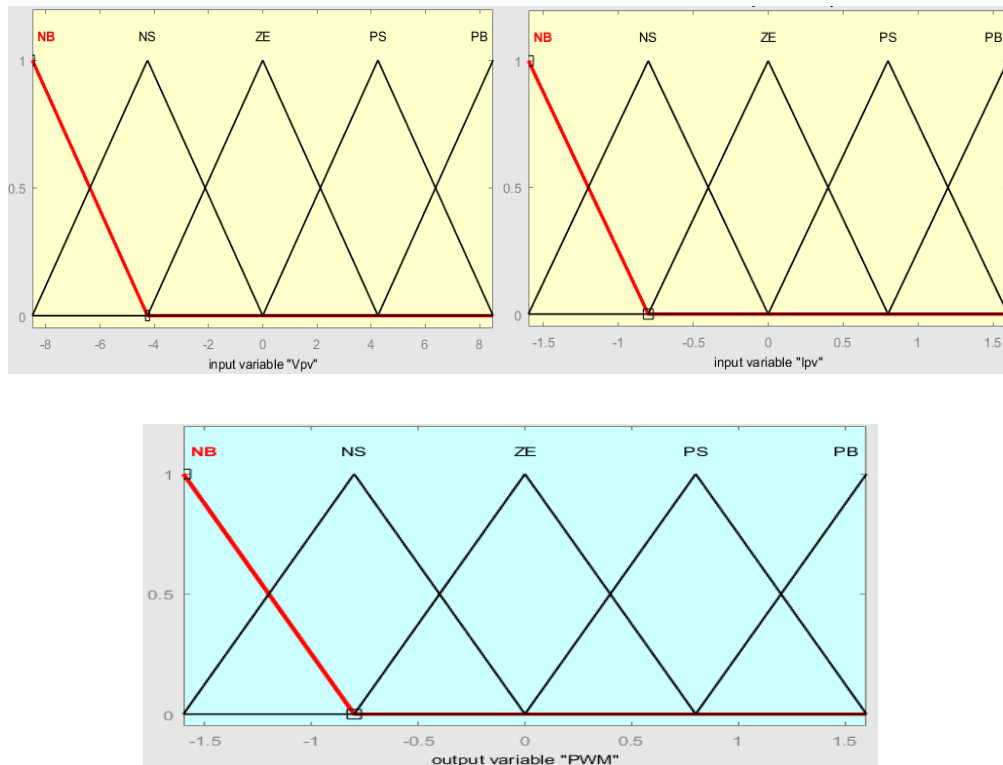


Figure (III.14). La fonction d'appartenance de la logique Flou.

III.7.1.2. Les règles d'inférences

Le tableau suivant montre les règles d'inférences utilisées dans le contrôleur flou

Tableau III.1 : règles d'inférences utilisées dans le contrôleur flou

		<i>E</i>				
		NB	NS	ZE	PS	PB
<i>CE</i>	NB	PB	PS	NB	NS	NS
	NS	PS	PS	NB	NS	NS
	ZE	NS	NS	PB	PB	PB
	PS	NS	PB	PS	NB	PB
	PB	NB	NB	PB	PS	PB

III.7.1.3. Simulation du système commandé par la MPPT FLOU

Après la simulation sous les conditions STC et en variant l'éclairement, l'allure de la puissance de sortie est représentée sur la figure (III.15) et figure (III.16) respectivement.

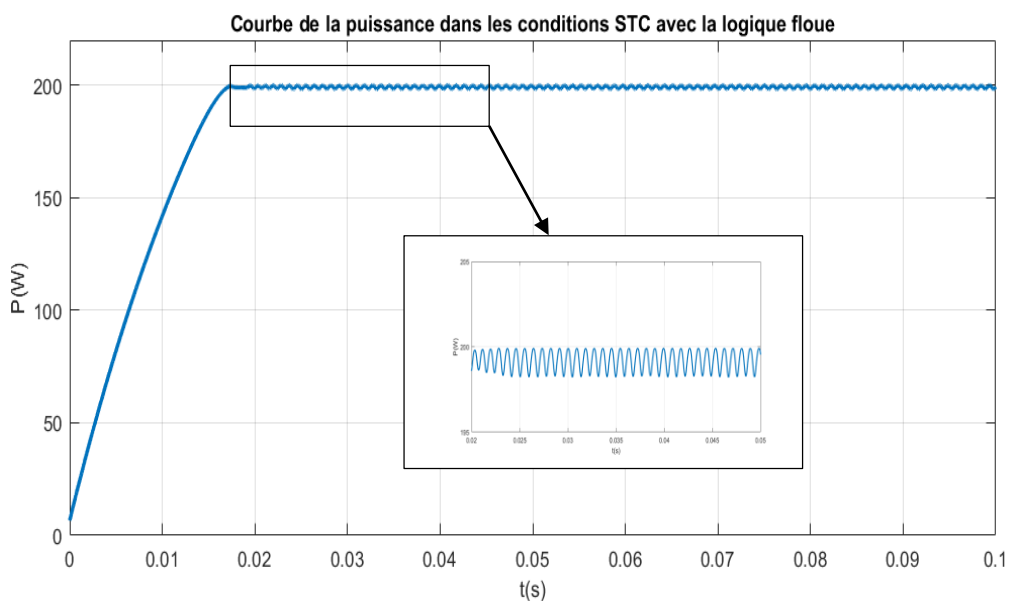


Figure (III.15). Allure de la puissance de sortie dans les conditions STC

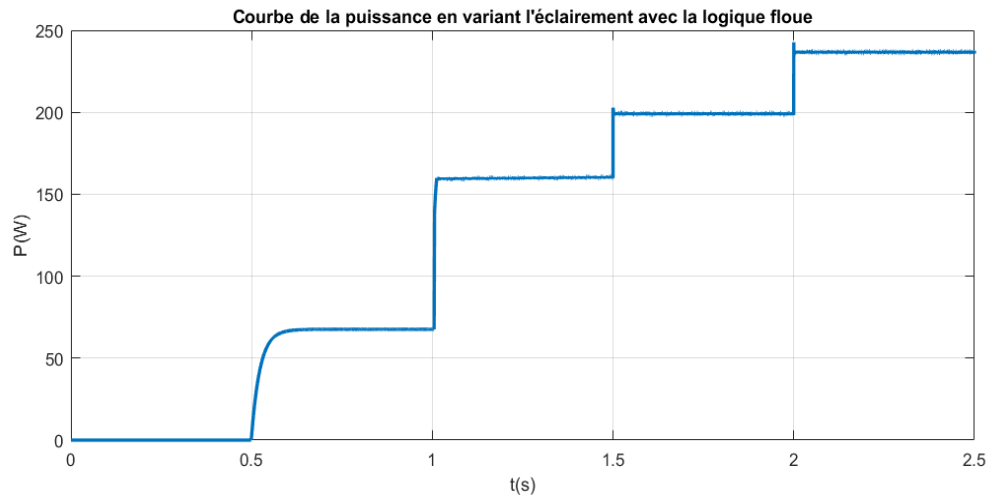


Figure (III.16). Allure de la puissance de sortie en variant E .

On remarque que le système PV arrive à en tirer la puissance max du panneau. Par rapport aux algorithmes P&O et Inc-Cond, on remarque que le temps de réponse est plus rapide avec cette technique ainsi que les oscillations sont beaucoup moins importantes, ce qui offre une stabilité au système.

III.7.1.4. Conclusion sur résultats de la technique MPPT Flou par rapport aux résultats de la commande P&O et Inc-Cond

Les résultats obtenus sur les figures précédentes (IV.16), montrent que la commande MPPT basée sur la logique Flou répond parfaitement aux caractéristiques du panneau. La puissance de sortie est 199.3 w (la valeur P_{pv} max du panneau utilisé est 200.14 w).

La commande basée sur la logique Flou est précise, le temps de réponse est plus rapide par rapport aux autres méthodes (P&O et Inc-Cond) car son algorithme est plus robuste et efficace pour tirer le point de puissance maximal.

Cet algorithme fonctionne au point optimal sans oscillations, en outre, il est caractérisé par un bon comportement au régime transitoire.

Cependant l'implémentation de ce type d'algorithmes est plus complexe que les algorithmes classiques, de plus cette technique dépend du tableau d'inférences et du choix des fonctions d'appartenance. Il nécessite un expert pour paramétrer l'algorithme.

La difficulté de choisir des paramètres flous nous a permis de chercher une solution pour résoudre le problème, on s'est alors orienté vers l'utilisation des algorithmes compacts pour essayer de trouver de meilleurs paramètres.

Conclusion

Dans ce chapitre, on a modélisé et simulé trois techniques MPPT dans un système photovoltaïque. Pour chaque technique on a simulé le panneau sous les conditions STC on premier lieu et en variant l'éclairement en deuxième.

On a présenté les résultats des simulations pour démontrer le rôle des trois techniques MPPT (la commande P&O, la commande Inc-Cond et la commande basée sur la logique Flou).

Ces techniques ont donné des résultats satisfaisants. Néanmoins la MPPT Flou présente des résultats meilleurs en temps de réponse, en absence des oscillations et en stabilité du système. Elle ne nous fournit pas toute la puissance maximale que le panneau peut générer mais elle reste beaucoup plus efficace et précise.

Chapitre IV
Optimisation du
contrôleur flou avec une
approche compact

Introduction

Afin d’augmenter le rendement des panneaux solaires, des techniques plus robustes ont été associées à la commande MPPT tels que les algorithmes génétiques, les algorithmes évolutionnaires et l’algorithme des d’optimisation des essaims de particules (PSO). La recherche sur les algorithmes dédiés à la commande MPPT ne cesse d’évoluer. Les chercheurs tentent de s’inspirer de la nature pour améliorer les performances et le rendement des panneaux photovoltaïques. A la limite des connaissances des auteurs de travail, les algorithmes compacts n’ont pas encore été appliqués pour améliorer les performances de la commande floue MPPT.

Ce chapitre présente l’optimisation du contrôleur flou précédemment conçu par un algorithme compact. Ceci en vue d’améliorer ses performances et de maximiser l’énergie produite. Les résultats obtenus montrent l’efficacité de notre approche.

IV.1. Optimisation compact

Les algorithmes compacts ont été conçus dans l’objectif de réduire les capacités de calcul que nécessite un algorithme basé sur une population. L’idée de base de cette méthode consiste à utiliser une population compactée : d’où le nom des algorithmes compacts. La population est remplacée par une fonction de distribution [22].

IV.1.1. Compacter une population ou un essaim

Compacter une population revient à la représenter par une fonction de distribution appelée PDF pour probability density function [23,24].

$$PDF(\mu[i], \sigma[i]) = \frac{e^{-\frac{(x-\mu[i])^2}{2\sigma[i]^2}} \sqrt{\frac{2}{\pi}}}{\sigma[i](erf(\frac{\mu[i]+1}{\sqrt{2}\sigma[i]})-erf(\frac{\mu[i]-1}{\sqrt{2}\sigma[i]}))} \tag{IV.1}$$

La PDF est définie pour chaque variable du problème. Si le problème a D dimensions, le PDF aussi aura D dimension. Une PDF est définie par sa moyenne (μ) et sa déviation standard (σ). Donc, la population se trouve représentée par un vecteur de probabilité appelée PVt.

$$PV^t = [\mu^t, \sigma^t] \tag{IV.2}$$

IV.1.2. Générer un individu dans une population compactée

Afin d'échantillonner un individu, d'abord la fonction de distribution cumulative correspondante (CDF). Comme le Co-domaine de CDF est [0, 1], afin d'échantillonner un gène (variable décisionnel) donné $x [i]$ de PV, un nombre aléatoire uniforme $rand(0,1)$ est généré, la fonction inverse de CDF, correspondant à $rand(0, 1)$, est ensuite calculé [23]. Cette valeur, notée $xr [i]$, doit être convertie dans l'espace de recherche $[a, b]$ en utilisant la formule

$$x[i] = (b - a) \frac{xr[i]+1}{2} + a \tag{IV.3}$$

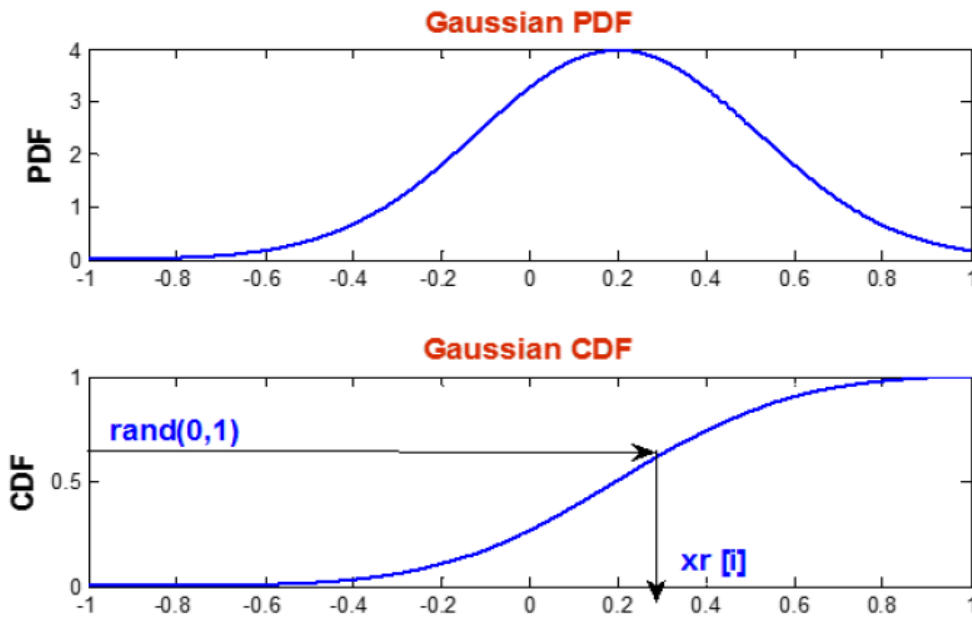


Figure (IV.1) : Génération d'une variable de décision (gène) à partir de la PDF

IV.1.3. Adaptation de la PDF

Pour adapter la PDF, on génère deux individus et on les compare. On obtient un gagnant (winner) et perdant (loser). En fonction des gènes (des allèles) de ces deux individus, on peut alors adapter la moyenne et la déviation standard de la PDF. Voilà les formules obtenues [24]:

$$\mu^{l+1}[i] = \mu^l[i] + \frac{1}{n}(w[i] - l[i]) \tag{IV.4}$$

$$\sigma^{t+1}[i] = \sqrt{\sigma^t[i]^2 + \mu^t[i]^2 - \mu^{t+1}[i]^2 + \frac{1}{n}(w[i]^2 - l[i]^2)} \tag{IV.5}$$

IV.2. Pseudo-code

La procédure de l’algorithme compact Fuzzy MPPT est illustrée dans l’algorithme suivant et ses paramètres obtenus après plusieurs tests sont donnés dans la figure suivante.

Algorithme : Pseudo-code compact Fuzzy MPPT	
1.	Initialisation de la moyenne de la PDF (μ).
2.	Initialisation de l’écart type de la PDF (σ).
3.	Initialisation de la population $N= 30$.
4.	Initialisation du Min et Max.
5.	$best \leftarrow$ choisi au hasard.
6.	$Fit_best \leftarrow$ évaluer le best.
7.	while condition d’arrêt $==0$ do
8.	$[G1, G2] \leftarrow$ générer la PDF.
9.	$Fit1 \leftarrow$ évaluer G1.
10.	$Fit2 \leftarrow$ évaluer G2.
11.	// Tournoi //
12.	if $Fit1 < Fit2$ then // G meilleur que G2
13.	$W=G1;$ // winner
14.	$Fit_W=Fit1;$
15.	$L=G2;$ // Looser
16.	$Fit_L=Fit2;$
17.	else // G2 meilleur que G1

```

18.          W=G2;

19.          Fit_W=Fit2;

20.          L=G1;

21.          Fit_L=Fit1;

22.          end if

23.  // Ajustement//

24.   $\mu^{l+1}[i] = \mu^l[i] + \frac{1}{n}(w[i] - l[i])$ 

25.   $\sigma^{t+1}[i] = \sqrt{\sigma^t[i]^2 + \mu^t[i]^2 - \mu^{t+1}[i]^2 + \frac{1}{n}(w[i]^2 - l[i]^2)}$ 

26.  Actualisation du best ;

27.  if Fit_Wis better thenFit_bestdo

28.      best  $\leftarrow$  W ;

29.      Fit_best $\leftarrow$ Fit_W ;

30.  endif

31. endwhile

32. Afficher le best.

```

Figure(IV.2) Pseudocode de l'algorithme utilisé.

L'algorithme compact Fuzzy MPPT peut être résumé comme suite :

➤ **Génération de deux individus:**

A chaque itération, deux individus notés G1 et G2 sont échantillonnés à partir de la population virtuelle. Chaque individu contient les points qui définissent les fonctions d'appartenance des entrées E, CE et de la sortie D du contrôleur flou. Ces dernières sont réparties en 5 variables linguistiques (voir chapitre III). Chaque fonction est triangulaire, donc chacune est définie par trois valeurs (3 points). Chaque individu est alors défini par 45 paramètres (15 paramètres pour E, 15 paramètres pour CE, et 15 paramètres pour D)

➤ **Evaluation**

L'algorithme évalue la fitness des deux individus G1 et G2. La fonction fitness est définie comme la valeur absolue de la différence entre la valeur moyenne de la puissance fournie par le GPV et PPM.

➤ **Tournoi**

Une sélection entre les deux individus selon leur fitness désignera le meilleur individu W et le mauvais L.

➤ **Mise à jour de la moyenne et d'écart type**

La moyenne et l'écart type sont ajustés Suivant les équations (IV.4 et IV. 5).

➤ **Actualisation du best**

Le best reçoit le gagnant et la fit best reçoit la fitness du gagnant.

Les paramètres de l'algorithme compact Fuzzy MPPT sont présentés dans le tableau IV.1:

Tableau IV.1: Les paramètres de l'algorithme compact.

Paramètre	Description	Valeur
N	Nombre d'individus	90
D	Dimension du problème	45
Max	Borne maximale de l'espace de recherche	Un vecteur de 30 colonnes
Min	Borne minimale de l'espace de recherche	Un vecteur de 30 colonnes
PM	Puissance du panneau	200.143 W
K	Nombre d'étirassions	600

IV.3. Résultats obtenus

IV.3.1. Evolution de la Fit best

La figure (IV.3) montre l'évolution de la fitness du meilleur contrôleur en fonction des itérations sur l'échelle logarithmique.

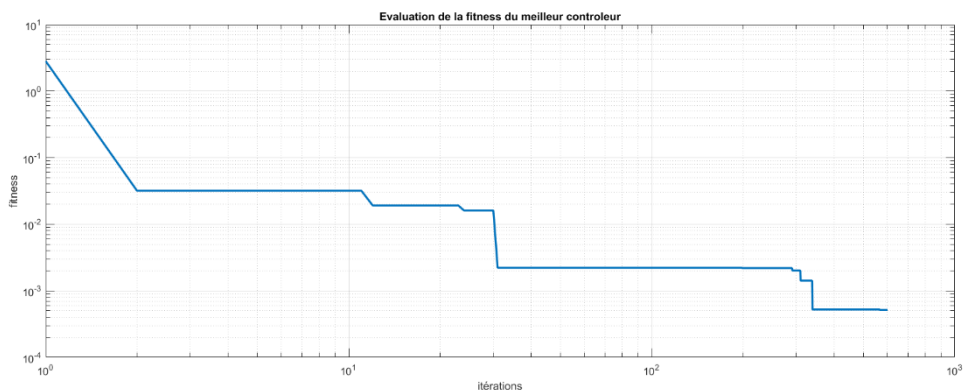


Figure (IV.3) Evolution de la fitness du meilleur contrôleur

La meilleure fitness obtenue est de 5.1698×10^{-4} .

IV.3.2. Contrôleur flou optimisé

La figure (IV.4) montre les fonctions d'appartenance des entrées Vpv et Ipv et de la sortie PWM obtenues par le contrôleur flou optimisé suivant l'algorithme compact.

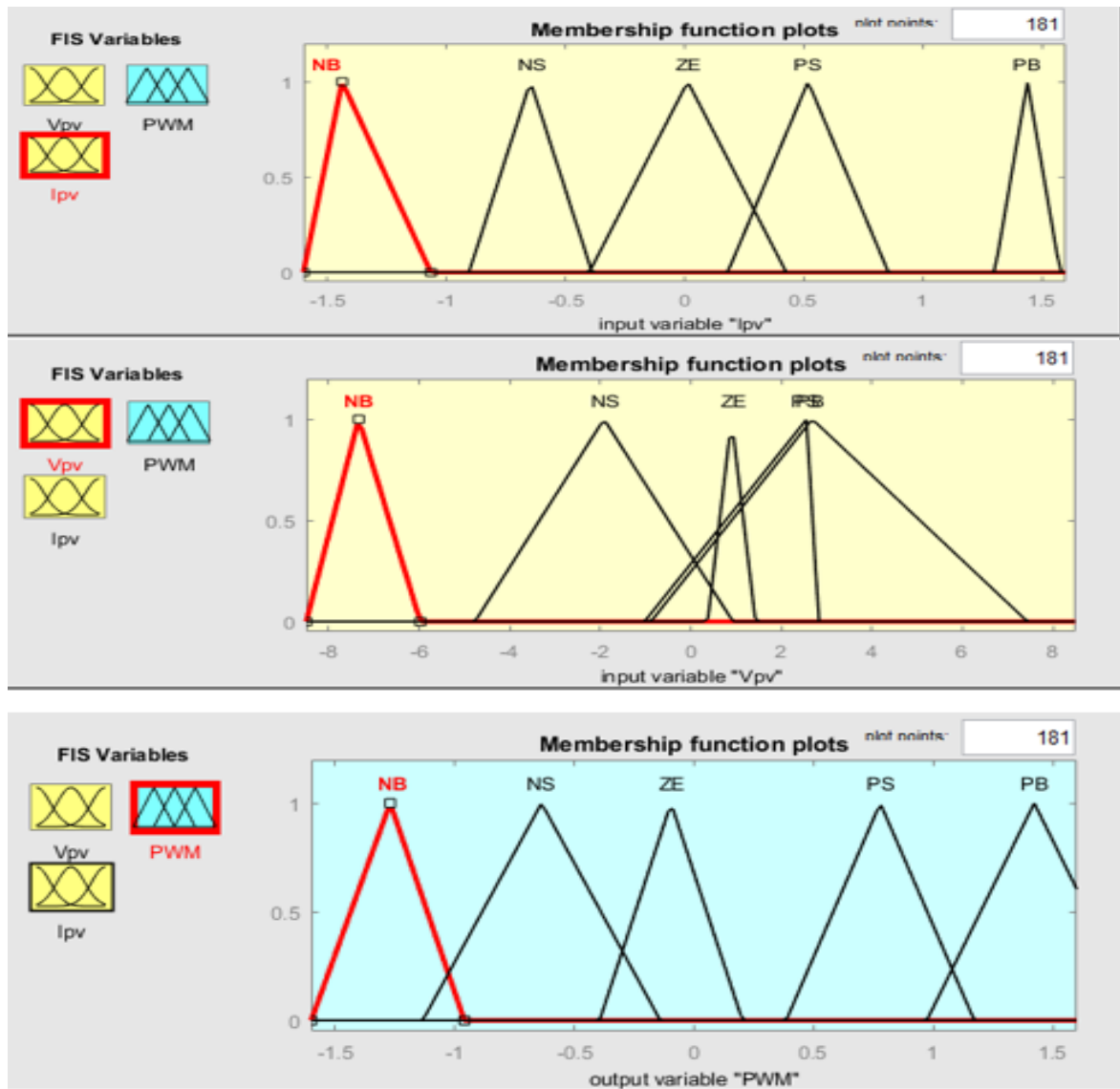


Figure (IV.4) : Fonctions d'appartenances des entrées et sortie du contrôleur optimisé.

Le tableau suivant montre les règles d'inférences obtenues après optimisation

Tableau IV.2 : Les règles d'inférence du contrôleur flou optimisé

		<i>E</i>				
		NB	NS	ZE	PS	PB
<i>CE</i>	NB	PB	PS	NB	NS	NS
	NS	PS	PS	NB	NS	NS
	ZE	NS	NS	PB	PB	PB
	PS	NS	PB	PS	NB	PB
	PB	NB	NB	PB	PS	PB

IV.4. Simulation du système commandé par la compact Fuzzy MPPT

Après la simulation sous les conditions STC et en variant l'éclairement, l'allure de la puissance de sortie est représentée sur les figures (IV.6) et (IV.7) respectivement.

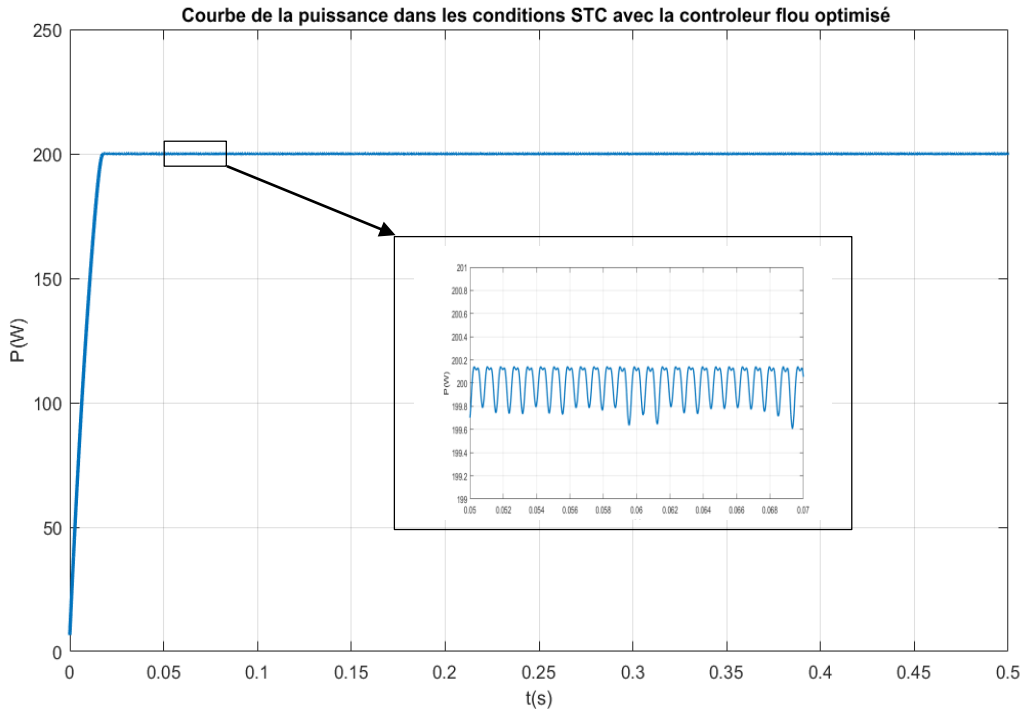


Figure (IV.5) : Allure de la puissance de sortie dans les conditions STC

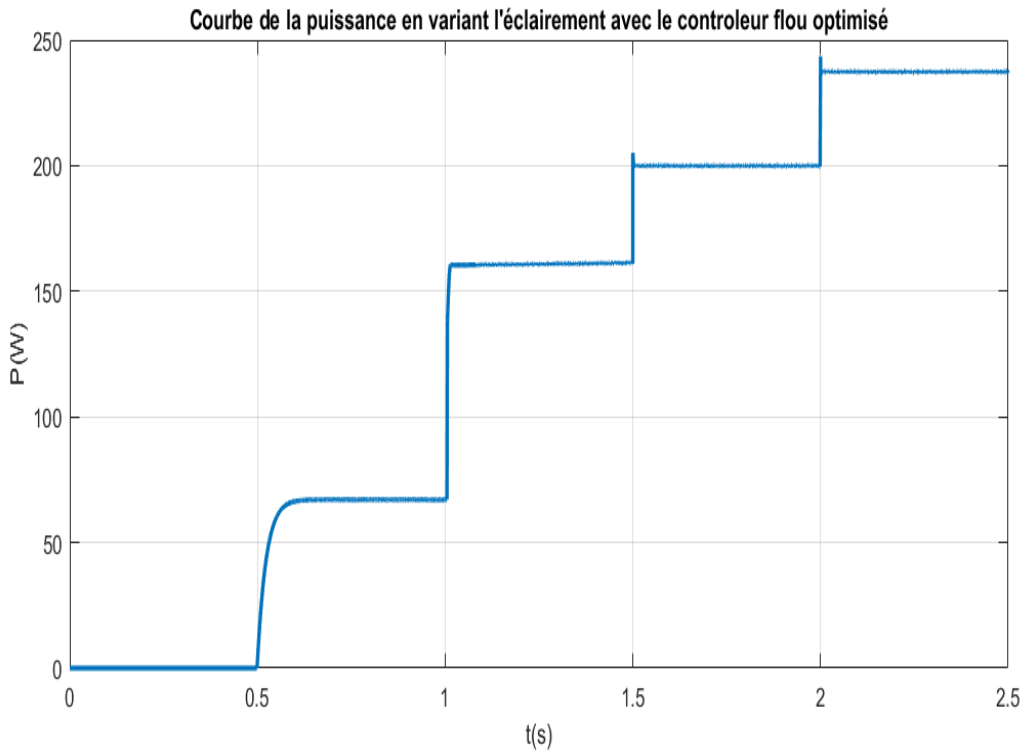


Figure (IV.6) Allure de la puissance de sortie en variant E

On remarque que grâce au contrôleur flou optimisé le système arrive à tirer la puissance maximale. Par rapport à la méthode de la logique floue sans optimisation, on remarque que le temps de réponse est plus rapide avec cette technique ainsi que les oscillations sont beaucoup moins importantes, ce qui offre une stabilité au système.

Conclusion

Dans ce dernier chapitre, un contrôleur flou a été conçu afin d'en tirer la puissance maximale du panneau photovoltaïque. Ce contrôleur est obtenu par un algorithme compact. Cet algorithme peut être classé dans la famille des algorithmes évolutionnaires. Sa particularité réside dans l'utilisation d'une fonction de distribution à la place d'une population.

Cette approche permet donc de minimiser les capacités de calcul et de mémoire requises pour optimiser un contrôleur MPPT basé sur la logique floue. Cette étude montre que notre approche est très compétitive et présente de meilleurs résultats.

Conclusion Générale

Conclusion Générale

Ce travail est un mémoire de master réalisé à l'université Abderrahmane Mira de Bejaia destiné à l'obtention du diplôme de master en automatique. Il nous a permis de nous confronter à plusieurs problèmes interdisciplinaires en relation avec l'automatique.

Cette étude concerne l'amélioration des performances et du rendement d'un système photovoltaïque. Il s'agit d'optimiser une commande MPPT à base de logique floue (contrôleur flou) par algorithmes compacts en vue d'améliorer les performances du mécanisme de poursuite du point de puissance maximale en termes de temps de réponse et de robustesse vis-à-vis aux variations des conditions climatiques.

Dans le premier chapitre, nous avons présenté quelques généralités sur la cellule photovoltaïque, élément principal dans un générateur photovoltaïque et sur la modélisation de ce dernier. Nous avons aussi étudié l'effet du changement des conditions climatiques (ensoleillement et température) sur les caractéristiques électriques ($I(V)$ et $P(V)$) du panneau.

Dans le deuxième chapitre, nous avons abordé le problème de poursuite du point de puissance maximale dans les systèmes de conversion photovoltaïque. En premier lieu, nous avons parlé sur le convertisseur statique qui est une pièce clé du système photovoltaïque. En deuxième lieu, Trois techniques très connues ont été détaillées (perturbe et observe, incrémental conductance et logique floue).

Le troisième chapitre est consacré aux résultats obtenus par la simulation des trois techniques. Ceci dit la commande MPPT floue est plus rapide et plus robuste par rapport aux deux premières techniques.

Le dernier chapitre a été consacré à l'optimisation du contrôleur flou. Pour ce fait, une nouvelle approche intelligente et compacte a été appliquée afin de trouver le meilleur contrôleur flou qui permet d'en tirer la puissance maximale du panneau. Le point de force de l'algorithme utilisé vient de fait qu'il nécessite qu'un minimum de mémoire et de capacité de calcul. Les résultats de simulation de notre algorithme ont été comparés aux résultats de la méthode floue, ceci a montré que la commande MPPT floue optimisée par algorithmes compacts est plus rapide et plus robuste.

Conclusion Générale

Enfin, il faut noter que notre étude s'est limitée sur le plan théorique. Cependant on a montré, par simulation, l'intérêt de notre approche compact pour améliorer les performances d'une commande MPPT floue. Il faudrait alors valider ces méthodes sur site réel pour donner un avis définitif.

Perspectives

Plusieurs perspectives sont possibles pour ce mémoire :

- Applications d'autres algorithmes sur les contrôleurs flous (algorithmes génétiques, algorithmes évolutionnaires, compact, swarm intelligence ...)
- Optimisation des contrôleurs flous avec de nouvelles approches.

Étudier en profondeur le cas de l'ombrage partiel.

Liste bibliographie

-
- [1]: A. Halouane, Modélisation du transfert radiatif dans les strates supérieures d'un module photovoltaïque, mémoire de fin d'étude, université de Boumerdas, 2017.
- [2]: Site internet, 'www.cellules_photovoltaïques.odt.com' ,30/04/2019.
- [3]: A. Bentomane, Commande MPPT à base de la logique floue appliquée à un Système Photovoltaïque, mémoire de fin d'étude, université de Tlemcen, 2020.
- [4]: Y. Azzoug, Commande de la charge d'une batterie dans une installation photovoltaïque, mémoire, QUEBEC, février 2008.
- [5]:R.Merahi, Modélisation d'un dispositif mppt pour l'étude de l'augmentation de la puissance produite par les générateurs photovoltaïques, mémoire, Annaba 2010.
- [6]:<https://fr.solar-energia.net/energie-solaire-photovoltaique/cellule-photovoltaique>.
- [7]:Mornay ThomasnVernay Alexis, Volle Marion, Les Cellules photovoltaïque, Classe préparatoire CPE Institution des chartreux, 2004-2005.
- [8]: K.Hellali, Modélisation d'une cellule photovoltaïque : étude comparative, magistère, Université de Tizi-ouzou, 2012.
- [9]: Dreis.H, Larbi.L, M'hand S.Z, 'Synthèse des méthodes de commande MPPT sous ombrage total et partiel', mémoire fin d'étude, université de Béjaia, 2020.
- [10]: Tigrine.C, Ait ouali.W, Etude et simulation des techniques MPPT d'un système photovoltaïque, Université de Béjaia, 2020.
- [11]: D. Boukhers, Optimisation D'un Système D'énergie Photovoltaïque Application Au Pompage, Magister En Electrotechnique, université de Constantine, 2007
- [12]: H.Abbes, H.Abid, K. Loukil, A.Toumi, M.Abid , Etude comparative de cinq algorithmes de commande MPPT pour un système photovoltaïque, *Revue des Energies Renouvelables Vol. 17 N°3 (2014) 435 – 445*, Tunisie.
- [13]: Femia, N., Pétrone, G., Spagnuolo, G., Vitelli, M. (2004). *Optimization of Perturb and Observe Maximum Power Point Tracking Method*. IEEE Transactions On Power Electronics. Vol.20, N. 4, pp. 16-19

-
- [14]: Belkaid, A. (2015). *Conception et implémentation d'une commande MPPT de haute performance pour une chaîne de conversion photovoltaïque autonome* [Thèse de doctorat, Université Ferhat Abbas, Setif]
- [15]: H.ABBES, Etude comparative de cinq algorithmes de commande MPPT pour un système photovoltaïque, Conférence Internationale des Energies Renouvelables (CIER'13), Sousse, Tunisie – 2013.
- [16]: M.Bedrane.Y, Etude comparative entre quelques méthodes de poursuite du point de puissance maximale dans les systèmes photovoltaïques Etude et simulation des techniques MPPT d'un système photovoltaïque, Université de Béjaia, 2013.
- [17] J. Zhijun, H. Shimiao, C. Wenhui, "A New Fuzzy Logic Torque Control Scheme Based on Vector Control and Direct Torque Control for Induction Machine", (ICICIC'08), 2008.
- [18] S. Xi Liu, M. Yu W, Y. Guang Chen, S. Li, "A Novel Fuzzy Direct Torque Control System for Three-level Inverter-fed Induction Machine", International Journal of Automation and Computing, vol. 7, no. 1, pp. 78-85, February 2010.
- [19] W. Pedrycz, "Fuzzy control and fuzzy system", Departement of electrical engineering University of Manitoba Winnipeg, Canada, R.S.P, Taunton, sonerset, England, 1998.
- [20] C.Yuen Won, D.Heon Kim, S.Chan Kim, W.Sam Kim,H.Sung Kim, " A New Maximum Power Point Tracker of Photovoltaic Arrays Using Fuzzy Controller ", *IEEE*, pp 396-403, 19994.
- [21] Chouikhi. W, Réalisation d'une commande buck-boost pour PV, Université de Tlemcen, 2018.
- [22] Tighzert L, Mendil B. CFO: A new compact swarm intelligent algorithm for global optimization and optimal bipedal robots walking. InModelling, Identification and Control (ICMIC), 2016 8th International Conference on 2016 Nov 15 (pp. 487-492). IEEE.
- [23] Tighzert L, Fonlupt C, Mendil B. A set of new compact firefly algorithms. Swarm and evolutionary computation. 2018 Jun 1;40:92-115.
- [24] Tighzert L, Fonlupt C, Mendil B. Towards compact swarm intelligence: a new compact firefly optimisation technique. International journal of computer applications in technology. 2019; 60(2):108-23.

Contribution à l'Optimisation Compacte-Optimisation de la commande MPPT par une approche compact.

Résumé: Ce travail traite de l'application d'une nouvelle approche d'optimisation compacte sur la commande MPPT plus précisément sur le contrôleur MPPT basé sur la logique flou afin d'en tirer la puissance maximale du panneau photovoltaïque. En premier lieu, on s'est intéressé à la modélisation mathématique des panneaux photovoltaïques (PV), ceci nous a permis d'obtenir un modèle exploitable en vue de faire de la commande automatique puis on a présenté l'aspect théorique de trois méthodes pour le suivi du point de fonctionnement à puissance maximale du système photovoltaïque qui sont la méthode « perturbation et observation », la méthode « conductance incrémentale », et la méthode « logique flou ». Après la simulation, une étude comparative entre les trois méthodes a été faite. Les résultats obtenus étaient satisfaisants, néanmoins la MPPT Flou présente des performances meilleures. En deuxième lieu, un contrôleur flou a été optimisé en utilisant une nouvelle approche d'optimisation compacte *compact Fuzzy MPPT*. Le point de force de cette approche vient de fait qu'il nécessite qu'un minimum de mémoire et de capacité de calcul. Les résultats de simulation de notre algorithme ont été comparés avec ceux de la logique floue et ils ont montré que notre approche est très compétitive et présente des résultats meilleurs.

Mots-clés: PV, perturbation et observation, conductance incrémentale, logique flou, MPPT, contrôleur flou, Optimisation compacte, *compact Fuzzy*.

Abstract: This work deals with the application of a new compact optimization approach on the MPPT control more precisely on the MPPT controller based on fuzzy logic in order to derive the maximum power from the photovoltaic panel. In the first place, we were interested in the mathematical modeling of photovoltaic (PV) panels, this allowed us to obtain a usable model for automatic control and then we presented the theoretical aspect of three methods for monitoring the operating point at maximum power of the photovoltaic system which are the "perturbation and observation" method, the "incremental conductance" method, and the "fuzzy logic" method. After the simulation, a comparative study between the three methods was made. The results obtained were satisfactory, nevertheless the MPPT Flou has better performance. Second, a fuzzy controller was optimized using a new compact Fuzzy MPPT compact optimization approach. The strength of this approach is that it requires only a minimum of memory and computing capacity. The simulation results of our algorithm have been compared with those of fuzzy logic and they have shown that our approach is very competitive and has better results.

Keyword: PV, perturbation and observation, incremental conductance, fuzzy logic, MPPT, fuzzy controller, Compact optimization, compact Fuzzy.

الخلاصة: يتعامل هذا العمل مع تطبيق نهج تحسين مضغوط جديد على التحكم القائم على المنطق الضبابي من أجل الحصول على أقصى طاقة من اللوحة بشكل أكثر دقة على وحدة التحكم. أولاً كنا مهتمين بالتمثيل بالتمثيلات الرياضية للألواح الكهروضوئية وهذا سمح لنا بالحصول على نموذج قابل للإستغلال للتحكم الآلي ثم قدمنا الجانب النظري لثلاث طرق لمراقبة نقطة التشغيل بأقصى قوة للنظام الكهروضوئي وهي طريقة "الإضطراب والملاحظة", طريقة " التوصيل المتزايد" وطريقة " المنطق الضبابي". بعد المحاكاة, تم إجراء دراسة مقارنة بين الطرق الثلاثة. كانت النتائج التي تم الحصول عليها مرضية, و مع ذلك فإن طريقة المنطق الضبابي لديها أداء أفضل. ثانياً, تم تحسين وحدة التحكم الضبابية باستخدام نهج تحسين جديد, تكمن قوة هذا الأسلوب في أنه يتطلب حداً أدنى من الذاكرة وسعة أقل. تمت مقارنة نتائج المحاكاة للخوارزمية الخاصة بنا مع نتائج محاكاة المنطق الضبابي, و أظهرت أن نهجنا تنافسي للغاية و يقدم نتائج أفضل.

الكلمات المفتاحية: منطق ضبابي, توصيل تدريجي, إضطراب و مراقبة, توصيل متزايد, وحدة تحكم ضبابية, تحسيت مضغوط.