



Université de Ghardaïa

N° d'ordre :
N° de série :

Faculté des Sciences et Technologies
Département des Sciences et Technologie

Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de

MASTER

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : Automatique et Système

Spécialité : Automatique et Système

Présente par :

MOULAY BRAHIM Younes

KHENE Ilyas

Thème

**Algorithmes de Poursuite de Point de Puissance Maximale
Pour les Systèmes Photovoltaïques**

Soutenu publiquement le : 20/06/2018

Devant le jury composé de :

DJALOULI Taher	MAA	Univ. Ghardaïa	Président
BENCHAABANE Achour	MAA	Univ. Ghardaïa	Examineur
BOUKHARI Hamed	MAB	Univ. Ghardaïa	Examineur
BOUARROUDJ Nouredine	MRB	URAER. Ghardaïa	Encadreur
BECHOUAT Mohcene	MCB	Univ. Ghardaïa	CO-Encadreur

Année universitaire 2017/2018

REMERCIEMENT

Nous tenons tout d'abord à remercier notre Dieu le tout puissant et miséricordieux, qui nous a donné la force et la patience d'accomplir ce travail.

En second lieu, nous tenons à remercier notre encadreur

Mr : **Noureddine BOUARROUDJ**, pour son précieux conseil et son aide durant toute la période du travail.

Un grand merci également à Mr : **Mohcene BECHOUAT** pour son engagement dans le CO-encadrement de ce mémoire. Sa participation aux discussions de fond et ses suggestions éclairée.

Nos vifs remerciements vont également aux membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre recherche en acceptant d'examiner notre travail et de l'enrichir par leurs propositions.

Enfin, nous tenons également à remercier toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Dédicace

Avant tout nous tenons nos remerciements à notre dieu de nos avoir

donné la force et le courage

Je dédie ce mémoire à ...

Ma Chère Mère Zaouia

Mon Père Abdelkader

Dont le mérite, les sacrifices et les qualités humaines

M'ont permis de vivre ce jour

*A mes chères sœurs Chaïma, Houda, Sara, wahiba, et Salima et ses
enfants Tadj dine et Adel, pour leurs encouragements permanents, et*

leur soutien moral

*A mes chers frères A. Jalil, et Mourad, pour leur appui et leur
encouragement*

*A toute ma famille pour leur soutien tout au long de mon parcours
universitaire.*

A tous mes amis et à tous ceux qui me sont chers.

Younes

Dédicace

Je dédie ce mémoire a ... :

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

*A Mes parents et Mes grands mère
Mon frère et son famille et mes sœurs
et Abd Elsamad et Chaima
ainsi que toute la famille*

Ilyas

ملخص

في عصر التنمية المستدامة ازداد الاعتماد على الطاقة الشمسية للحصول على الطاقة الكهربائية فطورت عدة تقنيات تسمح بتحسين كفاءة النظم الشمسية من بينها الاعتماد على خوارزمية ملاحقة نقطة الاستطاعة العظمى (MPPT) ، نركز في هذا العمل على دراسة ومناقشة عدة خوارزميات لمتابعة نقطة الاستطاعة العظمى وايجاد اكثرها كفاءة وامثلها في استخراج اكبر استطاعة ممكنة من المولد الكهروضوئي.

النقاط الرئيسية التي تطرقنا لها في هذه الدراسة هي نمذجة نظام كهروضوئي يحتوي على مولد كهروضوئي ، محول تيار مستمر- تيار مستمر (DC-DC) ، متحكم (MPPT) ، وحمولة على شكل مقاومة، حيث أظهرت نتائج المحاكاة باستخدام الخوارزميات الكلاسيكية والتي تعتمد على التحكم المباشر بعض السليبيات من بينها وجود تذبذب حول نقطة الإستطاعة العظمى ، ولغرض تحسين إستجابة النظام و التقليل من هذه التذبذبات تم الإعتماد في أول الأمر على التحكم غير المباشر بإضافة متحكم تناسبي تكاملي (PI) . كما تطرقنا إلى دراسة خوارزميات أخرى من بينها التقنيات المعتمدة على الذكاء الصناعي (المنطق الغامض) بحيث اظهرت نتائج المحاكاة كفاءة في التحكم مقارنة بالطرق التقليدية ,وفي الاخير قمنا بالاستعانة بخوارزمية سحابة الجزينات لتحسين كفاءة التحكم بالمنطق الغامض.

كلمات مفتاحية : مولد كهروضوئي، محول DC-DC، متحكم (MPPT) ، الخوارزميات الكلاسيكية ،التحكم المباشر التحكم غير المباشر،متحكم تناسبي تكاملي (PI) ، المنطق الغامض،خوارزمية سحابة الجزينات.

RÉSUMÉ

A l'ère du développement durable un recours accru à l'énergie solaire pour obtenir de l'électricité, plusieurs techniques développées pour améliorer l'efficacité des systèmes solaires photovoltaïques, parmi ces méthodes on a la poursuite de point de puissance maximale (MPPT), nous intéressons dans ce mémoire sur l'étude et la discussion de plusieurs algorithmes de suivi le point de puissance maximale et de trouver le plus efficace et optimale.

Les principaux points que nous avons eu affaire dans cette étude sont la modélisation du système photovoltaïque Contient d'un générateur photovoltaïque, un convertisseur DC -DC, commande (MPPT), et une charge résistive, où les résultats de la simulation des algorithmes classiques appuient sur le direct contrôle montrant certains inconvénients, des oscillations autour de l'MPP, pour améliorer la réponse du système et réduisent l'oscillation. D'abord on a utilisé un contrôle indirect par régulateur proportionnel intégral (PI) et nous avons étudié autres algorithmes base sure l'intelligence artificielle (logique floue), les résultats de simulation montrent une efficacité de contrôle comparée aux méthodes classiques, enfin nous avons utilisé l'algorithme essaim particule pour optimiser la méthode de logique floue.

Les mots clé : Générateur photovoltaïque, convertisseur DC-DC, commande MPPT, algorithmes classiques, contrôle directe, contrôle indirecte, contrôleur proportionnelle intégrateur PI, logique floue, algorithme essaim particule

ABSTRACT

In the era of sustainable development, the reliance on the solar energy has been increased for the electrical power, which has developed several technologies and mechanism to improve the efficiency of solar systems, including relying maximum power point tracking (MPPT).

On this study, we have focused on studying and discussing several algorithms to follow the maximum power point and finding out the most efficient and representable in extracting the largest possible from the photovoltaic generator. The main important points that we have discussed in this study is intergating and modeling the photoelectric system which contains the photovoltaic generator, converter continuous–continuous stream, controller (MPPT) and a payload as a form of resistance, whereby the results of the simulation using the classical algorithms which depend on the direct control of some negatives, including the vibrates around the maximum power point, in order to improve system responsiveness and reduce these fluctuations that were initially relying on the indirect control by adding the proportional-integral controller (PI). We have also studied other algorithms including, the most reliable techniques of the artificial intelligence (fuzzy logic) whereby the simulation results showed a efficiency in comparison to the traditional methods. Finally, we have relied on and adopted on the particle swarm optimization algorithms to improve the fuzzy logic control efficiency.

Keywords: Photovoltaic Generator, Coverter DC-DC, Control (MPPT), Classical algorithms, Direct-Indirect Control, Integral-proportional controller, Fuzzy logic, Particle Swarm Optimization.

SOMMAIRE

REMERCIEMENT	I
DEDICACE	II
RESUME	IV
SOMMAIRE	VI
LISTE DES FIGURES	IX
LISTE DES TABLEAUX	XI
LISTE DES ABREVIATIONS	XII
Introduction Générale	1

Chapitre I : Etude Et Modalisation D'un Système Photovoltaïque

I.1 Introduction	3
I.2 L'énergie solaire	4
I.2.1 Caractéristique du rayonnement solaire.....	4
I.2.1.1 L'irradiation ou rayonnement	4
I.2.1.2 L'éclairement ou irradiance	4
I.2.2 Spectre du rayonnement	4
I.2.3 Durée d'insolation	5
I.3 L'effet photovoltaïque	6
I.3.1 Le principe de la conversion.....	6
I.4 La photopile	7
I.4.1 Caractéristiques de la photopile.....	7
I.4.1.1 Circuit électrique idéal d'une photopile	7
I.4.1.2 Circuit électrique réel d'une photopile.....	8
I.4.2 Paramètres d'une cellule photovoltaïque.....	9
I.4.2.1 Le courant de court-circuit	9
I.4.2.2 Tension en circuit ouvert V_{CO}	10
I.4.2.3 La puissance	10
I.4.2.4 Le rendement	10
I.4.2.5 Le facteur de forme	10
I.5 Générateur Photovoltaïque	11
I.5.1 Module photovoltaïque	11

I.5.1.1	Modèle mathématique du module PV	11
I.5.1.2	Caractéristiques d'un module PV	12
I.6	Les convertisseurs.....	14
I.6.1	Les convertisseurs DC-DC	15
I.6.2	Les différents types de convertisseurs DC-DC	15
I.6.2.1	Convertisseur Buck	15
I.6.2.2	Convertisseur Boost	17
I.6.2.3	Convertisseur Buck-Boost.....	18
I.7	Conclusion	20

<p>Chapitre II : Algorithmes de poursuite de point de puissance maximale (MPPT) pour un système PV</p>

II.1	Introduction	21
II.2	Dimensionnement du hacheur Boost	21
II.3	Principe de la méthode (algorithme) de poursuite de point de puissance maximale	23
II.4	Les méthodes MPPT classiques.....	24
II.4.1	La méthode de perturbation et observation (P&O).....	24
II.4.1.1	Résultat de simulation de la méthode P&O.....	25
II.4.2	La méthode de conductance incrémentale (INC)	28
II.4.2.1	Résultat de simulation de la méthode de conductance incrémentale (INC)	29
II.4.3	Algorithme de conductance incrémental indirect basé sur un régulateur PI	30
II.4.3.1	Résultat de simulation de la méthode INC indirect avec régulateur PI.....	32
II.5	Méthodes basées sur l'intelligence artificielle (logique floue)	33
II.5.1	MPPT direct à base de la logique floue	34
II.5.1.1	Résultat de simulation de la méthode MPPT directe à base de logique floue .	36
II.5.2	Algorithme de conductance incrémental indirect à base d'un régulateur floue .	37
II.5.2.1	Résultat de simulation de la méthode conductance incrémental indirect à base d'un régulateur floue.....	39
II.6	Conclusion.....	41

Chapitre III : Algorithme MPPT-Floue Optimisé Par Essaim De Particules

III.1 Introduction	41
III.2 Formalisation	41
III.2.1 Nombre de particules	42
III.2.2 Initialisation de l'essaim	43
III.2.3 Equation de mouvement	43
III.2.4 Confinement d'intervalle	44
III.2.4.1 Coefficient de constriction	45
III.2.5 Critère d'arrêt.....	46
III.3 Application de l'algorithme OEP	46
III.4 Conception du contrôleur MPPT flou par essais particuliers	47
III.4.1 Création de la population initiale.....	47
III.4.2 Fonction objective	48
III.4.3 Paramètres de l'OEP	48
III.4.4 Résultat de simulation de la commande MPPT flou direct optimisée par PSO .	48
III.5 Conclusion	51
Conclusion Générale.....	52
Bibliographie.....	53

LISTE DES FIGURES

Figure I. 1: Système photovoltaïque autonome. -----	3
Figure I. 2: Analyse spectrale du rayonnement solaire . -----	5
Figure I. 3: Représentation schématique de l'effet photovoltaïque . -----	7
Figure I. 4: <i>Circuit électrique d'une photopile</i> -----	7
Figure I. 5 : Schéma équivalent du modèle à deux diodes d'une cellule photovoltaïque -----	8
Figure I. 6: Raccordement du module PV avec une résistance variable pour déterminer les caractéristiques P-V et I-V. -----	12
Figure I. 7 : Caractéristique courant-tension du module en fonction de l'éclairement. -----	12
Figure I. 8: Caractéristique puissance-tension du module en fonction de l'éclairement. -----	13
Figure I. 9: Evolution de la caractéristique (P-V) du module en fonction de la température. -----	13
Figure I. 10: Evolution de la caractéristique(P-V)du module en fonction de la température. -----	14
Figure I. 11: Réalisation semi-conductrice du convertisseur Buck.-----	15
Figure I. 12: Représentation idéale du commutateur du convertisseur Buck. -----	15
Figure I. 13: a) position du commutateur à $u=1$, b) position du commutateur à $u=0$ -----	16
Figure I. 14: Schéma électrique du convertisseur Boost. -----	17
Figure I. 15: a) position du commutateur à $u=1$,b) position du commutateur à $u=0$. -----	17
Figure I. 16: Schéma électrique du convertisseur Buck-Boost. -----	19
Figure I. 17: a) position du commutateur à $u=1$, b) position du commutateur à $u=0$ -----	19
<hr style="width: 50%; margin: 10px auto;"/>	
Figure II. 1: Les coordonnées V_{MPP} et I_{MPP} qui correspondent le point de puissance max -----	21
Figure II. 2: Schéma synoptique d'un système PV commandé par MPPT. -----	23
Figure II. 3: Signe de la variation de la puissance par rapport à la variation de la tension du GPV dans le plan $p_{pv}-v_{pv}$. -----	24
Figure II. 4: Organigramme de l'Algorithme P&O -----	25
Figure II. 5: Résultats de simulation avec l'algorithme P&O pour $G=1000W/m^2$ et $T=298K$ -----	26
Figure II. 6 : Profile variable d'éclairement et de température -----	27
Figure II. 7: Résultats de simulation avec l'algorithme P&O pour un profile variable d'éclairement et de température. -----	27
Figure II. 8: Résultats de simulation avec l'algorithme P&O pour variation brusque de la charge R. -----	28
Figure II. 9: Organigramme de l'algorithme de Conductance Incrémentale. -----	29
Figure II. 10 : Résultats de simulation avec l'algorithme INC pour $g=1000w/m^2$ et $T=298k$. -----	30
Figure II. 11 : Résultats de simulation avec l'algorithme INC pour un profile variable d'éclairement et de température. -----	30
Figure II. 12 : Résultats de simulation avec l'algorithme INC pour variation brusque de la charge R. -----	30
Figure II. 13: Organigramme de l'algorithme de conductance incrémental indirect. -----	31
Figure II. 14 : Résultats de simulation avec l'algorithme INC-indirect pour $G=1000W/m^2$ et $T=298K$. -----	32
Figure II. 15 : Résultats de simulation avec l'algorithme INC-indirect pour un profile variable d'éclairement et de température. -----	33

Figure II. 16: Résultats de simulation avec l’algorithme INC-indirect pour variation brusque de la charge R.	33
Figure II. 17 : Schéma général d’un contrôleur flou.....	34
Figure II. 18: Fonctions d’appartenance de l’entrée E et de la sortie ΔD pour MPPT-Flou direct.	35
Figure II. 19 : Résultats de simulation avec l’algorithme MPPT-floue direct pour $G=1000W/m^2$ et $T=298K$	36
Figure II. 20: Résultats de simulation avec l’algorithme MPPT-floue direct pour un profile variable d’éclairement et de température.	36
Figure II. 21: Résultats de simulation avec l’algorithme MPPT-floue direct pour variation brusque de la charge R.	37
Figure II. 22: Signe de la variable d’entrée E dans le plan $p_{pv}-v_{pv}$ pour l’algorithme INC indirect à base d’un régulateur floue.....	38
Figure II. 23: Fonctions d’appartenance pour l’algorithme INC indirecte à base d’un régulateur floue.	38
Figure II. 24 : Résultats de simulation avec l’algorithme INC indirect avec régulateur floue pour $G=1000W/m^2$ et $T=298K$	39
Figure II. 25: Résultats de simulation avec l’algorithme INC indirect avec régulateur flou pour un profile variable d’éclairement et de température.	40
Figure II. 26 : Résultats de simulation avec l’algorithme INC indirect avec régulateur flou pour une charge variable.	40

Figure III. 1: Déplacement d’une particule.	42
Figure III. 2 : Schéma de principe d’optimisation de la commande MPPT floue par PSO.	47
Figure III. 3: Codage des fonctions d’appartenance.	47
Figure III. 4 : Structure d’une particule.	48
Figure III. 5 : évolution de la fonction objective en fonction des itérations.	49
Figure III. 6 : Fonctions d'appartenances du contrôleur flou optimisé par l’OEP.	49
Figure III. 7: Résultats de simulation de la méthode MPPT flou direct optimisée par OEP sous les conditions climatiques standard ($G=1000W/m^2$ et $T=298K$).	50
Figure III. 8: Résultats de simulation de la méthode MPPT floue direct optimisée par OEP avec variation des conditions climatique	50
Figure III. 9 : Résultats de simulation de la méthode MPPT floue direct optimisée par OEP avec variation de charge	51

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I. 1 :Spécifications utilisées pour le module PV	11
<hr/>	
Tableau II. 1 :Règles du régulateur MPPT flou direct utilisé	35
Tableau II. 2 :Règles floues utilisés pour l’algorithme INC indirect à base d’un régulateur flou	39
<hr/>	
Tableau III. 1 : Algorithme d’optimisation par essaim de particules	44
Tableau III. 2 Fixation de la vitesse maximale	45
Tableau III. 3 : Paramètres de l’OEP.	48

LISTE DES ABREVIATIONS

PV : photovoltaïque

MPP : Maximum Power Point.

GPV : Générateur Photovoltaïque.

DC : Courant Continu (Direct Current).

AC : Alternatif courant (Alternative Current).

FF : Facteur de forme.

P&O : Perturbée et observée.

INC : Conductance incrémentale.

MPPT : Maximum Power Point Tracking.

OEP : Optimisation par Essaim de Particules.

SI : System Intentionnelle d'unité

ISES : International Solar Energy Society

Si : Silicium.

Ge : Germanium.

P-N : Positif – Négatif.

Eg : la bande d'énergie de semi-conducteur.

ESR : Résistance Equivalant Estimée.

MLI : Modulation par Largeur d'Impulsions.

PI : Proportionnel-Intégral.

PSO : Particle Swarm Optimization

Introduction

Générale

Introduction Générale

La crise de l'énergie devient de plus en plus importante, et la pollution de l'environnement est en hausse car l'utilisation de combustibles fossiles. Des efforts considérables ont été déployés pour utiliser les sources d'énergie renouvelables dans le système de production d'énergie.

L'énergie solaire photovoltaïque est l'une des sources d'énergie renouvelable qui peut être l'une des sources principales du futur de production d'électricité en mode autonome et connecté au réseau pour applications domestiques, commerciales et industrielles. En raison de sa flexibilité et de son adaptabilité, les systèmes photovoltaïques ont attiré l'attention des fabricants et des chercheurs pour l'amélioration maximale de cette technologie. Techniquement, il existe deux façons d'améliorer l'efficacité du système PV solaire, soit il pourrait être possible de développer des matériaux de conversion solaire à haut rendement et à faible coût ou contrôler le système photovoltaïque fonctionner au point de puissance maximale pour obtenir la meilleure puissance de sortie possible.

L'énergie électrique fournie par un système de production d'énergie photovoltaïque (PV) dépend des conditions atmosphériques, telles que l'irradiation solaire et la température. Les courbes caractéristiques tension-courant ($v_{pv}-i_{pv}$) et tension-puissance ($v_{pv}-p_{pv}$) du module PV spécifient un point de fonctionnement unique auquel la puissance maximale est fournie. Ce point est appelé en anglais maximum power point (MPP), est une tâche indispensable d'un système de contrôle photovoltaïque, car il maximise la puissance de sortie du système PV.

L'objectif principal de notre travail est de trouver parmi les algorithmes qui nous avons étudiée la commande efficace et optimale permettant d'extraire le maximum de puissance délivrée par le générateur photovoltaïque (GPV) vis-à-vis les variations climatiques (éclairage et température). L'étude sera faite sur un système constitué d'un panneau photovoltaïque (36 cellule connectée en série), d'une charge résistive et un étage d'adaptation qui est un convertisseur DC-DC survolteur.

De nombreuses stratégies de poursuite de point de puissance maximale (MPP) ont été étudiées telles que la méthode perturber et observer (P&O) et la méthode de conductance incrémentale (INC) des méthodes fondées sur l'intelligence artificielle utilisant la logique floue et l'optimisation par essaim de particules.

Dans le premier chapitre, nous donnons une généralité sur l'énergie solaire photovoltaïque ainsi que les principales caractéristiques de fonctionnement d'un générateur PV à sa puissance maximale ainsi que les différents types des convertisseurs DC-DC.

Le deuxième chapitre, est consacré à l'étude des différents types d'algorithmes de poursuite de point de puissance maximale rencontrés dans la littérature nous présentons d'abord une étude sur les algorithmes classiques «Perturbé et Observe» et «Conductance Incrémentale » basés sur la commande direct du convertisseur pour délivrer le rapport cyclique et pour avoir une amélioration dans les performances du système PV, la méthode MPPT indirect qui combine l'algorithme de conductance incrémental (pour délivrer la tension optimale du GPV) et un régulateur PI est étudiée. Ensuite, des méthodes MPPT basées la logique floue incluant les deux alternatives de commande directe et indirecte sont aussi étudiées.

Dans le troisième chapitre, et pour concevoir les paramètres optimaux du régulateur MPPT floue et afin de maximiser le plus possible la puissance du GPV, nous utilisons une technique d'optimisation par algorithme d'essaim de particules (OEP).

Enfin, une conclusion générale résume les principaux résultats obtenus dans ce travail.

Chapitre I

Etude Et Modélisation D'un Système Photovoltaïque

I.1 Introduction

Le soleil est une source énergétique quasiment illimitée, elle pourrait couvrir plusieurs milliers de fois notre consommation globale d'énergie. C'est pourquoi, l'homme cherche depuis longtemps à mettre à profit cette énergie importante et diffusée sur l'ensemble de la planète, il est arrivé à réaliser ce but par le moyen dit cellule photovoltaïque fabriquée généralement à base de silicium un nombre de cellules connecté entre eux constitue le module photovoltaïque [1].

L'énergie solaire photovoltaïque provient de la transformation directe d'une partie du rayonnement solaire en énergie électrique sous forme de courant continu. Cette conversion d'énergie s'effectue par le biais d'une cellule photovoltaïque (PV) basée sur un phénomène physique appelé effet photovoltaïque [2].

Les systèmes photovoltaïques permettent de convertir la lumière du soleil en électricité au sein de matériaux semi-conducteurs comme le silicium. Cette énergie est apporté par les photons (composent de la lumière) qui vont attaquer les atomes de silicium en heurtant les électrons et les libèrent, induisant un courant électrique qui va alimenter une charge DC, ou charge AC après avoir conversion par l'onduleur (voir figure I.1) [3].

Ce chapitre consacré à l'étude des générateurs photovoltaïques, leur modélisation et ses différentes caractéristiques. Ensuite, nous rappelons brièvement quelque structure des convertisseurs statique de puissance DC-DC.

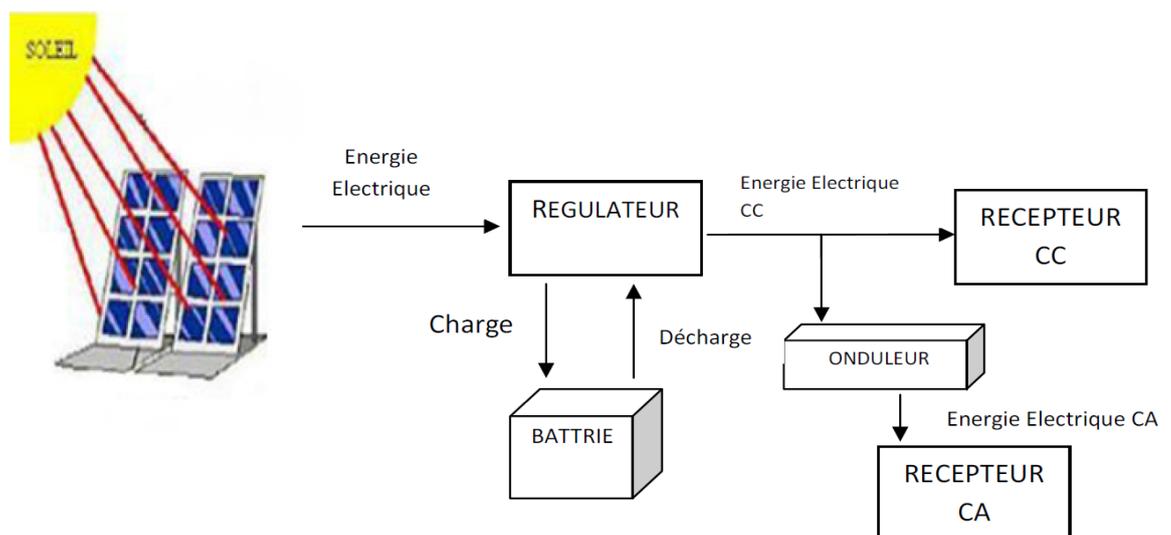


Figure I. 1: Système photovoltaïque autonome.

I.2 L'énergie solaire

La distance de la terre au soleil est environ 150 million de kilomètres et la vitesse de la lumière est d'un peu plus de 300000 km/h les rayons du soleil mettent donc environ 8 minutes à nous parvenir. La constante solaire est la densité d'énergie solaire qui atteint la frontière externe de l'atmosphère faisant face au soleil [3]. L'intensité du rayonnement solaire reçu sur un plan quelconque à un moment donné est appelée irradiation ou éclairement (noté généralement par la lettre G), il s'exprime en watts par mètre carré (W/m^2). La valeur du rayonnement reçu par la surface du module photovoltaïque varie selon la position de ce dernier. Le rayonnement solaire atteint son intensité maximale lorsque le plan du module photovoltaïque est perpendiculaire aux rayons [4].

I.2.1 Caractéristique du rayonnement solaire

I.2.1.1 L'irradiation ou rayonnement

L'irradiation est l'énergie reçue par une surface. Elle s'exprime en J/m^2 (joule par mètre carré). L'ISES (International Solar Energie Society) recommande le symbole H . D'autres unités plus courantes sont le Wh/m^2 (wattheure par mètre carré) bien que ce dernier ne doive pas être utilisé puisque n'appartenant pas au système international d'unités (SI) [5].

I.2.1.2 L'éclairement ou irradiance

L'éclairement est défini comme une puissance reçue par une surface. Il s'exprime en W/m^2 (watt par mètre carré). Le S.I. (système international d'unités) recommande d'utiliser le symbole G .

Signalons que, outre l'incidence de l'atmosphère, l'irradiation solaire dépend :

- De l'orientation et l'inclinaison de la surface
- De la latitude du lieu et son degré de pollution,
- De la période de l'année et de l'instant considéré dans la journée
- De la nature des couches nuageuses [5].

I.2.2 Spectre du rayonnement

Le rayonnement électromagnétique est composé de « grains » de lumière appelés photons. L'énergie de chaque photon est directement liée à la longueur d'onde λ [6]. Elle est donnée par la formule suivante :

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda} \quad (I.1)$$

Avec :

E : Energie lumineuse en joule.

$h = 6,62 \cdot 10^{-34}$ J.s, est le constant de Planck.

$c = 3 \cdot 10^8$ m.s⁻¹, vitesse de la lumière dans le vide.

ν : la fréquence (s⁻¹).

λ : longueur d'onde .

La figure I.2 présente les spectres du rayonnement solaire. Pour $0,2 < \lambda < 0,38$ nous avons le spectre Ultraviolet pour $0,38 < \lambda < 0,78$ nous avons le spectre visible et pour $0,78 < \lambda < 10$ nous avons le spectre infrarouge.

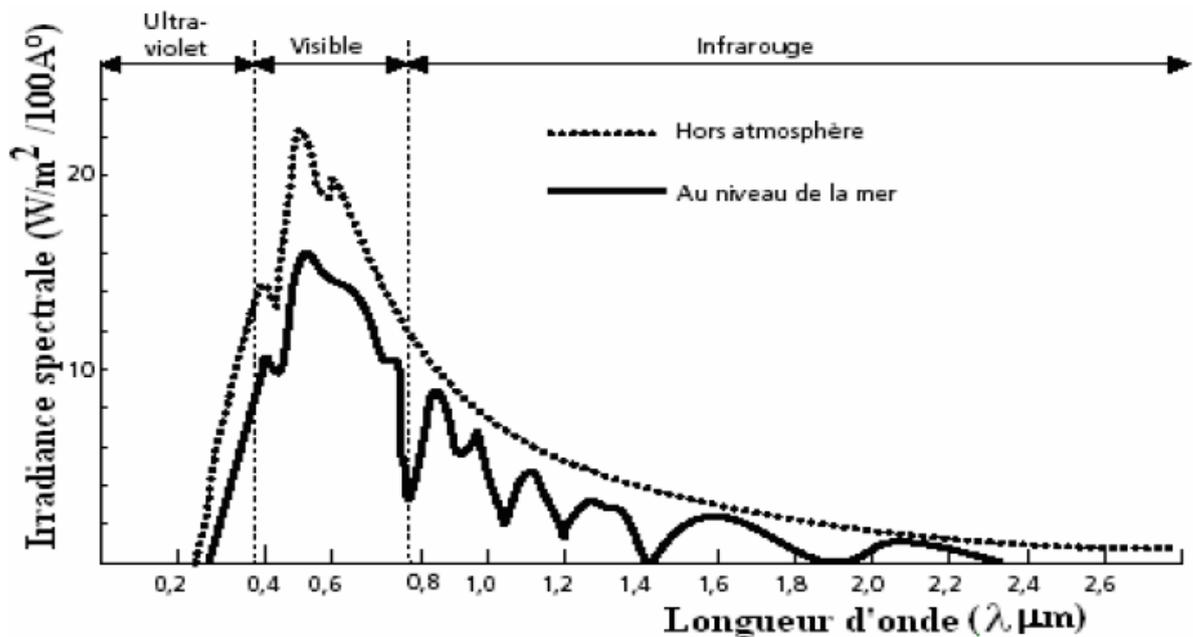


Figure I. 2: Analyse spectrale du rayonnement solaire [4].

I.2.3 Durée d'insolation

La durée d'insolation correspond au nombre d'heures dans la journée, entre le lever et le coucher du soleil, où celui-ci est bien visible. Le relevé est fait au moyen de l'héliographe de Campbell–Stokes dans lequel une sphère de cristal concentre les rayons du soleil sur un papier qu'il brûle en se déplaçant. Ainsi, seuls les moments où le soleil est bien visible sont enregistrés on parle alors de durée d'insolation réelle ou effective et dépend du fait que le soleil levé soit visible du point d'observation ou caché par les nuages.

Au défaut de l'héliographe, il est possible à partir du calcul du mouvement astronomique relatif du soleil et de la terre d'évaluer la durée théorique du jour c'est-à-dire, celle qu'il aurait

si les nuages ne cachent pas le soleil. Cette durée est calculée en fonction de la latitude du site et de la déclinaison apparente qu'elle même dépend de la période de l'année considérée [4].

I.3 L'effet photovoltaïque

L'effet photovoltaïque est un phénomène physique propre à certains matériaux appelés semi-conducteurs qui produisent de l'électricité lorsqu'ils sont exposés à la lumière.

L'effet photovoltaïque constitue la conversion directe de l'énergie du rayonnement solaire en énergie électrique au moyen de cellules généralement à base de silicium. Pour obtenir une puissance suffisante, les cellules sont reliées entre elles et constituent le module solaire.

L'effet photovoltaïque, c'est-à-dire la production d'électricité directement de la lumière. Fut observée la première fois, en 1839, par le physicien français Edmond Becquerel. Toutefois, ce n'est qu'au cours des années 1950 que les chercheurs des laboratoires Bell, aux Etats-Unis, parvinrent à fabriquer la première cellule photovoltaïque [7].

I.3.1 Le principe de la conversion

Il existe différentes techniques permettant la conversion directe de la lumière solaire en électricité, la plus connue est la conversion photovoltaïque effectuée à l'aide de matériaux semi-conducteurs tel que le silicium (Si), le germanium (Ge) [8].

Ce matériau comporte deux parties, l'une présentant un excès d'électrons et l'autre un déficit en électrons, dites respectivement dopée de type N et dopée de type P. Lorsque la première mise en contact avec la seconde, les électrons en excès dans le matériau N diffusent dans le matériau P (figure I.3) [4].

La transformation d'énergie solaire en énergie électrique se base sur trois mécanismes suivants :

- Absorption des photons (dont l'énergie est supérieure au gap) par le matériau constituant le dispositif.
- Conversion de l'énergie du photon en énergie électrique, ce qui correspond à la création des paires d'électrons/trous dans le matériau semi-conducteur.
- Collecte des particules générées dans le dispositif [1].

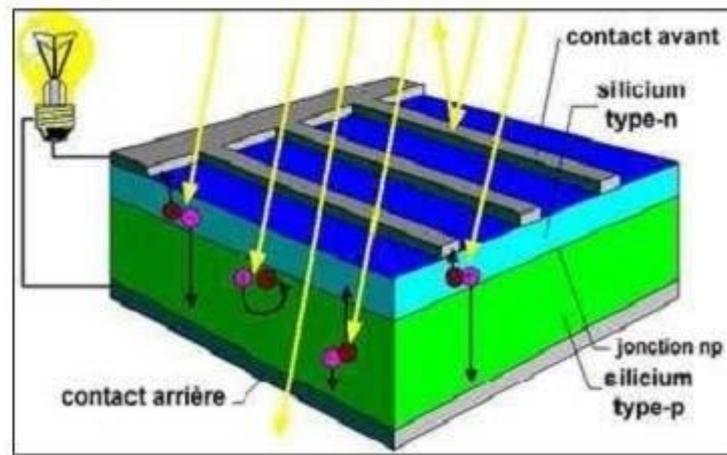


Figure I. 3: Représentation schématique de l'effet photovoltaïque [1].

I.4 La photopile

Une cellule solaire ou photopile sera obtenue en constituant une jonction de deux types opposés d'un matériau semi-conducteur. Au voisinage de la jonction apparaît un champ électrique qui maintient la séparation des charges positives et négatives. L'épaisseur moyenne de photopile est de 300 micromètre [9].

I.4.1 Caractéristiques de la photopile

I.4.1.1 Circuit électrique idéal d'une photopile

La jonction PN sous éclairage peut être schématisée par un générateur de courant I_{ph} (un courant inverse proportionnel à la lumière incidente) en parallèle avec une diode délivrant un courant (figure I.4) [10], [11].

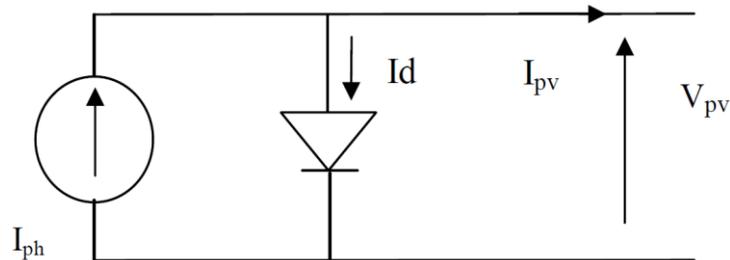


Figure I. 4: Circuit électrique d'une photopile

$$I_{PV} = I_{ph} - I_d \quad (I.2)$$

$$I_d = I_0 \left[e^{\frac{V_{PV}}{V_t}} - 1 \right] \quad (I.3)$$

$$I_{PV} = I_{ph} - I_0 \left[e^{\frac{V_{PV}}{V_t}} - 1 \right] \quad (I.4)$$

Avec :

I_0 : Courant de saturation de diode.

V_{PV} : tension de la photopile.

V_T : tension thermique.

T : température absolue en °K.

I_D : le courant qui traverse la diode.

I_{ph} : Photo courant.

I.4.1.2 Circuit électrique réel d'une photopile

Le schéma équivalent de la cellule photovoltaïque réelle tient compte d'effets résistifs parasites dues à la fabrication [12]. Les modèles électriques généralement considérés sont le modèle à une seule diode [13] et le modèle à deux diodes [14], [15].

Dans notre étude, nous considérons le modèle à deux diodes de la figure I.5, dont le modèle mathématique détaillé est donné par les équations ci-dessous.

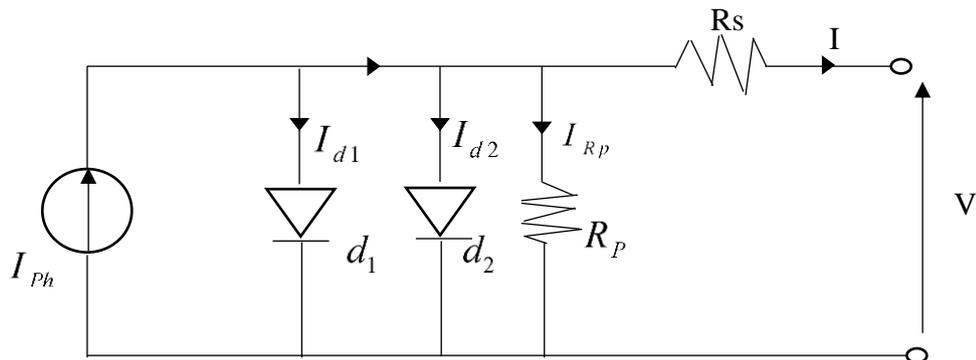


Figure I. 5 : Schéma équivalent du modèle à deux diodes d'une cellule photovoltaïque

La figure I.5 montre le schéma de cellule photovoltaïque qui comporte en réalité une résistance série R_s et une résistance en dérivation ou shunt R_p . Ces résistances auront une certaine influence sur la caractéristique I-V de la photopile.

La résistance série est la résistance interne de la cellule elle dépend principalement de la résistance du Semi-conducteur utilisé, de la résistance de contact des grilles collectrices et de la résistivité de cette grille. La résistance shunt est due à un courant de fuite au niveau de la jonction, elle dépend de la façon dont celle-ci a été réalisée [16].

Le modèle mathématique pour la caractéristique courant-tension est donnée par :

$$I = I_{ph} - I_{S1} \left[e^{\frac{q(V+I.R_S)}{n_1KT}} - 1 \right] - I_{S2} \left[e^{\frac{q(V+I.R_S)}{n_2KT}} - 1 \right] - \frac{V + I.R_S}{R_p} \quad (I.5)$$

Où :

I et V : sont le courant et la tension de sortie de la cellule photovoltaïque.

I_{ph} : est le photo-courant produit.

I_{S1} et I_{S2} : sont les courants de saturation des diodes.

n_1 et n_2 : les facteurs de pureté des diode.

R_s et R_p : sont respectivement la résistance série et la résistance parallèle.

T : est la température absolue en Kelvin.

$q = 1,602 \cdot 10^{-19}$ C, est la charge élémentaire constante.

$k = 1,380 \cdot 10^{-23}$ J/K , la constante de Boltzmann.

Le photo-courant I_{ph-max} est atteint à un éclairement maximum, souvent on a $I_{ph} = G \cdot I_{ph-max}$

Avec G : c'est l'éclairement.

Il est évident de l'équation I.5 que la caractéristique courant-tension dépend de l'éclairement et de la température. La dépendance de la température est encore amplifiée par les propriétés du photo-courant I_{ph} et les courants de saturation inverse des diodes qui sont donnés par :

$$I_{ph}(T) = \frac{G \cdot I_{ph-max}}{1000} \left[1 + (T - 298) \cdot (5 \cdot 10^{-4}) \right] \quad (I.6)$$

$$I_{S1} = K_1 T^3 e^{\frac{E_g}{KT}} \quad (I.7)$$

$$I_{S1} = K_2 T^{3/5} e^{\frac{E_g}{KT}} \quad (I.8)$$

Ou E_g est la bande d'énergies du semi-conducteur.

$$K_1 = 1,2 A / cm^2 K^3 \quad (I.9)$$

$$K_2 = 2,9 \cdot 10^5 A / cm^2 K^{5/2} \quad (I.10)$$

I.4.2 Paramètres d'une cellule photovoltaïque

I.4.2.1 Le courant de court-circuit

Le courant de court-circuit est le courant traversant la cellule solaire lorsque la tension aux bornes de la cellule solaire est nulle (c'est-à-dire lorsque la cellule solaire est court-circuitée).

A des niveaux d'éclairage usuels, le photo-courant est proportionnel à l'irradiation solaire (Flux lumineux) G (W/m^2). Dans le cas idéal, il correspond au courant de court-circuit qui peut alors simplement s'écrire [11].

$$I_{cc} = I_{cc0} \cdot \frac{E_g}{1000} \quad (I.11)$$

Où I_{cc0} est le courant de court-circuit pour une irradiation solaire standard de $1000 W/m^2$

I.4.2.2 Tension en circuit ouvert V_{co}

C'est la tension V_{co} pour laquelle le courant débité par le générateur photovoltaïque est nul (C'est la tension maximale d'une photopile ou d'un générateur photovoltaïque) [8].

I.4.2.3 La puissance

La partie intéressante de la caractéristique courant-tension pour l'utilisateur c'est celle que génère de l'énergie, donc ce ne sera ni au point de tension de circuit ouvert, ni au point de court-circuit, qui ne génère aucune énergie puisque la puissance est le produit du courant par la tension, donc la puissance maximale génère par la cellule est [17].

$$P_m = I_m \cdot V_m \quad (I.12)$$

P_m : Puissance max.

I_m : courant optimale.

V_m : tension optimale.

I.4.2.4 Le rendement

On appelle le rendement " η " de conversion de la cellule le rapport entre la puissance électrique maximale fournie par la cellule et la puissance lumineuse qu'elle reçoit.

$$\eta = \frac{P_m}{G S} \quad (I.13)$$

Avec :

S : la surface de la cellule en cm^2 .

G : l'éclairage en w/m^2 .

I.4.2.5 Le facteur de forme

C'est le rapport de la puissance maximale au produit $I_{cc} \cdot V_{co}$, il traduit l'influence des pertes par les deux résistances R_s et R_p [11].

$$FF = \frac{P_m}{V_{oc} \cdot I_{CC}} \quad (I.14)$$

I.5 Générateur Photovoltaïque

I.5.1 Module photovoltaïque

La cellule photovoltaïque élémentaire constitue un générateur de très faible puissance vis-à-vis des besoins de la plupart des applications domestiques ou industrielles. Pour produire plus de puissance, plusieurs cellules doivent être assemblées afin de créer un module ou un panneau photovoltaïque. En effet, les modules PV sont composés d'un ensemble de cellules mises en série, réalisant la conversion proprement dite de la lumière du soleil en électricité [7].

Pour augmenter la tension d'utilisation, les cellules PV sont connectées en série. La tension nominale du module est habituellement adaptée à la charge de 12 volts et les module sauront donc généralement 36 cellules. De plus, la fragilité des cellules au bris et à la corrosion exige une protection envers leur environnement et celles-ci sont généralement encapsulées sous verre ou sous composé plastique. Le tout est appelé un module photovoltaïque [16].

I.5.1.1 Modèle mathématique du module PV

La considération du modèle de circuit équivalent du figure I.5 piloté à l'équation I.15 pour une rangée des cellules photovoltaïque (généralement considérée comme un module solaire) avec z les cellules photovoltaïques raccordées en série.

$$I = I_{ph} - I_{S1} \left[e^{\frac{q(V+I.R_S)}{n_1 ZKT}} - 1 \right] - I_{S2} \left[e^{\frac{q(V+I.R_S)}{n_2 ZKT}} - 1 \right] - \frac{V + I.R_S}{R_p} \quad (I.15)$$

Les modules PV sont composés d'un ensemble de cellules mises en série pour augmenter la tension et en parallèle pour augmente leur courant cette ensemble est appelle le champ de module PV (ou panneau PV). Les caractéristiques du module PV donné par l'équation I.15 avec 36 cellules ($z=36$) connecté en série sont données par le tableau I.1

Puissance maximale P_{max}	61.91 W
Tension de circuit ouvert v_{co}	25.25 V
Courant de court-circuit I_{ph-max}	3.25 A
Tension optimal v_{opt}	20 V
Courant optimal i_{opt}	≈ 3.1 A
Facteur de pureté n_1	1
Facteur de pureté n_2	2

Tableau I. 1 : Spécifications utilisées pour le module PV

I.5.1.2 Caractéristiques d'un module PV

Afin de voir le bon fonctionnement du modèle étudié et les effets des différents paramètres (la température et l'éclairement) sur les caractéristiques courant-tension, puissance-tension du panneau photovoltaïque, nous avons effectué les simulations suivantes. Pour déterminer les caractéristique P-V et I-V nous raccordons le module PV avec une charge résistive variable comme le montre la figure suivante :

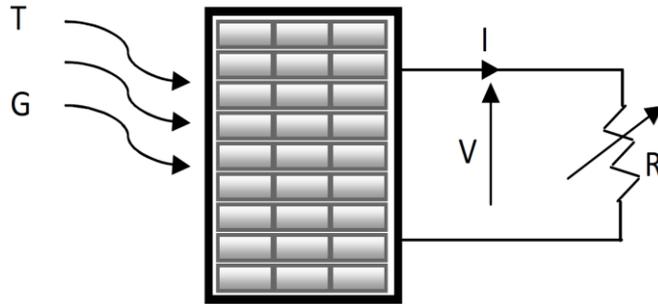


Figure I. 6: Raccordement du module PV avec une résistance variable pour déterminer les caractéristiques P-V et I-V.

a) Influence de l'Éclairement

L'énergie électrique produite par un module dépend de l'éclairement qu'elle reçoit sur sa surface. La figure I.7 représente la caractéristique courant-tension d'un module PV en fonction de l'éclairement, à une température constante ($T=298\text{ k}$).

Il est bien observé que le courant est directement proportionnel au rayonnement, contrairement à la tension qui ne varie que très peu en fonction de l'éclairement [3]. La puissance optimale diminuée lorsque l'éclairement diminué (figure I.8) [9].

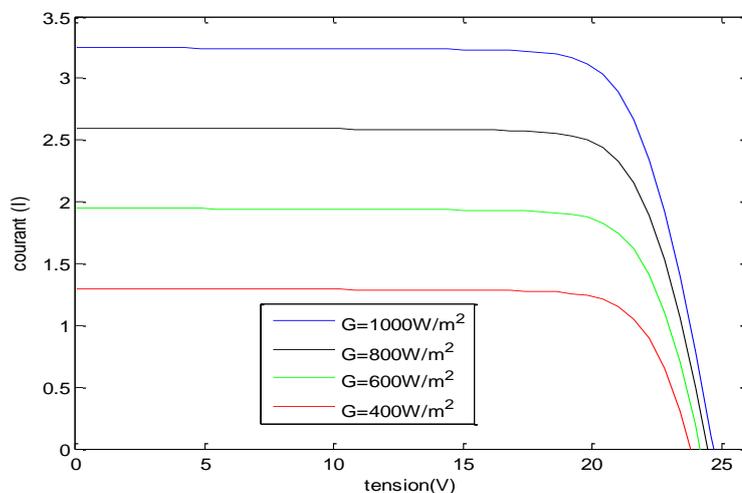


Figure I. 7 : Caractéristique courant-tension du module en fonction de l'éclairement.

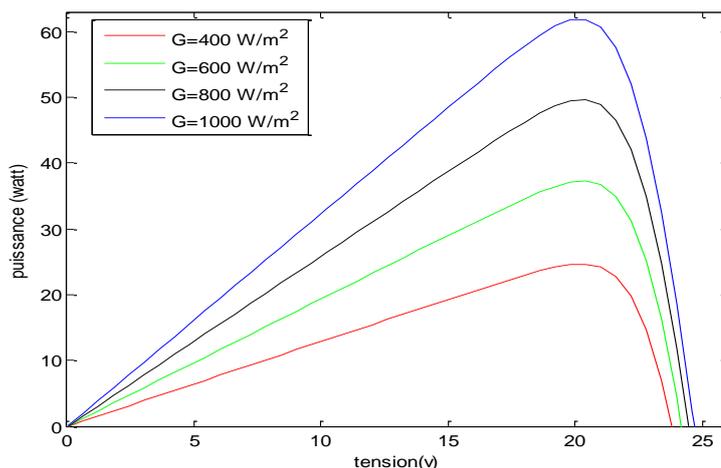


Figure I. 8: Caractéristique puissance-tension du module en fonction de l'éclairement.

b) Influence de la température

Nous présentons ci-dessous les caractéristiques I-V et P-V (figure I.9 et I.10) d'un module photovoltaïque pour un profil d'éclairement constant $G=1000 \text{ W/m}^2$ et pour différentes températures :

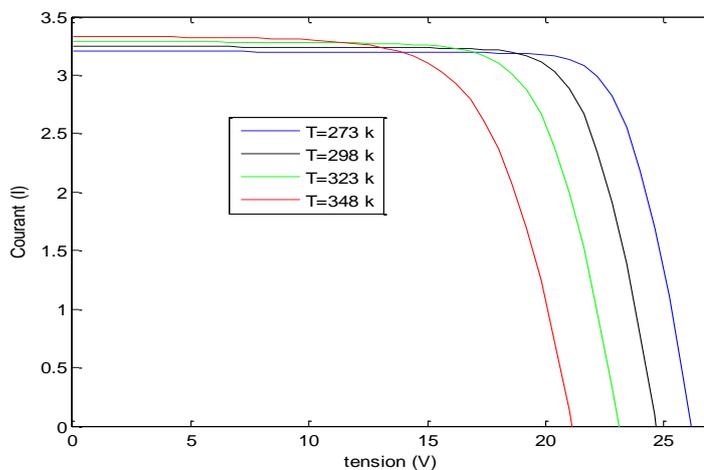


Figure I. 9: Evolution de la caractéristique (I-V) du module en fonction de la température.

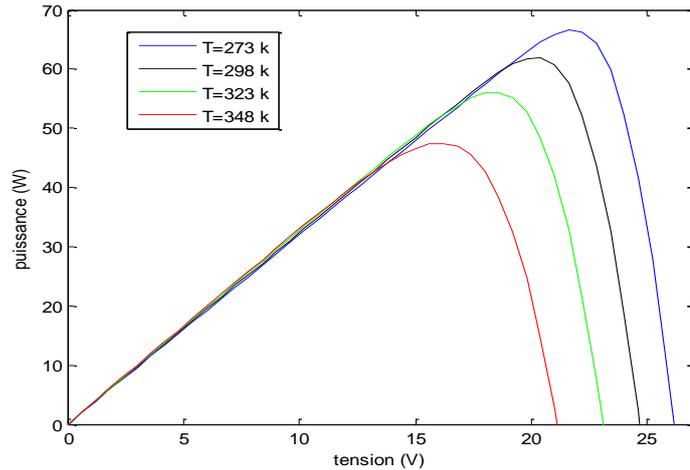


Figure I. 10: Evolution de la caractéristique (P-V) du module en fonction de la température.

Quand la température diminue, la tension à vide augmente, mais le courant de court-circuit diminue dans des proportions moindres. La diminution du courant de saturation est la principale cause de la chute de courant à basse température. Aussi, on considère en première approximation que le fonctionnement optimal du générateur PV correspond sensiblement à un fonctionnement à tension optimale constante [7].

I.6 Les convertisseurs

Les convertisseurs sont des outils qui assurent l'adaptation entre la source et la charge leur utilité sert à charger les batteries de stockages et faire la conversion électrique par la transformation de continu-continu (CC) au continu-alternatif (CA) et inversement, dans la littérature on trouve trois types de convertisseurs : les redresseurs, les hacheurs et les onduleurs. Les redresseurs réalisent la conversion CA/CC. Ils sont souvent utilisés pour charger des batteries à partir d'une source à CA, ce sont des appareils relativement simples, pas chers et a bon rendement. Les onduleurs sont des convertisseurs CC/CA. Ils peuvent fonctionner en autonome pour alimenter des charges à CA ou en parallèle avec des sources à CA. L'onduleur non autonome exige la présence d'une source à CC pour fonctionner. Il y a aussi des onduleurs qui peuvent assurer le fonctionnement : autonome ou en parallèle avec un autre générateur, Ceux-ci sont les plus flexibles, mais aussi les plus chers. Parfois, les fonctions de redresseur et d'onduleur sont réalisées par un seul appareil.

Les hacheurs sont des convertisseurs qui permettent de réaliser la conversion CC/CC pour adapter la tension entre deux sources [18].

I.6.1 Les convertisseurs DC-DC

Les hacheurs sont des convertisseurs du type continu-continu permettant de contrôler la puissance électrique dans des circuits fonctionnant en courant continu avec une très grande souplesse et un rendement élevé [1].

Son utilisation s'avère nécessaire pour stocker l'énergie photovoltaïque dans des batteries, ou pour alimenter une charge continue [8].

Les composants de l'hacheur (condensateurs, inductance et commutateurs) ne consomment aucune puissance active, c'est l'avenage pour laquelle on assure bons rendements.

L'interrupteur Q peut être remplacé par un transistor puisque le courant est toujours positif et que les commutations doivent être commandées (au blocage et à l'amorçage).

I.6.2 Les différents types de convertisseurs DC-DC [19]

I.6.2.1 Convertisseur Buck

Ce type de convertisseur est utilisé pour obtenir une tension continue fixe (et parfois régulée) à partir d'un générateur de tension continue supérieure.

Le schéma du convertisseur Buck est illustré à la figure I.11. Sur cette figure, nous représentons en fait le schéma du circuit avec les symboles transistor-diode. Dans la figure I.12, nous montrons cependant la représentation idéale du commutateur du même circuit de convertisseur.

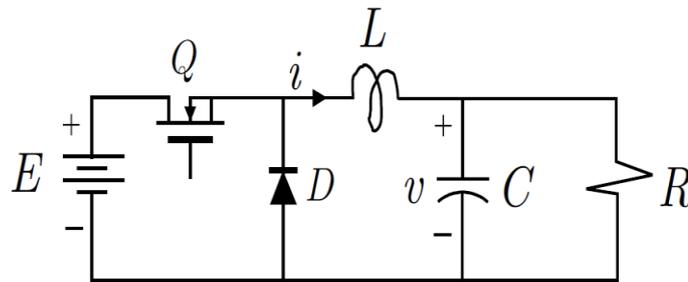


Figure I. 11: Réalisation semi-conductrice du convertisseur Buck.

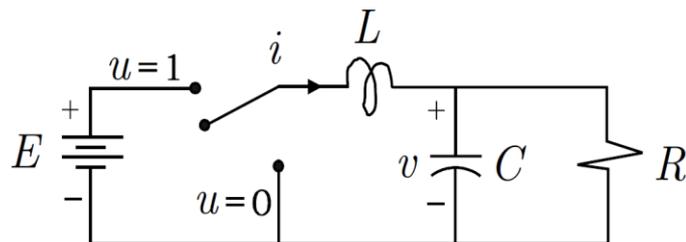


Figure I. 12: Représentation idéale du commutateur du convertisseur Buck.

Pour obtenir les équations différentielles décrivant le convertisseur Buck, nous considérons la topologie idéale présentée à la figure I.12.

Le système d'équations différentielles décrivant la dynamique du convertisseur Buck est obtenue par l'application directe des lois de Kirchoff pour chacune des topologies de circuit possibles découlant la valeur de position de commutateur supposée.

Ainsi, lorsque la position du commutateur présente la valeur $u=1$, on obtient la topologie correspondant au mode non conducteur de la diode. En variante, lorsque la position de commutateur Q présente la valeur $u=0$, on obtient la deuxième topologie de circuit possible correspondant au mode conducteur de la diode.

Nous laissons d'abord la position du commutateur à $u=1$, et nous appliquons les lois de Kirchoff sur les tensions et les courants au circuit résultant (voir figure I.13-a). On obtient alors le système d'équations différentielles suivant :

$$\begin{aligned} L \frac{di}{dt} &= -v + E \\ C \frac{dv}{dt} &= i - \frac{v}{R} \end{aligned} \quad (\text{I-16})$$

Lorsque la diode est en mode non conducteur, c'est-à-dire lorsque la position de commutateur est : $u=0$ (voir figure I.13-b), la dynamique du système est décrite par les équations différentielles suivantes :

$$\begin{aligned} L \frac{di}{dt} &= -v \\ C \frac{dv}{dt} &= i - \frac{v}{R} \end{aligned} \quad (\text{I-17})$$

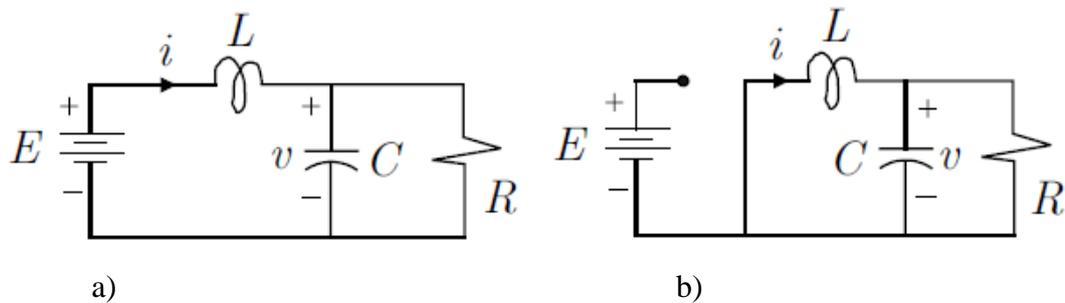


Figure I. 13: a) position du commutateur à $u=1$, b) position du commutateur à $u=0$

La seule caractéristique qui distingue le modèle moyen du modèle commuté sera alors l'entrée de commande u . Cela va sûrement rendre les choses sans équivoque. Le modèle moyen du convertisseur Buck est ensuite décrit par :

$$L \frac{di}{dt} = -v + u.E$$

$$C \frac{dv}{dt} = i - \frac{v}{R} \quad (\text{I-18})$$

À la limite entre les deux modes de conduction, la tension de sortie obéit aux expressions des deux modes. On utilisera celle donnée pour le mode de conduction continue :

$$v = u.E \quad (\text{I-19})$$

I.6.2.2 Convertisseur Boost

Ce type de convertisseur est utilisé pour obtenir une tension continue fixe (et parfois régulée) à partir d'un générateur de tension continue inférieur. Le schéma du convertisseur Buck est illustré à la figure I.14.

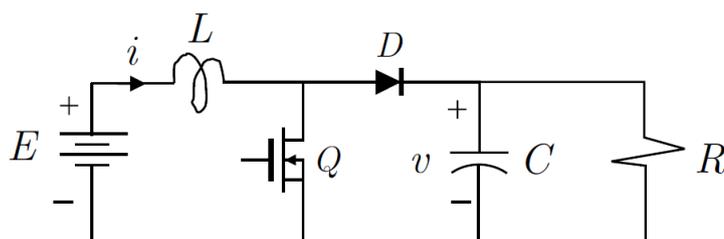


Figure I. 14: Schéma électrique du convertisseur Boost.

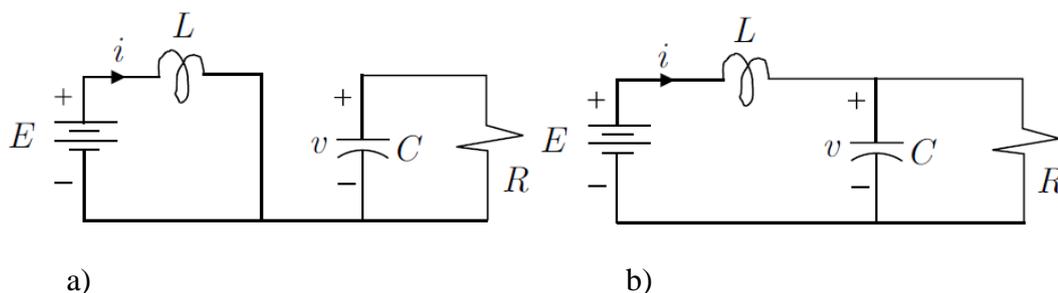


Figure I. 15: a) position du commutateur à $u=1$, b) position du commutateur à $u=0$.

Lorsque la position du commutateur Q est réglée sur $u = 1$ (figure I.15-a), nous obtenons, en utilisant la loi de Kirchoff, la dynamique décrite par l'ensemble d'équations suivantes,

$$L \frac{di}{dt} = E$$

$$C \frac{dv}{dt} = -\frac{v}{R} \quad (\text{I-20})$$

Lorsque la position du commutateur Q est réglée sur $u = 0$ (figure I.15-b), nous obtenons, en utilisant la loi de Kirchoff, la dynamique décrite par l'ensemble d'équations suivant,

$$L \frac{di}{dt} = -v + E$$

$$C \frac{dv}{dt} = i - \frac{v}{R} \quad (\text{I-21})$$

La dynamique du convertisseur Boost est alors décrite par le type de système bilinéaire suivant

$$L \frac{di}{dt} = -(1-u).v + E$$

$$C \frac{dv}{dt} = (1-u).i - \frac{v}{R} \quad (\text{I-22})$$

Les valeurs moyennes des paramètres de sortie en fonction des paramètres d'entrée sont données par l'équation suivante.

$$\frac{v}{E} = \frac{1}{(1-u)} \quad (\text{I-23})$$

I.6.2.3 Convertisseur Buck-Boost

Une autre disposition possible des commutateurs à semi-conducteurs laisse place à troisième type de convertisseur de courant continu-continu connu sous le nom de convertisseur Buck-Boost. En fait, ce nouveau convertisseur est obtenu en inter changeant la diode D et l'inductance L du convertisseur Buck. Le circuit est représenté sur la figure I-16. Ce convertisseur est également connu sous le nom de convertisseur hacheur-amplificateur. La différence fondamentale de cette classe de convertisseur avec les convertisseurs Buck et Boost est que la tension de sortie est de signe opposé à celle de la source constante E.

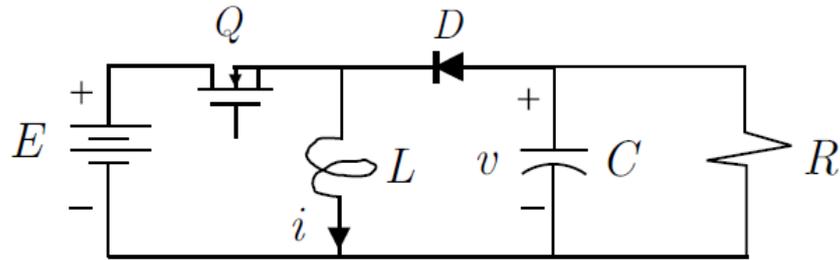


Figure I. 16: Schéma électrique du convertisseur Buck-Boost.

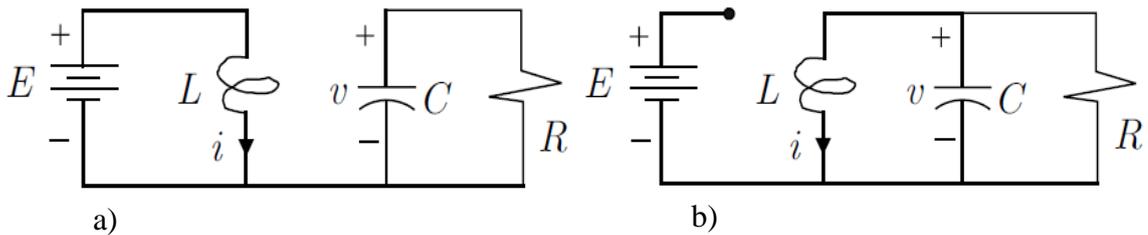


Figure I. 17: a) position du commutateur à $u=1$, b) position du commutateur à $u=0$

Le fonctionnement de ce système est le suivant lorsque le transistor est mis à l'état passant (état de conduction), la diode est polarisée en inverse générant une topologie de circuit qui est représentée sur la figure I.17-a. Pendant cette période, le courant inducteur est généré à partir de la tension de source E . Alors que la diode reste inversement polarisée, nous disons que le circuit fonctionne dans la "période de charge". Lorsque le transistor est sur l'état 0, la diode est directement polarisée générant la topologie du circuit représentée sur la figure I.17-b. Cette deuxième période est appelée "période de décharge" du fait que l'énergie stockée dans l'inductance L est transférée à la charge du système R . Lorsque les lois de Kirchoff sont appliquées aux deux topologies de circuit de la figure I.17, et que les modèles obtenus sont combinés en un seul modèle dynamique. Le système d'équations différentielles décrivant le convertisseur Buck-Boost est le suivant :

$$\begin{aligned} L \frac{di}{dt} &= (1-u).v + u.E \\ C \frac{dv}{dt} &= -(1-u).i - \frac{v}{R} \end{aligned} \quad (I-24)$$

Les valeurs moyennes des paramètres de sortie en fonction des paramètres d'entrée sont données par l'équation suivante :

$$\frac{v}{E} = \frac{-u}{(1-u)} \quad (I-25)$$

I.7 Conclusion

Ce chapitre est dédié à présenter le principe de l'effet photovoltaïque, la forme d'une photopile (cellule photovoltaïque) et ses paramètres après on a discuté sur le modèle PV et leur performance en fonction les conditions climatiques tels que la température et l'éclairement. En suite en a vu le différents type de convertisseur DC-DC (hacheurs) qui jouent un rôle très important dans les systèmes PV.

Le prochain chapitre en va présenter une étude sur les différents algorithmes de la commande MPPT pour chercher le point de puissance maximale du générateur photovoltaïque.

Chapitre II

**Algorithmes de poursuite de
point de puissance maximale
(MPPT) pour un système PV**

II.1 Introduction

Comme on a vu dans le chapitre précédent, les caractéristiques d'un module PV dépendent fortement de l'intensité des radiations solaires et de la température.

La courbe caractéristique de puissance du GPV présente un point de puissance maximale MPP (Maximum Power Point) correspondant à un certain point de fonctionnement de coordonnées V_{MPP} pour la tension et I_{MPP} pour le courant comme illustré dans la figure suivante.

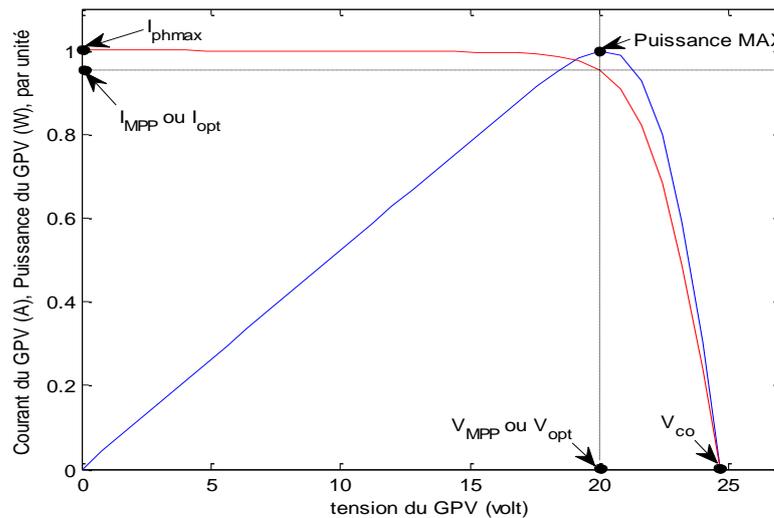


Figure II. 1: Les coordonnées V_{MPP} et I_{MPP} qui correspondent le point de puissance max

Une commande MPPT permet alors de piloter le convertisseur statique pour extraire le point de puissance maximale du GPV.

Le but de ce chapitre est d'étudier des différentes techniques de commande MPPT utilisant un convertisseur DC-DC (hacheur) survolteur avec différents scénarios, tels que les conditions climatiques standard, profile variable de la température et de l'éclairement, et avec charge variable.

II.2 Dimensionnement du hacheur Boost

Les calculs des paramètres de l'hacheur Boost se fait à l'aide les formules ci-dessous :

- ❖ Le rapport cyclique maximal $\langle\langle D \rangle\rangle$

$$D = 1 - \frac{V_{pv(\min)}}{V_c} \cdot \eta \tag{II.1}$$

$V_{PV(\min)}$: tension du GPV minimale.

V_C : tension de sortie désirée.

η : rendement de convertisseur estimé à 85% [20].

❖ Calcul de l'inductance <<L>>

Le calcul de la valeur d'inductance recommande calculer le courant d'ondulation.

$$\Delta I_L = \frac{V_{PV(\min)} \cdot D}{f_s \cdot L} \quad (\text{II.2})$$

D : rapport cyclique calculé par l'équation (II.1)

f_s : fréquence de commutation minimale du convertisseur

L : valeur d'inductance sélectionnée

Lorsqu'aucune plage d'inductance n'est indiquée, l'équation suivante est une bonne estimation pour l'inductance L [20].

$$L = \frac{V_{PV} (V_C - V_{PV})}{\Delta I_L \cdot f_s \cdot V_C} \quad (\text{II.3})$$

V_{PV} : voltage d'entrée (du GPV) typique.

ΔI_L : courant d'ondulation de l'inductance estimé.

❖ Calcule du condensateur d'entrée <<C₁>>

La valeur minimale du condensateur d'entrée est normalement donnée dans la feuille de cahier de charge. Cette valeur minimale est nécessaire pour stabiliser la tension d'entrée en raison de l'exigence de courant de crête d'une alimentation à découpage [20].

❖ Calcul du condensateur de sortie <<C₂>>

Les équations suivantes peuvent être utilisées pour ajuster les valeurs du condensateur de sortie pour une ondulation de tension de sortie souhaitée [20].

$$C_{2-\min} = \frac{I_{\text{sortie}(\max)} \cdot D}{\Delta V_{\text{sortie}} \cdot f_s} \quad (\text{II.4})$$

$I_{\text{sortie}(\max)}$: Courant maximal de sortie.

ΔV_{sortie} : Ondulation de la tension de sortie.

La résistance série équivalente (ESR) du condensateur de sortie ajoute un peu plus d'ondulation, donnée par l'équation suivant :

$$\Delta V_{\text{sortie}(ESR)} = ESR \cdot \left(\frac{I_{\text{sortie}(\max)}}{1-D} + \frac{\Delta I_L}{2} \right) \quad (\text{II.5})$$

$\Delta V_{\text{sortie}(ESR)}$: Ondulation de la tension de sortie supplémentaire qui convient aux condensateurs

ESR : résistance série équivalente.

II.3 Principe de la méthode (algorithme) de poursuite de point de puissance maximale

Le schéma de principe de fonctionnement d'un système photovoltaïque commandé par MPPT est donné par la figure II.2.

La poursuite du point de puissance maximale (MPPT) [8] est une commande essentielle pour un fonctionnement optimal du système photovoltaïque. Le principe de cette commande est basé sur des algorithmes de recherche itérative pour trouver le point de fonctionnement du module solaire pour que la puissance générée soit maximale sans interruption de fonctionnement du système. Elles ne sont pas basées sur des valeurs de références prédéfinies ou à partir des paramètres opérationnels, mais sur la maximisation permanente de la puissance générée par les modules photovoltaïques [21].

La puissance extraite du module est calculée à partir des mesures de courant i_{pv} et de tension v_{pv} du module et la multiplication de ces deux grandeurs [21].

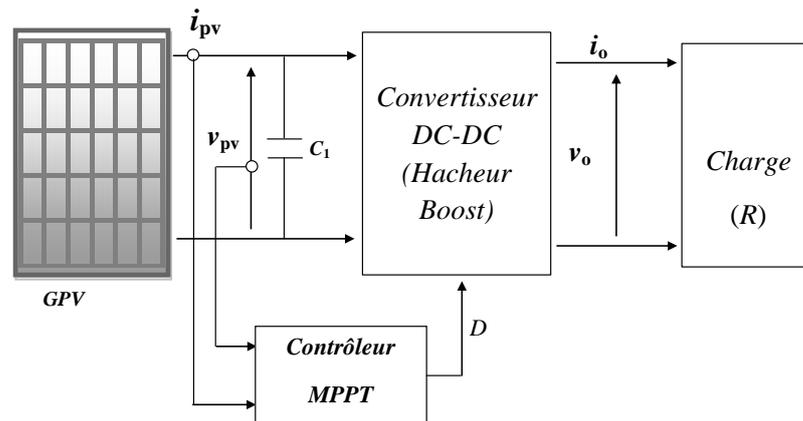


Figure II. 2: Schéma synoptique d'un système PV commandé par MPPT.

Les algorithmes MPPT trouvés dans la littérature sont probablement divisés en deux classes 1) la commande MPPT direct qui délivre directement le rapport cyclique du convertisseur à partir du courant et de tension mesurée du GPV 2) la commande MPPT indirect qui utilise deux étages de commande, l'un pour délivrer la tension/courant optimale du GPV, et l'autre pour délivrer le rapport cyclique afin de maintenir la tension/courant du GPV à la tension/courant optimale.

II.4 Les méthodes MPPT classiques

II.4.1 La méthode de perturbation et observation (P&O)

D'abord, il est à noter que la courbe caractéristique $p_{pv}-v_{pv}$ est découpée en deux demi plans (droite et gauche) par le point de puissance maximale (P_{max}) comme indiqué sur la figure suivante :

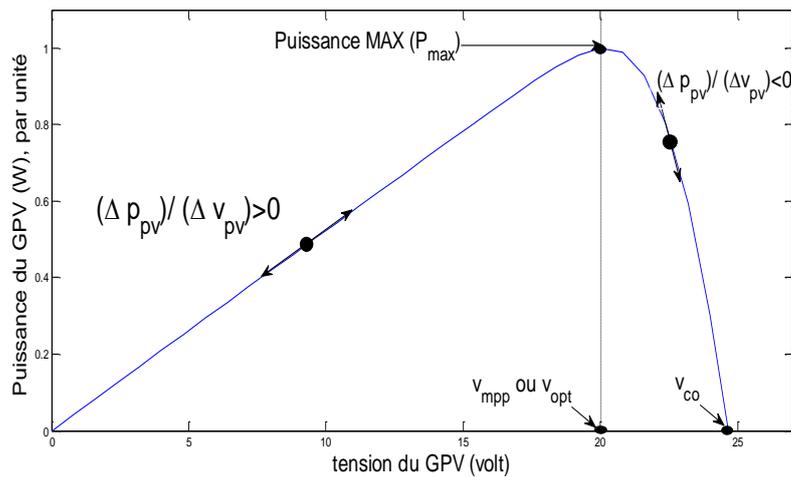


Figure II. 3: Signe de la variation de la puissance par rapport à la variation de la tension du GPV dans le plan $p_{pv}-v_{pv}$.

Le principe de cet algorithme est de provoquer une perturbation en agissant (diminution ou augmentation) sur le rapport cyclique de la commande MLI et l'observation de l'effet sur la puissance de système PV. Si la puissance instantanée $P_{pv}(k)$ est supérieure à la puissance calculée précédente $P_{pv}(k-1)$, alors la direction de perturbation doit conserver sinon il est inversé [22]. Ceci peut être détaillé comme suit : Si la variation de la puissance par rapport à la variation de la tension du GPV est supérieur à 0 ($\frac{\Delta P_{PV}}{\Delta V_{PV}} > 0$), on est dans le demi-plan gauche, alors la tension doit être augmentée pour aller vers le MPP, ceci est fait à travers la diminution du rapport cyclique :

$$D(K) = D(K - 1) - \Delta D \quad (II.6)$$

Quand $\frac{\Delta P_{PV}}{\Delta V_{PV}} < 0$, on est dans le demi-plan droit, alors la tension doit être diminuée par

l'incrémentation du rapport cyclique avec un pas ΔD :

$$D(K) = D(K - 1) + \Delta D \tag{II.7}$$

L'organigramme de l'algorithme perturber et observer (P&O) est donné par la figure suivante.

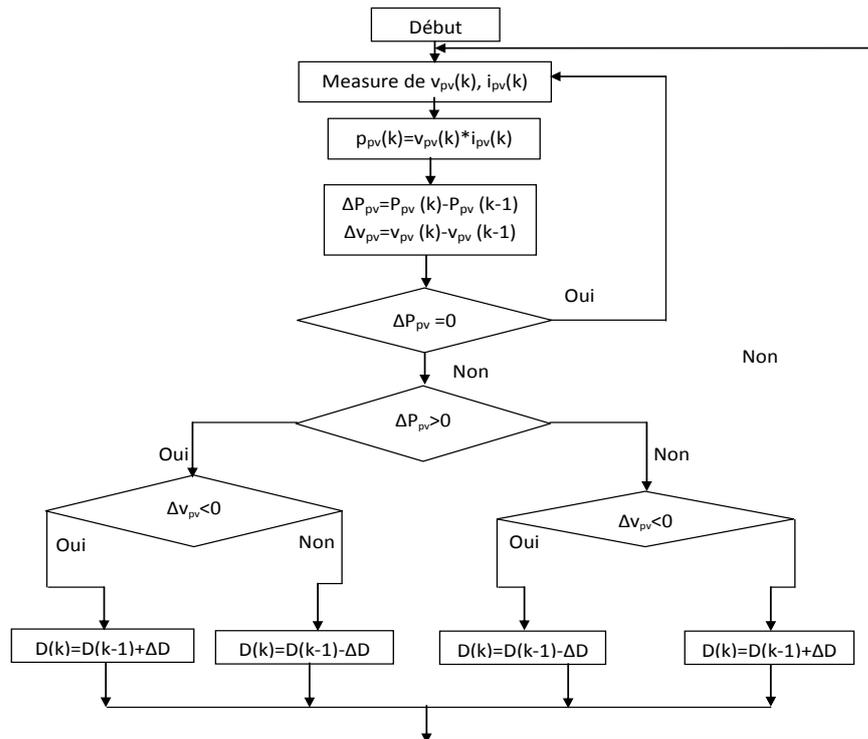


Figure II. 4: Organigramme de l'Algorithme P&O [23].

Remarque : Les inconvénients majeurs de cet algorithme et les autres qu'utilise un pas fixe pour mettre à jour le rapport cyclique sont, 1) Les oscillations de grande amplitude avec un temps de réponse rapide si ΔD est grand, 2) Un temps de réponse lent avec des petites oscillations autour la MPP si ΔD est petit.

II.4.1.1 Résultat de simulation de la méthode P&O

II.4.1.1.1 Simulation avec les conditions climatiques standard

La simulation du problème de poursuite de point de puissance maximale pour une charge résistive $R=25\Omega$ avec la méthode P&O a été effectuée en utilisant l'outil Matlab/Simulink avec un pas de simulation 10^{-4} second, et pas de perturbation du rapport cyclique $\Delta D=0.001$.

Les paramètres du convertisseur Boost sont : $C_1=1000e-6$ F, $C_2=470e-6$ F, $L=0.5e-3$ H.

Les figures suivantes représentent le résultat de simulation avec les conditions climatiques standard ($G=1000\text{W}/\text{m}^2$ et $T=298\text{K}$). La figure II.5 à gauche représente la puissance du GPV, et la figure II.5 à droite représente le rapport cyclique. On peut voir que la puissance maximale est atteinte mais avec des oscillations qui provoquent une perte de puissance significative. Avant de stabiliser, la puissance chute de $P_{\max} = 61,92$ watts à 22,5 watts, et retourner à P_{\max} dans un court laps de temps. Ceci est fait avec presque 48% du cycle de service.

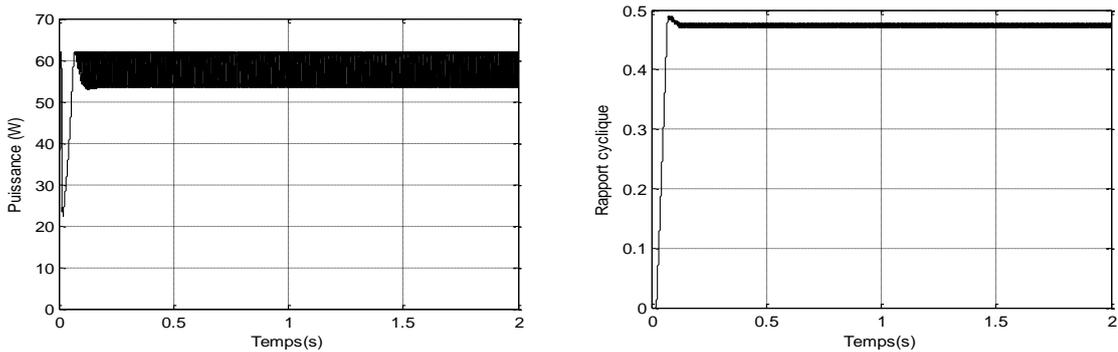


Figure II. 5:Résultats de simulation avec l'algorithme P&O pour $G=1000\text{W}/\text{m}^2$ et $T=298\text{K}$.

II.4.1.1.2 Simulation avec profil d'éclairement et de température variable

Dans ce scénario, l'algorithme P&O est effectué sous un profil variable de température et d'éclairement, comme illustré dans la figure II.6. Ce profil est généralement utilisé, pour tester la capacité des contrôleurs MPPT à gérer efficacement les variations lentes de l'éclairement et de la température. L'éclairement et la température sont réglés respectivement à $600\text{w}/\text{m}^2$ et 298 Kelvin dans l'intervalle de temps $[0\ 0.5]$ s, et respectivement à $400\text{W}/\text{m}^2$ et 288 Kelvin dans l'intervalle $[1.6\ 2]$ s. Dans l'intervalle $[0.5\ 1]$ s, l'éclairement augmente progressivement de 600 à $1000\text{w}/\text{m}^2$, et la température de 298 à 318 Kelvin. Dans l'intervalle $[1.3\ 1.6]$ s, l'éclairement diminue progressivement de 1000 à $400\text{w}/\text{m}^2$ et la température de 318 à 288 Kelvin. Les résultats de simulation sont donnés par la figures II.7. On observe que la stratégie P&O force le système de suivre le point de puissance maximale il est à remarquer aussi que la puissance prend la forme de l'éclairement. Avec les changements d'éclairement et de température, le point de puissance maximale change également son position et la commande MPPT agisse pour suivre ce nouveau point.

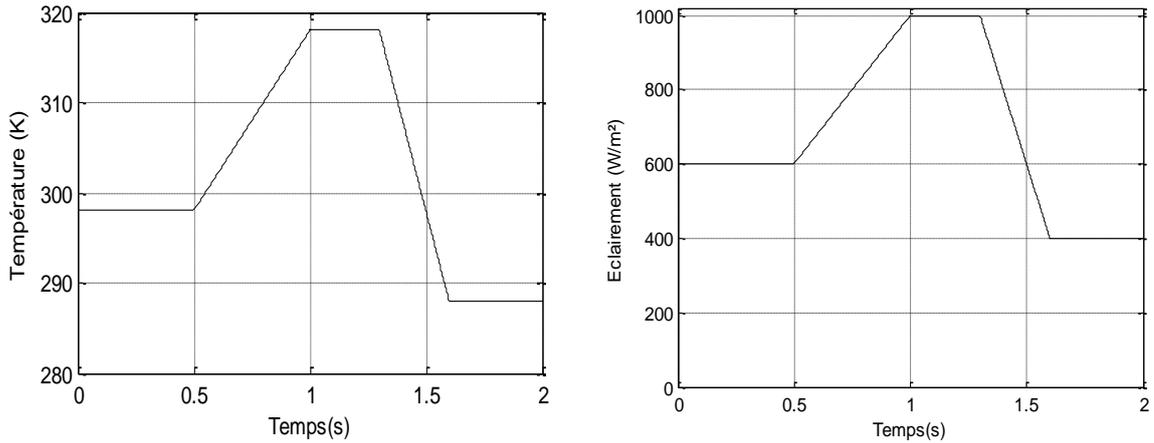


Figure II. 6 : Profile variable d'éclairement et de température

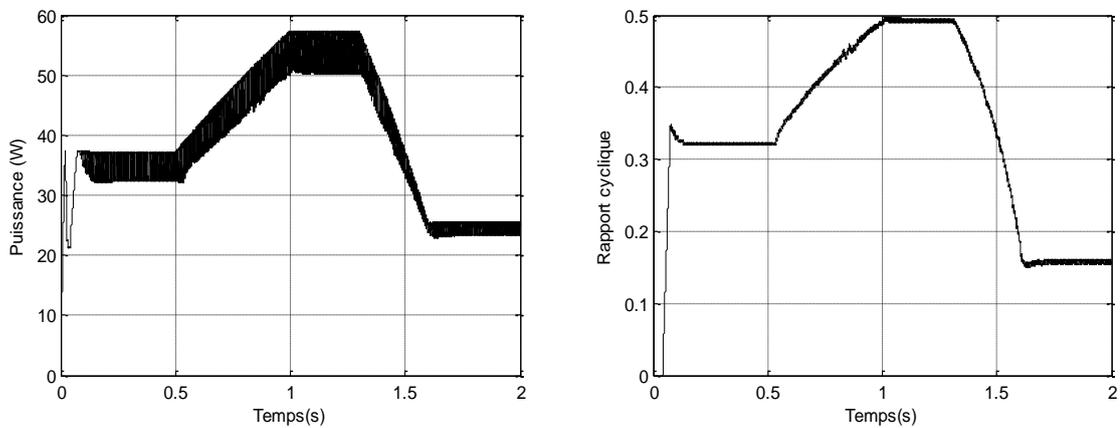


Figure II. 7: Résultats de simulation avec l'algorithme P&O pour un profile variable d'éclairement et de température.

II.4.1.1.3 Simulation pour variation brusque de la charge résistive R

Le système est simulé sous un changement brusque à l'instant $t=1s$ de la charge résistive R de 15Ω à 25Ω , avec $G = 1000 \text{ W / m}^2$ et $T = 25 \text{ }^\circ\text{C}$. Les résultats de simulation sont donnés par les figures suivantes. Ces figures montrent qu'une augmentation brusque de R produit une augmentation brusque du rapport cyclique de 0.34 à 0.48 afin de suivre le point de puissance maximale du PVG. Dans la figure II.8 à gauche, lorsque de la variation brusque de la charge résistive (R) de 15Ω à 25Ω à l'instant 1s, la puissance du module PV chute de $P_{max} = 61,92$ watts à 50 watts, et retourner à P_{max} dans court laps de temps. L'amplitude des oscillations sont aussi augmentées avec augmentation de la valeur de charge.

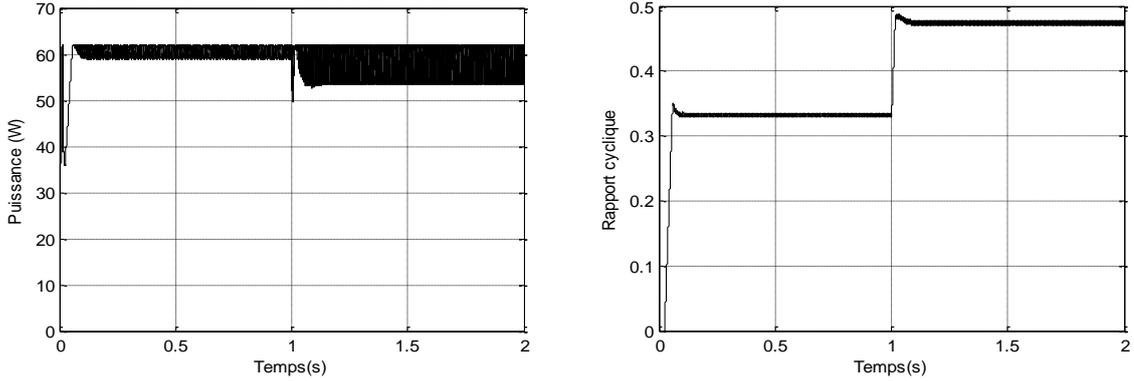


Figure II. 8: Résultats de simulation avec l'algorithme P&O pour variation brusque de la charge R

II.4.2 La méthode de conductance incrémentale (INC)

Dans cet algorithme, la dérivée de la puissance de sortie par rapport à la tension du module PV est calculée. Cette dérivée (dp_{pv}/dv_{pv}) est nulle au point de puissance maximale, positive sur la gauche et négative sur la droite du point de puissance maximale. Puisque la puissance du module PV est donnée par $p_{pv} = v_{pv} \cdot i_{pv}$, la dérivée (dp_{pv}/dv_{pv}) est donnée par [24] :

$$\frac{dp_{pv}}{dv_{pv}} = i_{pv} + v_{pv} \cdot \frac{di_{pv}}{dv_{pv}} \quad (II.8)$$

Lorsque la puissance maximale est atteinte, la différenciation de la puissance du module PV par rapport à la tension du module PV (dp_{pv}/dv_{pv}) tend vers zéro, et puis ($v_{pv} \cdot di_{pv}/dv_{pv} + i_{pv} = 0$), cela nous donne.

$$\frac{i_{pv}}{v_{pv}} + \frac{di_{pv}}{dv_{pv}} = 0 \quad (II.9)$$

Nous définissons la conductance instantanée par $G = i_{pv}/v_{pv}$, et la conductance incrémentale par $\Delta G = di_{pv}/dv_{pv}$. Puisque la tension v_{pv} du panneau PV est toujours positive, le point de puissance maximale est atteint si $G + \Delta G = 0$. Le point de fonctionnement du système est à gauche de ce point lorsque $G + \Delta G > 0$ et vice versa, comme indiqué ci-après :

$$\begin{aligned} \frac{dp_{pv}}{dv_{pv}} &> 0 \quad \text{si} \quad G + \Delta G > 0 \\ \frac{dp_{pv}}{dv_{pv}} &= 0 \quad \text{si} \quad G + \Delta G = 0 \\ \frac{dp_{pv}}{dv_{pv}} &< 0 \quad \text{si} \quad G + \Delta G < 0 \end{aligned} \quad (II.10)$$

La figure II.9 montre l'organigramme de l'algorithme INC, qui est basé sur la perturbation direct du rapport cyclique pour contrôler le convertisseur DC-DC. Lorsque $G + \Delta G = 0$ alors $\Delta D = 0$, lorsque $G + \Delta G > 0$ alors ΔD est négatif, et lorsque $G + \Delta G < 0$ alors ΔD est positif.

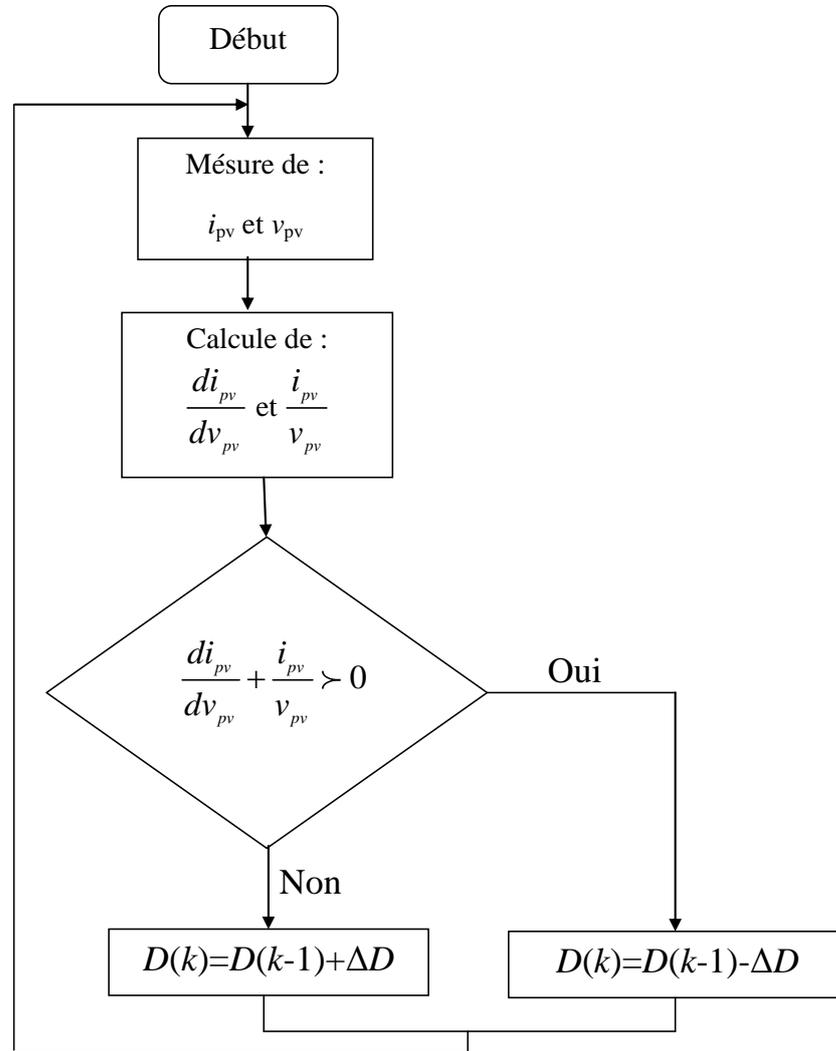


Figure II. 9: Organigramme de l’algorithme de Conductance Incrémentale [25].

II.4.2.1 Résultat de simulation de la méthode de conductance incrémentale (INC)

La simulation du problème de poursuite de point de puissance maximale avec la méthode INC a été effectuée avec un pas de simulation 10^{-4} second et pas de perturbation du rapport cyclique $\Delta D = 0.001$.

Les figures suivantes représentent le résultat de simulation pour les trois scenarios qu’on a vu précédemment avec la méthode P&O. D’après ces figures on peut conclure que la méthode de conductance incrémentale a donnée des meilleurs résultats que la méthode P&O en termes de temps de réponse et oscillations autour le point de puissance maximale.

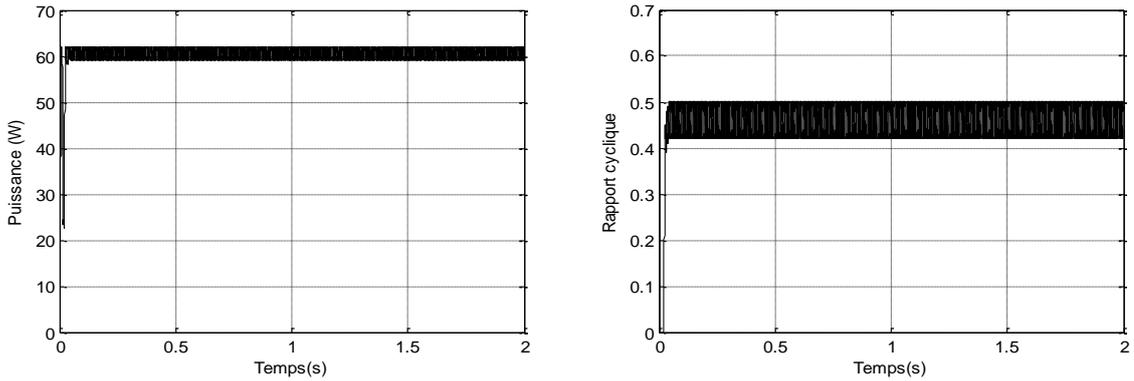


Figure II. 10 : Résultats de simulation avec l’algorithme INC pour $g=1000w/m^2$ et $T=298k$.

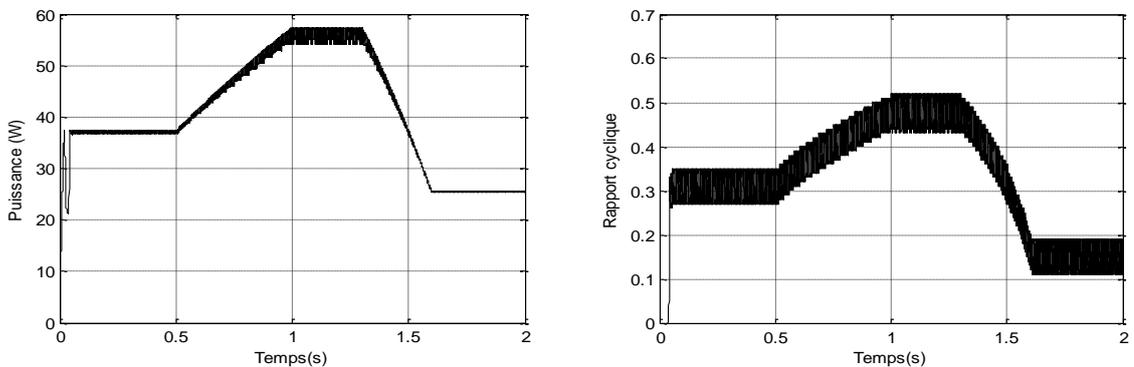


Figure II. 11 : Résultats de simulation avec l’algorithme INC pour un profil variable d’éclairement et de température

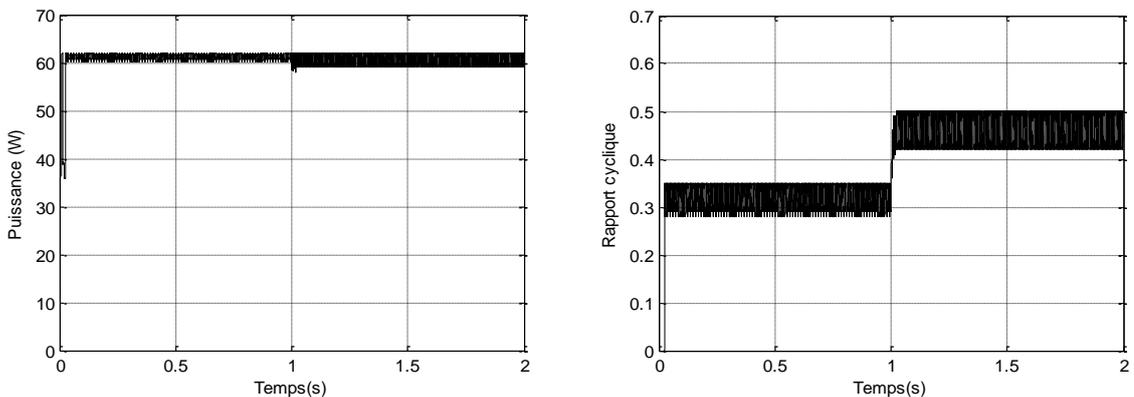


Figure II. 12 : Résultats de simulation avec l’algorithme INC pour variation brusque de la charge R.

II.4.3 Algorithme de conductance incrémental indirect basé sur un régulateur PI

L’organigramme de cet algorithme est donné par la figure suivante. L’algorithme de conductance incrémentale est utilisé pour délivrer la tension optimale (où de référence) v_{opt} . Le deuxième étage de commande c’est un régulateur proportionnel intégral (PI) utilisé pour réguler la tension du module PV à la tension optimale générée à partir du premier étage. Ce contrôleur

MPPT a également été conçu pour améliorer l'algorithme classique (INC direct) car l'utilisation d'un contrôleur PI peut aider à atteindre la puissance maximale et à augmenter la précision en réduisant l'erreur en régime permanent commise par le premier étage du contrôleur MPPT pendant la recherche du point de puissance maximale [26, 27].

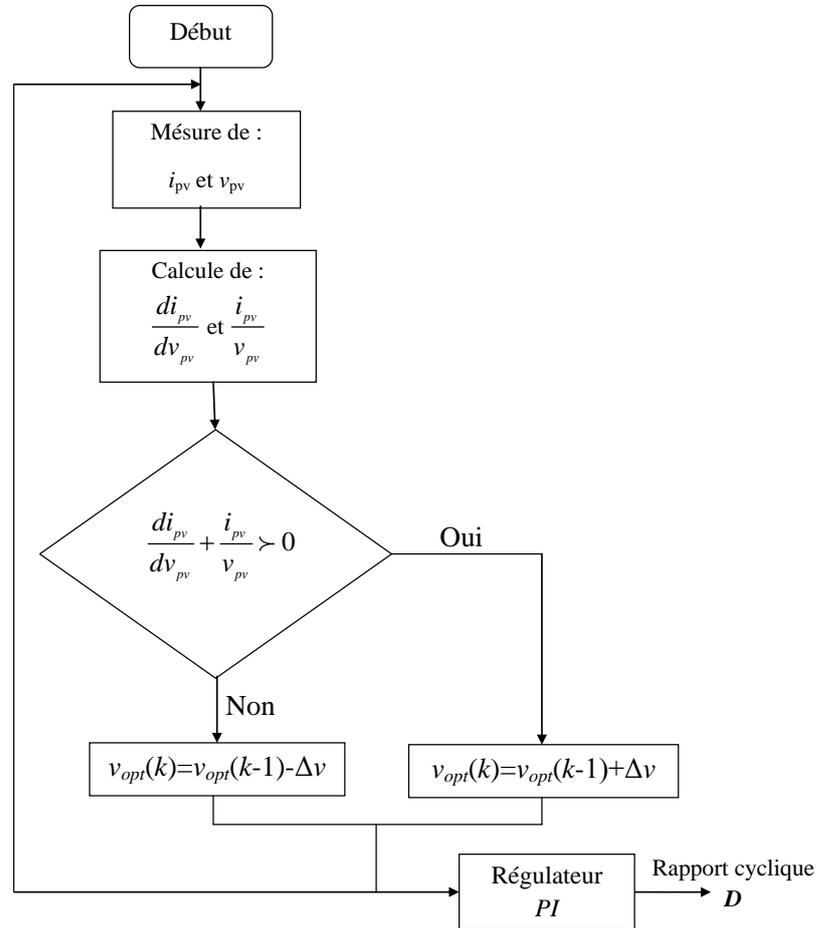


Figure II. 13: Organigramme de l'algorithme de conductance incrémental indirect.

Le régulateur PI est donné par l'équation suivante :

$$D(t) = k_p \cdot (v_{pv}(t) - v_{opt}(t)) + k_i \cdot \int_0^{t_f} (v_{pv}(t) - v_{opt}(t)) \quad (\text{II.11})$$

Avec $v_{pv}(t) - v_{opt}(t) = e(t)$, et la fonction de transfert du régulateur PI est alors donnée par :

$$FT(s) = \frac{D(s)}{e(s)} = k_p + \frac{k_i}{s} \quad (\text{II.12})$$

Avec S c'est l'opérateur de Laplace.

Remarque : L'organigramme de la figure II.13 montre que la tension optimale v_{opt} a un effet sur la recherche du point de puissance dans le deuxième étage de la commande avec PI. Si le pas Δv est fixe, les problèmes suivants apparaissent : 1) une fois Δv est petit, la réponse du contrôleur est trop lente, ce qui provoque des pertes de puissance et 2) quand Δv est grand, erreur de calcul et des oscillations indésirables apparaissent dans les résultats du contrôleur. Si la loi de commande est bien conçue, c'est-à-dire que le PI atteint ses meilleures performances, à ce moment la tension du module PV atteint la tension optimale et le P_{max} est atteint. Cependant, les paramètres du PI doivent être choisis de manière à stabiliser le rapport cyclique D dans la plage $0 < D < 1$.

II.4.3.1 Résultat de simulation de la méthode INC indirect avec régulateur PI

La simulation du système PV contrôlé à l'aide de l'algorithme INC indirect avec régulateur PI est effectuée avec un temps d'échantillonnage de $1e-4$ sous les trois scénarios qu'on a vu précédemment. Les paramètres utilisés dans cette simulation sont les suivants :

- Paramètres du régulateur PI : $k_p=0.2$, $k_i=25$.
- Pas d'incrément de la tension v_{pv} : $\Delta v=0.5$ volt.

Les résultats de simulation sont donnés par les figures suivantes on peut dire que les oscillations autour le point de puissance maximale sont moins qu'avec l'algorithme INC direct.

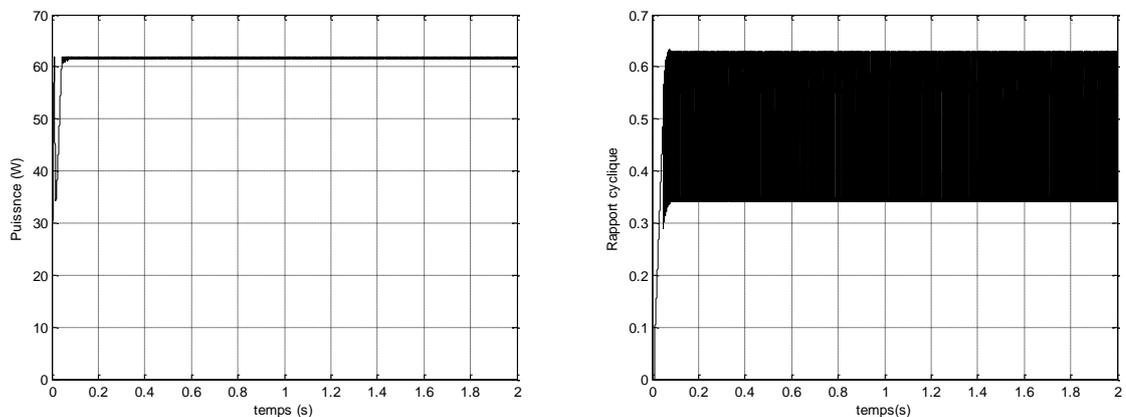


Figure II. 14 : Résultats de simulation avec l'algorithme INC-indirect pour $G=1000W/m^2$ et $T=298K$.

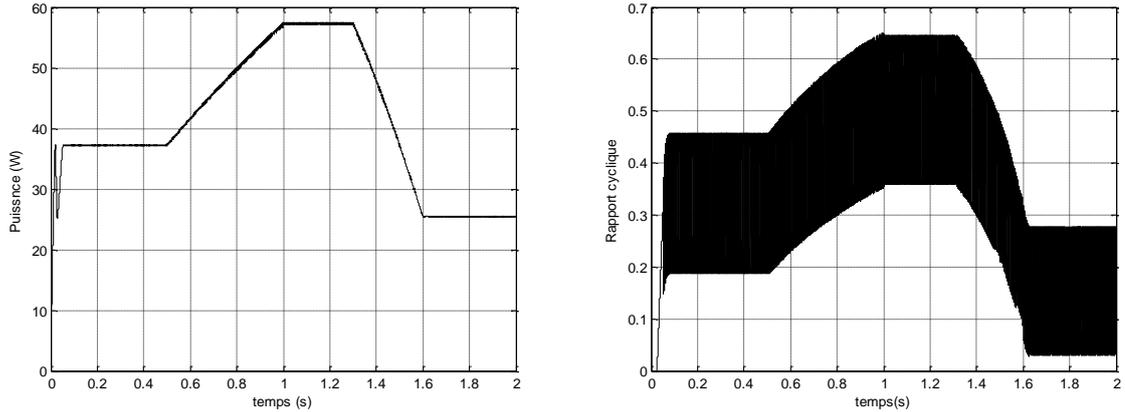


Figure II. 15 : Résultats de simulation avec l'algorithme INC-indirect pour un profil variable d'éclairage et de température.

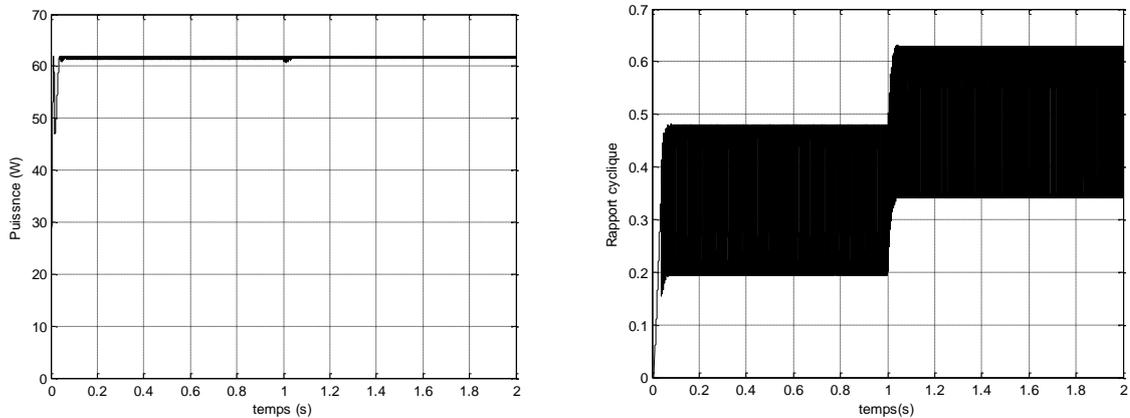


Figure II. 16:Résultats de simulation avec l'algorithme INC-indirect pour variation brusque de la charge R.

II.5 Méthodes basées sur l'intelligence artificielle (logique floue)

Récemment, les régulateurs à logique floue ont été introduits dans la poursuite de point de puissance maximale pour les systèmes PV. Ils ont l'avantage d'être robustes et relativement simples à concevoir car ils n'exigent pas la connaissance du modèle exact. Ils nécessitent en revanche la connaissance complète du fonctionnement du système PV par le concepteur [22]. Pour ce régulateur, il y a beaucoup de manières de présenter ses étapes de conception, mais en général il se divise en trois parties, 1) Fuzzification: qui est le processus de transformation d'une grandeur réelle mesurée en ensembles flous ceci est réalisé par de nombreux types de fuzzifiers (fonctions d'appartenance), et des règles floues 2) Méthode d'inférence : consiste à utiliser le moteur d'inférence, qui est un mécanisme permettant de condenser l'information d'un système à travers un ensemble de règles définies pour la représentation de tout problème. Chaque règle fournit une conclusion partielle qui est ensuite agrégée aux autres règles pour fournir une conclusion (agrégation), la méthode d'inférence couramment utilisée est le MAX-MIN utilisé

dans ce mémoire, 3) Défuzzification : la méthode couramment utilisée est la méthode de centre de gravité. Le régulateur flou est résumé par la figure suivante.

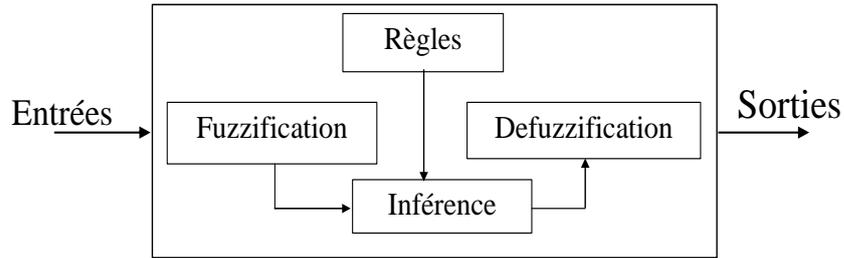


Figure II. 17 : Schéma général d'un contrôleur flou.

II.5.1 MPPT direct à base de la logique floue

Le régulateur flou utilise la base de l'algorithme de conductance incrémentale pour la maximisation de la puissance du module PV afin de garantir que la somme de la conductance du module PV et de son incrémental ($G+\Delta G$) est nulle. Le contrôleur flou a une entrée ($E= G+\Delta G$) et une sortie (ΔD).

L'entrée du régulateur flou est donnée par l'équation suivante [28] :

$$E = \left(\frac{\partial i_{pv}}{\partial v_{pv}} + \frac{i_{pv}}{v_{pv}} \right) = (G + \Delta G) \quad (\text{II.13})$$

En supposant que l'entrée et la sortie du régulateur flou ont cinq variables linguistiques, ses fonctions d'appartenance sont montrées dans la figure II.18. Avec :

NG (Négative Grand), **NP** (Négative Petit), **ZE** (Zéro), **PG** (Positive Grand), **PP** (Positive Petit).

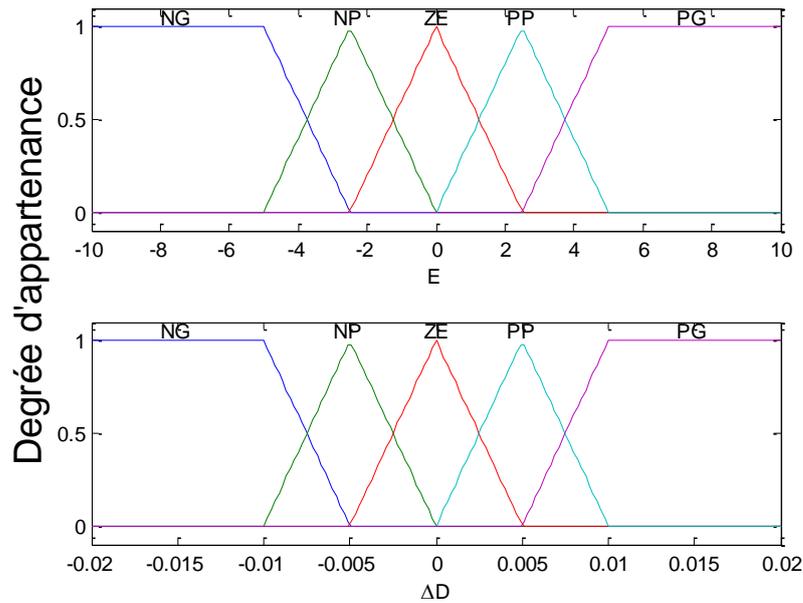


Figure II. 18: Fonctions d'appartenance de l'entrée E et de la sortie ΔD pour MPPT-Flou direct.

La base de règles qui associe la sortie à l'entrée du régulateur flou est dérivée de la connaissance du comportement du système de la figure II.3. Si $E > 0$ (PG ou PP), le point de fonctionnement est situé sur le demi-plan gauche de la courbe $p_{pv}-v_{pv}$, le rapport cyclique devient élevé et le régulateur doit diminuer le rapport cyclique (ΔD devient NG ou NP) pour atteindre le point de puissance maximale. Si $E < 0$ (NG ou NP), le point de fonctionnement est situé sur le demi-plan droite de la courbe $p_{pv}-v_{pv}$, le rapport cyclique devient faible et le régulateur doit augmenter le rapport cyclique (ΔD devient PG ou PP) pour atteindre le point de puissance maximale. Si $E = 0$ (ZE), le point de fonctionnement est au point de puissance maximale, alors le pas ΔD sera égal à zéro (ZE). A base de ces concepts, les règles floues sont données dans le tableau II.1.

	Région 1		Région 2	Région 3	
Entrée E	NG	NP	ZE	PP	PG
Sortie ΔD	PG	PP	ZE	NP	NG

Tableau II. 1 : Règles du régulateur MPPT flou direct utilisé

La méthode du centre de gravité a été utilisée pour le processus de défuzzification qui convertit le sous-ensemble flou de ΔD en nombres réels, comme présenté dans l'équation suivante :

$$\Delta D = \frac{\sum_{j=1}^n \mu(\Delta D_j) \cdot \Delta D_j}{\sum_{j=1}^n \mu(\Delta D_j)} \quad (\text{II.14})$$

Où ΔD_j est le centre de la composition Max-Min à la fonction d'appartenance de sortie.

II.5.1.1 Résultat de simulation de la méthode MPPT directe à base de logique floue

Les résultats de simulation pour les conditions climatiques standards, éclairement et température variable, et variation brusque de la charge sont donnés respectivement par les figures suivantes. D’après ces figures on peut dire que le régulateur MPPT-floue a donné des résultats meilleurs que toutes les méthodes discutées précédemment où les oscillations autour le point de puissance maximale sont nuls. La commande (évolution du rapport cyclique) est aussi lisse par rapport les méthodes précédentes.

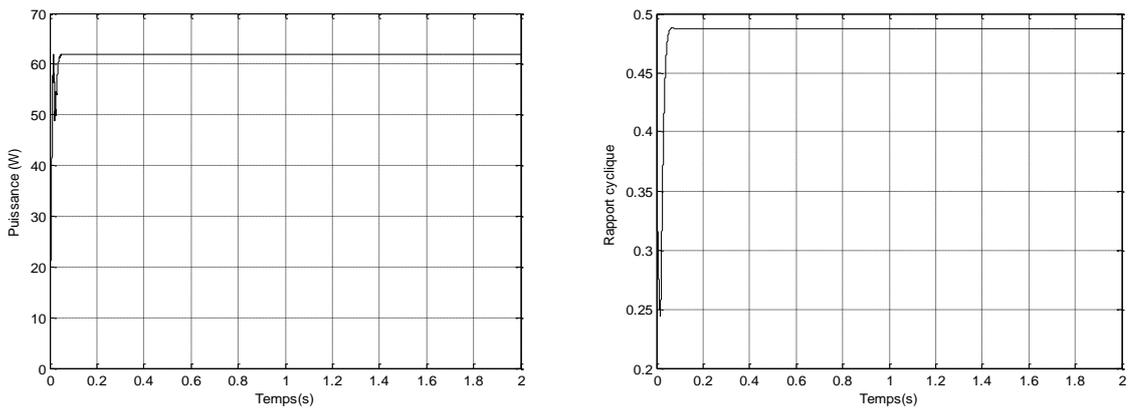


Figure II. 19 : Résultats de simulation avec l’algorithme MPPT-floue direct pour $G=1000W/m^2$ et $T=298K$.

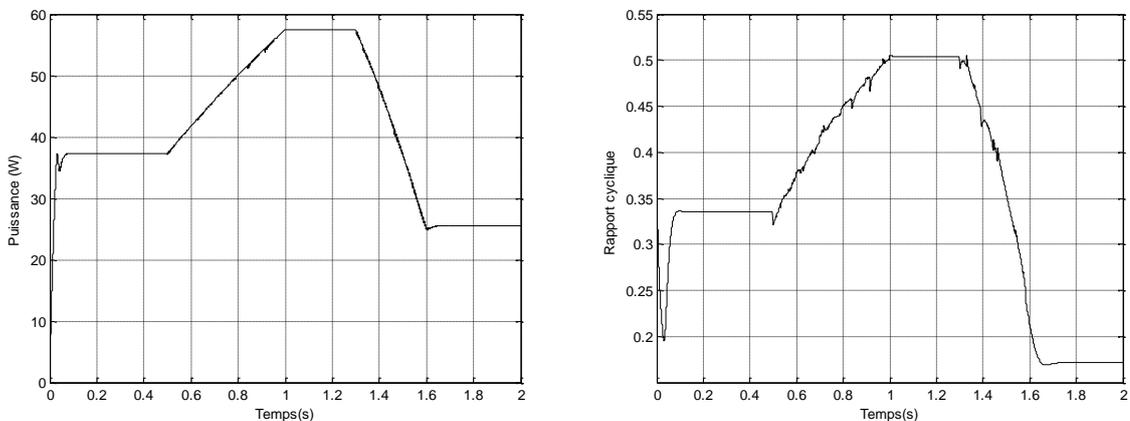


Figure II. 20:Résultats de simulation avec l’algorithme MPPT-floue direct pour un profil variable d’éclairage et de température.

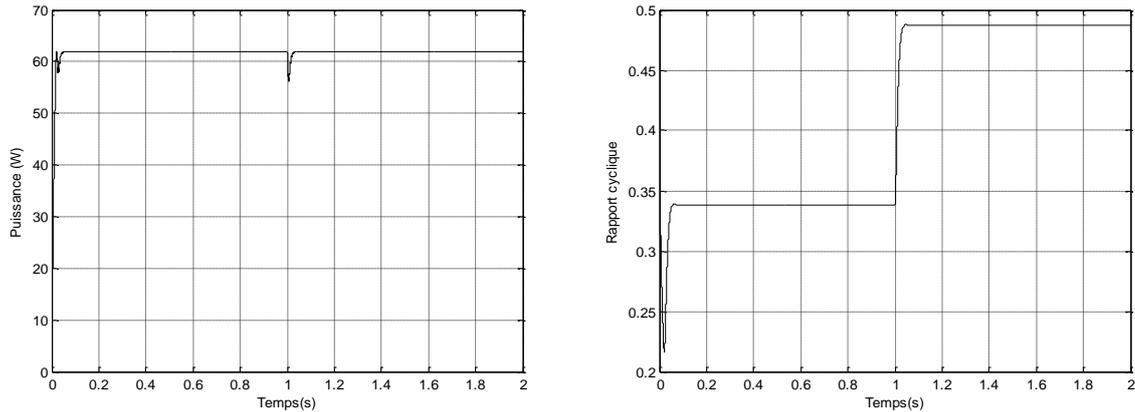


Figure II. 21: Résultats de simulation avec l'algorithme MPPT-floue direct pour variation brusque de la charge R.

II.5.2 Algorithme de conductance incrémental indirect à base d'un régulateur floue

Dans l'algorithme de conductance incrémental indirect on a utilisé un régulateur PI pour réguler la tension du générateur PV, ce régulateur est facile à concevoir et simples à mettre en œuvre. Cependant, il présente certains inconvénients tels que, la dépendance des performances sur le point de fonctionnement, la nécessité de réajuster les paramètres du régulateur lorsque des changements de tension de référence ou de paramètres de charge sont produits et la complexité de la conception des paramètres du régulateur et des problèmes de stabilisation associés, etc. pour surmonter à ces problèmes, on va remplacer le régulateur PI par un régulateur floue.

Avec cette méthode le contrôleur MPPT s'appuie sur la simplicité de la technique de conductance incrémentale pour calculer v_{opt} .

Dans ce contrôleur, l'erreur (E) qui est $v_{pv} - v_{opt}$ est sélectionnée comme entrée du régulateur flou et le pas d'incrémental du rapport cyclique (ΔD) est alors calculée comme sortie : le pas ΔD est rajouté à l'ancien valeur du rapport cyclique ($D(k-1)$) pour donner le rapport cyclique actuel ($D(k)$) [29].

Le signe de l'entrée $E(k) = v_{pv}(k) - v_{opt}(k)$ indique le point de fonctionnement du système PV à l'instant k est situé à gauche ou à droite du point de puissance maximale sur la caractéristique PV comme illustré dans la figure suivante [29].

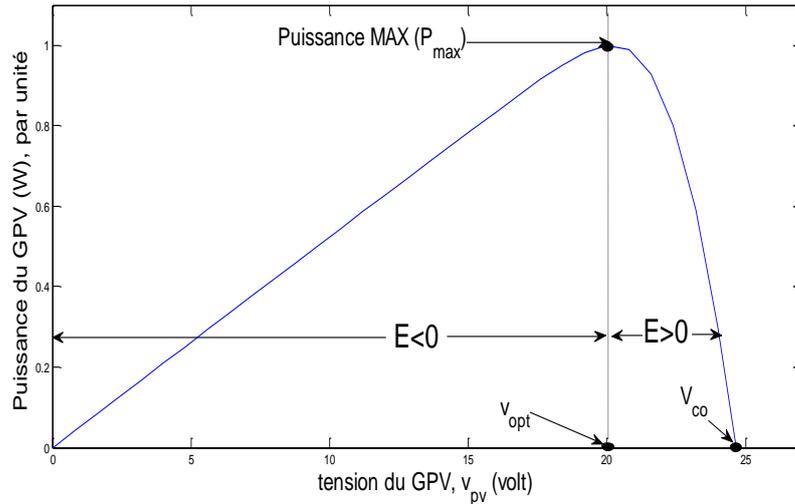


Figure II. 22: Signe de la variable d'entrée E dans le plan p_{pv} - v_{pv} pour l'algorithme INC indirect à base d'un régulateur flou.

Les fonctions d'appartenance associées à chaque variable (entrée et sortie) sont données par la figure suivante.

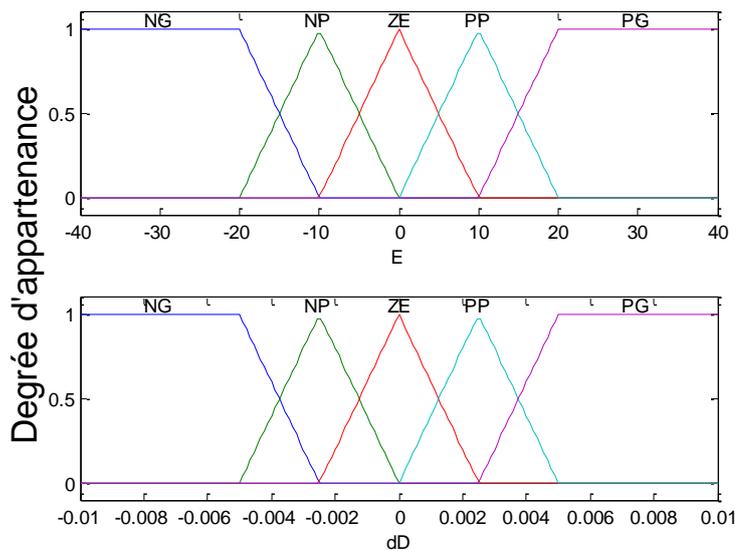


Figure II. 23: Fonctions d'appartenance pour l'algorithme INC indirecte à base d'un régulateur flou.

La base de règles qui associe la sortie floue à l'entrée floue est dérivée de la connaissance du comportement du système de la figure II.22. Si $E < 0$, on est dans le demi plan gauche, alors on augmente la tension (diminue le rapport cyclique) pour aller vers P_{max} . Si $E > 0$, on est dans le demi plan droite, alors on diminue la tension (augmente le rapport cyclique) pour aller vers P_{max} . Si $E=0$, alors P_{max} est atteint. Le tableau suivant résume cette discussion.

Entrée E	NG	NP	ZE	PP	PG
Sortie ΔD	NG	NP	ZE	PP	PG

Tableau II. 2 : Règles floues utilisés pour l'algorithme INC indirect à base d'un régulateur flou

La sortie ΔD est calculée à l'aide de la méthode du centre de gravité donnée par la formule ci-dessus. Le pas d'incrément de la tension Δv est fixé à 0.04 volt.

II.5.2.1 Résultat de simulation de la méthode conductance incrémental indirect à base d'un régulateur flou

Les résultats de simulation de la méthode de conductance incrémentale indirect avec régulateur flou pour les trois scénarios sont donnés par les figures suivantes où le point de puissance maximale est atteint avec oscillations presque nuls sauf qu'il y a des petites oscillations dans l'intervalle de temps [1.6 2] s, avec éclairement et température variable et dans l'intervalle [0 1] s, avec charge variable. On peut conclure que l'introduction d'un régulateur flou est aussi une solution pour améliorer les performances de la méthode de conductance incrémentale direct.

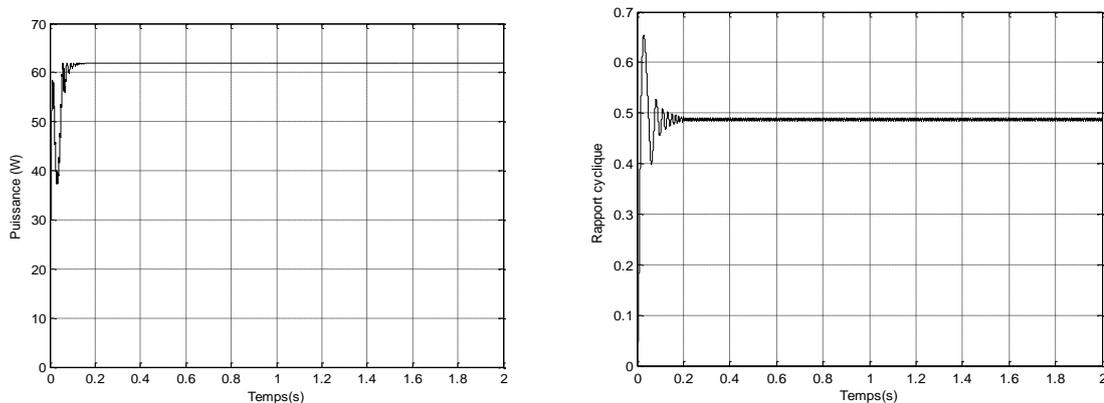


Figure II. 24 : Résultats de simulation avec l'algorithme INC indirect avec régulateur flou pour $G=1000W/m^2$ et $T=298K$.

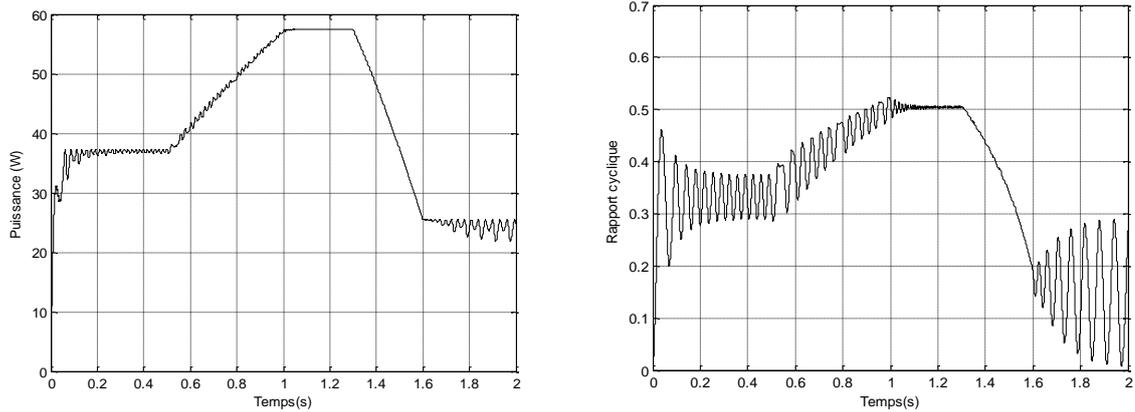


Figure II. 25: Résultats de simulation avec l'algorithme INC indirect avec régulateur flou pour un profil variable d'éclairement et de température.

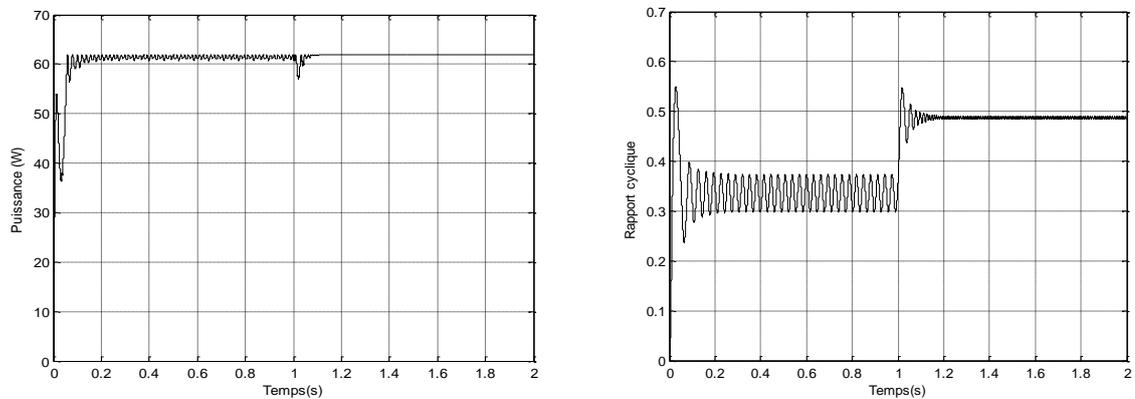


Figure II. 26 : Résultats de simulation avec l'algorithme INC indirect avec régulateur flou pour une charge variable.

II.6 Conclusion

Dans ce chapitre, des algorithmes MPPT ont été conçus pour contrôler un système PV afin de maximiser sa puissance produite. Dans un premier temps, les algorithmes de commande direct avec perturber et observer et conductance incrémentale ont été simulés en utilisant l'environnement Matlab/Simulink, dans lequel ces algorithmes ont prouvé ses faiblesses qui est l'oscillation indésirable autour le point de puissance maximale qui cause généralement des pertes de puissance. Parmi les solutions pour surmonter à ce problème, l'algorithme de commande indirect qu'utilise soit un régulateur PI ou régulateur flou a été introduit. On a vu également la commande MPPT direct à base de la logique floue qu'utilise les connaissances de l'algorithme de conductance incrémentale cet algorithme a aussi prouvé sa supériorité en terme de précision et temps de réponse.

Chapitre III

Algorithme MPPT- Floue Optimisé Par Essaim De Particules

III.1 Introduction

L'optimisation par essaim de particules (OEP), ou en anglais Particle Swarm Optimization (PSO), est une méta-heuristique d'optimisation qui utilise une population de solutions candidates pour développer une solution optimale au problème. Cet algorithme a été inventé par Russel Eberhart (ingénieur en électricité) et James Kennedy (socio-psychologue) en 1995 [30]. Cette méthode est inspirée du comportement social des animaux évoluant en essaim, tel que les bancs de poissons et les vols groupés d'oiseaux [31], [32]. Dans notre travail le rôle principal de l'algorithme PSO liées au choix optimal des paramètres de la commande MPPT pour maximiser le plus possible la puissance produite par le module PV. On a choisi à titre d'exemple la commande MPPT direct à base de la logique floue pour optimiser les fonctions d'appartenance.

III.2 Formalisation

Dans l'algorithme d'optimisation par essaim de particules, un ensemble d'individus appelés particules, sont originellement disposés de façon aléatoire et homogène, se déplaçant dans l'espace de recherche et constituant, chacune, une solution potentielle [33].

Chaque particule dispose d'une mémoire concernant sa meilleure solution visitée ainsi que la capacité de communiquer avec les particules de son entourage. Ensuite, à chaque itération

- Chaque particule est capable d'évaluer la qualité de sa position et de garder en mémoire sa meilleure position qu'elle a atteint jusqu'ici (parfois la position courante) et sa qualité (la valeur de la fonction à optimiser en cette position).
- Chaque particule est capable de communiquer avec un certain nombre de ses voisins et d'obtenir de chacune d'elle sa propre meilleure performance (et la qualité afférents)
- Chaque particule choisit la meilleure performance parmi les meilleurs dont elle a connaissance, modifier sa vitesse en fonction de cette information et de ses propres données et se déplace en conséquence [33].

Pour réaliser son prochain mouvement, chaque particule combine les trois tendances suivantes :

- Suivre sa propre vitesse.
- Revenir vers sa meilleure performance.
- Aller vers la meilleure performance de ses informations.

Une fois la meilleure informatrice détectée, la modification de la vitesse est une simple combinaison linéaire de ses trois tendances. La stratégie de déplacement d'une particule est illustrée par la figure (III.1).

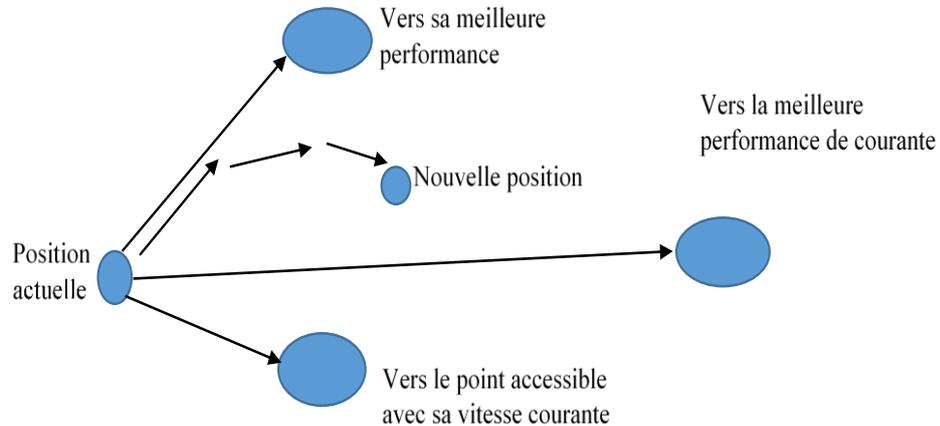


Figure III. 1: Déplacement d'une particule [33].

III.2.1 Nombre de particules

Le nombre n de particules allouées à la résolution du problème dépend essentiellement de deux paramètres

La taille de l'espace de recherche D et le rapport entre les capacités de calcul de la machine et le temps maximum de recherche. Il n'y a pas de règle pour déterminer ce paramètre n , mais réaliser de nombreux essais permet de se doter de l'expérience nécessaire à l'appréhension de ce paramètre.

Ce qui compte, c'est plutôt le nombre de fois où la fonction fitness doit être évaluée car dans la plupart des problèmes réels, cette évaluation nécessite un temps non négligeable, et évidemment, pour une itération, ce nombre d'évaluation est égal au nombre de particules. Donc si nous voulons réduire le nombre total d'évaluation nécessaire pour trouver une solution, nous sommes au contraire tentés de diminuer la taille de l'essaim. Mais un essaim trop petit risque de mettre très longtemps pour trouver une solution ou même ne pas la trouver du tout. Donc il y a un compromis à trouver. Empiriquement, les expérimentateurs ont proposé des tailles de l'ordre de 20 à 30 particules qui, en effet, se révèlent tout à fait suffisante pour résoudre la quasi-totalité des problèmes de test classiques [33].

III.2.2 Initialisation de l'essaim

La position des particules ainsi que leur vitesse initiale doivent être initialisé aléatoirement selon une loi uniforme sur [0,1].

Mais en pratique, il n'est pas souhaitable que trop de particules tendent à sortir de l'espace recherche dès le premier pas du temps, ni d'ailleurs plus tard. Pour les premières formulations nous nous contentons de tirer au hasard les valeurs de composants de chaque position et vitesse, selon une distribution uniforme dans.

$$\left[\left(\frac{x_{\min} - x_{\max}}{2} \right), \left(\frac{x_{\min} - x_{\max}}{2} \right) \right] \tag{III.1}$$

III.2.3 Equation de mouvement

On considère un ensemble de n particules et une fonction objective f que l'on cherche à minimiser sur un espace de recherche D. Pour chaque particule, on définit son vecteur de position $x_i = [x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{iD}]$, et son vecteur de vitesse $v_i = [v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{iD}]$, La qualité de sa position est déterminée par la valeur de la fonction objectif f dans chaque itération. Cette particule garde en mémoire la meilleure position par laquelle elle est déjà passée, que l'on note

$$Pbest_i = (Pbest_{i1} \ Pbest_{i2} \ \dots \ Pbest_{iD}) \quad Gbest_i = (gbest_1 \ gbest_2 \ \dots \ gbest_D)$$

, corresponde à la meilleure position atteinte par les particules de l'essaim. Nous nous référons à la version globale de l'OEP, où toutes les particules de l'essaim sont considérées comme voisines de la particule i, d'où la notation *Gbest* (global best).

Au départ de l'algorithme, les particules de l'essaim sont initialisées de manière aléatoire/régulière dans l'espace de recherche du problème. Ensuite, A chaque itération, chaque particule se déplace, leurs vitesses de déplacement et leurs positions à l'itération (k+1) sont mises à jour. Les équations régissant cette étape sont données par (III.2) (III.3) respectivement [34].

$$v_{i,j}^{k+1} = wv_{i,j}^k + c_1r_{1i,j}^k (pbest_{i,j}^k - x_{i,j}^k) + c_2r_{2i,j}^k (gbest_j^k - x_{i,j}^k), j \in \{1, \dots, D\} \tag{III.2}$$

$$Pbest_i^{k+1} = \begin{cases} Pbest_i^k, & \text{si } f(x_i^{k+1}) \geq Pbest_i^k \\ (x_i^{k+1}), & \text{sinon} \end{cases} \tag{III.3}$$

$$x_{i,j}^{k+1} = x_{i,j}^k + v_{i,j}^{k+1}, j \in \{1, \dots, D\}$$

w : s'appelle la facteur d'inertie, il sert à contrôler l'influence de la direction de déplacement sur le déplacement futur.

c1 et c2 : sont des constants positives, appelées respectivement le facteur cognitif et le facteur social permettant le contrôle du comportement individuel et collective de chaque particule.

r_1 et r_2 : sont des nombres aléatoire distribués uniformément dans l'intervalle $[0,1]$. A l'itération $(k+1)$, les deux vecteur $Pbest$ et $Gbest$ sont mis à jour, dans le cas d'une minimisation suivant les deux équations (III.4), et (III.5) [34].

$$Pbest_i^{k+1} = \begin{cases} Pbest_i^k, & \text{si } f(x_i^{k+1}) \geq Pbest_i^k \\ (x_i^{k+1}), & \text{sinon} \end{cases} \quad (III.4)$$

$$Gbest^{k+1} = \arg \min_{Pbest_i} f(Pbest_i^{k+1}), 1 \leq i \leq n \quad (III.5)$$

Où f est la fonction de cout.

La procédure de l'optimisation par essaim de particules est résumée par l'algorithme (III.1). Le critère d'arrêt différent suivant le problème posé. Si l'optimum global est connu a priori, on peut définir une « erreur acceptable » comme critère d'arrêt

III.2.4 Confinement d'intervalle

Lors de l'évolution de l'essaim, il peut arriver qu'une particule sortie de l'espace de recherche initialement défini. Pour s'affranchir de ce problème, plusieurs approches ont été proposées dans littérature. On peut introduire une vitesse maximale (notée V_{max}) qui va permettre de contrôler l'explosion du système, comme indiqué dans l'algorithme (III.2) [35]. Dans [36] on trouve une étude sur le comportement de l'OEP suivant cette proposition.

Algorithme III.1
1. Initialisation aléatoire de particules : position et vitesse.
2. Evaluation de la position de chaque particule
3. Pour chaque particule i , $Pbest_1 = x_i$
4. Calcul de $Gbest$ selon l'équation (III.5)
5. Tant que le critère d'arrêt n'est satisfait faire :
6. Déplacement des particules selon les équations (III.2) et (III.3)
7. Evaluation des positions des particules
8. Mise à jour de $Pbest_1$, $Gbest$ selon les équation (III.4) et (III.5)
9. Fin.

Tableau III. 1 : Algorithme d'optimisation par essaim de particules

Algorithme (III.2)	
1.	Si $v_{i,j}^K \succ v_{\max}$ alors
2.	$v_{i,j}^K = v_{\max}$
3.	Fin si
4.	Si $v_{i,j}^K \prec -v_{\max}$ alors
5.	$v_{i,j}^K = -v_{\max}$
6.	Fin si

Tableau III. 2 Fixation de la vitesse maximale

De plus, une stratégie de confinement d'intervalle peut être introduite, cette stratégie permet de ramener une particule sortie de l'espace de recherche à l'intérieur de celui-ci

Supposons, pour simplifier, que l'espace de recherche soit $[x_{\min}, x_{\max}]^D$ avec D est la dimension de l'espace de recherche.

Alors ce mécanisme stipule que si une coordonnée $x_{i,j}^{K+1}$, calculée selon les équations de mouvement, sort de l'intervalle $[x_{\min}, x_{\max}]$, on lui attribue en fait la valeur du point frontière le plus proche, En pratique, cela revient donc à remplacer la deuxième ligne des équations de mouvement (III.3) par

$$x_{i,j}^{k+1} = \min(\max(x_{i,j}^k + x_{i+j}^{k+1}, x_{\min}), x_{\max}) \tag{III.6}$$

En outre, on complète souvent le mécanisme de confinement par une modification de la vitesse, soit en remplaçant la composant qui pose problème par son opposé, souvent pondérée par un coefficient inférieur à 1, soit, tout simplement, en l'annulent.

Plus généralement, le principe même du confinement consiste à dire ceci : « si une particule tend à sortir de l'espace de recherche, alors la ramener au point le plus proche qui soit dans cet espace et modifier et modifier sa vitesse en conséquence ». Il permet de définir les confinements nécessaires à des problème (combinatoire, en général) dont les solutions doivent avoir toutes les coordonnées différentes.

III.2.4.1 Coefficient de constriction

Une autre approche pour le contrôle de la convergence des particules au sein de l'essaim est présentée par CLERC en 2002 [37]. Cette méthode utiliser un facteur de constriction X qui combine les paramètres w, c_1, c_2 . Les études effectuées par CLERC et KENNEDY ont démontré qu'une bonne convergence, une prévention de l'explosion de l'essaim, peut être assuré en rendent dépendants les paramètres w, c_1, c_2 . Par l'utilisation du coefficient de constriction l'équation (III.2) devient :

$$v_{i,j}^{k+1} = x \left[v_{i,j}^k + \phi_1 r_{1,i,j}^k (pbest_{i,j}^k - x_{i,j}^k) + \phi_2 r_{2,i,j}^k (gbest_j^k - x_{i,j}^k) \right] \quad (III.7)$$

Avec :

$$x = \frac{2}{\left| 2 - \phi - \sqrt{\phi^2 - 4\phi} \right|} \quad (III.8)$$

Où $\phi = \phi_1 + \phi_2$, $\phi > 4$.

Par observation on remarque que cette structure modifiée de l'algorithme OEP est équivalent à l'OEP original avec :

Avec de nombreux teste effectuée dans [37], les valeurs optimales de ϕ_1 , ϕ_2 sont déterminés.

Généralement, on pende $\phi = 4.1$ et $\phi_1 = \phi_2 = 2.05$, ce que donne un coefficient $x = 0.7298844$.

III.2.5 Critère d'arrêt

En effet, la convergence vers la solution optimale globale n'est pas garantie dans tous les cas. Il est donc important de doter l'algorithme d'une porte de sortie en définissent un nombre maximum d'itérations. Le programme s'arrête alors si et seulement si le nombre maximum d'itérations est atteint ou que la valeur de critère obtenue est acceptable pour l'utilisateur.

III.3 Application de l'algorithme OEP

Les algorithme d'OEP ont été appliquées à des problème d'optimisation classiques telle que la planification, le problème de voyageur de commerce, l'apprentissage des réseaux de neurones, et la répartition des tâches, à des applications hautement spécialisées telles que la puissance réactives et contrôle de tension [38], l'enregistrement d'image biomédicale [39], et même la composition de la musique [40]. Au cours des dernières années, l'algorithme OEP est devenu également u choix privilégié pour de nombreux chercheurs pour la manipulation optimisation multi-objectifs [41], et problèmes d'optimisation dynamique [42].

L'une des premières applications de l'OEP était l'évaluation des structures de réseaux de neurones artificiels. Eberhart a utilisé l'OEP pour remplacer l'algorithme d'apprentissage traditionnel rétro propagation dans un perceptron multicouche [35]. En raison de son comportement de convergence rapide, l'utilisation de l'OEP pour l'apprentissage de réseau de neurones peut quelque fois économiser une quantité considérable de temps de calcul par rapport aux autres méthodes d'optimisation.

III.4 Conception du contrôleur MPPT fluou par essais particulaires

Dans ce travail nous utilisons l'algorithme PSO pour l'optimisation des paramètres des fonctions d'appartenance associées aux variables d'entrée et de sortie du contrôleur fluou appliqué à la poursuite du point de puissance maximale [43].

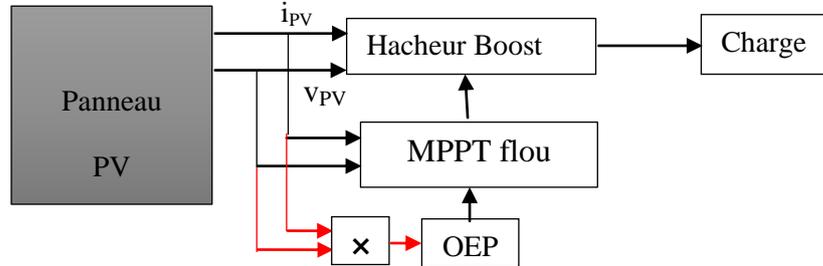


Figure III. 2 : Schéma de principe d'optimisation de la commande MPPT fluou par PSO.

III.4.1 Création de la population initiale

Premièrement les fonctions d'appartenance sont codées comme illustré dans la figure suivante.

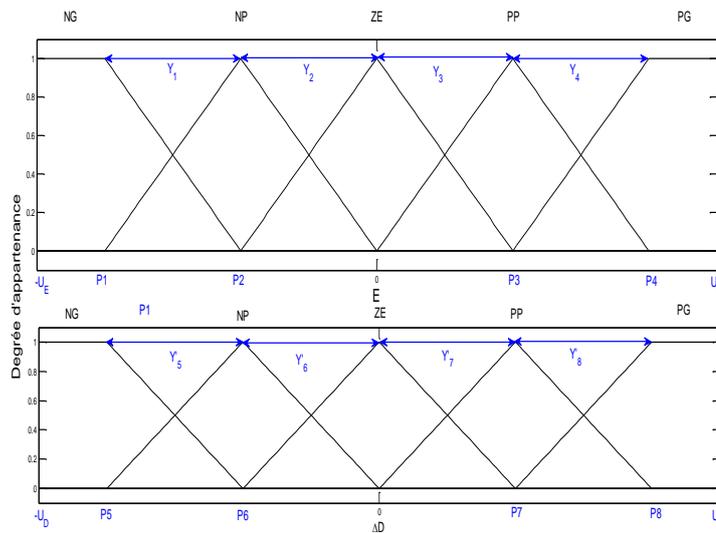


Figure III. 3: Codage des fonctions d'appartenance.

Où les paramètres des fonctions d'appartenance sont associés par les relations suivantes :

$$\begin{cases} P_1 = -(Y_1 + Y_2).U_E \\ P_2 = -Y_2.U_E \\ P_3 = Y_3.U_E \\ P_4 = (Y_3 + Y_4).U_E \end{cases}, \quad \begin{cases} P_5 = -(Y'_5 + Y'_6).U_D \\ P_6 = -Y'_6.U_D \\ P_7 = Y'_7.U_D \\ P_8 = (Y'_7 + Y'_8).U_D \end{cases}$$

Comme l'univers de discours de chaque variable (E, ΔD) est réparti en 5 fonctions d'appartenance complètement définies par 5 paramètres (centres des fonctions d'appartenance), nous avons alors au total 10 paramètres à optimiser. Nous avons défini pour chaque paramètre un intervalle de variation, ensuite le paramètre est créé aléatoirement à l'intérieur de cet

intervalle. La population se compose d'un ensemble de particules dont la structure est illustrée [43], par la figure III.4.

Y ₁	Y ₂	Y ₃	Y ₄	Y' ₅	Y' ₆	Y' ₇	Y' ₈	U _E	U _D
----------------	----------------	----------------	----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	----------------	----------------

Figure III. 4 : Structure d'une particule.

Y_{i(i=1,...,4)} : sont les centres des fonctions d'appartenance de la variable E.

Y'_{i(i=1,...,4)} : sont les centres des fonctions d'appartenance de la sortie ΔD.

U_E, U_D les univers de discours de la variable d'entrée et la variable de sortie.

Avec [0.01, 0.99] c'est la plage de variation des variables Y_i et Y'_i et [0.01, 10] c'est la plage de variation de U_E et U_D.

III.4.2 Fonction objective

Pour évaluer les particules à chaque itération, nous avons utilisé le critère suivant [43] :

$$j = \int_0^{t_f} |p_{pv}| dt \quad (\text{III.9})$$

En maximisant le critère J , il est possible d'améliorer le temps de réponse et stabiliser le système ou régime permanent avec oscillations nuls.

III.4.3 Paramètres de l'OEP

L'algorithme OEP décrit précédemment doit permettre d'optimiser les paramètres du contrôleur flou. Pour se faire, on doit choisir les valeurs des paramètres régissant l'évolution de l'essaim. Le tableau suivant, donne les paramètres utilisés [43].

Paramètres	Valeur
Taille de l'essaim	20
Coefficients d'accélération ϕ_1 et ϕ_2	2.05
Facteur de constriction x	0.72
Nombre des itérations	30

Tableau III. 3 : Paramètres de l'OEP.

III.4.4 Résultat de simulation de la commande MPPT flou direct optimisée par PSO

En premier lieu, le régulateur floue est optimisé sous les conditions climatiques standards (G=1000 W/m² et T=298 Kelvin).

Les variations de la valeur maximale de la fonction objective (critère J) en fonction du nombre d'itération sont données par la figure III-5. Nous remarquons que l'OEP a convergé vers une solution optimale ($J=1,23.10^6$) représentée par la meilleure particule de la population de la dernière itération. Cette particule donne les valeurs des paramètres recherchés.

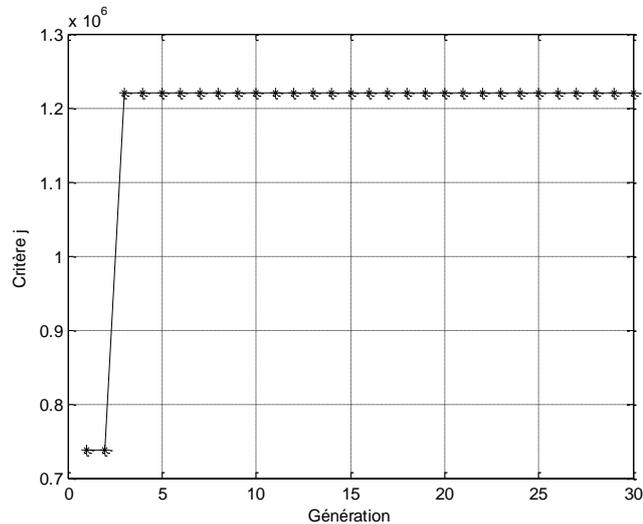


Figure III. 5 : évolution de la fonction objective en fonction des itérations.

Les fonctions d'appartenance optimales sont alors illustrées à la figure suivante :

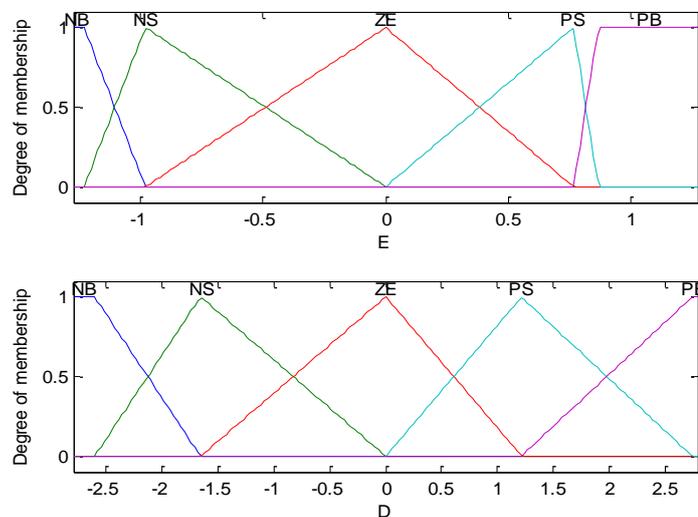


Figure III. 6 : Fonctions d'appartenance du contrôleur flou optimisé par l'OEP.

La figure III-7 représente la puissance du module PV et le rapport cyclique du convertisseur Boost, d'après cette figure on peut remarquer que le temps de réponse est amélioré par rapport à la commande MPPT flou direct non optimisé (vu dans le deuxième chapitre) et les oscillations autour le point de puissance maximale sont complètement éliminés

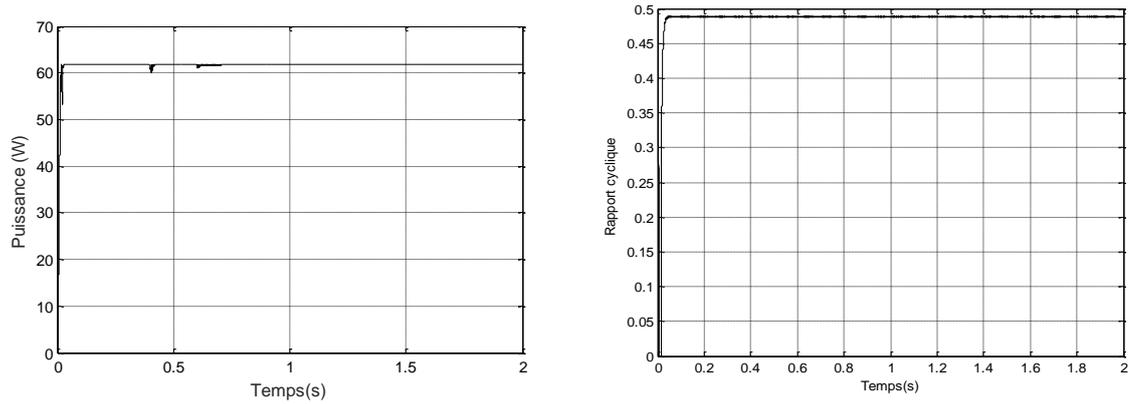


Figure III. 7: Résultats de simulation de la méthode MPPT flu direct optimisée par OEP sous les conditions climatiques standard ($G=1000\text{W}/\text{m}^2$ et $T=298\text{K}$).

Pour valider et montrer l'efficacité de la commande MPPT flu optimisée sous les conditions climatiques standards ($T=25\text{ }^\circ\text{C}$ et $G=1000\text{ W}/\text{m}^2$), nous avons effectué des tests avec variation des conditions climatiques et variation de la valeur de charge. Les résultats de simulation sont donnés par les figures suivantes où cette stratégie a montré sa bonne performance pour la poursuite de point de puissance maximale sans fluctuations et oscillations.

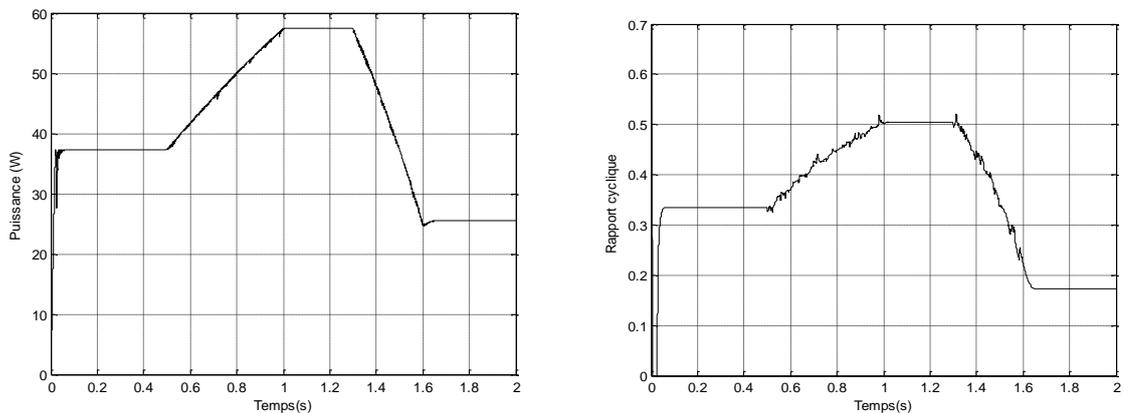


Figure III. 8: Résultats de simulation de la méthode MPPT flu direct optimisée par OEP avec variation des conditions climatique

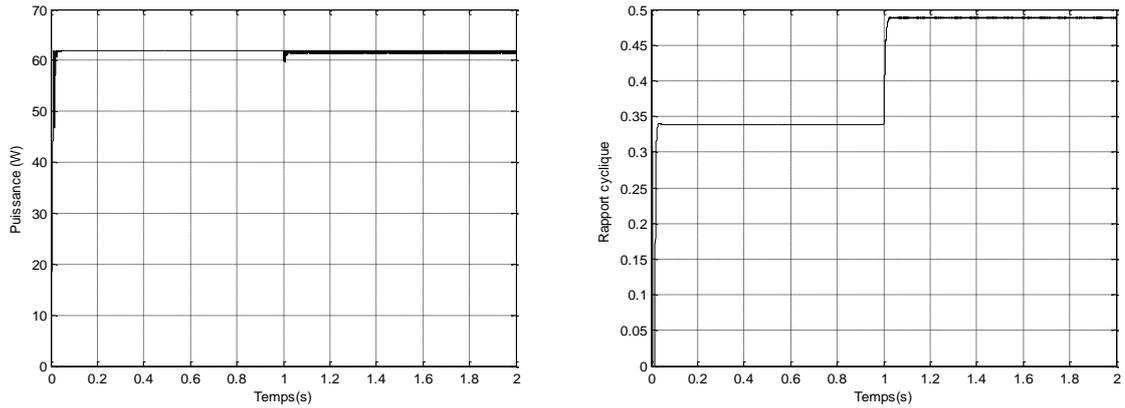


Figure III. 9 : Résultats de simulation de la méthode MPPT floue direct optimisée par OEP avec variation de charge

III.5 Conclusion

Dans ce chapitre, un régulateur flou considéré comme une technique de commande intelligente a été utilisée pour la poursuite de point de puissance maximale d'un système photovoltaïque. Parce qu'il est très difficile d'atteindre les paramètres optimaux de régulateur l'algorithme d'optimisation par essaim de particules basés sur une fonction de coût donnée a été utilisé pour obtenir les fonctions d'appartenance optimales aux longs de l'univers des discours. Les résultats de simulation ont montré que la commande MPPT floue optimisée donne de meilleures performances en termes de temps de réponse et précision que la Commande MPPT floue non optimisés.

Conclusion

Générale

Conclusion Générale

Les travaux présentés dans ce mémoire concernent l'étude des différents algorithmes de poursuite de point de puissance maximale pour un système photovoltaïque. Le but principal a été de faire une étude comparative entre les performances de quelques techniques MPPT et de trouver la plus efficace et optimale.

Avant d'entamer la problématique de poursuite de point de puissance maximale une connaissance sur le système photovoltaïque est nécessaire, dans le premier chapitre on a expliqué le principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque après on a fait une modélisation du système photovoltaïque ce qui nous on a permis de visualiser l'effet de la variation d'éclairement et température, on a conclu que la puissance de générateur PV augmente avec l'accroissement de l'éclairement et inversement a l'augmentation de la température. Simultanément on a présenté les différents modèles des convertisseurs statiques DC-DC.

Un deuxième volet de notre travail est l'étude des différentes techniques (algorithmes) de poursuite de point de puissance maximale MPPT, pour cela, nous avons commencé par la commande direct en utilisant les deux méthodes classiques P&O et INC qui sont plus simples à implémenter, mais l'inconvénient majeur de ces deux méthodes ils présentent des oscillations autour du MPP qu' il provoque généralement des pertes d'énergie, pour corriger ce problème- là on a intégré une commande indirecte basée sur un régulateur proportionnelle intégrale (PI). Pour assurer un régulateur MPPT plus efficaces en utilisant la technique basée sur la commande directe et indirecte par logique floue, les résultats ont montré clairement les améliorations de la réponse du système.

En dernier, dans le but d'améliorer le rendement de la méthode directe par logique floue une commande par l'algorithme d'essaim de particules est utilisé pour concevoir les meilleurs paramètres de la commande MPPT-floue et les résultats de simulation montrent que le système converge très rapidement vers le point de puissance maximale et les oscillations sont complètement éliminés. Nous avons démontré, que le contrôleur (floue optimisé) est plus robuste, et plus précis que celui de la méthode floue direct non optimisé et les méthodes classiques.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] N.F. Benhaddouche, « La commande d'un système photovoltaïque d'un satellite », Mémoire de Master en Automatique, université Abou bekr Belkaid – Tlemcen, 2014.
- [2] O. Benseddik, F. Djaloud, « Etude et optimisation du fonctionnement d'un système PV », Mémoire de Master en Génie Electrique, université kasdiMerbah- Ouargla, 2012.
- [3] N. Touil , Z. Lammouchi,« Modélisation et simulation d'un system photovoltaïque» Mémoire de Master en Génie Électrique ,université Echahid Hama Lakhder -D'el-oued, 2015.
- [4] N. Debili, « Etudes optimisation en environne en matlab/Simulink d'un système de pompage photovoltaïque», Mémoire de Magister en Electronique, université Constantine I, 2015.
- [5] B. Zerguine, « Modélisation d'un système de production électrique par la cellule photovoltaïque », Mémoire de Magister en Electrotechnique, université Badji Mokhtar-Annaba, 2010.
- [6] M. Belhadj, «Modélisation d'un système de captage photovoltaïque autonome» Mémoire de Magister en Microélectronique -Photovoltaïque, universitaire de Bechar, 2008.
- [7] A. Chebana , «Contrôle d'un système photovoltaïque connecte au réseau», Mémoire de Master en Electrotechnique , université Mohamed Khider -Biskra, 2014.
- [8] F. Hananou, A. Rouabah, «Modalisation et simulation d'un système photovoltaïque» Mémoire de Master en Electrotechnique, université Kasdi Merbah -Ouargla, 2014.
- [9] L. Miloudi, «Etude et simulation de la poursuite de la trajectoire de soleil par un panneau solaire photovoltaïque», Mémoire de Magister en Génie Electrique, université M'hamed Bougara -Boumerdès, 2012.
- [10] H. Benis, «Contribution à la modélisation du problème de "hot spot" dans les modules solaire photovoltaïque occultées», Mémoire de Magistère en Electronique, université de Mentouri -Constantine, 2008.
- [11] T. Benaoun, M.S. Mouissi, «Etude d'un système couplant un générateur photovoltaïque et une charge électrolytique», Mémoire de Master en Génie Électrique, université Kasdi Merbah -Ouargla, 2015.
- [12] F. Slama, «Modélisation d'un système multi générateurs photovoltaïques interconnectés au réseau électrique», Mémoire de Magister en Électrotechnique, université Ferhat Abbas – Setif, 2011.
- [13] A. Belkaid, J-P.Gaubert, A. Gherbi, «An improved sliding mode control for maximum power point tracking in photovoltaic systems», Control Engineering and Applied Informatics, vol.18,N°1, pp.86-94, 2016.

- [14] C. Larbes, S.M. Ait Cheikh, T. Obeidi, A. Zerguerras, «Genetic algorithms optimized fuzzy logic control for the maximum power point tracking in photovoltaic system», *Renewable Energy*, vol.34, pp. 2093–2100, 2009 .
- [15] VJ. Chin, Z. Salam, K. Ishaque, «Cell modelling and model parameters estimation techniques for photovoltaic simulator application: A review, *Applied Energy*, vol.154, pp 500–519, 2015.
- [16] S.M. Ait cheikh, «Etude investigation et conception d’algorithmes de commande appliqués aux systèmes photovoltaïques», Thèse de Doctorat D’état en Automatique école nationale polytechnique, 2007.
- [17] I. Khoudrane, « Etude d'un système de poursuite solaire pour les panneaux photovoltaïques », Mémoire de Master Professionnel en Génie Mécanique, université Kasdi Merbah – Ouargla, 2014.
- [18] O. Feddaoui, «Contribution à l’étude des systèmes hybrides de génération : application aux énergies renouvelables», Mémoire de Magistère en Electrotechnique université Mohamed Cherif Messaadia - Souk-Ahras, 2014.
- [19] Hebertt Sira-Ramírez, Ramón Silva-Ortigoza, «Control design techniques in power electronics devices», Springer-Verlag London Limited, 2006.
- [20] B. Hauke, «Basic Calculation of a Boost Converter's Power Stage», Texas Instruments, SLVA372C, 2014.
- [21] W. Bensaci, « Modélisation et simulation d’un système photovoltaïque adapté par une commande MPPT », Mémoire de Master en Génie électrique, université KasdiMerbah - Ouargla, 2012.
- [22] M.S. AïtCheikh, et al. « Maximum power point tracking using a fuzzy logic control scheme», *Revue des Energies Renouvelables*, vol. 10, N°. 3, pp. 387 – 395, 2007.
- [23] S. Pukhrem, « Comparative analysis of photovoltaic maximum power point tracking (MPPT) algorithm», In proceeding of: Power and Energy Student Summit (PESS), At Stuttgart, Germany, Volume: ISBN 978-3-00-044942-0, pp. 72-77, 2014.
- [24] K.H. Hussein et al. «Maximum photovoltaic power tracking: an algorithm for rapidly changing atmospheric conditions», *IEE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution* Vol. 142, no. 1, pp. 59 – 64, Jan 1995.
- [25] C-S. Chiu, Y-L. Ouyang, C-Y. Ku, «Terminal sliding mode control for maximum power point tracking of photovoltaic power generation systems», *Solar Energy*, vol. 86, pp. 2986 – 2995, 2012 .

- [26] J.H. Cho, W.P. Hong, «A variable step size incremental conductance MPPT of a photovoltaic system using DC-DC converter with direct control scheme », the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers, vol. 27 no. 9, pp. 74-82, 2013.
- [27] L. Chendi et al. «A high-performance adaptive incremental conductance MPPT algorithm for photovoltaic systems», *Energies*, vol. 9, pp. 288, 2016.
- [28] H. Abbes et al. « An improved MPPT incremental conductance algorithm using T-S fuzzy system for photovoltaic panel », *Renewable Energy Research*, Vol.5, N°1, pp. 161-167, 2015.
- [29] M. Farhat. et al. « Efficiency optimization of a DSP-based standalone PV system using a stable single input fuzzy logic controller », *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 49, pp. 907 – 920, 2015.
- [30] R. Eberhart, A. Kennedy, «A new optimizer using particle swarm theory», *Proceedings of the Sixth International Symposium on Micro Machine and Human Science*, Nagoya, Japan, pp.39-43, 1995.
- [31] C.W. Reynolds, «Flocks herds and schools a distributed behavioural model», *Computer Graphics*, Vol 21, N° 4, 1987.
- [32] E.O. Wilson, « *Sociobiology the new synthesis* », chapter 7, Harvard college, 1982.
- [33] N. Bouarroudj, «Commandes par mode de glissement d'ordre fractionnaire optimisées par métaheuristique. Application aux systèmes non linéaires et interconnectés», *Thèse Doctorat en Sciences en génie électrique*, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, 2017.
- [34] A. El Dor « Perfectionnement des algorithmes d'optimisation par essaim particulaire : applications en segmentation d'images et en électronique », *Thèse de doctorat en informatique*, université Paris-EST, 2012.
- [35] C. Eberhart, P. Simpson, R. Dobbins, «Computational intelligence PC tools, chapter 6», Academic Press Professional, Inc., San Diego, USA, 1996.
- [36] X. Cai, Y. Tan, «A study on the effect of V_{MAX} in particle swarm optimisation with high dimension», *int. j. bio-inspired computation*, vol. 1, N°. 3, pp. 210-216, 2009.
- [37] M. Clerc, J. Kennedy « The particle swarm—explosion, stability, and convergence in a multidimensional complex space », *transactions on evolutionary computation*, vol. 6, N° 1, pp.58-72 , 2002.
- [38] H. Yoshida et al. « A Particle Swarm Optimization for Reactive Power and Voltage Control Considering Voltage Security Assessment », *transactions on power systems*, vol. 15, N°. 4, pp. 1232-1239, 2000.

- [39] P. Wachowiak et al. « An approach to multimodal biomedical image registration utilizing particle swarm optimization», Transactions On Evolutionary Computation, vol. 8, N° 3, pp. 289-300, 2004.
- [40] T. M. Blackwell et P. Bentley « Improvised Music with Swarms», Proceedings of the Congress on Evolutionary Computation (CEC), vol. 2, pp. 1462–1467, IEEE Press, 2002.
- [41] M. R. Sierra, C.A. Coello Coello, « Multi-Objective Particle Swarm Optimizers: A Survey Of The State-Of-The-Art», computational intelligence research, Vol.2, N°3, pp. 287–308, 2006.
- [42] X. Li, J. Brankeet, T. Blackwell« Particle Swarm with Speciation and Adaptation in A dynamic environment», In GECCO'06: Proceedings of the 8th annual conference on Genetic and evolutionary computation, pp. 51–58, ACM New York, NY, USA, 2006.
- [43] A. Amaoui, «Optimisation d'une commande MPPT floue par essaims particulaire», Mémoire de Master en Automatique, université Abderrahmane Mira de Bejaïa, 2015.