

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Ecole Nationale Polytechnique
Département d'Electronique

Laboratoire des Dispositifs de
Communication
et de Conversion Photovoltaïque



Mémoire de Projet de Fin d'Études

Pour l'obtention du diplôme
D'Ingénieur d'État
En Électronique

Contribution à l'implémentation d'une technique
métaheuristique appliquée à la commande MPPT
dans un système photovoltaïque.

Présenté par :
BELMEKKI Mohamed Amir Alaa

Sous la direction de :

Pr LARBES Cherif (ENP) & Dr TITRI Sabrina (CDTA)

Présenté et soutenu publiquement le 29/06/2019
Composition du Jury :

Présidente	M. M. HADDADI,	Pr.	ENP
Promoteurs	M. C. LARBES,	Pr.	ENP
	Mme. S. TITRI,	Dr.	ENP
Examinatrice	M. M.S. AIT CHEIKH,	Pr.	ENP

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Ecole Nationale Polytechnique
Département d'Electronique

Laboratoire des Dispositifs de
Communication
et de Conversion Photovoltaïque



Mémoire de Projet de Fin d'Études

Pour l'obtention du diplôme
D'Ingénieur d'État
En Électronique

Contribution à l'implémentation d'une technique
métaheuristique appliquée à la commande MPPT
dans un système photovoltaïque.

Présenté par :
BELMEKKI Mohamed Amir Alaa

Sous la direction de :

Pr LARBES Cherif (ENP) & Dr TITRI Sabrina (CDTA)

Présenté et soutenu publiquement le 29/06/2019
Composition du Jury :

Présidente	M. M. HADDADI,	Pr.	ENP
Promoteurs	M. C. LARBES,	Pr.	ENP
	Mme. S. TITRI,	Dr.	ENP
Examinatrice	M. M.S. AIT CHEIKH,	Pr.	ENP

Remerciements

Je tiens à exprimer toute ma reconnaissance à mon encadreur de mémoire, Professeur Larbes, et co-encadreur, Docteur Sabrina Titri ainsi qu'au docteur Karim Kaced, de m'avoir orienté, aidé et conseillé. J'adresse mes sincères remerciements à tous les professeurs, intervenants et toutes les personnes qui par leurs paroles, leurs écrits, leurs conseils et leurs critiques ont guidé mes réflexions et ont accepté de me rencontrer et de répondre à mes questions durant mes recherches. Je remercie mes très chers parents qui ont toujours été là pour moi. Je remercie mon frère pour ses encouragements. Enfin, je remercie ma meilleure amie qui a toujours été là pour moi. Leur soutien inconditionnel et leurs encouragements ont été d'une grande aide. À tous ces intervenants, je présente mes remerciements, mon respect et ma gratitude.

ملخص :

يقدم هذا المشروع النهائي محاكاة وتحليل التحكم في تتبع القدرة القصوى (MPPT) باستخدام خوارزمية اليراع لنظام الخلايا الكهروضوئية. تختلف كفاءة استخدام الطاقة الشمسية اختلافاً كبيراً مع اختلاف درجة الحرارة المحيطة والظروف الجوية المختلفة مثل التظليل الجزئي أو التشيع وبالتالي فإن نقطة القدرة القصوى (MPP) للنظام الكهروضوئي ليست مستقرة. لذلك ، هناك حاجة إلى وحدة تحكم MPPT لتشغيل PV عند MPP من خلال تتبع الذروة العالمية. الحد الأقصى لطرق تتبع الطاقة المستندة إلى خوارزمية مستوحاة من الطبيعة مثل FA يقترح لتتبع MPP. يتم تطبيق الطريقة المقترحة مع محول دفعة DC-DC. توضح النتيجة أن الطريقة المقترحة يمكنها تتبع MPP بدقة مع سرعة تتبع عالية للتقارب. يتم التحقق من كفاءة النظام المقترح لنظام PV باستخدام نتائج المحاكاة وتحليل نقاط القوة القصوى باستخدام MATLAB وأداة Vivado HLS.

الكلمات الدالة:

(MPPT) تتبع نقطة الطاقة القصوى ، (HLS) المستوى الرفيع تجميع ، (FA) اليراع خوارزمية ، الخوارزمية طبيعية الملهمة ، نظام الخلايا الكهروضوئية (PV)

Abstract:

This final project presents the simulation and analysis of maximum power point tracking (MPPT) control using the firefly algorithm for photovoltaic (PV) system. The solar energy efficiency varies considerably with the variation in ambient temperature and different atmospheric conditions such as partial shading or irradiation and hence the maximum power point (MPP) of PV system is not stable. Therefore, a MPPT controller is needed to operate the PV at its MPP by tracking the global peak. Maximum power tracking methods based on nature inspired algorithm such as FA is proposed to track the MPP. The proposed method is implemented with a DC-DC boost converter. The result shows that the proposed method can accurately track the MPP with a high tracking speed of convergence. The efficiency of the proposed system is verified for the PV system using simulation results and an analysis of the maximum power points using MATLAB and the Vivado HLS tool.

Keywords:

Photovoltaic Array (PV), Maximum Power Point Tracking (MPPT), firefly algorithm (FA), high level synthesis (HLS), bioinspired algorithms.

Résumé :

Ce projet de fin d'étude a pour but de simuler et d'analyser la commande MPPT (Maximum Power Point Tracking) avec l'algorithme des lucioles dans le contexte des systèmes photovoltaïques (PV). Le rendement énergétique solaire varie considérablement avec les différentes conditions atmosphériques telles que la variation de la température ambiante, l'ombrage partiel ou l'irradiation, provoquant un point de puissance maximale (MPP) du système PV instable. Par conséquent, un contrôleur MPPT est nécessaire pour faire fonctionner le système PV à son point de puissance maximal. Plusieurs méthodes de poursuite du point de puissance maximale sont basées sur des algorithmes bio inspirés tels que l'algorithme des lucioles. La méthode proposée est mise en œuvre en utilisant un convertisseur DC-DC boost. Les résultats obtenus montrent que la méthode proposée permet de suivre avec précision le point de puissance maximale avec une vitesse de convergence élevée. L'efficacité du système proposé est prouvée et vérifiée dans le cadre d'un système PV à l'aide de résultats de la simulation et d'analyse des points de puissance maximal. La simulation est effectuée sur MATLAB et l'outil Vivado HLS.

Mots-clés:

Système photovoltaïque (PV), suivi du point maximal de puissance (MPPT), algorithme des lucioles (FA), synthèse de haut niveau (HLS), techniques métaheuristiques.

Table des matières

Liste des tableaux

Liste des figures

INTRODUCTION GÉNÉRALE	13
CHAPITRE I	14
SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE	14
I.1 Introduction :.....	15
I.2 Cellule photovoltaïque	15
I.2.1 Principe d'une cellule photovoltaïque	15
I.2.2 Caractéristique électrique d'une cellule photovoltaïque.....	16
I.2.3 Modélisation d'une cellule photovoltaïque	16
I.3 Le module photovoltaïque	18
I.4 Modèle mathématique	18
I.5 Le générateur photovoltaïque	18
I.5.1 Structure d'un générateur photovoltaïque	18
I.5.2 Caractéristique Courant-Tension et Puissance-Tension.....	20
I.5.2.1 Influence de l'éclairement sur les courbes I-V et P-V	20
I.5.2.2 Influence de la température sur les courbes I-V et P-V	21
I.5.2.3 Influence d'un éclairement non homogène : Ombrage partiel	21
I.6 Connexion générateur photovoltaïque-charge.....	22
I.6.1 Connexion directe	22
I.6.2 Connexion indirecte via un étage d'adaptation	23
I.7 Convertisseur DC/DC.....	24
I.8 Convertisseur survolteur (Boost converter).....	24
I.9 Conclusion :	27
CHAPITRE II	28
PRINCIPES ET ALGORITHMES BIO INSPIRÉS DANS LA RECHERCHE DU POINT DE PUISSANCE MAXIMALE ...	28
II.1 Introduction.....	29
II.2 Les Algorithmes MPPT.....	29
II.3 Les méthodes bio inspirées (MBI)	30
II.3.1 Concepts de base du bio inspiré.....	30
II.3.2 Méthodes basées sur l'intelligence en Essaim	31
II.4 L'algorithme métaheuristique des lucioles appliquées pour la poursuite du point maximal de puissance.....	32

II.4.1	Principes de base de l'algorithme FA	32
II.4.2	Procédure de l'algorithme métaheuristique des lucioles	34
II.4.3	Les différentes étapes algorithmiques	35
II.4.3.1	Génération d'une population initiale.....	35
II.4.3.2	Fonction coût	35
II.4.3.3	Mise à jour et déplacement	35
II.4.3.4	Arrangement	35
II.4.3.5	Critère d'arrêt.....	36
II.4.4	Paramétrages de l'algorithmes des lucioles	36
II.4.4.1	Nombre de luciole.....	37
II.4.4.2	Attraction de luciole.....	37
II.4.4.3	La distance	37
II.4.4.4	Coefficient d'absorption	38
II.4.4.5	Nombre de génération.....	38
II.5	CONCLUSION	38
CHAPITRE III.....		39
CALIBRAGE, IMPLÉMENTATION ET TESTS SOFTWARES DU CONTRÔLEUR MPPT BASÉS SUR L'ALGORITHME DES LUCIOLES		39
III.1	Introduction.....	40
III.2	Application de l'algorithme FA_ALGO pour la commande MPPT	40
III.2.1	Phase d'initialisation	42
III.2.2	Phase de déplacement des lucioles et de mise à jour.....	42
III.3	Paramétrages du contrôleur MPPT	44
III.3.1	Modélisation du système photovoltaïque	44
III.3.2	Processus de paramétrage.....	45
III.3.2.1	Etablissement préliminaire de l'algorithme des lucioles	45
III.3.2.2	La sélection paramétrage.....	47
III.3.2.2.1	Une population de 4 lucioles	49
III.3.2.2.1.1	Variation de α	49
III.3.2.2.1.2	Variation de β	51
III.3.2.2.1.3	Variation de γ	53
III.3.2.2.1.4	Variations des plusieurs paramètres α , β et γ	55
III.3.2.2.2	Une population de 5 lucioles	56
III.3.2.2.2.1	Variation de α	56
III.3.2.2.2.2	Variation de β	57

III.3.2.2.2.3	Variation de γ	58
III.3.2.2.2.4	Variations des plusieurs paramètres α , β et γ en même temps	59
III.3.2.3	Discussion des résultats	60
III.3.3	Simulation du contrôleur FA_ALGO_MPPT	61
III.3.4	Discussion des résultats	65
III.4	Conclusion :	65
CHAPITRE IV	.....	66
MISE EN ŒUVRE DU CONTRÔLEUR HARDWARE	.....	66
IV.1	Introduction.....	67
IV.2	La synthèse de haut niveau (HLS).....	67
IV.2.1	Les avantages de l'outil HLS	67
IV.2.2	Le mécanisme de fonctionnement de l'outil Vivado.....	68
IV.2.3	Les bases de l'outil HLS	69
IV.2.4	Les étapes de synthèse d'un code C via l'outil HLS	69
IV.3	L'algorithme fonctionnel FA_ALGO_MPPT en langage	70
IV.3.1	La fonction aléatoire	70
IV.3.2	La fonction arr	71
IV.3.3	La fonction conc	71
IV.3.4	La fonction search_pow	71
IV.3.5	La fonction FA.....	72
IV.4	Simulation fonctionnelle de l'algorithme FA_ALGO_MPPT sous différentes conditions climatiques	72
IV.4.1	Scénario 1.....	74
IV.4.2	Scénario d'ombrage 2	75
IV.4.3	Scénario d'ombrage 3	76
IV.4.4	Scénario d'ombrage 4	77
IV.4.5	Discussion des résultats	78
IV.5	Synthèse de haut niveau et la génération d'IP.....	78
IV.6	Proposition d'optimisation de l'algorithme FA_ALGO_MPPT.....	82
IV.7	Conclusion	82
CONCLUSION	.....	83
GENERALE	.....	83
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	.....	85

Liste des tableaux

Tableau III-1 Les résultats de simulation pour différentes valeurs des paramètres	60
Tableau III-2 Les différents scénarios d'ombrage auxquels les trois panneaux PV sont soumis.	61
Tableau IV-1 Les différents scénarios d'ombrage auxquels les trois panneaux PV sont soumis.	73

Liste des figures

Figure I-1 Constitution et principe d'une cellule photovoltaïque.	15
Figure I-2 Caractéristique I - V et P -V d'une cellule photovoltaïque.	16
Figure I-3 Circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque à deux diodes.	17
Figure I-4 Association de cellules photovoltaïques.	18
Figure I-5 Cellule, module et panneau PV.	19
Figure I-6 Caractéristique résultante d'un groupement de ns cellules en série.	19
Figure I-7 Caractéristique résultante d'un groupement de np cellules en parallèle.	20
Figure I-8 : Influence de l'éclairement sur les courbes Courant-Tension (I-V) et Puissance-Tension (P-V). .	20
Figure I-9 Influence de la température sur les courbes : Courant-Tension (I-V), Puissance-Tension (P-V). .	21
Figure I-10 Caractéristique P-V pour différents scénarios d'ombrage.	22
Figure I-11 Connexion directe GPV-Charge.	23
Figure I-12 Connexion d'un GPV à une charge via un étage d'adaptation.	23
Figure I-13 Convertisseur DC/DC.	24
Figure I-14 Schéma du circuit électrique d'un convertisseur Boost.	24
Figure I-15 Schéma du circuit électrique d'un convertisseur Boost à l'état de repos.	25
Figure I-16 Convertisseur Boost durant l'état on.	25
Figure I-17 Convertisseur Boost durant l'état.	26
Figure I-18 Formes d'ondes des tensions V_{pv} et V_{load} dans le cas du convertisseur Boost.	26
Figure II-1 La Chaîne de conversion photovoltaïque avec convertisseur statique.	29
Figure II-2 Groupes du domaine Bio Inspiré.	30
Figure II-3 Les Lucioles.	33
Figure II-4 Déplacement des lucioles dans une itération.	36
Figure III-1 Organigramme de l'algorithme Firefly dans le contexte MPPT.	41
Figure III-2 L'évolution des rapports cycliques durant le processus de convergence vers l'MPP.	43
Figure III-3 Modélisation software du système photovoltaïque.	44
Figure III-4 La convergence de la fonction cout (Puissance), du courant et de la tension de l'algorithme. .	46
Figure III-5 La courbe caractéristique I-V et P-V du modèle utilisé.	46
Figure III-6 Modèle Matlab d'un système photovoltaïque dans des conditions standards.	47
Figure III-7 La courbe caractéristique P-V dans les conditions standard.	48
Figure III-8 Process pour la détermination des courbes caractéristiques.	48
Figure III-9 C courbes de convergence de la puissance en variant le paramètres α avec.	49
Figure III-10 Exemple de courbes de convergence de la puissance en variant le paramètres α avec $\gamma=1$, $\beta=1$ (En une figure).	50
Figure III-11 Courbes de convergence de la puissance en variant le paramètres β avec $\alpha=0.2$ et $\gamma=1$	51
Figure III-12 Courbes de convergence de la puissance en variant le paramètres β avec $\alpha=0.2$ et $\gamma=1$ (En une figure).	52
Figure III-13 Courbes de convergence de la puissance en variant le paramètres γ avec $\alpha=0.1$ et $\beta=1$	53
Figure III-14 Courbes de convergence de la puissance en variant le paramètres γ avec $\alpha=0.1$ et $\beta=1$ (En une figure).	54
Figure III-15 Courbes de convergence de la puissance en variant le paramètres α , β et γ	55
Figure III-16 Courbes de convergence de la puissance en variant le paramètres α avec $\beta=1$ et $\gamma=1$	56
Figure III-17 Courbes de convergence de la puissance en variant le paramètres β avec $\alpha=0.2$ et $\gamma=1$	57
Figure III-18 : Courbes de convergence de la puissance en variant le paramètres γ avec $\alpha=0.2$ et $\beta=1$	58
Figure III-19 Courbes de convergence de la puissance en variant le paramètres α , β et γ	59

Figure III-20 Caractéristiques P-V pour différents scénarios d'ombrage.	62
Figure III-21 Caractéristiques P-V pour différents scénarios d'ombrage (en une seule figure).	62
Figure III-22 Courbes relatives au scénario d'ombrage 1 (1000-1000-1000).	63
Figure III-23 Courbes relatives au Scénario d'ombrage 2 (300-500-900).	63
Figure III-24 Courbes relatives au Scénario d'ombrage 3 (100-300-900).	64
Figure III-25 Courbes relatives au Scénario d'ombrage 4 (350-450-700).	64
Figure IV-1 Flot de conception de l'outil Vivado HLS.	68
Figure IV-2 L'analogie entre le système PV et l'algorithme hardware.	70
Figure IV-3 Courbes expérimentales et leurs interpolations numériques de la caractéristique P-V, I-V.	72
Figure IV-4 Process pour la détermination des courbes caractéristiques.	73
Figure IV-5 La caractéristique électrique de trois modules photovoltaïques pour le scénario 1.	74
Figure IV-6 Convergence des rapports cycliques lors du scénario 1.	75
Figure IV-7 La caractéristique électrique de trois modules photovoltaïques pour le scénario 2.	75
Figure IV-8 La caractéristique électrique de trois modules photovoltaïques pour le scénario 3.	76
Figure IV-9 La caractéristique électrique de trois modules photovoltaïques pour le scénario 4.	77
Figure IV-10 Rapport de la synthèse HLS de l'algorithme des lucioles.	79
Figure IV-11 Validation du fonctionnement RTL de notre code.	80
Figure IV-12 Validation du fonctionnement RTL de notre code.	81

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Introduction générale

L'énergie solaire est l'une des sources d'énergie renouvelable les plus prometteuses en raison de ses nombreux avantages. Les systèmes photovoltaïques ont connu un développement remarquable au cours des dernières décennies.

Comme le point de puissance maximum ou MPP (Maximum Power Point) d'un système photovoltaïque varie en fonction de l'évolution des conditions environnementales, les technologies et méthodes qui pistent le point de puissance maximum (Maximum Power Point Tracking) sont nécessaires pour obtenir la puissance maximale des systèmes photovoltaïques.

Cependant, la courbe de tension d'alimentation (P-V) présente des pics multiples dans des conditions d'ombrage partiel. Dans de telles conditions, de nombreuses méthodes traditionnelles de suivi des points de puissance maximale comme la perturbation et l'observation (perturbation and observation), ainsi que la conductance incrémentale (incremental conductance), peuvent devenir invalides à cause de l'apparition de beaucoup de maxima locaux.

De nombreuses méthodes avancées basées sur l'intelligence artificielle comme les réseaux de neurones artificiels et la logique floue de contrôle peuvent suivre le point de puissance maximale globale. Cependant, ils ne sont pas réalisables dans un environnement complexe car ils nécessitent un entraînement élaboré et une expérience plus large (en utilisant le machine learning et le deep learning sur des données massive).

Alternativement, les algorithmes de pistage du point de puissance maximale (MPPT) bio-inspirés traitent correctement de telles situations. Ces dernières années, les chercheurs ont largement appliqué des algorithmes bio-inspirés pour dans le contexte des MPPT d'un système photovoltaïque dans des situations d'ombrage partiel.

Ce projet de fin d'étude présente un examen complet d'un algorithme bio-inspiré utilisé dans le suivi global des points de puissance maximale. Diverses simulations et explications basées sur ces méthodes sont discutées.

Dans l'ensemble, les performances d'algorithme basé sur l'intelligence d'essaim est meilleure que celle des algorithmes évolutifs [23]. Nous entamerons ce PFE par un état de l'art sur les systèmes photovoltaïques et les algorithmes bio inspirés en faisant une fixation sur la méthode des lucioles qui dérive de ces derniers. Nous présenterons des résultats découlant de cette méthode bio inspiré sachant deux approches : hardware et software.

CHAPITRE I

SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE

I.1 Introduction :

Durant ce chapitre introductif, nous mettrons en évidence les bases théoriques et pratiques nécessaires à la compréhension de notre thématique.

Nous présenterons les concepts de base liés au fonctionnement d'un système photovoltaïque, à savoir l'effet photovoltaïque ainsi que les principaux facteurs qui influent sur le rendement des systèmes photovoltaïques, le principe d'adaptation le long de la chaîne de conversion pour un transfert de puissance maximale ainsi que le modèle mathématique qui régit ce système.

I.2 Cellule photovoltaïque

I.2.1 Principe d'une cellule photovoltaïque

Avant d'être développé effectivement au milieu du XXI^{ème} siècle, le principe de l'effet photovoltaïque fut, pour la première fois, découvert au XIX^{ème} siècle. Ce phénomène se manifeste lorsque on expose un certain type de matériaux à une quantité de photons qui donnera, en conséquence, de l'électricité et ce par effet photoélectrique. Pour l'anecdote, c'est cette théorie même qui a valu à Einstein un prix Nobel et non pas la théorie de la relativité.

En de mots simples, une cellule photovoltaïque est un capteur à base de matériaux semi-conducteurs qui transforme de la lumière en électricité.

La condition sine qua non pour qu'il y ait absorption optique est que le photon transmette suffisamment d'énergie à un électron pour qu'il passe à un niveau d'énergie supérieur. Dans le cas d'un semi-conducteur, le déplacement de l'électron se fait de la bande de valence à la bande de conduction. Ce déplacement entraîne l'apparition d'un trou dans la bande de valence.

Lorsque les photons sont absorbés par le semi-conducteur, ils transmettent leur énergie aux électrons. Si l'énergie transmise est supérieure à celle de l'Énergie Gap du semi-conducteur, alors il y aura une formation de paires électrons-trous dans la zone éclairée.

Sous l'effet d'un champ électrique extérieur, ces électrons commenceront à se mouvoir créant un courant électrique continu. La figure I-1 illustre la constitution et le principe d'une cellule photovoltaïque en silicium.

Le courant maximal I_{max} se produit lorsque les bornes de la cellule sont court-circuitées. On parle alors de courant de court-circuit I_{CC} dépendant fortement du niveau d'éclairement (E).

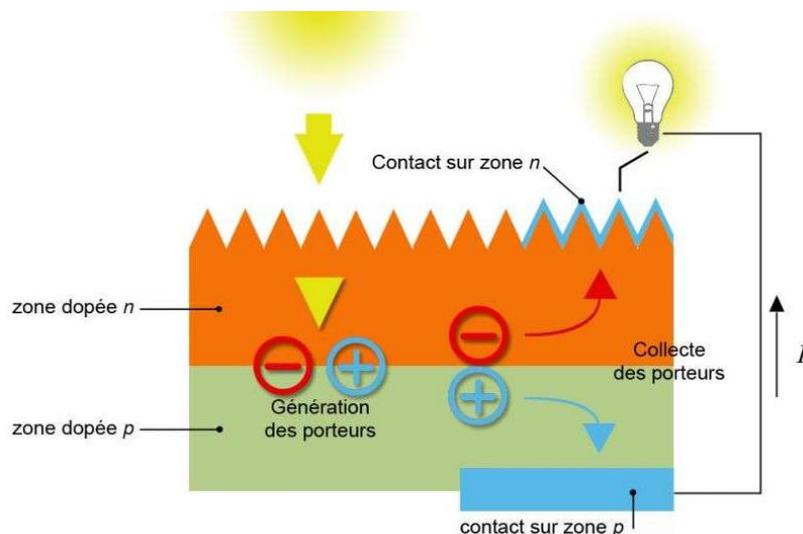


Figure I-1 Constitution et principe d'une cellule photovoltaïque [20].

I.2.2 Caractéristique électrique d'une cellule photovoltaïque

Une cellule photovoltaïque possède une caractéristique $I(V)$ non linéaire. La tension en circuit ouvert (V_{co}) d'une cellule PV dépend fortement du matériau semiconducteur utilisé, la température à laquelle est cellule et son état. Alors que son courant de court-circuit (I_{cc}) varie principalement selon le niveau d'irradiation solaire et selon les technologies et la tailles des cellules utilisées.

La figure I-2 montre la caractéristique non linéaire $I(V)$ d'une cellule PV à base de semi-conducteurs pour un cas de configuration donnée (éclairage, température). Notons, soit dit en passant, le point de puissance maximale (PPM ou MPP en anglais) est caractérisé par une tension et un courant optimum I_{MPP} et V_{MPP} .

Etant donné que la puissance de la cellule est le produit du courant par la tension, on peut tracer la caractéristique P-V de la cellule PV (Figure I-2).

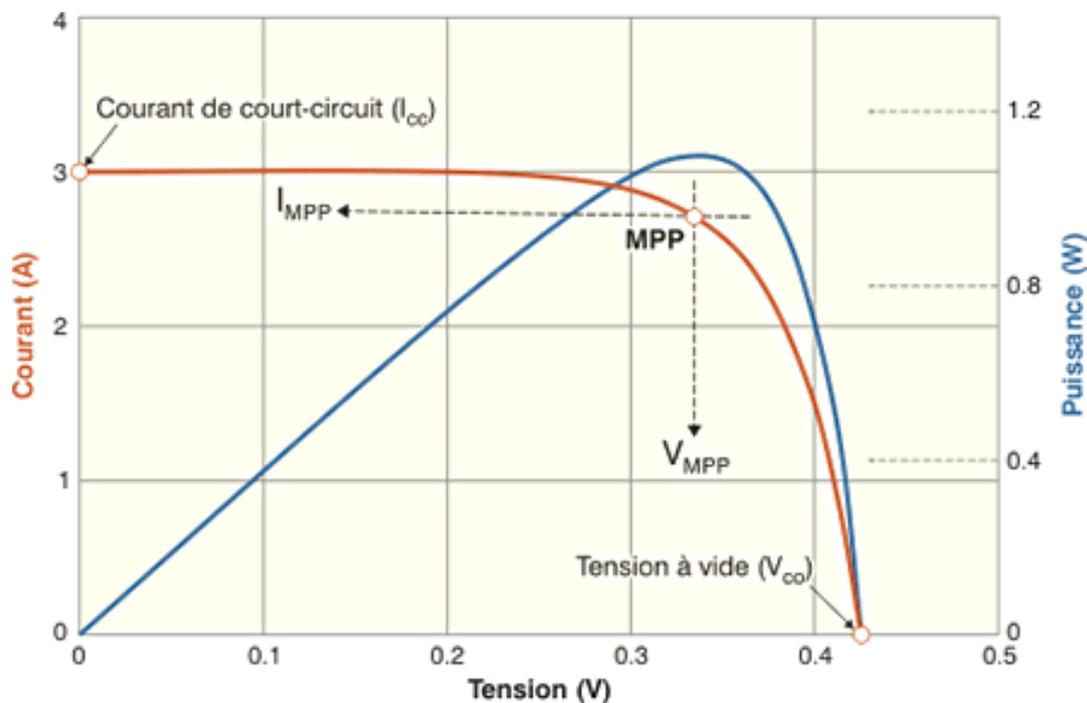


Figure I-2 Caractéristique I - V et P - V d'une cellule photovoltaïque.

I.2.3 Modélisation d'une cellule photovoltaïque

L'un des modèles électriques d'une cellule photovoltaïque les plus utilisés dans la littérature est le suivant [5] :

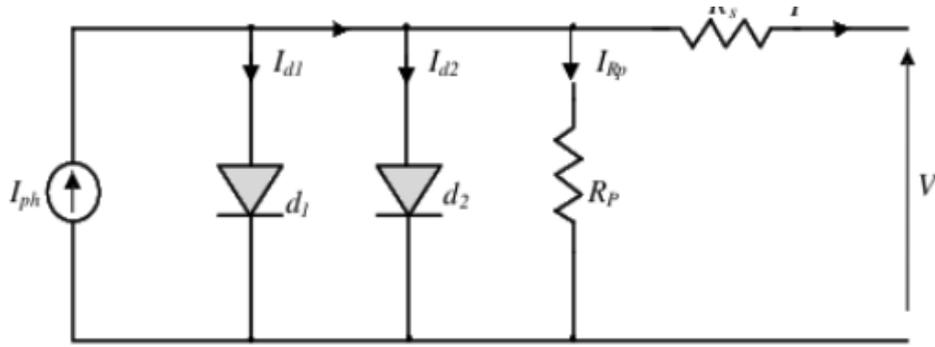


Figure I-3 Circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque à deux diodes [1].

Comme le montre le schéma de la figure I-3 une photopile comporte en réalité une résistance série R_s et une résistance en shunt R_p . Ces résistances influenceront sur la caractéristique I-V de la photopile.

La résistance série est la résistance interne de la cellule. Elle est due à la résistance du semi-conducteur utilisé, de la résistance de contact des grilles collectrices et de la résistivité de ces grilles. La résistance shunt est due à un courant de fuite au niveau de la jonction. Elle dépend du processus de fabrication. Le modèle mathématique pour la caractéristique courant-tension de la figure I-3 est donné par [2] :

$$I = I_{ph} - I_{d1} \left[e^{\frac{q(V+I.R_s)}{n_1 kT}} - 1 \right] - I_{d2} \left[e^{\frac{q(V+I.R_s)}{n_2 kT}} - 1 \right] - \frac{V + I.R_s}{R_p} \quad (1.1)$$

$$I_{ph}(T) = I_{ph}|_{T=298^{\circ}K} [1 + (T - 298.K)(5.10^{-4})] \quad (1.2)$$

$$I_{d1} = K_1 T^3 e^{-\frac{E_g}{kT}} \quad (1.3)$$

$$I_{d2} = K_2 T^{\frac{5}{2}} e^{-\frac{E_g}{kT}} \quad (1.4)$$

Où :

I, V : sont le courant (A) et la tension (V) de sortie de la cellule photovoltaïque ;

I_{ph} : est le photo-courant produit (A) ;

I_{d1}, I_{d2} : sont les courants de saturation des diodes (A) ;

n_1, n_2 : les facteurs d'idéalité de la diode ;

R_s, R_p sont respectivement la résistance série et la résistance parallèle (Ω);

T : est la température absolue ($^{\circ}K$),

q ($1.602 \times 10^{-19}C$) : est la charge élémentaire,

K : La constante de Boltzmann ($1.38 \times 10^{-23}J/^{\circ}K$),

E_g : Est la bande d'énergie du semi-conducteur (eV).

I.3 Le module photovoltaïque

Dans le but d'augmenter la tension d'utilisation, les cellules PV sont connectées entre elles. Les modules seront généralement au nombre de 36 cellules. De par la fragilité des cellules au bris et à la corrosion, les cellules sont encapsulées sous verre ou sous composé plastique en guise de protection envers leur environnement. Le tout est appelé : *module photovoltaïque*.

Afin d'augmenter la tension et l'intensité d'utilisation, les modules peuvent également être connectés selon une configuration série et parallèle.

I.4 Modèle mathématique

Si l'on considère le cas de configuration du modèle de circuit équivalent à la figure (I-3), Nous obtenons l'équation (I.5) et ce pour une rangée photovoltaïque de cellules (le plus souvent considérée comme un panneau solaire) avec h cellules photovoltaïques raccordées selon une configuration série [2].

$$I = I_{ph} - I_{d_1} \left[e^{\frac{q(V+I.h.R_s)}{h.n_1 kT}} - 1 \right] - I_{d_2} \left[e^{\frac{q(V+I.h.R_s)}{h.n_2 kT}} - 1 \right] - \frac{V + IhR_s}{h.R_p} \quad (1.5)$$

I.5 Le générateur photovoltaïque

I.5.1 Structure d'un générateur photovoltaïque

Dans des conditions climatiques standard, la puissance maximale qu'une cellule, silicium d'un ordre de grandeur standard, peut délivrer est faible et insuffisante pour la plupart des champs applications (domestiques ou industrielles). Pour une production conséquente de puissance, il faudrait faire un assemblage de plusieurs cellules afin de créer un module photovoltaïque, comme l'illustre la figure I-5.

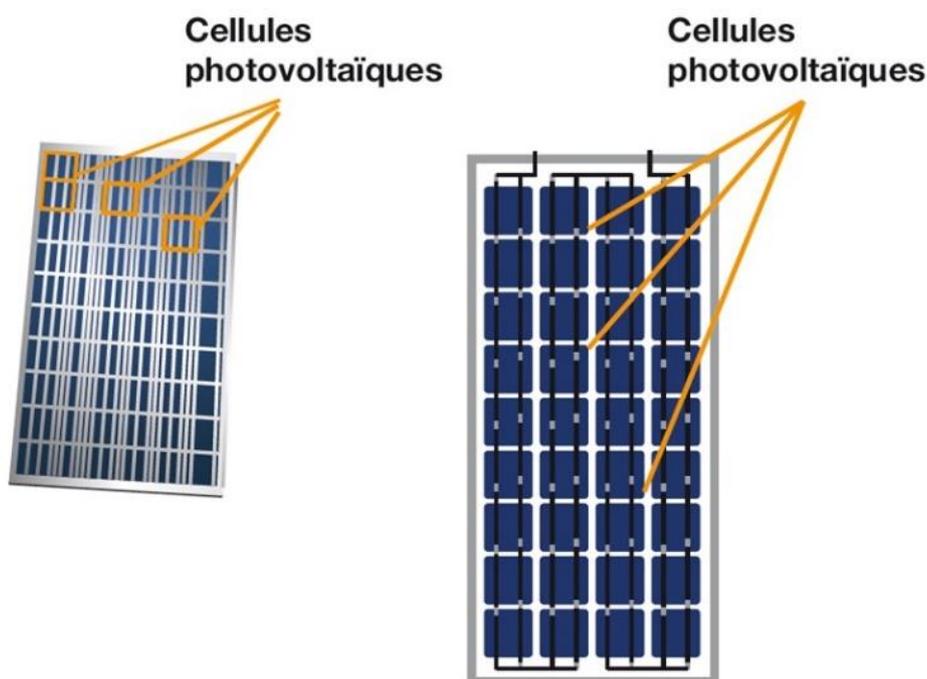


Figure I-4 Association de cellules photovoltaïques [19].

CHAPITRE I : Synthèse bibliographique

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

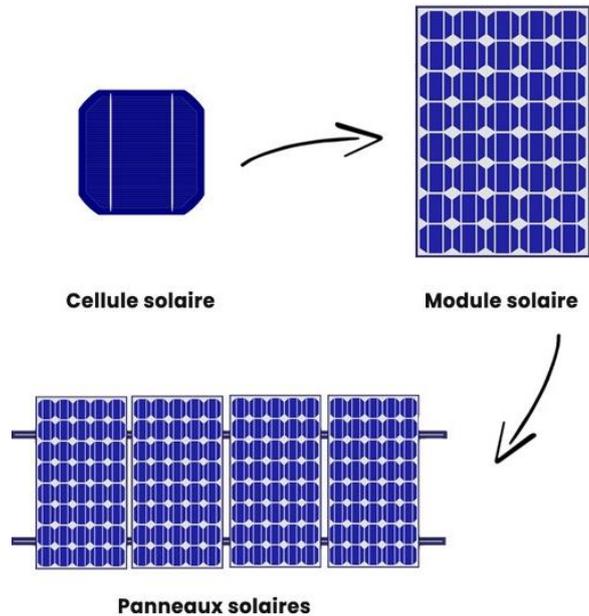


Figure I-5 Cellule, module et panneau PV [19].

Le générateur photovoltaïque est donc composé d'un réseau série/parallèle de plusieurs modules photovoltaïques identiques qui sont par la suite regroupés en panneaux/champ. Les courants s'additionnent lors d'une configuration parallèle des cellules. En revanche, en présence d'une configuration (assemblage) série, c'est les tensions qui vont s'additionner. L'addition des courants et tension est permise dans, leurs configurations respectives, sous réserve que les cellules aient des caractéristiques identiques.

Dans le cas d'un assemblage de n_s cellules selon une configuration série, la caractéristique équivalente est obtenue par addition des tensions de chaque cellule, alors même que le courant qui parcourt les cellules reste le même.

La figure I-6 illustre la caractéristique résultante, avec : $I_{scc} = I_{cc}$ et $V_{sco} = n_s \cdot V_{co}$.

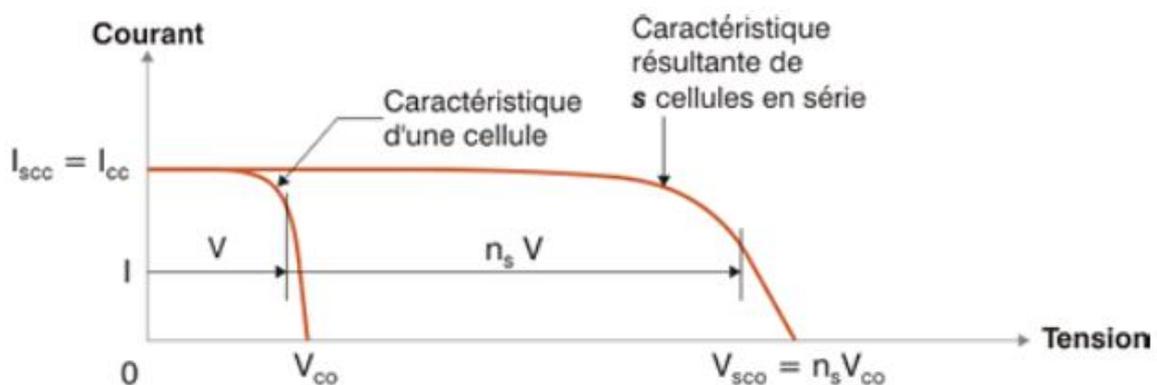


Figure I-6 Caractéristique résultante d'un groupement de n_s cellules en série [4].

CHAPITRE I : Synthèse bibliographique

Dans le cas d'un assemblage de n_p cellules en parallèle, la caractéristique équivalente du groupement est obtenue en additionnant les courants lors même que les cellules sont soumises à la même tension.

La figure I-7 illustre la caractéristique résultante avec $I_{pcc} = n_p \cdot I_{cc}$ et $V_{pco} = V_{co}$.

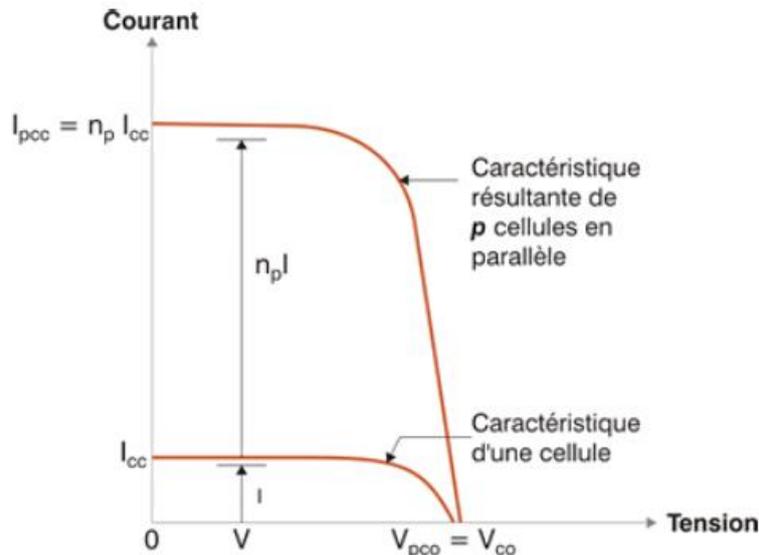


Figure I-7 Caractéristique résultante d'un groupement de n_p cellules en parallèle [4].

I.5.2 Caractéristique Courant-Tension et Puissance-Tension

I.5.2.1 Influence de l'éclairement sur les courbes I-V et P-V

La caractéristique I-V d'une cellule PV dépendant de l'éclairement et de la température. En conséquence, la puissance délivrée par un module PV variera au gré de ces variations atmosphériques.

La figure I-8 illustre les caractéristiques I-V et P-V pour différents niveaux d'éclairiments à une température donnée de 25°C.

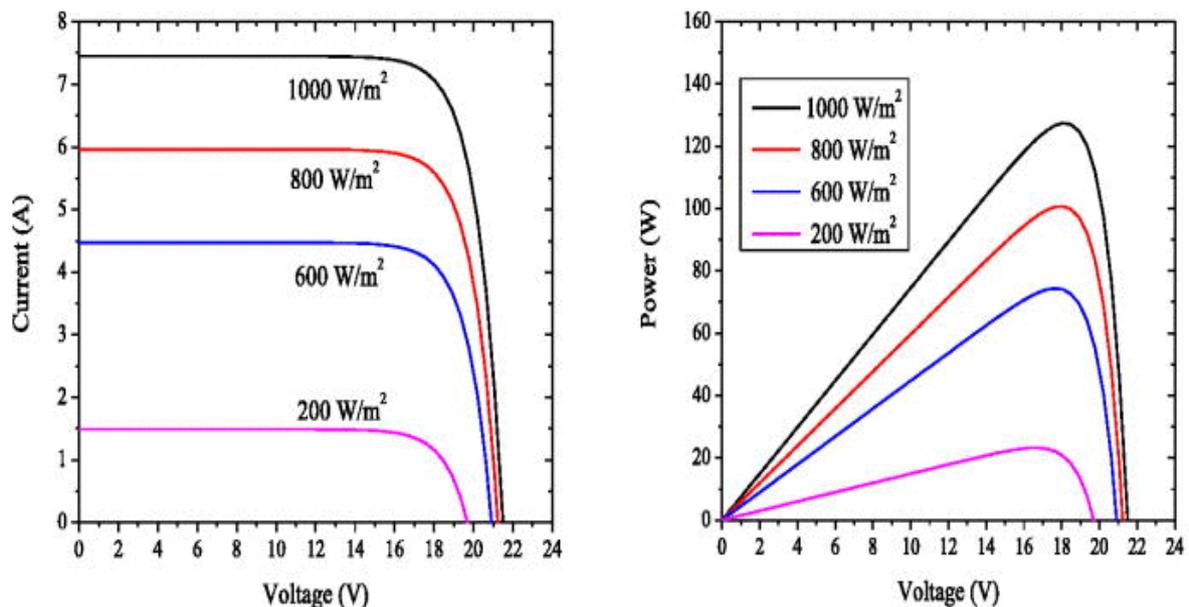


Figure I-8 : Influence de l'éclairement sur les courbes Courant-Tension (I-V) et Puissance-Tension (P-V).

CHAPITRE I : Synthèse bibliographique

Il est évident que à mesure que l'intensité du rayonnement augmente, la valeur du courant de court-circuit I_{cc} s'accroît en conséquence. Par ailleurs, la tension en circuit ouvert V_{co} demeure quasiment constante et ce en dépit d'un faible éclaircissement. Ceci implique que :

La puissance maximale (PPM) de la cellule est proportionnelle à l'éclaircissement et les points de puissance maximale se situent, avec une légère déviation mais, quasiment à la même tension.

I.5.2.2 Influence de la température sur les courbes I-V et P-V

La température a également son rôle à jouer sur l'influence de la caractéristique courant/tension. Nous constatons que la température engendre une influence négligeable sur la valeur du courant de court-circuit. Toutefois, la tension en circuit ouvert baisse drastiquement à mesure que la température augmente, par conséquent la puissance extractible diminue.

La puissance diminue avec un certain pourcentage pour chaque degré °C inférieur ou supérieur à une température de fonctionnement standard (souvent de 25°C). Au vu de ceci, La température ainsi que la plage de sa variation qui règne dans un milieu est à prendre avec beaucoup de considération

La figure I-9 illustre les caractéristiques I-V et P-V pour différentes valeurs de la Température pour un éclaircissement donné de 1000 W/m^2 [1].

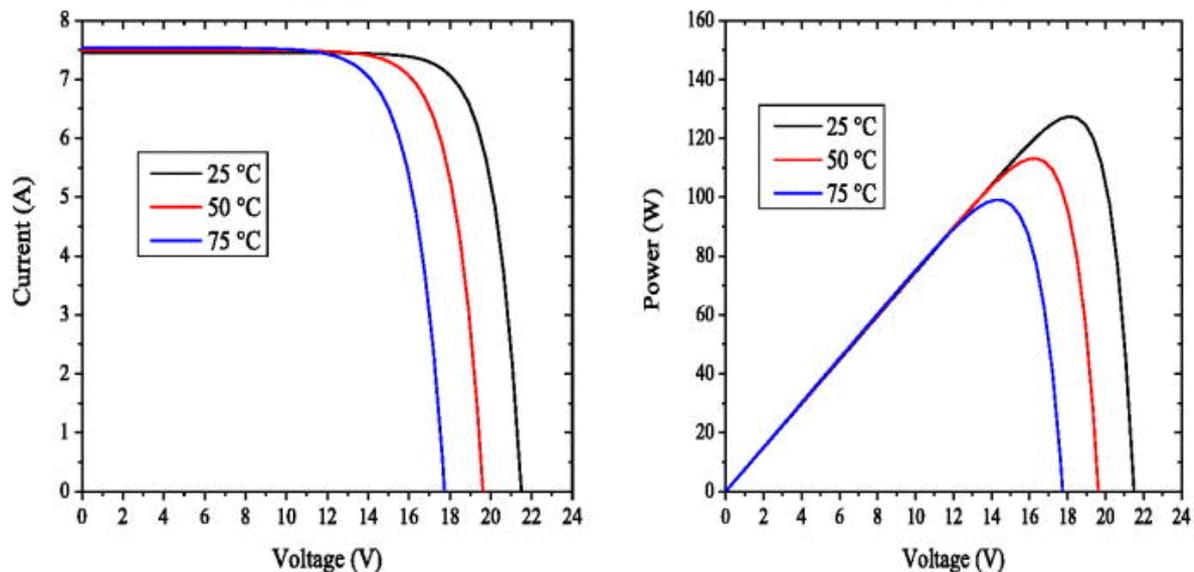


Figure I-9 Influence de la température sur les courbes : Courant-Tension (I-V), Puissance-Tension (P-V).

Comparativement à la variation de l'éclaircissement, nous constatons que la température dévie fortement le point PMM lors d'une variation de température. Aussi, nous remarquons une constance de I_{cc} et une variation de la valeur de V_{co} assez importante en comparaison avec une variation de l'éclaircissement.

I.5.2.3 Influence d'un éclaircissement non homogène : Ombrage partiel

La présence d'un éclaircissement non homogène (ombrage-partiel), auxquelles s'expose les cellules photovoltaïques, est tout à fait naturel. Il est souvent dû à des éléments naturels tel que des animaux volants, aux nuages, de la poussière ou tout simplement d'une cellule défectueuse ou en fin de cycle de vie. Lors d'une manifestation d'un tel phénomène, le module photovoltaïque y réagit très sensiblement

CHAPITRE I : Synthèse bibliographique

En effet, l'ombrage altère drastiquement la production énergétique totale d'un système photovoltaïque. Dans ce cas, l'allure des courbes caractéristiques I-V et P-V change : elle présente des maxima locaux. La poursuite du Point de Puissance Maximale (MPPT) devient plus complexe. De plus, le rendement baisse considérablement au-delà d'un certain pourcentage de la surface ombragée [1].

L'influence de l'ensoleillement non homogène sur les caractéristiques P-V est illustrée dans la figure I-10. On constate l'existence de plusieurs maxima locaux et un maxima global selon le scénario considéré.

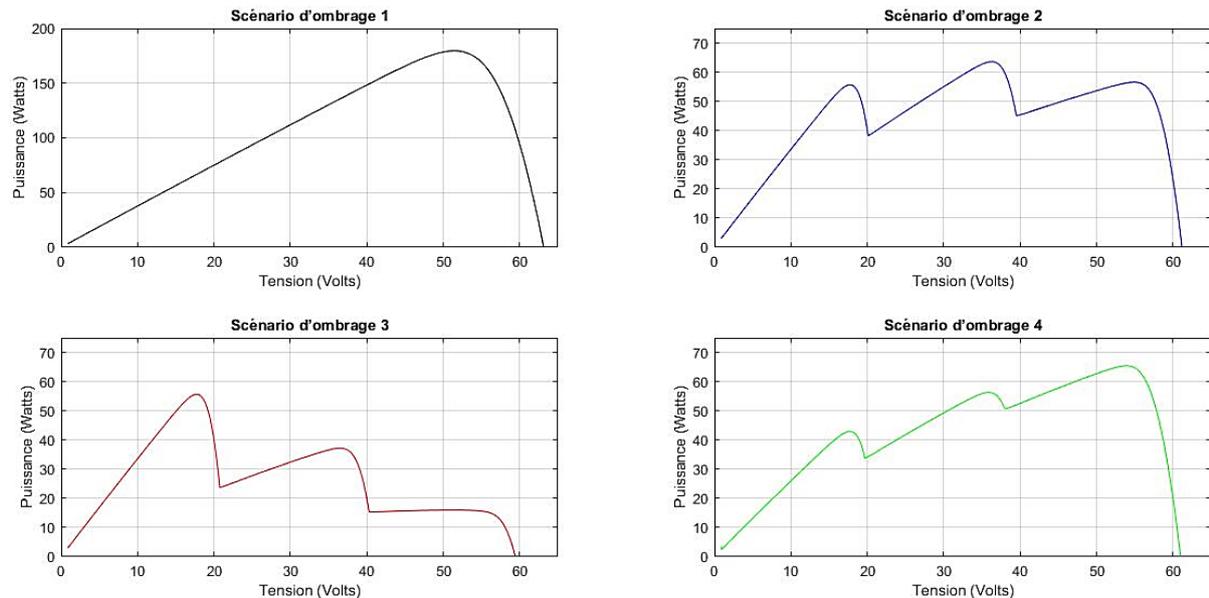


Figure I-10 Caractéristique P-V pour différents scénarios d'ombrage.

I.6 Connexion générateur photovoltaïque-charge

I.6.1 Connexion directe

Au début, l'approche qui visait à exploiter l'énergie solaire via les panneaux photovoltaïque se faisait en connexion directe (Figure I-11). Cette approche avait l'immense désavantage d'avoir un point de fonctionnement du générateur PV dépendant de l'impédance de la charge à laquelle il est connecté. En d'autres mots, tout est tributaire d'une tension V_{opt} fixée est faiblement variable par la tension nominale essentiellement et en plus d'une limitation de réglage de la tension de la charge due à l'application.

Ce choix de configuration, néanmoins, avait l'avantage d'être simple, fiable et était à moindre coût. Ce type de connexion nécessite une diode anti-retour et ce afin d'empêcher la circulation d'un courant négatif vers les modules PV, et ainsi, causer la détérioration de ces derniers.

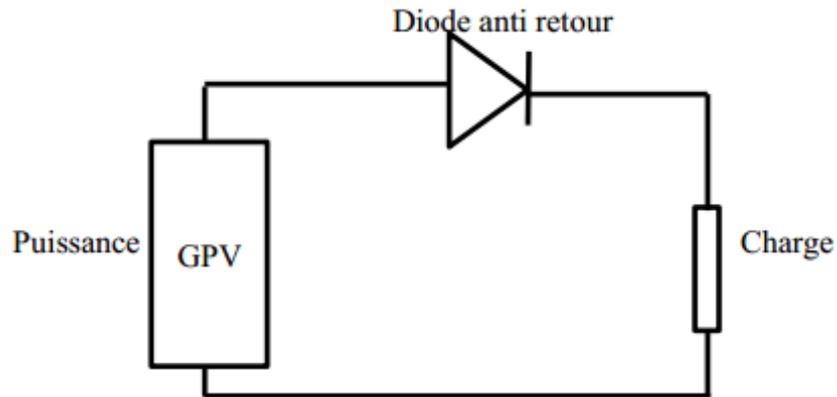


Figure I-11 Connexion directe GPV-Charge.

I.6.2 Connexion indirecte via un étage d'adaptation

Pour solutionner la problématique en question, il est plus que nécessaire de rajouter un étage d'adaptation, comme indiqué sur la figure I-12. Cette disposition garantit le transfert d'énergie maximale en faisant en sorte d'attendre des conditions de fonctionnement optimales prenant en compte le générateur PV et la charge.

Pour que tout fonctionne correctement, il est primordial d'ajouter des éléments qui feront en sorte d'assurer cette adaptation, entre autres, des boucles de contrôle en entrée et en sortie de l'étage d'adaptation. Ces boucles auront pour buts d'extraire le MPP aux bornes du générateur PV à chaque instant t (en entrée) et assure un fonctionnement optimal (en sortie)

Les techniques utilisées pour les boucles de contrôle en entrée consistent à associer à l'étage d'adaptation une commande appelée MPPT ou Maximum Power Point Tracking, qui effectue une recherche permanente du point de puissance maximale PPM.

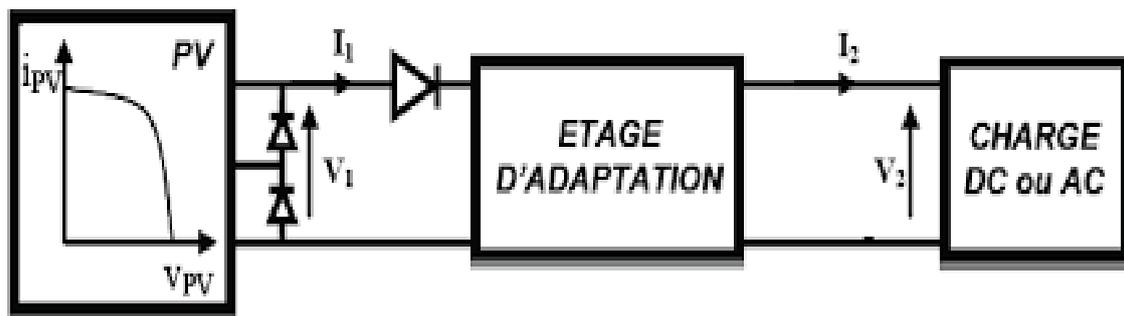


Figure I-12 Connexion d'un GPV à une charge via un étage d'adaptation.

I.7 Convertisseur DC/DC

La figure I-6 montre la représentation d'un convertisseur DC/DC, qui peut être utilisé comme interface entre la source et la charge [3].

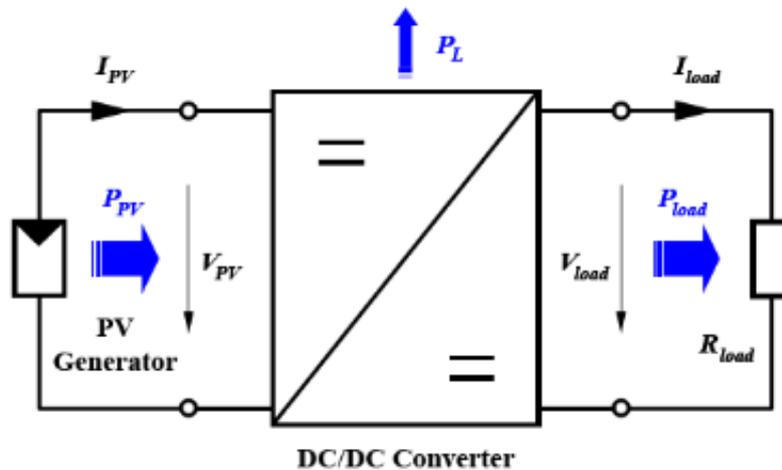


Figure I-13 Convertisseur DC/DC.

Le rôle du convertisseur DC/DC (dans le cadre du PV) consiste à faire l'adaptation entre la source (Générateur Photovoltaïque) et la charge afin d'assurer un transfert de puissance maximal. Ceci est rendu possible en maintenant le Point de fonctionnement au voisinage du MPP et ce pour n'importe quelles conditions de fonctionnement, entre autres le rayonnement, température, l'éclairement, l'ombrage, caractéristique de charge, etc. Afin qu'il y ait des pertes négligeables ou quasi-nulles, il est nécessaire que le convertisseur DC/DC soit constitué d'éléments réactifs et ce dans le but d'avoir une puissance en entrée et en sortie égale.

I.8 Convertisseur survolteur (Boost convertter)

Un convertisseur Boost, ou hacheur parallèle, est une alimentation à découpage qui convertit une tension continue en une autre tension continue de plus forte valeur. Ce type de convertisseur peut être utilisé comme adaptateur source-charge, lorsque le point de fonctionnement en couplage direct est à droite du MPP.

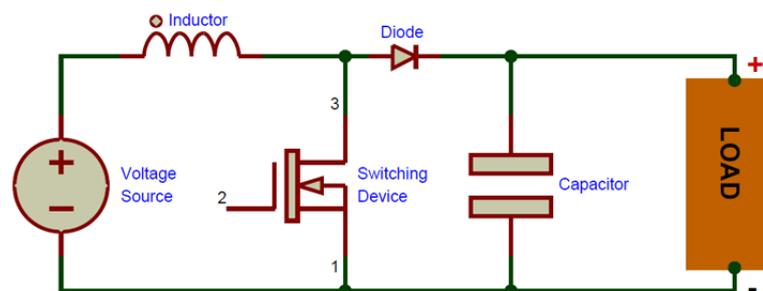


Figure I-14 Schéma du circuit électrique d'un convertisseur Boost [21].

Si le commutateur S_1 est désactivé à t_0 et si la chute de tension aux bornes de la diode est négligée, alors $V_{load} = V_{Capacitor}$ est égale à V_{PV} (figure I-15).

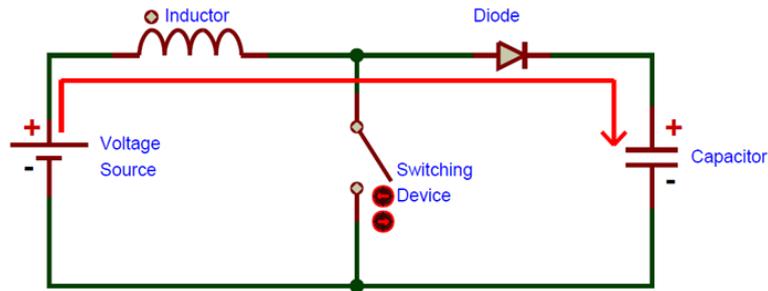


Figure I-15 Schéma du circuit électrique d'un convertisseur Boost à l'état de repos [21].

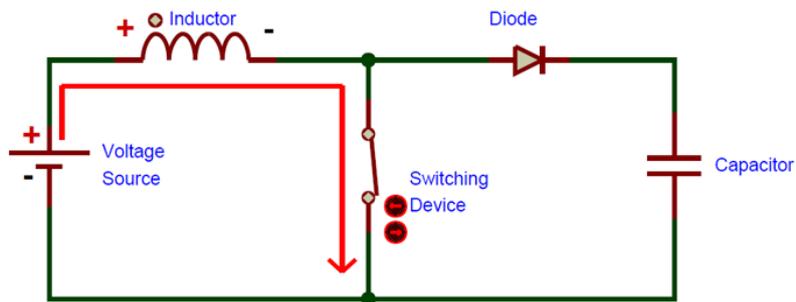


Figure I-16 Convertisseur Boost durant l'état on.

Lorsque le commutateur est activé (figure I-16), la tension de la charge chute immédiatement à zéro si le condensateur C est omis. Le courant du circuit i_L circule à travers l'inductance L et augmente suivant l'équation :

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{V_{PV}}{L} \quad (1.6)$$

Lorsque $S1$ est désactivé (figure I-17), l'inductance se trouve en série avec le générateur et sa f.e.m s'additionne à celle du générateur (effet survolteur). Le courant i_L traversant l'inductance traverse ensuite la diode D , le condensateur $C1$ et la charge. Il en résulte un transfert de l'énergie accumulée dans l'inductance vers le condensateur. Le courant décroît ensuite progressivement, car $V_{capacitor} = V_{load} > V_{PV}$:

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{V_{PV} - V_{Load}}{L} \quad (1.7)$$

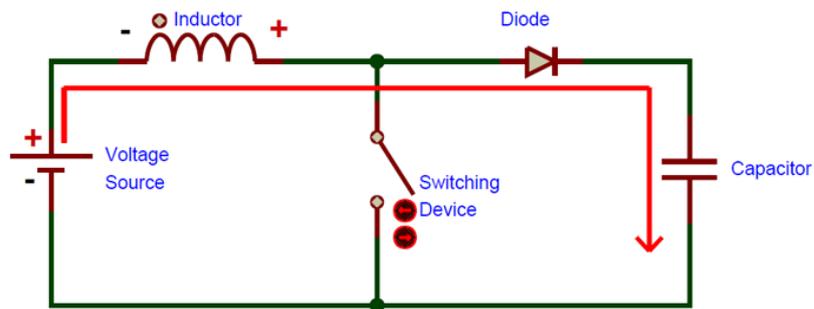


Figure I-17 Convertisseur Boost durant l'état.

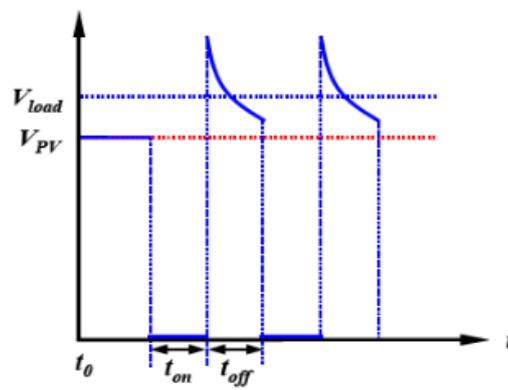


Figure I-18 Formes d'ondes des tensions V_{pv} et V_{load} dans le cas du convertisseur Boost [1].

La forme d'onde de la tension de la charge est représentée sur la figure I-18. La diode D permet d'éviter la décharge du condensateur C, lorsque le commutateur est activé. Le condensateur est supposé assez grand pour pouvoir lisser la tension de la charge. La tension de la charge est donnée par :

$$V_{Load} = \frac{T}{t_{off}} V_{PV} = \frac{1}{1 - D} \cdot V_{PV} \quad (1.8)$$

$D = \frac{t_{on}}{T}$: est le rapport cyclique ($0 < D < 1$).

On considère ici uniquement le comportement du circuit en conduction continue.

Autre ce convertisseur, d'autre type de convertisseur DC-DC existe :

- Convertisseur dévolteur (Buck converter)
- Convertisseur Buck-Boost :

I.9 Conclusion :

Ce chapitre introductif était destiné à faire un tour des concepts de base des systèmes photovoltaïques. De l'origine physique de l'effet photovoltaïque jusqu'à l'impact des conditions atmosphériques sur les caractéristiques du générateur photovoltaïque en passant par les composant intermédiaires du système photovoltaïque.

Aussi, nous avons aussi vu que pour exploiter pleinement l'énergie délivrée par le générateur photovoltaïque, il était primordial d'avoir recours à une chaîne de conversion qui assure l'adaptation entre le générateur photovoltaïque et la charge. Exploiter au mieux cette énergie reviendrait à se positionner à proximité du point de puissance maximale.

C'est ainsi que le prochain chapitre enchainera sur les méthodes de recherche du point de puissance maximale.

CHAPITRE II

PRINCIPES ET ALGORITHMES BIO INSPIRÉS DANS LA RECHERCHE DU POINT DE PUISSANCE MAXIMALE

II.1 Introduction

Afin de permettre à un système PV de fonctionner continuellement à des PPM, il est nécessaire de prévoir l'introduction d'une commande spécifique qui consiste à rechercher le point de puissance maximale PPM ou « Maximum Power Point Tracking – MPPT ». Leur principe est simple : il consiste à pister le point de puissance maximale constamment et en gardant une bonne adaptation entre le générateur et sa charge assurant ainsi un transfert de puissance maximum.

La figure II-1 reprend le schéma de la figure I-12 mais avec une légère différence qui consiste en l'ajout d'une commande MPPT qui consistera réaliser l'adaptation entre le générateur PV et la charge.

Le module de contrôle introduit grâce au MPPT consiste à agir sur le rapport cyclique de façon à amener le point de fonctionnement du générateur à sa valeur optimale de puissance et ce quel que soient les conditions atmosphériques et/ou les variations brusques de la charge. En d'autres termes, la commande MPPT fera varier le rapport cyclique de telle sorte que la puissance fournie par le GPV soit maximale à ses bornes.

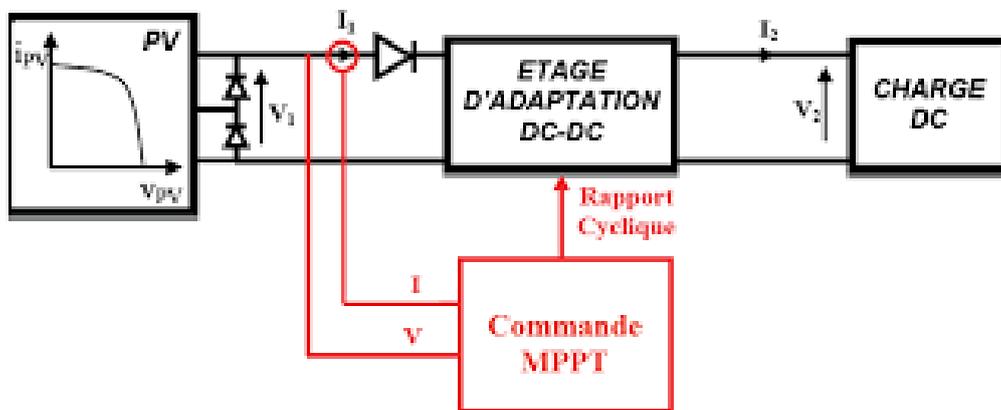


Figure II-1 La Chaîne de conversion photovoltaïque avec convertisseur statique.

II.2 Les Algorithmes MPPT

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

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

Par ailleurs, d'autres algorithmes MPPT plus complexes qui font parfois appel à des techniques nouvelles ont vu le jour, à savoir [3] :

- Les algorithmes basés sur la logique floue.
- Les algorithmes à base de réseau de neurones.
- Les algorithmes d'identification en temps réel du MPP.
- Dans le cas où la charge est une batterie, il existe un algorithme qui vise à maximiser uniquement le courant de charge puisque la tension en sortie est constante. Cet algorithme fait ainsi appel à un seul capteur ce qui réduit considérablement le coût.
- L'algorithme de la capacité parasite (Parasitic Capacitance).
- La méthode de l'oscillation forcée.

II.3 Les méthodes bio inspirées (MBI)

II.3.1 Concepts de base du bio inspiré

La recherche dans la discipline des méthodes Bio Inspirées (BI) provient des observations de l'être humain du monde naturel, et plus précisément, les créatures vivantes qui font appel à des stratagèmes afin de répondre à leurs besoins primaires. Ces observations sont devenues des méthodes qui ont connues un succès franc dans le domaine de la recherche à plus forte raison, dans le domaine de l'optimisation. Les caractéristiques de ces solutions bio inspirées tirées des différents travaux de recherche issus de la littérature sont résumées comme suit :

- Fonction métaheuristique
- Simplicité
- Auto-organisation et auto-apprentissage
- Robustesse
- Modularité & flexibilité
- Réactivité

Ces algorithmes ont un fonctionnement simple basé sur la sélection naturelle. Afin de résoudre des problèmes d'optimisation stochastiques, des individus constituant une population initiale sont choisis, aléatoirement ou non, dans un intervalle de recherche prédéfini.

Par la suite, cette population est améliorée au fur et à mesure des itérations en générant de nouvelles solutions grâce à l'actualisation de la position de chacun des individus en fonction de la meilleure solution identifiée précédemment. Cette étape est répétée jusqu'à atteindre la meilleure solution pour un nombre d'itération définis au départ (condition de rupture ou d'arrêt).

De nos jours, ces techniques sont encore en voie de développement. Ainsi, il n'existe pas une métrique fixe pour les classer. Par ailleurs, ces techniques sont catégorisées en deux principaux groupes : la biologie et les théories de l'évolution qui ont inspirés les Algorithmes Evolutionnaires (Evolutionary Algorithms) et l'éthologie avec les algorithmes à base d'Intelligence en Essaim (Collective) plus communément connue sous le nom de (Swarm Intelligence).

La figure II-2 illustre les deux principaux groupes du domaine Bio-Inspiré.

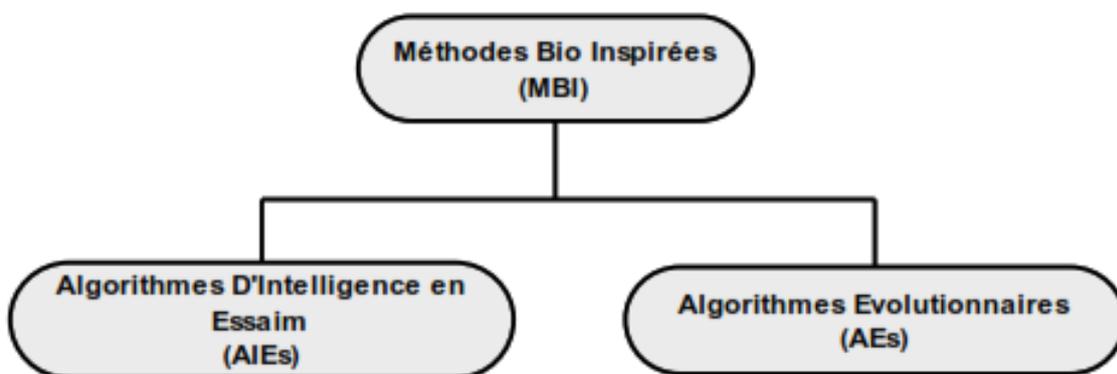


Figure II-2 Groupes du domaine Bio Inspiré.

Dans ce projet de fin d'étude, nous allons nous focaliser sur une méthode qui dérive d'un algorithme d'intelligence en essaim.

II.3.2 Méthodes basées sur l'intelligence en Essaim

L'intelligence en essaim (collective) résulte des aptitudes des membres d'une communauté qui interagissent entre eux. Ces individus peuvent exécuter des tâches collectives complexes via à un mécanisme synergétique. Sous certaines conditions, la collaboration entre individus permettra l'accomplissement de prouesse bien supérieurs à celles des individus pris isolément. Les principales caractéristiques dont fait preuve L'intelligence en essaim sont [1] :

- L'information locale : chaque membre de la communauté ne possède qu'une connaissance partielle de l'environnement dans lequel il évolue et il n'a pas conscience de la totalité des éléments qui influencent le groupe ;
- L'ensemble des règles : chaque membre de la communauté suit un ensemble fini et restreint de règles simples par rapport au comportement global de la communauté vue dans son ensemble ;
- Les interactions multiples : chaque membre est en relation avec un ou plusieurs membres de la communauté ;
- La collectivité : chaque membre trouve un intérêt à collaborer avec les autres (parfois instinctivement) et sa performance dans le groupe est bien supérieur que s'il œuvrait de manière individuelle.

L'intelligence en essaim est observée de manière accrue chez le règne animal (les loups, abeilles, bancs de poissons, etc...). Dotée d'une bonne organisation, d'intelligence, plusieurs algorithmes basés sur le principe d'intelligence en essaim ont vu le jour pour solutionner des problèmes de la vie réels. Dans notre cas, nous allons élaborer un contrôleur MPPT basé sur les principes de cette intelligence. Un tel contrôleur permettra de pister le MPPT dans le cadre de l'optimisation de puissance photovoltaïque dans différents cas de variations atmosphériques.

Plusieurs algorithmes ont été élaborer des contrôleurs MPPT appliqués au secteur des énergies renouvelable, notamment des systèmes photovoltaïques. Nous en citerons :

- Contrôleur MPPT à base de l'algorithme d'optimisation de colonie de fourmis (ACO_MPPT) [24-34] ;
- Contrôleur MPPT à base de l'algorithme d'optimisation par Essaim de particules (PSO_MPPT) [35-38] ;
- Contrôleur MPPT à base de l'algorithme de colonies d'abeilles (ABC_MPPT) [39-42] ;
- Contrôleur MPPT à base de l'algorithme de recherche coucou (CS_MPPT) [43] ;
- *Contrôleur MPPT à base de l'algorithme de luciole (FA_MPPT) [44-45] ;*
- Contrôleur MPPT à base de l'algorithme d'optimisation de chauve-souris (BSO_MPPT) [46] ;
- Contrôleur MPPT à base de l'algorithme de pollinisation des fleurs (FPA_MPPT) [47] ;
- Contrôleur MPPT à base de l'algorithme d'optimisation de ver luisant (GWSO_MPPT) [48] ;
- Contrôleur MPPT à base de l'algorithme d'optimisation de meute de loups (GWO_MPPT) [49] ;
- Contrôleur MPPT à base de l'algorithme d'optimisation de l'enseignement-apprentissage (TLBOA_MPPT) [50] ;
- Contrôleur MPPT à base d'algorithme de saut de grenouille (SFLA_MPPT) [51].

Tous les contrôleurs cités ci-dessus ont leurs propres avantages et inconvénients. De ce fait, il est difficile de les classer selon une métrique. Toutefois, ils ont été conçus pour les mêmes objectifs, à savoir la poursuite du point de puissance maximale. Les critères qui permettent de jauger les performances des algorithmes bio-inspirés sont : complexité, la flexibilité, le nombre de capteurs nécessaires, la robustesse, la vitesse de convergence, le cout et l'efficacité.

Notre intérêt portera tout particulièrement sur un algorithme qui est une variante des algorithmes d'optimisations par Essaim de particules, à savoir : l'algorithme de luciole " Firefly Algorithme (FA)".

II.4 L'algorithme métaheuristique des lucioles appliquées pour la poursuite du point maximal de puissance

Dans la section précédente, nous avons parlé des différentes méthodes utilisées dans la recherche des points optimums, et plus précisément dans les MPPT. Une proposition d'une classification des différentes méthodes de recherche du MPP bio inspirées est établie dans le contexte des systèmes photovoltaïques [1].

Dans ce qui suit, nous avons sélectionné un algorithme issu des méthodes bio inspirées pour l'implémentation d'un contrôleur MPPT qui est l'algorithme des lucioles (FA_ALGO). Nous présenterons les principes, concepts de base et son application pour le développement du contrôleur MPPT basé sur l'algorithme des lucioles : FA_ALGO_MPPT.

En générale, dans un système photovoltaïque, optimiser la puissance revient à assurer une production maximale de cette dernière, et par ricochet, un bon rendement énergétique. Ceci est tout à fait possible si l'on prend en compte d'importants critères à savoir :

- Une architecture à configuration optimale des modules photovoltaïques ;
- Un contrôleur MPPT efficace ;
- La prise en compte des variations atmosphériques.

L'objet de ce projet de fin d'étude n'est pas de proposer une architecture optimale dans le cadre des MPPT. C'est pour cela que nous ne nous focaliserons que sur les deux derniers critères qui consistent à développer et concevoir un algorithmes bio inspirés efficaces pour des contrôleurs MPPT assurant une production optimale dans un système photovoltaïque et ce dans différents cas de figure de variation atmosphérique. Ainsi, dans ce qui suit, nous présenterons les différentes phases de conception pour l'élaboration de notre propre contrôleur FA_ALGO_MPPT.

Dans cette section, nous allons présenter le principe de base de l'algorithme Firefly (FA_ALGO), suivi des différentes étapes permettant l'élaboration du contrôleur MPPT (FA_ALGO_MPPT) pour la recherche du PPM.

II.4.1 Principes de base de l'algorithme FA

Les lucioles (en anglais FireFly) sont de petits coléoptères ailés capables de produire une lumière clignotante à des fins d'attraction mutuelle. Bien que ces espèces fassent partie des coléoptères, la plupart des femelles ne peuvent pas voler. Néanmoins, ces insectes peuvent émettre presque tous de la lumière et ce grâce à un type de réaction chimique appelée bioluminescence [6].

Les femelles peuvent imiter les signaux lumineux des autres espèces afin d'attirer des mâles dans le but de les capturer et de les dévorer. Par ailleurs, les lucioles ont un mécanisme de type condensateur qui consiste en une lente décharge jusqu'à ce qu'un certain seuil soit atteint, produisant ainsi une libération l'énergie sous forme de lumière. Cette émission se répète de façon cyclique.

L'Algorithme des lucioles développé par Yang [7] s'inspire de l'atténuation de la lumière dans l'espace et l'attraction mutuelle des lucioles tout en faisant fi de leurs sexualités. En l'occurrence : Yang considère toutes les lucioles comme unisexes.



Figure II-3 Les Lucioles.

L'algorithme des lucioles [8] [9] [10] [11] a été introduit par X.S Yang en 2008. Sa source d'inspiration fut basée sur l'émission, l'absorption de la lumière et le comportement attractif mutuelle des lucioles. Initialement, il eut été développé pour résoudre des problèmes d'optimisation pour ensuite servir à la résolution discrète des problèmes en tout genre tels que les vendeurs itinérants. En outre, il a également été utilisé dans le domaine du traitement d'image numérique, la compression de données et le Maximum Power Point Tracking (MPPT).

Le FA algorithme, qui tire son inspiration du comportement clignotant des lucioles, obéit à un certain nombre de règles [12][13][14] :

- Toutes les lucioles sont unisexes ; l'attraction mutuelle se fait indépendamment du genre.
- L'attractivité des lucioles est proportionnelle à la luminosité émise. Cette luminosité est inversement proportionnelle à la distance entre les lucioles ;
- L'attraction des lucioles se fait de la luciole la moins lumineuse vers la plus lumineuse et la luciole la plus lumineuse se déplace de manière aléatoire ;
- La luminosité est proportionnelle à la fonction objective qui devra être optimisée ;
- La taille de la population détermine le nombre de candidats dont chacun représente une solution (position) générant une luminosité (fonction objective) ;
- À l'instar des méthodes d'optimisation métaheuristiques, Le processus de l'algorithme des lucioles commence avec l'initialisation fixe ou aléatoire de la population des lucioles où chaque luciole, dans une population, représente une solution candidate ;
- Dans l'étape suivante et à chaque nouvelle étape itérative, la distance, la luminosité et l'attraction de chaque luciole est calculée, évaluée et mise à jour ;
- La distance entre toutes lucioles peut être définie comme une distance cartésienne.
- La fonction de l'attractivité est définie en utilisant l'intensité lumineuse, la distance entre lucioles, et un coefficient d'absorption ;
- Le mouvement d'une luciole est défini par une fonction de mouvement et ce en utilisant la position actuelle, l'attractivité et un pas aléatoire et d'autres paramètres inhérents à l'algorithme ;
- Après avoir comparé la luminosité de chaque luciole avec toutes les autres lucioles, les positions des lucioles sont mises à jour en se basant sur les informations des lucioles et de leurs voisins.
- Après un déplacement, la nouvelle luciole est évaluée et l'intensité de sa lumière est mise à jour. Lors d'une boucle de comparaison en paire, la meilleure solution actuelle (local) est mise à jour de manière itérative. Le Processus de comparaison par paire est répété jusqu'à la satisfaction des critères de résiliation.
- Les principales étapes de l'algorithme des lucioles sont données par la procédure qui suit :

II.4.2 Procédure de l'algorithme métaheuristique des lucioles

Nombre d'interaction ($Nbre_iter$), nombre de population ($Nbre_pop$), les paramètres intrinsèques de l'algorithme (α, β, γ), définition de la fonction objectif f .

Début

Générer une population initiale x_i ($i = 1, \dots, n$)
Déterminer les intensités de lumière I_i des x_i via $f(x_i)$

Tant que ($t < Nbre_inter$) faire

Pour $i = 1$ à $nbre_pop$

Pour $j = 1$ à $nbre_pop$

Si ($I_j > I_i$) alors

Calculer $\beta_{i,j}, r_{i,j}$
Déplacer la luciole i vers j .

Sinon Déplacer x_i

fin de Si

Evaluer la nouvelle solution
Mettre à jour l'intensité I_i
Vérifier si x_i est la meilleure

fin de j

fin de i

Trouve la meilleure x_i grâce à $f(x_i)$
 $t++$

Fait

Fin de la procédure

II.4.3 Les différentes étapes algorithmiques

II.4.3.1 Génération d'une population initiale

Lors de cette étape, l'algorithme des lucioles "Firefly algorithm" génère une population initiale fixe ou aléatoire représentant un ensemble de solutions possibles. Le choix de la population initiale est très important car il peut rendre plus ou moins rapide la convergence vers l'optimum global.

Dans le cas où l'on a aucun indice sur le type de problème à solutionner, il est essentiel que la population initiale couvre tout le domaine de recherche. Le choix du nombre de candidat d'une population (nbre_Pop) est un paramètre en lien directe avec la vitesse de convergence.

Le choix d'une population trop élevée peut augmenter considérablement le temps de calcul et le choix d'une population de petit de la taille conduira à une convergence prématurée. Les lucioles se verront, alors, coincées dans un maxima local à cause du fait qu'elles n'ont pas été ventilées correctement sur tout le domaine de recherche.

II.4.3.2 Fonction coût

La fonction d'évaluation (fitness) en terminologie anglo-saxonne ou de coût/objective, affecte à chaque luciole une valeur numérique qui représente un coût de performance des lucioles. Cette fonction servira de critère de jugement à l'algorithme afin qu'il converge vers l'optimum.

L'efficacité de l'algorithme, en termes de pertinence de la solution et le temps de calcul, dépend principalement de la fonction objective, pour cela elle doit définir les fonctions objectives de la façon la plus fidèle que possible.

D'ordinaire, La fonction objective est définie et explicite. Dans notre cas (MPPT dans le contexte des systèmes photovoltaïques), la fonction objective est implicite, c'est-à-dire que nous n'avons aucune formule mathématique qui est fonction des données du problème.

II.4.3.3 Mise à jour et déplacement

A chaque nouvelle étape itérative, la luminosité (fonction objective) et l'attraction de chaque luciole est calculée. Après un déplacement, la nouvelle luciole est évaluée. Sa luminosité, l'attraction, sa position ainsi que sa distance par rapport aux autres lucioles sont mises à jour.

Lors d'une boucle de comparaison en paire, la meilleure solution actuelle (local) est mise à jour de manière itérative. Le Processus de comparaison par pair se perpétue jusqu'à la satisfaction des critères de d'arrêt (la résiliation).

II.4.3.4 Arrangement

Dans notre algorithme, Le classement des lucioles s'effectue par rapport à la fonction objective et donc selon l'intensité de la lumière que produit chaque luciole. Généralement, le classement sert à déterminer la plus ou la moins lumineuse des lucioles. Si l'on cherche à maximiser la fonction objective (critère), le classement se fera selon l'ordre croissant. Par conséquent, la plus lumineuse des lucioles, qui représente la luciole qui maximise la fonction objective, et le meilleur candidat et Vice versa.

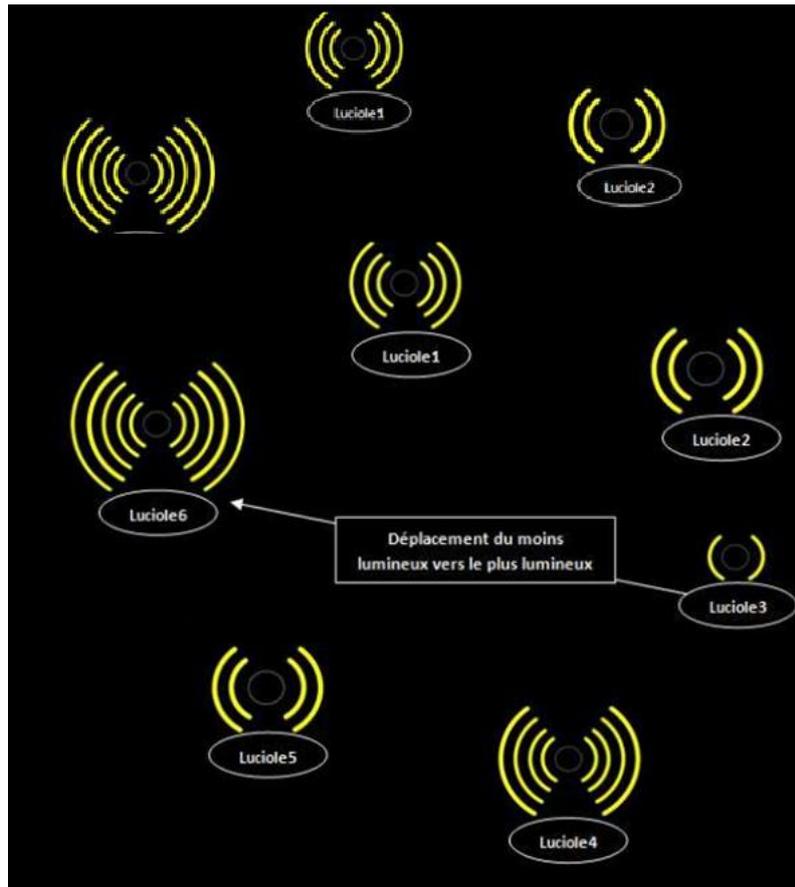


Figure II-4 Déplacement des lucioles dans une itération.

II.4.3.5 Critère d'arrêt

Les étapes itératives précédentes (déplacement, mise à jour et arrangement) ne s'arrêteront que lorsque la condition d'arrêt soit satisfaite. Cette condition correspond soit à un nombre maximum d'itération fixée au départ, ou quand une solution satisfaisante proche de la solution optimale est atteinte. Aussi on peut interrompre la boucle quand les résultats de l'algorithme sont devenus stable pour éviter des pertes de puissance qui sont principalement dues aux oscillations autour du point maximal.

Au cours de son évaluation, la population tend à converger, c-à-d, les lucioles tendent à se ressembler de plus en plus. Quand la population s'uniformise, les lucioles fournissent une bonne approximation d'un optimum du problème. Si cet optimum n'est pas toujours l'optimum global, c'est généralement un optimum local proche (en qualité) de celui-ci.

II.4.4 Paramétrages de l'algorithme des lucioles

La mise en œuvre de l'algorithme des lucioles ne pose pas de grandes difficultés. Toutefois, son paramétrage reste une étape cruciale et critique. Ces paramètres dépendent étroitement du type de problème à résoudre. Le plus souvent des cas, les valeurs de ces paramètres sont réglées en fonction des résultats expérimentaux obtenus, du nombre de lucioles, de la gamme et de la dimension de la population choisie. Dans notre algorithme "Firefly Algorithm" on prend en compte les paramètres suivants :

II.4.4.1 Nombre de luciole

Le nombre de lucioles (la taille de la population) a une influence directe sur l'algorithme à tout point de vue. Pour cela, il est très important de bien choisir ce paramètre pour garantir un meilleur compromis entre la convergence et le temps d'exécution.

Il faut savoir qu'augmenter le nombre de luciole revient à augmenter le temps d'exécution de l'algorithme. Par contre si le nombre de luciole est petit, il y aura alors une probabilité de converger vers un optimum local (convergence prématurée).

Par conséquent, nous devons choisir avec beaucoup de soin le nombre de luciole pour avoir une bonne probabilité de convergence et un temps d'exécution le plus court possible.

II.4.4.2 Attraction de luciole

Dans l'algorithme des lucioles, il y a deux valeurs très importantes : la variation de l'intensité lumineuse et la formulation de l'attractivité. [16]

L'attraction des lucioles est proportionnelle à l'intensité de la lumière qu'elles émettent vers les lucioles adjacentes [12]. Cette attraction décroît avec la distance, c-à-d plus la distance entre deux lucioles augmente plus l'attraction diminue.

Dans l'algorithme des lucioles, la principale forme de la fonction d'attractivité peut être n'importe quelle fonction monotone décroissante. Nous pouvons choisir l'expression suivante qui est l'une des plus utilisées dans la littérature :

$$\beta_{i,j} = \beta_0 * e^{-\gamma r_{i,j}^m} \quad (2.1)$$

Où $r_{i,j}$ est la distance entre deux lucioles i et j , β_0 est l'attractivité à $r = 0$ et γ est un coefficient constant d'absorption de lumière.

II.4.4.3 La distance

La distance entre 2 lucioles i et j au coordonnées x_i et x_j peut-être évalué en utilisant la norme cartésienne :

$$r_{i,j} = \sqrt{\sum_{k=1}^d (x_{i,k} - x_{j,k})^2} \quad (2.2)$$

Où $x_{i,k}$ est la k ème composante de la i ème luciole.

II.4.4.4 Coefficient d'absorption

Le coefficient d'absorption γ contrôle la variation de l'attractivité en fonction de la distance mutuelle de deux lucioles avec $\gamma \in [0, \infty]$:

- $\gamma = 0$ correspond à aucun changement, pas de variation ou attractivité constante.
- $\gamma = \infty$ Correspond à une recherche aléatoire complète.

Nous préférons garder la valeur de $\gamma \in [0,1]$ car $\gamma = 1$ entraîne une attractivité proche de zéro qui est encore équivalente à la recherche aléatoire complète.

Ce coefficient d'absorption personnalisé pourrait être basé sur la "longueur caractéristique" de l'espace de recherche optimisé.

II.4.4.5 Nombre de génération

La convergence vers la solution optimale globale n'est pas garantie dans tous les cas. De ce fait, il est fortement conseillé de doter l'algorithme d'une porte de sortie en définissant un nombre maximum d'itération.

L'algorithme des lucioles "Firefly Algorithm" permet de fournir rapidement des solutions qui sont proche de la solution optimale. Donc pour réduire le temps de convergence, il est impératif de fixer un nombre de génération assez grand de sorte à laisser le temps à l'algorithme converger et assez faible pour ne pas le laisser tourner dans une boucle alors même que la solution optimale a été atteinte.

II.5 CONCLUSION

Ce chapitre introductif a été dédié à la présentation des concepts élémentaires liés aux systèmes photovoltaïques, abordant leurs aspects physiques et les terminologies les concernant. Aussi, nous avons mis en évidence l'influence des variations atmosphériques sur les rendements et le fonctionnement des systèmes photovoltaïques.

Nous avons également explicité les éléments constituant la chaîne photovoltaïque conventionnelle ainsi que la chaîne dotée d'un contrôleur MPPT tout en explicitant le rôle de chaque constituant dans l'exploitation et la maximisation l'énergie délivrée.

Aussi, nous avons entamé la partie la plus importante de ce chapitre, à savoir les différents principes des algorithmes bio-inspirés et leur intérêt d'être utilisé dans l'implémentation des contrôleurs MPPT.

Nous avons, en dernier lieu, sélectionné l'un de ces algorithmes bio inspiré et expliciter chacun de ces principes et étapes permettant la compréhension et l'établissement d'un contrôleur MPPT qui utiliserait un algorithme bio-inspiré.

Dans le prochain chapitre, nous allons valider l'algorithme bio-inspiré en question sous un environnement de développement (IDE) software en appliquant les principes de base cités dans ce chapitre, en le calibrant afin d'en faire ressortir les paramètres qui optimiseront ce fonctionnement dans le contexte des MPPT et, enfin, nous évalueront son efficacité contre les variations atmosphérique dont il pourrait être soumis.

CHAPITRE III

**CALIBRAGE,
IMPLÉMENTATION
ET TESTS
SOFTWARES DU
CONTRÔLEUR MPPT
BASÉS SUR
L'ALGORITHME DES
LUCIOLES**

III.1 Introduction

Dans le chapitre précédant, nous avons parlé des différentes méthodes utilisées en optimisation, et plus précisément dans la recherche du MPP. Une proposition d'une classification des différentes méthodes de recherche du MPP bio inspirées est établie dans le contexte des systèmes photovoltaïques [1].

Nous avons sélectionné un algorithme issu des méthodes bio inspirées pour l'implémentation d'un contrôleur MPPT. Il s'agit de l'algorithme des lucioles (FA_ALGO).

En générale, dans un système photovoltaïque, optimiser la puissance revient à assurer une production maximale de cette dernière et un bon rendement énergétique. Ceci est tout à fait possible si l'on prend en compte d'importants paramètres à savoir :

- Une optimisation architecturale des modules photovoltaïques ;
- Un contrôleur MPPT efficace ;
- La prise en compte des variations atmosphériques.

L'objet de ce projet de fin d'étude n'est pas de proposer une architecture optimisée appliquée dans le contexte des MPPT. C'est pour cela que nous ne nous focaliserons que sur les deux dernières voies d'optimisation.

Notre travail consistera à développer et concevoir un algorithmes bio inspirés efficaces pour des contrôleurs MPPT assurant un rendement optimal dans un système photovoltaïque et ce dans différents cas de figure de variation atmosphérique. Ainsi, dans ce qui suit, nous présenterons les différentes phases de conception pour l'élaboration de notre propre contrôleur FA_ALGO_MPPT.

Dans cette section, nous allons présenter les différentes étapes algorithmiques du contrôleur des lucioles suivi des différentes étapes de paramétrage permettant l'élaboration du contrôleur MPPT (FA_ALGO_MPPT) pour la recherche du PPM.

III.2 Application de l'algorithme FA_ALGO pour la commande MPPT

L'algorithme FA_ALGO décrit dans le chapitre précédent est utilisé pour concevoir le nouveau contrôleur FA_ALGO_MPPT. A cet effet, le processus d'attraction des lucioles entre elles est imité, et la fonction objective à maximiser P (puissance générée du PV) est utilisée pour trouver le rapport cyclique à générer qui maximisera la puissance i.e. le PPM du système PV à atteindre.

Ainsi, la fonction objective du système PV est donnée par l'équation :

$$P_{PV} = V_{PV} \cdot I_{PV}(T, G) \quad (3.1)$$

Où :

V_{PV} : représente la tension (V) ;

I_{PV} : représente le courant (A) ;

T : représente la température (°C) ;

G : représente l'irradiation (W/m^2) ;

CHAPITRE III : Calibrage, implémentation et tests softwares du contrôleur MPPT basés sur l'algorithme des lucioles

L'organigramme de l'algorithme que nous avons proposé et qui est basé sur la méthode FA-ALGO [8] pour la recherche de l'extremums d'une fonction continue dans un intervalle donné, est décrit dans la Figure III-1 :

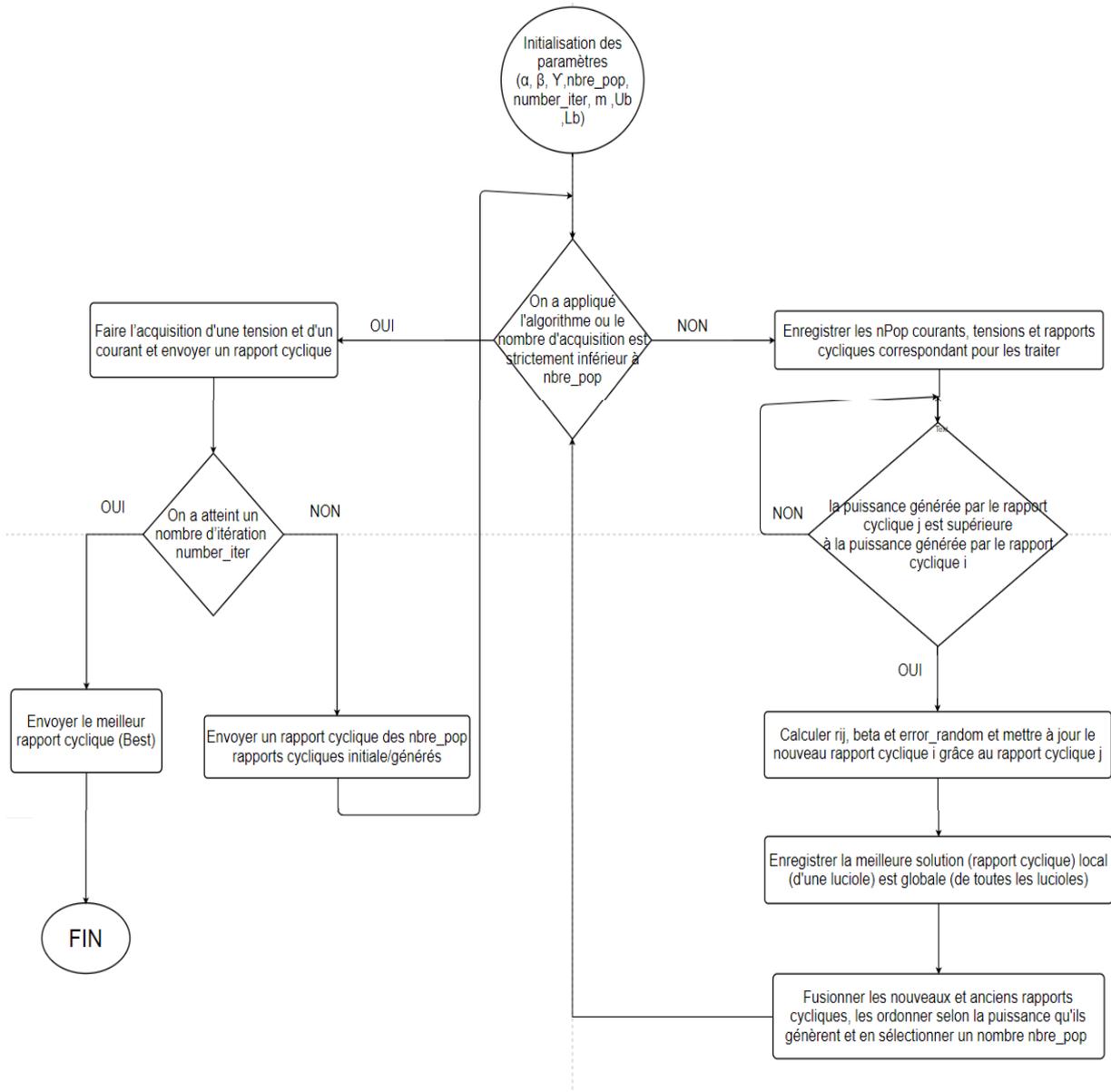


Figure III-1 Organigramme de l'algorithme Firefly dans le contexte MPPT.

L'algorithme présenté sous la forme d'un organigramme (voir ci-dessus) est basé sur la méthode FA-ALGO [8] pour la recherche de l'extremums d'une fonction continue dans un intervalle donné. Nous avons considéré le rapport cyclique comme étant la population. C'est cette même grandeur qui sera mise à jour au fur et à mesure des itérations.

Cet algorithme est basé principalement sur un nouveau processus de mise à jour de la luminosité (puissance dans notre cas) d'une luciole (rapports cycliques dans notre cas) lors de la phase d'exécution. Cette dernière est effectuée en sélectionnant les meilleures solutions.

CHAPITRE III : Calibrage, implémentation et tests softwares du contrôleur MPPT basés sur l'algorithme des lucioles

En effet, les lucioles (rapport cycliques) sont toujours attirées vers les meilleures solutions. L'algorithme FA_ALGO utilise une technique de recherche de [8,9,10].

Au départ, on fixe le nombre de la population nbre_pop et les valeurs initiales aux rapports cycliques. On a opté pour une distribution uniforme lors de l'initialisation, i.e., pour un nombre de population $\text{nbre_pop} = 5$ et $\text{nbre_pop} = 4$, nous aurons, respectivement, les vecteurs d'initialisations des rapports cycliques [0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 0.9] et [0.1, 0.3, 0.5, 0.7].

Par la suite, à la fin de chaque itération, les rapports cycliques sont mis à jour. Par itérations successives, ils se déplaceront vers le PPM. Pour la fonction objective, la puissance délivrée par le système PV est utilisée comme dans la plupart des travaux.

Les détails de chaque phase sont donnés ci-dessous :

III.2.1 Phase d'initialisation

L'étape d'initialisation sera faite lors de chaque changement de la courbe caractéristique P-V, en l'occurrence, lors de chaque perturbation ou variation atmosphérique.

Lors de cette étape, On fixe un nombre nbre_pop valeurs initiales aux rapports cycliques, le courant et la tension, Puis on introduit les paramètres de l'algorithme FA_ALGO, à savoir α , β , γ , la plage de la population : U_b et L_b (dans notre cas c'est 0 et 1), le nombre d'itération et le nombre de population (rapports cycliques) : nbre_pop .

Ces rapports cycliques attaqueront l'élément actif du convertisseur DC-DC avec une fréquence de dix rapports cycliques par seconde. A chaque itération, de nouvelles solutions sont construites en se basant sur l'algorithme FA_ALGO.

III.2.2 Phase de déplacement des lucioles et de mise à jour

Lorsque l'on aura acquis un nombre nbre_pop de rapport cyclique, il nous sera ensuite possible d'appliquer l'algorithme FA_ALGO. On met à jour les rapports cycliques selon l'équation :

$$d_i^{k+1} = d_i^k + (d_j^k - d_i^k)\beta e^{-\gamma r_{i,j}^2} + \alpha e_t \quad (3.2)$$

Où :

α : Est un paramètre contrôlant la taille du pas.

e_t : Est un vecteur tiré d'une distribution gaussienne ou autre.

d_i^k : est le rapport de la i ème particule à l'itération k

d_j^k : est le rapport de la j ème particule à l'itération k avec ($P_j^k > P_i^k$).

Après cette mise à jour, on enregistre la meilleure solution locale : par rapport à l' i ème particule (rapport cyclique), ainsi que la meilleure solution globale : par rapport à toutes les particules.

Après chaque application de l'algorithme, on attaque le convertisseur DC/DC avec les rapports cycliques mis à jour jusqu'à attendre la condition d'arrêt. Ceci fut fait, on sélectionne le rapport cyclique qui engendre la puissance maximale. Si cette puissance est égale au MPP, alors il y a bien eu convergence. Sinon, il y a eu une convergence prématurée ou approximative.

L'évolution des lucioles durant le processus de convergence vers la solution optimale ce fait de cette manière :

CHAPITRE III : Calibrage, implémentation et tests logiciels du contrôleur MPPT basés sur l'algorithme des lucioles

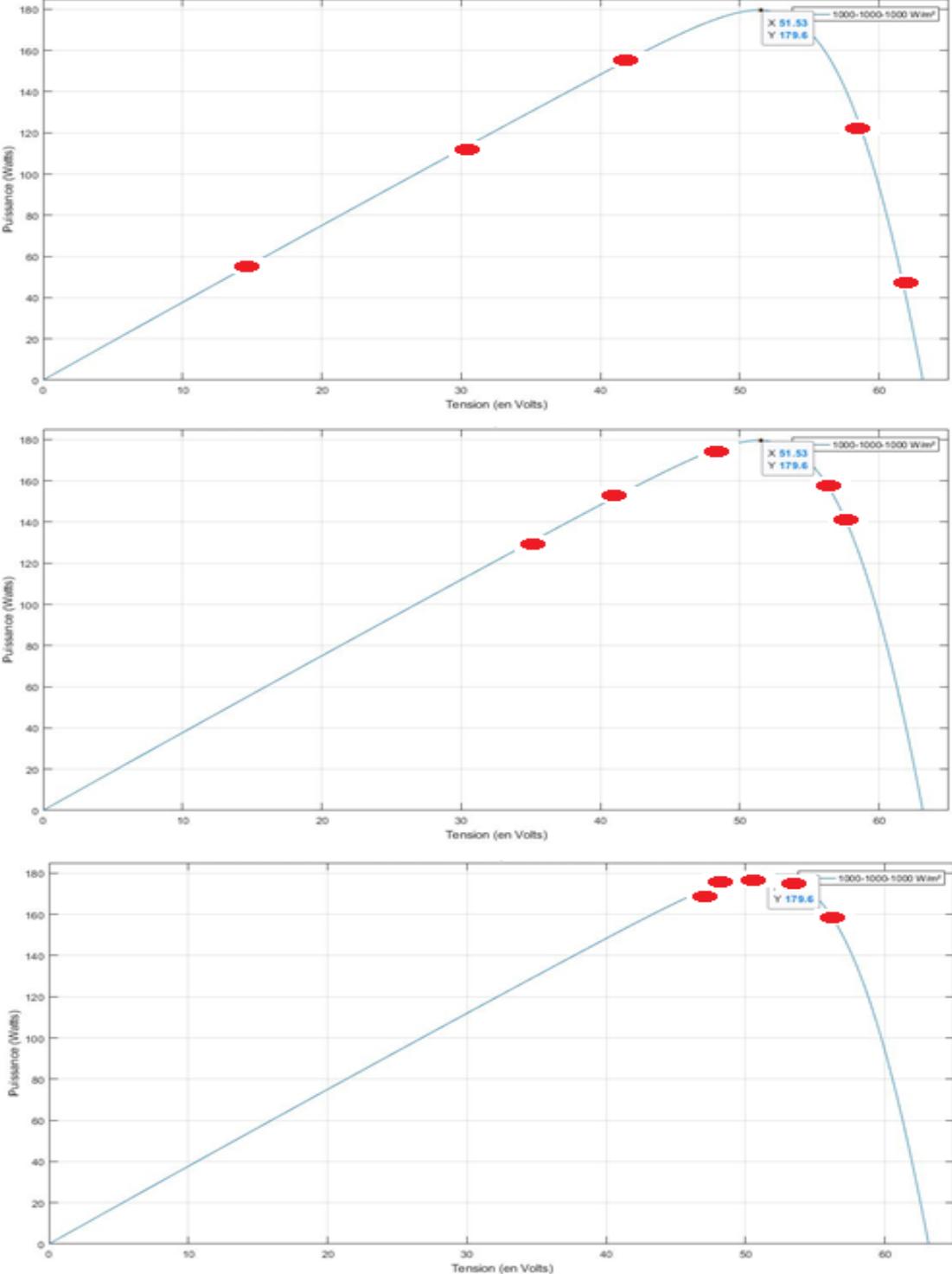


Figure III-2 L'évolution des rapports cycliques durant le processus de convergence vers l'MPP.

III.3 Paramétrages du contrôleur MPPT

Dans ce qui suit, nous présenterons la méthodologie adoptée pour le calibrage et la simulation du contrôleur MPPT développé issu de la méthode bio inspirée, à savoir, FA_ALGO_MPPT.

Il existe plusieurs critères comparatifs permettant de mettre en avant les performances d'un contrôleur MPPT [1]. Dans ce contexte, et afin d'évaluer les performances de notre algorithme appliqué au MPPT, nous avons choisi de prendre comme référence les critères relatifs au temps de réponse, à la stabilité face aux oscillations, à la précision et la robustesse face aux variations atmosphériques.

Pour ce faire, nous avons suivi une méthodologie qui consiste, dans un premier temps, à modéliser le système PV. Puis dans un deuxième temps et à l'issue de plusieurs tests et simulations, nous avons procédé au paramétrage du contrôleur FA_ALGO_MPPT. Cela nous a permis de sélectionner les meilleurs paramètres pour l'élaboration d'un bon contrôleur.

Suite à cela, en tenant compte des paramètres mentionnés précédemment, nous avons élaboré plusieurs scénarios afin de suivre l'évolution et le comportement du contrôleur face aux différentes variations atmosphériques. Les différents scénarios de test sont élaborés sous environnement Matlab/Simulink.

III.3.1 Modélisation du système photovoltaïque

Le modèle global de simulation du système PV est une combinaison de différents blocs modélisant les éléments qui le constituent.

Le modèle logiciel, établi à l'aide de Matlab/Simulink, correspondant au système PV qui nous a permis de faire les simulations et de paramétrer de l'algorithme FA_ALGO_MPPT est comme suit :

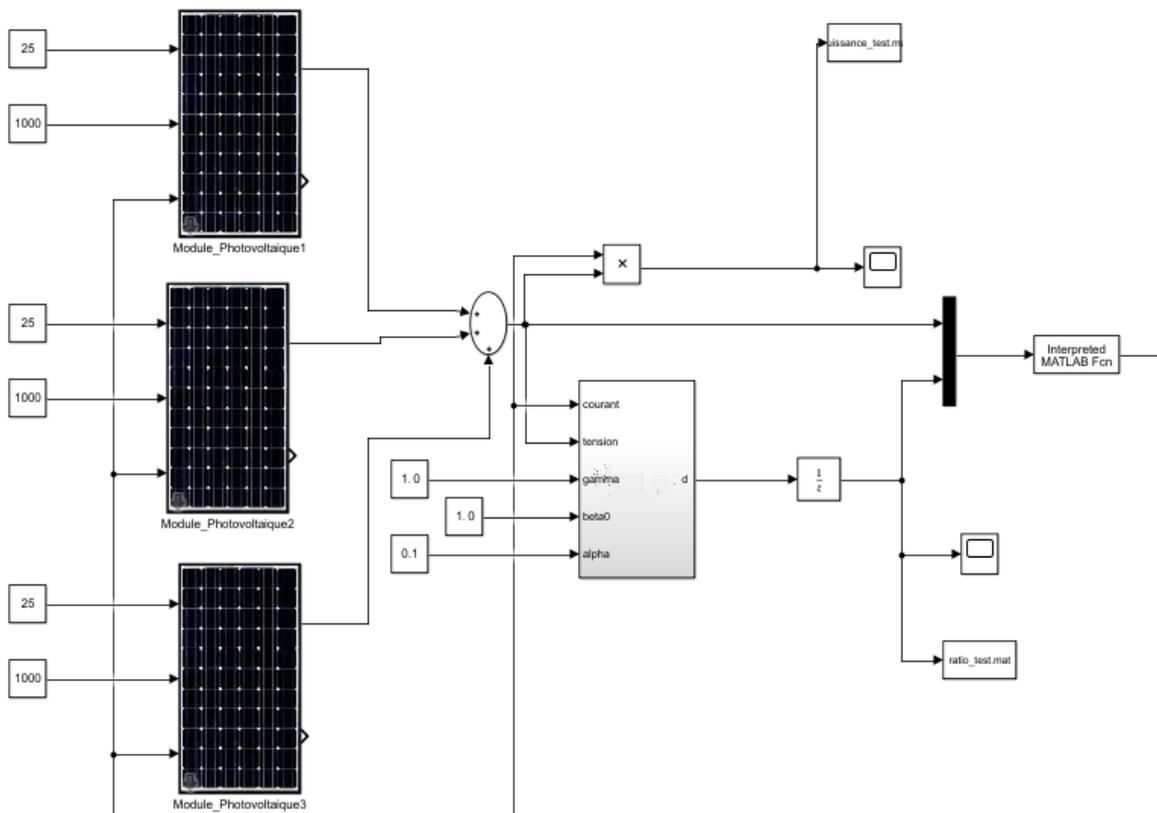


Figure III-3 Modélisation logiciel du système photovoltaïque.

Le système photovoltaïque est constitué de :

- Trois modules ayant pour entrées et paramètres influents : la température et l'éclairement.
- Un contrôleur MPPT qui utilise l'algorithme des lucioles : FA_ALGO_MPPT.
- Un convertisseur DC-DC Boost.

III.3.2 Processus de paramétrage

La phase de paramétrage, qui consiste en la sélection des meilleurs paramètres de l'algorithme maximisant la puissance des PVs, est une étape cruciale dans le processus de conception et de mise en œuvre de notre contrôleur.

En effet, les performances du FA_ALGO_MPPT peuvent être influencées par le choix de diverses paramètres (Taille de la population, paramètres inhérents de l'algorithme, nombre d'itération, etc...) qui peuvent avoir un grand impact sur son efficacité (i.e. convergence lente, convergence prématurée, etc...).

Par exemple, si la taille de la population des lucioles est grande, cela va augmenter la probabilité de trouver le point de puissance maximale. Cependant, cela va engendrer une augmentation du temps de calcul.

Pour ce faire, tenant compte de ces données et afin d'évaluer l'influence des paramètres lors de l'exécution de l'algorithme FA_ALGO et de valider le contrôleur FA_ALGO_MPPT proposés sachant une bonne optimalité, plusieurs tests sont effectués.

Ces tests consistent à évaluer le contrôleur en changeant les paramètres le constituant et permettant ainsi de sélectionner le cas de configuration le plus appropriés qui réduirait le temps d'exécution et améliorerait l'efficacité des contrôleurs, i.e. atteindre le PPM avec efficacité. Les tests sont effectués dans différents de variation atmosphérique.

III.3.2.1 Etablissement préliminaire de l'algorithme des lucioles

En utilisant le modèle mathématique d'un panneau photovoltaïque (I-3) avec quelques approximations et en fixant des paramètres quelconques, $\alpha=0.2$, $\beta=1$, $\gamma=1$ et $m=2$, et un nombre de population $\text{nbre_pop} = 5$, nous obtenons une convergence de l'algorithme au-delà de 5 itérations. Voir la figure III-4.

La figure III-5, qui illustre la caractéristique P-V, qui suit nous aidera à valider l'hypothèse d'une convergence vers un MPP.

CHAPITRE III : Calibrage, implémentation et tests logiciels du contrôleur MPPT basés sur l'algorithme des lucioles

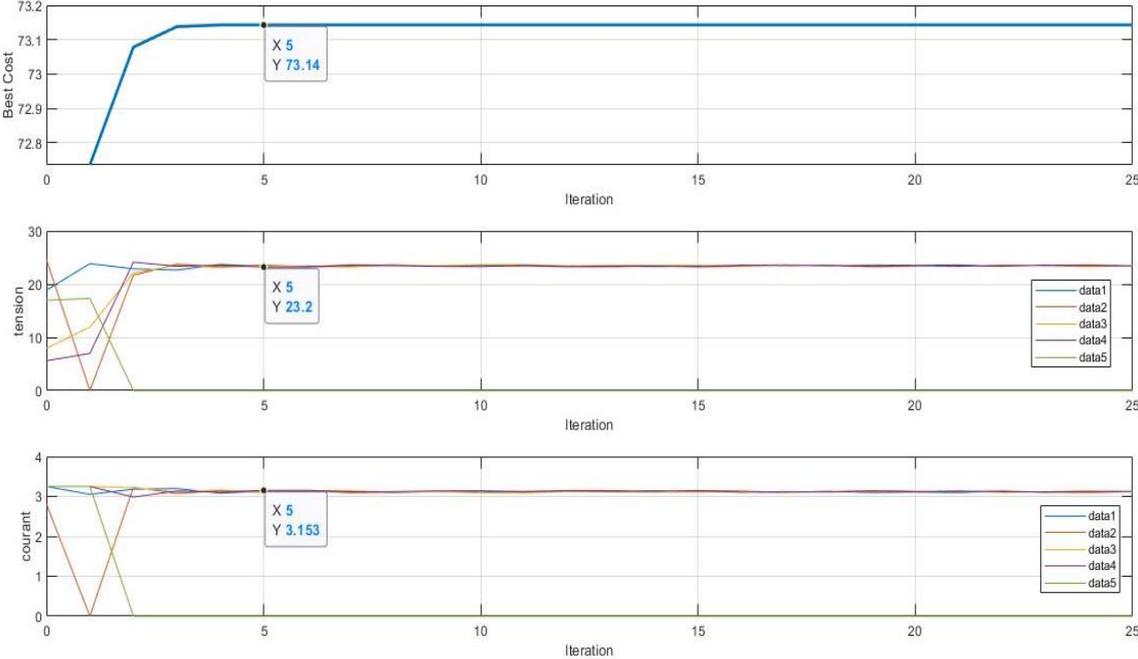


Figure III-4 La convergence de la fonction cout (Puissance), du courant et de la tension de l'algorithme.

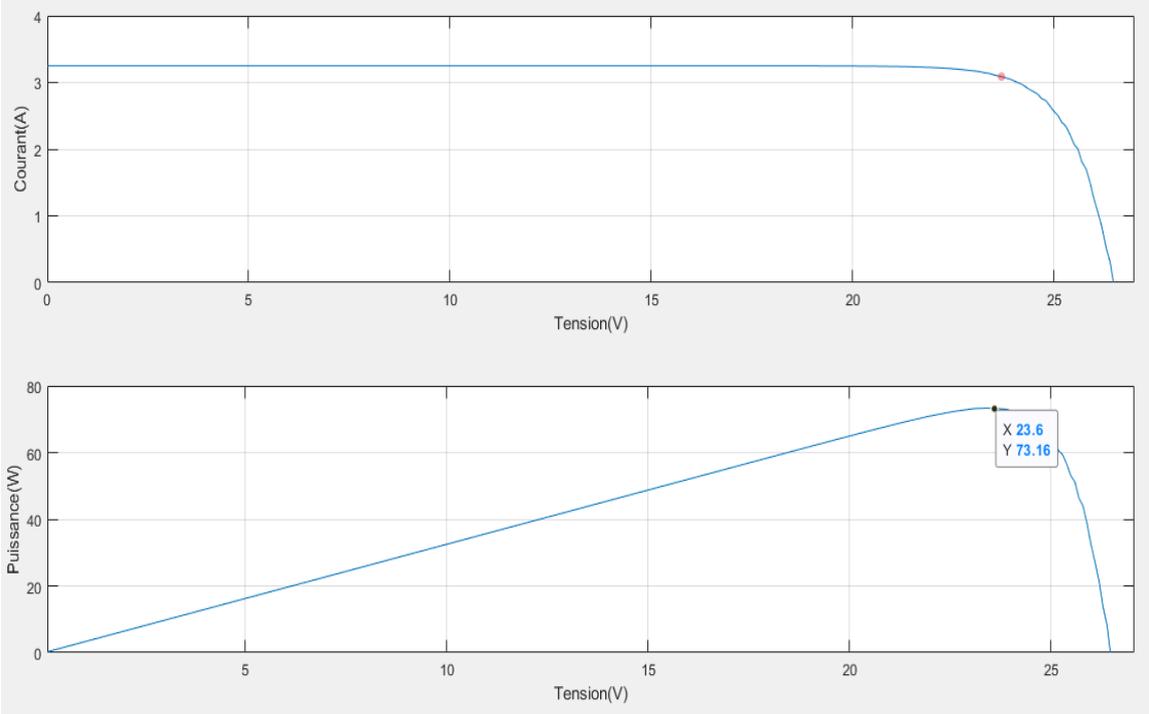


Figure III-5 La courbe caractéristique I-V et P-V du modèle utilisé

III.3.2.2 La sélection paramétrage

Le calibrage de l'algorithme FA_ALGO_MPPT se fera par rapport aux conditions standard (une irradiation de 1000 W/m^2 et une température de $25 \text{ }^\circ\text{C}$) moyennant une configuration série de trois panneaux photovoltaïques et un convertisseur Boost (voir la figure III-6).

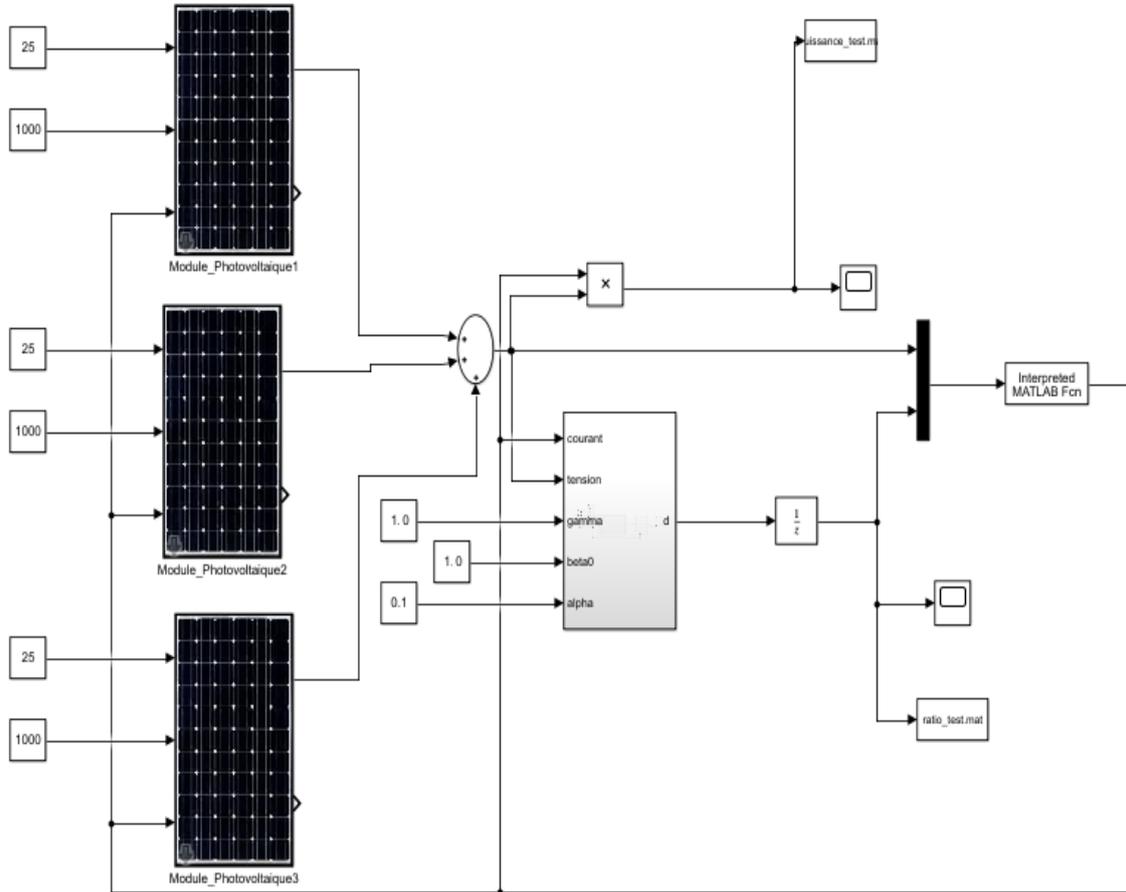


Figure III-6 Modèle Matlab d'un système photovoltaïque dans des conditions standards.

La courbe caractéristique P-V dans les conditions standards nous permettra de dire s'il y a convergence ou non. Voir sur les figures III-7.

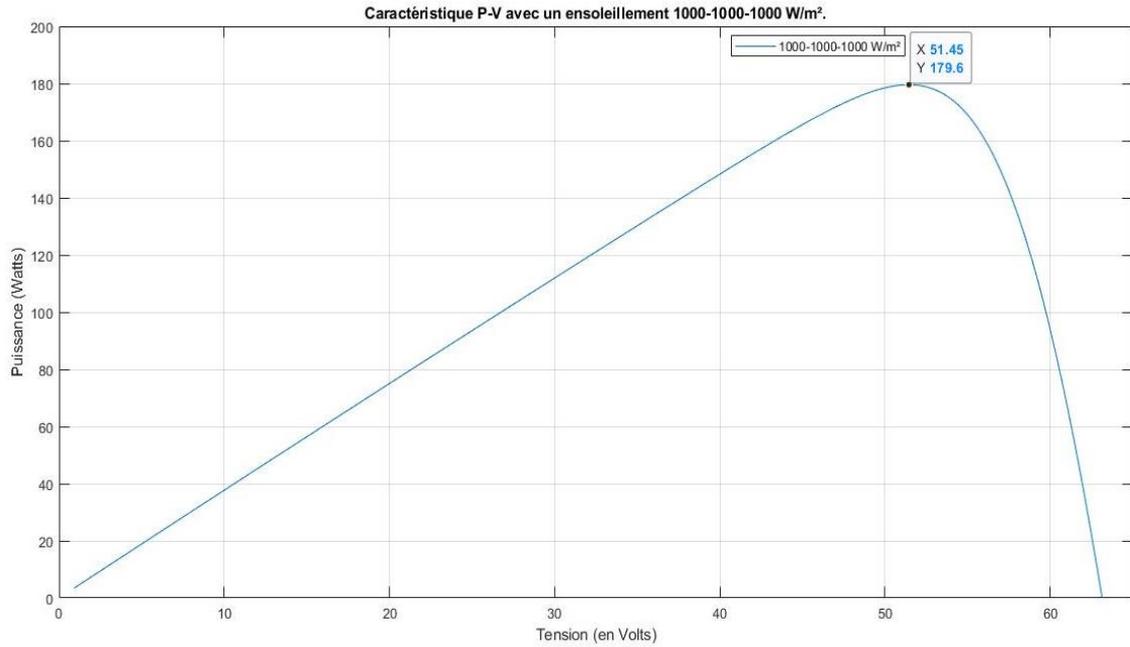


Figure III-7 La courbe caractéristique P-V dans les conditions standard.

Le processus grâce auquel nous avons obtenu cette courbe (voir la figure III-8) consiste à balayer toutes les valeurs possibles d'un paramètre (courant, tension ou rapport cyclique), à l'aide d'une rampe, et enregistrer les valeurs des autres paramètres correspondants. Dans notre cas, nous avons varié le paramètre courant de 0 à I_{CC} et nous avons enregistré la tension qui correspond à chaque valeur du courant. Nous aurions pu obtenir un résultat similaire en variant d (rapport cyclique) de 0 à 1 ou V (tension) de 0 à V_{CO} .

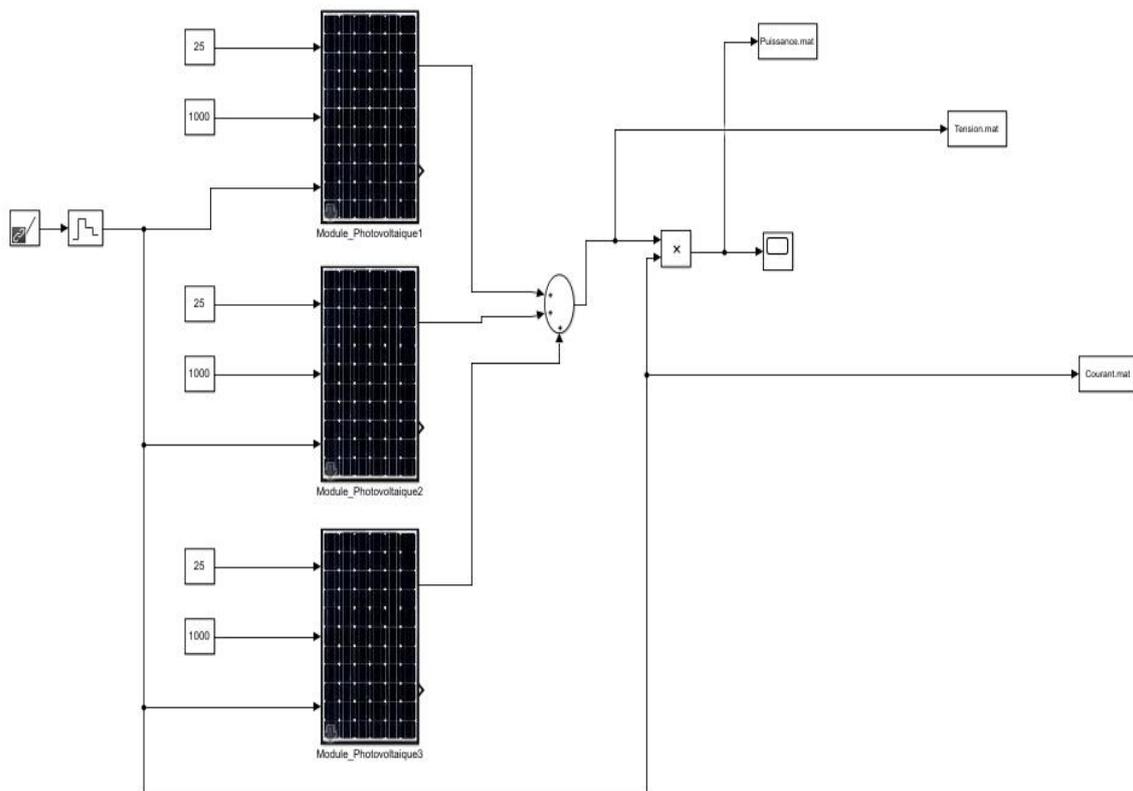


Figure III-8 Process pour la détermination des courbes caractéristiques.

CHAPITRE III : Calibrage, implémentation et tests logiciels du contrôleur MPPT basés sur l'algorithme des lucioles

Dans cette étape nous allons tenter de dégager les valeurs des paramètres de l'algorithme FA_ALGO qui maximiseront son efficacité. Ceci se fera en variant les paramètres un par un.

Les paramètres que nous allons faire varier sont : le nombre de population (nbre_pop) et les paramètres intrinsèques de l'algorithme (α , β et γ). Chaque paramètre admettra un ensemble de valeur qui augmenteront l'efficacité de l'algorithme FA_ALGO_MPPT.

À l'issue de ce paramétrage, nous testerons des combinaisons de valeurs des paramètres afin d'en tirer la meilleure en termes d'efficacité, en l'occurrence, celle qui assurera une convergence rapide vers le MPP tout en gardant une bonne stabilité.

Il est à rappeler que l'algorithme des lucioles contient beaucoup de termes stochastiques. Afin de supprimer l'influence du hasard, ces paramètres ont été remplacés par des coefficients. Ce faisant, toute influence des courbes sera due aux paramètres intrinsèques de l'algorithme i.e. α , β et γ ainsi que le nombre de population.

III.3.2.2.1 Une population de 4 lucioles

III.3.2.2.1.1 Variation de α

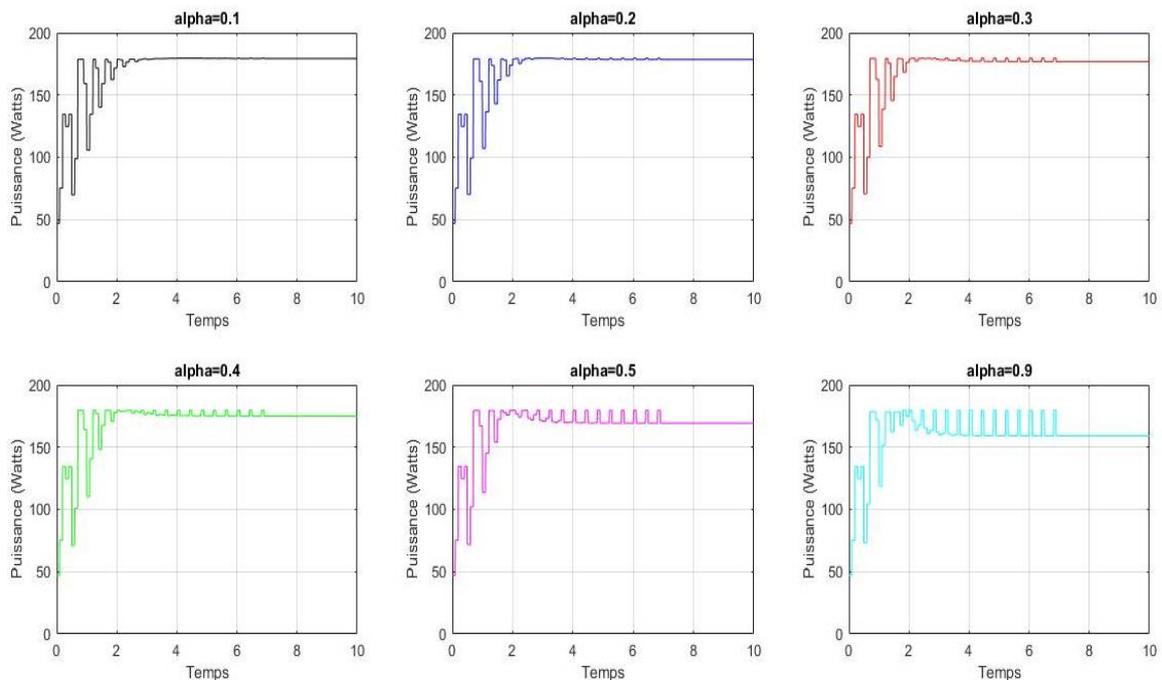


Figure III-9 C courbes de convergence de la puissance en variant le paramètres α avec

CHAPITRE III : Calibrage, implémentation et tests softwares du contrôleur MPPT basés sur l'algorithme des lucioles

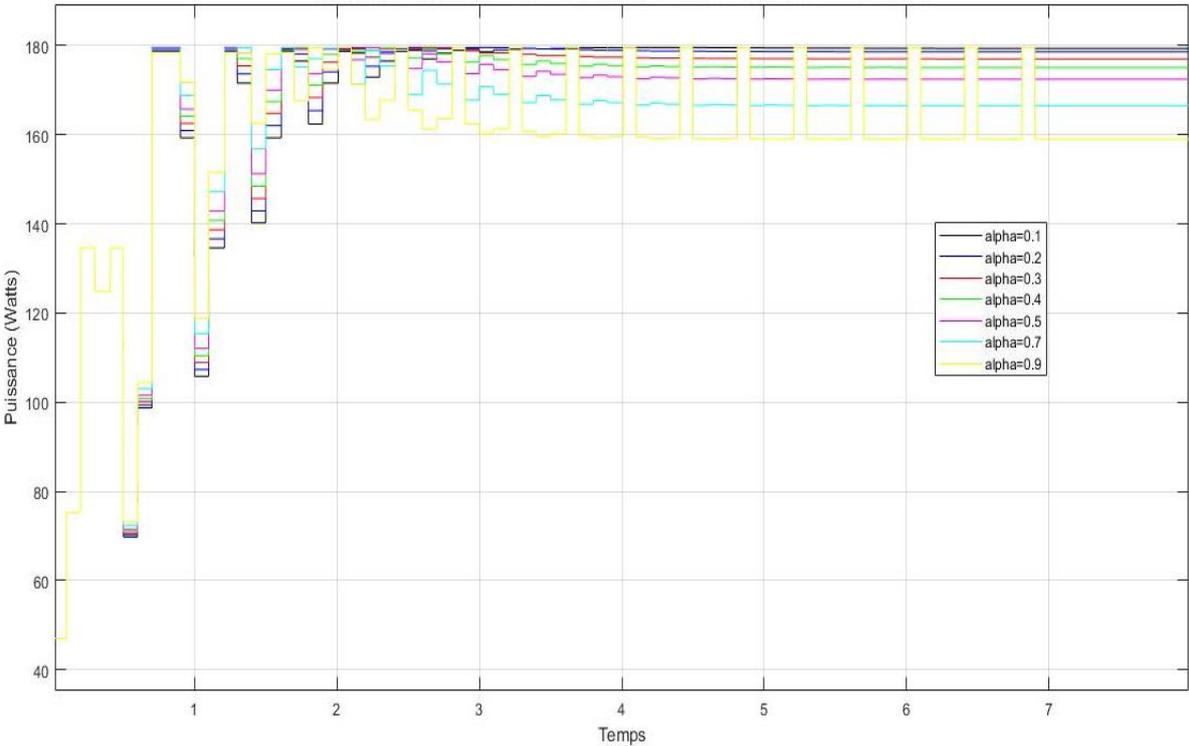


Figure III-10 Exemple de courbes de convergence de la puissance en variant le paramètres α avec $\gamma=1, \beta=1$ (En une figure).

III.3.2.2.1.2 Variation de β

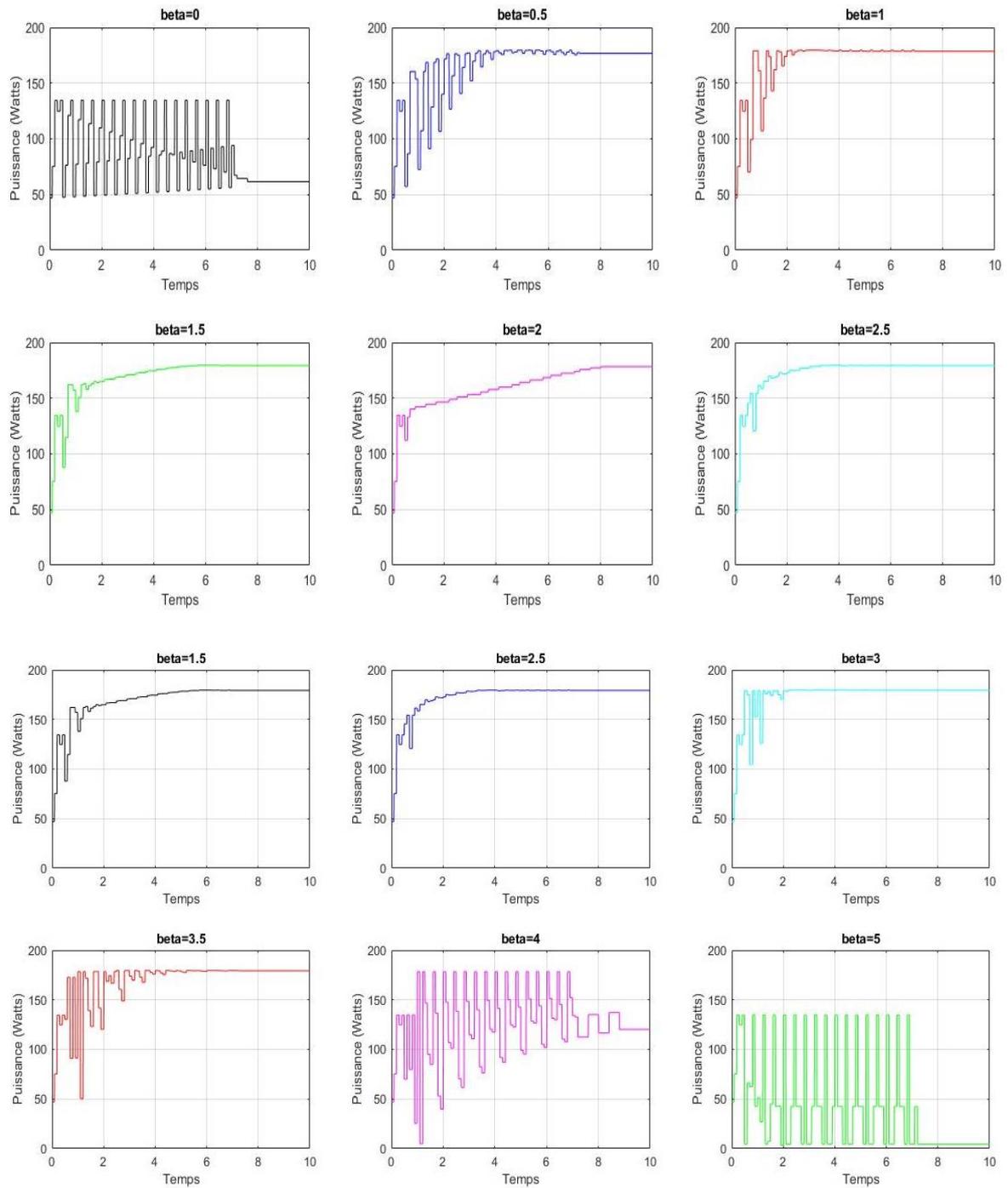


Figure III-11 Courbes de convergence de la puissance en variant le paramètres β avec $\alpha=0.2$ et $\gamma=1$.

CHAPITRE III : Calibrage, implémentation et tests logiciels du contrôleur MPPT basés sur l'algorithme des lucioles

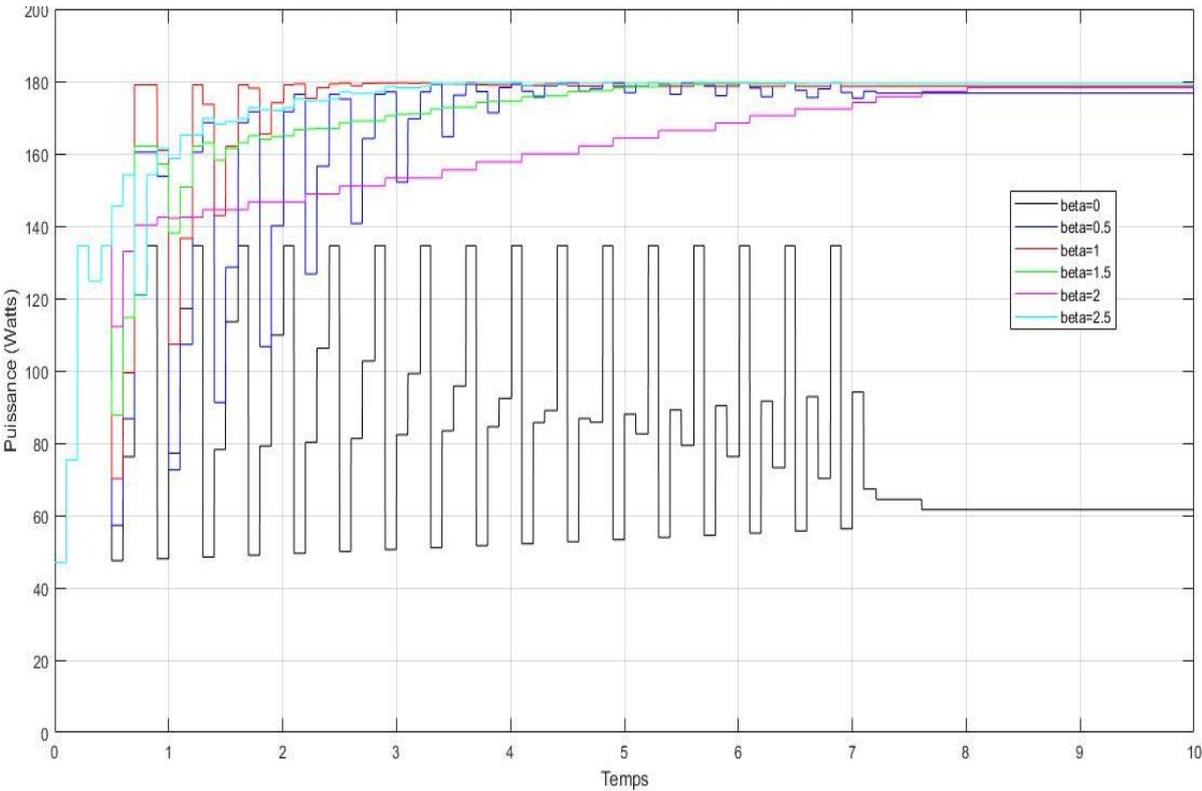


Figure III-12 Courbes de convergence de la puissance en variant le paramètres β avec $\alpha=0.2$ et $Y=1$ (En une figure).

III.3.2.2.1.3 Variation de γ

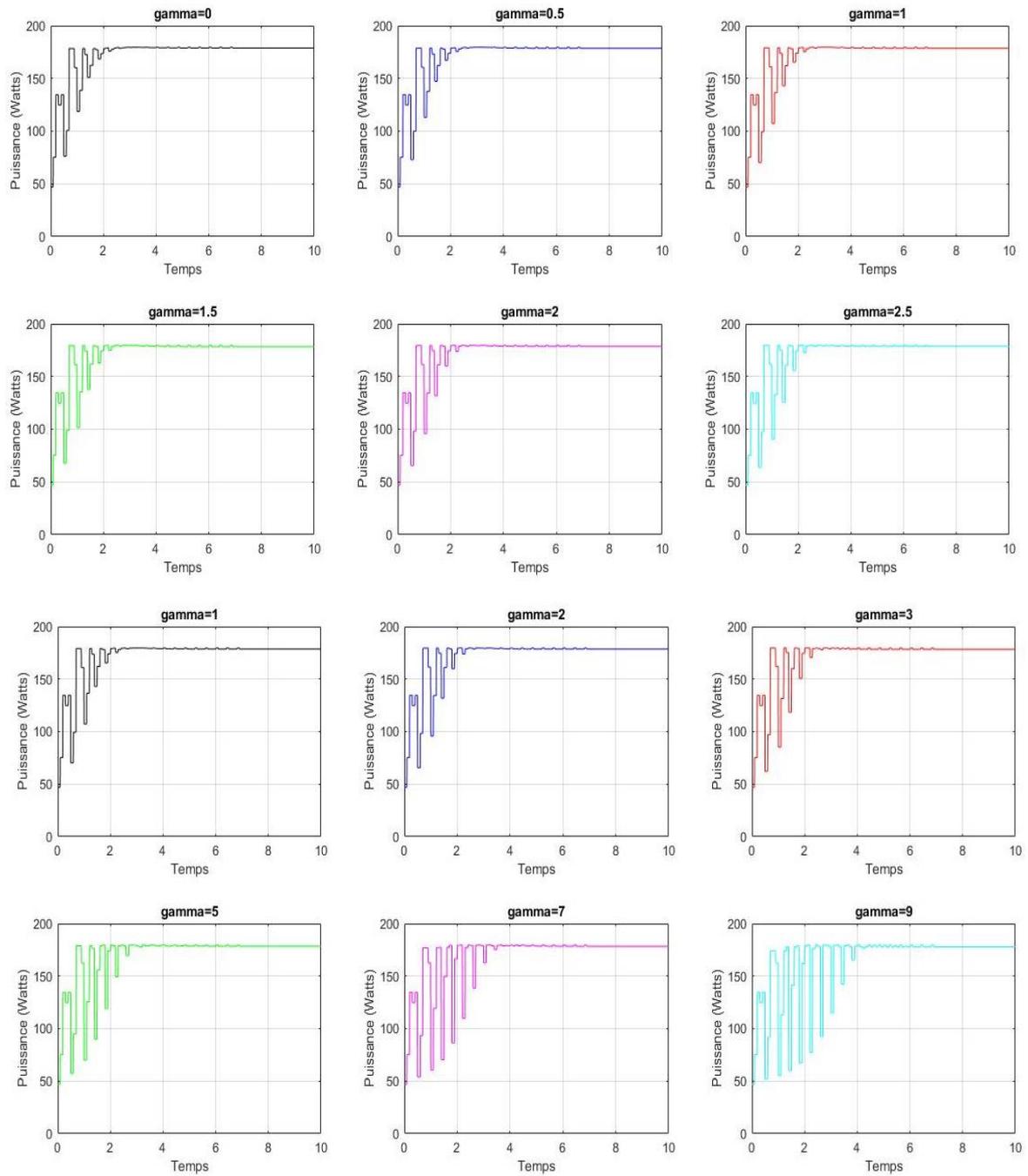


Figure III-13 Courbes de convergence de la puissance en variant le paramètres γ avec $\alpha=0.1$ et $\beta=1$.

CHAPITRE III : Calibrage, implémentation et tests logiciels du contrôleur MPPT basés sur l'algorithme des lucioles

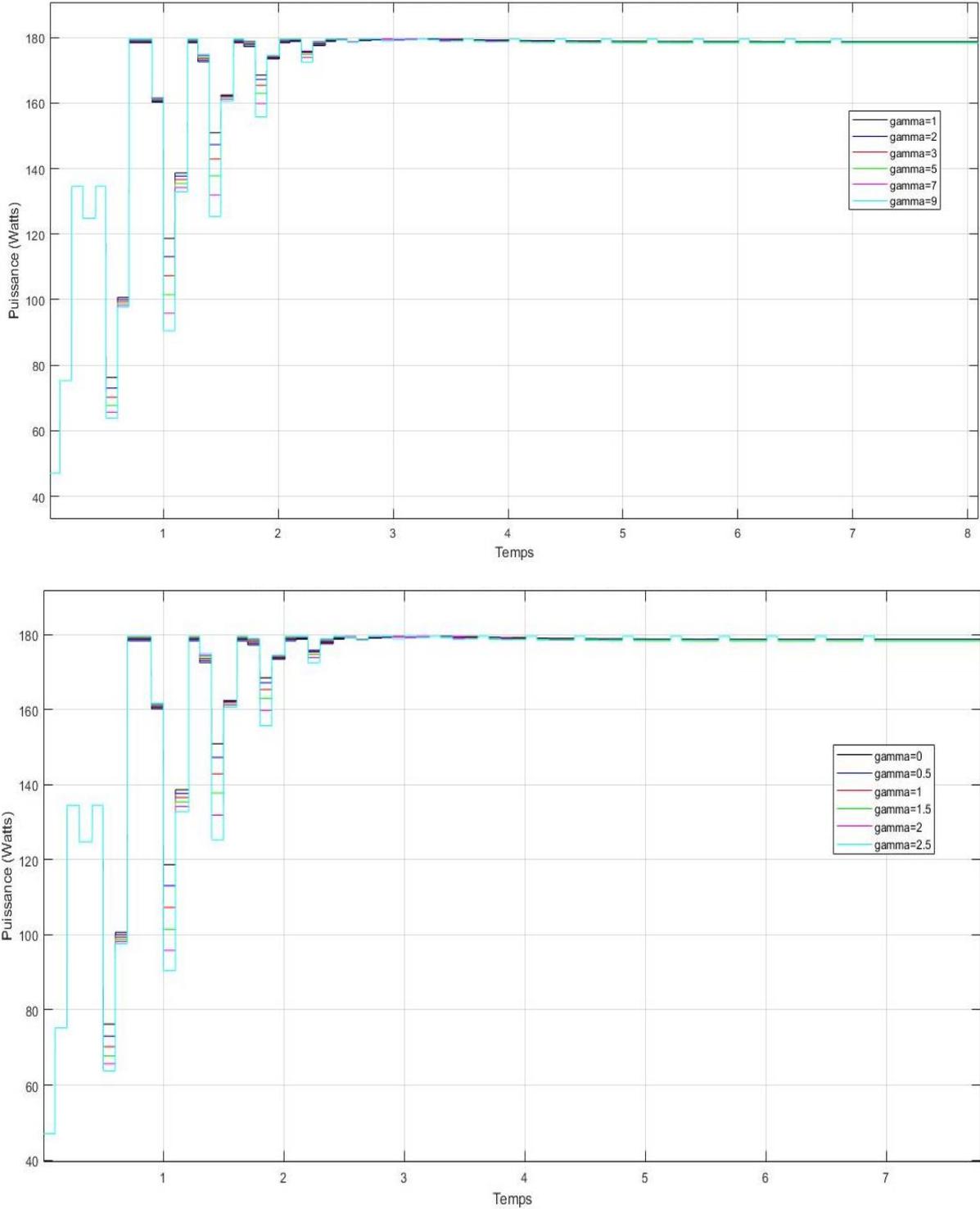


Figure III-14 Courbes de convergence de la puissance en variant le paramètres γ avec $\alpha=0.1$ et $\beta=1$ (En une figure).

III.3.2.2.1.4 Variations des plusieurs paramètres α , β et γ

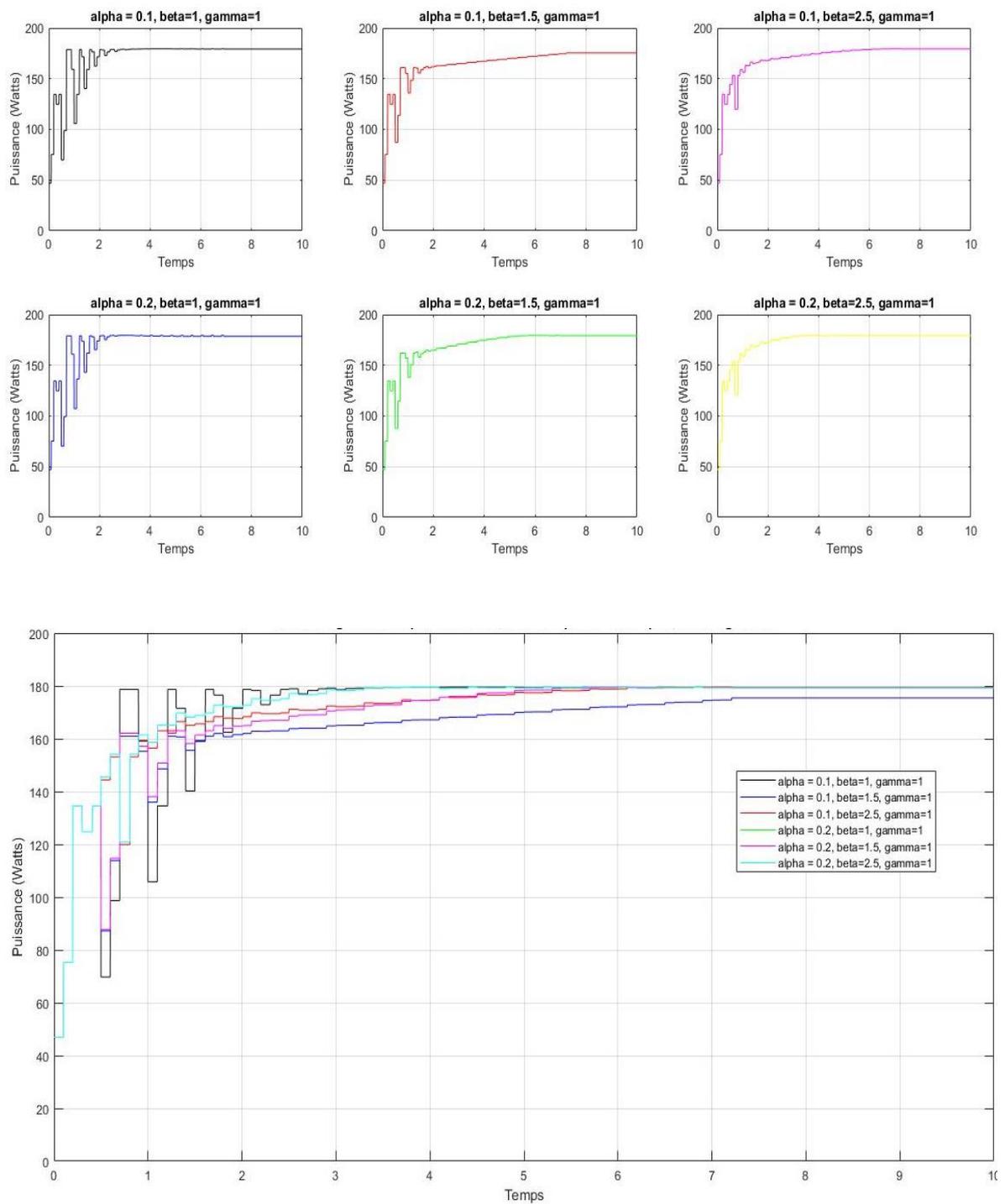


Figure III-15 Courbes de convergence de la puissance en variant le paramètres α , β et γ .

III.3.2.2.2 Une population de 5 lucioles

On suivra la même procédure que pour la détermination des paramètres pour une population de 4 lucioles.

III.3.2.2.2.1 Variation de α

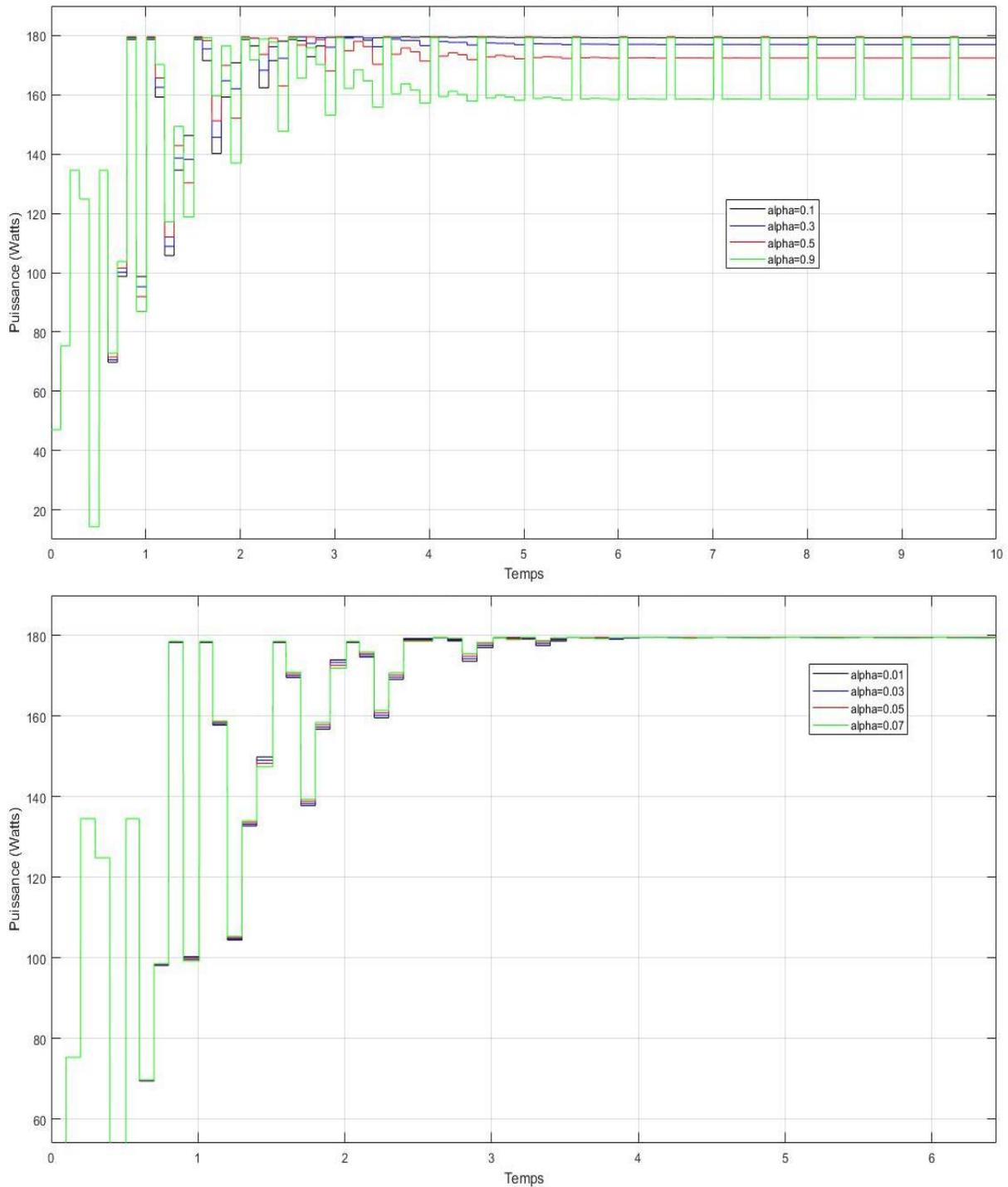


Figure III-16 Courbes de convergence de la puissance en variant le paramètres α avec $\beta=1$ et $Y=1$.

III.3.2.2.2 Variation de β

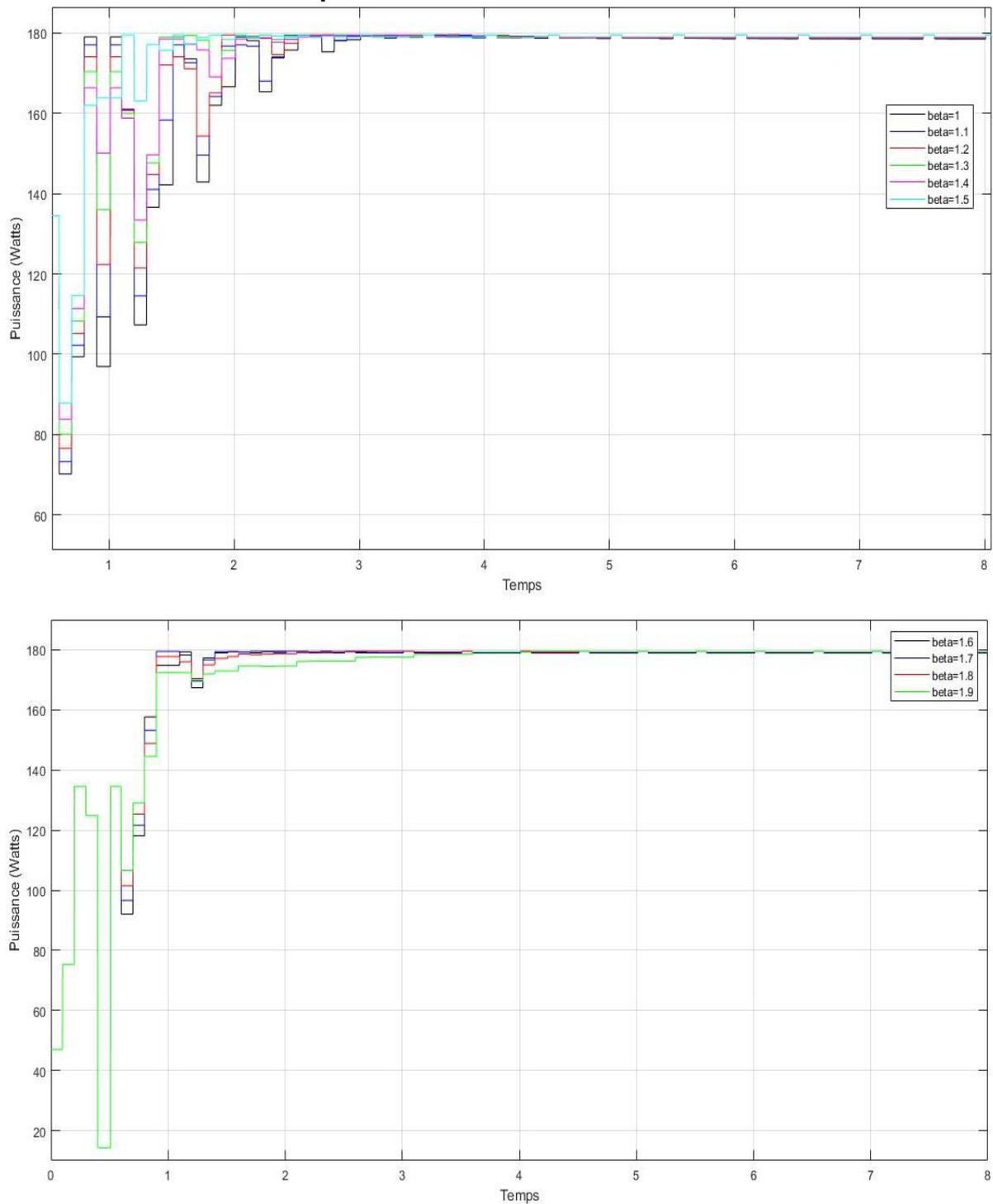


Figure III-17 Courbes de convergence de la puissance en variant le paramètres β avec $\alpha=0.2$ et $\gamma=1$.

III.3.2.2.3 Variation de γ

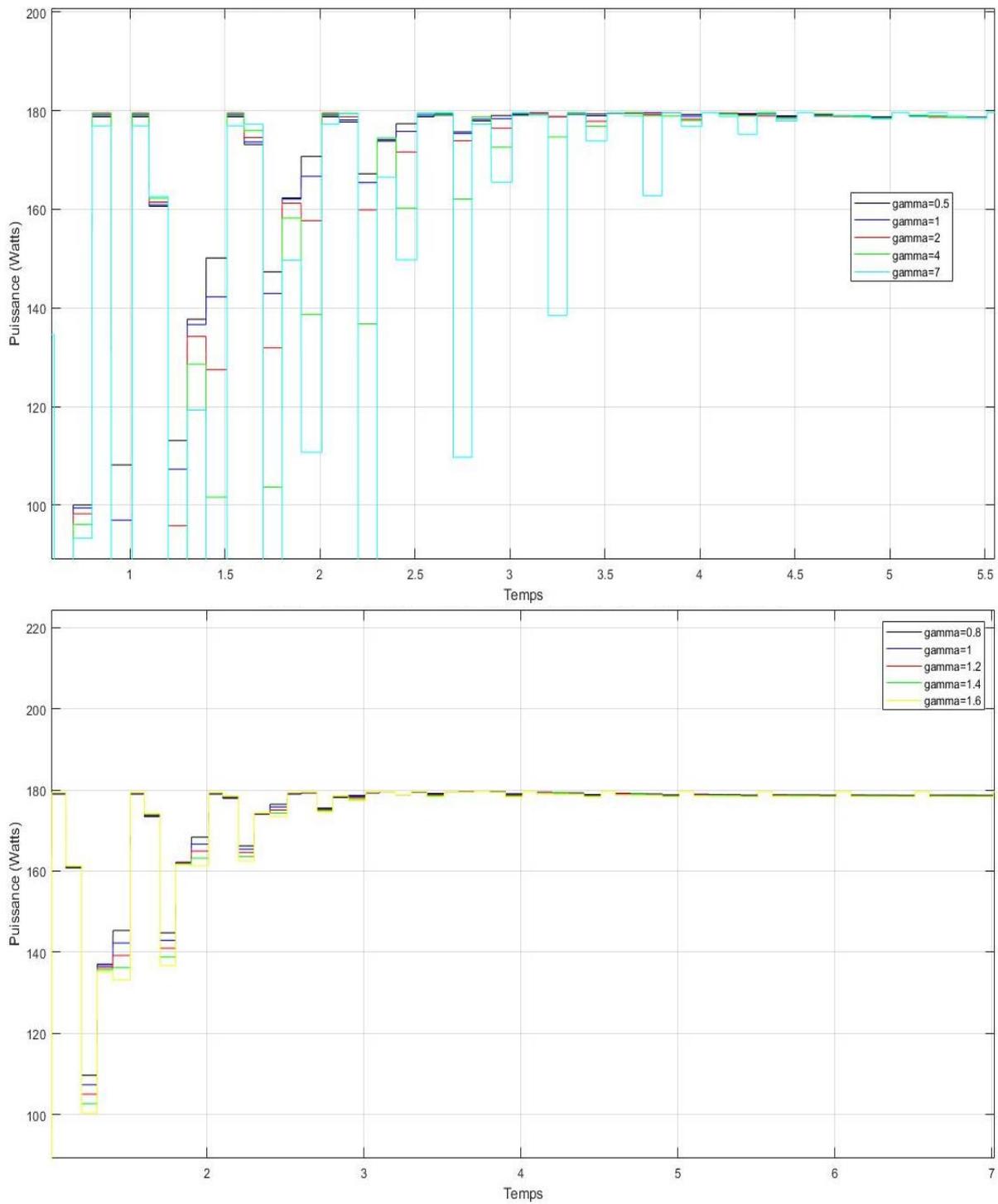


Figure III-18 : Courbes de convergence de la puissance en variant le paramètres γ avec $\alpha=0.2$ et $\beta=1$.

III.3.2.2.4 Variations des plusieurs paramètres α , β et γ en même temps

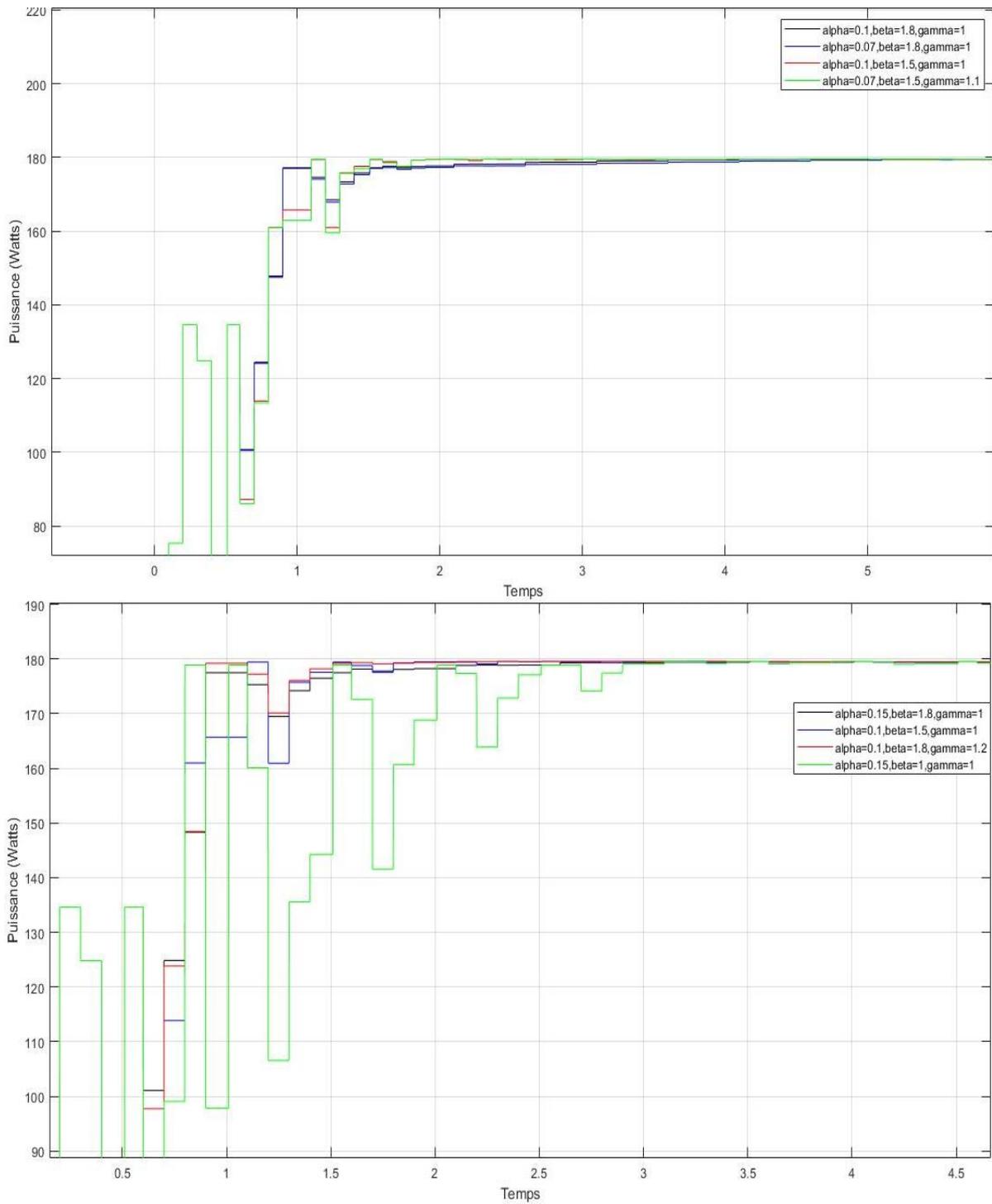


Figure III-19 Courbes de convergence de la puissance en variant le paramètres α , β et γ .

III.3.2.3 Discussion des résultats

On remarque que le paramètre α influe de manière notable la convergence vers le MPP et la stabilité de l'algorithme à l'état permanent. Par ailleurs, ce paramètre n'influe en rien l'état transitoire. Par conséquent, une valeur trop grande de la valeur α n'assure pas une convergence vers un MPP et augmente les perturbations à l'état permanent. Compris entre 0 et 1, le paramètre α optimise l'algorithme à mesure qu'il diminue tout en gardant une valeur au alentour de 0.1.

Le paramètre β , influe grandement sur la stabilité de la courbe de puissance, tant bien à l'état transitoire qu'à l'état permanent. Aussi on remarque que ce facteur permet de lisser la courbe de convergence vers le MPP. Dans notre cas, le paramètre β assure une bonne efficacité lorsque il prends des valeurs distinct entre 0 et 3. Défini mathématiquement entre 0 et l'infini, les valeurs pratiques qu'il devrait prendre appartiennent à l'intervall [0, 1]. Un β élevé assure un calcul rapide mais imprecis. En revanche, un β faible assure une bonne précision mais un temps de calcul lent [17]. Généralement considéré comme fixe, ce paramètre peut être variable en étant mis à jours durant chaque iteration [18].

On remarque que le paramètre γ influe uniquement le temps de convergence vers le MPP. N'ayant pas une grande influence à l'état permanent, l'influence γ est beaucoup plus notable à l'état transitoire qu'à l'état permanent. Compris entre 0 et l'infini, le paramètre γ engendre une plus grande efficacité lorsque il prend des valeurs entre 0 et 3. Mais ceci est vrai que si on prend comme population le rapport cyclique (une grandeur comprise entre 0 et 1). Si l'on avait pris la tension comme population, ce facteur aurait été beaucoup plus influent.

Le tableau ci-dessous illustre les résultats de simulation pour différentes valeurs des paramètres :

α : paramètre d'échelle ;

β : l'attractivité ;

γ : Coefficient d'absorption ;

Nbre_pop : le nombre de luciole ;

Tableau III-1 Les résultats de simulation pour différentes valeurs des paramètres

	Scénario 1	Scénario 2	Scénario 3	Scénario 4	Scénario 5	Scénario 6	Scénario 7	Scénario 8
Paramètres								
α	0.1	0.2	0.1	0.1	0.07	0.1	0.1	0.15
β	1	2.5	1.5	2.5	1.5	1.8	1.8	1
γ	1	1	1	1	1.1	1	1.2	1
Nbre_pop	4	4	4	4	5	5	5	5
$P_{max}(w)$	180	180	176	180	180	180	180	180
$t_{ps}(s)$	3	3	7.3	6	1.8	2	1.5	3

CHAPITRE III : Calibrage, implémentation et tests softwares du contrôleur MPPT basés sur l'algorithme des lucioles

Selon les différents tests effectués, l'utilisation d'une combinaison de paramètres $[\alpha, \beta, \gamma] = [0.1, 1.8, 1.2]$ et un nombre d'une population de 5 lucioles suffisent pour assurer la convergence du contrôleur et ce avec efficacité. En effet, pour des valeurs différentes, la méthode peut converger vers un maximum local et/ou ne pas atteindre la solution optimale comme montré par les premiers tests.

III.3.3 Simulation du contrôleur FA_ALGO_MPPT

Dans le but de visualiser les performances et l'efficacité du contrôleur FA_ALGO_MPPT, différents scénarios d'ombrage ont été élaborés afin de suivre l'évolution et le comportement de du contrôleur face aux différentes variations atmosphériques lors des différentes simulations.

Les multiples scénarios que nous allons simuler auront pour but d'observer les performances du FA_ALGO_MPPT face à l'effet de l'ombrage partiel sur le système PV.

Comme l'ombrage partiel est un phénomène stochastique, plusieurs scénarios peuvent se produire. Par conséquent, il est difficile de tester toutes les occurrences de l'ombre partiel.

De ce fait, nous avons opté pour la conception d'un modèle sous Simulink permettant de simuler le comportement du système PV. Ce dernier est composé de trois modules PV. A une température fixée à la valeur 25°C, les différents modules sont soumis à des éclairagements constants mais différents en termes de conditions d'ombrage partiel, comme énumérées dans le tableau ci-après :

Tableau III-2 Les différents scénarios d'ombrage auxquels les trois panneaux PV sont soumis.

	PV Panel 1 (W/m ²)	PV Panel 2 (W/m ²)	PV Panel 3 (W/m ²)
Scénario 1	1000	1000	1000
Scénario d'ombrage 2	300	500	900
Scénario d'ombrage 3	100	300	900
Scénario d'ombrage 4	350	450	700

Ces différents scénarios n'ont pas été sélectionnés de manière arbitraire. Ils représentent et provoquent des courbes caractéristique P-V très différentes. Cette différence d'allure des courbes caractéristique nous permettra d'évaluer les performances et la force de l'algorithme FA_ALGO_MPPT aux variations atmosphériques et ce de manière rigoureuse.

La figure ci-dessous illustre respectivement l'influence de l'ensoleillement homogène (pour le premier cas) et non homogène (pour les autres cas) sur les caractéristiques P-V du système PV pour différents patterns.

CHAPITRE III : Calibrage, implémentation et tests logiciels du contrôleur MPPT basés sur l'algorithme des lucioles

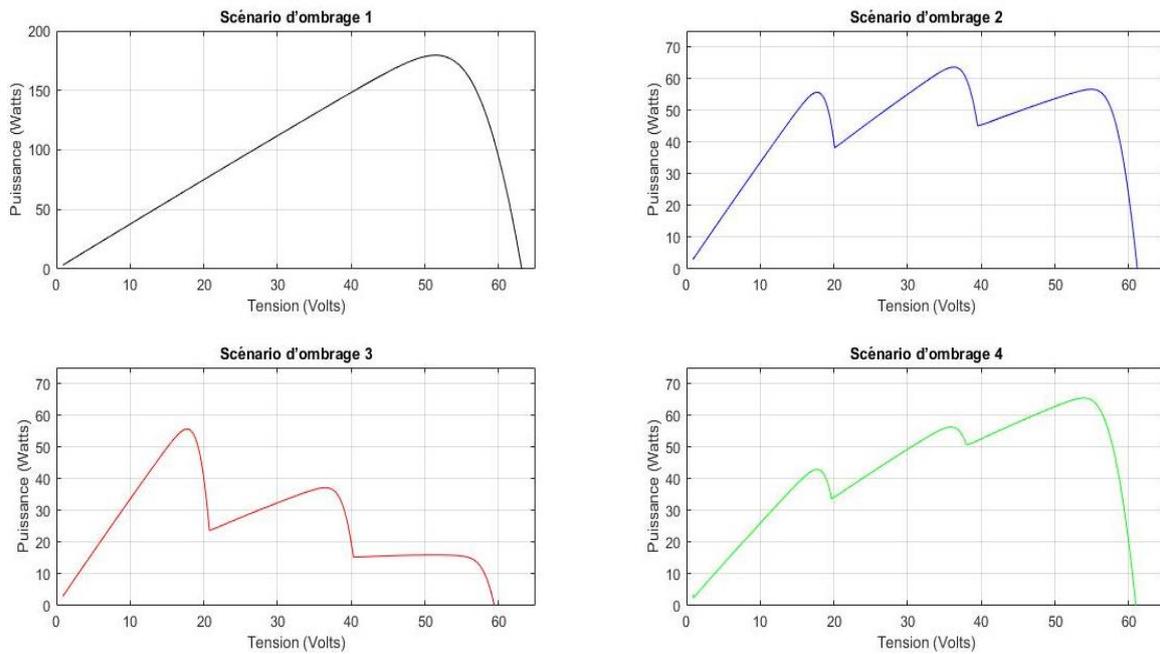


Figure III-20 Caractéristiques P-V pour différents scénarios d'ombrage.

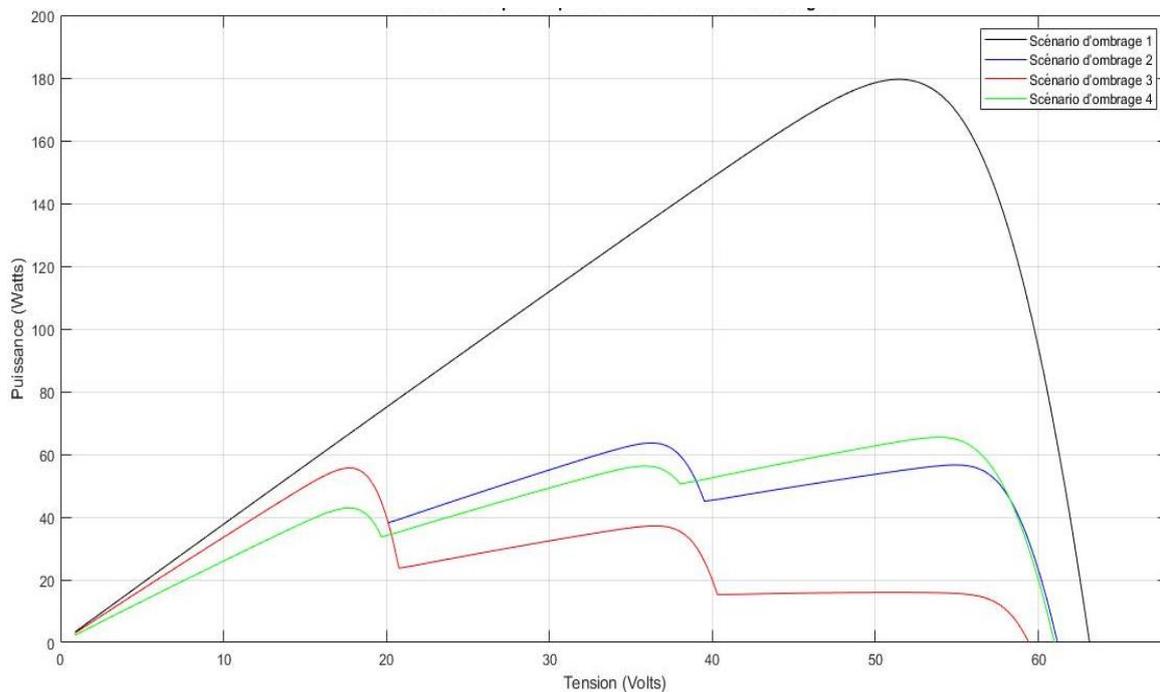


Figure III-21 Caractéristiques P-V pour différents scénarios d'ombrage (en une seule figure).

CHAPITRE III : Calibrage, implémentation et tests logiciels du contrôleur MPPT basés sur l'algorithme des lucioles

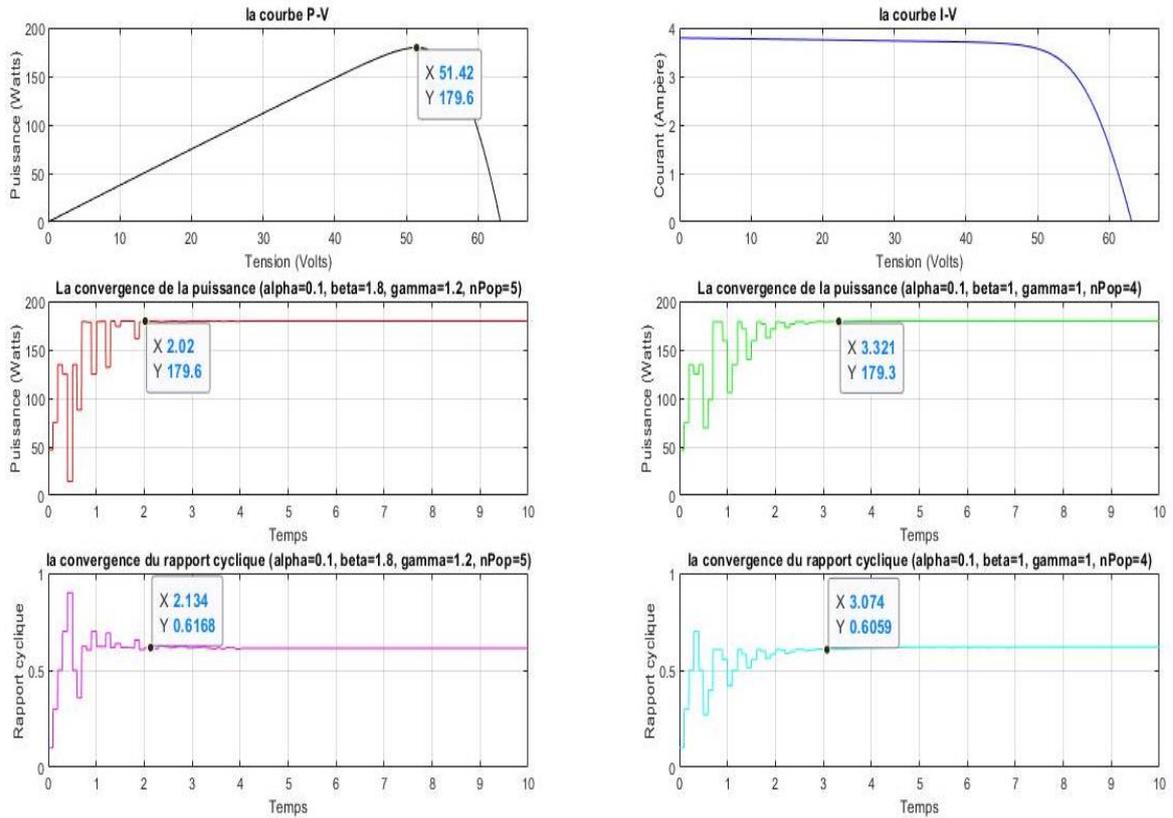


Figure III-22 Courbes relatives au scénario d'ombrage 1 (1000-1000-1000).

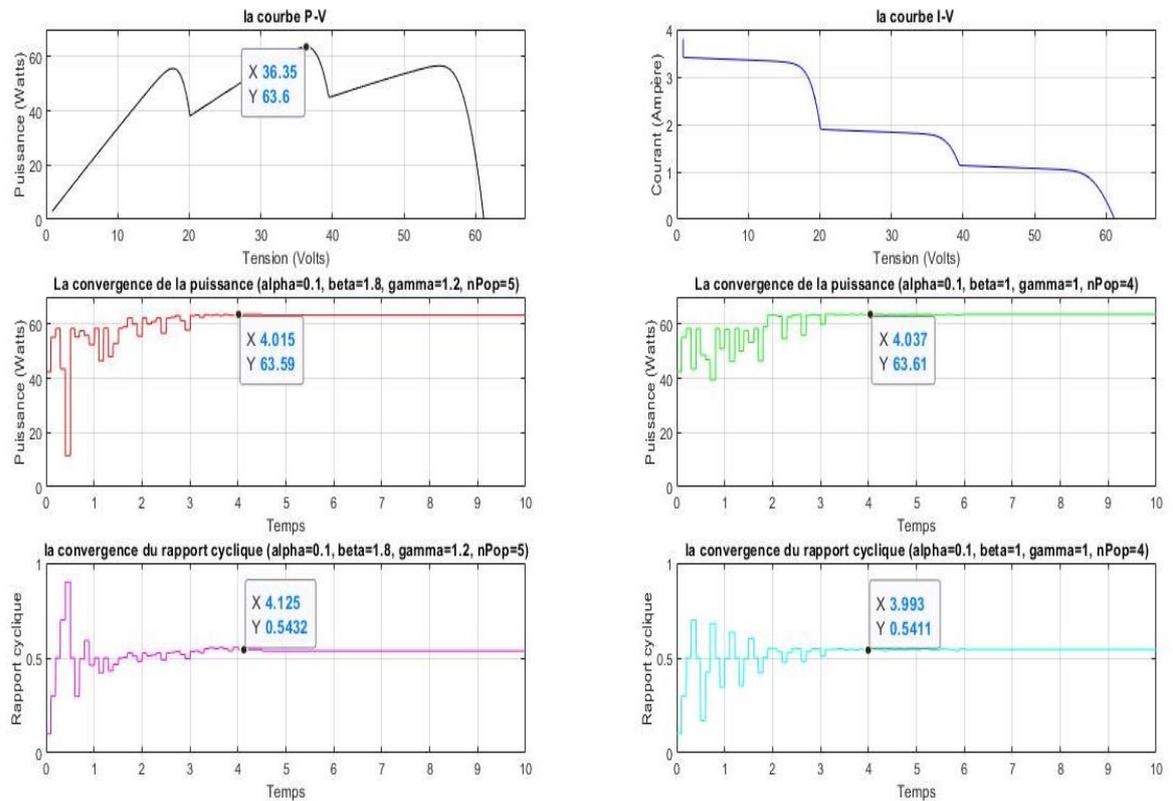


Figure III-23 Courbes relatives au Scénario d'ombrage 2 (300-500-900).

CHAPITRE III : Calibrage, implémentation et tests logiciels du contrôleur MPPT basés sur l'algorithme des lucioles

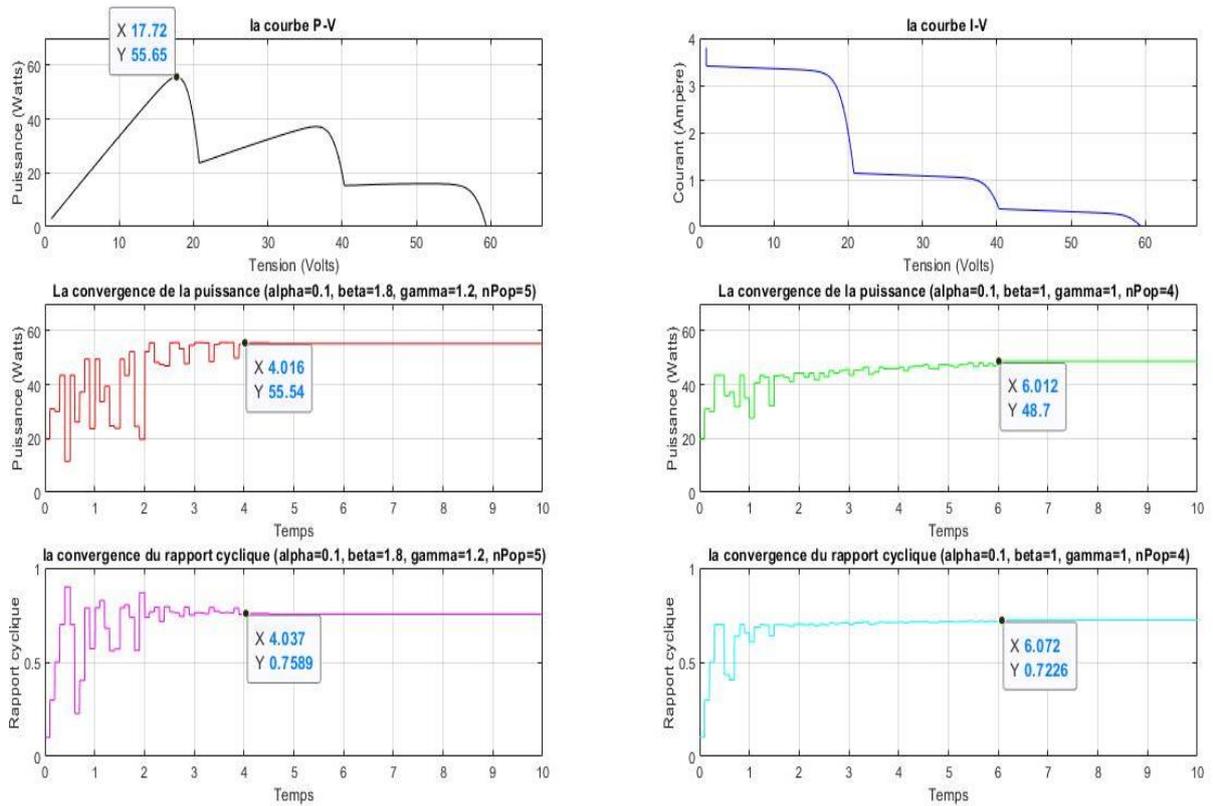


Figure III-24 Courbes relatives au Scénario d'ombrage 3 (100-300-900).

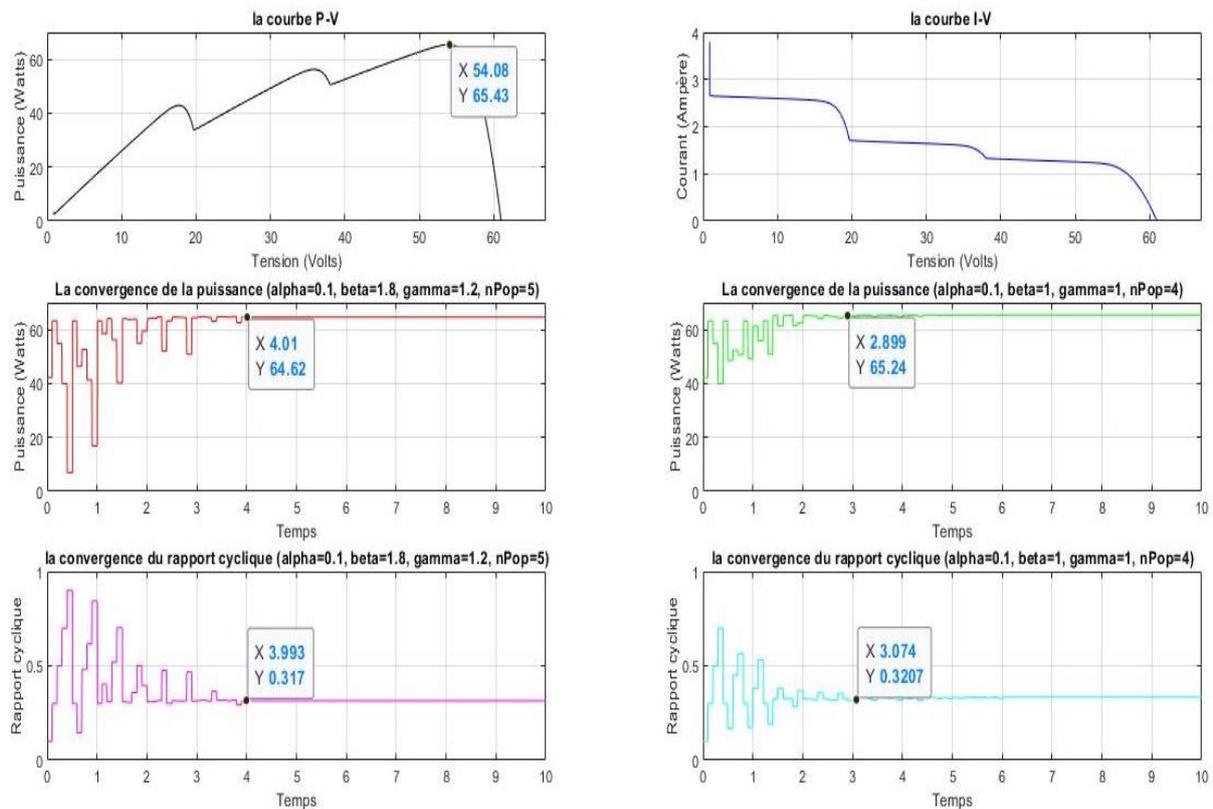


Figure III-25 Courbes relatives au Scénario d'ombrage 4 (350-450-700).

III.3.4 Discussion des résultats

- A partir des résultats de simulation obtenus, le contrôleur proposé présente de bonnes performances pour atteindre le PPM sous différentes conditions d'ombrage partiel avec zéro oscillation à l'état d'équilibre ;
- Pour chaque pattern d'ombrage, le maximum global est atteint comme l'illustre les figures correspondantes aux différents cas d'ombrage partiel.
- De ce fait, nous pouvons conclure, de par leur robustesse et leur aptitude d'auto adaptation, les méthodes bio inspirées sont très efficaces pour traiter le problème de l'ombrage partiel.

III.4 Conclusion :

Les simulations décrites ci-avant sont purement théoriques car pour évaluer les performances d'une commande numérique avant d'établir un prototype réel, il est nécessaire d'effectuer d'abord des simulations. Cette approche demeure, pour l'heure, la meilleure manière qui permettant d'évaluer les contrôleurs MPPT et d'analyser leurs comportements sous différentes conditions de fonctionnement.

Les résultats obtenus des simulations ont démontré l'efficacité du contrôleur FA_ALGO_MPPT. Pour cela plusieurs scénarios ont été élaborés pour mettre le contrôleur en épreuve de variations atmosphériques.

Par ailleurs, le problème tout aussi réaliste de l'ombrage partiel a été traité. Ce qui a donné naissance à un modèle permettant la simulation de ce phénomène. En effet, dans ce cas précis, plusieurs maxima locaux peuvent subvenir ce qui induit le contrôleur en erreur et impliquant ainsi une perte de puissance non négligeable.

En conclusion, nous pouvons dire que le contrôleur issu des méthodes Bio inspirées est robuste, stable et précis.

CHAPITRE IV

MISE EN ŒUVRE DU CONTRÔLEUR HARDWARE

IV.1 Introduction

L'objectif de ce chapitre est d'implémenter l'algorithme des lucioles destiné au pistage du point de puissance maximale (FA_ALGO_MPPT) appliqué aux systèmes photovoltaïques via une nouvelle méthodologie de conception qui favorise et accélère le prototypage.

Nous allons dans un premier temps expliquer cette méthodologie, quelques concepts de base qui la caractérise, ses particularités ainsi que son avantage par rapport aux méthodes conventionnelles. Ensuite, nous allons expliquer l'algorithme FA_ALGO_MPPT codé en C/C++ en spécifiant le rôle de chaque fonction dont est constitué le code.

Aussi, nous allons tester les performances fonctionnelles de l'algorithme face aux différentes variations climatiques, plus précisément l'ombrage partiel, auxquelles l'algorithme software (via MATLAB et SIMULINK) fut soumis et ce en utilisant les paramètres issus du calibrage de l'algorithme dans le chapitre précédent. Ces tests démontreront l'efficacité de l'algorithme avant son passage par l'outil HLS lequel générera un code destiné à assurer une fonction sur une carte FPGA.

Enfin, Nous génèrerons un IP-Catalog de l'algorithme des lucioles via l'approche HLS et nous clôturerons ce projet de fin d'étude par d'éventuelles perspectives qui visent à optimiser les performances de notre algorithme aussi bien sur l'aspect software que sur l'aspect hardware.

IV.2 La synthèse de haut niveau (HLS)

High-Level Synthesis (HLS) ou la synthèse de haut niveau consiste en la transformation d'un code de haut niveau tel que le C en une implémentation à un niveau de transfert à l'échelle du registre RTL (Register Transfer Level) qui sera susceptible d'être synthétisée en un réseau de portes programmables sur le terrain FPGA.

En démarrant d'une spécifications C (C, C++, SystemC, ...), Il sera possible de générer un code HDL (Hardware Description Language) qui fera en sorte de fournir une architecture parallèle et optimale tout en étant avantageuse en termes de performances, de coûts et de puissance par rapport à l'approche traditionnelle. Nous allons donner une brève introduction sur la synthèse de haut niveau.

IV.2.1 Les avantages de l'outil HLS

La synthèse de haut niveau relie de manière étroite le domaines matériel et logiciel tout en offrant les principaux avantages suivants :

- a- *Productivité accrue pour les concepteurs hardware* : développeurs peuvent travailler à un niveau d'abstraction plus élevé tout en créant du matériel de haute performance.
- b- *Performances systèmes améliorées pour les concepteurs de logiciels* : Les développeurs logiciels peuvent accélérer une partie ou la totalité de leurs algorithmes à forte intensité de calcul sur un matériel cible de type FPGA.

La méthodologie de conception de synthèse de haut niveau permettra de :

- a- Développer des algorithmes au niveau C tout en travaillant à un niveau d'abstraction très bas réduisant ainsi le temps de la mise en œuvre.
- b- Procéder à des vérifications au niveau C en validant l'algorithmique fonctionnelle plus rapidement qu'avec un langage de description matériel (HDL).
- c- Maîtriser l'étape de synthèse en C via des directives d'optimisation en implémentation HDL.
- d- La Création d'implémentations multiples à partir du code source C à l'aide de directives d'optimisation qui augmentent la probabilité de trouver une mise en œuvre optimale.
- e- Implémenter des codes sources en C beaucoup plus lisibles et portables ceci permettra l'incorporation du code C dans de nouveaux dispositifs.

IV.2.2 Le mécanisme de fonctionnement de l'outil Vivado

L'outil Xilinx Vivado HLS synthétise une fonction C en un bloc IP que l'on peut intégrer dans un système matériel. Il est étroitement intégré au reste des outils de conception Xilinx et offre une prise en charge complète du langage et des fonctionnalités pour créer l'implémentation optimale d'un algorithme C. Ci-dessous se trouve le flux de conception de la Vivado HLS :

1. Compiler, exécuter (simuler) et déboguer l'algorithme C.
2. Synthèse de l'algorithme C en une implémentation RTL, en utilisant éventuellement des directives d'optimisation utilisateur.
3. Générer des rapports complets et analyser la conception.
4. Vérifiez l'implémentation RTL à l'aide d'un flux de boutons poussoirs.
5. Regrouper l'implémentation RTL dans une sélection de formats IP.

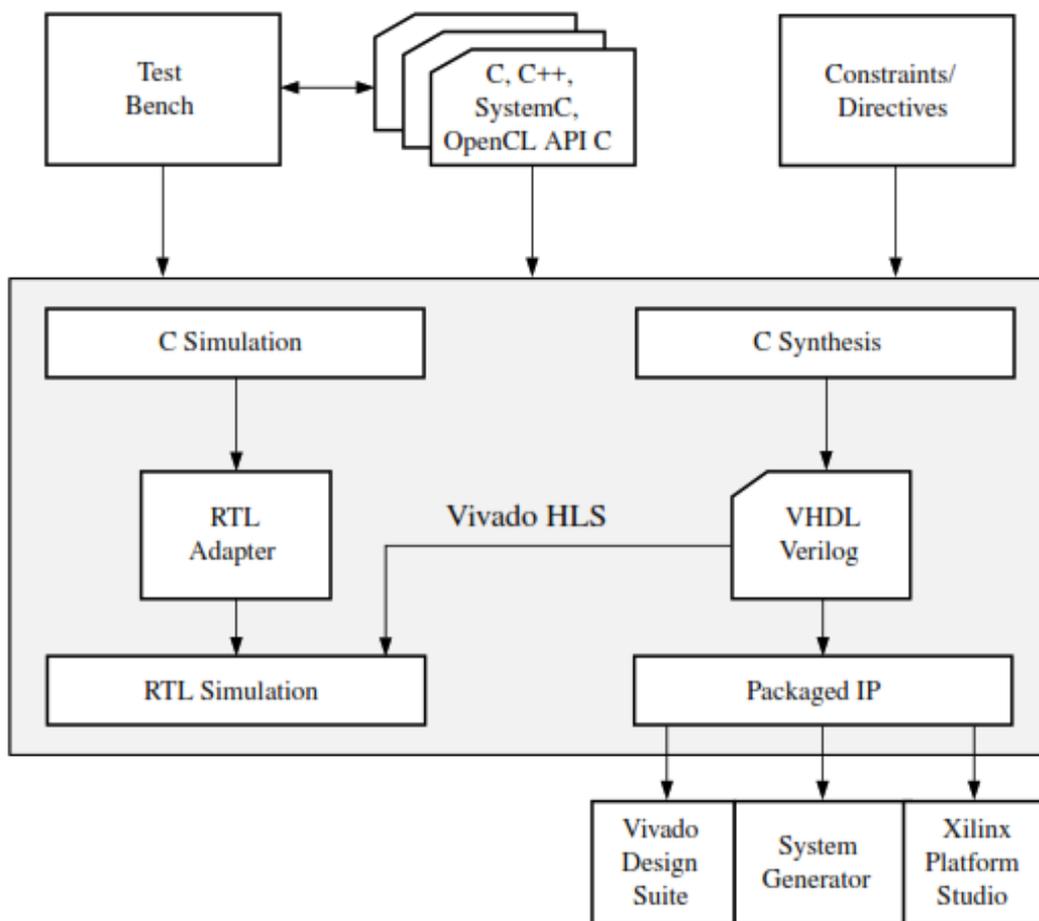


Figure IV-1 Flot de conception de l'outil Vivado HLS.

IV.2.3 Les bases de l'outil HLS

La synthèse de haut niveau comprend les phases suivantes :

- a- Scheduling : Détermine les opérations qui ont lieu pendant chaque cycle d'horloge en fonction de la fréquence et de la durée du cycle d'horloge, du temps nécessaire à la réalisation de l'opération et des directives d'optimisation spécifiées par l'utilisateur.
- b- Binding : Détermine quelle ressource matérielle implémente chaque opération planifiée. Pour mettre en œuvre la solution optimale, la synthèse de haut niveau utilise des informations sur l'appareil cible.
- c- Control logic extraction : Extrait la logique de commande pour créer une machine d'états finis (FSM) qui séquence les opérations dans une conception de type RTL.

IV.2.4 Les étapes de synthèse d'un code C via l'outil HLS

Les étapes de synthèse d'une fonction écrite en langage C (ou dérivé du C) se fait de la manière suivante :

1. Les arguments de fonction de niveau supérieur sont synthétisés en ports RTL d'Entrée et Sortie.
2. Si le code C comprend une hiérarchie de sous-fonctions, la conception finale du RTL comprend une hiérarchie de modules ou d'entités qui ont une correspondance un à un avec la hiérarchie de fonction C originale (Top Level Function). Toutes les instances d'une fonction utilisent la même implémentation ou bloc RTL.
3. Les tableaux du code C sont synthétisés en RAM (bloc ou UltraRAM) dans la conception finale sur la carte FPGA.

La synthèse de haut niveau met en œuvre une implémentation optimisée basée sur des comportements par défaut, des contraintes algorithmique et toutes les directives d'optimisation spécifiées. Il est possible d'utiliser les directives d'optimisation pour modifier et contrôler le comportement par défaut de la logique interne et des ports E/S (Entrée et Sortie). Ceci permet la génération de diverses implémentation matérielle à partir d'un même code C.

Pour déterminer si la conception satisfait aux exigences, il est possible d'examiner les paramètres de performance dans le rapport de synthèse généré par la synthèse de haut niveau. Après avoir analysé l'état, vous pouvez utiliser les directives d'optimisation pour affiner l'implémentation. Le rapport de synthèse contient de l'information sur les paramètres de rendement suivants :

- Superficie : Les ressources matérielles nécessaires à la mise en œuvre de la conception en fonction des ressources disponibles dans le FPGA, y compris les tables de recherche : Look Up Table (LUT), les registres, la RAM et les DSP48.
- Latence : Nombre de cycles d'horloge requis pour qu'une fonction calcule toutes les valeurs de sortie.
- Intervalle d'initiation (II) : Nombre de cycles d'horloge avant que la fonction puisse accepter de nouvelles données d'entrée.
- Latence d'itération de boucle : Nombre de cycles d'horloge nécessaires pour réaliser une itération de la boucle.
- Intervalle d'initiation de la boucle : Nombre de cycles d'horloge avant que la prochaine itération de la boucle ne commence à traiter les données.
- Latence de boucle : Nombre de cycles pour exécuter toutes les itérations de la boucle.

IV.3 L'algorithme fonctionnel FA_ALGO_MPPT en langage

Le code que nous avons établi n'est ni plus ni moins que l'implémentation software faite dans la partie précédente traduite en langage bas niveau (C/C++). Hormis le nombre d'itération, Nous avons considéré les mêmes paramètres issus de l'approche software, à savoir le nombre d'individu de la population et les paramètres intrinsèques (α , β , γ). Le vecteur qui rassemble les valeurs initiales de la population (rapport cyclique) a été fixé à [0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 0.8].

L'organigramme du hardware algorithme FA_ALGO_MPPT est exactement le même que dans la figure III-1. Toutefois, nous allons brièvement expliquer le fonctionnement de l'algorithme ainsi que les fonctions C que nous avons utilisées.

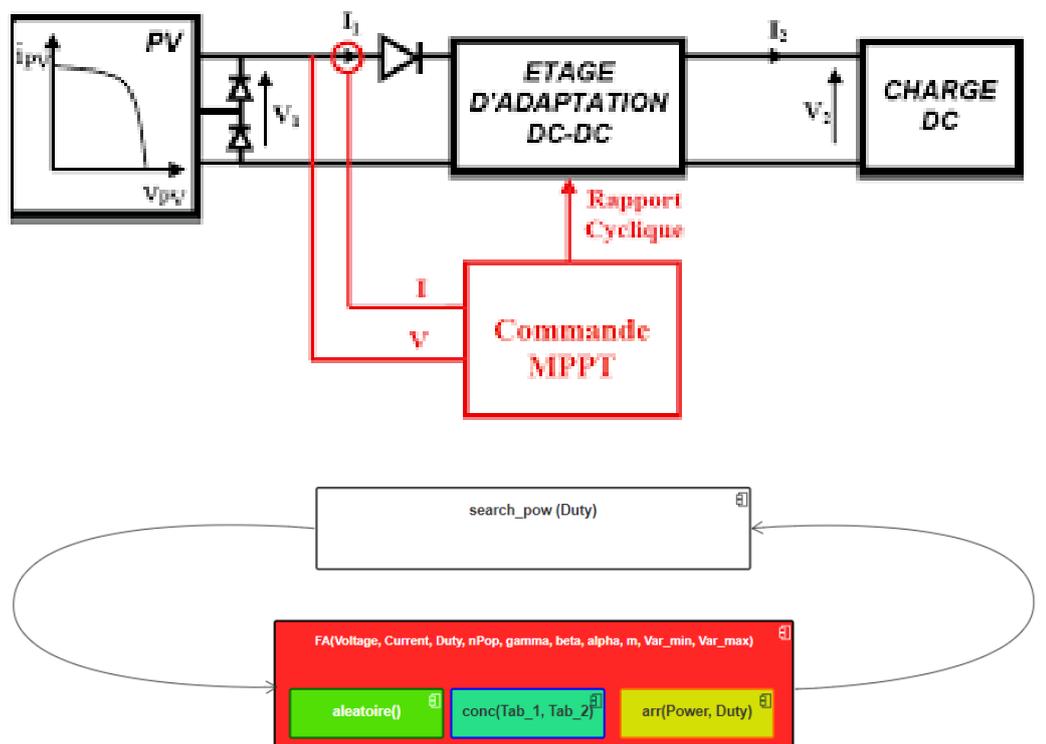
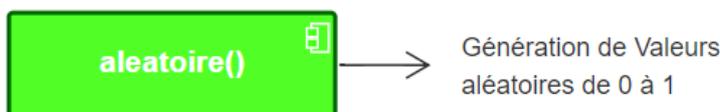


Figure IV-2 L'analogie entre le système PV et l'algorithme hardware.

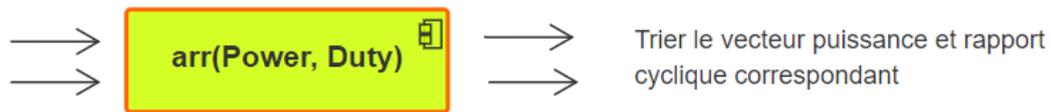
IV.3.1 La fonction aléatoire

La fonction *aléatoire* servira à générer des valeurs aléatoires comprises entre 0 et 1. Dans le cas d'une simulation fonctionnelle, on aurait pu utiliser la fonction *rand()* après avoir déclaré le header *time.h*. Toutefois, la bibliothec *time.h* ne fonctionnera pas dans le cas de la synthèse HLS. L'alternative était de faire une fonction combinatoire et récursive grâce au décalage à rétroaction linéaire des registres (LFSR).



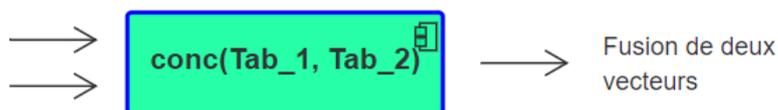
IV.3.2 La fonction arr

Cette fonction fera en sorte de trier le vecteur des puissances ainsi que les rapport cycliques correspondants. Ce tri permettra de faire une sélection des meilleurs rapports cycliques, issus de nouvelle et de l'ancienne population, qui produisent le plus de puissance.



IV.3.3 La fonction conc

La fonction conc servira à concaténer les deux vecteurs de puissance qui sont issus de la nouvelle et de l'ancienne population. Cette fonction conservera la correspondance entre chaque puissance et le rapport cyclique qui la génère.



IV.3.4 La fonction search_pow

Cette fonction fera correspondre à chaque rapport cyclique un courant, une tension et une puissance à l'aide de données pré-enregistrées. En réalité, cette fonction représente la réponse du système incluant le convertisseur DC-DC la charge et les modules photovoltaïques.

Le rapport cyclique qui entre dans la fonction *search_pow* représente le rapport cyclique qui attaquera le transistor du convertisseur DC-DC. La sortie cette fonction représente les courant et tension qui attaqueront le contrôleur MPPT afin d'en extraire la puissance (fonction objectif).



En fait, il y a une autre méthode qui permet d'obtenir le même résultat sans passé par un dressage de tableau de valeurs (qui relie le rapport cyclique que génère le contrôleur MPPT à la puissance délivrée par les PV). Cette méthode consiste à faire une interpolation des courbes caractéristiques qui donnera lieu à une fonction explicite. La figure en bas montre la différence entre la courbe expérimentale et la courbe qui résulte d'une interpolation polynomiale.

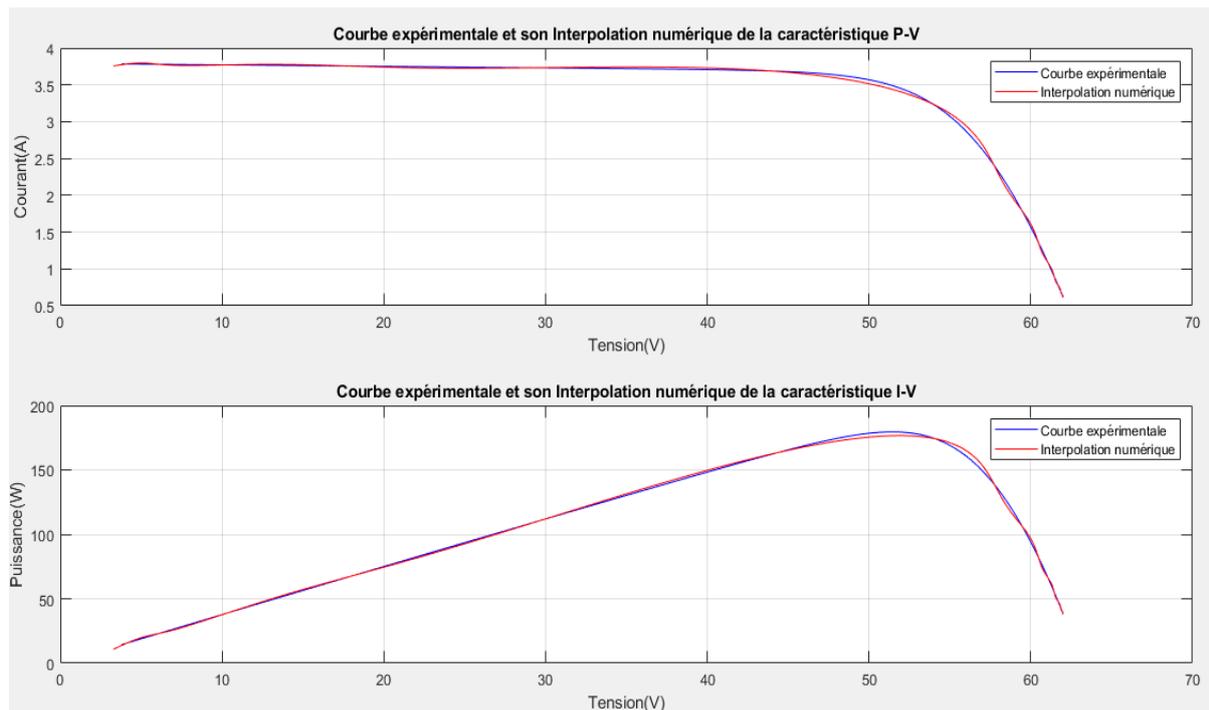


Figure IV-3 Courbes expérimentales et leurs interpolations numériques de la caractéristique P-V, I-V.

Le souci avec cette approche, c'est qu'elle requiert beaucoup de temps de calcul car le polynôme qui approche cette courbe est un polynôme de degré quatorze. De ce fait, cette approche est très gourmande en termes de puissance de calcul et de ressources. D'où l'intérêt d'avoir opté pour une solution qui fait appel à une correspondance entre des valeurs à l'aide de tableaux.

IV.3.5 La fonction FA

La fonction *FA* représente la fonction de haut niveau (Top Level Function) qui utilisera toutes les autres fonctions précédemment citées. Son rôle consistera à générer une nouvelle population de *nPop* rapport cyclique (lors de l'étape de mise à jour) en ayant en entrée les paramètres propres de l'algorithme (α , β , γ , *nPop*, *m* et *Var_min* et *Var_max*) ainsi que les anciens rapports cycliques et les puissances (le courant *I* et *V*) qu'il génère.



IV.4 Simulation fonctionnelle de l'algorithme FA_ALGO_MPPT sous différentes conditions climatiques

Dans le but d'évaluer les performances et l'efficacité du contrôleur FA_ALGO_MPPT sachant l'approche hardware, les différents scénarios d'ombrage qui ont été élaborés dans le chapitre précédent vont être repris. Nous rappellerons les scénarios d'ombrages pour lesquels nous avons optés lors du chapitre précédent :

Tableau IV-1 Les différents scénarios d'ombrage auxquels les trois panneaux PV sont soumis.

	PV Panel 1 (W/m ²)	PV Panel 2 (W/m ²)	PV Panel 3 (W/m ²)
Scénario 1	1000	1000	1000
Scénario d'ombrage 2	300	500	900
Scénario d'ombrage 3	100	300	900
Scénario d'ombrage 4	350	450	700

A la différence de la figure III-8 du chapitre précédent, nous avons besoin de faire correspondre à chaque rapport cyclique que génère un contrôleur MPPT un couple de courant et tension (puissance) qui vont être récoltés à l'entrée de ce dernier. De ce fait, la rampe, que l'on variera de 0 à 1, attaquera l'entrée du convertisseur DC-DC (plus précisément le transistor de puissance du convertisseur). Voir la figure IV-4.

Aussi, en raison du fait que notre convertisseur DC-DC soit un boost, un rapport cyclique de 1 engendrera une tension infinie, et par ricochet, une puissance infinie (voir l'équation 1.8). Ainsi, Nous constaterons un certain nombre d'échantillon manquant sur les courbes caractéristiques des différents scénarios d'ombrage dans les figures qui vont suivre. Ce manque d'échantillon est dû au fait que nous avons balayé les valeurs du rapport cyclique de 0 à 0.99. Pour plus de précision sur les courbes caractéristique des différents scénarios d'ombrage, se référer à la figure III-21 du chapitre précédent.

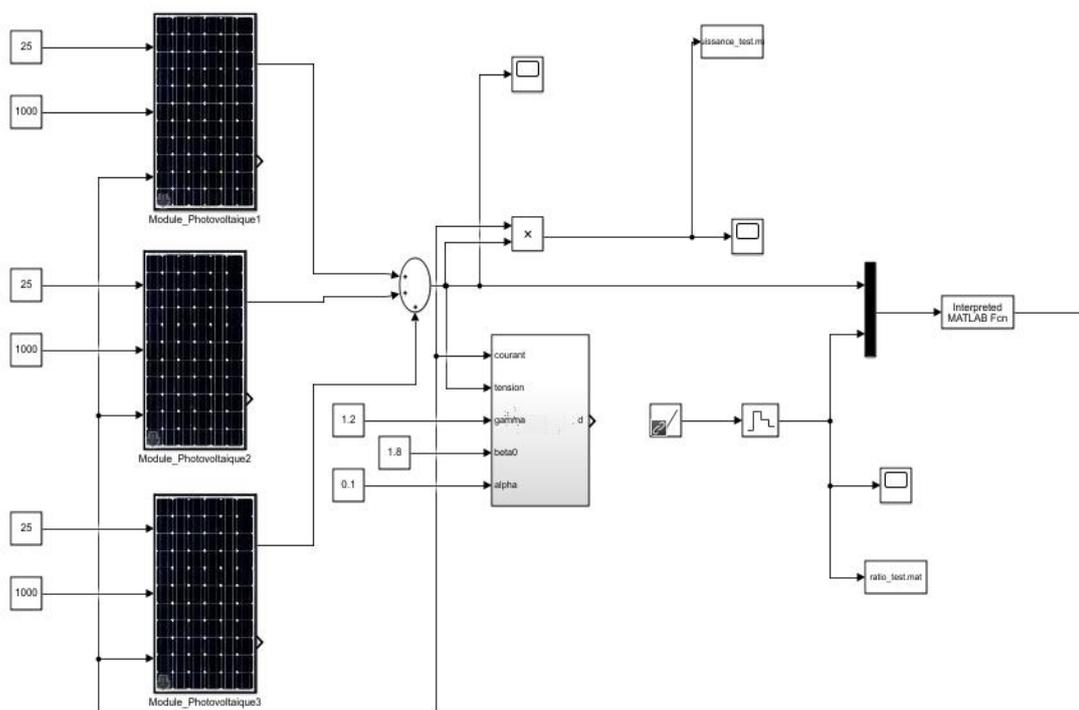


Figure IV-4 Process pour la détermination des courbes caractéristiques.

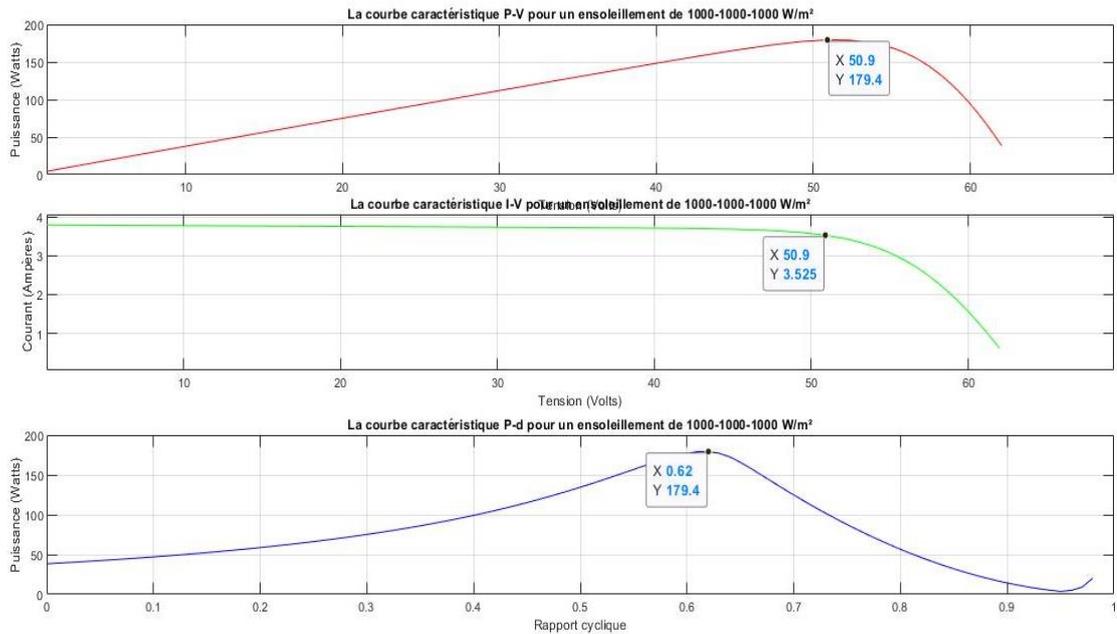


Figure IV-5 La caractéristique électrique de trois modules photovoltaïques pour le scénario 1.

Nous allons voir comment ces rapports convergent vers le MPPT au fur et à mesure des itérations.

IV.4.1 Scénario 1

Début de la génération 1

Power = 47.028313,	current = 0.761969,	voltage = 61.719471,	ratio = 0.100000
Power = 75.279305,	current = 1.239481,	voltage = 60.734554,	ratio = 0.300000
Power = 134.580338,	current = 2.320175,	voltage = 58.004383,	ratio = 0.500000
Power = 132.925491,	current = 3.719139,	voltage = 35.740929,	ratio = 0.690000
Power = 62.302513,	current = 3.758664,	voltage = 16.575708,	ratio = 0.790000

Fin de la génération 1

Début de la génération 2

Power = 134.580338,	current = 2.320175,	voltage = 58.004383,	ratio = 0.500000
Power = 134.580338,	current = 2.320175,	voltage = 58.004383,	ratio = 0.500000
Power = 179.185272,	current = 3.432310,	voltage = 52.205441,	ratio = 0.610000
Power = 179.185272,	current = 3.432310,	voltage = 52.205441,	ratio = 0.610000
Power = 179.395096,	current = 3.524696,	voltage = 50.896614,	ratio = 0.620000

Fin de la génération 2

Début de la génération 3

Power = 179.395096,	current = 3.524696,	voltage = 50.896614,	ratio = 0.620000
Power = 179.395096,	current = 3.524696,	voltage = 50.896614,	ratio = 0.620000
Power = 179.395096,	current = 3.524696,	voltage = 50.896614,	ratio = 0.620000
Power = 179.395096,	current = 3.524696,	voltage = 50.896614,	ratio = 0.620000
Power = 179.395096,	current = 3.524696,	voltage = 50.896614,	ratio = 0.620000

Fin de la génération 3

CHAPITRE IV : Mise en œuvre du contrôleur hardware

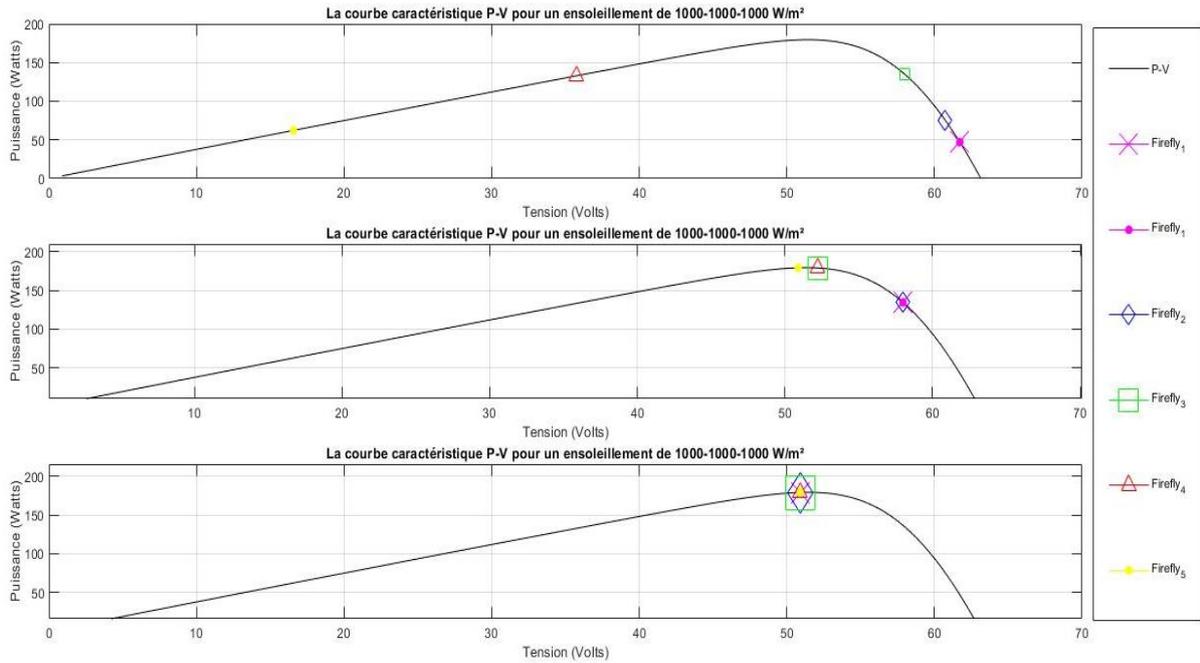


Figure IV-6 Convergence des rapports cycliques lors du scénario 1.

IV.4.2 Scénario d'ombrage 2

La caractéristique électrique de trois cellules photovoltaïques pour un ensoleillement de 300-500-900 W/m².

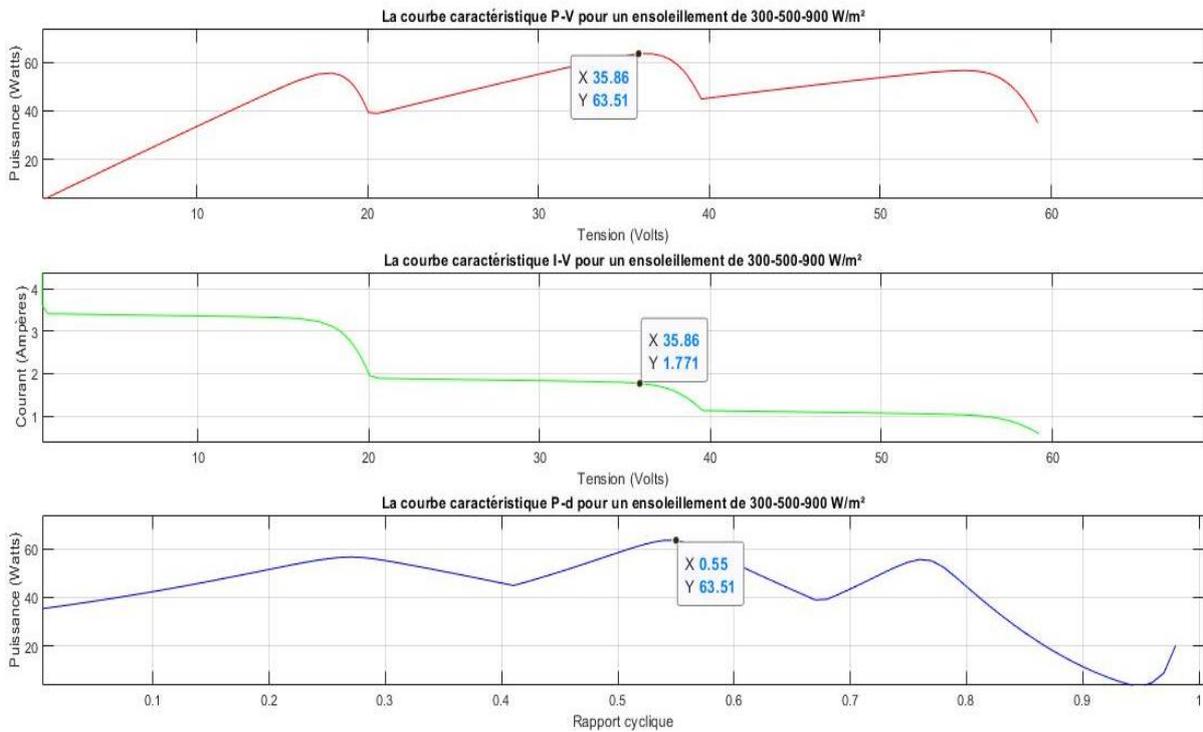


Figure IV-7 La caractéristique électrique de trois modules photovoltaïques pour le scénario 2

CHAPITRE IV : Mise en œuvre du contrôleur hardware

Début de la génération 1

Power = 42.391384,	current = 0.723430,	voltage = 58.597797,	ratio = 0.100000
Power = 55.884811,	current = 1.052903,	voltage = 53.076862,	ratio = 0.290000
Power = 58.406048,	current = 1.528477,	voltage = 38.211926,	ratio = 0.500000
Power = 43.479523,	current = 2.197967,	voltage = 19.781702,	ratio = 0.700000
Power = 48.641312,	current = 3.321111,	voltage = 14.646098,	ratio = 0.790000

Fin de la génération 1

Début de la génération 2

Power = 56.429279,	current = 1.043325,	voltage = 54.085987,	ratio = 0.280000
Power = 56.619057,	current = 1.030762,	voltage = 54.929314,	ratio = 0.270000
Power = 58.406048,	current = 1.528477,	voltage = 38.211926,	ratio = 0.500000
Power = 58.406048,	current = 1.528477,	voltage = 38.211926,	ratio = 0.500000
Power = 60.658497,	current = 1.811246,	voltage = 33.489933,	ratio = 0.570000

Fin de la génération 2

Début de la génération 3

Power = 58.406048,	current = 1.528477,	voltage = 38.211926,	ratio = 0.500000
Power = 62.487843,	current = 1.796574,	voltage = 34.781670,	ratio = 0.560000
Power = 62.487843,	current = 1.796574,	voltage = 34.781670,	ratio = 0.560000
Power = 63.506889,	current = 1.770916,	voltage = 35.861046,	ratio = 0.550000
Power = 63.471737,	current = 1.731938,	voltage = 36.647808,	ratio = 0.540000

Fin de la génération 3

IV.4.3 Scénario d'ombrage 3

La caractéristique électrique de trois cellules photovoltaïques pour un ensoleillement de 100-300-900 W/m².

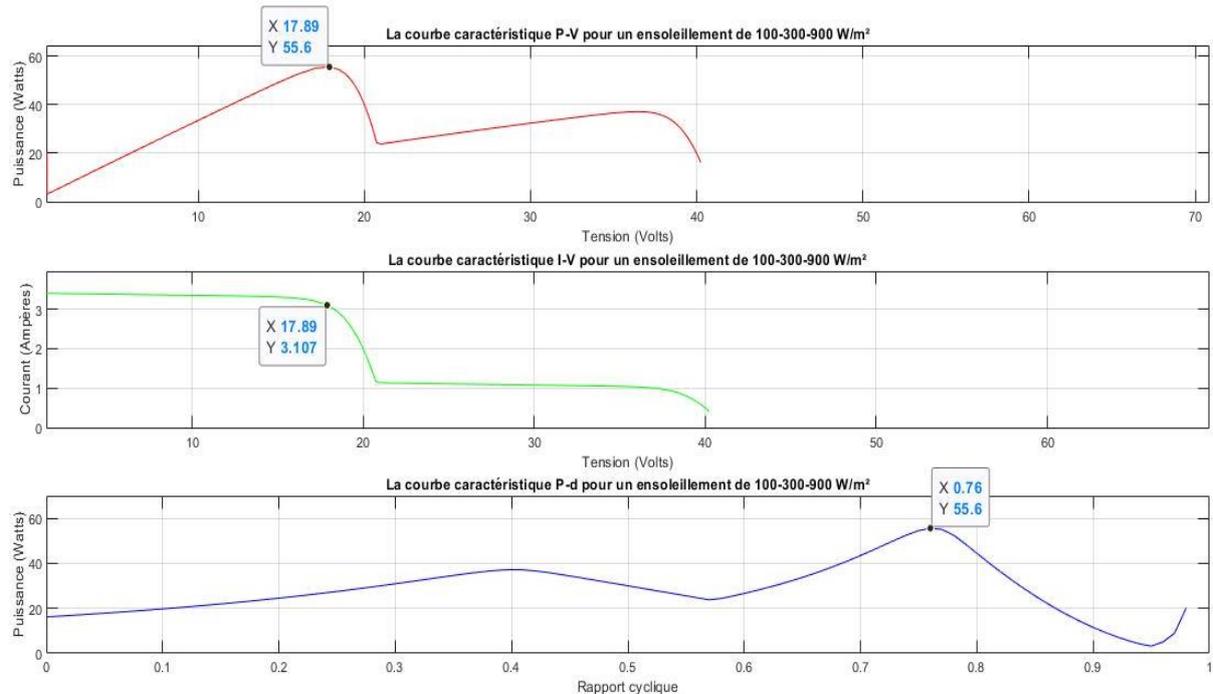


Figure IV-8 La caractéristique électrique de trois modules photovoltaïques pour le scénario 3.

CHAPITRE IV : Mise en œuvre du contrôleur hardware

Début de la génération 1

Power = 19.761082, current = 0.493927, voltage = 40.008095, ratio = 0.100000
 Power = 30.938923, current = 0.794611, voltage = 38.935936, ratio = 0.300000
 Power = 30.905634, current = 1.090056, voltage = 28.352346, ratio = 0.490000
 Power = 43.479523, current = 2.197967, voltage = 19.781702, ratio = 0.700000
 Power = 48.641312, current = 3.321111, voltage = 14.646098, ratio = 0.790000

Fin de la génération 1

Début de la génération 2

Power = 43.479523, current = 2.197967, voltage = 19.781702, ratio = 0.700000
 Power = 43.479523, current = 2.197967, voltage = 19.781702, ratio = 0.700000
 Power = 52.500156, current = 3.293500, voltage = 15.940538, ratio = 0.780000
 Power = 50.436787, current = 2.630328, voltage = 19.175093, ratio = 0.730000
 Power = 55.072247, current = 3.226551, voltage = 17.068457, ratio = 0.770000

Fin de la génération 2

Début de la génération 3

Power = 55.595570, current = 3.106768, voltage = 17.894985, ratio = 0.760000
 Power = 55.595570, current = 3.106768, voltage = 17.894985, ratio = 0.760000
 Power = 55.595570, current = 3.106768, voltage = 17.894985, ratio = 0.760000
 Power = 55.595570, current = 3.106768, voltage = 17.894985, ratio = 0.760000
 Power = 55.595570, current = 3.106768, voltage = 17.894985, ratio = 0.760000

Fin de la génération 3

IV.4.4 Scénario d'ombrage 4

La caractéristique électrique de trois cellules photovoltaïques pour un ensoleillement de 350-450-700 W/m².

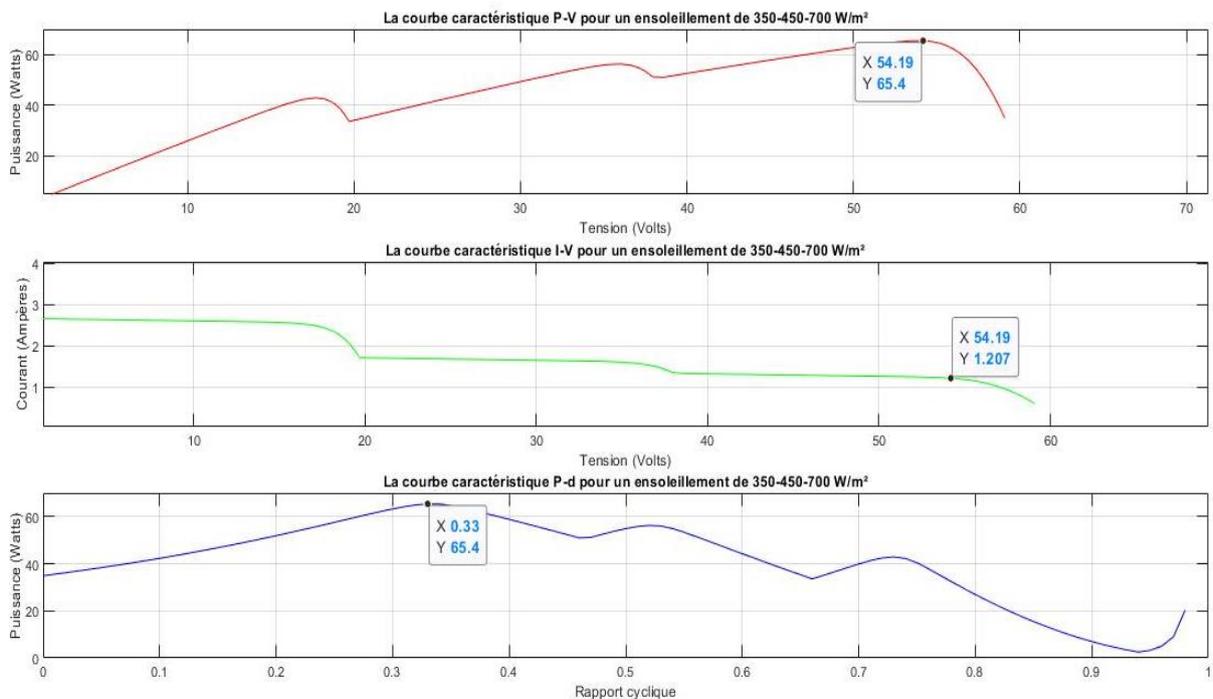


Figure IV-9 La caractéristique électrique de trois modules photovoltaïques pour le scénario 4.

CHAPITRE IV : Mise en œuvre du contrôleur hardware

```
*****
Début de la génération 1
Power = 42.309334,    current = 0.722729,    voltage = 58.541061,    ratio = 0.100000
Power = 63.261269,    current = 1.136242,    voltage = 55.675865,    ratio = 0.300000
Power = 54.902023,    current = 1.481918,    voltage = 37.047951,    ratio = 0.500000
Power = 39.925640,    current = 2.106225,    voltage = 18.956022,    ratio = 0.700000
Power = 29.554607,    current = 2.588769,    voltage = 11.416471,    ratio = 0.790000

Fin de la génération 1
*****
Début de la génération 2
Power = 54.902023,    current = 1.481918,    voltage = 37.047951,    ratio = 0.500000
Power = 54.902023,    current = 1.481918,    voltage = 37.047951,    ratio = 0.500000
Power = 58.831814,    current = 1.278365,    voltage = 46.021141,    ratio = 0.400000
Power = 63.261269,    current = 1.136242,    voltage = 55.675865,    ratio = 0.300000
Power = 63.261269,    current = 1.136242,    voltage = 55.675865,    ratio = 0.300000

Fin de la génération 2
*****
Début de la génération 3
Power = 63.261269,    current = 1.136242,    voltage = 55.675865,    ratio = 0.300000
Power = 63.261269,    current = 1.136242,    voltage = 55.675865,    ratio = 0.300000
Power = 63.261269,    current = 1.136242,    voltage = 55.675865,    ratio = 0.300000
Power = 64.211510,    current = 1.161335,    voltage = 55.291138,    ratio = 0.310000
Power = 65.404671,    current = 1.207062,    voltage = 54.185013,    ratio = 0.330000

Fin de la génération 3
*****
```

IV.4.5 Discussion des résultats

- Nous constatons que l'algorithme hardware FA_ALGO_MPPT converge vers le point de puissance maximale dans tous les cas d'ombrage que nous avons considérés. Cette convergence se fait au pire en trois itérations.
- Nous remarquons que le cas qui converge le plus rapidement est celui de l'éclairage homogène. Ceci n'est pas due à l'allure convexe de la courbe caractéristique contrairement aux autres cas d'ombrage qui présente beaucoup des maxima locaux. En réalité, le Scenario 1 converge plus rapidement que les autres en raison du fait que les paramètres de l'algorithme ont été calibrés en référence à ce cas de configuration.
- Comparativement aux cas software, la convergence hardware fait preuve d'une vitesse de converge tout aussi rapide car les deux approches se basent sur la même logique et les mêmes paramètres algorithmiques.

IV.5 Synthèse de haut niveau et la génération d'IP

L'outil Vivado HLS permet l'implémentations de fichiers RTL en utilisant les dérivées du langage C. Proposant une large librairie de fonction C, l'outil HLS assure une grande productivité et un design RTL très performant.

L'outil Vivado HLS permet de produire une implémentation RTL de haute qualité en Verilog ou VHDL. Ces RTL pourront être regroupés en un IP-Block dans l'optique de faire de l'intégration système.

Après avoir ouvert notre projet et saisi notre code C, la simulation fonctionnelle de notre code a donné comme résultats montrés dans la section IV-4. Après la validation du code C, on enchaîne avec l'étape de synthèse. A l'issue de cette étape, un rapport affiche des informations telles que l'estimation

des performances (Timing and latency), l'utilisation des ressources (les bascule flip-flop, LUT, ...) et les ports qui ont été utilisés (CLK, I/O, etc). Voir la figure ci-bas.

[-] Summary

Clock	Target	Estimated	Uncertainty
ap_clk	10.00	9.507	1.25

[-] Summary

Name	BRAM_18K	DSP48E	FF	LUT
DSP	-	1	-	-
Expression	-	2	0	1808
FIFO	-	-	-	-
Instance	48	86	16404	12915
Memory	6	-	256	12
Multiplexer	-	-	-	1536
Register	-	-	1939	-
Total	54	89	18599	16271
Available	240	160	128000	64000
Utilization (%)	22	55	14	25

Figure IV-10 Rapport de la synthèse HLS de l'algorithme des lucioles.

Au vu des résultats obtenus, nous constatons que les ressources consommées (Figure IV-10) en termes de LUT et FF utilisées sont relativement importantes. En effet, le nombre de FF utilisé est de 18599. Ce dernier, regroupe 1939 Registres et 16404 Instances. De même pour les LUT utilisées, qui sont au nombre de 16271, regroupant 12915 Instances, 1536 multiplexeurs et 1808 Expressions. Afin de réduire ces ressources, il est nécessaire de modifier la structure du code en insérant des directives d'optimisation offertes par l'outil de synthèse.

L'étape qui suivra consistera à vérifier que le code RTL fonctionne correctement. Si l'on sélectionne l'icône cosimulation du C/RTL dans la barre d'outils de Vivado, nous obtiendrons la figure IV-11.

Cette procédure est appelée cosimulation C/RTL car l'outil utilise le fichier test_bench pour générer les stimuli d'entrées. C'est pour cela que l'on a besoin de, au moins, deux fichiers pour faire cette étape, à savoir le fichier test_bench et la fonction de haut niveau.

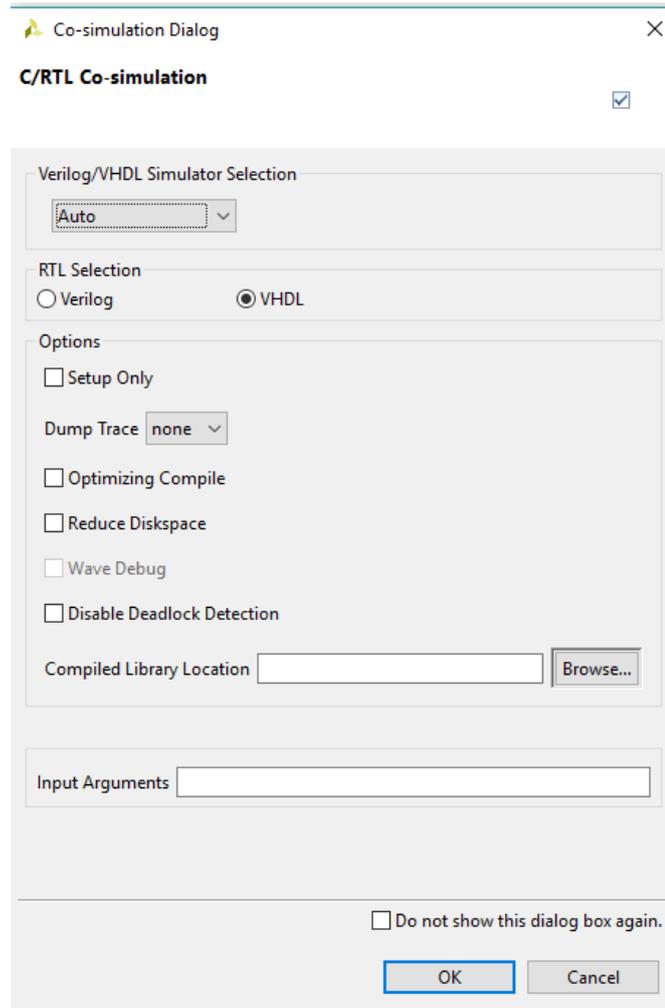


Figure IV-11 Validation du fonctionnement RTL de notre code.

L'étape finale consiste à exporter le fichier RTL de manière à en faire un IP-block. Nous avons opté pour un paquetage IP-Catalog. D'autres options sont disponibles quant au type de paquetage tel que le paquetage pour la génération système orienté DSP

Ceci fut fait, nous retrouvons l'option IP que nous avons sélectionnée en plus de deux directory VHDL et Verilog qui contiennent le design RTL destinées à des fins d'analyse. Si l'on veut utiliser notre code dans un grand projet, il sera question d'utiliser le paquetage IP. Voir la figure en bas.

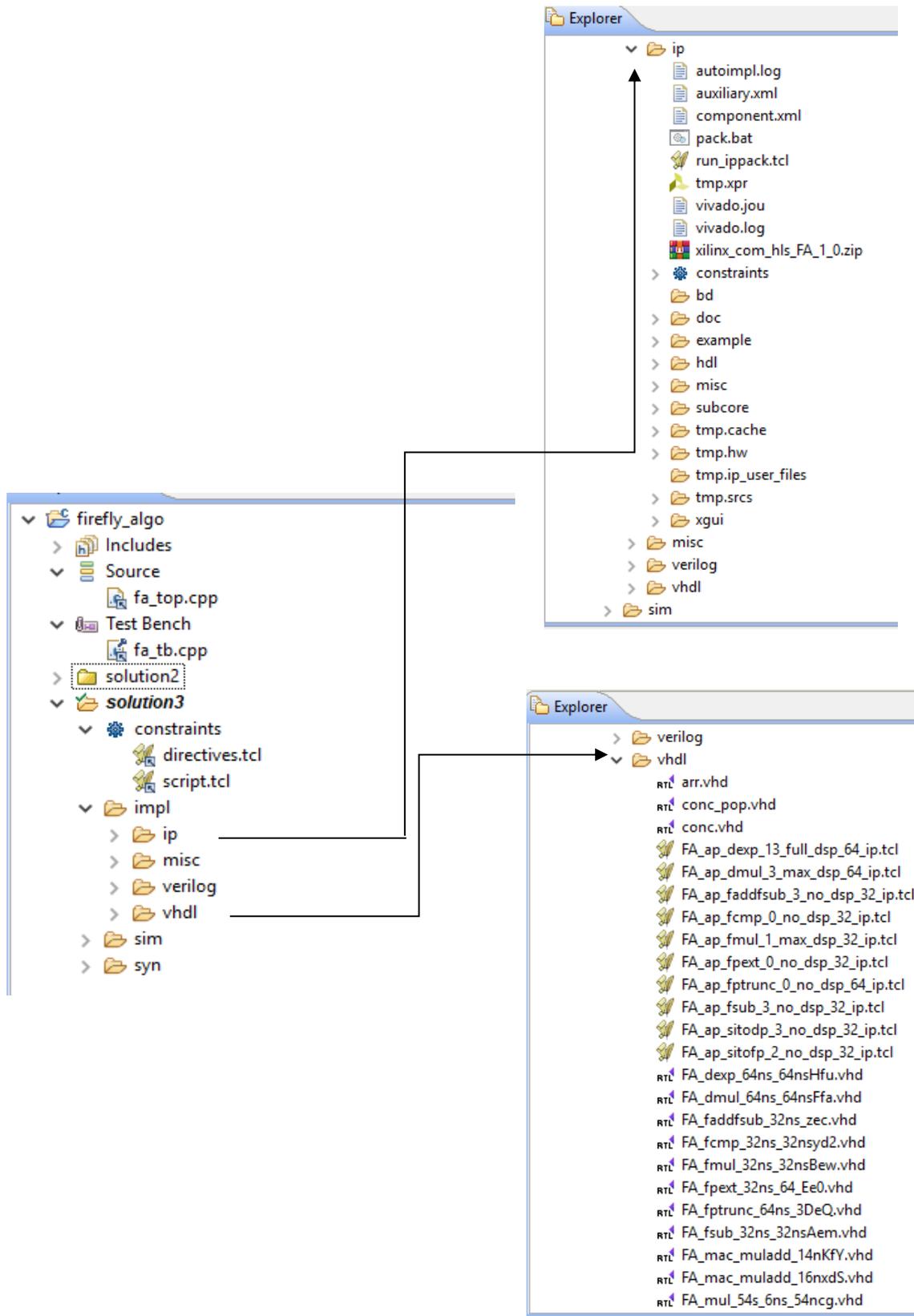


Figure IV-12 Validation du fonctionnement RTL de notre code.

IV.6 Proposition d'optimisation de l'algorithme

FA_ALGO_MPPT

Malgré le fait que notre algorithme propose des résultats de convergence satisfaisants, il n'en demeure pas moins qu'il comporte quelques points d'améliorations aussi bien sur l'aspect software que sur l'aspect hardware. Nous exposons les points que nous aurions aimé traités plus amplement lors de ce projet de fin d'étude qui seront d'excellents perspectives d'un autre projet s'inscrivant dans la continuité de ce PFE :

- 1- Dans des conditions d'ombrages partiels, les caractéristiques des panneaux photovoltaïques présentent de multiples points de puissance maximale (MPP). Des méthodes ont été proposées afin de localiser et estimer les maxima d'une courbe caractéristique [22]. La connaissance de ces optimums permettra une meilleure initialisation de la population, et par conséquent, la réduction du temps de convergence de l'algorithme.
- 2- L'approche que nous avons considérée lors de l'élaboration de notre algorithme consistait à maintenir les paramètres intrinsèques constants. En réalité, il est possible de mettre à jour ces paramètres lors de chaque itération. Cette méthode fut utilisée en [18] et a donné de bons résultats de convergence comparativement à une approche classique qui considère les paramètres d'intérêt constants.
- 3- Lors de la synthèse HLS, un code mal écrit ou pas du tout optimisé mobilise beaucoup de ressources d'une carte FPGA. Il existe des directives qui permettent l'optimisation d'un code en réduisant les ressources hardware utilisées (tel que les Look Up Tables ou les Flip Flop) en faisant appel à des artifices tel que les instructions concurrentes (un flow de données de type MIMD ou MISD) ou le pipelining [17].

IV.7 Conclusion

Durant ce chapitre, nous avons fait une introduction de l'outil HLS ainsi que ces avantages par rapport à la méthode conventionnelles. Nous avons aussi exposé les résultats de notre algorithme FA_ALGO_MPPT dans différents cas d'ombrage et comparé ces résultats avec celle l'approche software. Ensuite, nous avons généré un IP-catalog en utilisant la synthèse de haut niveau via l'outil Vivado. Enfin, nous avons évoqué quelques points à perfectionner sachant l'approche algorithmique pour laquelle nous avons opté et ce en se basant sur des méthodes et des articles scientifiques.

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

L'objectif de ce projet de fin d'étude est de contribuer à l'implémentation d'un algorithme bio-inspiré appliqué aux systèmes photovoltaïques dans la poursuite du point de puissance maximale (MPPT).

Après avoir expliqué les mécanismes, les principes de fonctionnement et les facteurs environnementaux qui influent sur le rendement énergétique des systèmes photovoltaïques, nous avons fait une introduction sur les méthodes et algorithmes qui permettent de solutionner les problématiques liées au pistage des points de puissance maximale. Parmi ces méthodes d'optimisation figurait des algorithmes bio-inspirés lesquels se base sur un mécanisme d'optimisation d'essaim.

Nous avons explicité les principes de base de l'algorithme des Lucioles et nous avons réussi à adapter cet algorithme dans le contexte des MPPT.

Pour valider l'adaptation de cet algorithme bio inspiré, nous l'avons implémenté selon deux approches : L'approche software à l'aide de Matlab et Simulink et hardware à l'aide de l'outil Vivado en utilisant le langage C/C++ suivi d'une synthèse HLS.

Durant l'implémentation software, nous avons validé l'algorithme des lucioles sachant le contexte MPPT dans le cas des systèmes photovoltaïques. Aussi nous avons dégager les paramètres qui maximiser l'efficacité de l'algorithme des lucioles et ce après plusieurs tests fait à l'aide de Matlab et Simulink. Après avoir sélectionné ses paramètres, nous avons soumis notre algorithme face à plusieurs changements climatiques pour évaluer sa robustesse.

Enfin, nous avons repris le principe de notre algorithme en langage C/C++. Identiquement à l'approche software, nous avons soumis notre algorithme hardware face à plusieurs cas d'ombrage pour tester sa capacité à s'adapter aux changements climatiques. Enfin, nous avons réussi à partir de notre code C/C++ de générer un IP-catalog selon l'approche HLS grâce à l'outil Vivado.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

[1] Titri, Sabrina, "Circuit reconfigurables pour la gestion de l'énergie dans les systèmes photovoltaïques". Thèse de Doctorat d'état, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, Algérie, 2018.

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

[3] M.Boukli-Hacene Omer. "Conception et Réalisation d'un Générateur Photovoltaïque Muni d'un Convertisseur MPPT pour une Meilleure Gestion Energétique". Mémoire de Magister Université de Tlemcen. Décembre 2011.

[4] Les caractéristiques électriques des cellules et des modules photovoltaïques. [En ligne]. [Consulté le 16 avril 2019]. Disponible sur <https://www.energieplus-lesite.be/index.php?id=16696>

[5] A. Issa. "An Improved Technique Based on Firefly Algorithm to Estimate the Parameters of the Photovoltaic Model". Iraqi Journal for Electrical and Electronic Engineering. (2016).

[6] H.K.F. Stanger, J.E. Lloyd., D.M. Hillis, "Phylogeny of North American fireflies (Coleoptera: Lampyridae)", Vol. 45, Issue 1, 2007, pp. 33-49.

[7] X.S Yang, "Nature-Inspired Metaheuristic Algorithms". Luniver Press, UK. 2008.

[8] X.S Yang, "Firefly algorithm for multimodal optimization in proceedings of the stochastic Algorithms", (SAGA 109) vol.5792, Oct.2009.

[9] X.S. Yang, "Firefly algorithm, stochastic test functions and design optimization", International Journal of Bio-Inspired computation, vol. 2, no. 2, pp. 78-84, 2010.

[10] X.S. Yang, "Firefly algorithm, levy flights and global optimization", in Research and Development in intelligent systems XXVI. Springer, 2010, pp.209-218

[11] Stanger-Hall, Kathrin F, James E. Lloyd and David M. Hillis. "Phylogeny of North American fireflies (Coleoptera: Lampyridae): implications for the evolution of light signals." *Molecular phylogenetics and evolution* 45 1 (2007): 33-49.

[12] A.Saoucha, N, K. Ghanem, and B. Benmammar. "On applying firefly algorithm for cognitive radio networks." Communications and Vehicular Technology in the Benelux (SCVT), 2014 IEEE 21st Symposium on. IEEE, 2014.

[13] Capor-Hrosik, Romana & Alihodzic, Adis & Tuba, Milan & Vukovic, Mirjana & Pikula, Milenko. "Firefly Algorithm for Constrained Optimization Problems", Proceedings of the 12th International Conference on Telecommunications and Informatics, WSEAS, Morgan State University, Baltimore, USA, (2013), pp. 139-144.

[14] Prabhneet kaur, Taranjot kaur, "A Comparative Study of Various Metaheuristic Algorithms", International Journal of Computer Science and Information Technologies, Vol. 5, Guru Teg Bahadur Institute of Technology, GGSIPU, New Delhi, (2014), 6701-6704.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

[15] S. E. Merzouk, "Problème de dimensionnement de lots et de livraisons : application au cas d'une chaîne logistique", Thèse de doctorat de l'Université de Technologie de Belfort Mont béliard et de l'Université de Franche-Comté, Novembre 2007.

[16] X.S Yang, "Nature-Inspired Metaheuristic Algorithms", 2nd Edition. Luniver Press.

[17] Vivado Design Suite User Guide - High-Level Synthesis, G902 (v2018.3) December 20, 2018.

[18] Y. M. Safarudin, A. Priyadi, M. H. Purnomo and M. Pujiantara, "Maximum power point tracking algorithm for photovoltaic system under partial shaded condition by means updating β firefly technique," 6th International Conference on Information Technology and Electrical Engineering (ICITEE), Yogyakarta, 2014, pp. 1-5.

[19] Alexis. Meilleurs Chargeurs Solaires et batteries solaires en 2018. [En ligne]. [Consulté le 30 mars 2019]. Disponible sur <https://www.insunwetrust.solar/blog/lifestyle/chargeurs-solaires/>

[20] Quentin Mauguit, Futura. Anatomie d'une cellule photovoltaïque. [En ligne]. [Consulté le 02 avril 2019]. Disponible sur <https://www.futura-sciences.com/planete/dossiers/developpement-durable-cellules-photovoltaiques-coeur-panneaux-solaires-1688/page/5/>

[21] components101. Boost Converter: Basics, Working, Design & Operation. [En ligne]. [Consulté le 04 avril 2019]. Disponible sur <https://components101.com/articles/boost-converter-basics-working-design>

[22] X. Li, H. Wen, Y. Du, L. Jiang, Y. Hu and W. Xiao, "A Novel Power Incremental GMPPT Method based on Modified Voltage Lines for Photovoltaic System," 2018 IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES), Chennai, India, 2018, pp. 1-5.

[23] Li, Guiqiang & Jin, Yi & Akram, Muhammad & Chen, Xiao & Ji, Jie. Application of bio-inspired algorithms in maximum power point tracking for PV systems under partial shading conditions – A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, (2018).

[24] R.Ramaprabha, V.Gothandaraman, et al," Maximum Power Point Tracking Using GA-Optimized ANN for Solar PV System", International Conference on Electrical Energy Systems, ICEES-2011, 264-268.

[25] Syafaruddin, E.Karatep,"Artificial Neural Network Polar Coordinated Fuzzy controller Based Maximum Power Point Tracking Under Partially Shaded Conditions", IET Renewable Power Generation, Vol.3, Issue:2, 2009, 239-253.

[26] A..M.Z Alabedin, EF.El-Saadany, et al, " Maximum Power Point Tracking for Photovoltaic System using Fuzzy Logic and Artificial Neural Networks", IEEE Power and Energy Society General Meeting,2011,1-9.

[27] F.Chekired, C.Larbes,et al, "FPGA Based Real time Simulation of ANFIS MPPT Controller for Photovoltaic Systems ", International Review on Modelling and Simulations ,IREMOS,2011,V.4,N°5,23612366.

[28] F.Chekired, C.Larbes, A.Mellit,"Comparative Study between two Intelligent MPPT Controller implemented on FPGA: Application for Photovoltaic Systems", International Journal for Sustainable Energy, DOI:10.1080/14786451.20120742896.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

[29] F.Belhachet,"Commande Neuro-Floue d'un Hacheur MPPT", Memoire de Magistere, Ecole National Polytechniques (ENP), Departement Electronique, Laboratoire des Dispositifs de Communications et de Conversion Photovoltaïque.(LDCCP), 2007.

[30] A.Hanif Halim, I.Ismail,"Bio Inspired Optimization Method: A Review", International journal of Artificial Intelligence, Vol.1, July 2014

[31] S.Binitha, S.Siva Sathya,"A Survey of Bio Inspired optimization Algorithms", International Journal of Soft Computing and Engineering, IJSCE, Vol.2, Issue-2, May 2012,137-150.

[32] M.Adly, A.H.Besher," A Meta Heuristics Search Algorithm as a Solution for Energy Transfer Maximization in Stand Alone Photovoltaic Systems", International Journal of Electrical Power and Energy Systems, Vol.51, 2013, 243-254.

[33] M. Adly, A.H. Besher, "An Optimized Fuzzy Maximum Power Point Tracker for Stand Alone Photovoltaic Systems: Ant Colony Approach", 7 IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA),2012, 113-119.

[34] L.Jiang, L.Douglas et al," A Novel Ant Colony Optimization Based MPPT for Photovoltaic Systems Under Partially Shaded Conditions", Energy and Buildings, Vol.58, 2013, 227-236.

[35] I.Kashif, Z.Salam, et al," A Deterministic Particle Swarm Optimization Maximum Power Point Tracker for Photovoltaic System Under Partial Shading Condition", IEEE Transaction on Power Electronics, Vol. 60, No.8, 2013, <http://ieeexplore.ieee.org> , DOI 10.1109/TIE.2012.2200223.

[36] I.Kashif, Z.Salam, et al,"An improved Partical Swarm Optimization PSO Based MPPT for PV with Reduced Steady state Oscillation", IEEE Transaction on Power Electronics, Vol.27, Issu 8, 2012, 3627-3638.

[37] M.Miyatake, F.Torium, et al," Maximum Power Point Tracking of Multiple PV Arrays: A PSO Approach", IEEE Ttransactions on Aerospace and Electronic Systems , Vol.47, Issu 1, 2011, ,367-380.

[38] H.Renaudineau, F.Donatantonio, J.Fontchastagner, G.Petrone, G.Martin,bet al,"A PSO based Global MPPT Technique for Distributed PV Power Generation", IEEE Trans Ind Electron 2015,62:1047-58.

[39] A.S.Benyoucef, A.Chouder, et al," Artificial Bee Colony Based Algorithm for Maximum Power Point Tracking for PV Systems Operating Under Partial Shaded Conditions", Applied Soft Computing, Vol. 32, 2015,38-48

[40] B.Bilal, "Implementation of Artificial Bee Colony Algorithm on MPPT for PV modules", 8th International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering, ATEE Bucharest, Romania,23-25 May,2013

[41] A. S.Oshaba , E. S. Ali and S. M. Abd Elazim," Artificial Bee Colony Algorithm Based Maximum Power Point Tracking in Photovoltaic System", WSEAS TRANSACTIONS on POWER SYSTEMS, Volume 10, 2015,123-134. E-ISSN: 2224-350X

[42] H.Salmi, A.Badri ,M.Zegrari, Maximum Power Point Tracking (MPPT) Using Artificial Bee Colony Based Algorithm for Photovoltaic System, International Journal of Intelligent Information Systems,Volume 5, Issue 1, February 2016, 1-4.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

[43] J.Ahmed, Zainal Salam "A Soft Computing MPPT for PV systems Based on Cuckoo Search Algorithm", 4 International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives, (POWERENG), 13-17 May 2013, 558-562. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.12.062>

[44] B. Prasad Bhavana .M A. Chitra," Implementation of MPPT Algorithm Using Firefly Technique for Solar Photovoltaic Systems", International Journal for Scientific Research & Development, Vol. 3, Issue 02, 2015.

[45] K.Sundareswran, P.Sankar, S.Palani,"MPPT for PV System under Partial Shaded Conditions through a Colony of Flashing Fireflies", IEEE Trans Energy Convers 2014:29(2):1-10.

[46] A.S.Oshaba, E.S.Ali, et al, "MPPT Control Design of PV System Supplied SRM using BAT Search Algorithm" Sustainable Energy Grids and Networks, Vol 2, 2015, 51-60.

[47] J.Prasanth Ram,N.Rajasekar,"A new Global Maximum Power Point Tracking for Solar Photovoltaic (PV) system under partial shading conditions (PSC)",Energy,2016,1-14, <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2016.10.084>.

[48] W.Hou,Y.Jin,C.Zhu,G.Li,"A novel maximum power point tracking algorithm based on Glowworm Swarm Optimization for photovoltaic systems", International journal of photoenergy,Vol.2016,ID.4910862, <http://dx.doi.org/10.1155/2016/4910862>.

[49] S.Mohanty,B.Subudhi,P.Kumar,"A new MPPT design using Grey Wolf Optimization Technique for photovoltaic system under Partial Shading Conditions", IEEE. Trans on Sustainable,Vol.7,Issue.1,181-188, DOI: 10.1109/TSTE.2015.2482120

[50] K.H.Chao, M.C.Wu,"Global Maximum Power Point Tracking (MPPT) of a photovoltaic Module Array Constructed through Improved Teaching Learning Based Optimization",Energy,2016,9,986,DOI:10.3390/en9120986.

[51] R.sridhar,S.Jeevanantha,S.Dash,P.Vishnuram,"A New maximum power point tracking in PV System during partially shaded conditions based on Shuffled Frog Leapa Algorithm", International Journal of Ambient Energy2016,1-13,<http://dx.doi.org/10.1080/0952813X.2016.1186750>