

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Saad Dahlab Blida 1

N° D'ordre :



Faculté des sciences

Département d'informatique

Mémoire Présenté par :

BOUCHAITA Abdelhak TISSELI Youcef

En vue d'obtenir le diplôme de master

Domaine : Mathématique et informatique

Filière : Informatique

Spécialité : Informatique

Option : Ingénierie de logiciels

Sujet : contribution à l'optimisation de la puissance dans un système photovoltaïque par un algorithme intelligent

Soutenu le : 26 / 06/2016

Devant le jury :

Mme S. AROUSSI.	Présidente
Mme L.OUAHRANI	Examinatrice
Mr Y.DJENNOURI	Promoteur
Mme S.TITRI	Encadreuse

Promotion : 2015/2016

Remerciements

Grâce à Dieu, nous avons abouti à la concrétisation de ce travail.

En préambule à ce mémoire, nous souhaiterons adresser nos remerciements les plus sincères aux personnes qui nous ont apporté leur aide et qui ont contribué à l'élaboration de ce mémoire ainsi qu'à la réussite de cette formidable année universitaire.

Que notre promoteur Mr DJENNOURI pour avoir accepté de nous encadrer tout au long de ce travail, pour son amabilité, sa disponibilité, son aide, ses conseils et suggestions et le temps qu'elle a bien voulu nous consacré malgré ses charges académiques et professionnelles.

On remercie infiniment Mme TITRI notre encadreuse pour son aide, sa patience et son attention durant cette année, on la remercie de nous avoir fait confiance et pour les informations très utiles qu'il a mis à notre disposition et on lui souhaite tout le bonheur et la prospérité.

Nos remerciements s'adressent également au Centre de développement des technologies avancées (CDTA) pour nous avoir donné l'opportunité d'effectuer un stage au cours de notre dernière année en cycle de Master.

Que tout enseignant nous ayant fait bénéficier de son savoir durant tout notre cursus universitaire, trouve ici l'expression de notre profonde gratitude.

Nous n'oublions pas nos familles, et spécialement nos parents pour leur contribution, leur soutien et leur patience.

Enfin, nous ne saurons oublier dans ces remerciements tous ceux qui nous ont aidé pour mener à bien ce travail dans de bonnes conditions.

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail

À mes très chers parents que Dieu les garde

En témoignage de ma profonde gratitude et mon incontestable reconnaissance, pour leurs sacrifices, leur confiance qu'ils m'accordent et tout l'amour dont ils m'entourent.

À mes frères « Kamel », « Mohamed », « Khaled » et « Abdelaziz ».

À toute ma famille.

À mon binôme Youcef.

Et à tout ceux qui me sont chers.

Que Dieu vous garde.

B.Abdelhak

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail

À mes très chers parents que Dieu les garde

En témoignage de ma profonde gratitude et mon incontestable reconnaissance, pour leurs sacrifices, leur confiance qu'ils m'accordent et tout l'amour dont ils m'entourent.

À ma petite sœur « Bouchra ».

À mes sœurs « Fatma Zohra » et « Khadidja » mon frère « Khaled ».

À toute ma famille.

À mon binôme Abdelhak.

Et à tout ceux qui me sont chers.

Que Dieu vous garde.

T.Youcef

ملخص:

تصميم، وتحسين وتنفيذ النظم الكهربائية الضوئية لا يزال من المشاكل الحالية. وترتبط المشكلة الكبرى للباحثين بسلسلة التحويل الكهربائية، والتي لديها الكثير من الخسائر في استخدام غير مناسب.

للتغلب على هذه المشكلة، نوقشت عدة نهج لتطوير خوارزميات باستخدامها لضمان الأداء الأمثل من هذه الأخيرة، النهج القائمة على الذكاء الاصطناعي مثل الرقابة على أساس الشبكات العصبية، الخوارزميات الوراثية، المنطق الضبابي وقد وضعت وتستخدم بشكل متزايد على حساب النهج التقليدية. ومع ذلك، فإن التحدي الحالي هو العثور على واحدة توفر أداء أفضل بالنسبة لمتطلبات السوق، الأمر الذي يتطلب إيجاد حلول أكثر فعالية.

في هذا السياق، وتركز على مساهمة الطلاب في هذا المشروع على المساهمة في تطوير منصة لمحاكاة واختبار لأوامر مختلفة في تتبع نقطة الطاقة القصوى في ظل ظروف مناخية مختلفة، ونماذج مختلفة من ألواح الخلايا الشمسية والطبولوجيا الحالية مختلفة. والواقع أن الحاجة إلى مثل هذا المنبر وبدافع من حقيقة أن معظم المنصات القائمة على المحاكاة ليست مجانية، وأكثر حداثة لاختبار عنصر التحكم في تتبع نقطة الطاقة القصوى.

فإن المنصة تسمح للمصممين بالاختبار والتحقق من صحة ومقارنة أداء تتبع نقطة الطاقة القصوى والتحكم لتحسين أداء النظم الكهربائية الضوئية.

Résumé :

La conception, l'optimisation et la réalisation des systèmes photovoltaïques demeure toujours des problèmes d'actualités. Le problème majeur auquel se penchent les chercheurs est lié à la chaîne de conversion électrique, qui présente beaucoup de pertes lors d'une utilisation mal adaptée.

Afin de palier à ce problème, plusieurs approches ont été abordées pour élaborer des algorithmes optimisés qui servent à garantir l'optimisation des performances de ces derniers. Les approches basées sur l'intelligence artificielle tel que les commandes à base de Réseaux de Neurones, Algorithmes Génétiques, Logique Floue, Neurone Floue,... ont été développées et sont de plus en plus utilisées au dépend des approches classiques. Cependant la difficulté actuelle est de trouver celle qui fournit le meilleur rendement par rapport aux exigences du marché, qui exige de plus en plus de solutions efficaces.

Dans le contexte de notre travail, nous proposons une nouvelle commande ou ce projet est centré sur une contribution à l'élaboration d'une plateforme de simulations et tests pour les différentes commandes MPPT sous différentes conditions climatiques, différents modèles de panneaux photovoltaïques ainsi que les différentes topologies existantes. En effet, le besoin d'une telle plateforme est motivé par le fait que la plupart des plateformes de simulations existantes ne sont pas gratuites, de plus, ces dernières ne sont pas destinées aux test des commandes MPPT (Poursuit de point du puissance maximale) .

La plateforme permettra aux concepteurs de tester, valider et comparer les performances des commandes MPPT afin d'optimiser au maximum les performances des systèmes photovoltaïque.

Mots clés :

Photovoltaïque, GPV, MPPT, MPP, P&O, métaheuristique, BAT, simulation, Matlab/Simulink, Qt .

Abstract

The design, optimization and implementation of photovoltaic systems is still a current problems. The major problem the researchers favor is linked to electrical conversion chains, which has a lot of losses in an unsuitable use.

To overcome this problem, several approaches were discussed to develop optimized algorithms used to ensure performance optimization of these. Approaches based on artificial intelligence as the basis for control Neural Networks, Genetic Algorithms, Fuzzy Logic, Fuzzy Neuron.... have been developed and are increasingly used at the expense of conventional approaches. However, the current challenge is to find one that provides the best performance relative to market requirements, which requires more effective solutions.

In this context, the contribution of the students in this project is focused on contributing to the development of a platform of simulation and test for different commands MPPT under different climatic conditions, different models of photovoltaic panels and the different existing topologies. Indeed, the need for such a platform is motivated by the fact that most existing platforms simulations are not free, more recent is not intended to test the MPPT control.

The platform will allow designers to test, validate and compare the performance of MPPT controls to fully optimize the performance of photovoltaic systems.

Keywords :

Photovoltaic, GPV, MPPT, MPP, P&O, metaheuristic, BAT, simulation, Matlab/Simulink, Qt.

Abréviation :

PV : Photovoltaïque.

SPV : Système Photovoltaïque.

GPV : Générateur Photovoltaïque.

DC-DC : Direct courant –Directe courant.

BA : Algorithme de chauve-souris, « Bat Algorithm ».

MPP : Point de fonctionnement optimal.

MPPT : Poursuite du Point de Puissance Maximale, « Maximum Power Point Tracking ».

P&O : Perturb & Observe.

IC : Incrémental conductance.

SCC : Short Circuit.

OCV : Open Circuit Voltage.

IA : Intelligence Artificielle.

ANN : réseaux de nuerons.

FL : Logique floue.

IncCond : Incremental conductance.

ESC : Extremum recherche méthode.

MOBA : Multi Objectif Bat Algorithm.

DABA : algorithme de bat artificiel.

BBA : Algorithme de bat binaire.

PSO : Particle Swarm Optimisation.

MATLAB : Matrix Laboratory.

Listes des figures :

- p.4 Figure 1.1 : Schéma synoptique d'un système photovoltaïque.
- p.6 Figure 1.2 : Schéma équivalent électrique d'une cellule PV.
- p.7 Figure 1.3 : Courbe $i=f(v)$ d'un panneau photovoltaïque.
- p.7 Figure 1.4 : L'influence de l'éclairement sur la caractéristique $I=f(V)$.
- p.8 Figure 1.5 : L'influence de l'éclairement sur la caractéristique $P=f(V)$.
- p.9 Figure 1.6 : Influence de la température sur la caractéristique $I=f(V)$.
- p.9 Figure 1.7 : L'influence de la température sur la caractéristique.
- p.11 Figure 1.8 : Convertisseur DC-DC.
- p.13 Figure 1.9 : Caractéristique résultante d'un groupement en série de n_s cellules identiques.
- p.14 Figure 1.10 : Caractéristique résultante d'un groupement constitué de n_p cellules identiques en parallèle.
- p.14 Figure 1.11 : Caractéristique résultante d'un groupement constitué de n_p cellules identiques en série-parallèle.
- p.16 Figure 2.1 : Courbe caractéristique de puissance d'un GPV.
- p.18 Figure 2.2 : L'organigramme de la méthode OCV(ou SCC).
- p.21 Figure 2.3 : Le neurone de base.
- p.22 Figure 2.4 : Diagramme de flux Système d'inférence floue.
- p.24 Figure 2.5 : L'organigramme de la méthode P&O.
- p.25 Figure 2.6 : Schéma synoptique illustrant le procédé ESC mis en œuvre dans un SPV.
- p.28 Figure 2.7 : L'organigramme de la méthode IncCond.
- p.29 Figure 2.8 : La description générale de la méthode hybride.
- p.34 Figure 3.1 : Représentation schématique des capacités fascinantes de chauve-souris.
- p.38 Figure 3.2 : Organigramme d'algorithme de recherche BAT.
- p.39 Figure 3.3 : BA: Phase de la recherche du MPP.
- p.41 Figure 3.4 : BA : Phase d'initialisation.
- p.43 Figure 3.5 : Schéma représente la phase de la recherche de MPP.
- p.43 Figure 3.4 : BA: Phase de la surveillance des changements climatiques.
- p.47 Figure 4.1 : L'interface d'onglet de simulation.
- p.47 Figure 4.2 : L'interface d'onglet de comparaison.
- p.48 Figure 4.3 : Schéma du système PV en Matlab/Simulink.
- p.48 Figure 4.4: Schéma de la commande MPPT en Matlab/Simulink.

- p.50 Figure 4.5 : Résultat de simulation de la poursuite du point MPP avec la commande BAT.
- p.50 Figure 4.6: variation de la puissance dans des conditions standards $E= 1000\text{W/m}^2$ et $T=25^\circ$.
- p.51 Figure 4.7 : variation de la puissance avec des conditions standards $E= 1000\text{W/m}^2$ et $T=25^\circ$.
- p.51 Figure 4.8 : variation des méthodes MPPT BAT et P&O aux des conditions standards de l'éclairement et de la température $E=1000\text{W/m}^2$, $T=25^\circ$.
- p.52 Figure 4.9 : temps d'exécution des méthodes BAT et P&O.
- p.52 Figure 4.10 : signal du changement de l'éclairement de 500W/m^2 à 1000W/m^2 .
- p.53 Figure 4.11 : variation des méthodes MPPT BAT et P&O selon l'augmentation rapide de l'éclairement de 500W/m^2 à 1000W/m^2 .
- p.54 Figure 4.12 : signal du changement de l'éclairement de 1000W/m^2 à 500W/m^2 .
- p.54 Figure 4.13 : variation des méthodes MPPT BAT et P&O selon la diminution rapide de l'éclairement de 1000W/m^2 à 500W/m^2 .
- p.55 Figure 4.14 : signal du changement de l'éclairement de 500W/m^2 à 1000W/m^2 avec un temps de transition $t=5\text{s}$.
- p.56 Figure 4.15 : variation des méthodes MPPT BAT et P&O selon l'augmentation rapide de l'éclairement de 1000W/m^2 à 500W/m^2 .
- p.56 Figure 4.16 : signal de la diminution de l'éclairement de 1000W/m^2 à 500W/m^2 avec un temps de transition $t=5\text{s}$.
- p.57 Figure 4.17 : variation des méthodes MPPT BAT et P&O selon la diminution rapide de l'éclairement de 1000W/m^2 à 500W/m^2 avec une transition de $t=5\text{s}$.
- p.57 Figure 4.18 : variation des méthodes MPPT BAT selon l'augmentation rapide de la température de $T=5^\circ$ à $T=40^\circ$ avec une transition de $t=5\text{s}$.
- p.58 Figure 4.19 : variation des méthodes MPPT BAT et P&O selon la diminution rapide de la température de $T=25^\circ$ à $T=5^\circ$.

Tables des matières

Introduction générale	1
Problématique et objectif	2
Première partie : Etat de l'art	3
Chapitre 1 : Technologie photovoltaïque	3
1. Introduction	3
2. Généralités sur les systèmes photovoltaïques	3
2.1. Les différents types des systèmes photovoltaïques	4
3. Electricité photovoltaïque	5
3.1. La cellule photovoltaïque	5
3.2. Le générateur photovoltaïque	6
3.3. Effets des variations climatiques	7
3.4. Le principe de conversion dans les systèmes pv	10
3.5. Les topologies	12
4. Avantages et Inconvénients de l'énergie pv	14
5. Conclusion	15
Chapitre 2 : Les commandes MPPT	16
1. Introduction	16
2. Généralités sur les commandes MPPT	16
3. Les méthodes MPPT proposées	17
3.1. Les méthodes offlines	17
3.2. Les méthodes en ligne	22
3.3. Les méthodes hybrides	29
4. Conclusion.....	31
Deuxième partie : Etude conceptuelle	33
Chapitre 3 : Conception	33
1. Introduction	33
2. Aperçu sur l'algorithme de recherche BAT	33

2.1. Comportement naturel	34
2.2. Comportement algorithmique	35
3. Conception de l'algorithme	39
3.1. Description de l'algorithme BAT proposé	39
4. Conclusion	44
Troisième partie : Implémentation et évaluation	45
Chapitre 4 : Implémentation et évaluation	45
1. Introduction	45
2. L'environnement de simulation et de développement	45
2.1. L'environnement de simulation Matlab/Simulink	45
2.2. L'environnement de développement Qt Creator	46
3. Plateforme de simulation	46
3.1. Présentation de la plateforme	46
4. Simulation du système photovoltaïque	48
4.1. Evaluation des performances de la commande MPPT	49
4.2. Précision, Stabilité, robustesse	52
5. Conclusion	58
Conclusion générale	59
Bibliographie	60

Introduction générale :

La production d'énergie est un défi de grande importance pour les années à venir. En effet, les besoins énergétiques des sociétés ne cessent d'augmenter. De plus, les pays en voie de développement auront besoin de plus en plus d'énergie pour mener à bien leur développement.

De ce fait, à l'ère du développement durable, les énergies renouvelables, tels que les énergies issus du soleil, du vent, de la chaleur de la terre, de l'eau ou encore la biomasse sont des énergies à ressources illimitées. Parmi toutes les sources d'énergies renouvelables citées, l'énergie solaire a un intérêt particulier en raison de son abondance et de son potentiel en tant que source d'énergie propre et renouvelable.

L'énergie solaire photovoltaïque provient de la transformation directe d'une partie du rayonnement solaire en énergie électrique par le biais d'une cellule photovoltaïque basé sur le phénomène photovoltaïque.

L'association de plusieurs cellules photovoltaïque donne un générateur photovoltaïque. Ce dernier présente une caractéristique courant-tension (I-V) non linéaire possédant un point de puissance max (MPP) qui dépend de l'ensoleillement et de la température de la cellule.

De ce fait, afin d'extraire le max de puissance disponible aux borne du Générateur photovoltaïque, les systèmes photovoltaïque utilisent des contrôleurs MPPT (Max Power Point Tracking). Ces derniers utilisent des algorithmes de poursuite du point maximal (MPP) correspondant à un taux de conversion maximal indépendamment des conditions climatiques.

Problématique et objectif :

- **Problématique :**

La problématique traitée dans ce chapitre porte sur l'utilisation d'une approche intelligente dans un problème de poursuite de MPP. Le problème étudié est plus connu sous l'intitulé «Problèmes d'optimisation continue». En conséquence, si des approches de résolution exactes peuvent être utilisées dans le but de résoudre de façon optimale les plus petits problèmes du MPPT, elles sont en revanche incapables de traiter des problèmes de taille réaliste. Cela justifie en soit la nécessité de développer des heuristiques permettant d'obtenir des solutions de qualité à ce genre de problèmes.

- **Objectif :**

Dans ce travail, nous développons une méthode intelligente et innovante, ayant pour objet la poursuite du MPP ainsi que l'amélioration des réponses obtenues avec les algorithmes classiques déjà développés, avec une nouvelle commande MPPT en deux facteurs essentiels (la diminution du temps d'exécution de l'algorithme et avoir une qualité de résultat très compétitif) quelque soit la variation des conditions climatiques (ensoleillement, température,.....etc.) même dans les cas les plus défavorables.

Dans ce mémoire, nous nous intéressons d'une part à la contribution pour l'optimisation de puissance dans les systèmes photovoltaïques par l'élaboration d'une nouvelle méthode MPPT basée sur l'algorithme de la chauve-souris, d'autre part, nous avons œuvré à amélioration des performances de plateforme de test existant au niveau du CDTA, permettant de valider et de comparer les différents algorithmes MPPT existants.

Notre mémoire est organisé en quatre chapitres

Concernant l'état de l'art, dans le 1^{er} chapitre, nous avons présentés les concepts de base liés aux domaines photovoltaïques.

Le chapitre 2 est une introduction à la commande MPPT dans les systèmes photovoltaïque.

Nous exposons des commandes proposées avec ses avantages et inconvénients.

Le chapitre 3 est une proposition et conception d'une nouvelle commande MPPT pour les systèmes photovoltaïque.

Le chapitre 4 comporte deux parties, l'implémentation et l'évaluation de notre commande. La partie d'implémentation présente l'environnement de simulation Matlab/Simulink et les différents schémas de notre simulation. La partie évaluation est une présentation et interprétation des résultats obtenus par simulation. Ainsi, une étude comparative de notre commande avec les commandes existantes.



Chapitre 1

Technologie photovoltaïque

1. Introduction :

Avec le développement industriel, le problème de l'insuffisance d'énergie est de plus en plus aggravant. Les technologies du système photovoltaïque se développent rapidement et ont un rôle croissant dans la technologie électrique et se considère comme l'énergie verte du nouveau siècle. Actuellement, des travaux sont réalisés sur les cellules (ou modules) et sur les systèmes PV afin d'améliorer les performances électriques des panneaux PV et réduire les pertes d'énergies dans les installations PV. Ceci réduit considérablement le coût des installations PV et encourage les citoyens à utiliser l'énergie verte.

Dans ce chapitre, nous allons nous intéresser au système photovoltaïque, en commençant par une généralité sur ce système. Ensuite, nous allons présenter ses différents composants ainsi ses performances.

2. Généralités sur les systèmes photovoltaïques :

Pour qu'un module photovoltaïque fonctionne dans les conditions optimales, il doit être doté d'un quadripôle d'adaptation qui est un convertisseur d'énergie DC-DC. Cette adaptation se réalise en cherchant de façon automatique le PPM du panneau PV [1].

La figure 1.1 représente le schéma synoptique du système PV qui comprend les blocs suivants:

- Un générateur photovoltaïque GPV est utilisé pour désigner, selon l'application considérée, un module ou un panneau PV [2].
- Un quadripôle d'adaptation, qui est un convertisseur d'énergie DC-DC de type 'boost' pour des applications nécessitant des tensions supérieures à celle optimales [6]. Les éléments constituant ce quadripôle (Inductance L, capacités Ce et Cs, diode de roue libre DI, transistor MOSFET) sont dimensionnés pour que le convertisseur fonctionne à une fréquence de hachage de 10 kHz.
- Une commande MPPT numérique permettant de suivre le PPM du panneau PV [20], par variation automatique du rapport cyclique du signal commandant l'interrupteur du convertisseur.

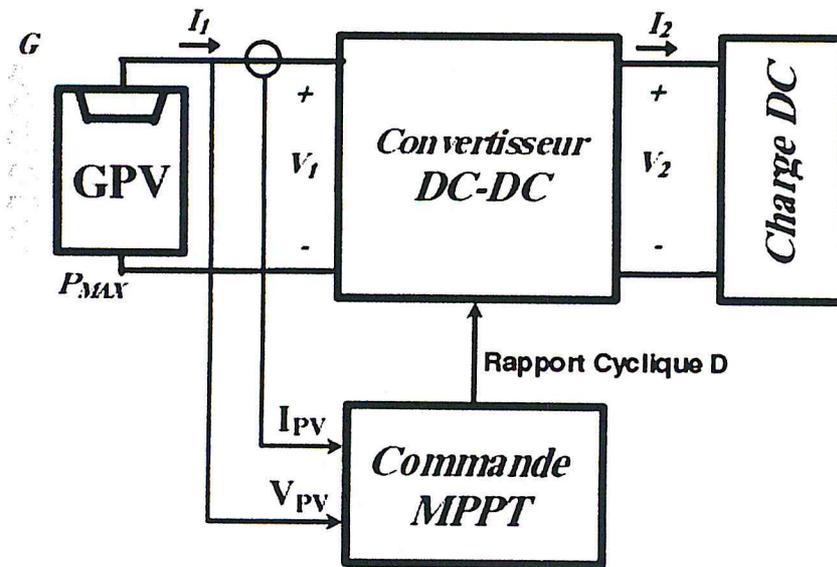


Figure 1.1 : Schéma synoptique d'un système photovoltaïque [3].

2.1 Les Différents Types de Systèmes Photovoltaïques :

2.1.1 Alimentations électriques faibles puissances :

Il s'agit des alimentations électriques faibles telles que les cauculettes ou les chargeurs de piles. Des modules photovoltaïques (PV) peuvent faire fonctionner n'importe quel appareil alimenté par des piles [23].

2.1.2 Installations électriques photovoltaïques autonomes :

En site isolé, le champ photovoltaïque peut fournir directement l'énergie électrique nécessaire pour faire fonctionner les récepteurs (éclairage et équipement domestique). Un système dérégulation et une batterie d'accumulateurs permettent de stocker l'énergie électrique qui sera ensuite utilisée en l'absence du Soleil. Les batteries sont utilisées pour stocker l'énergie électrique sous une forme chimique. Elles restituent l'énergie électrique au besoin selon ses caractéristiques. Le régulateur de charge a pour fonction principale de protéger la batterie contre les surcharges et les décharges profondes. Il est un élément essentiel pour la durée de vie de la batterie. En site isolé, on peut aussi utiliser des récepteurs fonctionnant en courant alternatif. Dans ce cas, l'installation comprendra un onduleur. On peut citer quelques exemples de systèmes autonomes, comme les balises en mer, les lampadaires urbains, le pompage solaire et les maisons en sites isolés.

La majorité des populations à l'écart des réseaux électriques vit dans des zones rurales, où l'implantation de tels réseaux est difficile, pour des raisons d'accès ou de moyens. Les systèmes photovoltaïques constituent alors une option intéressante, ils donnent aux populations un accès à l'électricité avec un coût, une maintenance et des difficultés de mise en œuvre réduits [25].

2.1.3 Installations ou centrales électriques photovoltaïques raccordées au réseau :

Un générateur photovoltaïque connecté au réseau n'a pas besoin de stockage d'énergie et élimine donc le maillon le plus problématique (et le plus cher) d'une installation autonome. C'est en fait le réseau dans son ensemble qui sert de réservoir d'énergie. Deux compteurs d'énergie sont nécessaires : un compteur comptabilise l'énergie achetée au fournisseur d'énergie et un autre compteur mesure l'énergie renvoyée sur le réseau électrique lorsque la production dépasse la consommation.

Un troisième compteur est ajouté dans le cas où l'énergie produite est injectée en intégralité dans le réseau (compteur de non-consommation).

2.1.4 Installations ou centrale électriques photovoltaïques hybride :

Il s'agit de systèmes qui regroupent des sources d'énergie de nature différentes telle une installation éolienne, un générateur diesel ou une centrale de cogénération en plus du générateur photovoltaïque.

Ce type d'installation est utilisé lorsque le générateur photovoltaïque seul ne couvre pas toute l'énergie requise [25].

3. Electricité photovoltaïque :

3.1. La Cellule Photovoltaïque :

Une cellule photovoltaïque est constituée par un matériau semi-conducteur de type P-N. La taille de chaque cellule va de quelques centimètres carrés jusqu'à 100 cm ou plus [26]. Sa forme est circulaire, carrée ou dérivée des deux géométries. Les cellules se branchent en série, ce qui permet aux électrons générés par une cellule d'être repris par la suivante. Le but est d'avoir une différence de potentiel normalement entre 6 et 24 V.

Chaque cellule peut être modélisée par le schéma électrique équivalent :

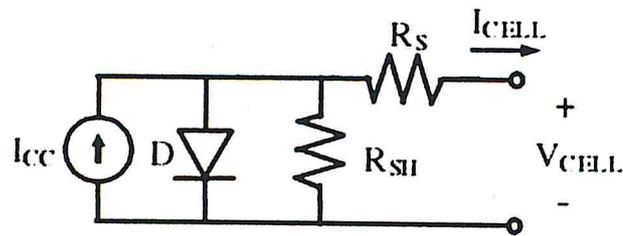


Figure 1.2 : Schéma équivalent électrique d'une cellule PV [3].

Les résistances R_s et R_{sh} permettent de tenir en compte des pertes liées aux défauts de fabrication. R_s représente les diverses résistances de contact et de connexion tandis que R_{sh} caractérise les courants de fuite dus à diode et aux effets de bord de la jonction.

On distingue 4 types de cellule qui sont : [2]

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

3.2 Le Générateur PV et ses Performances :

Un générateur photovoltaïque ou module est constitué d'un ensemble de cellules photovoltaïques élémentaires montées en série et/ou parallèle afin d'obtenir des caractéristiques électriques désirées tels que la puissance, le courant de court-circuit ou la tension en circuit ouvert [27].

3.2.1 Caractéristique Courant-Tension :

La figure ci-dessous représente la courbe $i=f(v)$ d'un panneau photovoltaïque typique dans des conditions constantes d'irradiation et de température

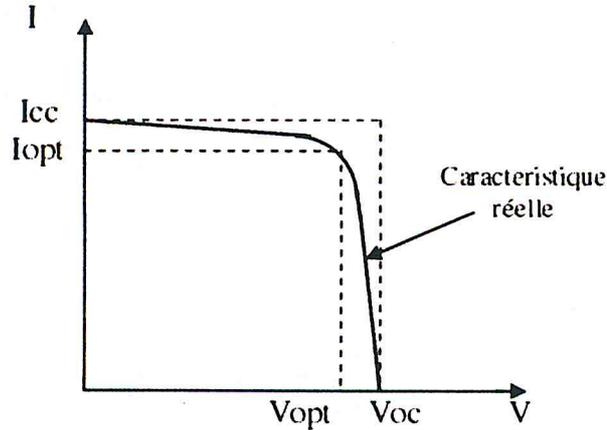


Figure 1.3 : Courbe $i=f(v)$ d'un panneau photovoltaïque [26].

Il est difficile de donner un caractère source de courant ou de tension à un module photovoltaïque sur toute l'étendue de la caractéristique courant-tension. Par conséquent, le module photovoltaïque est considéré comme une source de puissance avec un point P_m où la puissance se trouve être maximale. Il est donc intéressant de se placer sur ce point pour tirer le maximum d'énergie et ainsi exploiter au mieux la puissance installée.

Il est important de noter que certains régulateurs solaires réalisent une adaptation d'impédance afin qu'à chaque instant on se trouve proche de ce point P_m .

3.3. Effets des variations climatiques :

➤ Influence de l'Éclairement

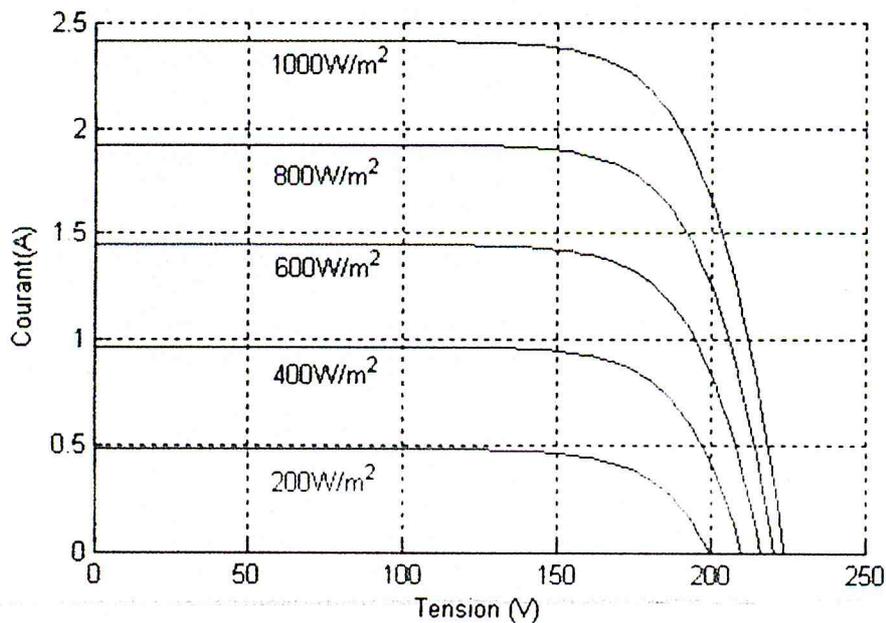


Figure 1.4 : L'influence de l'éclairement sur la caractéristique $I=f(V)$ [27].

On remarque que la valeur du courant de court-circuit est directement proportionnelle à l'intensité du rayonnement. Par contre, la tension en circuit ouvert ne varie pas dans les mêmes proportions, elle reste quasiment identique même à faible éclairement.

L'irradiation standard, internationalement acceptée, pour mesurer la réponse des panneaux photovoltaïques est une intensité rayonnante de 1000 W/m^2 et une température de $25 \text{ }^\circ\text{C}$ [4-5].

La figure 1.5 illustre la variation de la puissance délivrée par le générateur en fonction de la tension pour différentes valeurs d'éclairement, ce qui nous permet de déduire l'influence de l'éclairement sur la caractéristique $P(V)$ [5].

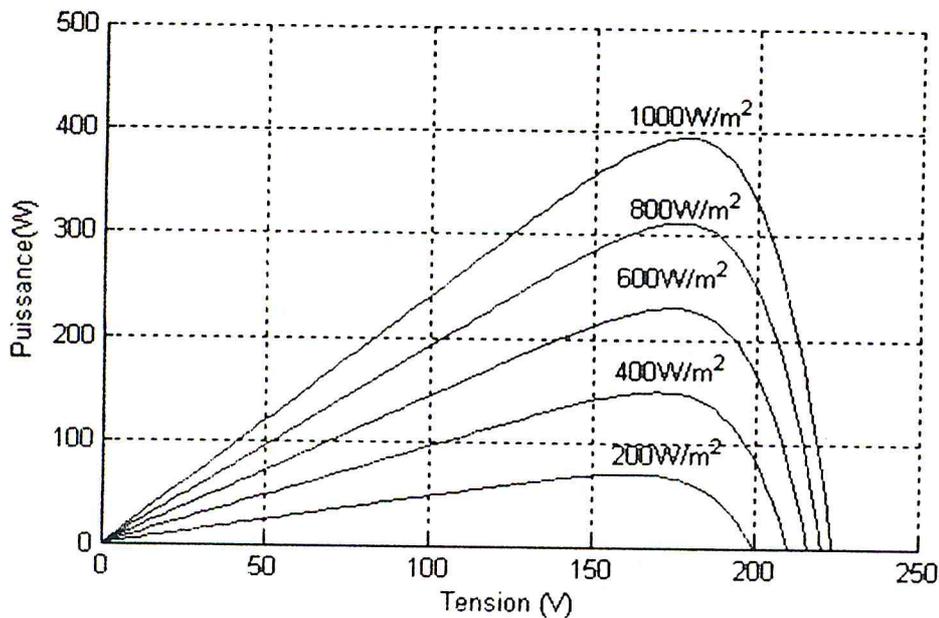


Figure 1.5 : L'influence de l'éclairement sur la caractéristique $P=f(V)$ [27].

➤ Influence de la Température

On remarque que la température a une influence négligeable sur la valeur du courant de court-circuit. Par contre, la tension en circuit ouvert baisse assez fortement lorsque la température augmente, par conséquent la puissance extractible diminue [5]. Lors du dimensionnement d'une installation, la variation de la température du site sera impérativement à prendre en compte.

Il est important de savoir que la puissance du panneau diminue environ de 0,5% par chaque degré d'augmentation de la température de la cellule au dessus de 25 °C [4].

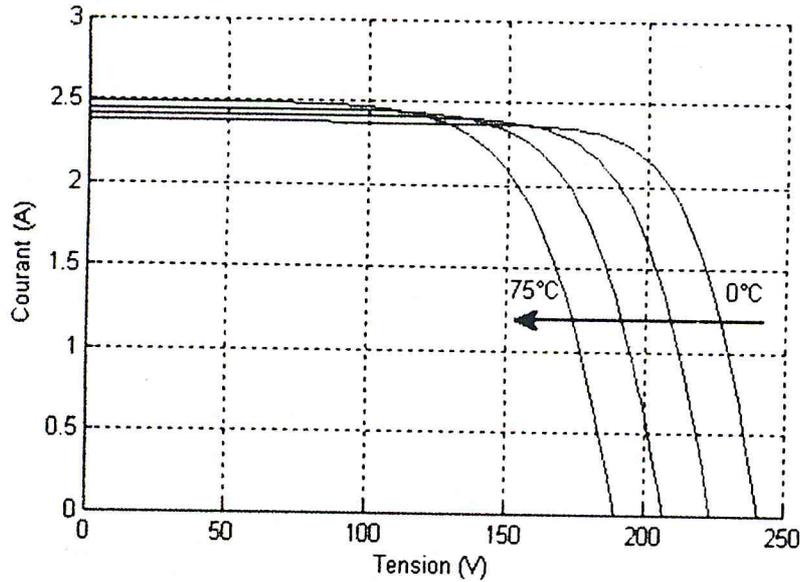


Figure 1.6 : Influence de la température sur la caractéristique $I=f(V)$ [27].

La figure (1.7) illustre la variation de la puissance délivrée par le générateur en fonction de la tension pour différentes valeurs de la température, ce qui nous permet de déduire l'influence de la température sur la caractéristique $P=f(V)$ [5].

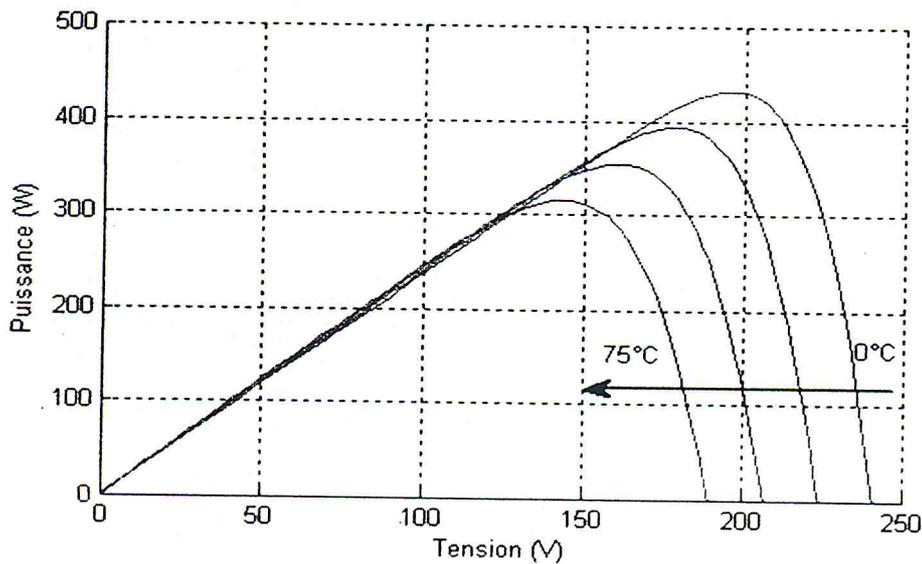


Figure 1.7 : L'influence de la température sur la caractéristique [27].

3.4. Les Principes de Conversion dans les Systèmes PV

Le générateur PV est le cœur d'un système PV. Cependant, pour une application pratique, d'autres éléments sont nécessaires, par exemple pour le stockage de l'énergie, pour la régulation de la circulation du flux d'énergie ou pour l'alimentation du réseau alternatif. Ces composants supplémentaires représentent une part considérable du coût, provoquent la réduction du rendement et influencent considérablement le comportement et les performances de tout le système [2].

3.4.1. Couplage direct d'un Générateur PV et une charge résistive

Dans le cas où une charge résistive est directement connectée à une source linéaire, les valeurs du courant et de la tension pour chaque point de fonctionnement sont facilement calculées en utilisant la loi d'Ohm. Par contre, lorsque la source est de nature non linéaire, comme c'est le cas pour le GPV, une méthode graphique est nécessaire. Le point de fonctionnement est alors déterminé par l'intersection de la caractéristique I/V du GPV et la courbe de la charge [28].

3.4.2. Etage d'adaptation entre un Générateur PV et une charge

Afin d'extraire, à chaque instant, le maximum de puissance disponible aux bornes du GPV et de la transférer à la charge, un étage d'adaptation est utilisé. Cet étage joue le rôle d'interface entre les deux éléments. Il assure, à travers une action de contrôle, le transfert du maximum de puissance fournie par le générateur [29].

L'adaptateur communément utilisé en PV est un convertisseur statique (convertisseur de puissance DC/DC). La structure de conversion est choisie en fonction de la charge à alimenter. Elle peut être survoltrice ou dévoltrice. Si par exemple la charge est une batterie au plomb, ce sont ses plages de tension de charge et de décharge qui vont permettre d'établir la structure la plus adéquate [30].

➤ **Convertisseur DC/DC**

La figure (1.8) montre la représentation d'un convertisseur DC/DC, qui peut être utilisé comme interface entre la source et la charge [7].

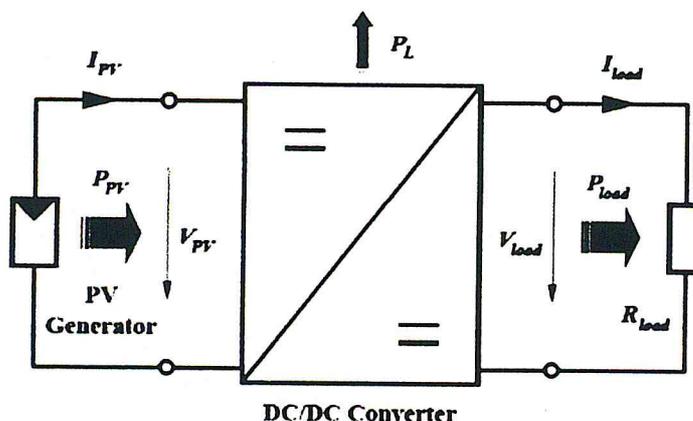


Figure 1.8 : Convertisseur DC-DC [7].

Le rôle du convertisseur DC/DC (dans le cadre du PV) est de faire l'adaptation entre la source de GPV et la charge pour un transfert de puissance maximal. Ceci est fait en maintenant le point fonctionnel sur ou assez proche du MPP pour n'importe quelles conditions de fonctionnement (rayonnement, température, caractéristique de charge, etc.).

Contrairement au cas général où le convertisseur DC/DC est utilisé pour réguler la tension de sortie, ici c'est plutôt la tension d'entrée qui est régulée. La tension de référence (consigne) est alors constante ou imposée par un algorithme de commande. Si les pertes internes P_L du convertisseur sont négligeables, alors les puissances d'entrée et de sortie sont égales. Dans ce qui suit, le principe de fonctionnement de quelques types de convertisseurs DC/DC est décrit [31].

On distingue 3 types de convertisseur DC-DC [7]:

-Convertisseur dévolteur (Buck converter) :

Un convertisseur Buck, ou hacheur série, est une alimentation à découpage qui convertit une tension continue en une autre tension continue de plus faible valeur. Ce type de convertisseur peut être utilisé comme adaptateur source-charge, lorsque le point de fonctionnement en couplage direct est à gauche du MPP [32].

-Convertisseur survolteur (Boost converter) :

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.

-Convertisseur Buck-Boost :

Un convertisseur Buck-Boost est une alimentation à découpage qui convertit une tension continue en une autre tension continue de plus faible ou plus grande valeur mais de polarité inverse.

3.5. Les topologies

3.5.1 Association de Cellules Photovoltaïques en Série :

Dans un groupement en série, les cellules sont traversées par le même courant et la caractéristique résultante du groupement en série est obtenue par addition des tensions à courant donné [3].

La figure (1.9) montre la caractéristique résultante (I_{sc}, V_{sc}) obtenue en associant en série (indice s) n_s cellules identiques (I_{cc}, V_{co}) : $I_{sc} = I_{cc}$ et $V_{sc} = n_s V_{co}$

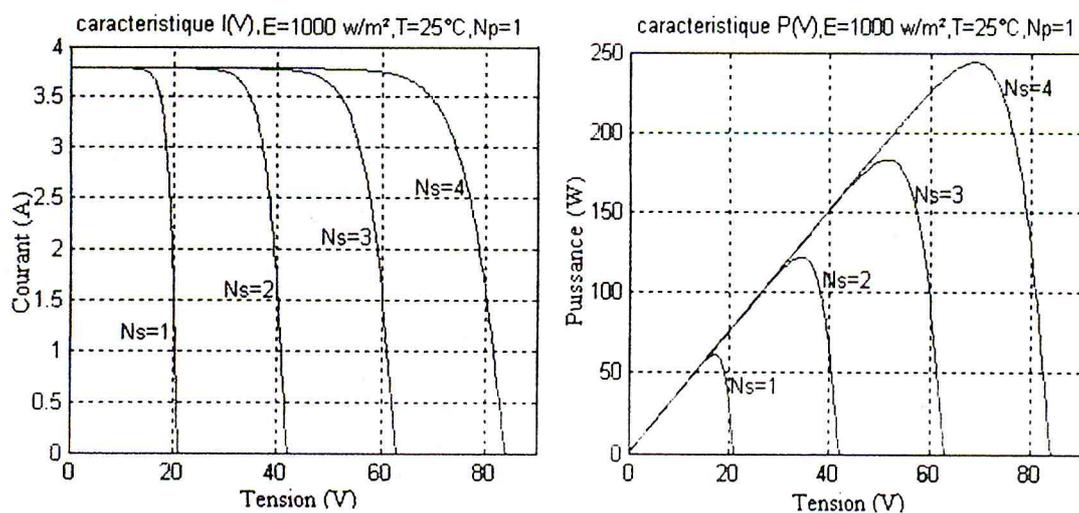


Figure 1.9 :Caractéristique résultante d'un groupement en série de ns cellules identiques [27].

3.5.2 Association de Cellules Photovoltaïques en Parallèle :

Les propriétés du groupement en parallèle des cellules sont duales de celles du groupement en série. Ainsi, dans un groupement de cellules connectées en parallèle, les cellules sont soumises à la même tension et la caractéristique résultante du groupement est obtenue par addition des courants à tension donnée [3]. La figure (1.10) montre la caractéristique résultante (I_{pcc} , V_{pco}) obtenue en associant en parallèle (indice p) n_p cellules identiques (I_{cc}, V_{co}) :

$$I_{pcc} = n_p I_{cc} \text{ et } V_{pco} = V_{co}$$

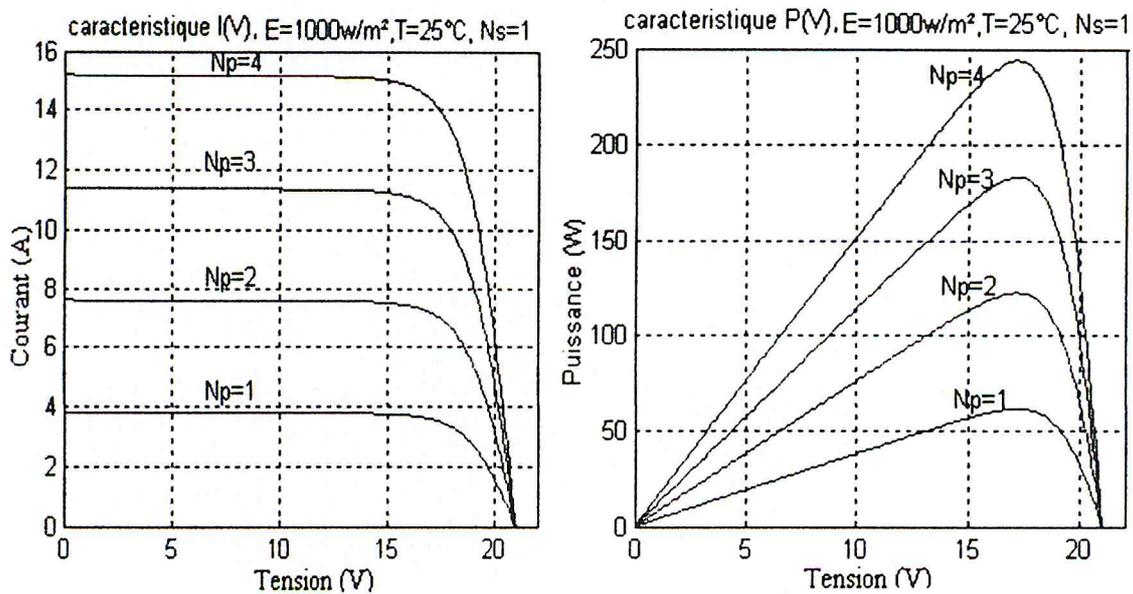


Figure 1.10 : Caractéristique résultante d'un groupement constituée de n_p cellules identiques en parallèle [27].

3.5.3 Influence de l'association mixte des cellules PV:

Pour avoir une satisfaction en courant et en tension, on est obligé d'utiliser un groupement mixte, c'est à dire Série-Parallèle [3]. La caractéristique d'un groupement de N_p modules solaires en parallèle est représentée par la figure suivante :

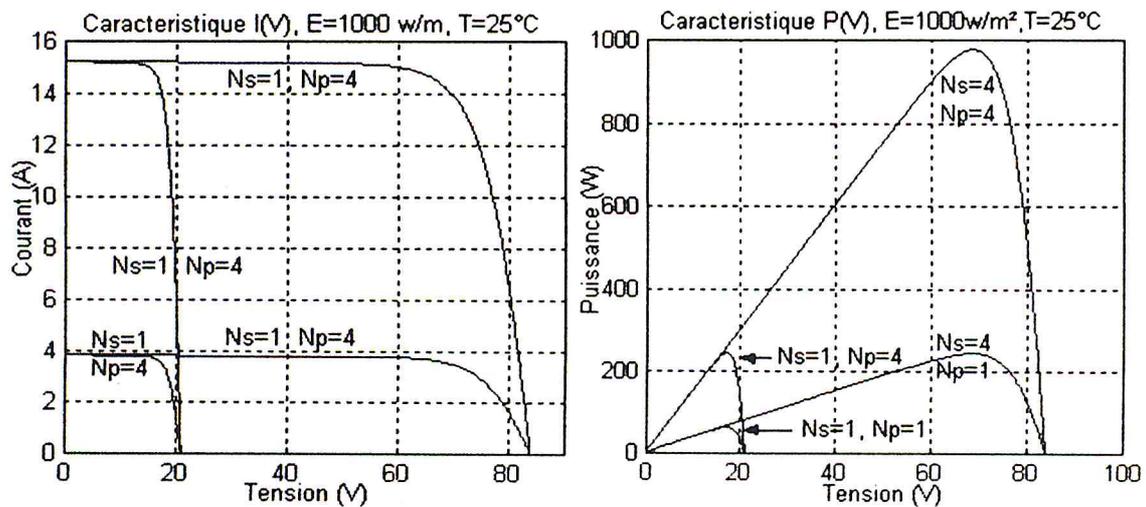


Figure 1.11 : Caractéristique résultante d'un groupement constitué de n_p cellules identiques en série-parallèle [27] .

4. Avantages et Inconvénients de l'Énergie Photovoltaïque :

Les principaux avantages de l'énergie photovoltaïque sont [1-2]:

- Sa gratuité.
- Pas de pollution.
- Sa fiabilité et la longue vie de l'installation.
- Sa structure fixe.
- Son coup de maintenance bas.
- Sa flexibilité (dimensionnement selon les besoins, modularité).
- L'installation ne produit aucun bruit.
- Son potentiel illimité. 5% de la surface des déserts suffiraient pour alimenter la planète entière

Les inconvénients de l'énergie photovoltaïque sont :

- Le coût élevé de l'installation.
- Le rendement relativement bas de l'effet photovoltaïque.
- La puissance est réduite lorsque les conditions climatiques sont défavorables (nuages).
- Le stockage de l'énergie électrique sous forme chimique (batterie) est nécessaire pour une installation autonome.

- Même si l'électricité produite par une installation photovoltaïque est sans pollution, la fabrication, l'installation et l'élimination des panneaux ont un impact sur l'environnement.

5. Conclusion :

Ce chapitre s'est consacré à présenter les différents composants d'un système photovoltaïque. On a étudié le principe de l'effet photovoltaïque. En suite on fait un rappel sur les systèmes PV et leurs performances.

Dans le chapitre prochain, on présentera une étude sur les commandes MPPT dans le système photovoltaïque en utilisant un algorithme de recherche.

Chapitre 2

Les commandes MPPT
proposées

1. Introduction :

Un nombre important de technique de commande MPPT ont été élaboré depuis les années 70, commençant par des techniques simples comme les contrôleurs MPPT basés sur le retour d'état de la tension et du courant, aux contrôleurs plus performant utilisant des algorithmes pour calculer MPP du GPV, parmi les techniques les plus utilisées Perturbation et Observation (P&O), Incrémentation de la Conductance (IC) [7].

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

Dans ce chapitre, nous allons expliquer le principe du MPPT et présenter les méthodes existantes.

2. Généralités sur les commandes MPPT :

La puissance délivrée par un GPV dépend fortement du niveau d'ensoleillement, de la température des cellules, Elle est de ce fait très imprévisible. Comme nous l'avons déjà vu dans les chapitres précédents, la courbe caractéristique de puissance du GPV présente un point de puissance maximale MPP correspondant à un certain point de fonctionnement de coordonnées V_{mpp} pour la tension et I_{mpp} pour le courant (Voir figure 2.1). Vu que la position du MPP dépend du niveau d'ensoleillement et de la température des cellules, elle n'est jamais constante dans le temps. Un contrôleur MPPT doit donc être utilisé afin de suivre ces changements. Un contrôleur MPPT est un système de conversion de puissance muni d'un algorithme de contrôle approprié permettant d'extraire le maximum de puissance que le GPV peut fournir [5].

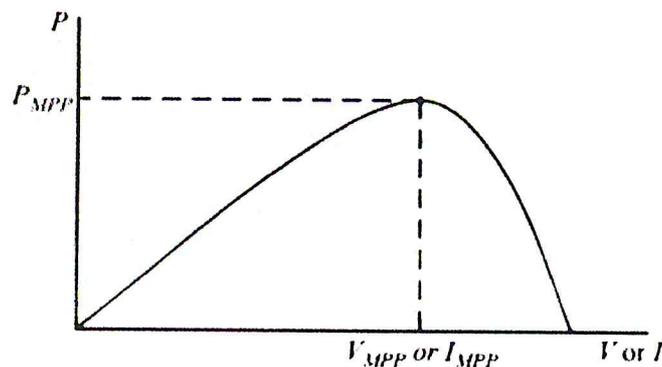


Figure 2.1 : Courbe caractéristique de puissance d'un GPV[5].

Le développement du MPPT a constitué un thème techniquement attrayant, si bien que finalement, un grand nombre de procédures et techniques ont été développés. Elles varient en complexité, capteurs nécessaires, vitesse de convergence, coût, efficacité, matériel pour la réalisation, etc.

3. Méthodes MPPT proposées :

Un inconvénient majeur des systèmes PV est relativement le coût plus élevé nécessaire pour la production d'énergie par rapport à celle produite par les systèmes classiques de production d'électricité ou même par rapport aux autres sources d'énergie renouvelables.

Par conséquent, maximiser l'efficacité de la puissance délivrée à la sortie par le suivi du point de puissance maximale est critique pour un fonctionnement optimal des systèmes photovoltaïques. Le système PV est connecté au réseau par l'intermédiaire de convertisseurs DC-DC. Pour atteindre MPPT dans les systèmes PV de la tension aux bornes de PV (ou courant) peut être réglée par appliquer un signal de commande aux convertisseurs. Pour atteindre MPPT une grande variété d'algorithmes a été proposée et mis en œuvre. Dans ce manuscrit, ces méthodes ont été classifiées en trois grandes catégories: des méthodes offlines, des méthodes en ligne et des procédés hybrides [19].

3.1. Les méthodes offlines :

Dans des méthodes offlines, aussi connu comme méthodes modèle de base, Habituellement les valeurs physiques du panneau PV sont utilisées pour générer les signaux de commande. Ces méthodes ne sont utilisées que pour les systèmes PV sont des circuits de tension ouvert (OCV), court-circuit courante (CCS), ainsi que la méthode basée sur MPPT Intelligence artificielle (AI).

3.1.1. Méthode circuit ouverts de tension (OCV) :

Cette méthode est l'une des plus simple des méthodes offlines, qui utilise la relation approximativement linéaire entre la tension (V_{OC}) et la tension de point de puissance maximale (V_{MPP}) dans différentes conditions environnementales telles que décrites par l'équation suivante [19]:

$$V_{MPP} \approx KV_{OC} \quad (1)$$

Où K est une constante qui dépend des caractéristiques de la cellule solaire. Cette constante est empiriquement dérivée basée sur la mesure de V_{OC} et V_{MPP} dans différentes conditions environnementales. C'est difficile de choisir une valeur optimale pour la constante K , cependant les valeurs pour ce paramètre allant 0,73 à 0,80 ont été rapportées dans les modules PV poly-cristallins. A partir de l'équation. (1) V_{MPP} est déterminé après chaque mesure de V_{OC} . Dans chaque étape successive que MPP est suivie, cette valeur de V_{MPP} qui est choisi comme point de consigne est supposé rester relativement constant sur une large plage de valeurs de température et de l'éclairement.

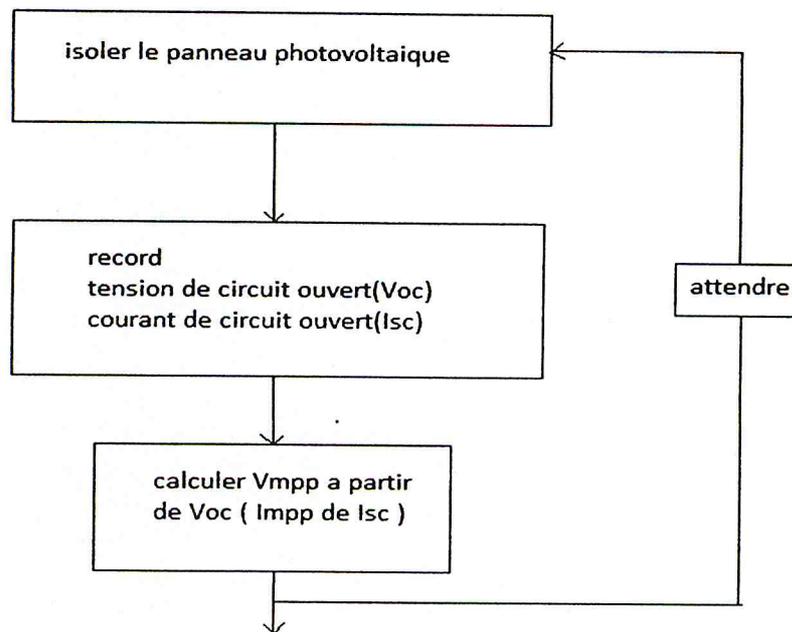


Figure 2.2 :L'organigramme de la méthode OCV(ou SCC) [34].

Un organigramme illustrant de cette méthode est représentée sur la Figure (2.2). En dépit de la facilité relative à la mise en œuvre et de faibles coûts, les cellules pilotes ont été utilisées pour obtenir V_{OC} . Ces cellules pilotes doivent être soigneusement choisies. Afin de surmonter les pertes d'énergie associé à l'interruption de la charge, un plus simple, mais approche approximative peut être proposé. Cette approche implique mesure de la température et de l'irradiante et l'estimation de V_{OC} sur la base des équations du modèle régissant [19].

3.1.2. Méthode de court-circuit actuelle (SCC) :

Cette méthode représente une autre approche offline qui est relativement similaire à la méthode OCV (Figure 2.2) [19]. Il y a également une relation approximativement

linéaire entre le court courant de circuit (I_{SC}) du panneau solaire et le courant MPP (I_{MPP}), qui peut être décrit par l'équation suivante:

$$I_{MPP} \approx KI_{SC} \quad (2)$$

Où K est une constante comprise entre 0,8 et 0,9. Semblable à la méthode OCV, la charge doit être versée afin de déterminer la I_{SC} . Bien que la méthode SCC soit plus précise et efficace que la méthode OCV, en raison de problèmes pratiques liés à la mesure I_{SC} , ses coûts de mise en œuvre sont plus élevés. Un coup de pouce le convertisseur est utilisé, lorsque l'interrupteur du convertisseur lui-même peut être utilisé pour appliquer un court-circuit à la matrice de PV. Une amélioration semblable à celui proposé ci-dessus pour la méthode OCV peut être appliquée la méthode SCC. En particulier, les pertes de puissance associées à interruption de la charge peut être évitée si la mesure de la température et irradiante est utilisé pour estimer la CSC sur la base du régressant les équations du modèle, il y a est un compromis impliquant la précision associée au projet amélioration. Les méthodes OCV et SCC ne parviennent pas à fournir une puissance de sortie maximale à la charge pour deux raisons. La raison première est l'interruption de charge se produisant lors de la mesure I_{SC} ou V_{OC} , et la seconde la raison est que le député ne peut jamais être suivi tout en utilisant exactement cette méthode dans la première place comme suggéré par Equation (2) ou (1). Ces deux méthodes ne peuvent pas être classés comme «vrais» qui cherchent des méthodes MPP, Cependant, la simplicité de ces algorithmes et de la facilité avec laquelle ils peuvent être mis en œuvre les rendent aptes à être utilisés comme partie des méthodes hybrides nouveaux [19].

3.1.3 Les méthaheuristiques :

Les méta heuristiques sont généralement des algorithmes stochastiques itératifs, qui progressent vers un optimum global, c'est-à-dire l'extremum global d'une fonction, par échantillonnage d'une fonction objectif. Elles se comportent comme des algorithmes de recherche, tentant d'apprendre les caractéristiques d'un problème afin d'en trouver une approximation de la meilleure solution (d'une manière proche des algorithmes d'approximation).

Les méthaheuristiques sont utilisés pour résoudre des problèmes pratiques complexes dans divers domaines consiste de plusieurs disciplines, des applications d'artificielle réseaux de neurones (ANN) et la logique floue (FL) ...

Au cours des dernières années, les méthodes basées sur ANNs et FL ont été utilisées avec succès pour la mise en œuvre de la recherche de MPP

- **Méthode de colonie de fourmis (ACO) :**

L'ACO est une méthode métaheuristique consistante et effective pour la résolution des problèmes d'optimisation difficiles et s'inspire principalement du comportement des fourmis lors de la recherche de la nourriture (Marco & Thomas, 2004).

L'algorithme a été introduit premièrement pour la résolution des problèmes combinatoires notamment le problème du voyageur de commerce (TSP) par Marco Dorigo en 1991 et a été appelé « Ant System » (Johann, Pétrowski, Siarry, & Taillard, 2003). Elle a été généralisée par la suite et a appliquée pour la résolution des problèmes d'optimisation continue [17].

L'ACO est une méthode métaheuristique consistante et effective pour la résolution des problèmes d'optimisation difficiles et s'inspire principalement du comportement des fourmis lors de la recherche de la nourriture (Marco & Thomas, 2004).

L'algorithme a été introduit premièrement pour la résolution des problèmes combinatoires notamment le problème du voyageur de commerce (TSP) par Marco Dorigo en 1991 et a été appelé « Ant System » (Johann, Pétrowski, Siarry, & Taillard, 2003). Elle a été généralisée par la suite et a appliquée pour la résolution des problèmes d'optimisation continue.

- **Méthode artificielle des réseaux de neurones (ANN) :**

Un ANN est une collection de neurones électriques (Figure 2.3) connectés basé sur diverses topologies. L'application la plus courante d'un ANN implique l'identification et la modélisation du système à l'aide non linéaire et des fonctions complexes. Au cours du processus d'apprentissage dans ANNs, les Poids (W_i) sont déterminés. ANN subit une adaptation le cycle, au cours duquel les coefficients de pondération sont mis à jour jusqu'à ce que le réseau atteigne un état d'équilibre. Afin d'identifier avec précision le MPP en utilisant le W_i de ANN à déterminer de façon appropriée sur la base de la relation entre l'entrée et la sortie de l'installation photovoltaïque. Par conséquent, le tableau de PV est testé au cours des mois ou des années et le modèle entre l'entrée et la sortie du réseau de neurones sont enregistrés. Le signal d'entrée pour chaque neurone est soit le signal reçu à partir de neurones voisins ou les variables d'entrée associées ANN à partir du système non linéaire à l'étude. En application de ANNs à MPPT, les variables

d'entrée peuvent être V_{OC} et I_{SC} , les données atmosphériques comme irradiance et de la température, ou tout combinaison de ceux-ci. La sortie de ANN est généralement l'un de plusieurs signaux de référence, dont le plus courant est le cycle de service signal utilisé pour piloter le convertisseur de puissance pour fonctionner à ou à proximité MPP [19].

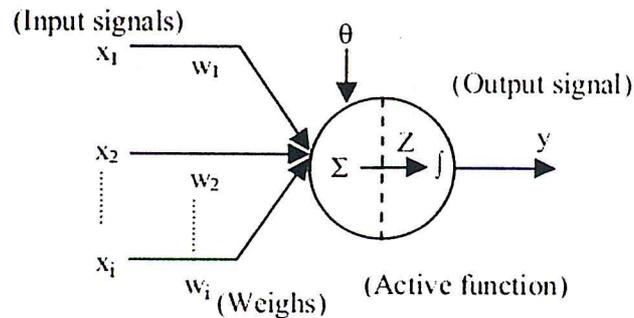


Figure 2.3 : Le neurone de base[35].

Dans cette méthode, V_{OC} a été la seule entrée à ANNs provenant du panneau solaire. La sortie des ANNs est un signal qui peut être comparé à la tension instantanée afin de générer le signal de commande nécessaire pour conduire le solaire panneau MPP par un régulateur PI.

L'avantage de la méthode à base ANN réside dans le fait que le réseau neuronal formé peut fournir un suffisamment précise MPPT sans nécessiter une connaissance approfondie sur le système photovoltaïque. Cependant, il faut noter que, depuis la plupart des panneaux photovoltaïques présentent des caractéristiques différentes de sortie, un ANN doit être spécifiquement formés pour le photovoltaïque avec lequel il sera utilisé.

- **Méthode PSO :**

L'ACO est une méthode métaheuristique consistante et effective pour la résolution des problèmes d'optimisation difficiles et s'inspire principalement du comportement des fourmis lors de la recherche de la nourriture (Marco & Thomas, 2004). L'algorithme a été introduit premièrement pour la résolution des problèmes combinatoires notamment le problème du voyageur de commerce (TSP) par Marco Dorigo en 1991 et a été appelé « Ant System » (Johann, Pétrowski, Siarry, & Taillard, 2003). Elle a été généralisée par la suite et a appliquée pour la résolution des problèmes d'optimisation continue [17].

- **Méthode de logique floue (FL) :**

La figure 2.4 montre le diagramme de flux pour Système d'inférence floue. Ce système met en œuvre la logique floue le contrôle en trois étapes: fuzzification, la prise de décision, et de fuzzification. Au cours de fuzzification, les variables d'entrée sont nettes converties en variables linguistiques basées sur une adhésion fonctionnée comme cela est représenté sur la Figure 2. . Dans la phase de prise de décision, les règles qui sont spécifiées par un ensemble de IF-THEN de définir le comportement du contrôleur. Le règles décrivant ce stade de fonctionnement sont exprimés en linguistique variables représentées par des ensembles flous [19].

Dans la phase de fuzzification, la sortie du contrôleur de logique floue est convertie à partir d'une variable linguistique à une variable numérique encore en utilisant une fonction d'appartenance comme cela est représenté sur la Figure 2. . Ceci permet d'un signal analogique qui va contrôler le convertisseur de puissance et d'entraînement le point le MPP d'exploitation.

Les entrées du contrôleur de logique floue sont généralement une erreur E et un le changement dans l'erreur, E associé à plusieurs variables différentes. En particulier, afin de suivre MPP, l'erreur est basée calculée l'ensoleillement et de la température ou des valeurs instantanées telles que la puissance et la tension. Le signal de sortie est soit le devoir cycle lui-même, ou V_{MPP} et I_{MPP} à partir de laquelle le cycle de service peut être généré.

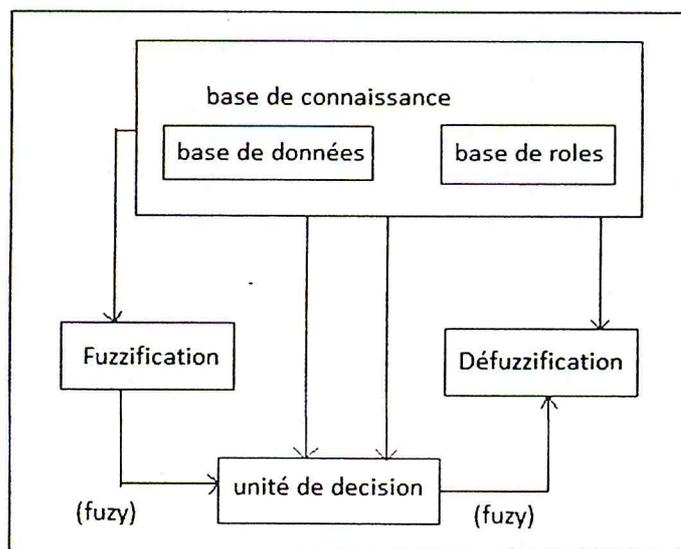


Figure 2.4 : Diagramme de flux Système d'inférence floue [35].

Contrôleurs de logique floue offrent les avantages suivants: capacité de travailler avec des entrées imprécises, le manque d'exigence d'un modèle mathématique précis, la capacité à gérer la non-linéarité, convergence rapide. Cependant, la capacité d'apprentissage et de précision obtenue par l'approximation dépend du nombre de niveaux flous et la forme des fonctions d'appartenance. Dans la plupart systèmes flous, la fonction d'appartenance associée à fuzzification et défuzzification, ainsi que l'antécédent et les règles floues qui en découlent sont déterminés en fonction des essais et des erreurs, qui peut prendre du temps.

3.2. Les méthodes en ligne :

Dans les procédés en ligne, également connu sous le nom de méthodes sans modèle, habituellement les valeurs instantanées de la tension ou le courant de sortie PV sont utilisé pour générer les signaux de commande. Les méthodes en ligne comme la méthode de Perturbation et d'observation (P & O), méthode de l'extremum control (ESC) et ainsi que la méthode de conductance incrémentale (IncCond)...

3.2.1. Méthode de perturbation et d'observation (P & O) :

Cette méthode est l'une des méthodes les plus simples en ligne qui n'a été examiné par un certain nombre de chercheurs [19]. P & O peuvent être mis en œuvre en appliquant une perturbation à la tension de référence, ou le signal de courant de référence du panneau solaire. Un organigramme illustrant cette méthode, qui est également connu comme le «escalade de la colline

Méthode', est représentée sur la Figure 2.5, Dans cet algorithme, si le signal de référence, X est considéré comme la tension, (à savoir, $X=V$), l'objectif consistera de pousser la référence signal de tension vers V_{MPP} provoquant ainsi la tension pour suivre le V_{MPP} . En conséquence, la volonté de puissance de sortie approche le MPP. A cet effet, une petite perturbation est constante appliquée à la tension de panneau solaire.

La tension de panneau solaire est modifiée par l'application d'une série de petits et les perturbations constantes notées ($C=\Delta V$) sur une étape par étape basent afin de changer le point de fonctionnement du système. Suivant chaque perturbation, la variation de puissance de sortie (ΔP) est mesurée. Si ΔP est positif, approche le MPP, donc une tension perturbation du même signe doit être appliquée dans ce qui suit étape. Une ΔP

négative et une perturbation de signe opposé doit être appliquée. Ce processus est répété jusqu'à ce que le MPP soit atteint.

La méthode P & O a été améliorée pour réduire les coûts. Afin de suivre le MPP, cette méthode utilise le courant du panneau photovoltaïque (I_{pv}) que la variable mesurée pour le calcul du rapport cyclique (D), qui sert de signal de référence (X) [7].

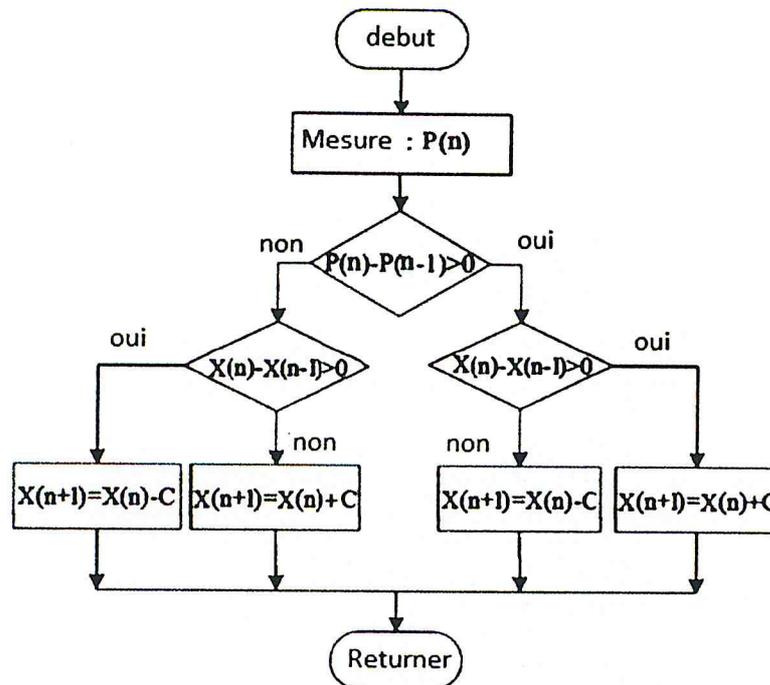


Figure 2.5 : L'organigramme de la méthode P&O [36].

La méthode P & O a deux inconvénients majeurs. Tout d'abord, dans cet algorithme de l'amplitude des perturbations appliquées au système est le principal facteur qui détermine l'amplitude des oscillations ainsi que le taux de convergence de la puissance de sortie à MPP. Les grandes perturbations du plus rapide l'algorithme doivent trouver le MPP. Néanmoins une perturbation plus importante conduira à une plus grande valeur de l'amplitude d'oscillation. Si les perturbations appliquées sont trop petites, d'autre part, les oscillations autour de MPP sera réduit, mais le taux de convergence diminuera aussi. En d'autres termes, dans cet algorithme il y a un compromis entre le taux de réponse et la quantité d'oscillations dans l'état d'équilibre conditions. Pour pallier cet inconvénient, l'utilisation d'une variable taille de perturbation qui devient plus petite que MPP est abordée était proposée. Dans cette approche, les grandes perturbations sont appliquées lorsque la puissance de sortie est loin de MPP, alors que plus petit des mesures sont adoptées en tant que la puissance de sortie oscille autour du MPP.

L'ampleur de la perturbation déterminée variable est basée sur la pente de la courbe de puissance à courant continu. La détermination de cette pente, cependant, augmente la complexité et les coûts associés cette approche.

Deuxièmement, si le point de fonctionnement du système change rapidement, l'algorithme sera soumis à des erreurs de suivi. Pour remédier à ce problème, différentes méthodes ont été présentées.

3.2.2. Méthode de l'extremum recherche de contrôle (ESC) :

Cette méthode d'optimisation en temps réel comporte un système dynamique non linéaire avec rétroaction adaptative. Cette méthode ESC a été appliquée avec succès dans divers systèmes tels que la traction la maximisation de freinage antiblocage pour une voiture, la réduction de puissance la maximisation d'un flight, la pression montée maximisation d'un aéro compresseur du moteur, le suivi autonome cible du véhicule, et réglage PID. Cette méthode a également été spécifiquement adaptée pour PV systèmes afin de suivre MPP [19].

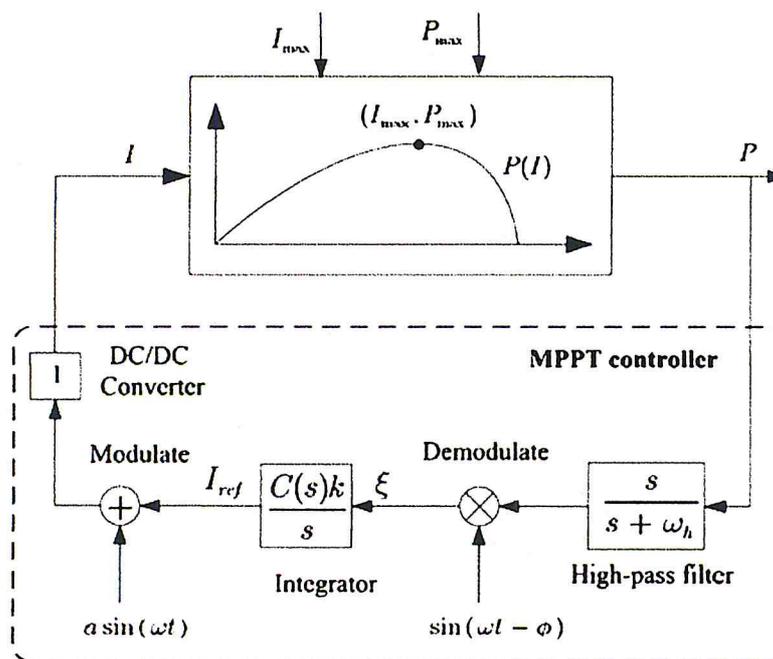


Figure 2.6 : Schéma synoptique illustrant le procédé ESC mis en œuvre dans un SPV [19].

Dans cette figure I_{ref} est la valeur initiale du courant MPP inconnu, I_{max} , représente le courant à dont le PV produit la puissance maximale P_{max} , ' α ', ' ω ' et ' ϕ ' sont l'amplitude, la fréquence et le déphasage de la sinusoïdal signal de perturbation, respectivement, ' ωh '

est la fréquence de coupure du passe-haut filtre, 'k' est le gain adaptatif positif de la intégrateur et C (s) représente la fonction de transfert pour la compensateur.

Supposons un petit courant sinusoïdal représenté par $\Delta I = \alpha \sin(\omega t)$ est ajoutée sous forme d'une perturbation du courant de référence (I_{ref}).

Ceci conduit à l'apparition d'une puissance d'entraînement (ΔP), dont la phase et l'amplitude dépendent de la localisation relative du point par rapport à MPP d'exploitation. Comme on le voit sur la Figure 2.6, la perturbation de courant sinusoïdal sera ajoutée à la référence du courant et appliqué à l'installation photovoltaïque. Si l'ondulation résultante dans le courant est en phase avec l'ondulation de la puissance de sortie, la sortie puissance va tomber à gauche du MPP, et le courant de référence sera moins que I_{MPP} , donc le contrôleur augmentera la référence courant. Si, d'autre part, l'ondulation du courant est en dehors de phase avec celle de la puissance de sortie, la puissance de sortie tombée à droite du MPP, et le courant de référence sera plus grande que I_{MPP} . Le contrôleur, par conséquent, diminuer la référence courant jusqu'à ce que le député soit atteint. En faisant passer la sortie à travers un passe-haut filtre, la puissance d'entraînement (ΔP) peut être extraite. L'ondulation puissance est alors démodulée par multiplication par le péché $(\omega t - \phi)$ [8].

Le signal résultant, Zeta est soit positif ou négatif selon la position de la courbe de puissance de sortie. Zeta est ensuite appliqué à un intégrateur pour modifier la valeur I_{ref} afin d'atteindre MPP. Dans le cas où le point de fonctionnement tombe MPP, l'amplitude de l'ondulation sera très faible et la fréquence de la puissance de sortie ondulation sera deux fois celle de l'ondulation de courant.

Une autre méthode MPPT, qui, comme la méthode ESC, utilise de l'ondulation de la puissance pour effectuer le suivi des MPPs, est connu sous le nom le contrôle d'entraînement de corrélation (RCC). Quand un générateur photovoltaïque est connecté à un convertisseur de puissance, l'action de commutation du convertisseur de puissance impose la tension et ondulations de courant sur le tableau PV. En conséquence, la puissance du générateur photovoltaïque devient également assujettie onduler. Dans le procédé RCC, on effectue une corrélation entre la dérivée temporelle de la puissance du générateur photovoltaïque (dp / dt) et dérivée du courant (di / dt) ou une tension (dv / dt) associé à le tableau de PV dans une tentative pour atteindre le MPP en conduisant la puissance gradient à zéro.

L'approche ESC présente deux avantages principaux. Premièrement, l'optimisation problème impliquant la force de maximisation est explicitement résolue en utilisant le contrôle de rétroaction sur la base d'adaptation dynamique loi pour une perturbation sinusoïdale. La réalisation de MPP est, par conséquent, garantie lorsque l'algorithme de commande est convergente. Seconde, cette approche ne nécessite aucun paramétrage ou structurel formalisation de l'incertitude de la modélisation. L'inconvénient de la méthode ESC réside dans la complexité associée à son la mise en œuvre, ainsi que la nécessité d'évaluer les signaux de amplitude relativement faible [9].

3.3. Méthode de conductance incrémentale (IncCond) :

La conductance incrémentale (IncCond) utilise la méthode pente des caractéristiques de puissance du générateur photovoltaïque pour suivre MPP.

Cette méthode est basée sur le fait que la pente du générateur photovoltaïque courbe de puissance est nulle au MPP, positif pour les valeurs de sortie puissance inférieure à MPP, et négatif pour les valeurs de la sortie puissance supérieure à MPP.

$$\text{On a : } dP/dV = I+V dI/dV=0$$

$$dI/dV \approx \Delta I/\Delta V = -I_{MPP}/V_{MPP}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} dP/dV = 0 \\ dP/dV > 0 \\ dP/dV < 0 \end{array} \right. \rightarrow \left\{ \begin{array}{l} \Delta I/\Delta V = -I/V \text{ à MPP} \\ \Delta I/\Delta V > -I/V \text{ gauche de MPP} \\ \Delta I/\Delta V < -I/V \text{ droite de MPP} \end{array} \right.$$

MPP peut donc être suivi en comparant l'instantanée Conductance (I / V) à la conductance incrémentale ($\Delta I / \Delta V$), comme illustré dans l'organigramme donné dans la figure 2. . Sur cette figure V_{ref} est la référence tension à laquelle le générateur photovoltaïque est obligé de fonctionner. A MPP, V_{ref} est égal à V_{MPP} . Une fois que le MPP est atteinte, le fonctionnement du tableau de PV est maintenu à ce point à moins qu'un changement courant I se produise à la suite d'un changement dans l'atmosphère des conditions conduisant à une variation de MPP. L'algorithme, puis, suit le MPP en appliquant l'incrément V_{ref} . le taille de l'incrément ou décrémente détermine à quelle vitesse le MPP est suivi. Suivi rapide peut être obtenue en appliquant une plus grande incrémente, mais le système ne fonctionne pas exactement au MPP et les oscillations autour de la MPP peuvent entraîner. Autrement dit, l'utilisation de la méthode de revenu

implique un compromis entre la vitesse de convergence et la probabilité d'apparition d'oscillations autour d' MPP [19].

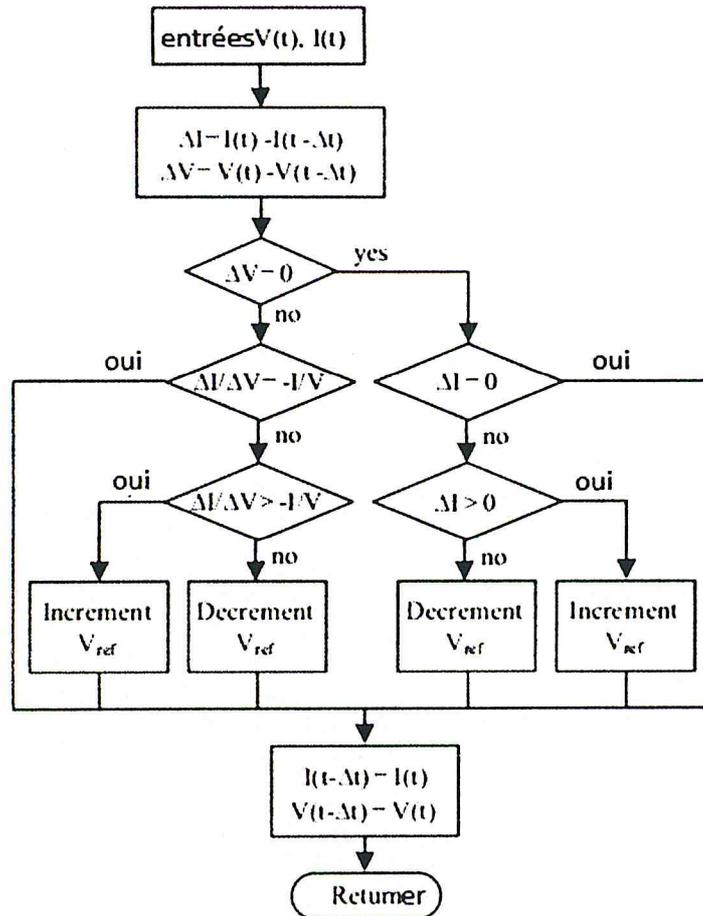


Figure 2.7 : L'organigramme de la méthode IncCond [38].

Le principal avantage de cet algorithme est qu'il offre une solution efficace dans l'évolution rapide des conditions atmosphériques.

Le principal inconvénient lié au procédé IncCond est qu'il nécessite un circuit de commande complexe.

3.3. Méthodes hybrides :

Les méthodes hybrides devraient suivre MPP plus efficacement. Dans ces procédés, le signal de commande associé à l'algorithme est constitué de deux parties. Chaque partie est générée sur la base d'une boucle algorithmique séparée. La première partie est

déterminée en fonction à l'un des simplifiée des méthodes offline comme une valeur constante, ce qui dépend des conditions atmosphériques données du panneau PV, et représente la valeur de l'état d'équilibre de fixes. Cette partie de la commande signal est destiné à suivre le MPP environ et est seulement nécessaire pour présenter une réponse rapide à la variation de l'environnement. Cette partie peut être générée en utilisant l'un des précédents des méthodes offlines ou simplifications de ceux-ci reposent sur la relation entre les caractéristiques de puissance de sortie et la température ambiante. La deuxième une partie du signal de commande, qui pourrait être obtenu sur la base d'une des méthodes en ligne impliquant des recherches d'état stable, représente tente de suivre exactement MPP. Contrairement à la première partie du signal de commande, cette partie tente de minimiser l'état d'équilibre l'erreur et ne nécessite pas une réponse rapide à l'environnement variations [19].

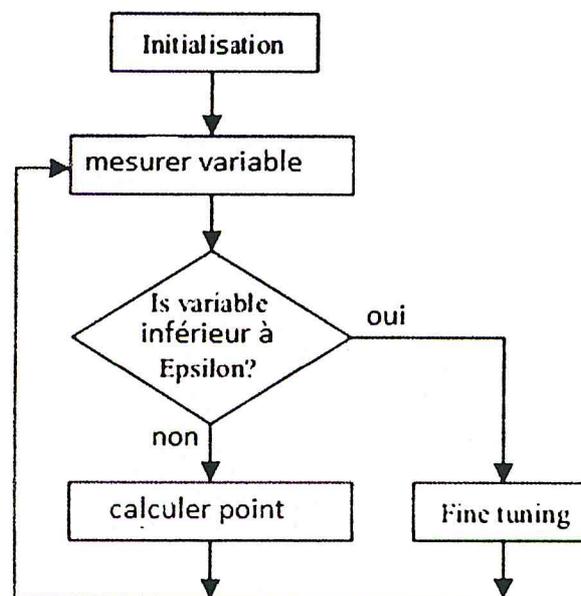


Figure 2.8 : La description générale de la méthode hybride [38].

Le signal de commande est générée en utilisant un procédé offline à travers le point de consigne calculassions de boucle, tandis que la seconde partie est obtenue en utilisant une méthode en ligne par l'intermédiaire de la boucle de réglage fine.

Un procédé hybride constitué de deux boucles est proposée. Dans la première boucle, MPP est estimé sur la base du circuit ouvert tension à une température constante. Dans la seconde boucle en appliquant P & O méthode la quantité exacte de la puissance de sortie maximale seront recherchées. Afin d'améliorer l'état d'équilibre transitoire et les réponses, l'amplitude et la fréquence de perturbation sont maintenues très petit.

Une méthode hybride est proposée qui utilise une méthode offline pour amener le point de la matrice PV de fonctionnement proche MPP et utilise ensuite l'approche de revenu en ligne pour suivre le MPP avec une grande précision. Grâce à un contrôle adéquat du convertisseur de puissance, le point de fonctionnement initial est réglé pour correspondre à une résistance de charge proportionnelle à la V_{OC} / I_{SC} rapport associé au réseau de PV. Cette méthode hybride assure également que le vrai MPP est suivi en cas plusieurs maxima locaux sont présents.

L'utilisation de la logique floue pour la mise en œuvre de taille variable perturbations est discuté dans le cadre de la réalisation améliorée réponses transitoires et stables État. Le rapport cyclique de la puissance convertisseur électronique est ajustée afin de pousser l'exploitation signaler le plus rapidement possible vers la région MPP, ce qui l'amélioration de la réponse transitoire. Une fois que la région MPP est atteinte, un P & O algorithme modifiée basée sur la logique floue, qui est optimisé pour les petites variations autour de la MPP, est utilisé. Cette approche se traduit en oscillations réduite et un rendement accru de puissance sous les constantes conditions de l'État. Dans ces articles, chaque boucle applique la méthode P & O à l'aide des perturbations d'amplitude différente. La décision sur laquelle la boucle doit être mise en œuvre est déterminée par la logique floue. L'utilisation de ce méthode ainsi que les résultats du contrôle de pointe actuelles dans une amélioration dans la réponse aux transitoires ainsi qu'une diminution de la perte de puissance dans des conditions d'état stable [38].

D'autres méthodes hybrides sont signalées ailleurs. Une fonction linéaire est utilisée pour détecter l'emplacement de l'exploitation point par rapport à la MPP de sorte qu'une perturbation appropriée signe peut être appliqué.

Un algorithme à deux boucles est proposé qui permet plus rapide suivi dans la boucle première et effectue le suivi plus fine dans la deuxième boucle. L'équation non linéaire décrivant la puissance de sortie caractéristiques est utilisée pour estimer un point de fonctionnement initial près de la MPP.

Un analogue maximal suivi du point de puissance hybride technique est proposé qui combine l'offline OCV et la en ligne P & O méthodes MPPT. Dans ce procédé, l'OCV, qui a été mesurée directement, est utilisé comme l'estimation initiale du MPP. Puissance interruption du générateur solaire en tant que résultat de la mesure des OCV se produit une seule fois lorsque le système est sous tension. Dans la boucle réglage de la méthode

P & O est utilisée pour calculer la pente des courbes caractéristiques, afin de suivre le MPP avec plus de précision.

4. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons entamé la partie la plus importante de cette étude. Il s'agit de la description de la commande MPPT. Nous avons expliqué le principe de recherche de MPP. Ensuite, nous avons cité les algorithmes existants puis la problématique traitée et l'objectif.

Dans le chapitre suivant, on va proposer une nouvelle commande MPPT basée sur un algorithme de recherche chauve souris.

Chapitre 3

Conception

1. Introduction :

Beaucoup de problèmes de grande complexité, dans des secteurs techniques très divers, sont difficilement solubles. La difficulté ne vient pas de la complexité du problème, mais la taille successive de l'espace de solutions. Il est alors impensable de pouvoir les tester toutes pour trouver la meilleure. Pour cette raison, nous nous intéressons à une méthode dénommée métaheuristique.

Les métaheuristicques sont des algorithmes d'optimisation applicables à une grande variété de problèmes. Elles sont apparues à partir des années 80, dans le but de résoudre au mieux des problèmes d'optimisation. Dans la pratique, trois types de problèmes d'optimisation sont souvent rencontrés : les problèmes combinatoires (discrets), les problèmes continus (à variables continues), et les problèmes mixtes. Les métaheuristicques s'efforcent de résoudre tout type de problème d'optimisation. Elles sont caractérisées par leur caractère stochastique, ainsi que par leur origine discrète. Elles sont inspirées par des analogies avec la physique (recuit simulé, recuit micro canonique), avec la biologie (algorithmes évolutionnaires) ou encore l'éthologie (colonies de fourmis, essaims particulières). Cependant, elles ont l'inconvénient d'avoir plusieurs paramètres à régler.

Dans ce chapitre, nous allons présenter l'algorithme de recherche BAT (Algorithme de chauve-souris) proposé pour la poursuite du point de puissance maximale dans les systèmes photovoltaïques.

2. Aperçu sur l'algorithme de recherche BAT :

BA, proposé par Yang [10], est un algorithme de méta-heuristique inspiré par les capacités de chauves-souris à trouver leurs proies, même dans l'obscurité totale. La capacité d'écholocation avancée de chauves-souris rend fascinant.

Les Chauves-souris utilisent un sonar typique appelé écholocation pour détecter proies et d'éviter les obstacles. Les chauves-souris, dans notamment les micro-chauves-souris, sont capables de reconnaître les positions des objets de propagation des signaux audio haut et court et par collision et la réflexion de ces signaux étalés. Dans BA, les caractéristiques d'écholocation sont idéalisées dans le cadre des règles suivantes en bénéficiant tels caractéristiques de chauves-souris.

Les capacités de cet algorithme ont inspirées les chercheurs dans de nombreux domaines. Parmi les différents travaux, nous pouvons citer :

- Algorithme de bat multi-objectif (MOBA)

L'algorithme de chauve-souris multi-objective très efficace, mais pourtant simple (MOBA) a été développé pour résoudre des tâches de conception technique multi-objective. Un autre algorithme de chauve-souris multi-objective en combinant l'algorithme de chauve-souris avec NSGA-II produit des résultats très compétitifs avec une bonne efficacité.

- Algorithme de bat au modèle BAT-FLANN (BAT-FLANN)

Le modèle BAT-FLANN a été proposé par Sashikala et al. en 2012. [10] pour résoudre la classification des données d'expression génique. En utilisant la fréquence de chauve-souris simple, la logique de l'intensité sonore et le poids aléatoire, un algorithme très efficace est conçu qui donnent résultat prometteur.

- Algorithme de bat binaire (BBA)

L'algorithme BBA a été proposé par Mirjalili et al. en 2014. Une fonction de transfert en forme de V a été utilisée pour permettre à BBA de résoudre les problèmes binaires.

2.1. Comportement naturel :

La figure ci-dessous illustre les capacités de l'algorithme lors de la phase de détection de ses proies, les différentes étapes sont comme suit :

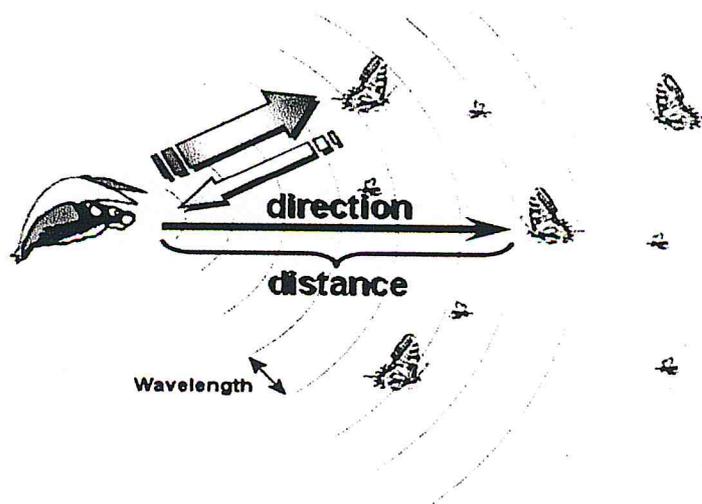


Figure 3.1 : Représentation schématique des capacités de chauve-souris [8].

- Au début, la chauve-souris survole aveuglement l'espace de recherche, tout en émettant des trains d'impulsions ultrasoniques, d'une certaine amplitude (intensité) et taux (densité).

- Entre les trains d'impulsions, elle perçoit les signaux de retour (son propre signal et, éventuellement, les signaux des autres chauves-souris de l'essaim), par écholocation et les interprète.
- Si les signaux reçus en retour ont une faible intensité et/ou un taux puissant, alors il est très probable qu'une proie soit détectée et la chauve-souris doit se diriger vers elle.
- Au fur et à mesure que la chauve souris s'approche de la proie, elle intensifie graduellement la qualité d'impulsions (le taux d'ultrasons) et, en même temps, diminue progressivement l'intensité de ces impulsions.
- Si les signaux reçus sont de taux très faibles, elle continue son vol à l'aveugle, sans changer l'intensité et le taux d'ultrasons émis.
- La distance jusqu'à la proie est estimée par l'effet de doppler en variant la fréquence des ultrasons émis, sur une bande assez large [31].

2.2. Comportement algorithmique :

L'algorithme de recherche BAT proposé dans ce travail est développé par Yang [9-12] et est utilisé pour résoudre divers problèmes d'optimisation. Chaque chauve-souris virtuelle dans la population initiale emploie une manière homologue en effectuant une façon d'écholocation pour mettre à jour sa position. L'écholocation de chauve-souris est un système de perception dans lequel une série d'ondes ultrasonores fortes sont libérées pour créer des échos. Ces ondes sont retournées avec les retards et les différents niveaux sonores qui qualifient les chauves-souris de repérer une proie spécifique. Certaines règles sont introduites pour étendre la structure de l'algorithme de BAT et d'utiliser les caractéristiques d'écholocation des chauves-souris [13-16]

(A) Chaque chauve-souris utilise les caractéristiques d'écholocation à classer entre la proie et la barrière.

(B) Chaque chauve-souris vole au hasard avec une vitesse v_i à la position x_i avec une fréquence fixe f_{\min} , Variant la longueur d'onde λ et l'intensité L_0 à chercher des proies. Il régule la fréquence de son pouls libéré et ajuste le taux d'impulsion de presse r dans la plage de $[0,1]$, en se fondant sur la proximité de son but.

(C) la fréquence, l'intensité et la fréquence d'impulsion libérée de chaque chauve-souris sont variées.

(D) L'intensité L_m^{iter} change d'une grande valeur L_0 à une valeur constante minimale L_{min} .

La position x_i et la vitesse v_i de chaque chauve-souris devraient être définies et mises à jour au cours de la tâche d'optimisation. Les nouvelles solutions x_i^t et vitesses v_i^t au temps t sont effectuées par les équations suivantes [16-18]:

$$f_i = f_{min} + (f_{max} - f_{min}) \alpha$$

$$v_i^t = v_i^{t-1} + (x_i^t + x^*) f_i$$

$$x_i^t = x_i^{t-1} + v_i^t$$

Où α dans l'échelle $[0, 1]$ est un vecteur aléatoire élaboré à partir d'une distribution uniforme. x^* est le meilleur emplacement mondiale actuel, qui est obtenue après avoir comparé tous les emplacements entre toutes les n chauves-souris. Comme le produit $\lambda_i f_i$ est l'incrément de vitesse, on peut considérer soit f_i (ou λ_i) pour régler le changement de vitesse tout en fixant l'autre facteur.

Pour la mise en œuvre, chaque chauve-souris est attribuée au hasard une fréquence qui est tirée uniformément de (f_{min}, f_{max}) . Pour la recherche locale, une fois qu'une solution est choisie parmi les meilleures solutions actuelles, une nouvelle solution pour chaque chauve-souris est générée en utilisant une marche aléatoire.

$$x_{new} = x_{old} + \varepsilon L^t,$$

Où, $\varepsilon \in [-1, 1]$ est un nombre aléatoire, tandis que L^t est le niveau moyen de l'intensité des chauves-souris à cette étape de temps. Comme l'intensité réduit habituellement une fois une chauve-souris a trouvé sa proie, tandis que le taux d'émission d'impulsion augmente, l'intensité peut être élue comme toute valeur de commodité. En supposant $L_{min} = 0$ signifie que la chauve-souris vient de trouver la proie et arrête temporairement d'émettre son, on a:

$$L_i^{t+1} = \beta L_i^t,$$

$$r_i^{t+1} = r_i^0 [1 - \exp(-\gamma t)],$$

Où β est une constante dans l'échelle $[0, 1]$ et γ est une constante positive. Au fil du temps atteint l'infini, l'intensité a tendance à être zéro, et γ_i^t est égal à γ_i^0 .

L'organigramme de l'algorithme de BAT est représenté dans la Figure (2.3)

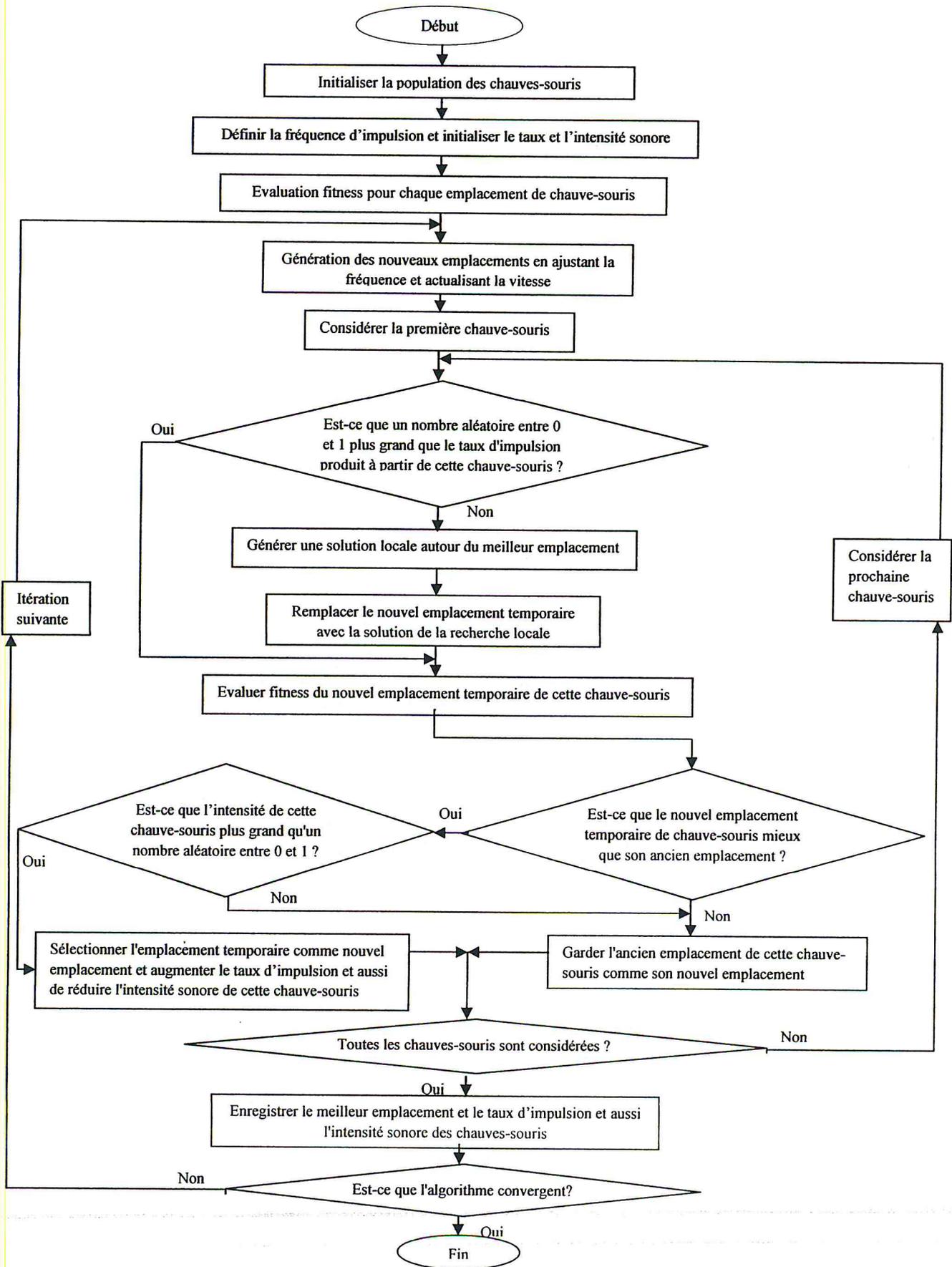


Figure 3.2 : Organigramme d'algorithme de recherche BAT [15].

3. Conception de l'algorithme :

Dans cette partie, nous présentons une nouvelle commande basée sur un algorithme BAT (Algorithme des Chauve-souris) proposée pour la poursuite du point de puissance maximale dans les systèmes photovoltaïques.

3.1. Description de l'algorithme BAT proposé :

Cet algorithme se déroule en de deux phases. La première phase consiste à la recherche du MPP alors que la deuxième consiste à la surveillance des changements climatiques qui peuvent perturber le point de fonctionnement du système et le réajuster pour s'adapter à ces derniers.

3.1.1 Phase1 : La recherche du MPP

Cette phase est composée de trois étapes principales :

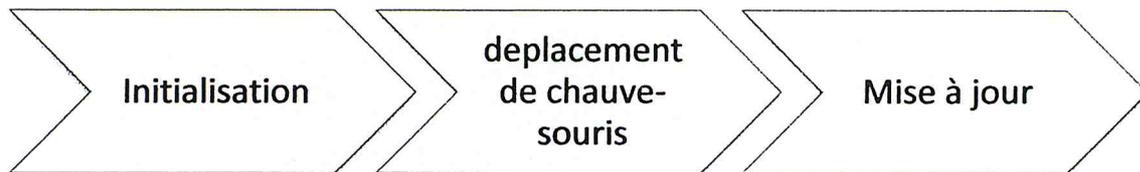


Figure 3.3 : BA: Phase de la recherche du MPP.

On commence par initialiser une archive dans laquelle on sauvegarde quelques solutions (une solution consiste en une valeur de la tension délivrée par GPV; Puis à chaque itération, de nouvelles solutions sont construites en se basant sur les solutions de l'archive et les valeurs de fréquence et vitesse. Ensuite, on met à jour l'archive à la fin de chaque itération la puissance délivrée est utilisée comme dans la plupart des travaux. L'algorithme est donné dans ce qui suit :

Algorithme : BAT « Phase de recherche du MPP »

Début

Initialiser les paramètres de l'algorithme (*Nb_iter* : le nombre maximal d'itérations, *K* : la taille de l'archive, *Nb_bats* : le nombre de chauve-souris...).

/* étape d'initialisation */

/* initialisation de l'archive */

Pour *i* = 1, à *K*

$archive[i] = rand() * V_{oc}$ /*génération une valeur sur l'intervalle[0, V_{oc}]/

$d_i = 1 - archive[i] / V_{oc}$ /* le calcul du rapport cyclique */

Envoyer d_i au convertisseur DC-DC

Mesurer le courant et la tension du panneau V_{pv} et I_{pv} respectivement

$P_{pv} = I_{pv} * V_{pv}$

Fin Pour

$t = 0$

Tant que ($t < Nb_iter$)

/* Génération des nouveaux emplacements en ajustant la fréquence et actualisant la vitesse */

Pour *i* = 1, à *Nb_bats*

$f_i = f_{min} + (f_{max} - f_{min}) * rand()$ /* ajustement de la fréquence */

$v_i^t = v_i^{t-1} + (x_i^t + x^*) * f_i$ /* actualisation de la vitesse associée à la $i^{ème}$ solution de l'archive */

$x_i^t = x_i^{t-1} + v_i^t$ /* génération de $i^{ème}$ solution de l'archive */

/* Phase de déplacement des chauves-souris */

Choisir un point de référence *k*

$bats[i] = archive[k] + Loudness * rand()$ /* génération une nouvelle solution autour meilleure solution*/

FinSi

$d_i = 1 - bats[i] / V_{oc}$ /* le calcul du rapport cyclique. */

Envoyer d_i au convertisseur DC-DC

Mesurer le courant et la tension du panneau I_{pv} et V_{pv} respectivement

$fitness_bat[i] = P_{pv} = I_{pv} * V_{pv}$

```

FinPour
t=t+1
Loudness = beta* Loudness /* critère d'intensité sonore*/
Rate=rate0*(1 - exp(-gama*t)) /* critère de taux d'impulsion*/
/* Mise à jour de l'archive */
Mettre à jour l'archive avec les K meilleures solutions parmi les
(Nb_bats + K) solutions.
Fin Tantque
Fin
    
```

a) Initialisation :



Figure 3.4 : BA : Phase d'initialisation.

L'algorithme BAT utilise une archive pour stocker un ensemble de solutions. Ces derniers sont utilisés comme une référence pour la génération de nouvelles solutions. Cette phase se déroule comme suit :

- On initialise l'archive avec des valeurs de tension V_i , $i=1...K$ générées aléatoirement sur l'intervalle $[0, V_{oc}]$.
- Pour chaque solution V_i , la fitness (la puissance P_i) est mesurée en changeant le rapport cyclique d_i du convertisseur DC-DC par la formule :

$$d_i = 1 - \frac{V_i}{V_{oc}}$$

- On sélectionne les m meilleures solutions de l'archive, n étant le nombre de chauve-souris.
- On initialise les quantités de fréquence f_i et de vitesse v_i des n solutions (où chaque solution correspond à une chauve-souris) par les formules :

$$f_i = f_{\min} + (f_{\max} - f_{\min}) \alpha$$

$$v_i^t = v_i^{t-1} + (x_i^t + x^*) f_i$$

$$x_i^t = x_i^{t-1} + v_i^t$$

α : variable générée aléatoirement sur l'intervalle $[0,1]$.

b) Déplacement des chauves-souris :

Le mouvement des chauves-souris est conditionné par les valeurs de fréquence f_i et de vitesse v_i précédemment calculées ; pour chaque chauve-souris:

- On sélectionne un point de référence X_k (la solution laquelle la chauve-souris est attirée) selon la puissance.
- Une fois le point de référence $X_k(t-1)$ sélectionné, la position de la $i^{\text{ème}}$ chauve-souris est obtenue par la relation :

$$X_i(t) = X_k(t-1) + L * \beta$$

β : variable générée aléatoirement sur l'intervalle $[0,1]$.

L : critère d'intensité sonore.

c) Mise à jour de solution :

A la fin de la deuxième étape de l'algorithme, n nouvelles solutions sont générées; on garde dans l'archive les K meilleures solutions parmi tous l'ensemble $(m+K)$.

Une fois l'archive mise à jour par les meilleures solutions, on sélectionne à nouveau les n meilleures solutions et on met à jour les fréquences et les vitesses.

La figure ci-dessous illustre les différentes étapes de la phase de recherche du MPP.

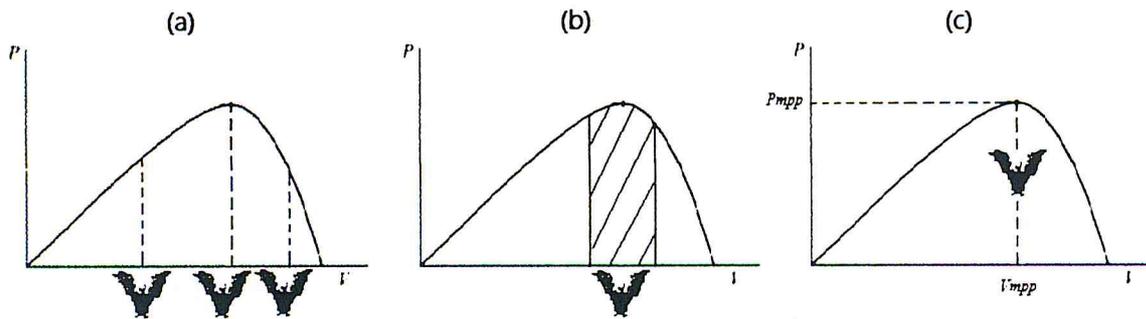


Figure 3.5 : Schéma représente la phase de la recherche de MPP. (a)initialisation, (b) restriction de l'espace de recherche, (c)détection du MPP

3.1.2 Phase 2 : Surveillance des changements climatiques

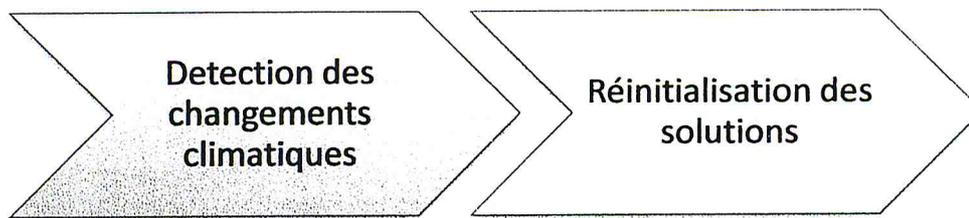


Figure 3.4 : BA: Phase de la surveillance des changements climatiques.

Dans cette phase on prend en considération les changements climatiques (augmentation ou diminution de l'irradiation solaire). Pour adapter l'algorithme afin de prendre en compte ces situations, nous avons pensé à réinitialiser les valeurs de l'archive et ré-exécuter l'algorithme de nouveau. La réinitialisation de l'archive est très cruciale pour la convergence de l'algorithme au nouveau point MPP.

4. Conclusion :

Dans ce chapitre; nous avons présenté la conception d'algorithme de recherche BAT pour la poursuite du MPP, en commençant par un aperçu sur l'algorithme et son comportement naturel et algorithmique, puis suivi de la phase conception.

Le chapitre prochain traite les détails de notre implémentation.

Chapitre 4

Implémentation et évaluation

1. Introduction :

Dans ce chapitre, nous présentons l'environnement de simulation et de développement choisis, les différents schémas de l'implémentation de notre système et nous discutons les résultats de la simulation.

2. L'environnement de simulation et de développement :

2.1. L'environnement de simulation Matlab/Simulink :

MATLAB (« *matrix laboratory* ») est un langage de programmation émulé par un environnement de développement du même nom ; il est utilisé à des fins de calcul numérique. Développé par la société The MathWorks, MATLAB permet de manipuler des matrices, d'afficher des courbes et des données, de mettre en œuvre des algorithmes, de créer des interfaces utilisateurs, et peut s'interfacer avec d'autres langages comme le C, C++, Java, et Fortran.

Il fait également partie d'un ensemble d'outils intégrés dédiés au traitement du Signal. En complément du noyau de calcul Matlab, l'environnement comprend des modules optionnels qui sont parfaitement intégrés à l'ensemble :

- Une vaste gamme de bibliothèques de fonctions spécialisées (Toolboxes).
- Simulink, un environnement puissant de modélisation basée sur les schémas-blocs et de simulation des systèmes dynamiques linéaires et non linéaires.
- Des bibliothèques de blocs Simulions spécialisés (Blocksets).
- D'autres modules dont un Compilateur, un générateur de code C, un accélérateur.
- Un ensemble d'outils intégrés dédiés au Traitement du Signal : le DSP Workshop.

SIMULINK est une plate-forme de simulation multi-domaine et de modélisation des systèmes dynamiques. Il fournit un environnement graphique et un ensemble de bibliothèques contenant des blocs de modélisation qui permettent le design précis, la simulation, l'implémentation et le contrôle de systèmes de communications et de traitement du signal.

2.2 L'environnement de développement Qt Creator :

Qt Creator est un environnement de développement intégré multi plateforme faisant partie du Framework Qt. Il est donc orienté pour la programmation en C++.

Il intègre directement dans l'interface un débogueur, un outil de création d'interfaces graphiques, des outils pour la publication de code sur Git et Mercurial ainsi que la documentation Qt. L'éditeur de texte intégré permet l'auto complétion ainsi que la coloration syntaxique. Qt Creator utilise sous Linux le compilateur gcc. Il peut utiliser MinGW ou le compilateur de Visual Studio sous Windows.

3. Plateforme de simulation :

Pour la simulation des différentes commande MPPT, Notre contribution dans le cadre de notre projet consiste en l'amélioration des performances d'une plateforme de simulation par l'ajout d'icône, l'insertion d'autres panneaux PV, ainsi que d'autres algorithmes.

3.1. Présentation de la plateforme :

Cette plateforme de test et de simulation pour les SPVs et les techniques MPPT composée de deux onglets principaux : le premier onglet pour la simulation, le second pour les différentes comparaisons des commandes.

La figure (4.1) et (4.2) illustrent l'interface de la plateforme. L'onglet *simulation* est utilisé pour tester et simuler les différents algorithmes MPPT proposées.

L'onglet *comparaison* permet de faire la comparaison entre les différentes traces d'exécution des algorithmes MPPT sélectionnés.

Les différentes parties de la plateforme sont :

- '1' : Visualisation du GPV montrant le niveau d'irradiation
- '2' : Le graphe montrant les courbes courant en fonction de la tension $I=f(V)$ et puissance en fonction de la tension $P=f(V)$.
- '3' : Configuration du GPV.
- '4' : Configuration des conditions climatiques.
- '5' : Configuration de l'algorithme MPPT testé.
- '6' : Control de simulation qui permet de démarrer, mettre en pause ou d'arrêter la simulation.
- '7' : La trace d'exécution de l'algorithme MPPT qui permet de faire l'évolution des valeurs courant, tension et puissance en fonction de temps.

'8' : Trace d'exécution pour chaque commande testée sous la forme de tableau.

'9' : Présentation graphique de la puissance en fonction de temps $P=f(t)$ pour chaque commande MPPT testé.

'10' : Liste des simulations qui indique à chaque exécution les différents paramètres d'initialisation, la configuration utilisée et les résultats obtenus.

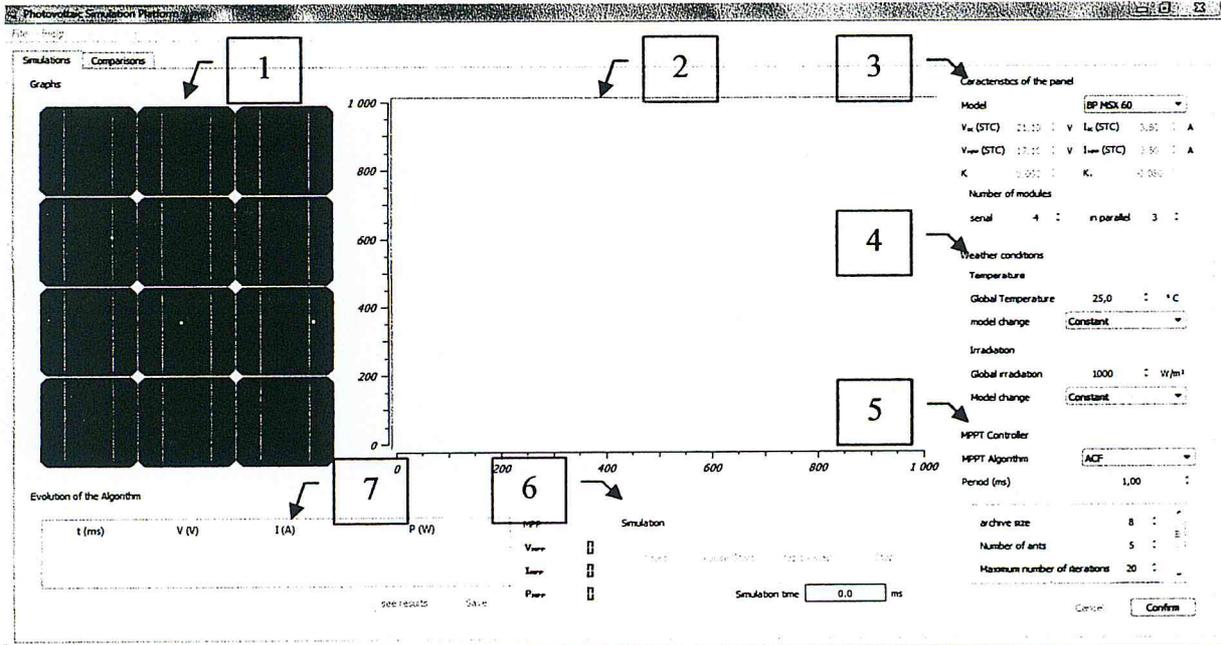


Figure 4.1 : L'interface d'onglet de simulation.

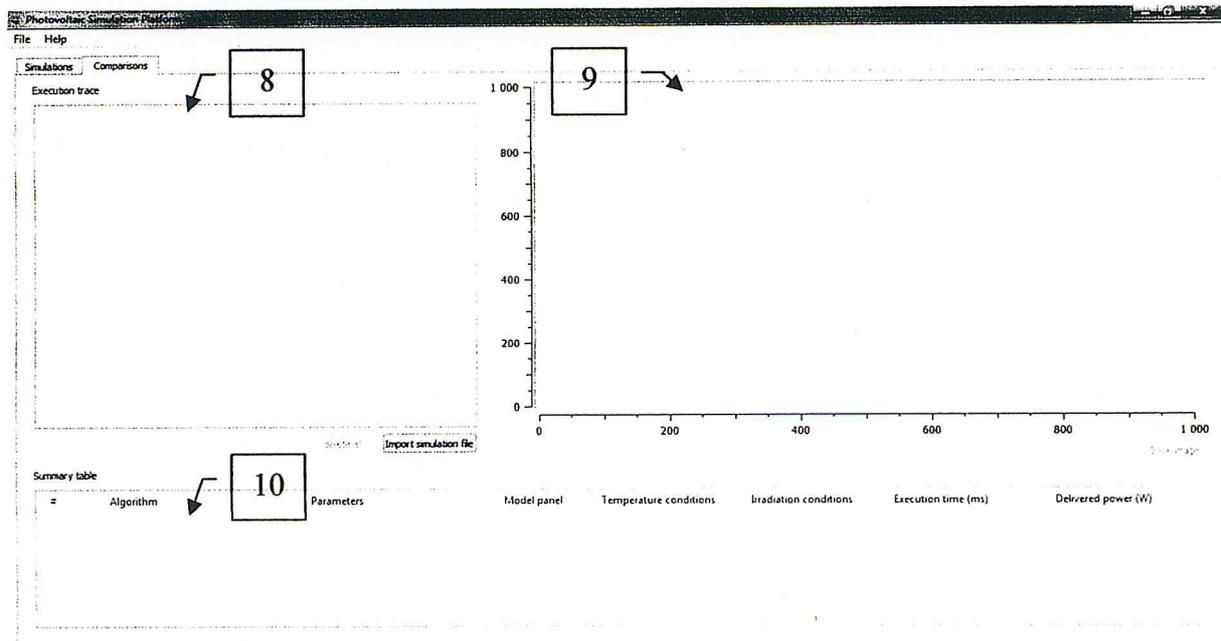


Figure 4.2 : L'interface d'onglet de comparaison.

4. Simulation du système photovoltaïque :

La figure représente le model simulink du système photovoltaïque.

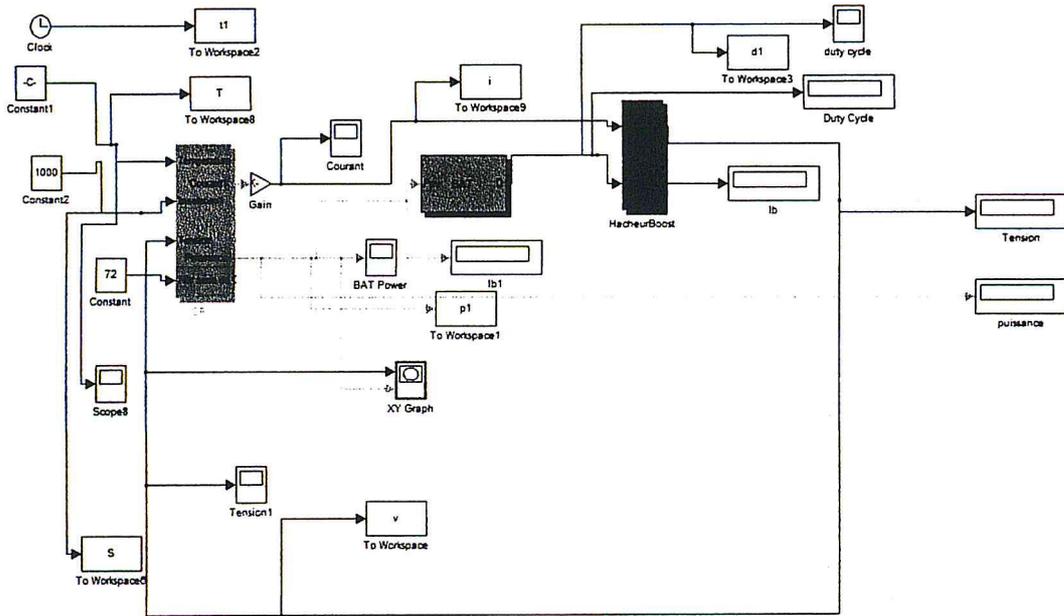


Figure 4.3 : Schéma du système PV en Matlab/Simulink.

Le model est constitué d'un panneau PV, le BP SOLAR MSX 120, de la commande MPPT implémenté et d'un hacheur Boost DC/DC.

La figure (4.4) Représente la fonction réalisant la commande MPPT, les paramètres d'entrée sont la puissance Ppv générée par GPV, et en sortie le rapport cyclique.. La fonction permet de chercher le point de fonctionnement optimal du GPV indépendamment des conditions climatiques. Son principe de régulation est basé sur la variation automatique du rapport cyclique D à la valeur adéquate de manière à maximiser continuellement la puissance générée par GPV.

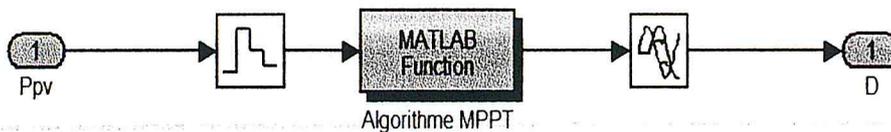


Figure 4.4: Schéma de la commande MPPT en Matlab/Simulink.

4.1. Evaluation des performances de la commande MPPT :

Afin d'évaluer les performances de notre contrôleur, plusieurs tests ont été élaborés. En premier, nous avons effectué des tests afin de sélectionner les paramètres adéquats de l'algorithme. Une fois les paramètres validés, nous avons effectué des tests afin d'examiner les effets de la température et de l'éclairage sur les performances de notre contrôleur. Une comparaison avec notre commande et la commande MPPT basée sur le contrôleur P&O ont été faites.

4.1.1. Sélection des paramètres de l'algorithme

La figure ci-dessous représente les différents tests effectués pour la sélection des paramètres. Pour cela, nous avons initialisé les paramètres de l'algorithme, par la suite variation de ces derniers est faite afin de diminuer les fluctuations de la courbe et que l'algorithme se stabilise à la meilleure configuration avec un temps de convergence adéquat. Le tableau ci dessous représente les paramètres de réglage de la méthode BAT avec des différents tests appliqués ainsi que le changement des paramètres.

K	n	fmax	loudness	Rate	Beta	gama	N iter	Pmax
8	5	3	0.5	0.5	0.5	0.5	20	120.1
6	4	3	0.5	0.5	0.5	0.5	20	122.6
6	4	3	0.7	0.3	0.5	0.5	18	119.7
6	4	3	0.7	0.3	0.5	0.5	17	120.1
5	3	3	0.7	0.3	0.7	0.7	15	123.3
5	3	3	0.7	0.3	0.9	0.9	13	123.8
5	3	2	0.8	0.2	0.9	0.9	10	123.8

Tableau 4.1 : Réglage de paramètres d'initialisation de BA.

Les différents tests nous ont permis de choisir les paramètres suivant :

- une taille de l'archive = 5,
- nombre de chauves souris = 3,
- nombre d'itérations = 10,
- fréquence max = 2,
- loudness = 0.8,
- beta = 0.9,
- gamma = 0.9

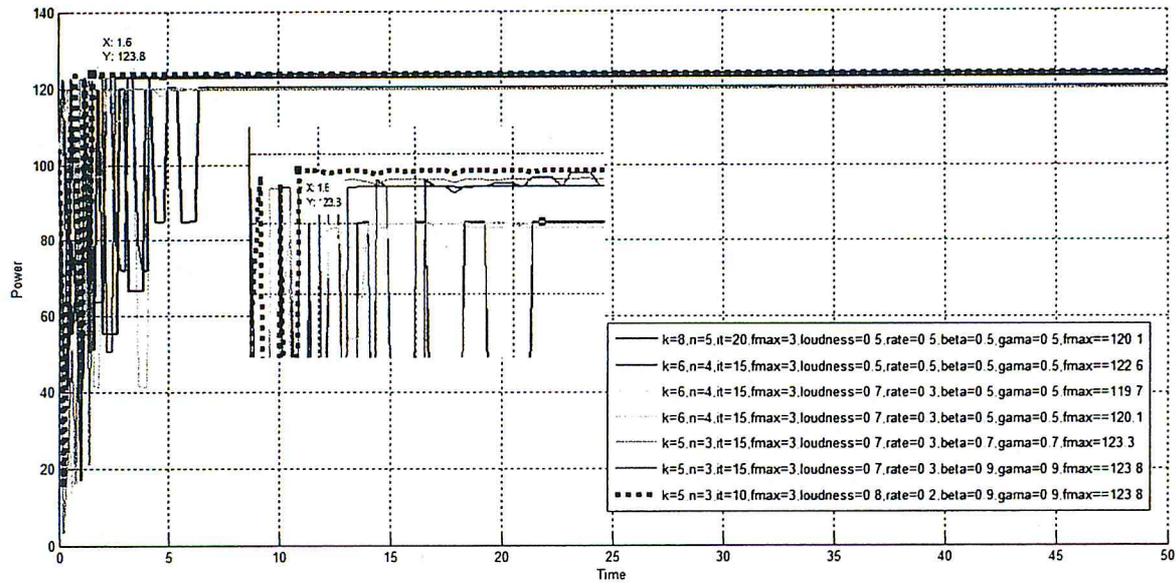


Figure 4.5 : Résultat de simulation de la poursuite du point MPP avec la commande BAT.

4.1.2 Test de convergence :

Lors du test de convergence, initialise les deux contrôleurs BAT et P&O dans un environnement de test aux conditions standard puis on observe le comportement de chacun d'eux, on calcule alors le temps nécessaire pour atteindre le point MPP. La figure 4.7 et 4.8 représentent respectivement les résultats de simulation des deux contrôleurs dans les conditions standard ($1000W/m^2, 25^\circ C$).

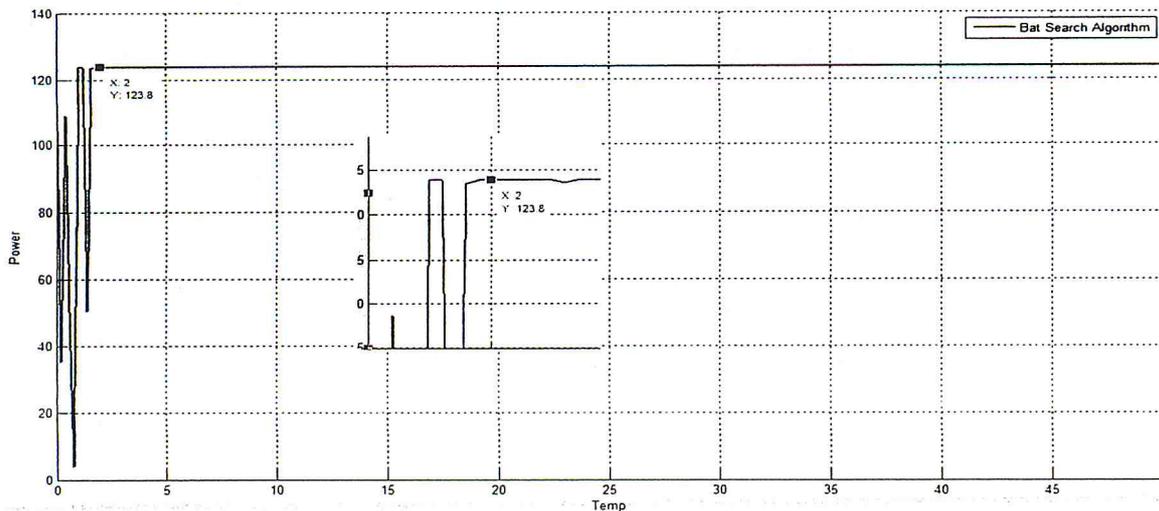


Figure 4.6 : variation de la puissance dans des conditions standards $E= 1000W/m^2$ et $T=25^\circ$.

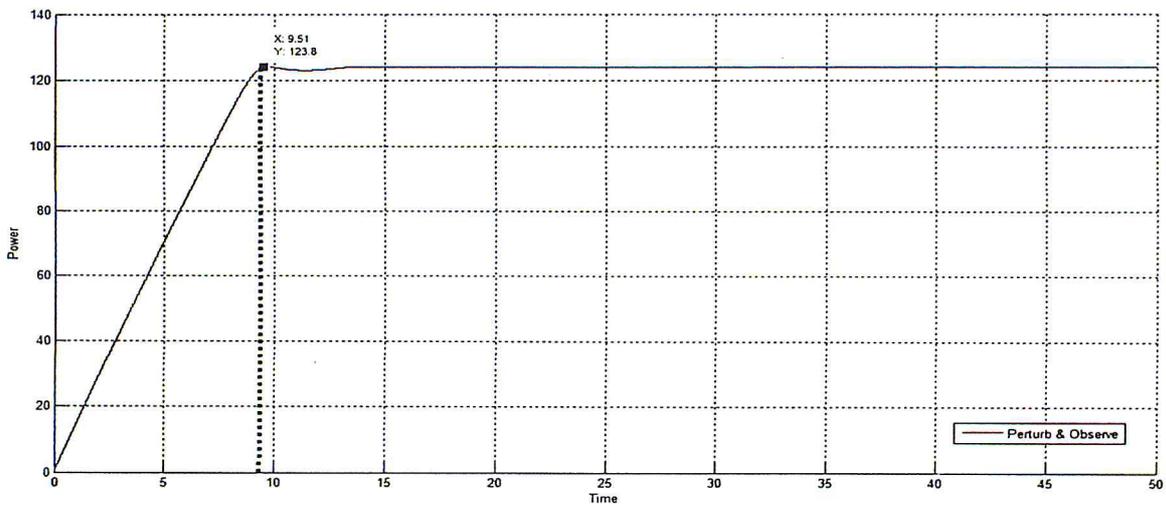


Figure 4.7 : variation de la puissance avec des conditions standards $E= 1000W/m^2$ et $T=25^\circ$.

La figure (4.8) montre une comparaison en termes de temps de réponse des deux contrôleurs.

D'après le résultat obtenu, on remarque que notre contrôleur converge rapidement vers le point MPP un temps rapide $t=2.5s$ contrairement au contrôleur P&O qui converge lentement vers le MPP avec un temps $t= 9.81s$

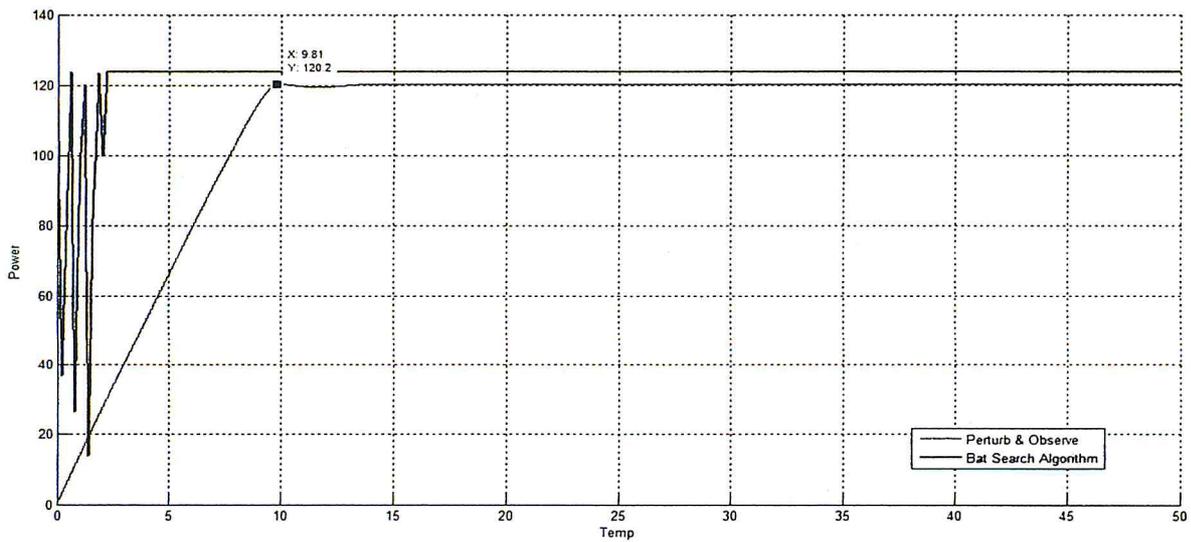


Figure 4.8 : variation des méthodes MPPT BAT et P&O aux des conditions standards de l'éclaircement et de la température $E=1000W/m^2$, $T=25^\circ$.

La figure 4.9 illustre les temps d'exécution des deux contrôleurs.

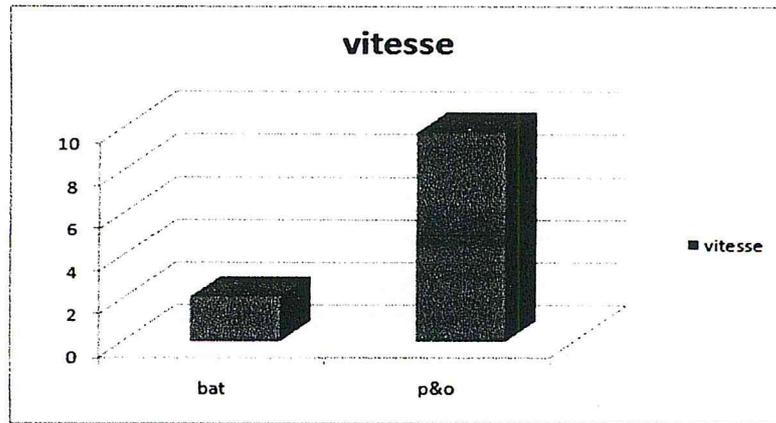


Figure 4.9 : temps d'exécution des méthodes BAT et P&O.

En conclusion, nous pouvons dire que le contrôleur P&O converge lentement vers le MPP parce que c'est un algorithme conventionnel.

4.2. Précision, stabilité, robustesse :

Dans cette partie, afin de valider l'efficacité et robustesse de notre contrôleur, nous avons procédé à des simulations des variations climatiques en augmentant et en diminuant rapidement de l'éclairement.

4.2.1. Augmentation rapide de l'éclairement :

La figure ci-dessous représente un signal qui permet au contrôleur de s'adapter au changement de l'éclairement lors d'un passage de l'éclairement de 500 à 1000W/m².

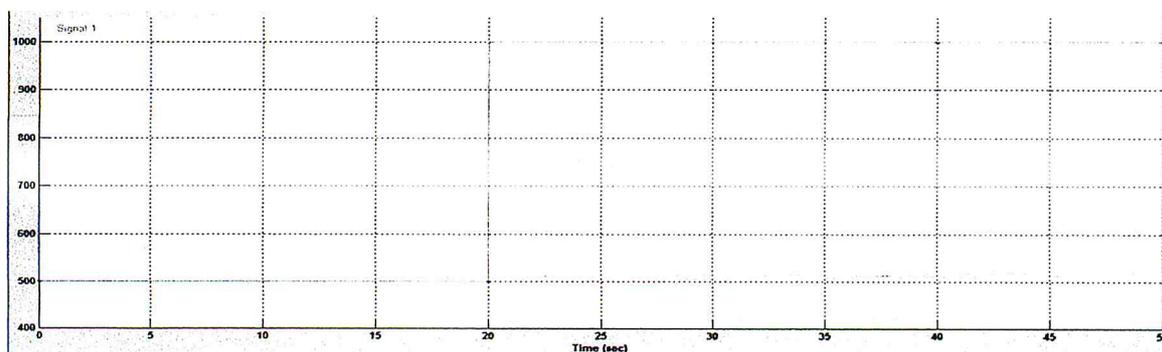


Figure 4.10 : signal du changement de l'éclairement de 500W/m² à 1000W/m².

La figure (4.11) représente l'effet du changement de 500W/m^2 à 1000W/m^2 de l'éclairement sur les deux contrôleurs.

On remarque que la commande BAT s'adapte rapidement au changement et que les courbes suivent exactement et s'adaptent à l'augmentation de l'éclairement. Contrairement au contrôleur P&O qui prend beaucoup plus de temps et s'adapte lentement au changement, il est moins stable, moins robuste.

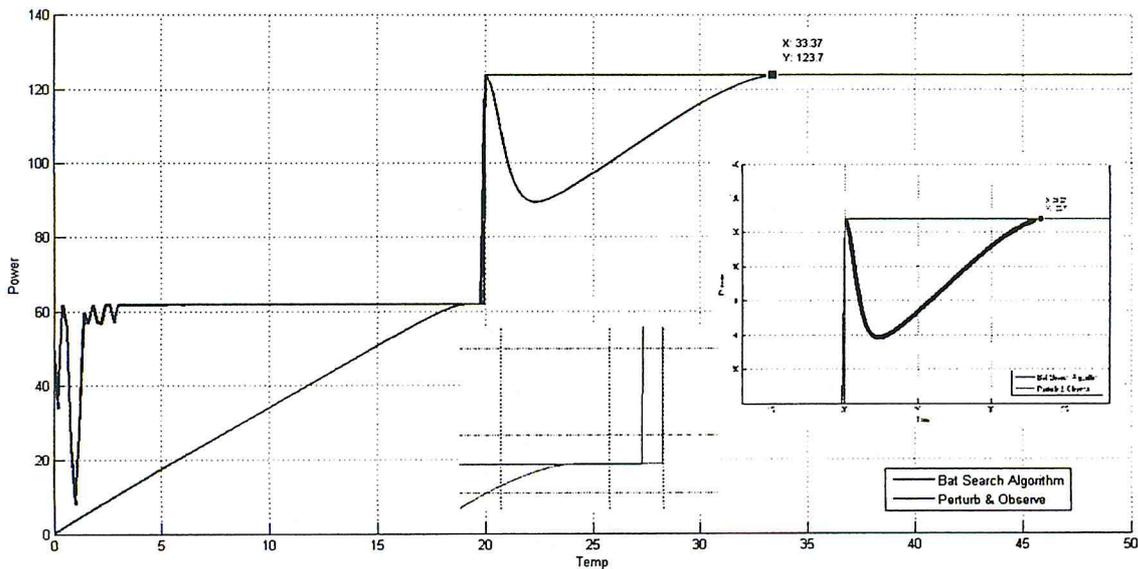


Figure 4.11 : variation des méthodes MPPT BAT et P&O selon l'augmentation rapide de l'éclairement de 500W/m^2 à 1000W/m^2 .

4.2.2. Diminution rapide de l'éclairement :

La figure ci-dessous représente un signal qui permet au contrôleur de s'adapter au changement de l'éclairement lors d'un passage de l'éclairement de 1000 à 500W/m^2 .

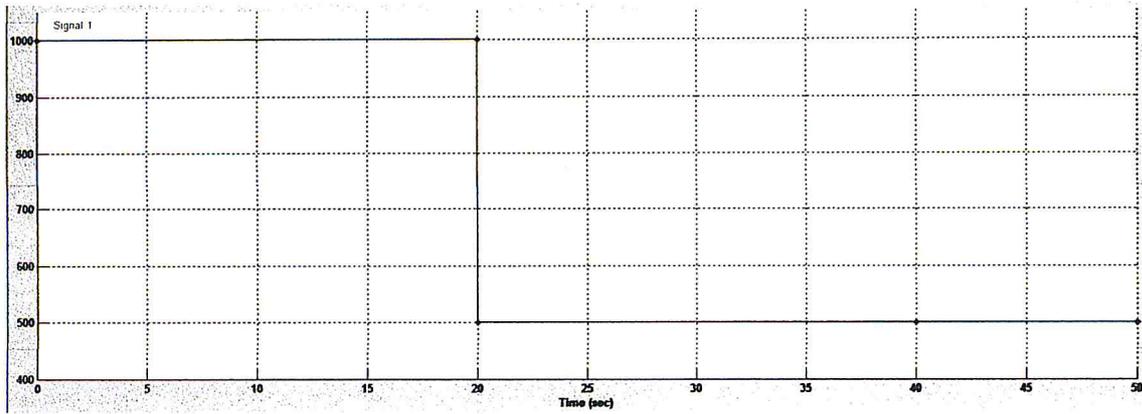


Figure 4.12 : signal du changement de l'éclairement de $1000W/m^2$ à $500W/m^2$.

D'après les résultats de simulation, on observe que selon le temps de reponse de notre controleur est plus rapide, plus précis et robuste par contre le P&O répond lentement avec des oscillations lors du passage de $1000W/m^2$ à $500W/m^2$.

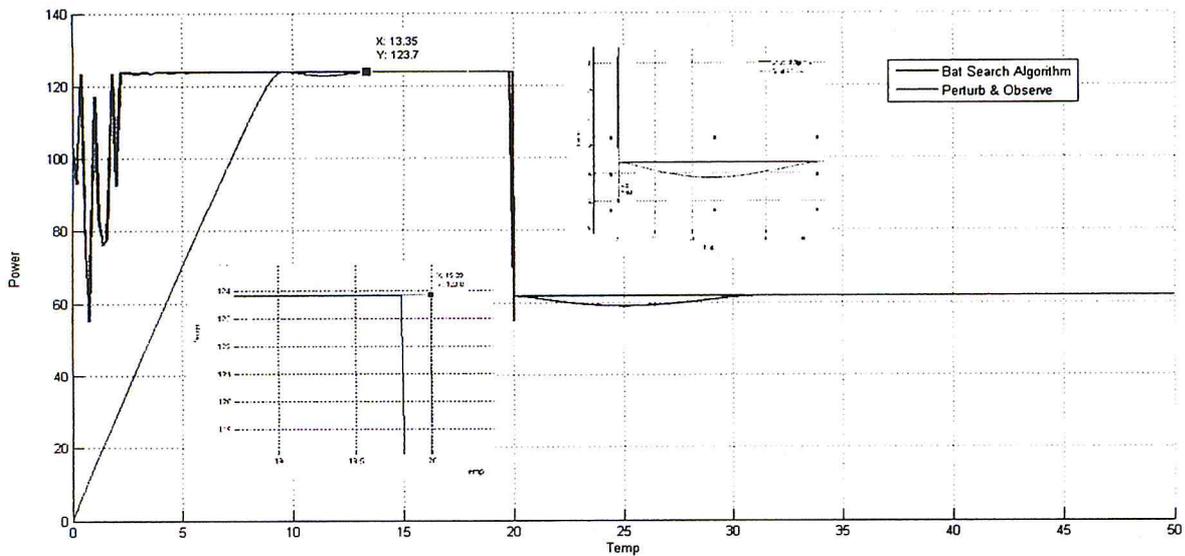


Figure 4.13 : variation des méthodes MPPT BAT et P&O selon la diminution rapide de l'éclairement de $1000W/m^2$ à $500W/m^2$.

4.2.3. Augmentation de l'éclairage avec transition :

On applique un signal du changement avec un temps de transition $t=5s$ lors du passage de $500W/m^2$ à $1000W/m^2$.

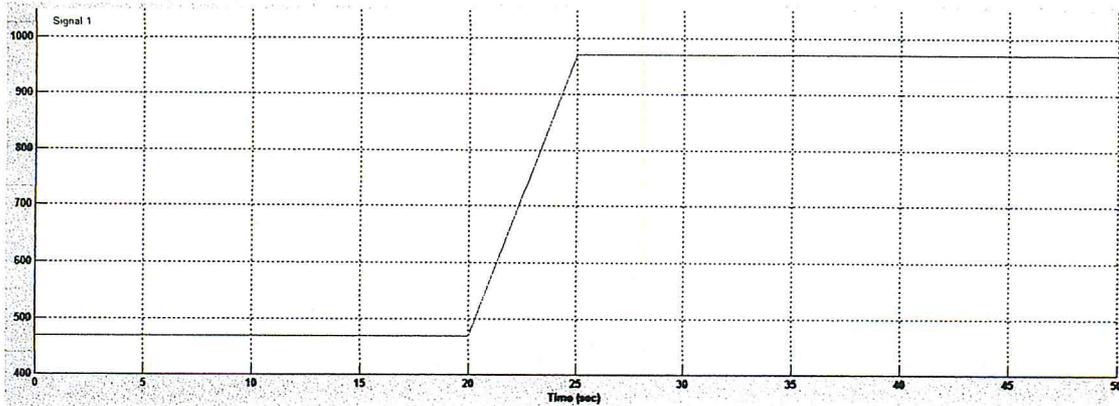


Figure 4.14 : signal du changement de l'éclairage de $500W/m^2$ à $1000W/m^2$ avec un temps de transition $t=5s$.

La figure (4.15) montre l'adaptation des méthodes BAT et P&O au changement rapide avec une transition de temps $t=5s$, on remarque que le BAT est rapide, robuste, et les chauve souris suivent exactement le changement. Le P&O prend du temps pour répondre au changement et s'adapte lentement pour atteindre le MPP.

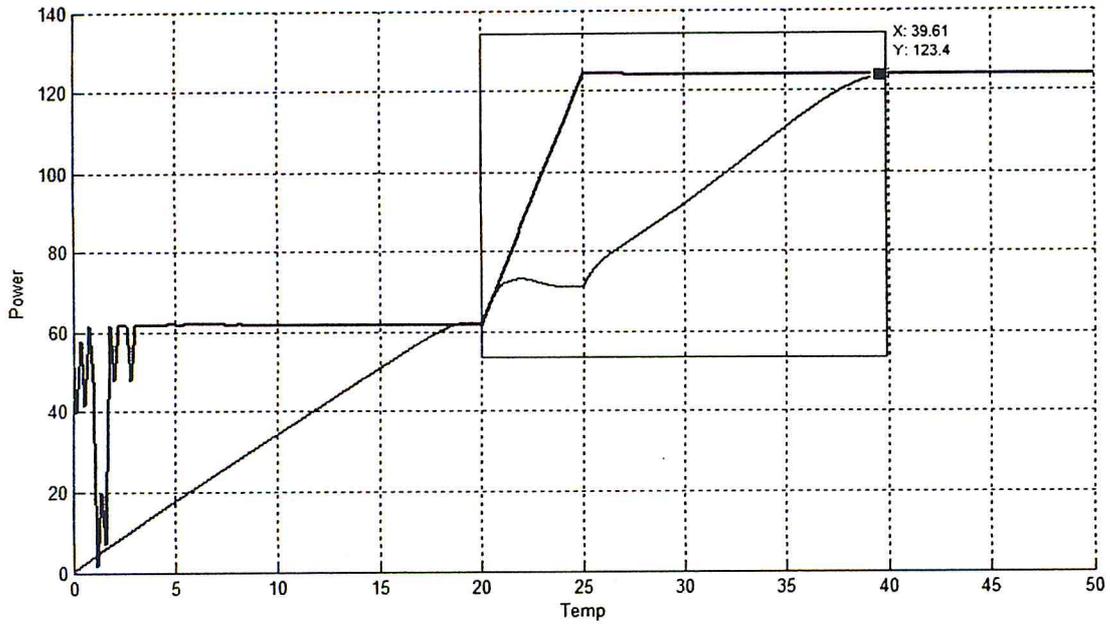


Figure 4.15 : variation des méthodes MPPT BAT et P&O selon l'augmentation rapide de l'éclairement de $500W/m^2$ à $1000W/m^2$.

4.2.4. Diminution de l'éclairement avec transition :

On applique un signal de changement climatique avec un temps de transition $t=5s$ lors du passage de $1000W/m^2$ à $500W/m^2$.

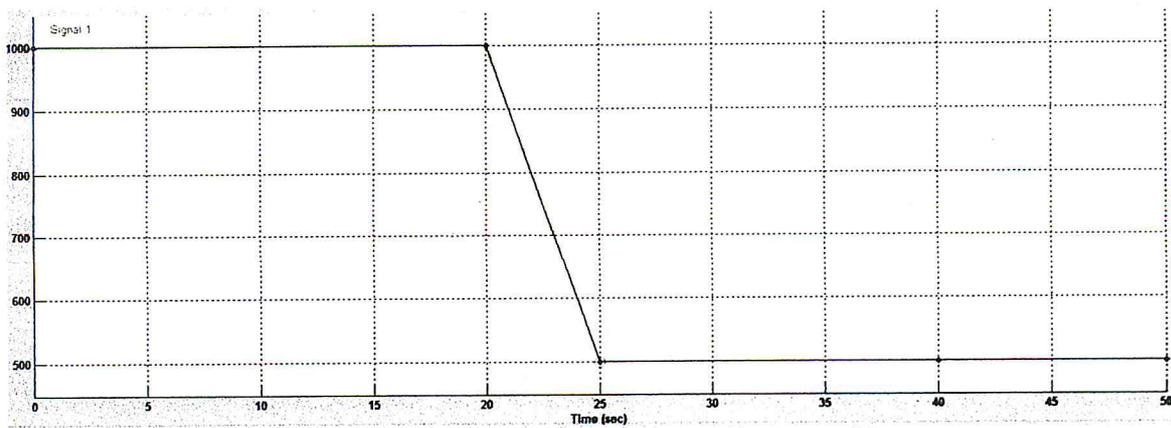


Figure 4.16 : signal de la diminution de l'éclairement de $1000W/m^2$ à $500W/m^2$ avec un temps de transition $t=5s$.

La figure (4.17) représente l'adaptation des méthodes BAT et P&O pour une diminution de l'éclairement de 1000W/m^2 à 500W/m^2 , on observe alors la robustesse du BAT par rapport a P&O qui est moins stable et moins robuste.

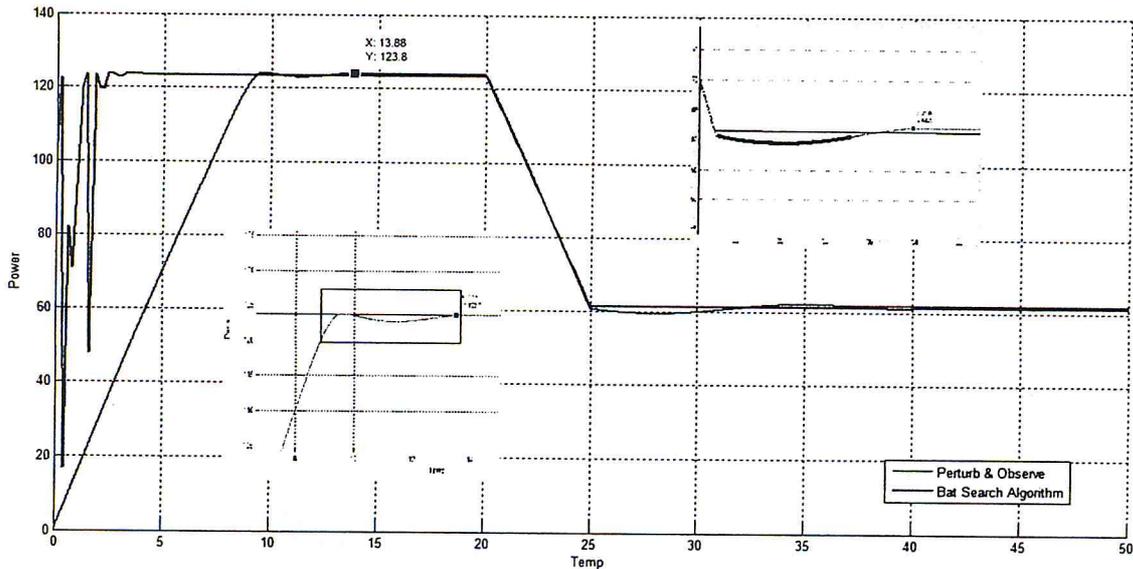


Figure 4.17 : variation des méthodes MPPT BAT et P&O selon la diminution rapide de l'éclairement de 1000W/m^2 à 500W/m^2 avec une transition de $t=5\text{s}$.

4.2.5. Augmentation rapide de la température :

Dans cette étape on agit aussi sur la caractéristique température, on fait augmenter rapidement et on observe la courbe afin que le contrôleur se stabilise autour de la MPP.

Comme illustré ci-dessous, nous faisons varier la température entre $T=5^\circ$ et $T=40^\circ$ et on observe la courbe.

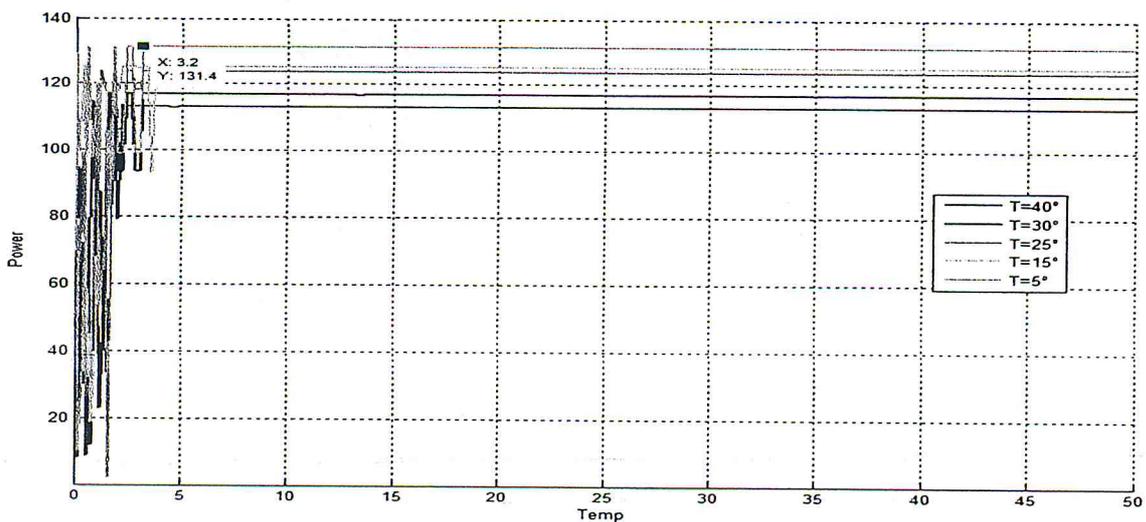


Figure 4.18 : variation des méthodes MPPT BAT selon l'augmentation rapide de la température de $T=5^\circ$ à $T=40^\circ$ avec une transition de $t=5\text{s}$.

Le résultat montre la simulation du contrôleur lorsque la température est réduite, ce qui permet au panneau d'atteindre la puissance maximale, par contre l'augmentation de la température diminue la puissance.

4.2.6. Diminution rapide de la température :

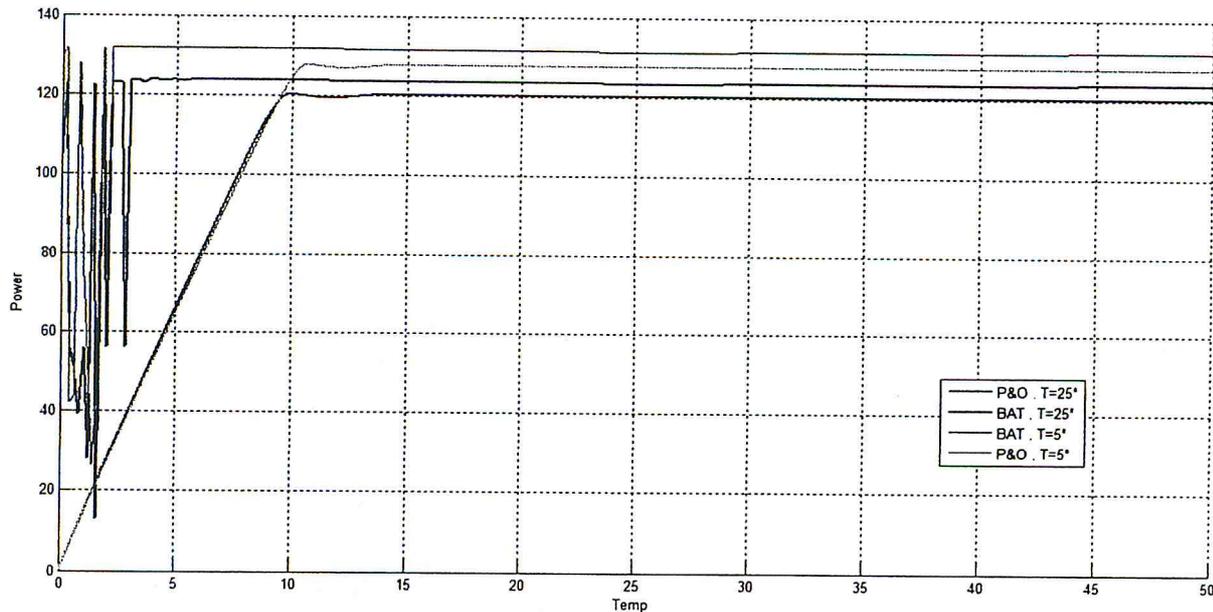


Figure 4.19 : variation des méthodes MPPT BAT et P&O selon la diminution rapide de la température de $T=25^{\circ}$ à $T=5^{\circ}$.

On observe l'effet du changement de la température dans deux cas différents $T=25^{\circ}$ et $T=5^{\circ}$, on remarque que la puissance augmente lors de la diminution et que le chauve souris est plus rapide et s'adapte mieux aux variations que le P&O dans les mêmes conditions.

5. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté l'environnement de simulation Matlab/Simulink. Nous avons présenté aussi la simulation du SPV et les différentes interfaces de l'application. Nous avons par la suite évalué les performances de notre contrôleur lors des simulations élaborés sous différents conditions climatiques.

Notre objectif étant de diminuer le temps d'exécution et d'extraire un maximum de puissance du GPV, nous avons donné une comparaison de notre méthode avec la méthode P&O par rapport à la vitesse de convergence, la précision, la stabilité et la robustesse.

Conclusion générale :

L'électricité solaire est vue comme étant une importante source d'énergie renouvelable. Le GPV est une source caractérisée par un certain point de fonctionnement où la puissance générée est maximale. Ce point se déplace en fonction des conditions atmosphériques. Un mécanisme de poursuite est donc nécessaire afin d'optimiser la puissance générée par le générateur PV.

Le fonctionnement de ce dernier est basé sur un algorithme d'optimisation.

Dans notre travail nous avons un contrôleur MPPT basé sur un algorithme intelligent.

Nous visons de développer d'autres métaheuristiques pour résoudre ce problème

Amélioration de cette commande et développer une plateforme de simulation en ajoutant d'autres commandes.

Dans le but de tests et valider l'efficacité de notre Contrôleur a été effectué moyennant l'outil matlab/simulink.

Les résultats de simulations de l'ensemble du système photovoltaïque montrent que l'approche proposée a donné des meilleurs résultats en termes de temps de réponse, stabilité et robustesse.

Bibliographie :

- [1] Luque, Antonio, and Steven Hegedus, eds. *Handbook of photovoltaic science and engineering*. John Wiley & Sons, 2011. %av in syst pv
- [2] Green, Martin A. "Solar cells: operating principles, technology, and system applications." (1982).
- [3] Picault, Damien. *Reduction of mismatch losses in grid-connected photovoltaic systems using alternative topologies*. Diss. Institut National Polytechnique de Grenoble-INPG, 2010.
- [4] Adouane, Mabrouk. *Etude et conception d'une stratégie de commande d'un onduleur connecté au réseau électrique*. Diss. Ecole nationale supérieure polytechnique, 2008. %3
- [5] Salim, I. S. S. A. A. D. I. *Commande d'une poursuite du point de puissance maximum (MPPT) par les réseaux de neurones*. Diss. Ecole nationale supérieure polytechnique, 2006.
- [6] Abouchabana, Nabil. *Etude d'une nouvelle topologie buck-boost appliquée à un MPPT*. Diss. Ecole nationale supérieure polytechnique, 2009. %7
- [7] Abbes, H., et al. "Etude comparative de cinq algorithmes de commande MPPT pour un système photovoltaïque." *Revue des Energies Renouvelables* 17.3 (2014): 435-445.
- [8] Yang, Xin-She. "A new metaheuristic bat-inspired algorithm." *Nature inspired cooperative strategies for optimization (NICSO 2010)*. Springer Berlin Heidelberg, 2010. 65-74.
- [9] Yang, Xin-She. "Bat algorithm for multi-objective optimisation." *International Journal of Bio-Inspired Computation* 3.5 (2011): 267-274.
- [10] Bora, Teodoro C., Leandro dos S. Coelho, and Luiz Lebensztajn. "Bat-inspired optimization approach for the brushless DC wheel motor problem." *Magnetics, IEEE Transactions on* 48.2 (2012): 947-950.
- [11] Yang, Xin-She, and Amir Hossein Gandomi. "Bat algorithm: a novel approach for global engineering optimization." *Engineering Computations* 29.5 (2012): 464-483.

- [12] ARUNA, S., and T. DEVA RAJU. "COMBINED ECONOMIC LOAD AND EMISSION DISPATCH EVALUTION USING BAT ALGORITHM." *nternational Recognition Multidisciplinary Research Journals* 3.5 (2013).
- [13] Ramesh, Bandi, V. Chandra Jagan Mohan, and VC Veera Reddy. "Application of bat algorithm for combined economic load and emission dispatch." *Int. J. of Electricl Engineering and Telecommunications* 2.1 (2013): 1-9.
- [14] Yang, Xin-She, and Xingshi He. "Bat algorithm: literature review and applications." *International Journal of Bio-Inspired Computation* 5.3 (2013): 141-149.
- [15] Biswal, S., et al. "Optimal power dispatch using BAT algorithm." *Energy Efficient Technologies for Sustainability (ICEETS), 2013 International Conference on.* IEEE, 2013.
- [16] Sambariya, D. K., and R. Prasad. "Robust tuning of power system stabilizer for small signal stability enhancement using metaheuristic bat algorithm." *International Journal of Electrical Power & Energy Systems* 61 (2014): 229-238.
- [17] Ali, E. S. "Optimization of power system stabilizers using BAT search algorithm." *International Journal of Electrical Power & Energy Systems* 61 (2014): 683-690.
- [18] Rodrigues, Douglas, et al. "A wrapper approach for feature selection based on bat algorithm and optimum-path forest." *Expert Systems with Applications* 41.5 (2014): 2250-2258.
- [19] Reisi, Ali Reza, Mohammad Hassan Moradi, and Shahriar Jamasb. "Classification and comparison of maximum power point tracking techniques for photovoltaic system: A review." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 19 (2013): 433-443.S
- [20] Abdelaziz, A. Y., and E. S. Ali. "Cuckoo Search algorithm based load frequency controller design for nonlinear interconnected power system." *International Journal of Electrical Power & Energy Systems* 73 (2015): 632-643.
- [21] Fister, Iztok, Xin-She Yang, and Janez Brest. "Modified firefly algorithm using quaternion representation." *Expert Systems with Applications* 40.18 (2013): 7220-7230.
- [22] Fister, Iztok, et al. "Planning the sports training sessions with the bat algorithm." *Neurocomputing* 149 (2015): 993-1002.

- [23] Abouda, Salim. *Contribution à la commande des systèmes photovoltaïques: application aux systèmes de pompes*. Diss. Reims, 2015.
- [24] El Fadil, H., and F. Giri. "Robust and nonlinear control of PWM DC-to-DC boost power converters." *2007 IEEE Power Electronics Specialists Conference*. IEEE, 2007.
- [25] Mrabti, T., et al. "Characterization and Fine Modelling of Electric Operation of Photovoltaic Panels." *Archives of Physics Research* 1.1 (2010): 1-11.
- [26] Lenine, D., Ch Sai Babu, and G. Shankaraiah. "Performance Evaluation of Fuzzy and PI Controller for Boost Converter with Active PFC." *International Journal of Power Electronics and Drive Systems* 2.4 (2012): 445.
- [27] Lu, Di. *Conception et contrôle d'un générateur PV actif à stockage intégré: application à l'agrégation de producteurs-consommateurs dans le cadre d'un micro réseau intelligent urbain*. Diss. Ecole Centrale de Lille, 2010.
- [28] Lenine, D., Ch Sai Babu, and G. Shankaraiah. "Performance Evaluation of Fuzzy and PI Controller for Boost Converter with Active PFC." *International Journal of Power Electronics and Drive Systems* 2.4 (2012): 445.
- [29] Abouda, Salim, et al. "Design, simulation and voltage control of standalone photovoltaic system based MPPT: application to a pumping system." *International Journal of Renewable Energy Research (IJRER)* 3.3 (2013): 538-549.
- [30] Khalifa, M. A., et al. "Commande vectorielle indirecte d'une pompe centrifuge photovoltaïque au fil de soleil." *Revue des Energies renouvelables, CICME Sousse (Tunisie)* (2008).
- [31] Mrabti, T., et al. "Amélioration du fonctionnement des systèmes photovoltaïques suite aux brusques variations des conditions météorologiques et de la charge." *Revue des Energies Renouvelables* 11.1 (2008): 107-117.
- [32] Altas, Ismail H., and Adel M. Sharaf. "Novel Control strategies using load matching for maximum photovoltaic energy utilization." *2007 Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering*. IEEE, 2007.

[33] Makhloufi, Mohamed Tahar, Yassine Abdessemed, and Mohamed Salah Khireddine. "Maximum power point tracker for photovoltaic systems using on-line learning neural networks." *International Journal of Computer Applications* 72.10 (2013).

[34] Messaoudene, Hichem. *Détermination intelligente de la puissance maximale des modules photovoltaïques*. Diss. 2013.

[35] Olasagasti, Enaut Muxika. *Application des réseaux de neurones à l'identification d'un axe de machine-outil*. Diss. Institut National Polytechnique de Grenoble-INPG, 2002.

[36] Femia, Nicola, et al. "Optimization of perturb and observe maximum power point tracking method." *IEEE transactions on power electronics* 20.4 (2005): 963-973.

[37] Petrone, Giovanni, et al. "Reliability issues in photovoltaic power processing systems." *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 55.7 (2008): 2569-2580.

[38] Safari, Azadeh, and Saad Mekhilef. "Simulation and hardware implementation of incremental conductance MPPT with direct control method using cuk converter." *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 58.4 (2011): 1154-1161.