

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR

ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE SAAD DAHLAB, BLIDA



FACULTE DES SCIENCES

DEPARTEMENT INFORMATIQUE

Mémoire en vue de l'obtention du diplôme de Master II

Spécialité : Génie des Systèmes Informatiques

Thème :

*Contribution à l'optimisation de puissance dans les
systèmes photovoltaïques par un algorithme
intelligent*

Présenté par :

M^{lle} Hacene Houda

M^{lle} Bouchenafa Soumia

Promoteur : Mr Y.Djenouri

Encadré par : Mme S.Titri

President de jury : M. Benzakou
Examinateur : Bouteoumi

Année Universitaire 2015-2016

MA-004-326-1

Remerciement

Avant tout, nous tenons à remercier notre Dieu de nous avoir

Donné le courage et la force pour réaliser ce travail.

Toute chose réalisée et crée en ce monde est le résultat

D'un travail collectif de diverses personnes d'où on remercie profondément

Mme: S.Titri , pour son attention, Ses conseils fructueux

Et critiques constructives qu'il a bien voulu

Nous accorder tout on long de notre stage.

Tout le personnel de CDTA Pour leur accueil.

Ainsi que notre promoteur

Mr : Y.Djenouri pour sa profonde aide .Nous remercions tous les Enseignants

Du Département informatique d'USBD

*En fin nous remercions tous ceux qui ont participé de près ou de loin Pour nous
permettre d'accomplir ce modeste travail.*

Dédicace

*Tous les mots ne sauraient exprimer la gratitude, l'amour, le respect, la reconnaissance, c'est tout simplement que : Je dédie Je dédie ce travail:
A Ma tendre Mère Fatma : Tu représentes pour moi la source de tendresse et l'exemple de dévouement qui n'a pas cessé de m'encourager. Tu as fait plus qu'une mère puisse faire pour que ses enfants suivent le bon chemin dans leur vie et leurs études.*

A Mon très cher Père Missoum : Aucune dédicace ne saurait exprimer l'amour, l'estime, le dévouement et le respect que j'ai toujours pour vous. Rien au monde ne vaut les efforts fournis jour et nuit pour mon éducation et mon bien être. Ce travail et le fruit de tes sacrifices que tu as consentis pour mon éducation et ma

A mes chers frères Amine et Ghoulem

A mes très chères sœurs Sara et Hadjer

A toute ma famille

A mes très chers amies : Sara et Rachaa

A tous mes collègues qui m'ont apporté

L'aide et le soutien durant toute la période du projet.

A Tous ceux que j'ai connus.

Soumia



Dédicace

*Tous d'abord, je remercie le dieu, notre créateur de m'avoir donnés,
Les forces, la volonté et le courage afin d'accomplir ce modeste travail.
Je remercie mes très chers parents, Boualem et Nacira, qui ont toujours été là
pour moi, « Vous avez tout sacrifié pour vos enfants n'épargnant ni santé ni
efforts. Vous m'avez donné un magnifique modèle de labeur et de
persévérance. Je suis redevable d'une éducation dont je suis fière ».*

*J'adresse mes sincères remerciements à tous les professeurs, intervenants et
toutes les personnes qui par leurs paroles, leurs écrits, leurs conseils et leurs
critiques ont guidé mes réflexions et ont accepté à me rencontrer et répondre à
mes questions durant mes recherches.*

*Je remercie mon seul et meilleur frère Mohamed, mes sœurs Amina et Meriem
pour leurs encouragements, et très spécialement mon chers oncle Mohamed sans
oublier mon Abdelaziz.*

*Je tiens à remercie Soumia ma binôme, pour son amitié et son aide, son soutien
inconditionnel et son encouragements sans oublier mes plus proches*

ami(e)s « Asmaa, Lamia et Lila, Mohamed et Riadh, Nesrine et Meriem A.

Enfin, je remercie tous mes ami(e)s que j'aime spécialement « Amina, Houda,

Micha ».

HouDa



Résumé :

La poursuite du point de puissance maximale (MPPT : Maximum Power Point Tracker) joue un rôle très important pour l'obtention de la puissance maximale d'un panneau solaire, car il permet d'assurer un fonctionnement optimal d'un système photovoltaïque, quelles que soient les conditions de variations d'ensoleillement et de température. Dans ce sens, nous présentons dans ce document, une technique pour l'amélioration et l'optimisation des performances de contrôle d'un système, composé d'un panneau photovoltaïque, d'un Boost série et d'une charge. Ce contrôle est effectué en utilisant un algorithme basé sur une méta-heuristique. Des simulations sont développées sous Matlab/Simulink, permettant ainsi une comparaison entre les performances des contrôleurs étudiés. Cet algorithme de commande MPPT est testé, sous les conditions météorologiques (changements climatiques). Les résultats obtenus, sous différentes conditions de fonctionnement, montrent une nette amélioration des performances de contrôle MPPT d'un système photovoltaïque.

Mots clés : MPPT, Système Photovoltaïque, Metaheuristique, ACO.

Sommaire

Liste des figures	10
Liste des tableau	12
Liste d'abréviations	13
Introduction général	14
Chapitre 1 : Généralité sur les systèmes Photovoltaïque	
1.1 Introduction	17
1.2 Historique et état actuelle	17
1.3 Avantages et Inconvénients de l'énergie photovoltaïque	18
1.3.1 Avantages	18
1.3.2 Inconvénients	18
1.4 Le système photovoltaïque	18
1.5 La cellule photovoltaïque (PV) et l'effet photovoltaïque	19
1.5.1 La modélisation d'une cellule PV	20
1.5.2 Les paramètre d'une cellule photovoltaïque	21
1.6 Générateur photovoltaïque (GPV)	22
1.6.1 Les caractéristiques d'un GPV	22
1.6.2 Influence de l'éclairement et la température sur les courbes $I=f(V)$ et $P=f(V)$	24
1.6.3 Groupement de Cellules Photovoltaïques	26
1.7 Convertisseur DC/DC (Direct Curent/Direct Curent)	29
1.8 La charge	30
1.9 La commande MPPT	31
1.10 Conclusion	31
Chapitre 2 : Technique d'optimisation dans un système photovoltaïque	
2.1 Introduction	34
2.2 Principe de la Recherche du MPP	34
2.3 Classification des commandes MPPT	34
2.3.1 Les méthodes classiques	35

2.3.2 Les méthodes intelligentes	40
2.4 Critères d'évaluation d'une commande MPPT	43
2.4.1 Flexibilité	43
2.4.2 Réponse dynamique	43
2.4.3 Simplicité et Cout	44
2.4.4 Compétitive sur une large gamme de puissance	44
2.5 Conclusion	44

Chapitre 3 : Commande MPPT basée sur une méta-heuristique(ACO)

3.1 Introduction	46
3.2 Les Méthodes Méta-heuristiques	46
3.3 Les fourmis en nature	48
3.3.1 Méthode de communication chez les fourmis	48
3.3.2 Recherche de nourriture chez les fourmis (Le fourragement)	48
3.4 Optimisation par Colonie de fourmis	50
3.4.1 Algorithme de fourmis bas sur la recherche de nourriture	50
3.5 Description de l'algorithme proposé	51
3.5.1 La phase d'initialisation	51
3.5.2 La phase de déplacement des fourmis	51
3.5.3 La phase de mise à jour de l'archive	52
3.6 Conclusion	53

Chapitre 4 : Résultats et simulations

4.1 Introduction	55
4.2 L'outil Matlab/Simulink	55
4.3 Système photovoltaïque proposée	55
4.4 Simulation de la commande MPPT	58
4.4.1 Test de la vitesse de convergence	59
4.4.2 Test de stabilité, précision et robustesse	61
4.5 Conclusion :	66

Conclusion général	67
-------------------------------------	-----------

Références	68
-----------------------------	-----------

Table des figures

Figure 1.1 :Les composants d'un système photovoltaïque.	19
Figure 1.2 : L'effet photovoltaïque.....	19
Figure 1.3 :Circuit électrique simple d'une cellule PV.....	20
Figure 1.4 :Schéma équivalent d'une cellule PV avec deux diodes.....	21
Figure 1.5 :Cellule, module, panneau.....	22
Figure 1.6 :Les caractéristiques dans les conditions standard.....	23
Figure 1.7 ;L'influence de l'éclairement sur la caractéristique $I=f(V)$	24
Figure 1.8 :L'influence de l'éclairement sur la caractéristique $P=f(V)$	25
Figure 1.9 :L'influence de la température sur la caractéristique $I=f(V)$	25
Figure 1.10 : L'influence de la température sur la caractéristique $P=f(V)$	26
Figure 1.10 :Schéma de 2 cellules photovoltaïques associées en série.....	27
Figure 1.11 :Caractéristique I-V de 2 cellules photovoltaïques raccordées en Série.....	27
Figure 1.12 :Schéma de deux (2) cellules photovoltaïques associées en parallèle.	28
Figure 1.13 : Caractéristique I-V de deux(2) cellules PV raccordées en parallèle.	28
Figure 1.14 :Groupement mixte de cellules PV.....	29
Figure 1.15 :Convertisseur DC/DC (type Boost).....	30
Figure 1.16 :Système photovoltaïque	31
Figure 2.1 :Principe de la première commande MPPT numérique	36
Figure 2.4 :Organigramme de la méthode P&O.....	37
Figure 2.3 :Caractéristique de la puissance du générateur PV.....	37
Figure 2.4 :Positionnement du point de fonctionnement	39
Figure 2.5 :Organigramme de la méthode IC	40
Figure 2.6 :Exemple d'un réseau de neurones.....	41
Figure 2.7 :Organigramme de la méthode PSO.....	43

Figure 3.1 :Classes des méta-heuristiques	47
Figure 3.2 :Les fourmis en nature.	49
Figure 3.3 :Effet de la coupure d'une piste de phéromone.	49
Figure 3.4 :Phases principales d'ACO	51
Figure 4.1 :Model Simulink du système photovoltaïque	56
Figure 4.2 :Différents panneaux de GPV.	56
Figure 4.3 :Paramètres du panneau photovoltaïque BP Solar MSX 120.	57
Figure 4.4 :Caractéristique I/V	57
Figure 4.5 :Caractéristiques P/V.	58
Figure 4.6 : Différent courbes P(t) sous le changement de température.....	59
Figure 4.7 : La courbe P(t) de ACO.....	59
Figure 4.8 :La courbe P(t) de P&O.	60
Figure 4.9 : Caractéristique P(t) d'ANN	60
Figure 4.10 : La courbe P(t) de ACO, P&O et ANN	61
Figure 4.11 : Signal d'ensoleillement.	62
Figure 4.12 : La courbe P(T) sous changement rapide de l'ensoleillement	62
Figure 4.13 : Caractéristique P(t) sous variation rapide de l'ensoleillement de différentes commandes	63
Figure 4.14 : Signal de variations de l'ensoleillement	64
Figure 4.15 : La courbe P(t) dans le cas d'ombrage partiel.	64
Figure 4.16 : La comparaison entre les différentes commandes avec la courbe P (t)	65

Liste des tableaux

Tableau 1.1 : Les différents types de convertisseurs	29
Tableau 2.1 : Tableau résume l’algorithme P&O	38
Tableau 4.1 : Résultats de simulation dans les conditions standard.....	61
Tableau 4.2 : Résultats de simulation sous variation rapide de l’ensoleillement.....	63
Tableau 4.3 : Résultats de simulation de variation de l’ensoleillement.....	65

Liste d'abréviations

ACO : Ant Colony Optimisation

ANN : Artificiel Neural Network

DC-DC : Direct Curent-Direct Curent

GPV : Générateur Photovoltaïque

IC: Incremental Conductance

IncCond: Incremental Conductance

Isc: current short-circuit

MPP: Maximum Power Point

MPPT : Maximum Power Point Tracking

P&O : Perturbation et Observation

PPM : Point de Puissance Maximale

PSO : Particle Swarm Optimization

PV : Photovoltaïque

Voc : Tension Open-circuit

Introduction général

La production d'énergie est un défi de grande importance pour les années à venir. En effet, les besoins énergétiques des sociétés industrialisées ne cessent d'augmenter. Par ailleurs, les pays en voie de développement auront besoin de plus en plus d'énergie pour mener à bien leur développement. De nos jours, une grande partie de la production mondiale d'énergie est assurée à partir de sources fossiles. La consommation de ces sources donne lieu à des émissions de gaz à effet de serre et donc une augmentation de la pollution. Le danger supplémentaire est qu'une consommation excessive du stock de ressources naturelles réduit les réserves de ce type d'énergie de façon dangereuse pour les générations futures.

Ces problèmes conduisent les recherches vers le développement des sources d'énergie renouvelables qui devient de plus en plus une solution parmi les options énergétiques prometteuses avec des avantages comme l'abondance, l'absence de toute pollution et la disponibilité en plus ou moins grandes quantités en tout point du globe terrestre. Les énergies renouvelables sont des énergies issues du soleil, du vent, de la géothermie, des chutes d'eau, des marées ou de la biomasse. Leur exploitation n'engendre pas ou peu de déchets et d'émissions polluantes, ce sont les énergies de l'avenir. Ces énergies regroupent un certain nombre de filières technologiques selon la source d'énergie valorisée et l'énergie utile obtenue.

La filière étudiée dans ce mémoire est l'énergie photovoltaïque qui connaît une progression rapide en raison de son potentiel significatif comme source d'énergie renouvelable. Les systèmes photovoltaïques semblent bien s'imposer comme moyen de conversion de l'énergie solaire en énergie électrique. Cependant, le rendement de la conversion photovoltaïque reste relativement faible.

Sachant que lors de fonctionnement du Générateur photovoltaïque, adapter par un convertisseur d'énergie, le point de puissance maximale peut être dégradé suite aux variations des conditions météorologiques. L'énergie produite par un générateur photovoltaïque GPV n'est pas constante durant toute la journée elle dépend de plusieurs facteurs parmi lesquels il y'a l'ensoleillement et la température qui sont des paramètres très fluctuants d'une saison à l'autre ou même d'une instant à l'autre, pour chaque ensoleillement et température la caractéristique (puissance-tension) passe par un maximum.

Pour extraire le maximum de puissance du module photovoltaïque, il faut réaliser une poursuite en temps réel, autrement dit au fil de la variation de l'ensoleillement et la température, le

Le système doit être commandé de telle manière à se trouver au voisinage de puissance maximum MPP.

L'objectif de ce mémoire est d'appliquer un algorithme ou une loi de commande efficace et optimale permettant d'extraire le maximum de puissance disponible à partir du générateur photovoltaïque (GPV) à l'aide d'un contrôleur MPPT. Nous allons étudier un algorithme d'intelligent qui permet la recherche et la poursuite du point à maximum de puissance appelé «Maximum power point tracking» (MPPT) respectant les Conditions climatiques et Par la suite, nous allons comparer cette technique avec d'autres techniques utilisés dans le contrôle des systèmes photovoltaïques.

La présentation de ce travail est organisée comme suit :

Après une brève introduction, nous exposons dans le premier chapitre la modélisation électrique du système en donnant le principe de fonctionnement de chaque élément constituant le système photovoltaïque. Dans le second chapitre, nous avons essayé de présenter les différentes techniques utilisées comme traqueur du point MPP notamment les méthodes conventionnelles (P&O, IncCon), et les méthodes intelligentes les essaims de particule (PSO), et les réseaux de neurones en citant leurs avantages et inconvénients. Le chapitre 3 est consacré à la présentation et modélisation de l'algorithme proposé. Le quatrième chapitre traite des différents tests et résultats de simulations des comportements du système PV face aux changements de l'éclairement G et la température T . Enfin, nous terminons notre contribution par une conclusion sur nos travaux d'investigation tout en proposant quelques perspectives pour faire évoluer ce travail.



CHAPITRE 1 :

Généralités sur les systèmes photovoltaïques

1.1 Introduction

Dans les dernières années, la croissance du besoin en énergie ainsi que la pollution provenant de l'utilisation des énergies fossiles poussent le grand public à utiliser les énergies renouvelables. Dans ce contexte, l'énergie photovoltaïque est l'un des importantes sources d'énergie renouvelable qui présente un dénouement à nos problèmes de production d'énergie. Les systèmes photovoltaïques semblent bien s'imposer comme moyen de conversion de l'énergie solaire en énergie électrique. Un tel système se compose d'un champ de modules et d'un ensemble de composants qui adaptent l'électricité produite par les modules aux spécifications des récepteurs.

Pour comprendre le fonctionnement de cette énergie et en optimiser son utilisation, nous effectuons dans ce chapitre un bref rappel sur le principe des systèmes photovoltaïques, ses composants, ses avantages et ses inconvénients.

1.2 Historique et état actuelle

- Le terme « photovoltaïque » vient du Grec, il est composé de deux parties : « photon » (grains de lumière) et du nom de famille du physicien italien (Alessandro Volta) qui inventa la pile électrique en 1800 et donna son nom à l'unité de mesure de la tension électrique, le volt [1].
- L'effet photovoltaïque, c'est-à-dire la production d'électricité directement de la lumière, fut observée la première fois, en 1839, par le physicien français Edmond Becquerel. Dans les années 1880, l'américain Charles Fritts mit au point les premières cellules solaires au sélénium [1]. Mais c'est Albert Einstein qui le premier, a pu expliquer le principe photovoltaïque [2].
- Le premier satellite envoyé dans l'espace doté de panneaux solaires est Vanguard 1. Il a été mis en orbite le 17 mars 1958.
- L'énergie photovoltaïque eut un regain d'intérêt dans les années 1960 lors des premiers lancements spatiaux de satellites puis lors des missions lunaires. Les crises économiques des années 1970, puis les accidents de centrales nucléaires renforcèrent l'intérêt du grand public envers les énergies renouvelables, et en particulier l'énergie photovoltaïque qui s'impose comme une des sources d'énergies renouvelables les plus prometteuses [1].

1.3 Avantages et Inconvénients de l'énergie photovoltaïque

I.3.1 Avantages

- Elle fournit de l'électricité grâce à l'énergie gratuite et renouvelable du soleil.
- Elle fournit de l'électricité aux zones rurales les plus isolées.
- Elle peut être intégrée de manière esthétique dans les bâtiments.
- Elle ne génère ni bruit, ni gaz polluants à carburant, elle est silencieuse, non polluante et respectueuse de l'environnement.
- Les modules photovoltaïques sont recyclables et les matériaux utilisés pour leur production peuvent être réutilisés.

I.3.2 Inconvénients

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

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

I.4 Le système photovoltaïque

Un système photovoltaïque est constitué de quatre blocs comme le montre (la figure 1.1). Le premier bloc représente la source d'énergie (générateur photovoltaïque GPV), le second bloc est un convertisseur statique DC-DC, le troisième bloc représente la charge et le quatrième bloc représente la commande MPPT.

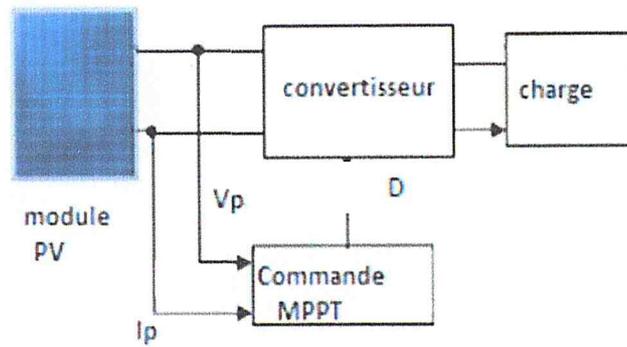


Figure 1 .1 : Les composants d'un système photovoltaïque [1].

Avec :

I_p : le courant.

V_p : la tension.

D : le rapport cyclique.

1.5 La cellule photovoltaïque (PV) et l'effet photovoltaïque

Aussi appelée « photopile », est le composant élémentaire d'un panneau photovoltaïque. Elle permet de transformer l'énergie solaire en énergie électrique. Cette transformation est appelée l'effet photovoltaïque c'est la conversion directe de l'énergie du rayonnement solaire en énergie électrique au moyen de cellules PV.

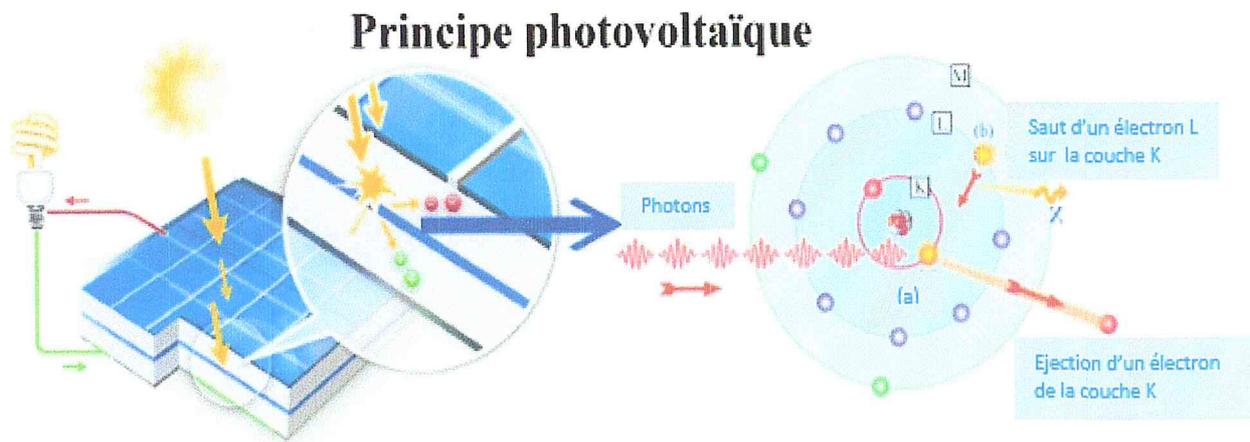


Figure 1.2 : L'effet photovoltaïque [1].

Il peut être expliqué par le fait qu'un photon reçu du rayonnement solaire, heurte une cellule PV, son énergie peut être transférée à un électron dans le matériau semi-conducteur de la cellule.

Chapitre 1 : Généralités sur les systèmes photovoltaïques

Avec cette énergie supplémentaire, l'électron peut alors s'échapper de sa position normale dans l'atome, créant ainsi un trou qui deviendra une partie d'un courant dans un circuit électrique. [3]

1.5.1 La modélisation d'une cellule PV

Le modèle le plus simple d'une cellule PV se compose d'une diode parallèle à une source de courant idéal (Figure I.3) et deux résistances parasites sont introduites dans ce schéma [4].

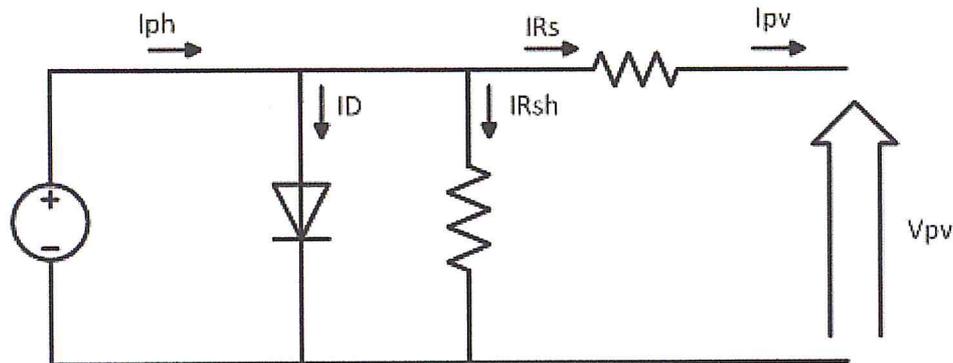


Figure 1.3 : Circuit électrique simple d'une cellule PV [4].

Le courant généré de ce modèle est donné par la loi de Kirchhoff (KCL) ci-dessous :

$$I_{PV} = I_{ph} - I_{sat} \left[\exp\left(\frac{e(V_{PV} + (I_{PV} * R_{ser}))}{nKT}\right) - 1 \right] - \frac{V_{PV} + (I_{PV} * R_{ser})}{R_{shu}} \quad \dots (1.1)$$

Où I_{sat} est le courant de saturation, K est la constante de Boltzmann ($1,381 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$), T est la température effective des cellules en Kelvin(K), e est la charge de l'électron ($e=1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$), n est le facteur d'idéalité de la jonction ($1 < n < 3$), I_{pv} est le courant fourni par la cellule lorsqu'elle fonctionne en générateur, V_{pv} est la tension aux bornes de cette même cellule, I_{ph} est le photocourant de la cellule dépendant de l'éclairement et de la température ou bien courant de court-circuit (I_{cc}), R_{shu} est la résistance shunt caractérisant les courants de fuite de la jonction, R_{ser} est la résistance série représentant les diverses résistances de contacts et de connexions [3].

Dans notre étude, nous allons utiliser le modèle mathématique d'une cellule photovoltaïque avec deux diodes [4]. La figure ci-dessous illustre le schéma équivalent d'une cellule PV à deux diodes.

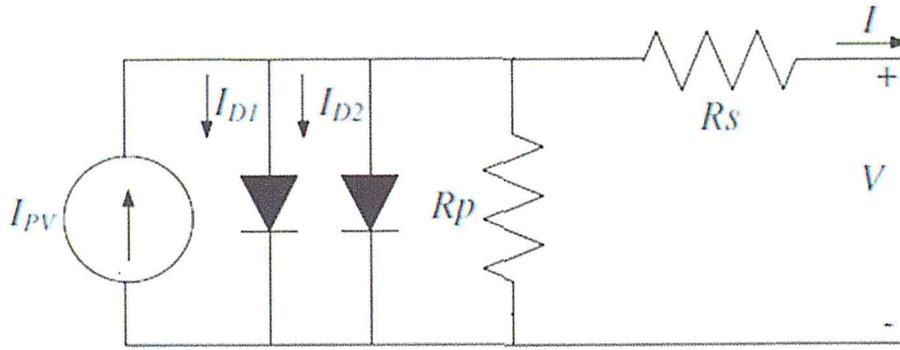


Figure 1.4 Schéma équivalent d'une cellule PV avec deux diodes [4].

• R_s : Résistance série représentant les diverses résistances des contacts et de connexion.

• R_p : Résistance de shunt caractérisant les courants de fuites de la jonction.

Avec un tel circuit électrique équivalent, Le courant généré de ce modèle est donné par [3] :

$$I = I_{PV} - I_{o1} \left[\exp \left(\frac{V + IR_s}{a_1 V_{T1}} \right) - 1 \right] - I_{o2} \left[\exp \left(\frac{V + IR_s}{a_2 V_{T2}} \right) - 1 \right] - \left(\frac{V + IR_s}{R_p} \right) \quad (1.2)$$

Où :

- I : courant fourni par la cellule.
- I_{pv} : photocourant créé par la cellule (proportionnel au rayonnement incident).
- I_{o1}, I_{o2} : courant des diodes 1 et 2.
- R_s : Résistance série.
- R_{sh} : Résistance parallèle.
- V : tension aux bornes de la cellule.
- T_1, T_2 : température.

1.5.2 Les paramètres d'une cellule photovoltaïque

• Courant de court-circuit (I_{cc}) :

C'est le courant pour lequel la tension aux bornes de la cellule ou du générateur PV est nulle. Quantitativement, il a la plus grande valeur du courant généré par la cellule pratiquement $I_{CC} = I_{ph}$ [1].

• Tension de circuit-ouvert (V_{co})

Chapitre 1 : Généralités sur les systèmes photovoltaïques

C'est la tension V_{co} pour laquelle le courant débité par le générateur photovoltaïque est nul (c'est la tension maximale d'une photopile ou d'un générateur photovoltaïque) [1].

.Rendement énergétique η :

Ce paramètre reflète la qualité de conversion de l'énergie solaire en énergie électrique. C'est le rapport entre la puissance électrique maximale fournie par la cellule P_{max} et la puissance solaire incidente [1].

1.6 Générateur photovoltaïque (GPV)

Le générateur photovoltaïque est un ensemble de modules mis en place pour exploiter l'énergie photovoltaïque afin de satisfaire les besoins en charge. Le terme générateur photovoltaïque GPV est utilisé pour désigner, un module ou un panneau PV. La cellule solaire, de forme ronde ou carrée est l'élément de base d'un système solaire. Un ensemble de cellules forme un module solaire, plusieurs modules forment un panneau solaire. La puissance fournie par une seule cellule solaire étant très faible, plusieurs cellules dont les caractéristiques sont semblables doivent être électriquement associées et encapsulées dans un plastique pour former un GPV. Le câblage série-parallèle est donc utilisé pour obtenir globalement un générateur PV aux caractéristiques souhaitées : La connexion en série des cellules permet d'augmenter la tension de l'ensemble, tandis que la mise en parallèle permet d'accroître le courant [1] [3].

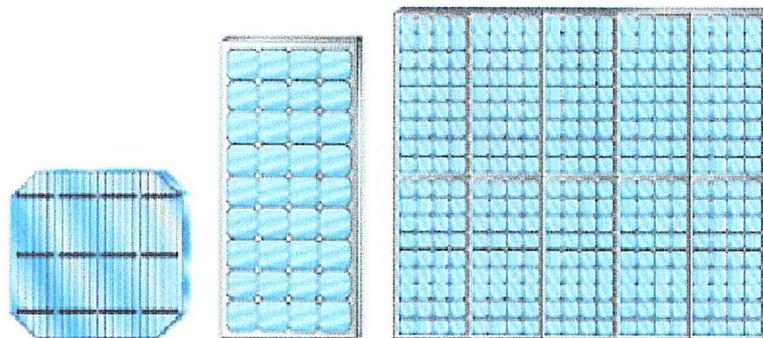


Figure 1.5 : cellule, module, panneau [1].

1.6.1 Les caractéristiques d'un GPV:

Un module photovoltaïque est constitué d'un ensemble de cellules photovoltaïques élémentaires montées en série et/ou en parallèle afin d'obtenir des caractéristiques électriques

b) Caractéristique de Puissance-Tension :

Elle indique que la quantité d'énergie produite par la cellule PV varie considérablement selon ses conditions opérationnelles. Il est important de faire fonctionner le système au MPP de la cellule PV afin d'exploiter sa puissance maximale [8].

1.6.2 Influence de l'éclairement et la température sur les courbes $I=f(V)$ et $P=f(V)$

La figure (1.7) montre l'influence de l'éclairement sur les caractéristiques $I=f(V)$, à une température constante, on constate que le courant subit une variation importante, par contre la tension varie légèrement, car le courant de court-circuit (I_{cc}) est une fonction linéaire de l'éclairement alors que la tension de circuit ouvert est une fonction logarithmique.

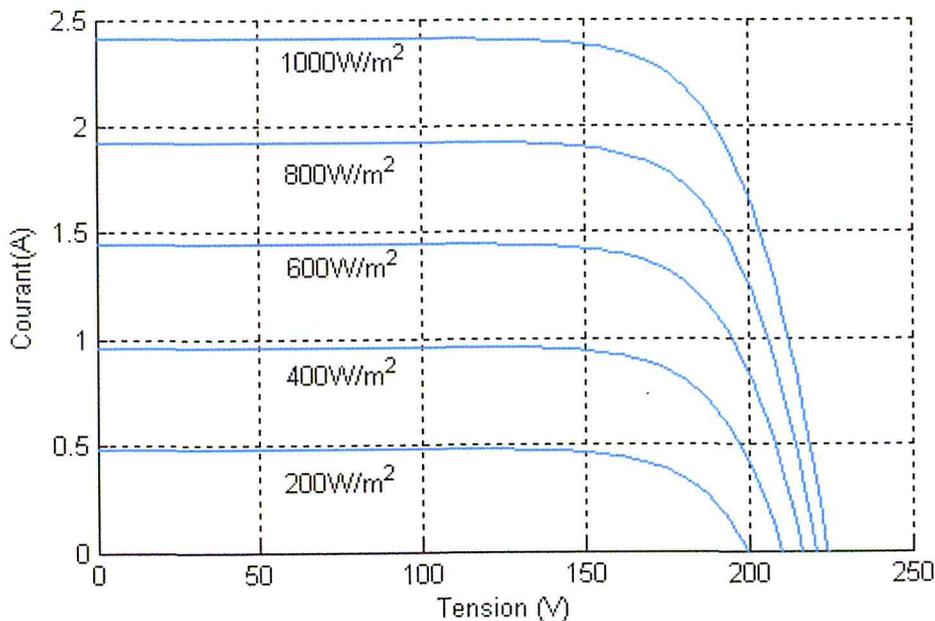


Figure 1.7 : L'influence de l'éclairement sur la caractéristique $I=f(V)$ [7].

La figure (1.8) 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 $P(V)$.

Chapitre 1 : Généralités sur les systèmes photovoltaïques

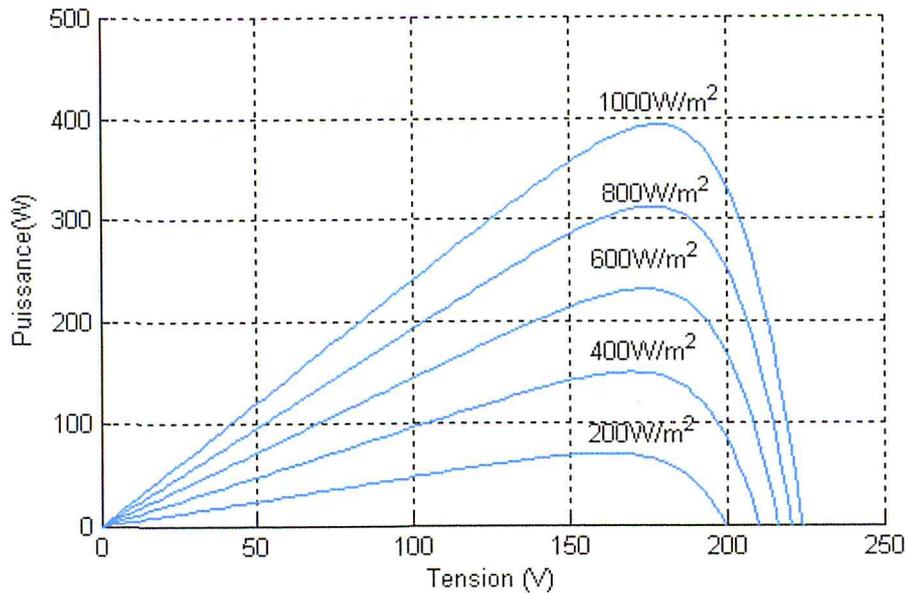


Figure 1.8 : L'influence de l'éclairement sur la caractéristique $P=f(V)$ [7].

La figure ci-dessous montre l'influence de la température sur la caractéristique $I=f(V)$. Le courant dépend de la température puisque le courant augmente légèrement à mesure que la température augmente, mais la température influe négativement sur la tension de circuit ouvert. Quand la température augmente la tension de circuit ouvert diminue. Par conséquent la puissance maximale du générateur subit une diminution.

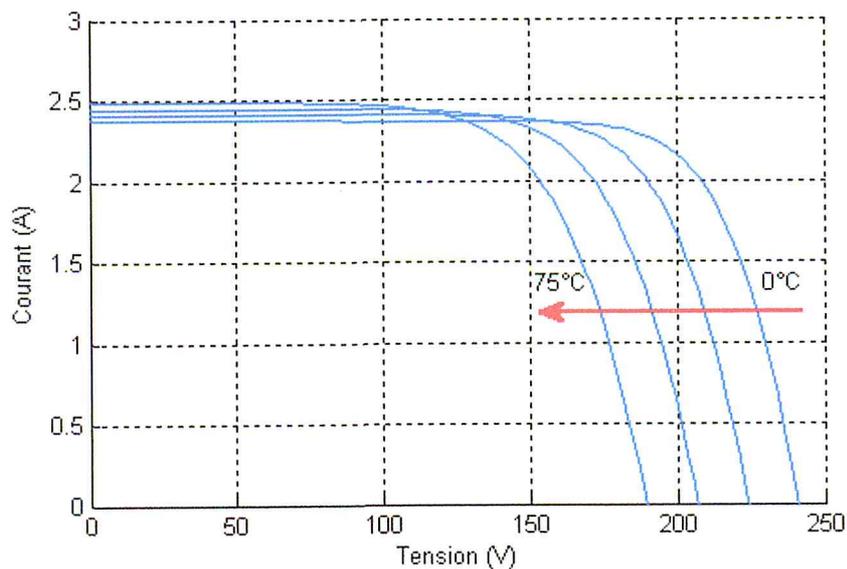


Figure 1.9 : L'influence de la température sur la caractéristique $I=f(V)$ [7].

Chapitre 1 : Généralités sur les systèmes photovoltaïques

La figure (1.10) 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 $P=f(V)$.

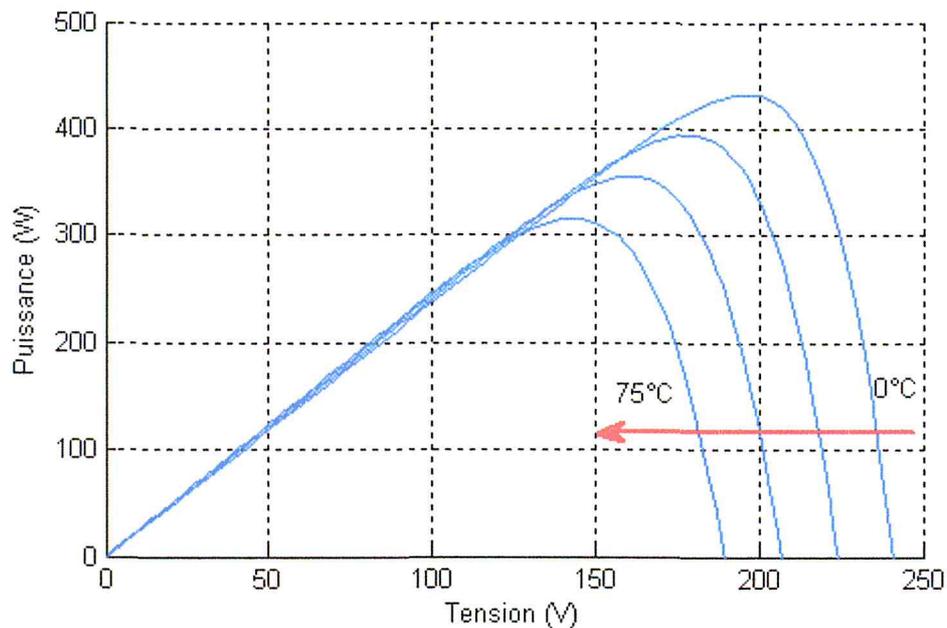


Figure 1.10 : L'influence de la température sur la caractéristique $P=f(V)$.

1.6.3. Groupement de Cellules Photovoltaïques :

La puissance fournie par une seule cellule solaire étant très faible, plusieurs cellules dont les caractéristiques sont semblables doivent être électriquement associées et encapsulées dans un plastique pour former un GPV pratique. Dans ce qui suit, différents groupements possibles des cellules solaires sont présentés [1].

a) Groupement 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. La figure (1.12) montre la caractéristique résultante (I_{sc} , V_{oc}) obtenue en associant en série N cellules identiques [14].

Chapitre 1 : Généralités sur les systèmes photovoltaïques

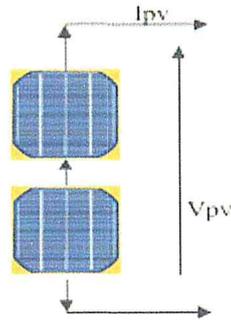


Figure (1.11) : Schéma de 2 cellules photovoltaïques associées en série [14].

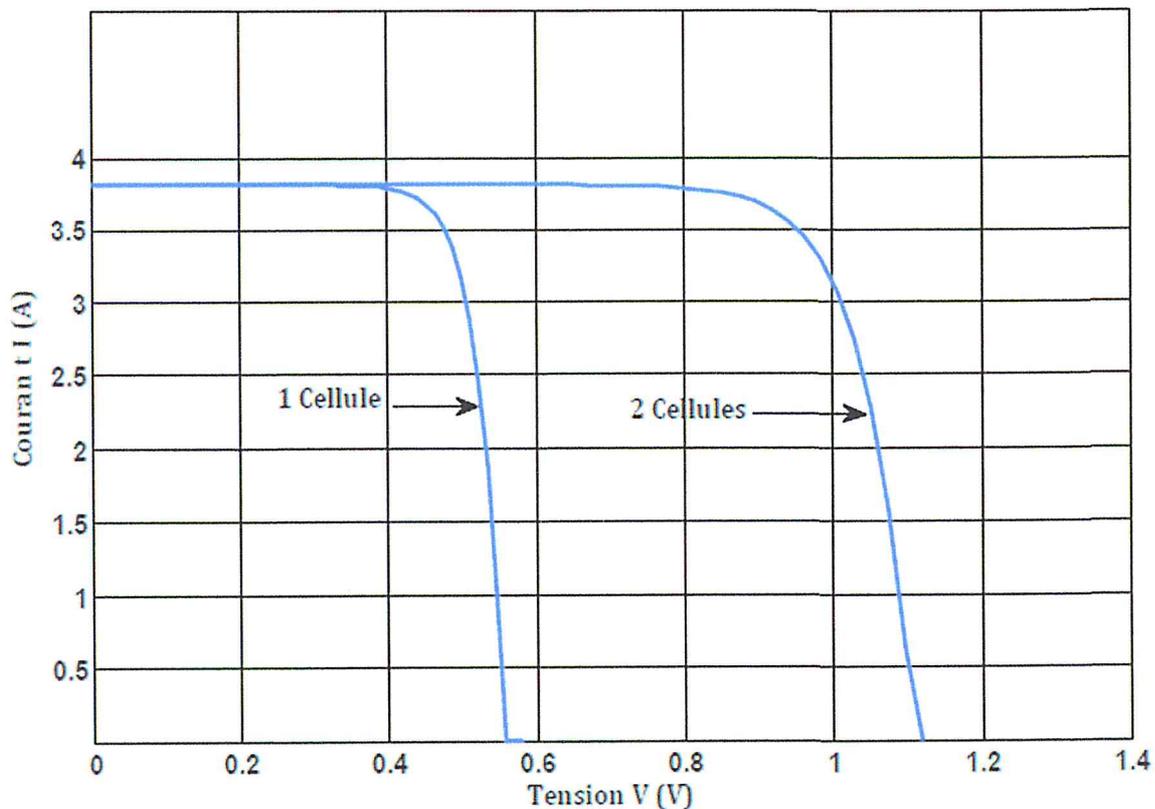


Figure 1.12 : Caractéristique I-V de 2 cellules photovoltaïques raccordées en série [14].

b) Groupement en parallèles :

Les propriétés du groupement en parallèle des cellules sont duales de celles du groupement en série. Ainsi, dans un groupement des 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. La figure (1. 14) montre les caractéristiques résultantes (I_{sc} , V_{oc}) obtenues en associant en parallèle des cellules identiques [14].

Chapitre 1 : Généralités sur les systèmes photovoltaïques

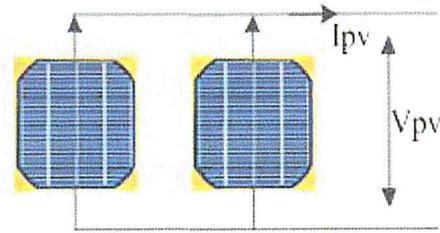


Figure 1.13 : Schéma de deux (2) cellules photovoltaïques associées en parallèle [14].

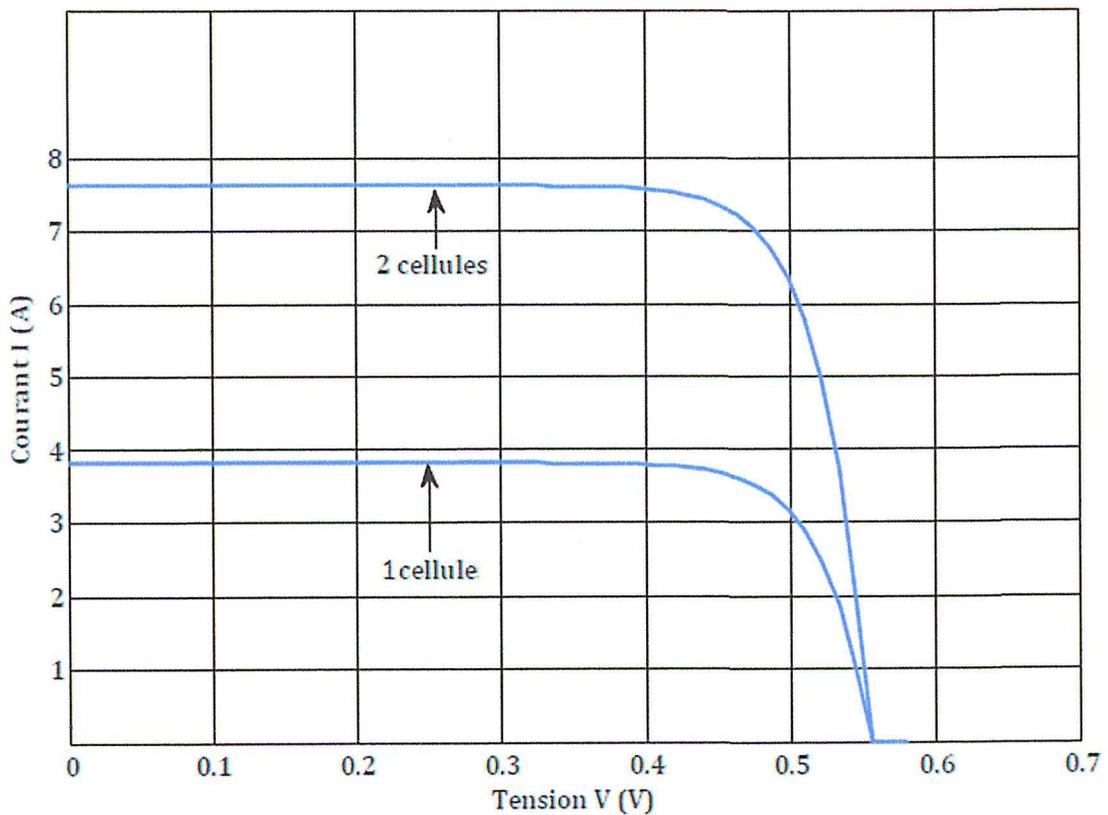


Figure 1.14 : Caractéristique I-V de deux(2) cellules PV raccordées en parallèle [14].

c) Groupement mixte :

Les cellules solaires sont souvent branchées en série pour former des chaînes ou modules. Plusieurs modules sont connectés en parallèle pour former un panneau [1]. Figure 1.15 représente le groupement mixte de cellule.

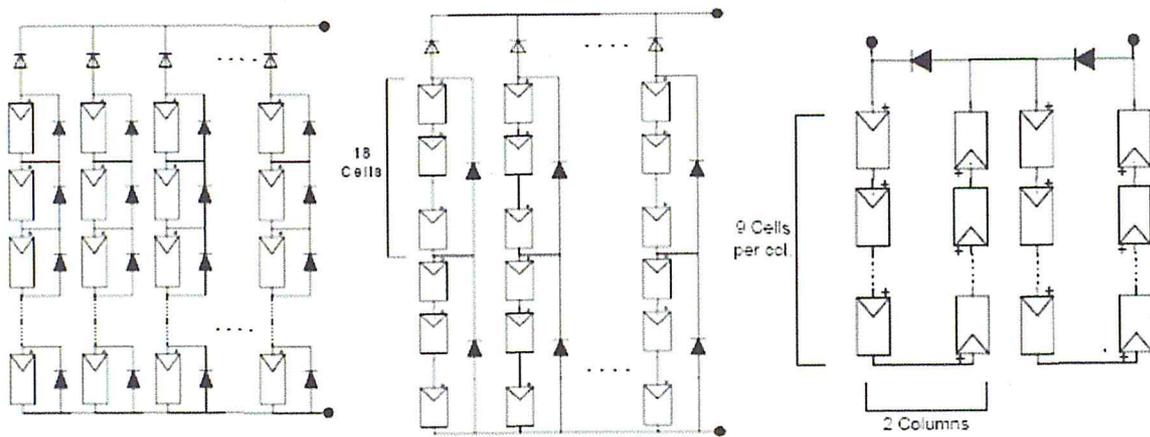


Figure 1.15 : Groupement mixte de cellules PV [1].

1.7 Convertisseur DC/DC (Direct Current/Direct Current)

Le convertisseur DC-DC est une interface qui permet l'adaptation entre le panneau PV et la charge afin d'extraire la puissance maximale du panneau. Les hacheurs ou convertisseurs du type continu-continu permettant de contrôler la puissance électrique dans des circuits fonctionnant en courant continu avec une très grande souplesse [5] [6].

convertisseur dévolteur (buck)	convertisseur survolteur (boost)	Convertisseur mixte (dévolteur-survolteur)
<p>-Le convertisseur dévolteur peut être souvent trouvé dans la littérature sous le nom de hacheur buck ou hacheur série.</p> <p>-Son application typique est de convertir sa tension d'entrée en une tension de sortie inférieure.</p>	<p>- est un convertisseur survolteur, connu aussi sous le nom de « boost » ou hacheur parallèle.</p> <p>- Son application typique est de convertir sa tension d'entrée en une tension de sortie supérieure</p>	<p>-combine les propriétés des deux convertisseurs précédents, il est utilisé comme un transformateur idéal de n'importe quelle tension d'entrée pour n'importe quelle tension de sortie désirée</p>

Tableau 1.1 : Les différents types de convertisseurs.

Chapitre 1 : Généralités sur les systèmes photovoltaïques

Il existe plusieurs types des convertisseurs DC-DC. Qui sont utilisés fréquemment dans les systèmes photovoltaïques pour générer les tensions et les courants souhaités ainsi que pour l'adaptation des panneaux solaires avec les différentes charges [5] [6].

Dans le cadre de notre étude, nous avons opté pour le convertisseur de type Boost. La figure ci-dessous illustre le schéma électrique du ce convertisseur. Le fonctionnement de ce dernier peut être divisé en deux phases distinctes selon l'état de l'interrupteur K [7] :

➤ Une phase d'accumulation d'énergie :

Lorsque l'interrupteur K est fermé (état passant), cela entraîne l'augmentation du courant dans l'inductance donc le stockage d'une quantité d'énergie sous forme d'énergie magnétique. La diode D est alors bloquée et la charge est alors déconnectée de l'alimentation [7].

➤ La phase de transformation de l'énergie :

Lorsque l'interrupteur est ouvert, l'inductance se trouve alors en série avec le générateur. Le courant traversant l'inductance traverse ensuite la diode D, le condensateur C_s et la charge R_L . Il en résulte un transfert de l'énergie accumulée dans l'inductance vers la capacité [7].

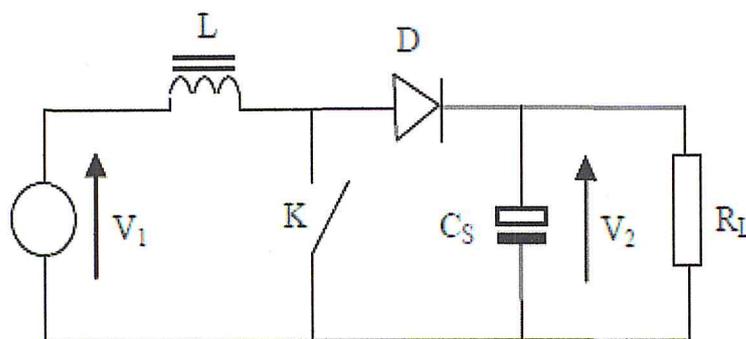


Figure 1.16 : Convertisseur DC/DC (type Boost)

1.8 La charge

Le système PV nécessite l'utilisation de batteries pour le stockage de l'électricité et d'un contrôleur de charge pour assurer la durabilité des batteries. La charge et l'équipement électrique alimenté par le système peut être de type continue comme des équipements de télécommunications, le pompage d'eau, ou de type alternative dans les cas d'usage domestique (maison solaire), ce cas nécessite un onduleur.

1.9 La commande MPPT

Elle est souvent nommée dans la littérature « Recherche du Point de Puissance Maximum » ou bien « Maximum Power Point Tracking » en anglais (MPPT).

La commande MPPT est une commande essentielle pour un fonctionnement optimal du système photovoltaïque. Le principe de cette commande est basé sur la variation automatique du rapport cyclique D en l'amenant à la valeur optimale de manière à maximiser la puissance délivrée par le panneau PV (Figure I.17). Ainsi quel que soit les conditions météorologiques (température et irradiation), cette commande place le système au point de fonctionnement maximum (I_{MPP} , V_{MPP}).

Le tracking joue un rôle très important parce qu'il maximise le rendement et réduit au maximum le coût [1].

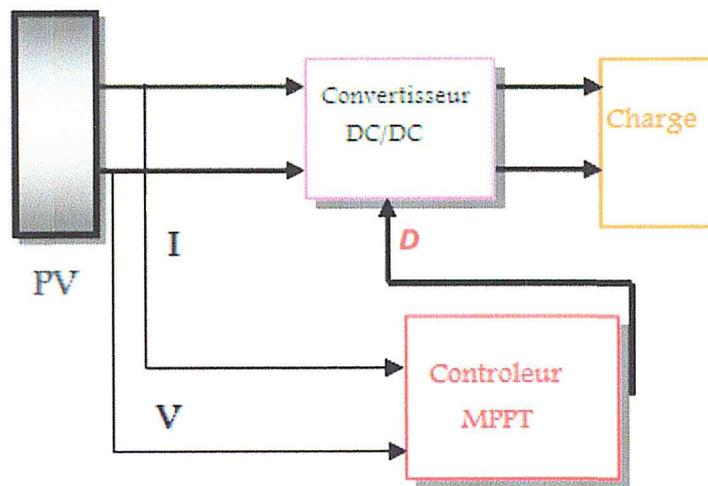


Figure 1.17 : Système photovoltaïque [1].

Il existe plusieurs techniques de fonctionnement (plusieurs algorithmes des commandes MPPT). Dans le chapitre suivant, nous présentons une synthèse des différents types d'algorithmes MPPT présents dans la littérature.

1.10 Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre les différentes notions qui entrent dans la constitution d'un système photovoltaïque et les principes de fonctionnement de chaque élément, on a étudié le principe de l'effet photovoltaïque, la cellule PV et ses paramètres. Nous avons

Chapitre 1 : Généralités sur les systèmes photovoltaïques

aussi vu l'effet des changements climatiques sur l'énergie produite par la cellule à travers des graphiques représentatifs ainsi que les différents groupements de cellule.

Ce qui suit, nous allons présenter une étude sur les commandes MPPT et les différents algorithmes utilisés pour chercher le point où la puissance du générateur photovoltaïque maximale.

Chapitre 2 :

Technique d'optimisation dans un système photovoltaïque

2.1 Introduction

La puissance électrique produite par un panneau photovoltaïque dépend fortement de l'ensoleillement et à un degré moins important de la température des cellules. Ces deux variables influençant sur le comportement du système et présentent des fluctuations quotidiennes et saisonnières. Pour ces raisons, le panneau photovoltaïque ne peut fournir une puissance maximale que pour une tension particulière et un courant bien déterminé. A cet effet et en fonction du type de cette charge, un dispositif de contrôle devra être intégré dans le circuit de commande du convertisseur. Ce dernier doit être capable de faire fonctionner le panneau photovoltaïque à sa puissance maximale. La méthode de suivi ou "Tracking" connue sous le nom MPPT (Maximum Power Point Tracking) est basée sur l'utilisation d'un algorithme de recherche du maximum de la courbe de puissance (MPP) du panneau photovoltaïque.

Dans ce chapitre nous présenterons une description sur la recherche du MPP suivie d'une synthèse des principaux modes de recherche du PPM existants.

2.2 Principe de la recherche du MPP

La position du PPM n'est pas connue dans la courbe (I-V) à l'avance et change dynamiquement selon l'irradiation et la température (comme on a déjà vue dans le chapitre précédent).

L'algorithme MPPT peut être plus ou moins compliqué pour rechercher le MPP. En général, il est basé sur la variation du rapport cyclique du convertisseur statique en fonction de l'évolution des paramètres d'entrée de ce dernier (I et V et par conséquent de la puissance du GPV) jusqu'à se placer sur le PPM. Plusieurs algorithmes sont présents dans la littérature. Dans ce qui suit, nous allons présenter une classification de ses différentes commandes.

2.3 Classification des commandes MPPT

Diverses publications sur les commandes assurant un fonctionnement de type commande MPPT apparaissent régulièrement dans la littérature depuis 1968, date de publication de la première loi de commande de ce genre, adaptée à une source d'énergie renouvelable de type photovoltaïque [9].

Chapitre 2 : Technique d'optimisation dans un système photovoltaïque

Etant donné le grand nombre de publications dans ce domaine, a été faite une classification des différentes MPPT existantes qui sont regroupé selon leur principe [9].

La classification, en plus du principe, s'est effectuée selon des critères comme la précision de la recherche ou sa rapidité pour en faire une évaluation comparative.

2.3.1 Les méthodes classiques

Les algorithmes MPPT classiques ont été mis au point dans l'hypothèse où l'ensemble des cellules d'un panneau ont le même comportement. Ainsi, à un instant donné, un seul maximum de puissance peut exister [7].

Pour faire face au problème de présence de multiples maxima sur la caractéristique du générateur photovoltaïque, un certain nombre de travaux ont proposé l'adaptation des Algorithmes classiques [8].

- Ces Approches basées sur des méthodes conventionnelles ont été abordées pour élaborer des algorithmes optimisés qui servent à garantir l'optimisation des performances de ces derniers. Cependant, ses commandes présentent des limites lors des variations rapides des conditions climatiques.
- Parmi les techniques les plus utilisées nous avons :

a) Les premiers types de commande MPPT

L'algorithme mis en œuvre dans les premières commandes MPPT était relativement simple. En effet, les capacités des microcontrôleurs disponibles à l'époque étaient faibles et les applications, surtout destinées au spatial, avaient beaucoup moins de contraintes en variation de température et d'éclairement que les applications terrestres. Appliqué initialement au photovoltaïque, son principe a d'abord été décrit par A.F. Boehringer . Cette commande est basée sur un algorithme de contrôle adaptatif, permettant de maintenir le système à son point de puissance maximum (PPM) [9].

Cette première approche est destinée beaucoup plus à des applications spatial car le phénomène de changement aléatoire de l'éclairement et la température n'est pas pris en compte, ceci n'empêche pas que ce simple algorithme a été la base de toutes les stratégies de la MPPT développées par la suite [10].

Le principe de la première commande MPPT numérique consiste à calculer la puissance à l'instant (t_i) à partir des mesures de I_{pv} et V_{pv} et de la comparer à celle stockée en mémoire, correspondant à l'instant (t_{i-1}). De là, un nouveau rapport cyclique D est calculé et appliqué au

Chapitre 2 : Technique d'optimisation dans un système photovoltaïque

convertisseur statique. Ce principe est toujours valable du point de vue théorique et appliqué de nos jours sur des algorithmes plus performants.

Cependant, le temps de réaction a été amélioré ainsi que la précision de la recherche du PPM associée à un certain nombre de précautions pour ne pas perdre le PPM même temporairement [10].

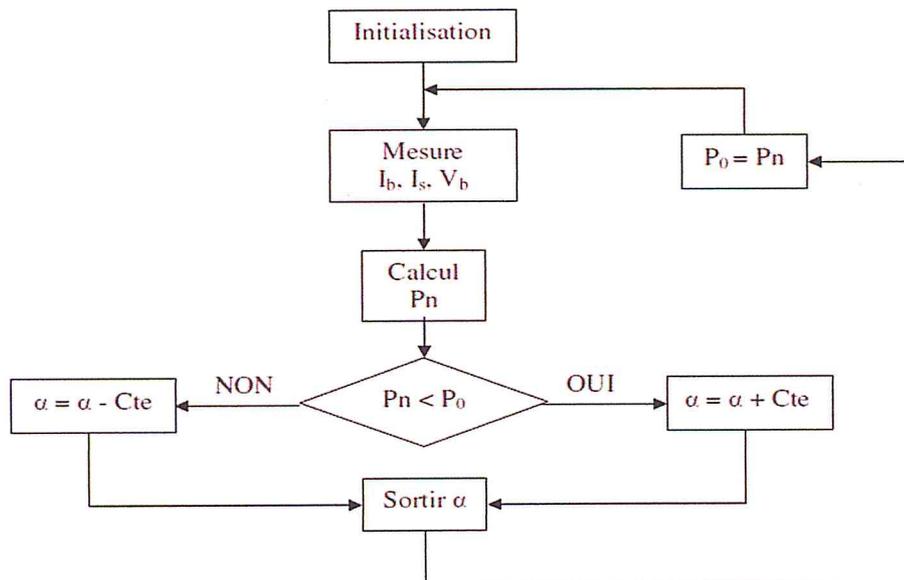


Figure 2.1 : Principe de la première commande MPPT numérique [10].

b) Algorithme Perturbation et Observation (P&O)

La méthode P&O est généralement la plus utilisée en raison de sa simplicité et sa facilité de réalisation. Comme son nom l'indique, cette méthode fonctionne en perturbant le système et observant l'impact sur la puissance à la sortie du GPV [1].

Le principe de cet algorithme est d'effectuer une perturbation sur la tension du panneau PV tout en agissant sur le rapport cyclique D. En effet, suite à cette perturbation, on calcule la puissance fournie par le panneau PV à l'instant k, puis on la compare à la précédente de l'instant (k-1). Si la puissance augmente, on s'approche du point à maximum de puissance (MPP) et la variation du rapport cyclique est maintenue dans le même sens. Au contraire, si la puissance diminue, on s'éloigne du MPP. Alors, on doit inverser le sens de la variation du rapport cyclique. Le diagramme sous-dessous explique bien le principe de cet algorithme et toutes ses étapes.

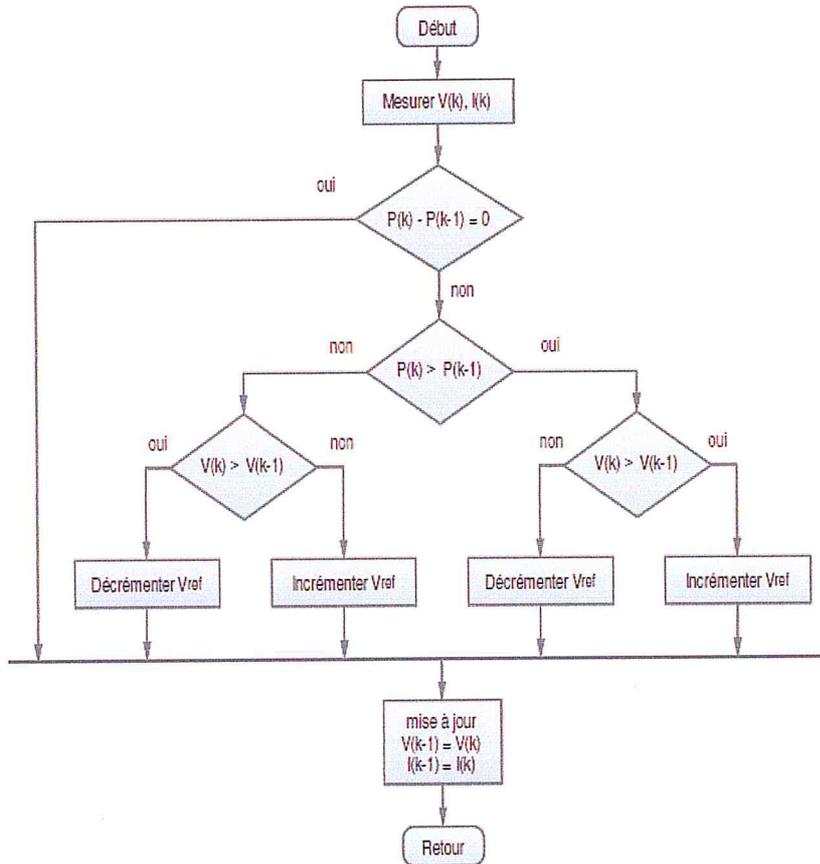


Figure 2.2 : Organigramme de la méthode P&O [1].

On voit que si la tension de fonctionnement est perturbée dans une direction donnée et que la puissance augmente ($dP=dV > 0$), alors il est clair que la perturbation a déplacé le point de fonctionnement vers le MPP. L'algorithme P&O continuera à perturber la tension dans la même direction. Par contre, si la puissance diminue ($dP=dV < 0$), alors la perturbation a éloigné le point de fonctionnement du MPP. L'algorithme inversera la direction de la perturbation suivante. Cet algorithme est résumé sur le tableau 2.1.

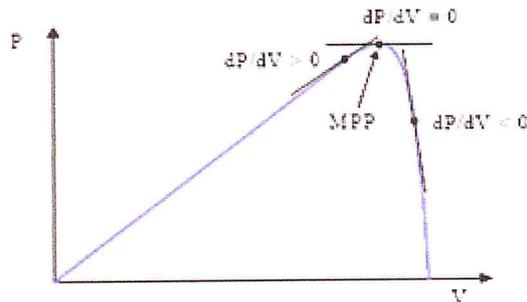


Figure 2.3 : Caractéristique de la puissance du générateur PV.

Chapitre 2 : Technique d'optimisation dans un système photovoltaïque

Perturbation	Changement dans la Puissance	Perturbation suivante
positive	positif	positive
positive	négatif	négative
négative	positif	négative
négative	négatif	positive

Tableau 2.1 : Tableau résume l'algorithme P&O [1].

Le processus est répété périodiquement jusqu'à ce que le MPP soit atteint. Le système oscille alors autour du MPP, ce qui provoque des pertes de puissance.

L'oscillation peut être minimisée en diminuant la taille de la perturbation. Cependant, une taille de perturbation trop petite ralentit considérablement la poursuite du MPP. Il existe alors un compromis entre précision et rapidité [10].

Il est important de noter qu'avec l'algorithme P&O, la variable à contrôler peut être soit la tension soit le courant du GPV. Cependant, la variable idéale qui caractérise le MPP est celle qui varie peu lors d'un changement climatique. On a vu que la variation du rayonnement affecte d'avantage le courant que la tension photovoltaïque. Par contre, la variation de la température modifie plus la tension du GPV. Néanmoins, la dynamique de la température est lente et varie sur une plage réduite. Par conséquent, il est préférable de contrôler la tension du GPV [10].

En effet, il est connu que ce type de commande permet d'obtenir un rendement plus important durant une journée relativement ensoleillée, où le MPP évolue lentement et proportionnellement au soleil. Par contre pour une journée présentant de forts changements d'irradiations très fréquents, cette commande présente plus de pertes, engendrées par le temps de réponse de la commande pour atteindre le nouveau MPP [10].

En effet, si on analyse en détail ce mode de recherche, il présente des erreurs d'interprétation au niveau de la direction à suivre pour atteindre le MPP lorsque des variations brusques des conditions climatiques ou/et de charge apparaissent [10].

c) Incrémental Conductance (IC)

La conductance est un facteur de mesure dans un circuit, il s'agit d'un rapport du courant sur la tension.

$$G = \frac{I_{pv}}{V_{pv}}$$

Chapitre 2 : Technique d'optimisation dans un système photovoltaïque

Cette méthode se base sur un concept mathématique de l'analyse des fonctions à variables continues. Il s'agit de la dérivée d'une fonction. Donc une variation élémentaire (incrément) de conductance peut être définie par :

$$dG = \frac{dI_{pv}}{dV_{pv}}$$

D'autre part, l'évolution de la puissance du GPV par rapport à la tension donne la position du point de fonctionnement par rapport au PPM. Lorsque la dérivée de puissance est nulle, cela signifie que l'on est sur le PPM, si elle est positive le point d'opération se trouve à gauche du maximum, lorsqu'elle est négative, on se situe à droite [11].

$$\frac{dP}{dV} = 0 \quad \text{au MPP}$$

$$\frac{dP}{dV} > 0 \quad \text{à gauche du MPP.}$$

$$\frac{dP}{dV} < 0 \quad \text{à droite du MPP.}$$

Puisque :

$$\frac{dP}{dV} = \frac{d(IV)}{dV} = I + V \frac{dI}{dV} \quad \dots\dots\dots(a)$$

Alors l'équation (a) peut être écrite comme suit :

$$\frac{dI}{dV} = -\frac{I}{V} \quad \dots\dots\dots(1)$$

$$\frac{dI}{dV} > -\frac{I}{V} \quad \dots\dots\dots(2)$$

$$\frac{dI}{dV} < -\frac{I}{V} \quad \dots\dots\dots(3)$$

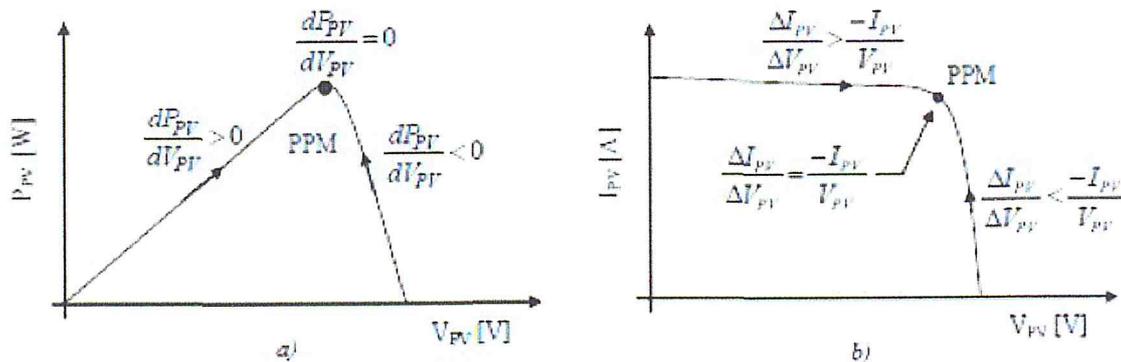


Figure 2.4 : Positionnement du point de fonctionnement [1].

La méthode consiste à comparer périodiquement la conductance instantanée avec la conductance incrémentale (d'où son nom Incrémental Conductance). Cette comparaison ne peut s'effectuer que lorsqu'il y a un changement dans la tension V pendant la période de mesure i.e. : $dV \neq 0$; dans le cas contraire il suffit de faire un test sur la variation de courant. La méthode

Chapitre 2 : Technique d'optimisation dans un système photovoltaïque

a) Les réseaux de neurones artificiels

La technique de réseaux de neurones est, elle aussi, de plus en plus utilisée, car elle offre une grande alternative pour résoudre des problèmes complexes. Ces dernières années, l'utilisation de cette méthode dans divers domaines d'application ne cesse d'augmenter car elle fonctionne à partir d'une boîte noire qui n'exige pas d'informations détaillées sur le fonctionnement du système. Elle établit des relations entre les variables d'entrée et de sortie en analysant les précédentes données mémorisées. Un autre avantage est qu'elle peut traiter des problèmes d'une grande complexité grâce à des paramètres interdépendants [10].

Les réseaux de neurones sont composés généralement de trois couches différenciées nommées :

- Couche d'entrée (Input layer).
- Couche cachée (Hidden layer).
- Couche de sortie.

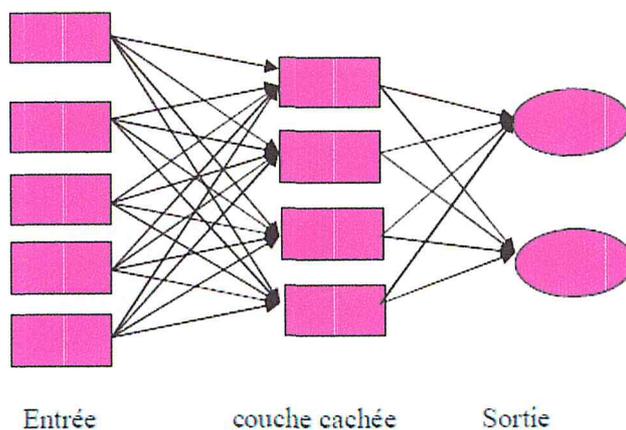


Figure 2.6: Exemple d'un réseau de neurones.

Le nombre de nœuds au niveau des différentes couches est variable en fonction du degré d'apprentissage souhaité et de la précision de la commande souhaitée. Pour une commande MPPT, les variables d'entrées peuvent donc être les paramètres caractéristiques d'un G (V_{oc} , I_{cc}) associées ou non à des données atmosphériques comme la température ou l'irradiation ou bien une combinaison de ces dernières. La sortie est généralement un ou plusieurs signaux de référence comprenant au moins le rapport cyclique permettant de commander le convertisseur pour fonctionner le plus souvent possible au PPM. La qualité de la recherche du PPM dépend essentiellement de l'algorithme utilisé dans la couche cachée et de la construction proprement dite du réseau. Ainsi, l'importance entre deux nœuds de la valeur du poids choisi W_{ij} est à prendre en compte. Pour identifier avec précision les différents PPM

Chapitre 2 : Technique d'optimisation dans un système photovoltaïque

éventuels, les poids W_{ij} doivent être initialement déterminés avec le plus de soin possible à travers des procédures d'apprentissage laborieuses et spécifiques à chaque GPV, chaque site d'implantation et chaque type de charge.

De plus, cet apprentissage doit être révisé régulièrement (typiquement chaque mois) pour mettre à jour les relations entre les entrées et les sorties du réseau. Ce qui rend cette commande fastidieuse en entretien et en maintenance [10].

b) Les essais de particules (PSO)

Contrairement aux autres méthodes métaheuristiques, PSO (Particle Swarm Optimization) est proposé à la base pour les problèmes d'optimisation continus. PSO est une méthode très utilisée dans le domaine des systèmes photovoltaïques en vue de sa simplicité ainsi que son taux de convergence très rapide.

Ces particules n'ayant aucun chef peuvent se déplacer ensemble en suivant chacune la particule qui lui est la plus proche. En effet, les particules ayant une meilleure position vont informer les autres pour les attirer à cette emplacement en changeant leurs vitesses et directions de mouvement (dite aussi vélocités). Ce processus continue à progresser jusqu'à ce que toutes les particules suivent la même direction.

Kashif et all ont proposé la méthode PSO pour la recherche du point MPP, en agissant sur le rapport cyclique (Dutty Cycle) afin d'ajuster les valeurs du courant I_{pv} et de tension V_{pv} de sortie.[21][22].

L'algorithme fonctionne en deux phases :

-La première phase : consiste à appliquer l'algorithme PSO de base jusqu'à atteindre le point MPP dans les conditions climatique idéals. A l'issu de cette phase, un vecteur de rapports cycliques $d = [d_1, d_2, \dots, d_{NP}]$ est initialisé (les valeurs d_i correspondent aux positions des particules), un nombre de particule $N_p = 3$, est jugé suffisant pour la recherche du point MPP. [An Improved Particle Swarm Optimization (PSO)–Based MPPT for PV with Reduced Steady-State Oscillation]

-La deuxième phase : une fois le point MPP est localisé, l'algorithme durant cette phase minimise les perturbations des valeurs d_i , car les perturbations majeures causent une oscillation autour du point MPP, ce qui dégrade énormément les performances du système PV. En plus la méthode continuer à surveiller le nouveau point MPP au cas des changements d'irradiation. Pour cela la valeur d_i est perturbée linéairement suivant la direction du changement de la puissance. Le diagramme sous-dessous explique bien le principe de cet algorithme.

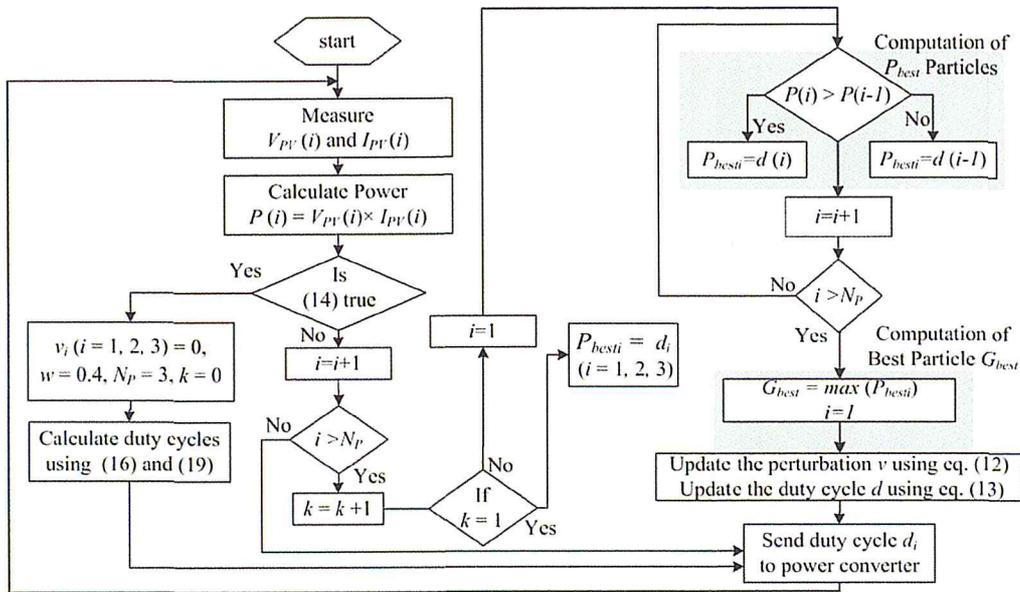


Figure 2.7 : Organigramme de la méthode PSO [22] .

2.4 Critères d'évaluation d'une commande MPPT

La qualité d'une commande MPPT peut être définie comme la position du point de fonctionnement du système par rapport au MPP.

Les performances d'une commande MPPT se résument à des critères présentés dans la suite, tels que le temps de réponse et son aptitude à fonctionner sur une large gamme de puissance sont importants pour évaluer les qualités de ce type de commande [10]. Nous les détaillerons au fur et à mesure de leur utilisation dans ce chapitre.

2.4.1 Flexibilité

Une commande MPPT doit être précise et stable quelles que soient ses conditions d'utilisation. C'est-à-dire qu'elle ne doit pas être conçue pour fonctionner pour un seul type de panneau. Elle doit être la plus universelle possible, capable de fonctionner avec des panneaux de différentes technologies sans trop de modifications, tout en gardant le même taux de précision et de robustesse [10].

2.4.2 Réponse dynamique

Chapitre 2 : Technique d'optimisation dans un système photovoltaïque

Une commande MPPT doit avoir un bon comportement en dynamique afin de pouvoir piloter l'étage d'adaptation (convertisseur) et assurer que la recherche du nouveau MPP, suite aux changements d'éclairement ou de température, soit faite le plus rapidement possible [10].

2.4.3 Simplicité et Coût

Il est important de connaître le niveau de Complexité de l'algorithme entraînant des difficultés d'implémentation et des pertes liées directement au nombre de calculs nécessaires. En résumé, une commande MPPT doit avoir un niveau de simplicité important favorisant une faible consommation et donc un coût de développement raisonnable pour que sa présence compense le surcoût généré [10].

2.4.4 Compétitive sur une large gamme de puissance :

Par définition, une commande MPPT, utilisée dans des applications photovoltaïques, est supposée traquer le PPM généré par un module PV, quel que soit le niveau d'ensoleillement. La commande MPPT est dite compétitive si le PPM est atteint avec une erreur statique, correspondant à la position du point de fonctionnement par rapport au PPM, relativement faible sur une large gamme de puissance [10].

-Il est important de préciser qu'il n'existe pas de standard international qui définisse comment il faut mesurer les performances d'une commande MPPT.

2.5 Conclusion :

Ce chapitre présente le principe de la recherche du MPP, nous avons présenté aussi les techniques les plus populaires et couramment utilisées dans les travaux de recherche en mettant en évidence leurs avantages et leurs inconvénients, L'objectif de cette étude est de comparer leurs comportements ce qui peut aider un concepteur dans le choix d'une commande MPPT. Ce chapitre nous servira comme support de comparaison avec l'approche MPPT que nous allons développer dans le troisième chapitre.

Chapitre3 :

**Commande MPPT basée sur
une méta heuristique (ACO)**

3.1 Introduction

Quand un nouveau problème se pose en ingénierie, on se retrouve devant une tâche difficile, qui nous conduit à définir de nouvelles méthodes de résolution car les techniques existantes ne sont pas convenables d'apporter une solution à ce problème. Et lorsque nous voulons inventer une nouvelle méthode de résolution, il nous faut souvent une source d'inspiration. Cette méthode peut être une idée virtuelle comme par exemple des méthodes mathématique ou peut au contraire être issue de la modélisation des systèmes complexes naturels. Il s'agit dans ce dernier cas de copier et d'adapter les concepts mise en œuvre par le monde vivant pour la résolution de problème d'optimisation.

Les recherches sur les comportements collectifs des insectes sociaux fournissent aux informaticiens des méthodes puissantes pour la conception d'algorithmes d'optimisation. Les essaims de fourmis par exemple offrent une grande diversité de comportements et de morphologies. L'étude précise de leur comportement (l'éthologie). Cette diversité est une mine d'inspiration pour les systèmes informatiques. C'est ainsi que les capacités des fourmis en matière de coopération, de communication, de compétition et d'apprentissage, peuvent être mises à profit pour la conception d'algorithmes d'optimisation, qui constitue l'objet de ce chapitre.

3.2 Les Méthodes Métaheuristiques

La complexité du problème d'optimisation de puissance surtout dans un environnement de marché d'électricité libre, avec l'apparition de nouvelles contraintes en matière de réduction des émissions de gaz polluant (Protocole de Kyoto, 2005) et l'utilisation de sources d'énergies renouvelables, fait en sorte qu'il est souvent difficile d'utiliser des méthodes exactes de solution compte tenu du manque de flexibilité des méthodes classiques pour intégrer diverses contraintes spécifiques.

Ces problèmes ont donné lieu au développement d'une nouvelle classe de méthodes d'optimisation nommées métaheuristiques, celles-ci marquent une grande révolution dans le domaine d'optimisation. En effet, elles s'appliquent à toutes sortes de problèmes combinatoires, et elles peuvent également s'adapter aux problèmes continus [17].

Chapitre3 : Commande MPPT basée sur un méta heuristique (ACO)

Les méthodes métaheuristiques apparues à partir des années 1980, permettent de trouver une solution de bonne qualité en un temps de calcul en général raisonnable, sans garantir l'optimalité de la solution obtenue. Les méthodes heuristiques peuvent être divisées en deux classes. Il y a, d'une part, les algorithmes spécifiques à un problème donné qui utilisent des connaissances du domaine, et d'autre part les algorithmes généraux qui peuvent être utilisés pour une grande variété de problèmes [16].

Les métaheuristiques sont un ensemble d'algorithmes d'optimisation visant à résoudre les problèmes d'optimisation difficiles. Elles sont souvent inspirées par des systèmes naturels, qu'ils soient pris en physique (cas du recuit simulé), en biologie de l'évolution (cas des algorithmes Génétiques) ou encore en éthologie (cas des algorithmes de colonies de fourmis ou de l'optimisation par essaims particuliers). La figure 3.1 illustre une classification des métaheuristiques.

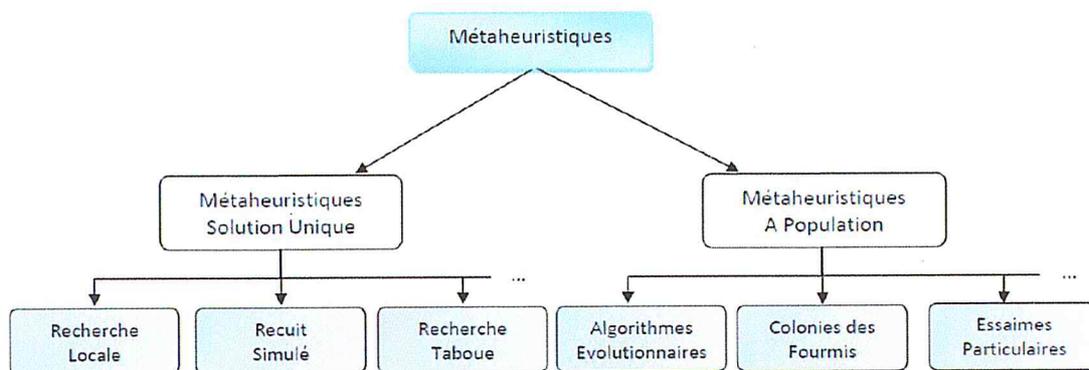


Figure 3.1 : Classes des métaheuristiques [16].

Actuellement les recherches qui utilisent ces algorithmes sont développées pour la résolution des problèmes d'optimisation multi objectif, en tenant compte de plusieurs contraintes et de nouvelles configurations des réseaux électriques surtout à l'associations de sources des énergies renouvelables où la résolution de ce system complexe est un défi. On va d'abord étudier le comportement naturel des fourmis afin d'en prouver la validité, avant de l'extraire pour le simuler informatiquement.

3.3 Les fourmis en nature

La fourmi est l'animal qui par rapport à sa taille est le plus extraordinaire dans ses comportements observables. Elle possède des propriétés assez différentes de celles des autres espèces d'insectes, vive en colonies et offre une grande diversité de comportements et de

Chapitre3 : Commande MPPT basée sur un méta heuristique (ACO)

morphologies, l'étude précise de leurs comportements est souvent limitée aux espèces les moins populeuses pour des raisons pratiques [19].

Les principales caractéristiques des fourmis que l'on pourra retrouver dans les systèmes informatiques sont :

3.3.1 Méthode de communication chez les fourmis

Comme tous les animaux vivant en société les fourmis utilisent des moyens de communication sophistiqués. Le langage dont elles se servent le plus est celui des odeurs : les phéromones. Elles utilisent leurs antennes qui produisent et détectent des messages ayant une odeur typique pour elles : découverte de nourriture.

3.3.2 Recherche de nourriture chez les fourmis (Le fourragement)

Les éthologues ont montré que les fourmis étaient capables de sélectionner le plus court chemin pour aller du nid à une source de nourriture grâce au dépôt et au suivi de pistes de phéromone. Lorsqu'une colonie de fourmis doit emprunter un pont à deux branches de longueurs différentes pour exploiter une source de nourriture, elle sélectionne la branche courte si la différence entre les longueurs des branches est suffisamment importante (Figure 3.2). Les fourmis déposent de la phéromone à l'aller vers la source de nourriture et au retour vers le nid. Au départ, le choix est aléatoire mais la branche courte devient vite la plus marquée car les fourmis qui l'empruntent arrivent plus vite au nid et auront statistiquement plus de chance de l'emprunter lorsqu'elles retourneront vers la source de nourriture. [18].

Comme illustré dans la figure 3.3, les fourmis suivent une piste de phéromones, à un moment donné, nous avons un obstacle qui barre la route des fourmis. Au début les fourmis qui arrivent à côté de l'obstacle doivent choisir une route aléatoire.

Puisqu'aucune trace de phéromone n'est déposée le long de l'obstacle, il y a autant de fourmis qui partent à gauche qu'à droite. Lorsque le chemin de droite est plus court que celui de gauche, les fourmis qui l'empruntent, vont retrouver plus vite la piste de phéromone de départ.

Chapitre3 : Commande MPPT basée sur un méta heuristique (ACO)

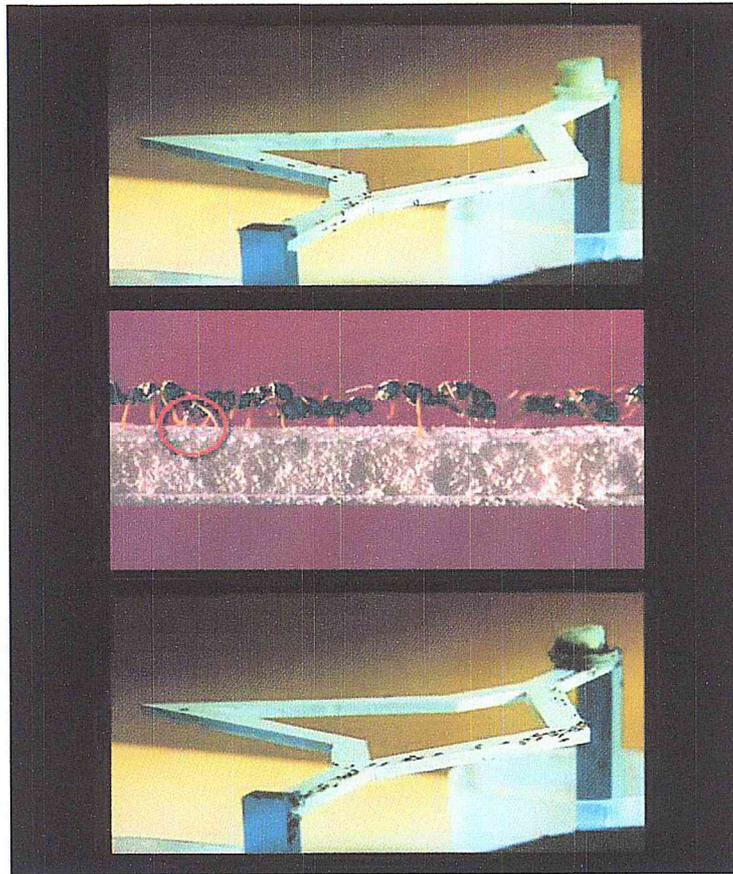


Figure 3.2 :L'optimisation de chemin par les fourmis.[18]

Les phéromones de ces fourmis vont se superposer à droite. Lorsqu'elles vont rejoindre le chemin initial, le chemin de droite sera deux fois plus imprégné de phéromone que la piste de gauche,

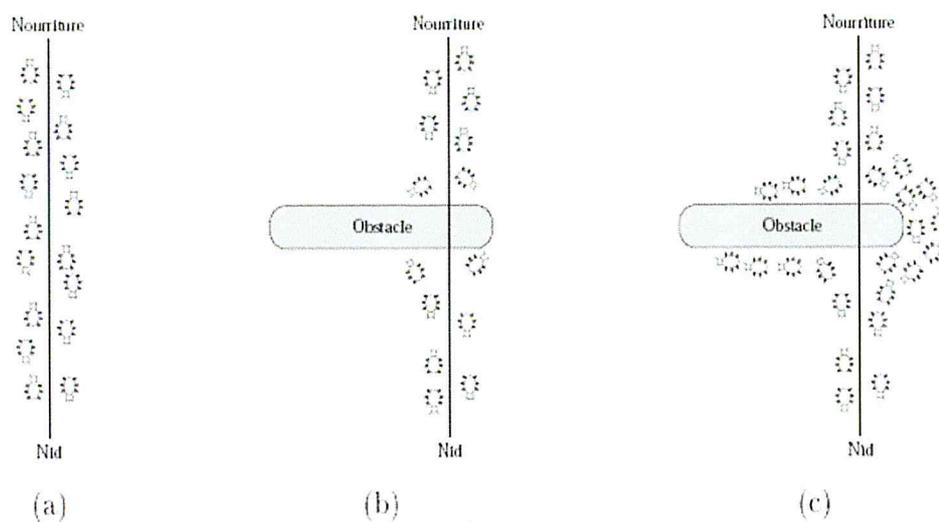


Figure 3.3 : Effet de la coupure d'une piste de phéromone.

Chapitre3 : Commande MPPT basée sur un méta heuristique (ACO)

Les fourmis qui arrivent à l'obstacle à partir de ce moment, préféreront suivre la piste de droite. Le nombre de fourmis qui passent par la droite va augmenter, ce qui augmentera encore la concentration de phéromones.

Il est intéressant de remarquer que bien qu'une seule fourmi soit capable de construire une solution (i.e. de trouver un chemin du nid à la nourriture), c'est seulement le comportement de l'ensemble de la colonie qui crée le chemin le plus court .

3.4 Optimisation par Colonie de fourmis

L'optimisation par colonie de fourmis est une famille très récente des métaheuristiques. Son principe est basé sur le comportement des fourmis réelles dans la vie. Cette approche de résolution fait l'objet de notre étude.

La capacité des fourmis à trouver le plus court chemin entre une source de nourriture et leur nid, a été utilisée pour résoudre des problèmes d'optimisation combinatoire. Les traces de la phéromone, représentent une attirance pour un arc du graphe modélisant le problème. Chaque fourmi construit une solution pour le problème et l'évaluation de chaque solution est utilisée pour mettre à jour les traces de la phéromone.

Lorsqu'une fourmi doit prendre décision sur la direction à prendre, elle doit choisir le chemin ayant la plus forte concentration en phéromone, c'est-à-dire la décision dépend de la probabilité de transition d'un emplacement à une autre. Cette probabilité dépend de la concentration en phéromone. C'est exactement le principe utilisé par les algorithmes d'optimisation à base des fourmis. [19]

3.4.1 Algorithme de fourmis basé sur la recherche de nourriture [19]

Algorithme :ACO

Début

/* initialiser la trace de phéromone */

Tant que (critère d'arrêt n'est pas atteint) faire

Pour $i = 1$, à N (N nombre de fourmis)

/*Construire une solution en tenant compte de la visibilité et trace*/

/* Mettre à jour la trace de phéromone*/

Fin Pour

Fin tant que

Fin

3.5 Description de l'algorithme proposé

Nous proposons un algorithme pour la poursuite du point de puissance maximale dans les systèmes photovoltaïques dans les conditions standard et dans le cas d'ombrage partiel.

Notre algorithme est composé de trois étapes principales comme illustré dans la figure ci-dessous :



Figure 3.4 : Phase principales de ACO

3.5.1 La phase d'initialisation :

- Initialiser l'archive avec des valeurs aléatoires
- Initialiser la fitness
- Positionner les fourmis.
- Initialiser la quantité de phéromone τ_i pour chaque fourmi i par les formules suivant :

$$D_i = |V_i - V| \quad (1)$$

$$\Phi_i = e^{\frac{-D_i^2}{2t}} \quad (2)$$

$$\tau_i = \frac{\Phi_i}{\sum_{j=1}^m \Phi_j} \quad (3)$$

D_i : la distance entre i ème fourmis et la meilleur solution.

Φ_i : une valeur gaussienne liée à la solution V_i .

τ_i : la quantité de phéromone liée à la solution V_i .

3.5.2 La phase de déplacement des fourmis:

- Sélectionne un point de référence V .
- Déplacer la $i^{\text{ème}}$ fourmi par une distance aléatoire en utilisant la relation :

$$V_i(t) = V(t - 1) + d_x$$

Chapitre3 : Commande MPPT basée sur un méta heuristique (ACO)

3.5.3 La phase de mise à jour de l'archive :

- Garder les k meilleures solutions de l'archive selon la fitness parmi les K+N solution.
- Réinitialiser l'archive par les meilleures solutions.
- Réinitialiser la quantité de phéromone.
- La condition d'arrêt de l'algorithme est donnée par un nombre d'itérations fixé.

Algorithme : ACO pour MPPT

Début

Initialiser les paramètres de l'algorithme (*Nb_iter* : le nombre maximal d'itérations, *K* : la taille de l'archive, *Nb_ants* : le nombre de fourmis, *Nb_Panneau* : nombre de panneau.....)

/ Phase d'initialisation */*

Pour chaque Panneau PV $j=1, \dots, Nb_Panneau$ Faire

Pour $i = 1, \text{ à } K$

archive[i] = rand()*V

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

Fin Pour

t = 0

Tant que (t < *Nb_iter*)

/ Initialisation */*

Pour $i = 1, \text{ à } Nb_ants$

$D_i = |V_i - V|$

$\Phi_i = e^{\frac{-D_i^2}{2\epsilon}}$

$\tau_i = \frac{\Phi_i}{\sum_{j=1}^m \Phi_j}$

Fin Pour

/ Phase de déplacement des Fourmis */*

Pour $i = 1, \text{ à } Nb_ants$

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

Choisir un point k avec une probabilité τ_k

Si la position de fourmis est à gauche de MPPT

ants[i] = archive(t)[k] + d_x

else

ants[i] = archive(t)[k] - d_x

$d = 1 - \text{ants} / V$

Fin Pour

/ Mise à jour de l'archive */*

Mettre à jour l'archive avec les K meilleures solutions parmi les $(N + K)$ solutions.

Appliquer le critère d'évaporation consistant à réduire la valeur de α .

$t=t+1$;

Fin Tant que

Envoyer d_i au convertisseur DC-DC

Fin Pour

Fin

3.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons introduit le concept de métaheuristiques, Puis nous avons détaillé le mécanisme de l'une des plus importantes métaheuristiques (colonie de fourmis) et donner une description du comportement de ces extraordinaire insectes lors de la recherche de nourriture, qui permet de résoudre un problème d'optimisation continue appelée la méthode de colonie de fourmis pour valider le programme élaboré, de l'applications sur l'optimisation de puissance dans un système photovoltaïque .

Chapitre 4 :

Résultats et simulations

4.1 Introduction

La simulation permet de passer de la conception théorique de système à la réalisation pratique avec plus d'assurance.

Dans ce chapitre nous allons discuter les résultats de notre commande MPPT obtenu par une méthode métaheuristique ACO puis une étude comparative des résultats obtenus par l'ACO et quelques méthodes discutée dans le chapitre 2.

4.2 L'outil Matlab/Simulink

MATLAB 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.

4.3 Système photovoltaïque proposée

La figure 4.1 illustre le modèle Simulink de notre Système Photovoltaïque.

Il est constitué d'un générateur photovoltaïque (GPV), de notre contrôleur MPPT (Maximum Power Point Tracking) et d'un convertisseur BOOT DC/DC.

La commande MPPT permet de chercher le point de fonctionnement optimal du générateur PV qui dépend des conditions météorologiques. 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 à la sortie du GPV.

Chapitre 4 : Résultats et simulations

Pour la modélisation de notre système photovoltaïque, nous avons choisi le panneau photovoltaïque BP solar MSX 120 composé de 72 cellules, ayant une puissance maximal de 120 W.

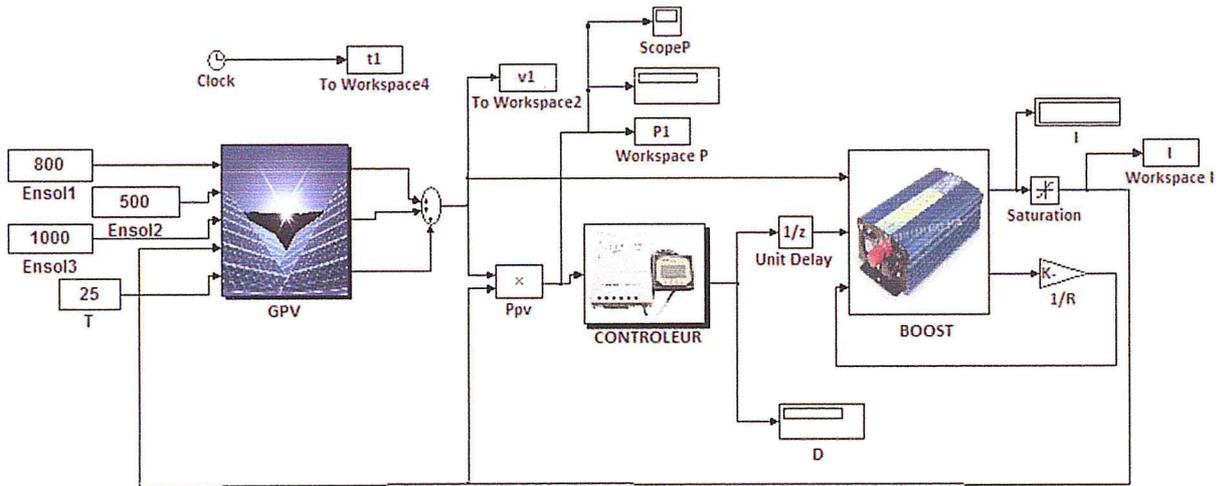


Figure 4.1: Model Simulink du système photovoltaïque.

Le GPV est composé de plusieurs panneaux photovoltaïques comme la figure (4.2) montre, ils prennent en entrée le courant, l'ensoleillement et la température.

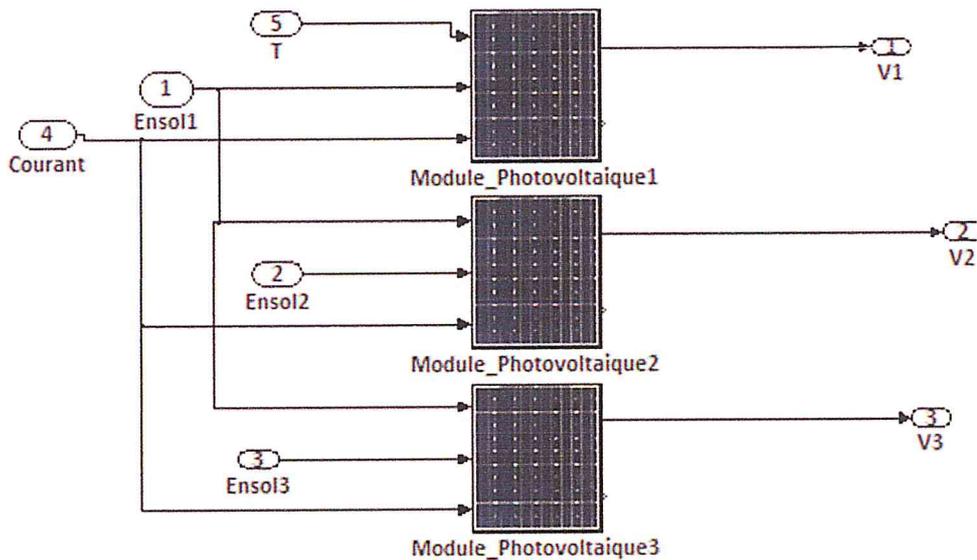


Figure 4.2 :Différent panneaux de GPV

Les paramètres du chaque panneau photovoltaïque sont illustrés dans la figure en dessous :

Chapitre 4 : Résultats et simulations

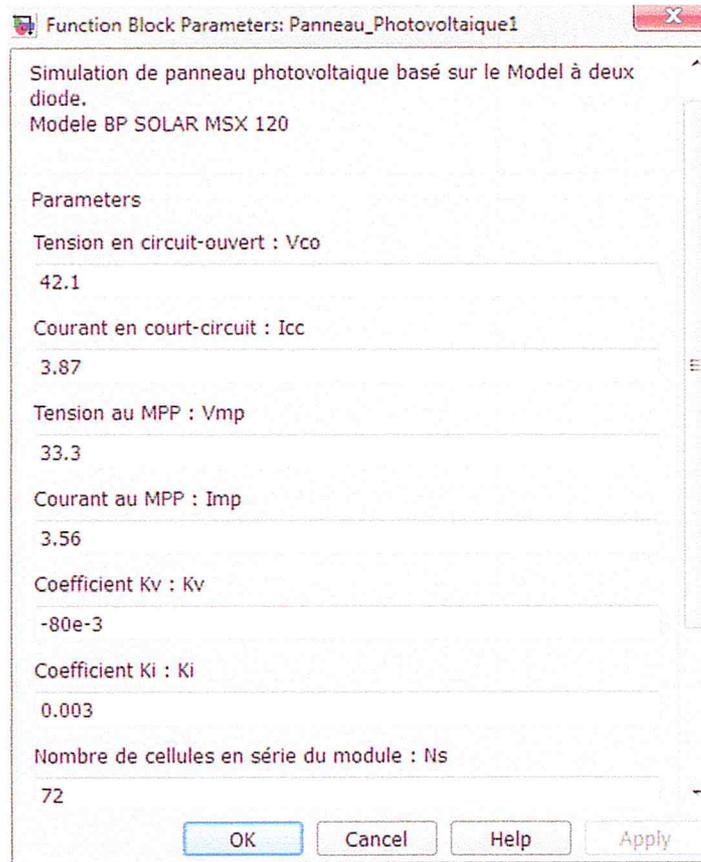


Figure 4.3 : Paramètres du panneau photovoltaïque BP Solar MSX 120

Comme il a été vu dans le chapitre 1, le GPV a des caractéristiques électriques qui varient selon l'ensoleillement et la température. La figure (4.4) à (4.3) représente ces caractéristiques obtenues sous les conditions standards (éclairage $E=1000\text{w/m}^2$ et une température $T=25^\circ\text{C}$).

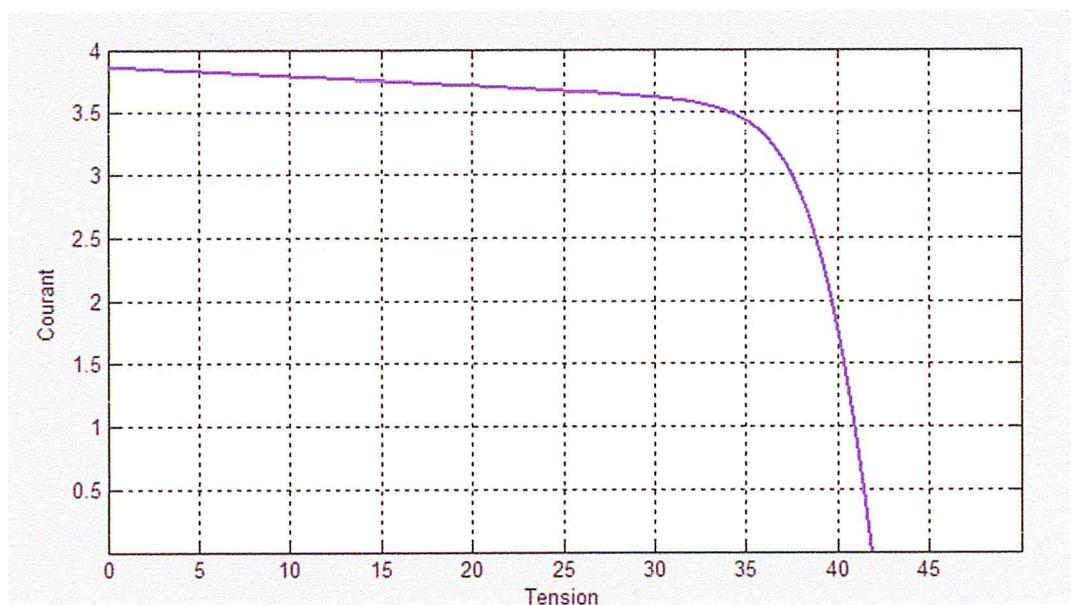


Figure 4.4 : Caractéristique I/V

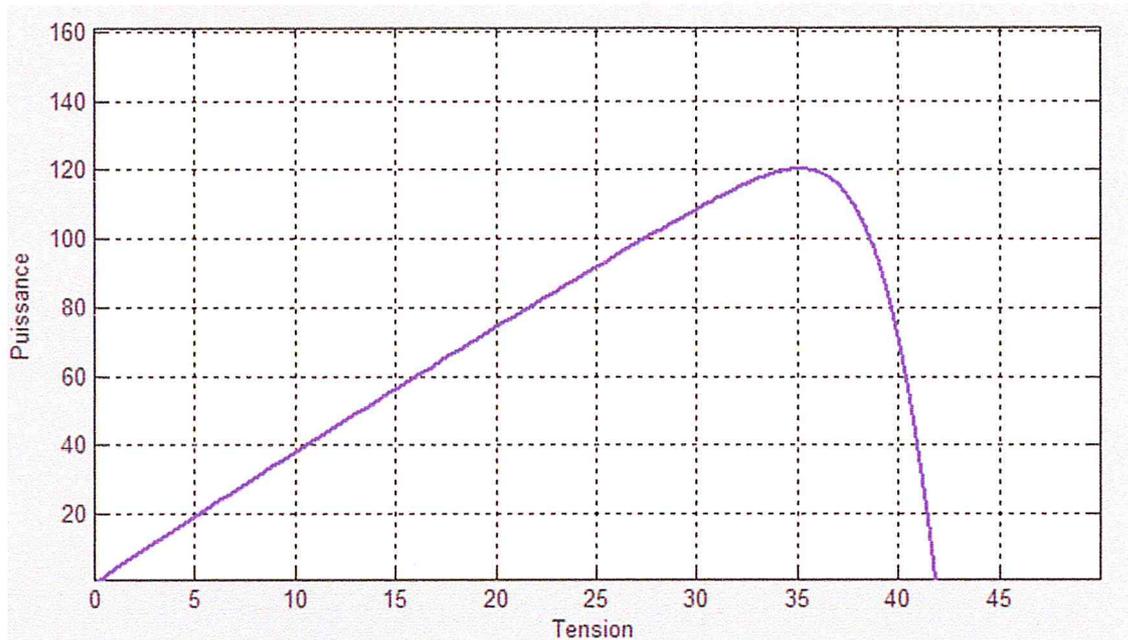


Figure 4.5 caractéristiques P/V

4.4 Simulation de la commande MPPT

Pour évaluer les performances de la commande MPPT, nous avons effectué différents tests de simulations. afin d'étudier l'effet des variations des conditions climatiques (température et ensoleillement) sur les performances de notre commande. Une comparaison avec une commande MPPT basée sur le contrôleur P&O a été faite [1].

Dans notre simulation, nous avons utilisé le courant comme une entrée du GPV. Le changement de la température va augmenter la tension par contre le changement de l'ensoleillement va augmenter le courant.

Dans la Figure 4.6, le test est effectué sous un changement de température et l'ensoleillement a été maintenue à une valeur constante de $E=1000\text{w/m}^2$.

Chapitre 4 : Résultats et simulations

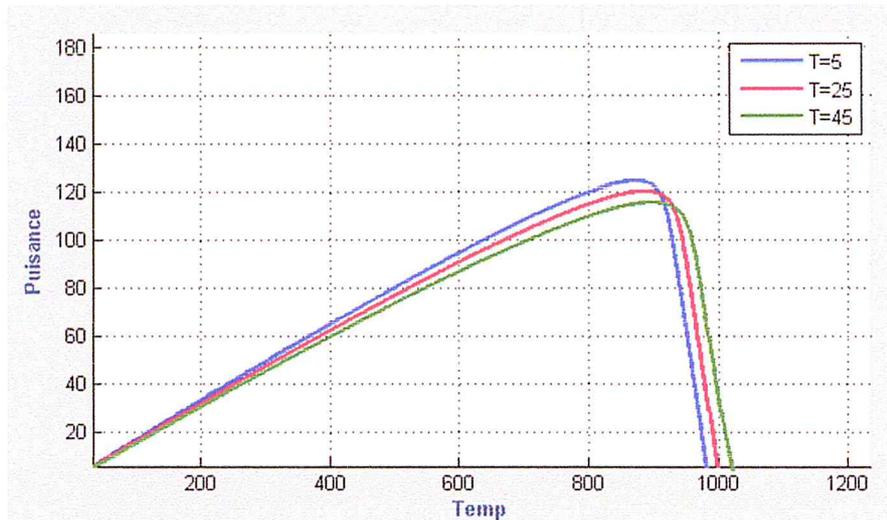


Figure 4.6 : Différent courbes P(t) sous le changement de température.

4.4.1 Test de la vitesse de convergence

Afin d'évaluer la vitesse de convergence de notre commande, nous avons effectué un test sous condition standard. Dans ce cas de simulation, les paramètres (température $T=25C^{\circ}$ et l'ensoleillement $E=1000w/m^2$) sont maintenus constants.

Le résultat de notre algorithme ACO est présenté dans la figure suivante.

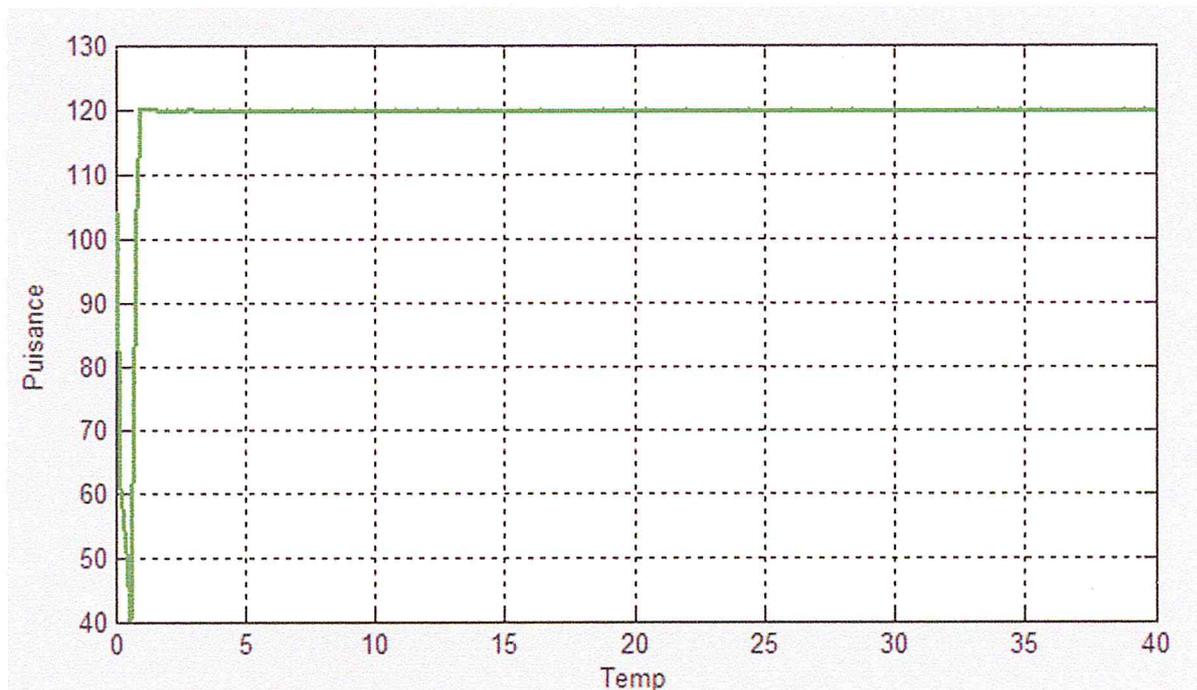


Figure 4.7 : La courbe P(t) de ACO.

Chapitre 4 : Résultats et simulations

Pour prouver l'efficacité de notre solution, on va faire la comparaison avec d'autres algorithmes. Le résultat de la simulation du système PV utilisant l'algorithme de P&O et ANN sont présentés à la Figure 4.8 et Figure 4.9

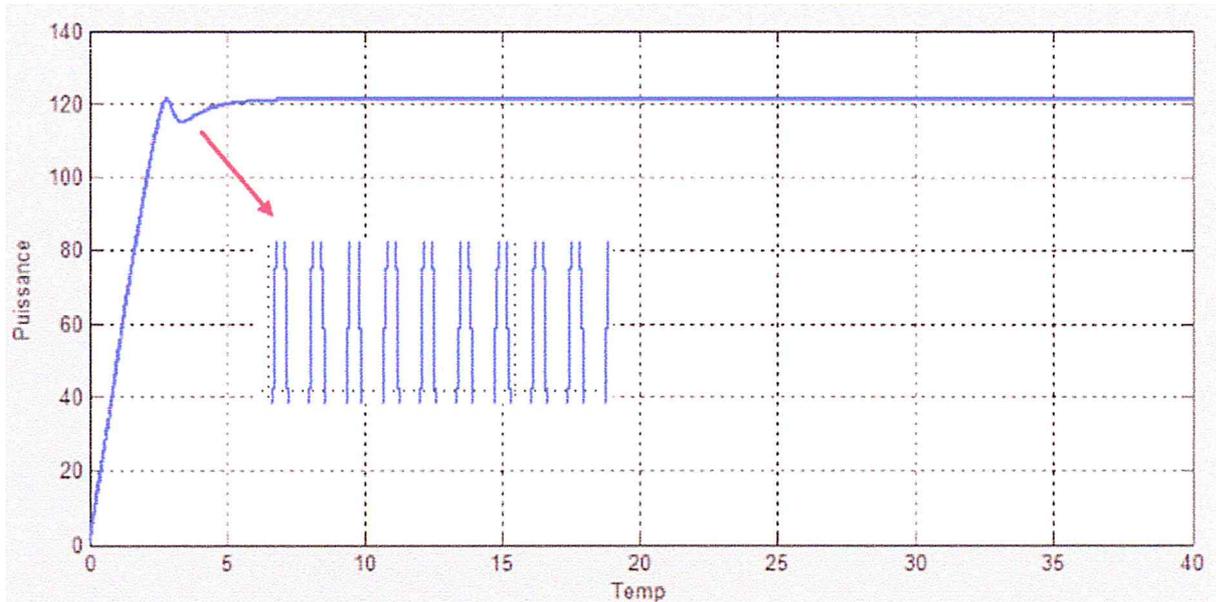


Figure 4.8 : La courbe $P(t)$ de P&O

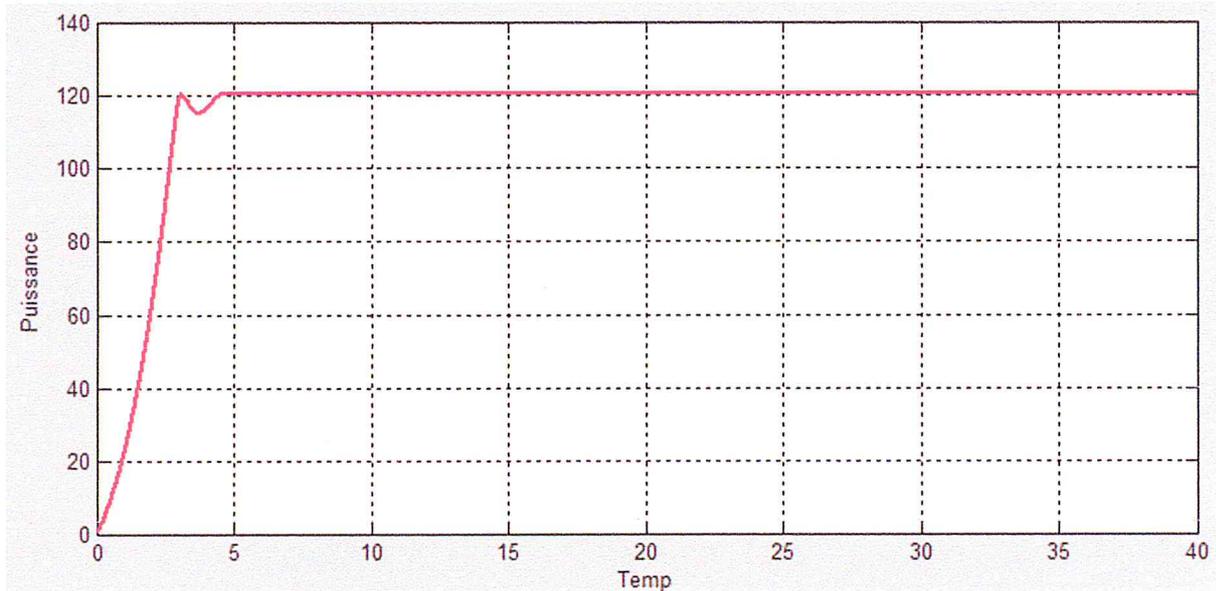


Figure 4.9 : Caractéristique $P(t)$ de ANN

La figure ci-dessous montre les résultats de simulations de différents contrôleurs pour qu'on puisse montrer la différence entre eux.

Chapitre 4 : Résultats et simulations

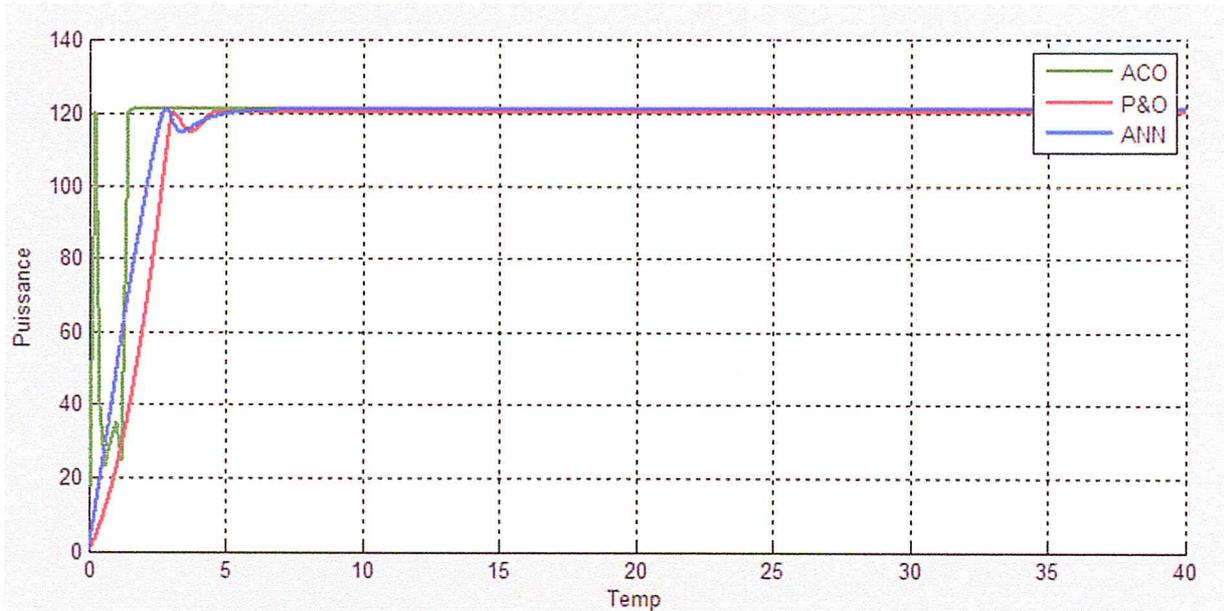


Figure 4.10 : La courbe $P(t)$ de ACO ,P&O,ANN

On remarque la puissance de notre algorithme proposé converge vers la solution optimale avec un temps de réponse meilleur par rapport P&O et ANN.

Le tableau suivant montre les résultats simulé et le temp de réponse de chaque commande.

	Temp de simulation (s)	Pmax simulé (w)	Temp de reponse (s)
P&O	40s	120	4.6
ANN	40s	120	5.5
ACO	40s	119.7	1.4

Tableau 4.1 : Résultats de simulation dans les conditions standard

D'après les résultats de simulation obtenus, on remarque que le temps de réponse de notre contrôleur conduit à des meilleures performances, il est plus rapide comparé aux autres contrôleurs.

4.4.2 Test de stabilité, précision et robustesse

Afin de montrer que notre contrôleur s'adapte à la variation des conditions climatiques, nous avons effectué différents tests.

a) Fonctionnement sous diminution rapide

Le contrôleur est soumis à différentes variations des conditions d'ensoleillement.

Chapitre 4 : Résultats et simulations

Le premier test est effectué sous un changement rapide de l'insolation de 800 à 500 W/m^2 et la température de cellules a été maintenue à une valeur constante de 25°C . Ce cas est observé dans les stations mobiles (Exemple : véhicule solaire) lors de changement brusque de l'angle d'incidence des rayons solaires.

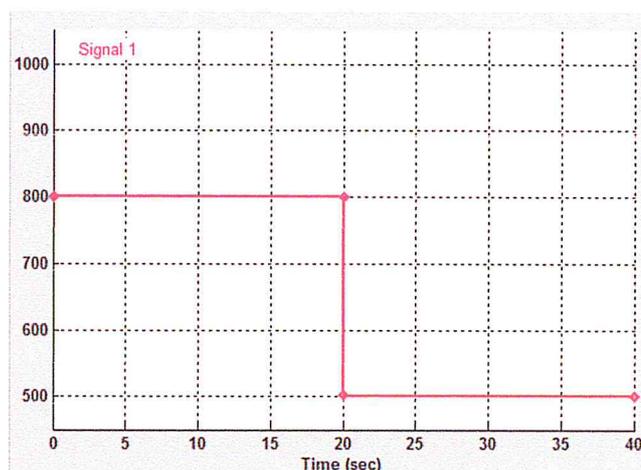


Figure 4.11 : Signal d'insolation

Le GPV produit une dégradation dans la puissance à cause de changement de l'insolation ce qui cause l'apparition de plusieurs pics globales et locales comme la Figure 4.12 montre.

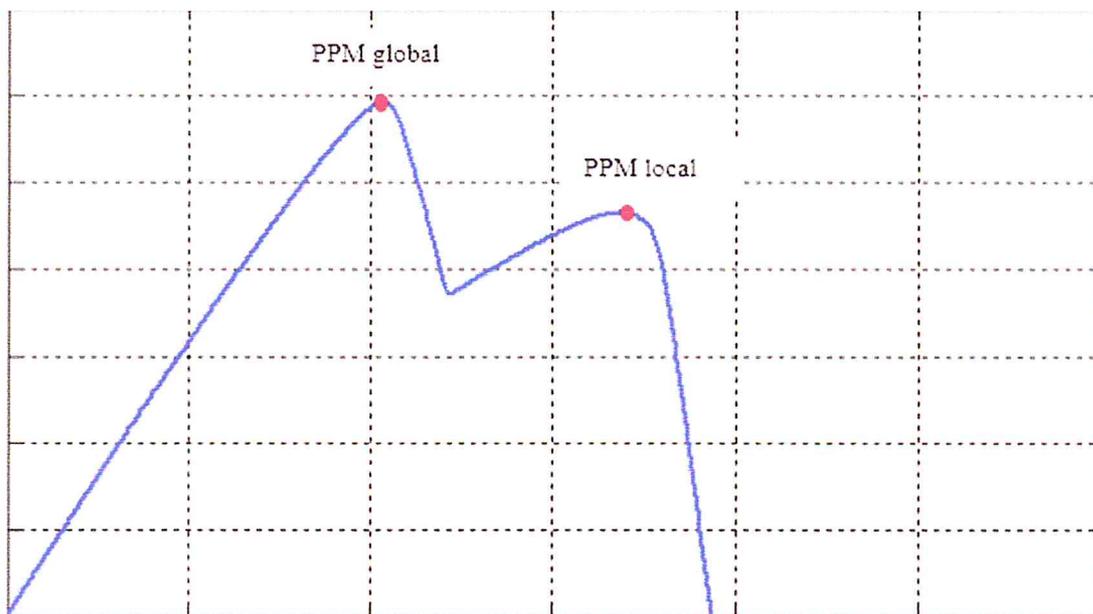


Figure 4.12 : La courbe P(T) sous changement rapide de l'insolation

Nous avons testé ce cas sur les trois algorithmes : ACO, P&O, ANN et le résultat est dans la figure suivante.

Chapitre 4 : Résultats et simulations

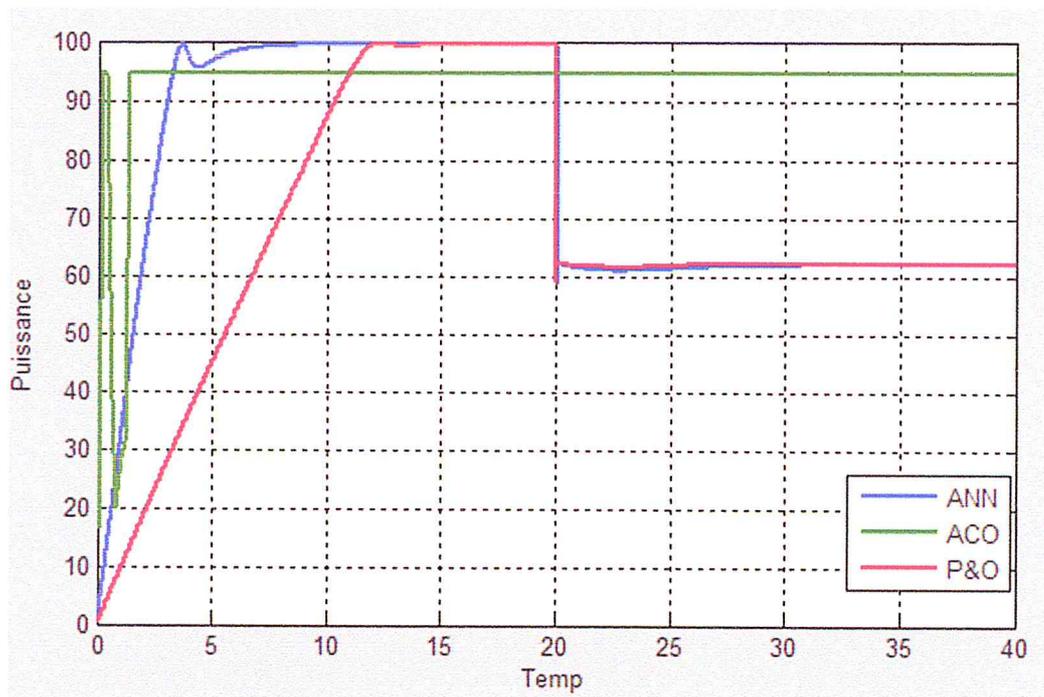


Figure 4.13 : Caractéristique $P(t)$ sous variation rapide de l'ensoleillement de différentes commandes.

Les résultats obtenus par la simulation sont illustré dans le tableau suivant.

	Temp de simulation (s)	Puissance simulé (w)	Temp de réponse (s)
P&O	40s	62.2	26
ANN	40s	61.9	28
ACO	40s	95	1.6

Tableau 4.2 : Résultats de simulation sous variation rapide de l'ensoleillement.

b) Fonctionnement sous un ensoleillement variable

Le deuxième test est effectué sous une variation de l'ensoleillement de 800 à 1000W/m^2 et de 1000 à 500W/m^2 la température de cellules a été maintenue à une valeur constante de 25°C .

Chapitre 4 : Résultats et simulations

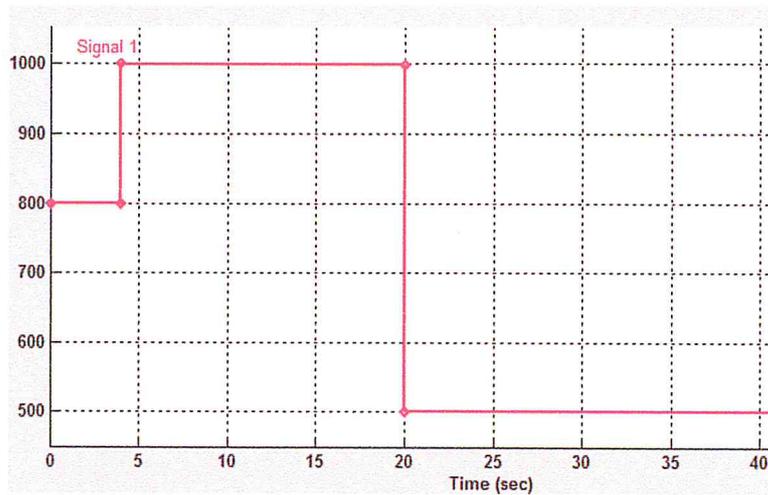


Figure 4.14 : Signal de variation de l'ensoleillement

La figure suivante présente la caractéristique $P(t)$ sous le changement variable de l'ensoleillement qui contient plusieurs pics locaux et globaux.

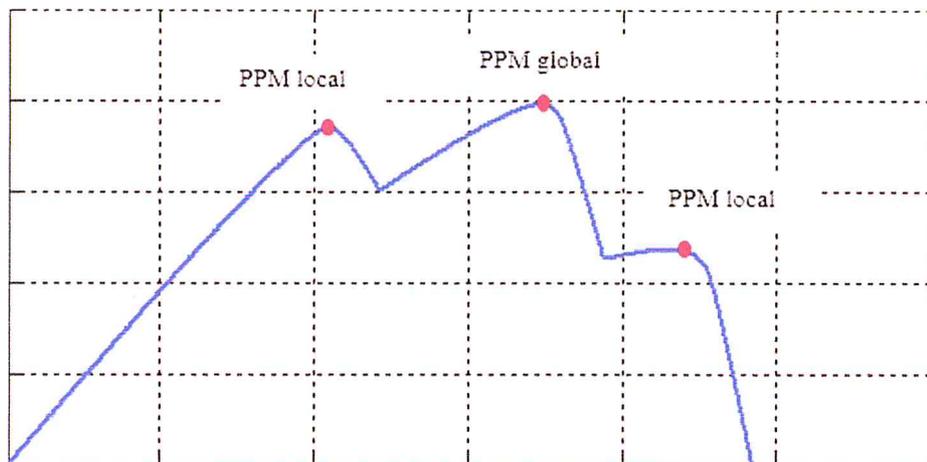


Figure 4.15 : La courbe $P(t)$ dans le cas d'ombrage partiel

Notre travail consiste à trouver le pic global qui représente la puissance maximale. La figure 4.16 montre les résultats de différentes commandes.

Chapitre 4 : Résultats et simulations

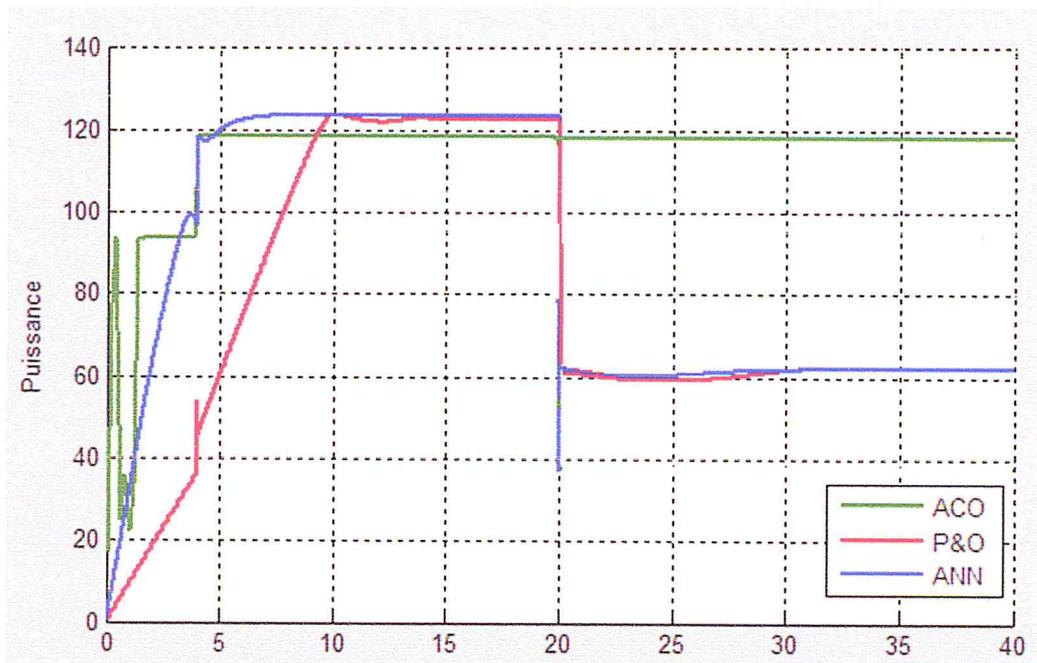


Figure 4.16 : La comparaison entre les différentes commandes avec la courbe P (t)

	Temp de simulation (s)	Pmax simulé (w)	Temp de reponse (s)
P&O	40	62.2	20
ANN	40	61.9	20
ACO	40	119	4

Tableau 4.3 : Résultats de simulation de variation de l'ensoleillement.

On remarque que les contrôleurs ANN et P&O ne prennent pas en compte les changements climatiques (augmentation ou diminution de l'irradiation solaire), il est plutôt dédié aux problèmes où la fonction objectif ne change pas en fonction du temps.

Les résultats obtenus avec notre Contrôleur ACO sont meilleurs que ceux obtenus avec des algorithmes de contrôle (P&O et ANN).

Ainsi, nous pouvons dire que notre contrôleur est

- **Robuste** puisque nous avons prouvé qu'il suit les variations climatiques,
- **Stable**, puisque lorsque le MPP est atteint, il n'y a pas d'oscillations autour de ce point ;
- **Précis**, puisque le MPP atteint la valeur correspondant à l'éclairement donné ;
- **Rapide**, avec une meilleure performance en temps de réponse.

Une étude comparative des différentes commandes proposées (classiques et intelligentes) a montré que le contrôleur basé sur la commande par colonie de fourmis optimise mieux la

Chapitre 4 : Résultats et simulations

puissance de fonctionnement du système. On s'attend à ce que l'utilisation de cette méthode proposée, nous puissions atteindre une puissance maximale en temps réel et à augmenter considérablement la puissance de sortie des panneaux photovoltaïques dans un système de production d'énergie solaire.

4.5 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons modélisé et analysé dans l'environnement MATLAB/SIMULINK le fonctionnement électrique d'un système PV, adapté par un convertisseur BOOST, régulé par une commande MPPT basé sur l'ACO.

D'après les résultats obtenus de la simulation, on remarque que :

- La méthode proposée est une approche simple avec une charge de calcul moindre, ce qui peut être utilisé pour déterminer directement la puissance maximale du panneau.
- Cette méthode pourrait être appliquée à l'algorithme MPPT pour tous types des panneaux photovoltaïques.
- La méthode ACO proposée est non seulement capable de diminuer le temps de localisation du PPM et de la perte d'énergie, mais aussi de réduire la fluctuation de la puissance et d'augmenter l'utilisation d'énergie.

Conclusion Générale

Au terme de ce modeste travail Nous pouvons dire que notre contribution a été axée sur l'optimisation de puissance dans les systèmes photovoltaïque par un algorithme intelligent. Tout d'abord nous avons passé en revue assez générale sur le système photovoltaïque, en rappelant son principe de fonctionnement, ces différents composants, et l'association des cellules dans un module photovoltaïque.

Dans la deuxième partie du mémoire, nous avons décrit le mécanisme de la poursuite pour l'extraction de la puissance maximale sous différentes conditions de fonctionnement. On a présenté aussi les méthodes MPPT basées sur contre réaction de puissance, comme l'algorithme d'incrément de l'inductance et la méthode de perturbation et observation et quelques méthodes intelligentes comme PSO (Particle Swarm Optimization).

Puis, le troisième chapitre de ce mémoire représente la structure de notre commande MPPT. Cette dernière est basée sur le comportement des fourmis lors de recherche de nourriture.

En fin, dans le quatrième chapitre. Nous avons exploré et testé l'application de notre méthode d'optimisation de puissance dans le système photovoltaïque sous Matlab/Simulink.

Les résultats montrent que l'utilisation de notre commande MPPT permet d'améliorer d'une manière considérable le rendement des installations photovoltaïques. Espérant que l'approche proposée peut fournir une base théorique et des connaissances physiques pour la conception des systèmes photovoltaïques. Comme perspective, nous pensons à l'implémentation d'autres contrôleurs intelligents.

References

[1] Boukli Hacem Omar, « Conception et réalisation d'un générateur photovoltaïque muni d'un convertisseur MPPT pour meilleure gestion énergétique »Thèse de magister.Université Abou Bakr Belkaid-Tlemcen.2011

[2] http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1921/

[3] Bensaci Wafa, « Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque adapté par une commande MPPT » Thèse magister, 2012.

[4] Kashif Ishaque , Zainal Salam , Syafaruddin . «A comprehensive MATLAB Simulink PV system simulator with partial shading capability based on two-diode model». Universiti Teknologi Malaysiab Kumamoto University, July 2011, Japan.

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

[6] N. Abouchabana, « Etude d'une nouvelle topologie buck-boost appliquée à un MPPT », Mémoire de Magistère, 2009, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, Algérie.

[7] Azeddine Houari, « contribution a l'étude de micro-réseaux autonomes alimentés par des sources photovoltaïques » ,Thèse magister, L'université de lorraine.2012.

[8]Angel Cid Pastor. « Conception et realisation de modules photovoltaiques electroniques ».INSA de Toulouse.2006.

[9] Cedric Cabal. « Optimisation énergétique de l'étage d'adaptation électronique dédié à la conversion photovoltaïque »Mémoire de doctorat,Université Paul Sabatier -Toulouse.2008.

[10] Lahlah salah, « Etude comparative des techniques MPPT Perturbation and Observation (P&O), Incremental Conductance (Inc.CoN) et Hill climbing (H.C) »,These de magister,Université de Batna.2007

- [11] Hanen Abbes, Hafedh Abid, « Etude comparative de cinq algorithmes de commande MPPT pour un système photovoltaïque » These de master, National School of Engineering of Sfax, University of Sfax. 2013.
- [12] Messaoudane Hichem , « Détermination intelligente de la puissance maximale des modules photovoltaïques », Thèse magister, Université El Hadj Lakhdar -Batna 2014.
- [13] Yassine Lasmi, « Optimisation de la poursuite du point de puissance maximale (MPPT) d'un système photovoltaïque par les techniques intelligentes », Thèse magister, Université Sétif1 ,2013.
- [14] Z.Ayache, A. Bendaoud, H. Slimani, B. Benazza, H. Miloudi and A. Bentaallah, , « Commande MPPT et Contrôle d'un Système Photovoltaïque par la Logique Floue », Thèse magister, Université Djilali Liabès .Sidi Bel Abbès, Algeria. 2007.
- [15] Costanzo Andrea, Luong Thé Van, Marill Guillaume. « Optimisation par colonies de fourmis ». Cours.2006.
- [16] Lemouari Ali, « Introduction aux Métaheuristiques » Cour , Université de Jijel. 2014.
- [17] Souhil Mouassa, « Optimisation de l'écoulement de puissance par une méthode métaheuristique (technique des abeilles) », These de magister, Université Ferhat Abbas Setif.2012.
- [18] Guy Théraulaz. « L'intelligence collective des fourmis », Cours, Université Paul Sabatier.
- [19] Krzysztof Socha, « Ant Colony Optimization for Continuous and Mixed-Variable Domains » Thèse de doctorat , Université Libre de Bruxelles.
- [20] Belkacem Mourad , « Etude et optimisation du transfert d'énergie électrique en conversion photovoltaïque par la recherche du point de puissance maximale (MPPT) », Mémoire master. Université Abou Bekr Belkaid .Tlemcen.2015.
- [21] K. Divya, G. Sugumaran, « DPSO Based SEPIC Converter in PV System under Partial Shading Condition », .International Journal of Electrical.2014
- [22] Kashif Ishaque, Zainal Salam...all, « An Improved Particle Swarm Optimization (PSO) Based MPPT for PV With Reduced Steady-State Oscillation ». 2012