



Université Mohamed Khider de
Biskra

Faculté des Sciences et de la
Technologie

Département de Génie Electrique

MÉMOIRE DE MASTER

Domaine : Sciences et
Techniques

Filière : Génie Electrique
Spécialité : Electromécanique

Réf. : Entrez la référence du document

Présenté et soutenu par :
AYMEN ANGAR

Le : juin 2025

Optimisation de point de puissance maximal d'un panneau photovoltaïque par la méthode d'essaim de particule.

Jury :

Dr.	Kiyyour Brahim	MCA	Université de Biskra	Président
Dr.	Laala Widad	MCA	Université de Biskra	Rapporteur
Dr.	Tkouti Nacira	MCB	Université de Biskra	Examineur
Dr	Guedidi Asma		Université de Biskra	Co-rapporteur

Dédicace

À ma mère et à mon père.

Merci pour votre amour inconditionnel et votre soutien sans faille.

À mes frères Hakim et Rafik, et à ma sœur Aïcha,

Merci pour vos encouragements constants.

**À mon frère Walid, à sa femme Fatma, et à leurs enfants Ghaith et
Zaid.**

Merci pour votre gentillesse et votre présence précieuse.

Un grand merci à mon encadrante, laala Widad.

Pour son accompagnement et son aide tout au long de ce travail.

**Un remerciement particulier à mon ami et voisin Issam Eddine
Djebbari.**

Pour son soutien et son appui sincère.

Remerciements

Remerciements infinis avant tout au Dieu le plus puissant qui nous a comblé des bienfaits de l'islam et de la science.

J'exprime mes profonds remerciements à mon encadrante, Dr **Laala Widad**, ainsi qu'à mon Co-encadrante, le Dr **Guedidi Asma**, pour leur soutien constant et leur guidance précieuse. Je suis heureux de travailler sous leur direction et de bénéficier de leur sagesse, de leur expertise

J'exprimons notre profonde gratitude au Dr **Kiyyour Brahim**. Celui qui nous a fait l'honneur de présider le jury de ce mémoire, nous lui sommes très reconnaissants de l'intérêt qu'il porte à ce travail. Je tiens également à remercier Dr **Tkouti Nacira**. Avoir accepté d'être membre de la Commission d'Arbitrage de la Défense.

Nous exprimons également notre profonde gratitude à tous les professeurs du département électromécanique, Enfin, nous tenons à remercier notre famille et nos amis de nous avoir encouragés.

Résumé :

Ce mémoire aborde la problématique du suivi du point de puissance maximale (MPPT) dans les systèmes photovoltaïques, notamment sous des conditions d'ombrage partiel, où plusieurs points de puissance locaux peuvent apparaître, rendant l'identification du point de puissance maximale global (GMPP) plus complexe.

Pour surmonter cette difficulté, un algorithme MPPT basée sur la méthode d'optimisation par essaim particulaire (PSO) a été proposée. Cette méthode se distingue par sa capacité à dépasser les points de puissance locaux sans s'y arrêter, contrairement aux techniques classiques telles que Perturb and Observe (P&O) ou Incremental Conductance (IncCond).

Les performances de l'approche proposée ont été évaluées à travers des simulations numériques réalisées sur un champ photovoltaïque soumis à un ombrage partiel. Les résultats ont montré que l'algorithme PSO est capable d'atteindre le point de puissance maximale global avec une grande efficacité et une stabilité remarquable.

Mots Clés :

MPPT, GMPP, PSO, IncCond.

Abstract:

This thesis addresses the challenge of Maximum Power Point Tracking (MPPT) in photovoltaic systems, particularly under partial shading conditions, where multiple local power peaks may appear. This makes the identification of the Global Maximum Power Point (GMPP) more complex.

To overcome this issue, an MPPT algorithm based on Particle Swarm Optimization (PSO) is proposed. This method is characterized by its ability to go beyond local power peaks without getting stuck on the first detected maximum, unlike conventional techniques such as Perturb and Observe (P&O) or Incremental Conductance (IncCond).

The performance of the proposed approach was evaluated through numerical simulations on a photovoltaic array under partial shading conditions. The results demonstrated that the PSO algorithm is capable of accurately identifying the global maximum power point with high efficiency and minimal oscillation.

Keywords:

MPPT, GMPP, PSO, IncCond.

ملخص :

الاستدامة القصوى (MPPT) الإلكترونيات الكهروضوئية، خاصة تحت متطلبات التصليل الجزئي، حيث يدوم عدة نقاط جديدة، مما يجعل الوصول إلى النقطة القصوى الحقيقية (GMPP) أكثر مخاطراً. اتصال (MPPT PSO) لم تتمكن من التوقف عند أول قمة إلا أنها يمكن العثور عليها، كما تفعل العديد من الطرق الكلاسيكية مثل الاضطراب والمراقبة (P&O) أو الزيادة والنقصان (IncCond). تم اختبار الأداء عبر المحاكاة الرقمية على مصفوفة فوتوفولطية حقيقية تحت تأثير التصليل الجزئي، حيث توصلت إلى أن الكيفية الفعالة على نقطة الاستطاعة القصوى الكلية عالية وبدون فصول كبيرة في بذل الجهود.

الكلمات المفتاحية:

MPPT ، GMPP ، PSO ، IncCond.

SOMMAIRE

Dédicace

Remerciements

Résumé

Sommaire

Liste des tableaux

Liste des figures

Liste des abréviations

Introduction générale..... 1

Chapitre I : Généralité sur les systèmes photovoltaïques.

I.1- Introduction 3

I.2- Principe de conversion photovoltaïque 3

I.2.1- Effet photovoltaïque 3

I.2.2- Cellule photovoltaïque 5

I.2.2.1 Principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque 5

I.2.2.2- Structure et mode de fonctionnement 5

I.3- Différents type de cellule..... 7

I.4- Modélisation d'une cellule photovoltaïque..... 9

I.4.1- paramètre d'une Cellule photovoltaïque 9

I.4.2- Influence des paramètres internes..... 10

I.4.3- Influence des paramètres externes..... 11

Sommaire

I.4.4- Générateur photovoltaïque.....	11
I.4.4.1- Association des cellules	11
I.4.4.2- Position.....	14
I.4.4.3- Champs PV	14
I.5- Hacheur.....	15
I.6- Générateur photovoltaïque.....	15
I.6.1- Influence de l'éclairement	15
I.6.2- Influences de la température	16
I.6.3- Modèle électrique de la cellule photovoltaïque	17
I.7- Conclusion.....	17
<u>Chapitre II : Techniques de Suivi du Point de Puissance Maximale (MPPT) pour les systèmes photovoltaïques.</u>	
II.1- Introduction	19
II.2- Méthodes Classiques de MPPT	19
II.2.1- Perturb and Observe (P&O)	20
II.2.2- Conductance Incrémentale (IncCond).....	23
II.2.3- Tension ou Courant Constant.....	25
II.2.3.1- Régulation de la Tension.....	26
II.2.3.2- Régulation du Courant.....	27
II.3- Méthodes Intelligentes	28
II.3.1- Logique Floue.....	28
II.3.2- Réseaux de Neurones Artificiels	29
II.4- Méta heuristiques (Optimisation par Essaim Particulaire (PSO))	30
II.4.1- Description et historique de la méthode PSO.....	31
II.4.2- Principe de la méthode PSO.....	31

Sommaire

II.5- La commande MPPT par le Technique d'Optimisation par Essaims de Particule	33
II.6- Les Avantages et inconvénients de la méthode PSO dans les systèmes électriques	34
II.7- Comparaison des méthodes	34
II.8- Conclusion.....	36

Chapitre III : Poursuite du point de puissance maximale parla technique PSO.

III.1- Introduction.....	37
III.2- La caractéristique $P=f(V)$ du champ PV simulé	37
III.3- La caractéristique puissance en fonction de tension d'un champ PV sous les conditions d'ombrage partiel (PSC)	40
III.4- MPPT en utilisant un hacheur	42
III.5- Conclusion	46
Conclusion générale	48
Références bibliographies	50

LISTE DES TABLEAUX

Chapitre I : Généralité sur les systèmes photovoltaïques.

Tableau I.1- Comparaison des rendements des principaux types de cellules photovoltaïques	5
---	----------

Chapitre II : Techniques de Suivi du Point de Puissance Maximale (MPPT) pour les systèmes photovoltaïques.

Tableau II.1- Résumé de l'algorithme P&O	21
Tableau II.2- Comparer les méthodes classiques et les méthodes MPPT intelligentes	35

Chapitre III : Poursuite du point de puissance maximale parla technique PSO.

Tableau III.1- Caractéristiques électriques du module photovoltaïque	38
---	-----------

LISTE DES FIGURES

Chapitre I : Généralité sur les systèmes photovoltaïques.

Figure I.1- Conversion de l'énergie solaire en électricité sur une cellule PV	4
Figure I.2- Modèle équivalent d'une cellule PV	5
Figure I.3- Structure et principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque	6
Figure I.4- Panneaux solaires en cellules amorphes.....	7
Figure I.5- Cellule de silicium monocristallin et panneau solaire fabriqué à partir d'une cellule monocristalline	8
Figure I.6- Cellules en silicium poly cristallin	9
Figure I.7- Groupement de cellules en série.....	12
Figure I.8- Groupement de cellules en parallèle	13
Figure I.9- Groupement de modules en série- parallèle	14
Figure I.10- Hacheur série avec charge inductive.....	16
Figure I.11- Forme d'onde des grandeurs d'un Hacheur série charge inductive en conduction continue.....	17
Figure I.12- présente un exemple des courbes pour différents niveaux de rayonnement	18
Figure I.13- Caractéristique $I = f(V)$ et $P = f(V)$ d'un panneau solaire constitue de 36 cellules en série pour différents températures $T_s = 1000 \text{ w} / \text{m}^2$	19

Chapitre II : Techniques de Suivi du Point de Puissance Maximale (MPPT) pour les systèmes photovoltaïques.

Liste des figures

Figure II.1- dp/dv à différentes positions de la courbe caractéristique de puissance	20
Figure II.2- Organigramme de la méthode P&O	22
Figure II.3- Divergence de la méthode P&O	23
Figure II.4- Signe de la pente de la puissance sur la courbe P-V	24
Figure II.5- Organigramme de la commande IncCond	25
Figure II.6- Schéma fonctionnel de la régulation de la tension	26
Figure II.7- Schéma fonctionnel de la régulation du courant.....	27
Figure II.8- Schéma bloc de l'algorithme à base de la logique floue	29
Figure II.9- Le schéma simplifie l'installation de neurones artificiels pour le MPPT.....	30
Figure II.10- Principe du déplacement des particules dans l'espace de recherche.....	33
Figure II.11- Algorithme de particules d essaim	34

Chapitre III : Poursuite du point de puissance maximale parla technique PSO.

Figure III.1- Modèle de simulation P(V) et I(V) avec et sans ombrage	37
Figure III.2- Courbes de puissance et courant en fonction de la tension sous trois niveaux d'irradiance.....	38
Figure III.3- Suivi MPPT par l'algorithme PSO : Évolution en fonction des itérations.....	40
Figure III.4- La caractéristique $P=f(V)$ sous différentes conditions d'ombrage partiel (PSC)	41
Figure III.5- Suivi du point de puissance maximale (MPP) sur une courbe P(V) sous trois irradiances à différentes itérations de l'algorithme PSO	42
Figure III.6- Simulation de la commande PSO.....	43
Figure III.7- Le courant d'entrée et de sortie.....	44
Figure III.8- La tension d'entrée et de sortie	44

Liste des figures

Figure III.9- La puissance d'entrée et de sortie	45
Fig.III.10- Rapport cyclique	45
Figure III.11- Puissance d'entrée et de sortie pour une variation de l'éclairement	46
Fig.III.12- Rapport cyclique	46

LISTE DES PRINCIPAUX ABREVIATIONS

PV : Photovoltaïque.

PN : Jonction PN.

ZCE : Zone de Charge d'Espace.

Voc : Tension en circuit ouvert.

Icc : Courant de court-circuit.

I-V : Courant-Tension.

FF : Facteur de Forme.

η (Eta) : Rendement.

Rs : Résistance série.

Rsh : Résistance parallèle.

Pm : Puissance maximale.

MPPT: Maximum Power Point Tracking.

MPP : Maximum Power Point.

GPV: Générateur Photovoltaïque.

P&O : Perturb and Observe.

IncCond : Incremental Conductance.

Voc : Tension à vide.

Isc (ou Icc) : Courant de court-circuit.

Vmp : Tension au point de puissance maximale.

Imp : Courant au point de puissance maximale.

RNA : Réseaux de Neurones Artificiels.

Liste des principaux abreviations

Pso : Optimisation par Essaim Particulaire.

dP/dV : Dérivée de la puissance par rapport à la tension.

ACO : Optimisation par colonie de fourmis.

GA : Genetic Algorithm.

Pmax : Puissance maximale.

PSC : Partial Shading Conditions (Conditions d'ombrage partiel).

DC-DC : Convertisseur continu-continu (type de hacheur).

GMPP : Global Maximum Power Point (Point de puissance maximale global).

Introduction Générale

L'augmentation constante de la demande énergétique, conjuguée aux préoccupations environnementales et à la raréfaction des ressources fossiles, a incité la communauté scientifique à explorer des alternatives durables et respectueuses de l'environnement. Parmi celles-ci, l'énergie solaire photovoltaïque se distingue comme une source propre, inépuisable et adaptée aux besoins croissants en électricité. Toutefois, l'exploitation optimale de cette ressource naturelle reste un défi majeur, en raison de sa dépendance aux conditions météorologiques et aux caractéristiques non linéaires des panneaux photovoltaïques (PV).

L'un des axes fondamentaux pour améliorer le rendement des systèmes photovoltaïques consiste à extraire la puissance maximale que peut délivrer le panneau sous des conditions d'éclairement et de température données. Ce processus, connu sous le nom de suivi du point de puissance maximale (MPPT), fait appel à diverses techniques de commande et d'optimisation.

Dans cette optique, ce travail se focalise sur la simulation et l'analyse de la méthode de suivi du point de puissance maximale basée sur l'algorithme PSO (Particle Swarm Optimization). L'étude vise à mesurer les performances du PSO lorsqu'il est appliqué à une structure composée d'un panneau photovoltaïque, d'un hacheur abaisseur, et d'une charge résistive, en mettant l'accent sur sa capacité à atteindre rapidement et avec précision le point de puissance maximale, tout en garantissant une bonne stabilité du système.

L'objectif est d'examiner les performances du PSO dans un montage associant un panneau PV, un hacheur abaisseur, et une charge résistive, afin d'en démontrer la robustesse et la rapidité de convergence vers le point de puissance maximale.

Ce travail est structuré en trois chapitres principaux :

- **Le premier chapitre** : présent les principes fondamentaux de la conversion photovoltaïque, les différentes structures de panneaux solaires existantes, ainsi que la modélisation mathématique du panneau PV.
- **Le deuxième chapitre** : est consacré à l'étude des différentes méthodes de suivis de MPPT, notamment la méthode P&O, la méthode de conductance incrémentale, et l'algorithme d'optimisation par essaim particulaire (PSO).

- **Le troisième chapitre** : expose les résultats de simulation obtenus en appliquant la méthode PSO sur un système PV connecté à un hacheur et à une charge résistive. Le but est de démontrer non seulement la rapidité de convergence et la stabilité de la méthode, mais également son impact positif sur le rendement énergétique global du système, en maximisant de manière efficace l'énergie extraite du générateur solaire.

Finalement, ce travail est clôturé par une conclusion qui résume les principaux résultats obtenus et propose des perspectives d'amélioration pour des recherches futures.

Chapitre I :
Généralité sur les systèmes
photovoltaïques.

I.1- Introduction :

Ce chapitre est consacré à l'étude des principes de base de la conversion de l'énergie solaire en électricité à l'aide de la technologie photovoltaïque. Nous y introduisons d'abord le concept de l'effet photovoltaïque, phénomène physique qui permet aux cellules solaires de générer un courant électrique lorsqu'elles sont exposées à la lumière. Nous présentons ensuite les différentes structures de cellules photovoltaïques, avec un accent particulier sur celles à base de silicium, largement utilisées dans l'industrie. La modélisation de la cellule est également abordée, en mettant en évidence les paramètres clés qui influencent son rendement, qu'ils soient liés à la conception de la cellule elle-même ou aux conditions environnementales. Enfin, nous décrivons la constitution d'un générateur photovoltaïque, en expliquant les modalités d'association des cellules, l'orientation optimale des modules et la configuration des champs photovoltaïques selon les besoins spécifiques du site d'installation [1].

I.2- Principe de conversion photovoltaïque :

Le principe de conversion photovoltaïque repose sur la transformation de l'énergie solaire en énergie électrique. Cela se fait grâce à l'effet photovoltaïque, où les cellules solaires, généralement en silicium, convertissent la lumière en courant continu. Cette conversion est influencée par divers paramètres comme l'intensité lumineuse et la température, qui déterminent l'efficacité du système. Ce processus est fondamental pour les technologies solaires modernes, permettant une production d'énergie propre et durable.

I.2.1- Effet photovoltaïque :

L'effet photovoltaïque est un phénomène physique fondamental qui permet la conversion de l'énergie solaire en énergie électrique. Ce processus repose sur l'utilisation de semi-conducteurs, des matériaux dont la conductibilité électrique peut varier en fonction de certaines conditions.

Un matériau photovoltaïque typique est constitué de deux parties distinctes : une partie dopée de type N, qui présente un excès d'électrons, et une partie dopée de type P, qui présente un déficit en électrons. Lorsque ces deux parties sont mises en contact, les électrons en excès dans le matériau N diffusent vers le matériau P. Par conséquent, la zone N devient chargée

positivement, tandis que la zone P devient chargée négativement. Cette interface entre les zones N et P forme une jonction P-N.

Au niveau de cette jonction, un champ électrique se crée en raison de la différence de charges électriques entre les deux zones. Ce champ électrique agit comme une barrière pour les électrons en excès dans la zone N, les repoussant vers cette zone, et pour les "trous" (défauts d'électrons) dans la zone P, les poussant également vers cette zone.

Cette configuration crée une séparation nette des charges électriques, générant ainsi un potentiel électrique entre les deux zones.

Lorsque la lumière solaire, composée de photons, atteint la jonction P-N, les photons peuvent exciter les électrons dans le matériau, leur donnant suffisamment d'énergie pour surmonter la barrière du champ électrique et se déplacer vers la zone N. Ce mouvement des électrons crée un courant électrique dans le circuit externe connecté au matériau photovoltaïque.

En d'autres termes, les électrons supplémentaires, qui ont acquis de l'énergie grâce aux photons solaires, ont tendance à quitter la zone N par le biais d'un contact électrique externe, car le champ électrique à la jonction P-N est très fort. Cela entraîne la génération d'un courant électrique dans le circuit externe, qui est défini dans le sens opposé à celui des électrons.

Ce processus d'excitation des électrons par les photons solaires et de génération d'un courant électrique est à la base du fonctionnement des cellules solaires photovoltaïques. En exploitant cet effet photovoltaïque, il est possible de capturer une partie de l'énergie solaire et de la convertir directement en électricité, offrant ainsi une source d'énergie propre et renouvelable [1].

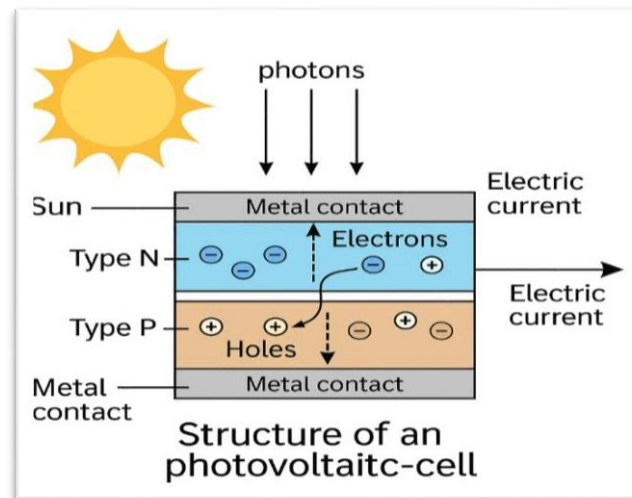


Figure I.1- Conversion de l'énergie solaire en électricité sur une cellule PV [1].

I.2.2- Cellule photovoltaïque :

La première cellule photovoltaïque (ou photopile) a été développée aux Etats-Unien 1954 par les chercheurs des laboratoires Bell, qui ont découvert que la photosensibilité du silicium pouvait être augmentée en ajoutant des "impuretés", c'est une technique appelée le "dopage" qui est utilisée pour tous les semi-conducteurs [2].

I.2.2.1- Principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque :

Quand une cellule solaire photovoltaïque est éclairée par le soleil et en même temps connectée à une charge, elle génère une différence de potentiel entre les contacts causés par le mouvement des électrons à travers la charge, dans ces conditions, la cellule fonctionne comme un générateur de courant [3].

Le modèle équivalent d'une cellule est proche de celui d'une diode à jonction PN dont les caractéristiques dépendent du semi-conducteur, l'effet photovoltaïque pouvant être décrit par une simple source de courant proportionnelle au courant engendré par l'éclairement de la cellule. A cela, nous devons ajouter une résistance série (R_s) représentant les diverses résistances de contact et une résistance parallèle (R_p) représentant les divers courants de fuite (Figure 2) [2].

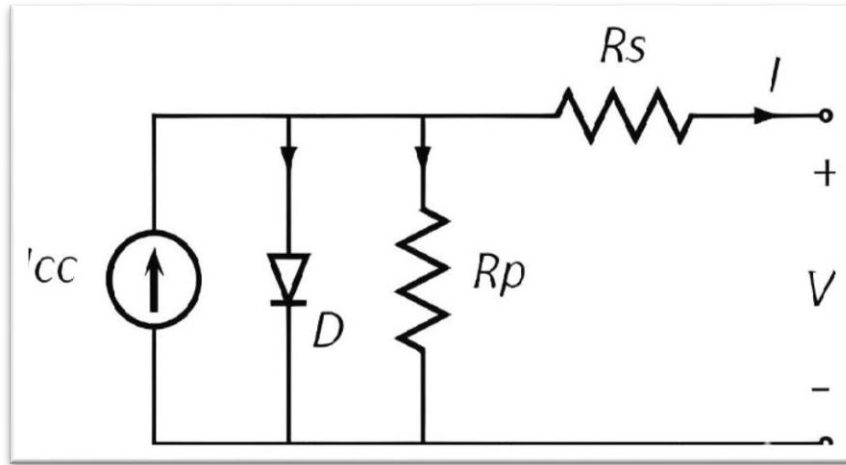


Figure I.2- Modèle équivalent d'une cellule PV [2].

I.2.2.2- Structure et mode de fonctionnement :

La cellule photovoltaïque est basée sur le phénomène physique appelé effet photovoltaïque, qui consiste à établir une force électromotrice lorsque la surface de cette cellule est exposée à la lumière. La tension générée peut varier en fonction du matériau utilisé et d'autres paramètres. Une cellule PV est réalisée généralement à partir de deux couches, une dopée P et l'autre dopée N, créant ainsi une jonction PN avec une barrière de potentiel. Cette jonction peut être d'un même matériau (homo jonction P-N) ou entre deux matériaux (hétérojonction). Cette transformation photovoltaïque est basée sur les trois mécanismes suivants: absorption des photons d'énergie $h\nu \geq E_g$ par le matériau constituant le dispositif. Conversion de l'énergie du photon en énergie électrique, ce qui correspond à la création de paires électron-trou dans le matériau semi-conducteur. Collecte des particules générées dans les régions neutres N et P sous l'effet d'un champ électrique interne. La figure (I-2) montre le principe de fonctionnement d'une cellule PV.

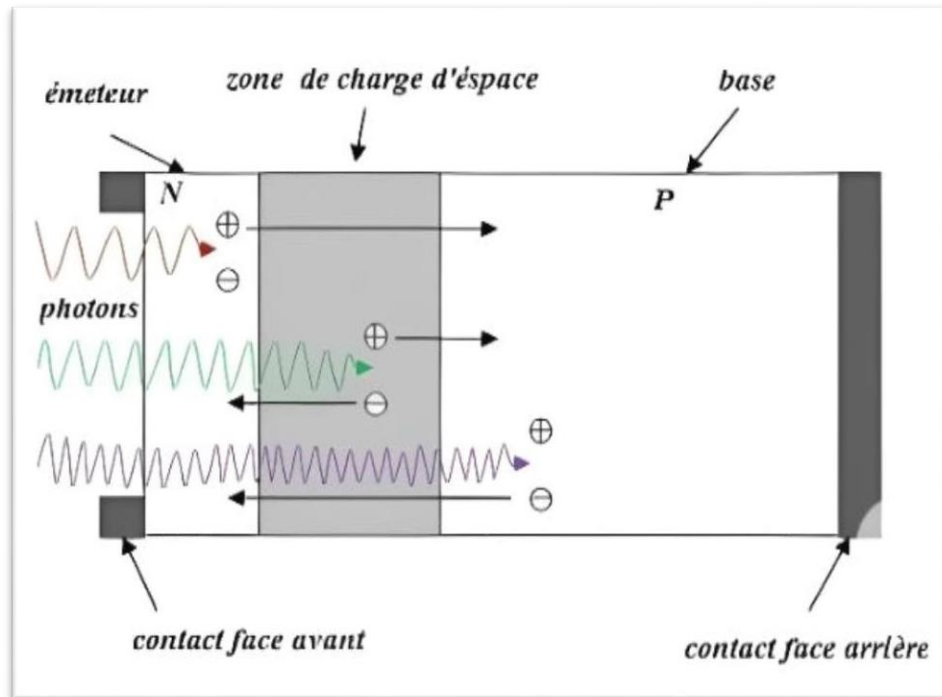


Figure I.3- Structure et principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque [4].

Dans la ZCE (zone de charge d'espace), les paires électron-trou créées par les photons incidents sont dissociées par le champ électrique. Les électrons vont aller vers la région N et les trous vers la région P. Dans la zone N, les trous qui atteignent la ZCE sont envoyés par le champ électrique dans la zone P. par contre dans la zone P c'est l'inverse. Ces deux procédures sont à l'origine du photo courant La. C'est un courant de porteurs minoritaires. La collection des porteurs de charges va créer une tension interne; on l'appelle la tension du circuit ouvert VEN [4].

I.3- Différents type de cellule :

Les cellules les plus courantes sont actuellement basées sur le silicium (2,2 V). Le tableau montre l'efficacité des modules et cellules en fonction des différentes technologies.

Tableau I.1- Comparaison des rendements des principaux types de cellules photovoltaïques.

[5]

Technologies	Rendement cellule (labo)	Rendement cellule (production)	Rendement module
Mono cristallin	24.7%	21.5%	16.9%

Poly cristallin	20.3%	16.5%	14.2%
Couche mince	13%	10.5%	7.5%

- La cellule en silicium amorphe (organique) :

Le silicium ne se cristallise pas, mais il est déposé sur une plaque de verre. La cellule est de couleur gris foncé. C'est une cellule utilisée dans les calculatrices et les montres, et elle est appelée cellule solaire [5].

Les Avantages :

- Fonctionne avec une faible luminosité (par temps nuageux ou à l'intérieur d'un bâtiment).
- Moins coûteuse que les autres types.

Les Inconvénients :

- Faible rendement (environ 10 %, soit une qualité inférieure aux autres en plein soleil).
- Leur efficacité diminue notablement avec le temps.



Figure I.4- Panneaux solaires en cellules amorphes [5].

- La cellule en silicium monocristallin :

Lorsque le silicium fondu est refroidi, il est structuré de manière à se solidifier sous forme d'un gros lingot unique, qui est ensuite découpé en fines tranches pour donner les cellules. Ces cellules sont généralement de couleur bleue uniforme [5].

Les Avantages :

- Bon rendement, environ 20 %.

Les Inconvénients :

- Cellules coûteuses. Processus de fabrication inefficace en faible luminosité.

- Processus de fabrication inefficace en faible luminosité.

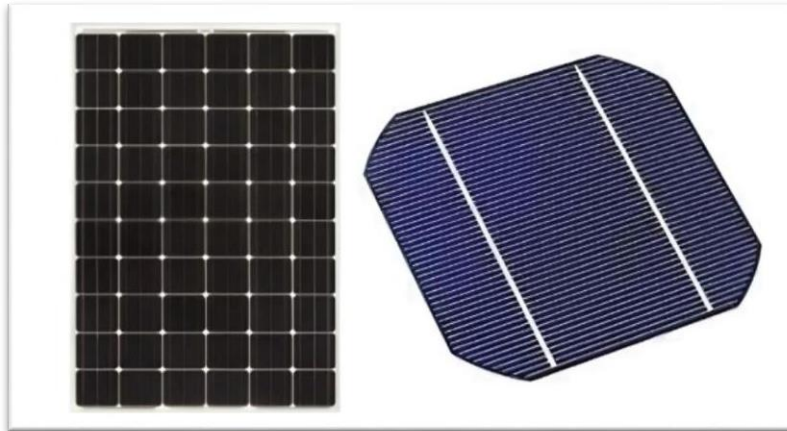


Figure I.5- Cellule de silicium monocristallin et panneau solaire fabriqué à partir d'une cellule monocristalline [5].

- Les cellules en silicium multi cristallin :

Lorsque le silicium fondu est refroidi, plusieurs cristaux se forment. Ce type de cellules est également de couleur bleue, mais elle n'est pas uniforme. On peut distinguer les motifs créés par les différents cristaux [5].

Les Avantages :

- Bon rendement (environ 13 %) mais inférieur à celui des monocristallins.
- Moins cher que les monocristallins.

Les Inconvénients :

- Même défauts que les monocristallins.
- Ce sont les cellules les plus utilisées pour la production d'électricité (meilleur rapport qualité/prix).

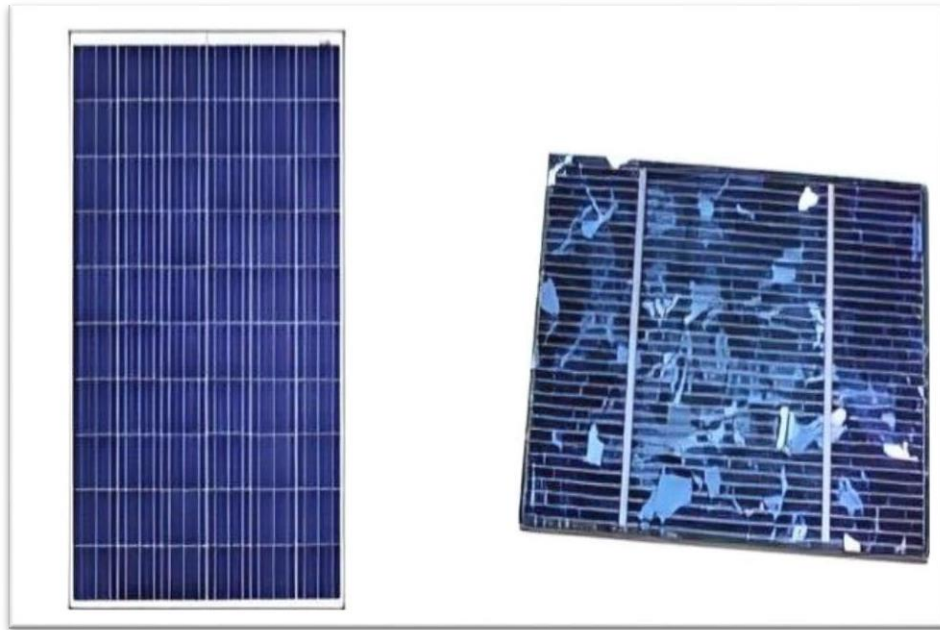


Figure I.6- Cellules en silicium poly cristallin [5].

I.4- Modélisation d'une cellule photovoltaïque :

L'objectif de cette simulation est d'identifier les différents facteurs qui impactent l'efficacité et la performance d'une cellule. Dans ce cadre, il est prévu de déterminer son fonctionnement en se basant sur des paramètres internes comme les matériaux employés dans sa fabrication et externes notamment les exigences climatiques qui ont des conséquences sur sa production électrique.

I.4.1- paramètre d'une Cellule photovoltaïque :

Les paramètres essentiels d'une cellule photovoltaïque sont :

Courant de court-circuit (I_{cc}) :

C'est le courant maximal produit par la cellule lorsque ses bornes sont court-circuitées. Ce courant est un indicateur de la capacité de la cellule à générer un courant sous lumière.

Tension de circuit ouvert (V_{oc}) :

Il s'agit de la tension maximale que la cellule peut générer lorsque ses bornes sont ouvertes (sans charge connectée). Cette tension dépend des propriétés du matériau utilisé dans la cellule.

Courant et tension de fonctionnement (I et V) :

Ce sont les valeurs réelles mesurées lorsque la cellule fonctionne sous charge. Ces valeurs permettent de calculer la puissance produite par la cellule.

Facteur de forme (FF) :

Ce paramètre évalue l'efficacité de la cellule en comparant la puissance maximale qu'elle peut produire à sa puissance théorique maximale.

Efficacité (η) :

L'efficacité d'une cellule photovoltaïque représente la proportion d'énergie solaire convertie en électricité. Plus l'efficacité est élevée, meilleure est la conversion de la lumière en énergie.

Coût de la cellule :

Bien que cela ne soit pas un paramètre directement lié à l'efficacité de la cellule, son coût est un facteur déterminant pour son adoption à grande échelle.

I.4.2- Influence des paramètres internes :

Les paramètres internes concernent la conception physique et les propriétés du matériau de la cellule photovoltaïque. Ces facteurs influencent la manière dont la cellule convertit la lumière en électricité. Les principaux paramètres internes sont :

Type de matériau :

Le choix du matériau semi-conducteur (par exemple, silicium cristallin, couches minces, ou pérovskites) a un impact majeur sur l'efficacité de la conversion.

Dopage du semi-conducteur :

Le niveau de dopage (ajout d'impuretés dans le matériau) détermine les propriétés électriques du matériau, notamment la densité de porteurs de charge, influençant ainsi la performance de la cellule.

Épaisseur du matériau :

Une épaisseur trop importante peut entraîner des recombinaisons de porteurs de charge, tandis qu'une épaisseur trop fine peut limiter la quantité de lumière absorbée.

Qualité du matériau :

Les défauts dans la structure cristalline ou la présence d'impuretés réduisent l'efficacité des cellules en provoquant des recombinaisons non désirées des porteurs de charge.

I.4.3- Influence des paramètres externes :

Les paramètres externes affectent directement la performance d'une cellule photovoltaïque et sont liés aux conditions environnementales. Les facteurs externes les plus importants incluent :

Irradiation solaire :

L'intensité du rayonnement solaire reçu par la cellule (mesurée en W/m^2). Une irradiation plus élevée entraîne une production d'énergie plus importante.

Température :

La température ambiante influence l'efficacité des cellules photovoltaïques. En règle générale, une température plus élevée réduit la tension de sortie de la cellule et donc son efficacité.

Angle d'incidence de la lumière :

L'angle auquel la lumière solaire frappe la cellule. L'optimisation de cet angle augmente l'absorption de la lumière et donc la performance de la cellule.

Conditions météorologiques :

Nuages, poussière, ou pollution peuvent réduire l'irradiation solaire reçue par la cellule, diminuant ainsi son rendement.

Température de la cellule :

Elle dépend de l'environnement et des mécanismes de refroidissement disponibles. Une température plus basse permet généralement de maintenir une meilleure performance.

I.4.4- Générateur photovoltaïque :

L'énergie solaire photovoltaïque provient de la transformation directe d'une partie du rayonnement solaire en énergie électrique. Cette conversion d'énergie s'effectue par le biais d'une cellule dite photovoltaïque basée sur un phénomène physique appelé effet

photovoltaïque qui consiste à produire une force électromotrice lorsque la surface de cette cellule est exposée à la lumière [6.7].

La cellule photovoltaïque élémentaire constitue un générateur de très faible puissance vis-à-vis des besoins de la plupart des applications domestiques ou industrielles. Une cellule élémentaire de quelques dizaines de centimètres carrés délivre, au maximum, quelques watts sous une tension inférieure au un volt [8].

Pour produire plus de puissance, plusieurs cellules doivent être assemblées afin de créer un module ou un champ photovoltaïque. La connexion en série des cellules permet d'augmenter facilement la tension de l'ensemble, tandis que la mise en parallèle permet d'accroître le courant. Le câblage série/parallèle est donc utilisé pour obtenir globalement un générateur PV aux caractéristiques souhaitées [9].

I.4.4.1- Association des cellules :

Il existe plusieurs types d'association des cellules photovoltaïques, chacune permettant d'ajuster les caractéristiques électriques du système en fonction des besoins spécifiques en termes de tension et de courant.

A. Association en série :

La caractéristique courant-tension d'une cellule reste valable pour un groupement de cellules. Le courant généré par N, générateurs en série étant le même dans toute la branche, on prendra soin de ne connecter en série que des cellules identiques ayant même densité de courant. La Figure (I-6) présente la courbe (IV) du groupement ainsi réalisé. La caractéristique résultante est obtenue en multipliant point par point et pour un même courant la tension individuelle V, par N [10].

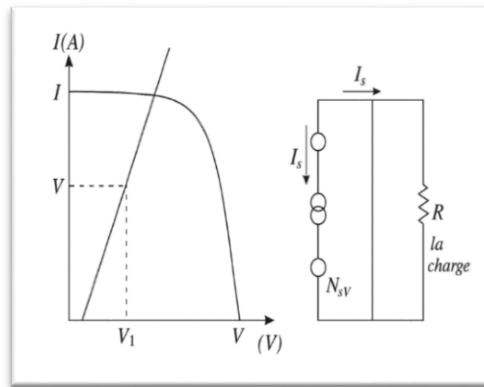


Figure I.7- Groupement de cellules en série [10].

B. Association en parallèle :

Pour augmenter le courant fournit à une charge on connecte les cellules en parallèle. La figure (I-7) présente la courbe $I(V)$ d'un groupement de $N_{\{p\}}$ cellules en parallèle. On ne monte que des cellules ayons la même tension de fonctionnement, les courants s'ajoutent, la nouvelle courbe est obtenue en multipliant point par point et pour chaque valeur de tension, le courant I de la cellule élémentaire par $N_{\{p\}}$ [10].

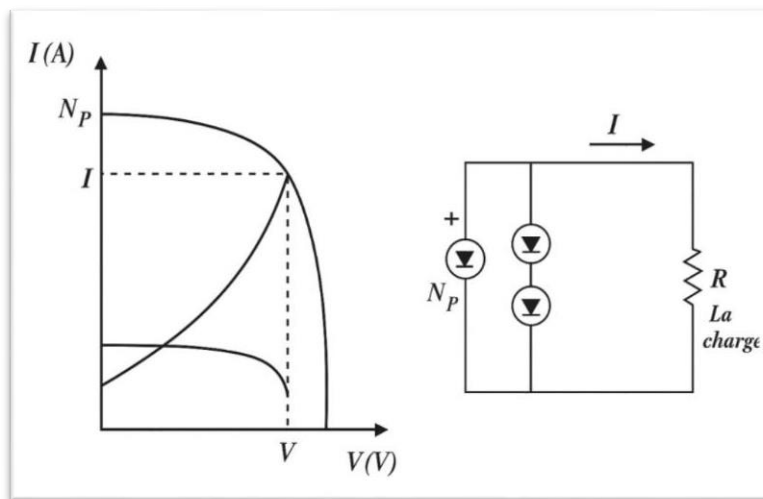


Figure I.8- Groupement de cellules en parallèle [10].

C. Association en série parallèle :

Pour élever la tension, les cellules sont associées généralement en séries sous forme de modules, ces modules sont ensuite associés en réseau série-parallèle de façon à obtenir la tension et le courant désirés. Cette association doit être réalisée en respectant des critères

précis, en raison des déséquilibres apparaissant dans un réseau de modules en fonctionnement. La figure (I-8) présente un tel groupement de N ms modules en série dans une branche, et N bp branchent en parallèle. Si P_{m} est la puissance crête disponible sur un module, la caractéristique électrique globale courant-tension du panneau PV sera $N \cdot v_m \cdot N \cdot i_{sc}$ dans le cas idéal, où tous les modules ont des caractéristiques électriques identiques. L'influence de l'éclairement et de la température sur le courant de court-circuit et la tension de circuit ouvert reste la même que pour la cellule élémentaire [10].

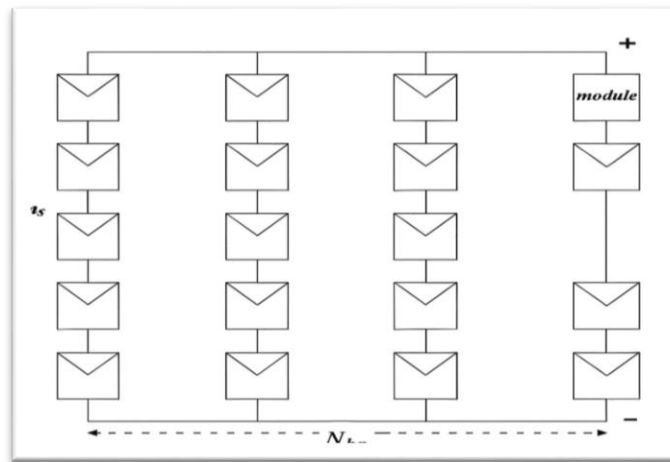


Figure I.9- Groupement de modules en série- parallèle [10].

I.4.4.2- Position :

La position d'un générateur photovoltaïque fait référence à son orientation et à son inclinaison par rapport au soleil. Ces facteurs influencent directement la quantité d'énergie produite par les panneaux solaires. Une position optimale permet de maximiser l'absorption de l'ensoleillement tout au long de l'année.

Cela inclut l'ajustement de l'angle des panneaux pour capter le maximum de lumière, selon la latitude et la saison, afin d'optimiser la production d'énergie solaire.

I.4.4.3- Champs PV :

Le champ photovoltaïque, ou système photovoltaïque solaire, est l'unité de puissance énergétique la plus importante d'une centrale solaire. Une centrale photovoltaïque comprend deux composants principaux : le champ photovoltaïque et l'onduleur solaire. Elle repose sur l'idée d'organiser des modules solaires en un réseau pour capter le rayonnement solaire et le convertir en courant continu (CC). Les modules sont composés de cellules

photovoltaïques (PV) qui peuvent être assemblées en séries et en combinaisons parallèles pour atteindre la tension et le courant souhaités. En fonction des contraintes du site et de l'objectif du projet, le réseau photovoltaïque peut également être positionné sur des toits, au sol ou monté sur des structures spécialement conçues. Il peut être utilisé comme un système autonome avec stockage par batterie, ou il peut être connecté au réseau électrique pour vendre l'électricité générée. La configuration du champ photovoltaïque dépend d'un certain nombre de facteurs tels que l'orientation du champ, l'angle d'inclinaison, l'ensoleillement local et l'ombrage. Une centrale photovoltaïque peut avoir un grand impact sur l'atteinte de la durabilité énergétique lorsqu'elle est conçue pour optimiser la production d'énergie. En plus de la génération, des composants de protection et de contrôle sont ajoutés pour prévenir tout dommage incontrôlé au système. En résumé, cette recherche souligne clairement le rôle du champ photovoltaïque dans la transition vers des sources d'énergie renouvelables.

I.5- Hacheur :

Un Hacheur série associe une source de tension liée par intermittences à un récepteur de courant. Il est un convertisseur statique réglant le transfert d'énergie entre un générateur de tension continue est une source de courant continu où la tension moyenne de sortie est inférieure à celle de l'entrée.

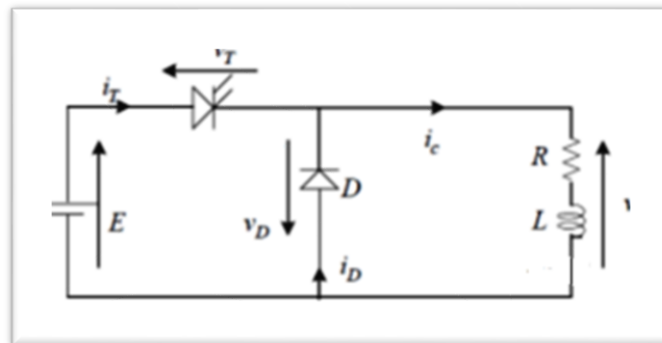


Figure I.10- Hacheur série avec charge inductive.

Dans ce qui suit nous allons présenter le principe de fonctionnement d'un hacheur serie avec une charge inductive sur une période T :

$0 < t < \alpha T$: H est commandé à la fermeture, donc il va devenir passant et la diode D sera bloquée.

$$v_H = 0 \quad v_D = E$$

$$v_c = Ri_c + L \frac{di_c}{dt} = E \quad (I.1)$$

$$i_c(t) = \left(I_{min} - \frac{E}{R}\right) e^{-\frac{t}{\tau}} + \frac{E}{R} \quad \text{avec } I_{min} = I_0 = i_c(0) \quad (I.2)$$

$\alpha T < t < T$: H est ouvert et la diode de roue libre D devient passante. ce qui permet à l'inductance de libérer l'énergie électromagnétique qu'elle avait accumulée.

L'équation différentielle du courant de la charge sera la suivante :

$$v_c = Ri_c + L \frac{di_c}{dt} = 0 \Rightarrow i_c(t) = I_{Max} e^{-\frac{(t-\alpha T)}{\tau}} \quad \text{avec } I_{Max} = i_c(\alpha T) \quad (I.3)$$

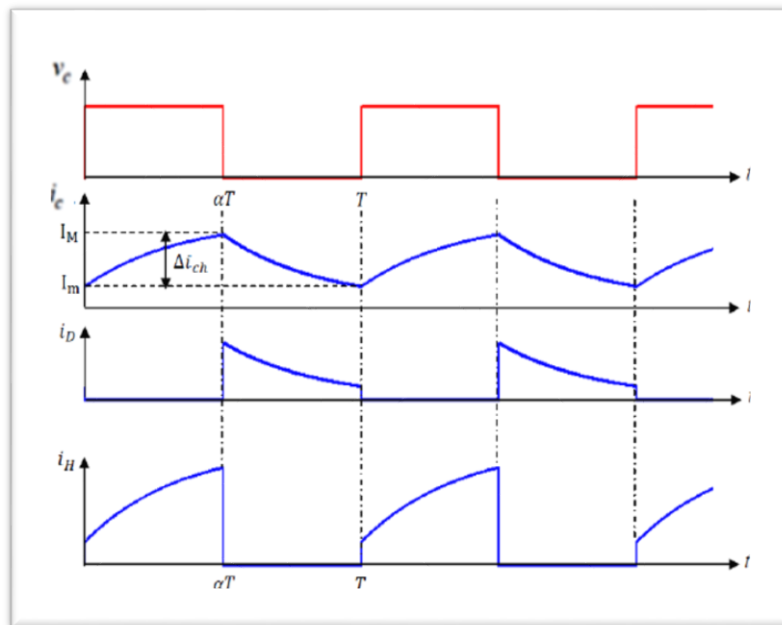


Figure I.11- Forme d'onde des grandeurs d'un Hacheur série charge inductive en conduction continue.

I.6- Générateur photovoltaïque :

La simulation d'un générateur photovoltaïque consiste à modéliser numériquement le comportement du système sous différentes conditions environnementales, comme l'irradiance solaire et la température. Elle permet d'évaluer les performances électriques (tension,

courant, puissance) et d'optimiser le dimensionnement du système avant l'installation réelle. Cette étape est essentielle pour anticiper les pertes, améliorer le rendement, et adapter les composants comme les régulateurs et les convertisseurs.

I.6.1- Influence de l'éclairement :

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 $25 \text{ deg}^\circ \text{C}$ [1] [11].

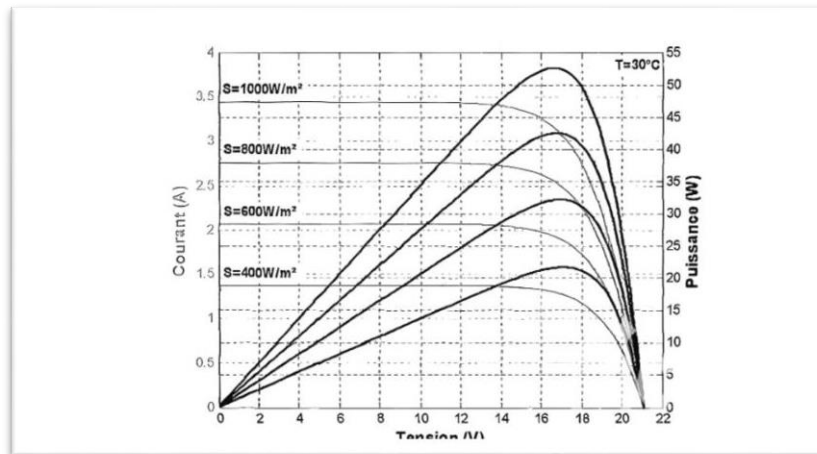


Figure I.12- présente un exemple des courbes pour différents niveaux de rayonnement [11].

I.6.2- Influences 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. 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 [11].

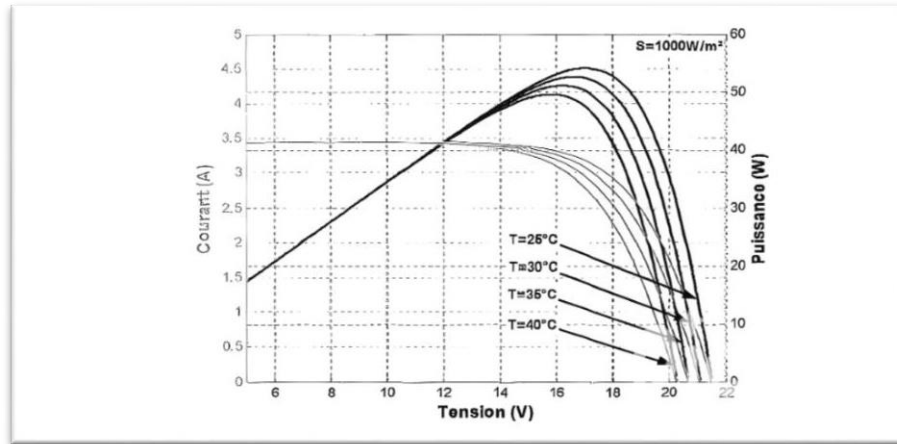


Figure I.13- Caractéristique $I = f(V)$ et $P = f(V)$ d'un panneau solaire constitué de 36 cellules en série pour différents températures $T_s = 1000w / m^2$.

I.6.3- Modèle électrique de la cellule photovoltaïque :

Le comportement électrique d'une cellule photovoltaïque peut être modélisé à l'aide d'un schéma équivalent basé sur une diode. Le modèle à une seule diode, couramment utilisé, représente la cellule comme une source de courant associée à une diode, une résistance série R_s et une résistance parallèle R_{sh} . L'équation caractéristique courant-tension (I-V) de ce modèle est donnée par :

$$I = I_{ph} - I_o [\exp(q(V + IR_s) / nkT) - 1] - (IR + V_s) / R_{sh} \quad (I.1)$$

I : est le courant de sortie de la cellule,

I_{ph} : est le courant généré par l'irradiation lumineuse (courant photo-généré).

I_o : est le courant de saturation de la diode.

V : est la tension aux bornes de la cellule.

Q : est la charge de l'électron ($1,6 \times 10^{-19}$ C).

N : est le facteur d'idéalité de la diode.

K : est la constante de Boltzmann ($1,38 \times 10^{-23}$ J/K).

T : est la température absolue en Kelvin.

Rs : est la résistance série.

Rsh : est la résistance de shunt (ou parallèle)

I.7- Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons exposé les bases essentielles de la conversion de l'énergie solaire par la voie photovoltaïque. Nous avons d'abord décrit le principe de l'effet photovoltaïque, phénomène physique fondamental permettant aux cellules solaires de transformer la lumière en électricité, puis nous avons présenté les structures courantes de cellules photovoltaïques, en insistant particulièrement sur celles à base de silicium, les plus répandues. Par la suite, nous avons étudié la modélisation de la cellule photovoltaïque, en identifiant les principaux facteurs qui influencent son efficacité, qu'ils soient d'origine interne (comme les propriétés des matériaux, les niveaux de dopage ou l'épaisseur des couches) ou externe (tels que le niveau d'irradiation, la température ambiante ou l'angle d'exposition au soleil).

Chapitre II :
Techniques de Suivi du Point de
Puissance Maximale (MPPT) pour
les systèmes photovoltaïques.

Chapitre II : Techniques de Suivi du Point de Puissance Maximale (MPPT) pour les systèmes photovoltaïques.

II.1- Introduction :

D'un point de vue expérimental, les cellules photovoltaïques (PV) présentent de grandes variances de leur puissance électrique en fonction des conditions météorologiques. De plus, quand elles sont connectées à une charge, certains problèmes apparaissent, et la puissance transférée à la charge correspond rarement à la puissance maximale délivrée par le générateur PV. On remarque des problèmes similaires dans le cas du éolien. Pour avoir la meilleure connexion entre une source non linéaire et une charge arbitraire et produire la meilleure puissance, le Maximum Power Point Tracking (MPPT) a été développé depuis 1968. Ces genres de contrôleurs, particulièrement adaptés pour piloter une source non linéaire, forcent le générateur à travailler à son Maximum Power Point (MPP), induisant une amélioration globale du rendement du système de conversion électrique. Quand une source d'énergie est connectée à une charge, le point de fonctionnement est déterminé en prenant l'intersection de la caractéristique électrique 1-V avec celle de la charge. Ce point de fonctionnement varie du fait que la source d'énergie ou la charge varie à tout moment. C'est pourquoi, souvent, on n'opère pas au MPP, et la puissance fournie à la charge est inférieure à la puissance maximale que l'on pourrait fournir. Il existe différents types de contrôleurs MPPT. Généralement, chacun de ces contrôleurs a été réalisé pour une application spécifique. La précision et la robustesse de ces contrôleurs dépendent d'un certain nombre de paramètres:

Le rendement global du système désiré par le constructeur.

Le type de convertisseur de puissance permettant l'adaptation et la connexion à une charge (DC-DC, DC-AC), ou à un réseau électrique.

L'application souhaitée (systèmes autonomes, connectés au réseau, spatiaux.) Les caractéristiques du MPPT.

En fonction de la vitesse, qualité Le type d'implantation choisi (analogique, numérique, mélange des deux) [12].

II.2- Méthodes Classiques de MPPT :

Afin de maximiser l'extraction d'énergie à partir des panneaux photovoltaïques, plusieurs méthodes de poursuite du point de puissance maximale (MPPT) ont été développées. Les méthodes classiques regroupent un ensemble de techniques qui visent à ajuster le point de fonctionnement du générateur photovoltaïque afin d'obtenir une puissance maximale, même sous des conditions environnementales changeantes.

Chapitre II : Techniques de Suivi du Point de Puissance Maximale (MPPT) pour les systèmes photovoltaïques.

Parmi ces méthodes, les approches à contre-réaction de puissance se basent sur des algorithmes de recherche itérative pour localiser le point de fonctionnement optimal sans interrompre le système. La puissance générée est calculée à partir des mesures de courant (I) et de tension (V), selon la relation $P=V \times I$. Les techniques les plus utilisées dans cette catégorie incluent.

II.2.1- Perturb and Observe (P&O):

La méthode P&O est généralement la plus utilisée en raison de sa simplicité et de sa facilité de réalisation. Comme son nom l'indique, cette méthode fonctionne en perturbant le système et en observant l'impact sur la puissance à la sortie du GPV. Sur la figure II.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 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 II.1 et l'organigramme de la (figure II.1) [13].

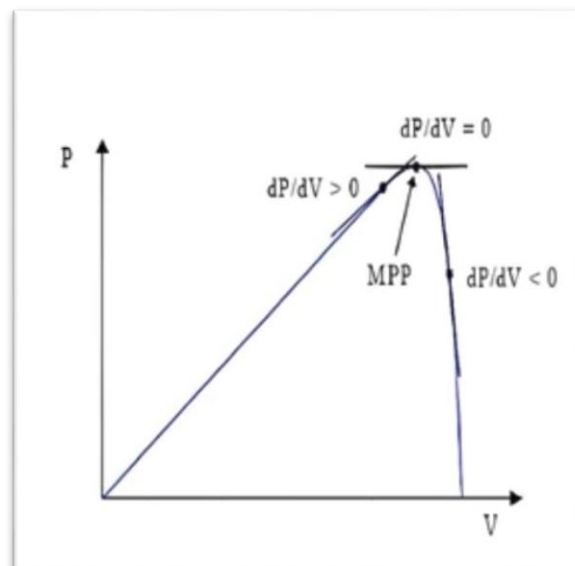


Figure II.1- dp/dv à différentes positions de la courbe caractéristique de puissance.

Chapitre II : Techniques de Suivi du Point de Puissance Maximale (MPPT) pour les systèmes photovoltaïques.

Tableau II.1- Résumé de l'algorithme P&O.

Perturbation (ΔV)	Changement dans la puissance (ΔP)	Perturbation suivante
Positive	Positive	Positive
Positive	Négative	Négative
Négative	Positive	Négative
Négative	Négative	Positive

Il convient de souligner que dans l'algorithme Perturb and Observe (P&O), la variable contrôlée peut être soit la tension (V), soit le courant (I) du générateur photovoltaïque (GPV). Toutefois, pour garantir une meilleure stabilité autour du point de puissance maximale (MPP), il est préférable de choisir la variable la moins sensible aux variations climatiques.

En pratique Le rayonnement solaire influence fortement le courant, tandis que son effet sur la tension reste relativement limité. À l'inverse, la température affecte principalement la tension, mais sa variation est généralement lente et de faible amplitude. Par conséquent, la tension constitue un meilleur choix pour la commande dans l'algorithme P&O. Pour appliquer cette méthode, deux capteurs sont généralement utilisés :

- Un pour mesurer la tension.
- Un autre pour le **courant**, à partir desquels la puissance instantanée est déduite via $P = V \times I$.

Dans certains cas, des techniques d'estimation permettent de déduire le courant à partir de la tension, ce qui permet de réduire le nombre de capteurs nécessaires et ainsi simplifier le système. Enfin, bien que des circuits analogiques puissent implémenter l'algorithme P&O, l'utilisation d'un microprocesseur est souvent privilégiée en raison de sa flexibilité, sa précision et sa facilité d'adaptation à différents profils d'ensoleillement. Un des principaux inconvénients de la méthode Perturb and Observe (P&O) réside dans sa sensibilité aux variations rapides des conditions atmosphériques, comme illustré dans la (figure II.3). Lorsque l'algorithme commence à partir d'un point de fonctionnement A, et que les

Chapitre II : Techniques de Suivi du Point de Puissance Maximale (MPPT) pour les systèmes photovoltaïques.

conditions climatiques restent stables, une légère perturbation de la tension ($\Delta V \backslash \Delta V$) déplace le point vers B. Si une diminution de la puissance est observée, le sens de la perturbation est alors inversé, conformément au principe de la méthode.

Cependant, en cas d'augmentation soudaine de l'ensoleillement, la courbe de puissance se déplace de P1 à P2, et le point de fonctionnement passe de A à C en un seul cycle de la boucle MPPT. Cette transition s'accompagne d'une augmentation apparente de la puissance, que l'algorithme interprète à tort comme un effet positif de sa propre action. En conséquence, le sens de la perturbation est maintenu. Cela entraîne un éloignement progressif du point de fonctionnement par rapport au MPP, qui peut se poursuivre tant que l'ensoleillement continue à évoluer.

Pour remédier à cette limitation, une amélioration consiste à introduire un troisième point de comparaison dans le processus de décision. En analysant trois points successifs au lieu de deux, l'algorithme peut déterminer de manière plus fiable la véritable origine de la variation de puissance, et ainsi ajuster plus efficacement le sens de la perturbation

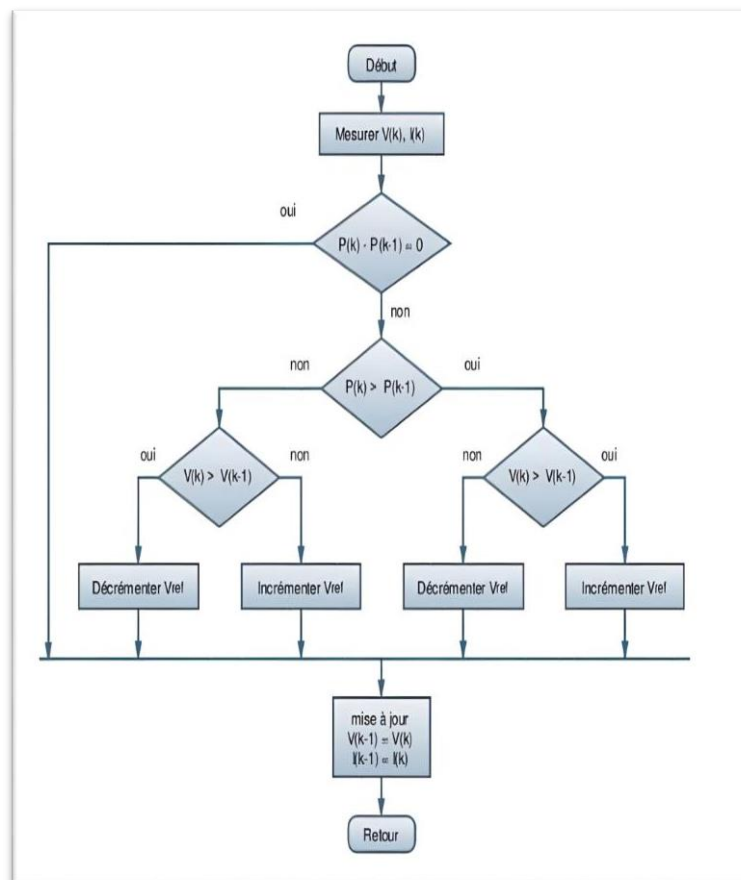


Figure II.2- Organigramme de la méthode P&O.

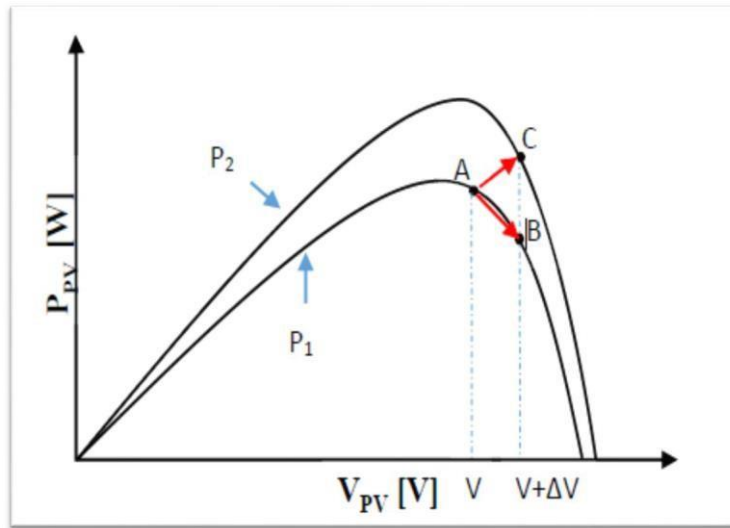


Figure II.3- Divergence de la méthode P&O.

II.2.2- Conductance Incrémentale (IncCond) :

La technique Incrémentation de la Conductance (en anglais : Incremental conductance « IncCond ») est, comme la méthode P&O, très utilisée pour la recherche de la puissance maximale dans les systèmes photovoltaïques. Elle est relativement simple et performante et elle fonctionne correctement pour les très fortes variations des conditions climatiques, notamment l'irradiation. Cette technique est basée sur le fait que la pente de la dérivée de la puissance par rapport à la tension de la courbe de puissance-tension (P-V) du générateur photovoltaïque est nulle au point de puissance max MPP, positive à gauche du MPP et négative à droite, (Figure II.4).

Sachant que le courant du panneau dépend de la tension, la dérivée de la puissance par rapport à la tension peut s'écrire :

$$DP/dV = d(IV)/dP = (I * (dV/dV)) + (V * (dI/dV)) = (I + V) * (dI/dV) \quad (II.1)$$

A partir de l'équation (II-1), on peut tirer les conclusions suivantes :

$$\begin{aligned} DP/dV < 0 &\Rightarrow (dI)/(dV) = - I/V && P = P_{\max} \\ DP/dV < 0 &\Rightarrow (dI)/(dV) > - I/V && P \text{ à gauche de } P_{\max} \end{aligned} \quad (II.2)$$

$\frac{dP}{dV} < 0 \Rightarrow \left(\frac{dI}{dV}\right) < -I/V$ P à droite de P max

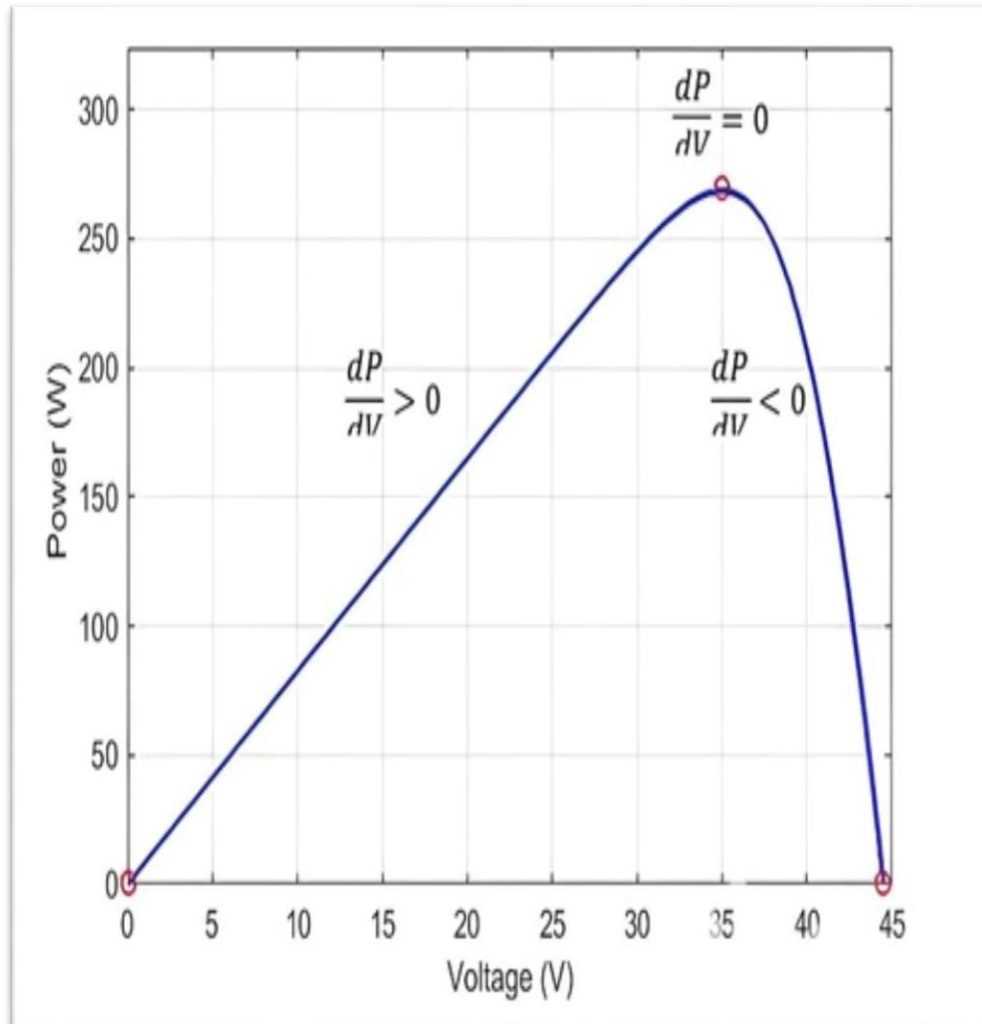


Figure II.4- Signe de la pente de la puissance sur la courbe P-V.

Le MPP est donc recherché par la comparaison entre la conductance G (I/V) et l'incrément de la conductance dG (di/dv) instantanées. Une fois le MPP est trouvé, on ne change plus la tension jusqu'à une variation du courant. Dans ce cas, l'algorithme commence de nouveau la recherche du nouveau MPP [14].

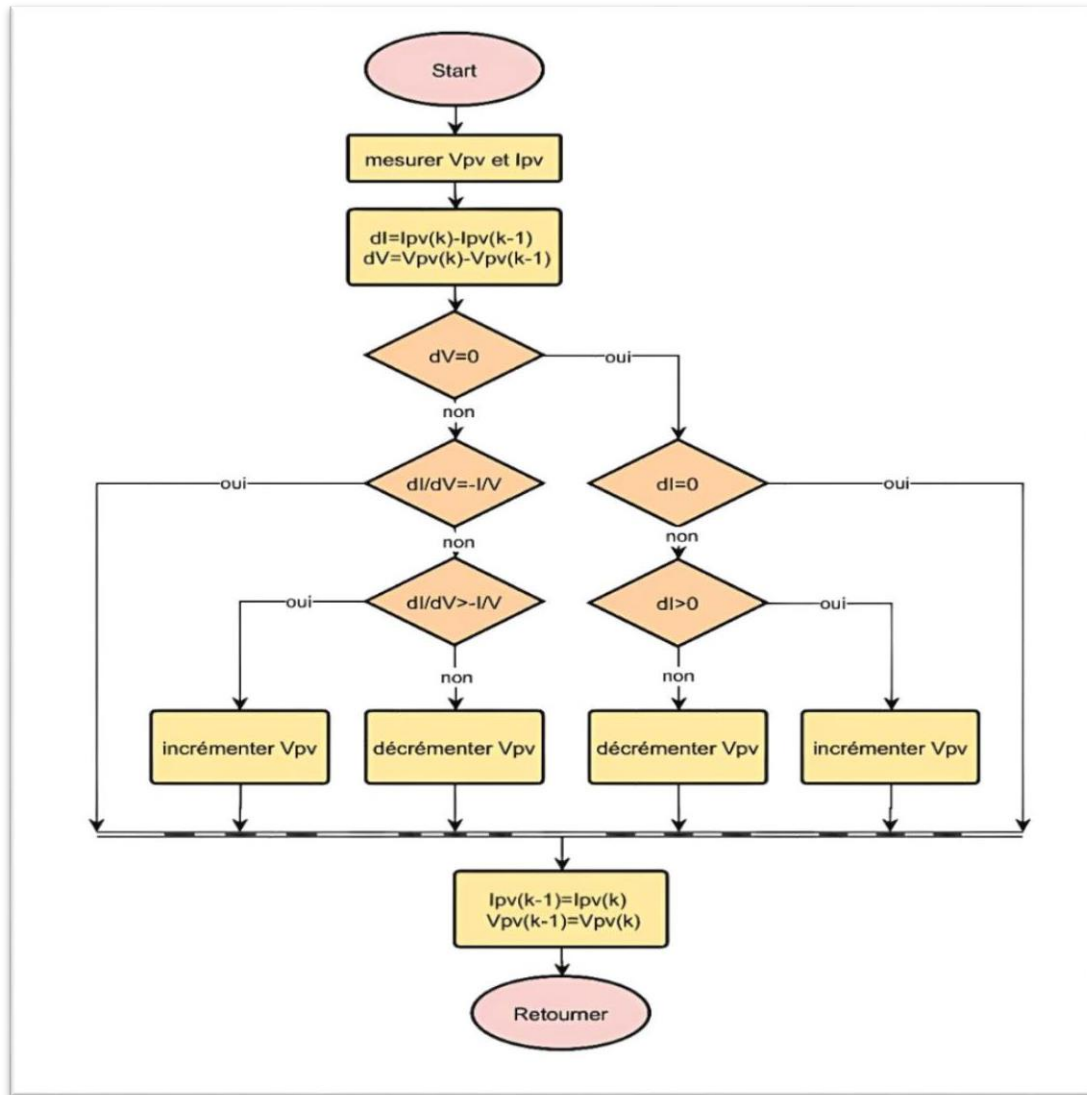


Figure II.5- Organigramme de la commande IncCond.

Comme la méthode P&O, cette technique (IncCond) souffre du choix de la valeur de la perturbation, une grande perturbation accélère la recherche mais augmente les oscillations autour du MPP au régime permanent. Une petite perturbation diminue les oscillations mais ralentit la convergence vers le MPP [14].

II.2.3- Tension ou Courant Constant :

Dans certaines méthodes classiques de suivi du point de puissance maximale (MPPT), le principe repose sur le maintien d'une tension ou d'un courant fixe au niveau du générateur photovoltaïque. Ces méthodes se basent sur l'observation expérimentale que la tension au

Chapitre II : Techniques de Suivi du Point de Puissance Maximale (MPPT) pour les systèmes photovoltaïques.

point de puissance maximale représente une fraction constante de la tension de circuit ouvert (V_{oc}), et que le courant optimal est approximativement proportionnel au courant de court-circuit (I_{sc}). Bien que ces techniques soient simples à implémenter et ne nécessitent pas de calculs complexes, elles présentent certaines limites, notamment leur sensibilité aux variations des conditions climatiques (éclairage et température). Dans ce qui suit, nous présentons deux approches distinctes : la régulation de la tension et la régulation du courant.

II.2.3.1- Régulation de la Tension :

Cette méthode consiste à comparer la tension délivrée par le panneau GPV avec la tension optimale V_{mp} considérée comme référence. L'erreur entre les deux tensions est alors utilisée pour ajuster le rapport cyclique du convertisseur statique dans le but d'avoir une tension égale à celle de référence. La tension de référence est obtenue à partir de la relation linéaire entre V_{mp} et V_{oc} du module GPV:

$$V_{mp} = K * V_{oc} \quad (II-3)$$

Où k est un facteur de tension qui dépend du GPV utilisé et de la température de fonctionnement. Généralement, pour des GPV en Si, k est compris entre 0.71 et 0.78.

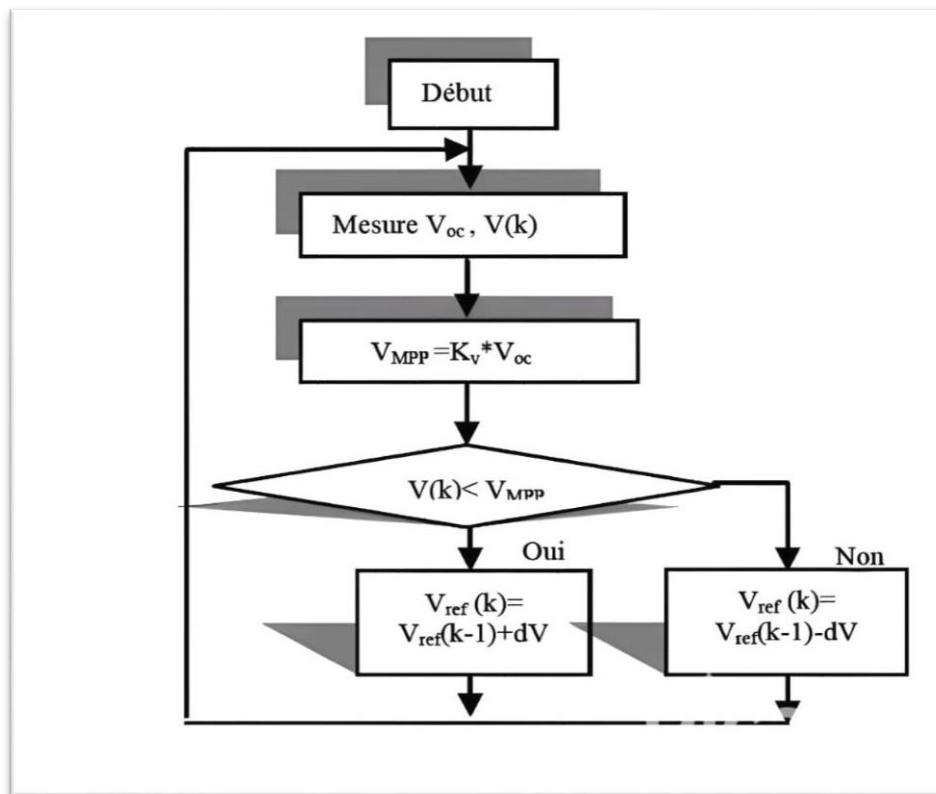


Figure II.6- Schéma fonctionnel de la régulation de la tension.

Chapitre II : Techniques de Suivi du Point de Puissance Maximale (MPPT) pour les systèmes photovoltaïques.

L'inconvénient de cette technique est qu'il est nécessaire d'effectuer la mesure de V_{oc} de temps en temps. La charge doit être donc déconnectée pendant cette mesure, ce qui provoque une perte de puissance. Cette méthode est simple et robuste mais ne présente pas assez de précisions [15].

II.2.3.2- Régulation du Courant :

Concernant cette méthode, le PPM peut être atteint en comparant le courant de court-circuit I_{cc} mesuré à un courant de référence égal I_{mp} . Ce courant est calculé par la relation suivante

$$I_{mp} = K * I_{cc} \quad (II.4)$$

K : étant le facteur de courant qui dépend du GPV utilisé, généralement compris entre 0.78 et 0.92.

Pendant la mesure du courant I_{cc} , il est nécessaire de court-circuiter le GPV, ce qui implique une perte de transfert de puissance.

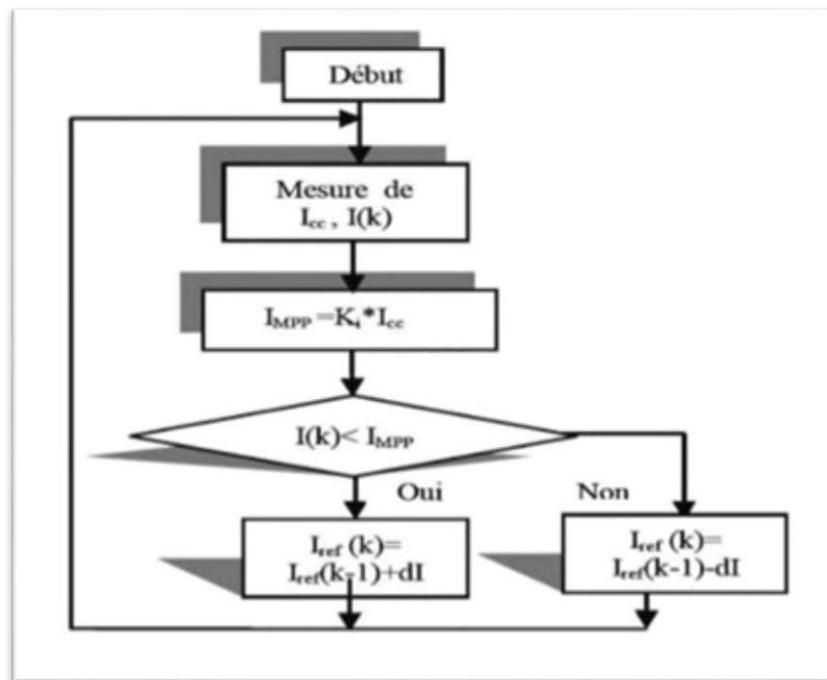


Figure II.7- Schéma fonctionnel de la régulation du courant.

Ces types de commandes nécessitent un seul capteur, ce qui les rend faciles à mettre en œuvre. Par contre, leur précision est faible cause des procédés d'estimation des paramètres I_{cc}

Chapitre II : Techniques de Suivi du Point de Puissance Maximale (MPPT) pour les systèmes photovoltaïques.

et Vco. De plus, à chaque mesure de courant ou de tension, un arrêt de transfert de puissance est obligatoire [15].

II.3- Méthodes Intelligentes :

Malgré l'efficacité des méthodes classiques de suivi du point de puissance maximale, telles que Perturb and Observe (P&O) ou l'Incrément de Conductance (IncCond), ces techniques présentent certaines limites, notamment en termes de précision et de rapidité dans des conditions d'ensoleillement changeant. Pour surmonter ces limites, les méthodes intelligentes ont été introduites, exploitant les avancées en intelligence artificielle et en logique mathématique. Ces approches permettent d'améliorer la robustesse, la rapidité de convergence et l'adaptation du système photovoltaïque face aux variations climatiques et aux incertitudes du modèle. Parmi les méthodes intelligentes les plus utilisées, on distingue notamment la logique floue et les réseaux de neurones artificiels.

II.3.1- Logique Floue :

La logique floue est une branche de l'intelligence artificielle utilisée pour modéliser le raisonnement humain imprécis et non déterministe. Ce concept a été développé par le scientifique iranien Lotfi Zadeh dans les années 1960, comme une nouvelle méthode de traitement des données qui ne peuvent pas être représentées avec précision par la logique classique (logique booléenne).

Dans la logique classique, les données sont classées en catégories bien définies : elles sont soit vraies (1), soit fausses (0). Cependant, dans la réalité, de nombreuses informations se situent dans une zone grise, où il est difficile de les considérer comme entièrement vraies ou entièrement fausses. C'est dans ce contexte que la logique floue intervient pour exprimer des "degrés de vérité", où une valeur peut être, par exemple, 0,2 ou 0,75, indiquant ainsi son degré d'appartenance à une certaine catégorie.

Composantes d'un système flou.

- Fuzzification.

Cette étape consiste à transformer les valeurs numériques d'entrée en valeurs floues à l'aide de fonctions d'appartenance. Par exemple, une température peut être décrite comme "froide", "modérée" ou "chaude" au lieu d'une valeur précise comme 35°C.

- Base de règles.

Chapitre II : Techniques de Suivi du Point de Puissance Maximale (MPPT) pour les systèmes photovoltaïques.

Elle se compose d'un ensemble de règles linguistiques du type "SI... ALORS" (IF-THEN) définissant les relations entre les entrées et les sorties. Exemple : Si la température est élevée et l'irradiation faible, alors la puissance est faible.

- 3. Moteur d'inférence.

C'est le cœur du système, responsable de l'analyse des règles et de la détermination de la sortie floue en fonction des entrées actuelles.

- 4. Défuzzification.

C'est le processus par lequel les résultats flous sont convertis en valeurs numériques exploitables, telles qu'une tension de sortie ou une vitesse de moteur.

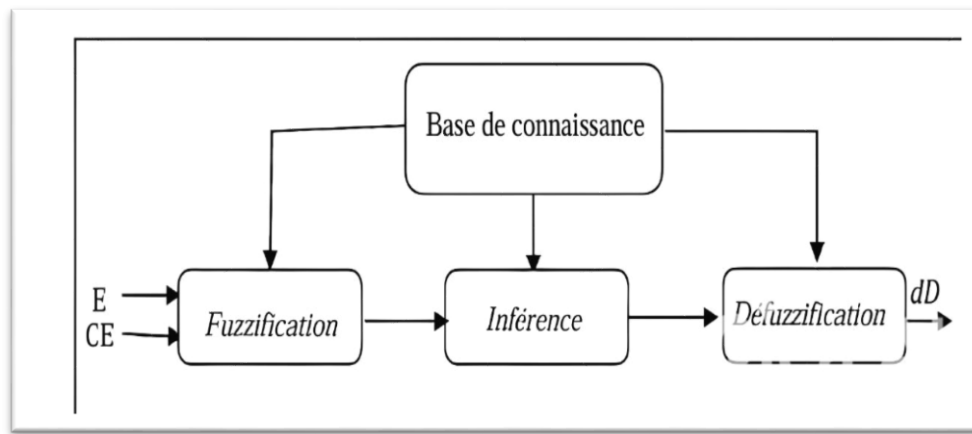


Figure II.8- Schéma bloc de l'algorithme à base de la logique floue.

Les Avantages de la logique floue :

- Capacité à gérer des données imprécises ou incomplètes.
- Grande flexibilité de modélisation, notamment pour les systèmes complexes ou difficilement modélisables mathématiquement.
- Possibilité d'intégrer les connaissances humaines et l'expérience sous forme de règles simples.
- Ne nécessite pas de modèle mathématique précis du système.

II.3.2- Réseaux de Neurones Artificiels :

Les gènes des cellules nerveuses artificielles (ARN) sont des systèmes d'intelligence au service de l'humain, capables de discriminer les informations et de prescrire des décisions de manière intelligente. A partir du point de puissance maximale (MPPT) du générateur

Chapitre II : Techniques de Suivi du Point de Puissance Maximale (MPPT) pour les systèmes photovoltaïques.

photovoltaïque, l'ARN est utilisé pour diriger la tension ou la température optimale dans une partie des conditions d'entrée (par exemple : l'isolation et la température). Un RNA se compose des trois parties principales : Un canapé d'entrée : qui reçoit les meilleures données (par exemple : tension, courant, irradiation). Un ou plusieurs canapés en espèces : qui contiennent des informations. Une table de tri : qui prend la décision (par exemple : ajuster la vitesse de transport). Après une phase d'application, l'appareil a la capacité de donner rapidement la commande optimale pour maximiser la puissance du produit.

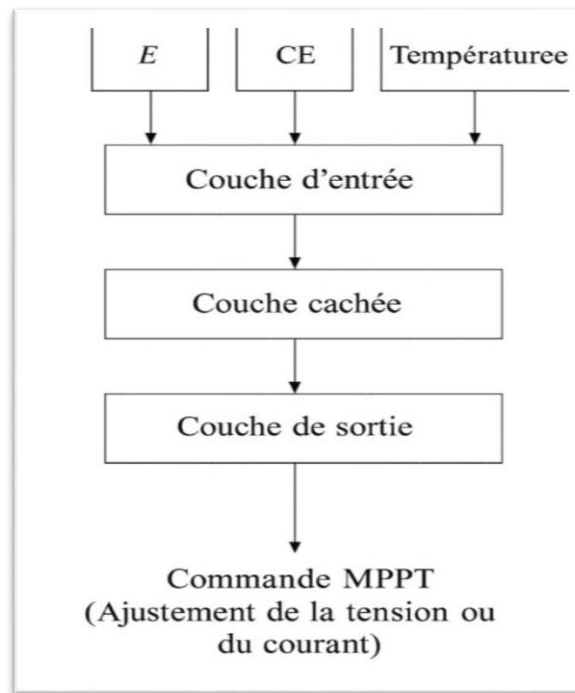


Figure II.9- Le schéma simplifie l'installation de neurones artificiels pour le MPPT.

II.4- Méta heuristiques (Optimisation par Essaim Particulaire (PSO)) :

Les techniques de suivi du point de puissance maximale (MPPT) sont essentielles pour optimiser l'extraction d'énergie des systèmes photovoltaïques. Traditionnellement, des méthodes comme l'algorithme de perturbation et observation (P&O) ou l'algorithme de conductance incrémentale (INC) sont couramment utilisées pour trouver le point de puissance maximale. Cependant, ces approches peuvent parfois être limitées par des conditions environnementales variables, des non-linéarités du système et des perturbations.

Dans ce contexte, les méthodes métaheuristiques, qui incluent des techniques inspirées de la nature telles que l'optimisation par essaim particulaire (PSO), les algorithmes génétiques (GA) ou les algorithmes de colonie de fourmis (ACO), ont émergé comme des alternatives

Chapitre II : Techniques de Suivi du Point de Puissance Maximale (MPPT) pour les systèmes photovoltaïques.

puissantes et efficaces pour le MPPT. Ces approches permettent une exploration plus large de l'espace des solutions, offrant ainsi une meilleure capacité d'adaptation aux conditions changeantes, tout en améliorant les performances et la stabilité du système photovoltaïque.

Les méthodes métaheuristiques, grâce à leur capacité à échapper aux minima locaux et à optimiser les performances en temps réel, représentent une avancée prometteuse dans le domaine du MPPT.

II.4.1- Description et historique de la méthode PSO :

Depuis son apparition au milieu des années 1990, l'algorithme PSO (Particle Swarm Optimization) a rapidement attiré l'attention de la communauté scientifique dans le domaine des systèmes électriques, en particulier pour résoudre les problèmes complexes d'optimisation liés à la production, à la distribution et à la gestion de l'énergie. À la fin des années 1990 et au début des années 2000, le PSO a été appliqué pour la première fois à des problèmes classiques comme la répartition économique de la production (Economic Dispatch) et l'optimisation du flux de puissance dans les réseaux électriques. Ces premières applications ont démontré que le PSO pouvait fournir des solutions de qualité avec une rapidité et une robustesse appréciables, même dans des espaces de recherche non linéaires et multi-dimensionnels.

Avec la montée en puissance des énergies renouvelables, notamment l'énergie solaire photovoltaïque, le PSO a trouvé une place de choix dans le traitement des défis spécifiques à ces systèmes, comme les variations soudaines de l'irradiance solaire et le phénomène d'ombrage partiel (PSC). Ces situations complexes donnent lieu à plusieurs points de puissance maximale locale, ce qui rend les algorithmes MPPT classiques (comme P&O ou IC) incapables d'atteindre le point de puissance maximale global (GMPP).

À partir des années 2010, le PSO est largement utilisé dans le suivi du point de puissance maximale (MPPT) des champs photovoltaïques soumis à des conditions d'ensoleillement variables. Il a montré une grande capacité à éviter les minima locaux et à converger efficacement vers le point optimal global.

II.4.2- Principe de la méthode PSO :

L'algorithme PSO repose sur un ensemble d'agents simples appelés particules, formant un essaim. Chaque particule représente une solution potentielle au problème étudié et est

Chapitre II : Techniques de Suivi du Point de Puissance Maximale (MPPT) pour les systèmes photovoltaïques.

caractérisée par une position et une vitesse. Chaque particule est également dotée d'une mémoire lui permettant de retenir sa meilleure position atteinte jusqu'à présent, ainsi que la meilleure position découverte par l'ensemble de l'essaim. Lors de son évolution dans l'espace de recherche, le mouvement de la particule est influencé par trois composantes principales :

- **La composante cognitive (ou individuelle)** : Elle représente l'influence de la meilleure position qu'une particule a rencontrée lors de son propre parcours. Cette composante pousse la particule à revenir vers sa propre meilleure position, favorisant l'exploration locale de l'espace de recherche.
- **La composante sociale (ou collective)** : Elle est déterminée par la meilleure position découverte par l'ensemble de l'essaim. Cette composante incite la particule à se déplacer vers la meilleure solution globale trouvée par le groupe, encourageant ainsi l'exploration globale de l'espace de recherche [16].
- **La composante de vitesse** : Elle permet de déterminer la direction et l'intensité du mouvement de la particule, en prenant en compte à la fois la position actuelle, les positions passées et les influences cognitive et sociale. La vitesse permet d'ajuster la manière dont chaque particule évolue vers la solution optimale.

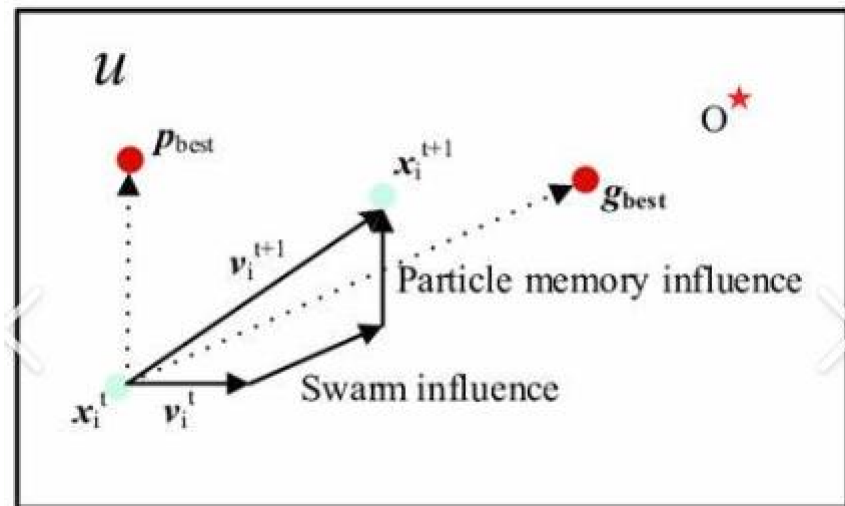


Figure II.10- Principe du déplacement des particules dans l'espace de recherche.

II.4.3- Formulation Mathématique de l'Algorithme PSO :

Chapitre II : Techniques de Suivi du Point de Puissance Maximale (MPPT) pour les systèmes photovoltaïques.

L'algorithme de base de la PSO fonctionne sur un groupe, appelé essaim, constitué de solutions potentielles, désignées sous le nom de particules. Ces particules sont initialement réparties de manière aléatoire dans l'espace de recherche de la fonction objectif.

A chaque itération, les particules se déplacent en prenant en compte leur meilleure position mais aussi la meilleure position de son voisinage.

Dans les faits, on calcule la nouvelle vitesse à partir de la formule suivante :

$$v_i(t + 1) = w \cdot v_i(t) + c_1 \cdot r_1 \cdot [P_{op-i} - x_i(t)] + c_2 \cdot r_2 \cdot [P_{op-g} - x_i(t)] \quad (\text{II.5})$$

$$x_i(t + 1) = x_i(t) + v_i(t + 1), \quad i \in \{1, \dots, n_p\} \quad (\text{II.6})$$

Avec : $x_i(t)$: la position de la particule i à l'instant t .

$x_i(t + 1)$: la position de la particule i à l'instant $t+1$.

$v_i(t)$: la vitesse de la particule i à l'instant t .

$v_i(t + 1)$: la vitesse de la particule i à l'instant $t+1$.

P_{op-i} : la meilleure position locale (de la particule i).

P_{op-g} : la meilleure position globale (de toutes les particules de l'essaim).

w : coefficient d'inertie (Constante).

r_1 et r_2 : nombres aléatoires entre 0 et 1, c_1 et c_2 : coefficients d'accélération (constantes). n_p : nombre des particules dans l'espace de recherche.

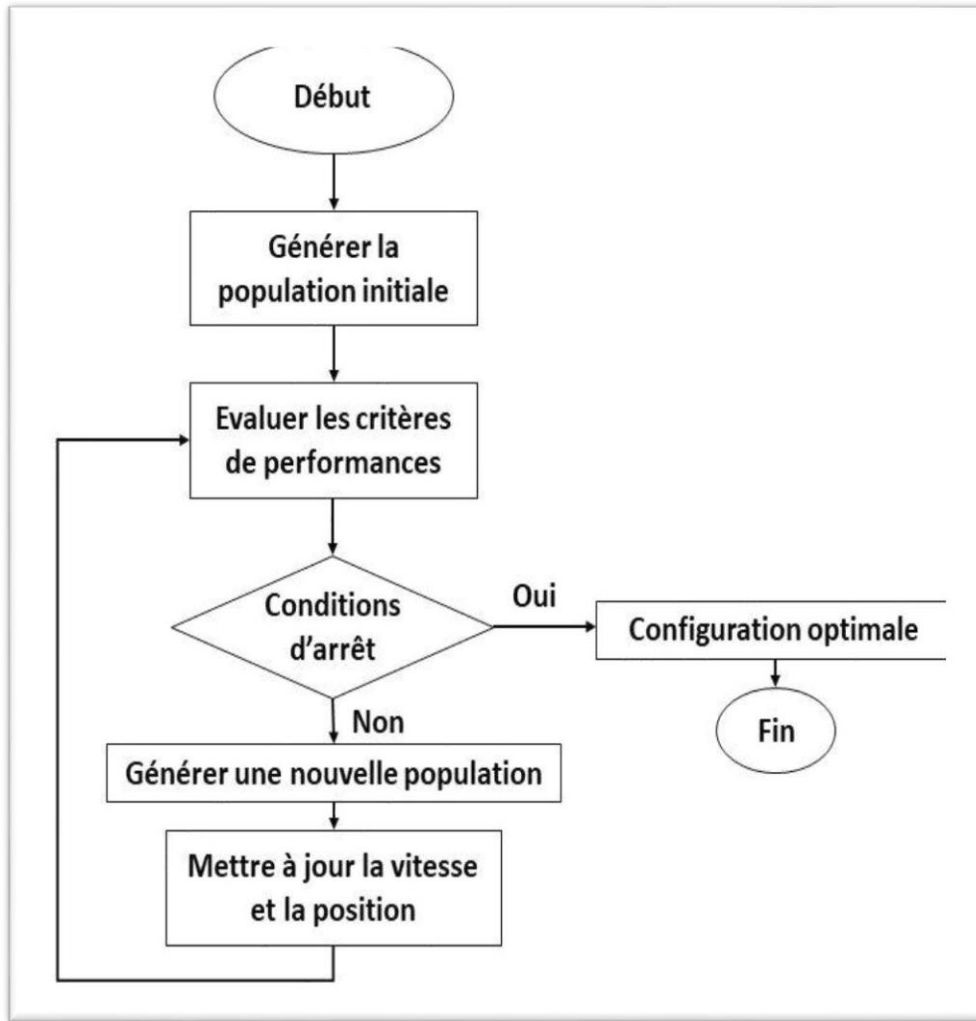


Figure II.11- Algorithme de particules d essaim.

II.5- La commande MPPT par le Technique d'Optimisation par Essaims de Particule :

Un problème d'optimisation consiste à rechercher le minimum ou le maximum (l'optimum) d'une fonction donnée. Dans le contexte du suivi du point de puissance maximale (MPPT) pour les systèmes photovoltaïques, le problème d'optimisation consiste à trouver les conditions (tension et courant) qui permettent d'extraire la puissance maximale du générateur photovoltaïque en fonction des variations de l'éclairement et de la température.

L'algorithme PSO (Particle Swarm Optimization) est une technique métaheuristique efficace pour résoudre ce type de problème. Dans le cadre du MPPT, les particules représentent différentes combinaisons de paramètres (tension et courant) pour le système photovoltaïque. Chaque particule explore l'espace de recherche en ajustant ses positions (les valeurs de

Chapitre II : Techniques de Suivi du Point de Puissance Maximale (MPPT) pour les systèmes photovoltaïques.

tension et courant) afin de maximiser la puissance générée par le module photovoltaïque. Les particules sont guidées par deux facteurs : leur propre expérience (meilleure position atteinte) et l'expérience collective de l'essaim (meilleure solution globale trouvée par toutes les particules).

Ainsi, l'algorithme PSO permet une recherche optimale et dynamique du point de puissance maximale, en adaptant continuellement la tension et le courant pour maximiser l'efficacité du système, tout en s'adaptant aux changements de conditions environnementales

II.6- Les Avantages et inconvénients de la méthode PSO dans les systèmes électriques :

Avantages :

- Facile à implémenter et ne nécessite pas de modèle mathématique précis.
- Rapide dans la convergence vers une solution optimale.
- Capable d'éviter les optima locaux et d'atteindre l'optimum global.
- Flexible et applicable à divers problèmes (MPPT, contrôle, planification...).
- Ne dépend pas des dérivées (convient aux problèmes non linéaires).

Inconvénients :

- Sensible au réglage des paramètres (inertie, c_1 , c_2).
- Peut présenter des oscillations dans les systèmes instables.
- Sensible au bruit dans les mesures.
- Peut être coûteux en calculs pour les systèmes de grande dimension.
- Ne garantit pas toujours la solution optimale (algorithme approché).

II.7- Comparaison des méthodes :

D'après la littérature, Le choix d'une méthode de maximisation du point de puissance (MPPT) dépend des sources du système et des conditions d'exploitation. Les méthodes classiques comme P&O et l'incrément de conductance, sont simples à mettre en œuvre mais présentent des limites face aux variations environnementales. A l'inverse, les méthodes intelligentes, permettent une adaptation plus fine et une meilleure robustesse, au prix d'une complexité de conception et d'un développement plus poussé. Le tableau II.2 explique les principales différences entre ces deux catégories.

Chapitre II : Techniques de Suivi du Point de Puissance Maximale (MPPT) pour les systèmes photovoltaïques.

Tableau II.2- Comparer les méthodes classiques et les méthodes MPPT intelligentes.

Critère	Méthodes Classiques	Méthodes Intelligentes	Méthode PSO
Principe	Basées sur des algorithmes simples (P&O, IncCond)	Basées sur l'intelligence artificielle (logique floue, RNA, etc.)	Basée sur les interactions collectives des particules
Modèle du système	Nécessite un modèle approximative	Peu ou pas besoin de modèle précis	Pas besoin de modèle précis
Réaction aux variations climatiques	Réaction lente ou oscillations autour du MPP	Adaptation rapide et précise aux changements	Réaction rapide et adaptative aux changements
Complexité	Faible, facile à mettre en œuvre	Élevée, nécessite un développement et des connaissances spécifiques	Moyenne, nécessite une calibration fine mais plus simple que les réseaux neuronaux
Vitesse de convergence	Moyenne (peut osciller autour du MPP)	Rapide et stable après apprentissage ou réglage	Rapide et stable grâce à l'interaction des particules
Robustesse	Sensible aux perturbations	Robuste face aux incertitudes et variations	Robuste face aux perturbations et variations

Chapitre II : Techniques de Suivi du Point de Puissance Maximale (MPPT) pour les systèmes photovoltaïques.

Exemples	Perturb and Observe, Incremental Conductance	Logique Floue, Réseaux de Neurones, PSO	PSO (Optimisation par Essaim Particulaire)
----------	--	---	--

II.8- Conclusion :

Ce chapitre a présenté une étude comparative des différentes méthodes de suivi du point de puissance maximale (MPPT) appliquées aux systèmes photovoltaïques. Les approches classiques telles que Perturb and Observe (P&O) et Incrément de Conductance (IncCond) se distinguent par leur simplicité et leur facilité de mise en œuvre, mais montrent des limites notables face aux variations rapides des conditions climatiques. En revanche, les méthodes dites "intelligentes", comme la logique floue, les réseaux de neurones artificiels et les métaheuristiques telles que PSO, offrent une meilleure adaptabilité, une précision accrue et une robustesse face aux incertitudes, au prix toutefois d'une complexité de conception plus élevée. Le choix de la stratégie MPPT dépend donc fortement du contexte d'application, des contraintes de coût, de la capacité de calcul embarquée et des performances souhaitées. Pour des systèmes à ressources limitées, les méthodes classiques restent des solutions viables. En revanche, pour des applications avancées ou critiques, les approches intelligentes ou hybrides peuvent significativement améliorer les performances globales. Ainsi, le chapitre qui suit est dédié à l'application de l'optimisation par essaim particulaire (PSO) pour le suivi du point de puissance maximale (MPPT).

Chapitre III :
Poursuite du point de puissance
maximale parla technique PSO.

III.1- Introduction :

Dans ce chapitre, nous allons exposer les principaux résultats de simulation obtenus au cours de ce travail. Nous commencerons par l'analyse de la caractéristique $P = f(V)$ d'un champ photovoltaïque soumis à un éclairage uniforme. Ensuite, nous présenterons la simulation de cette même caractéristique dans le cas de conditions de fonctionnement non uniformes (PSC). Nous poursuivrons avec la mise en œuvre de la méthode MPPT fondée sur l'algorithme PSO. Afin d'assurer que le module photovoltaïque fournisse sa puissance maximale disponible, il est crucial d'adapter en permanence la charge au générateur photovoltaïque. Cette adaptation est réalisée par l'intégration d'un convertisseur DC-DC, qui permet d'ajuster la tension et le courant en fonction des conditions de fonctionnement. L'hacheur est contrôlé par un mécanisme de suivi du point de puissance maximale basé sur l'algorithme PSO, garantissant ainsi que le système fonctionne toujours à son point de puissance optimale.

III.2- La caractéristique $P=f(V)$ du champ PV simulé :

Pour étudier l'effet de l'éclairement et de la température sur les caractéristiques (I-V) ou (P-V) du générateur Photovoltaïque, nous allons réaliser des simulations dans l'environnement Matlab dans deux cas fonctionnement : sans et avec ombrage.

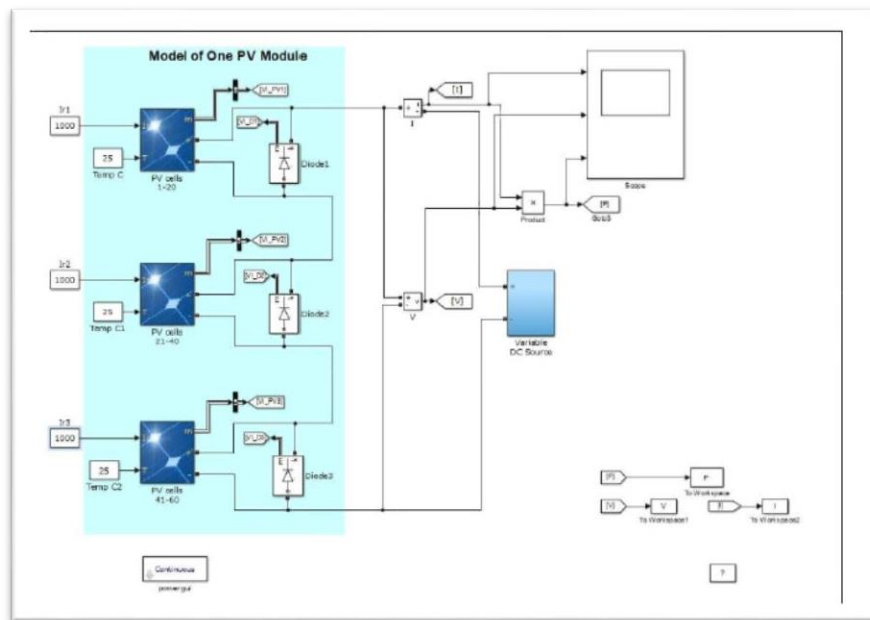


Figure III.1- Modèle de simulation P(V) et I(V) avec et sans ombrage.

Chapitre III : Poursuite du point de puissance maximale parla technique PSO.

Le panneau PV choisi est de puissance $P_{max}=213.15$ W, dans les mêmes conditions ($T=25^{\circ}\text{C}$, $G=1000$ W/m²). Ce module PV est constitué de 60 cellules avec deux diodes by-pass, les caractéristiques électriques de ce module PV sont données dans le tableau suivant :

Tableau III.1- Caractéristiques électriques du module photovoltaïque.

Parametre	Valeur
Branches parallèles	1
Modules connectés en série par chaîne	1
Puissance maximal (W)	213.15
Tension à vide Voc (V)	37.92
Tension optimale (V)	29
Courant optimale (A)	7.35
Courant de court circuit Isc(A)	7.84
Coefficient Température de Voc (%/°C)	0.102
Coefficient Température de de Isc(%/°C)	-0.36099
Nombre de cellule par module	60

Après l'exécution du modèle de simulation présenté dans la (FigureIII-1), en appliquant trois niveaux d'irradiance uniforme sur tous les modules. Les courbes de puissance en fonction de la tension sont présentes à la figure III.2 où les points de puissances maximales sont indiqués en rouge. D'après ces résultats, on remarque que l'influence d'irradiance est bien nette. Plus l'irradiance est élevée, plus la puissance maximale délivrée par le panneau est grande.

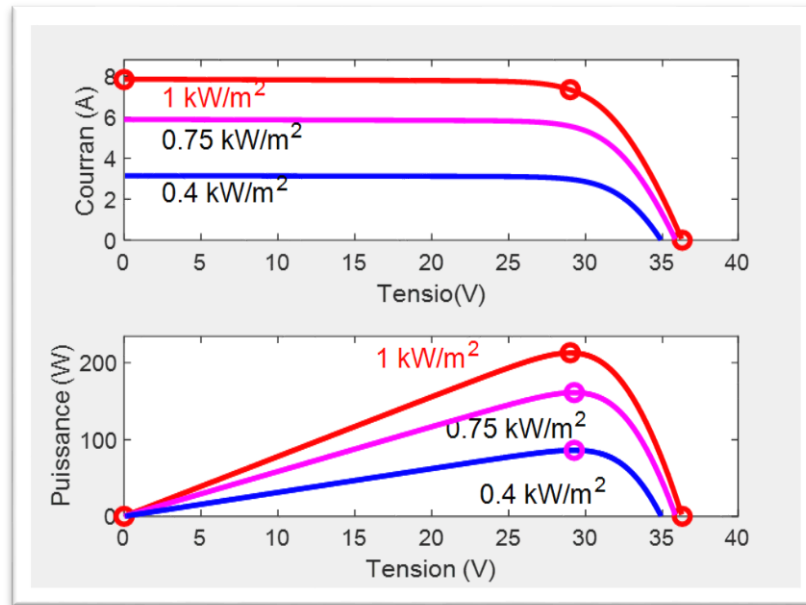


Figure III.2- Courbes de puissance et courant en fonction de la tension sous trois niveaux d'irradiance.

La figure III.3 montre l'évolution du processus d'optimisation du point de puissance maximale (MPP) sur une courbe $P(V)$ à différentes **itérations** de l'algorithme **PSO** :

- **Itération 1** De nombreuses particules (en bleu) sont réparties sur la courbe, principalement dans la région montante. À cette étape, les particules explorent l'espace de recherche de manière quasi-aléatoire. La convergence vers le MPP n'a pas encore eu lieu.
- **Itération 10** : Les particules commencent à se concentrer dans la zone proche du MPP. L'algorithme commence à exploiter les meilleures solutions détectées.
- **Itération 20** : Les particules se resserrent davantage autour du point de puissance maximale. On observe une nette amélioration de la précision et une convergence rapide.
- **Itération 100** : Presque toutes les particules convergent vers le véritable MPP, situé sur la crête de la courbe $P(V)$. L'algorithme a abouti à une solution optimale avec grande précision.

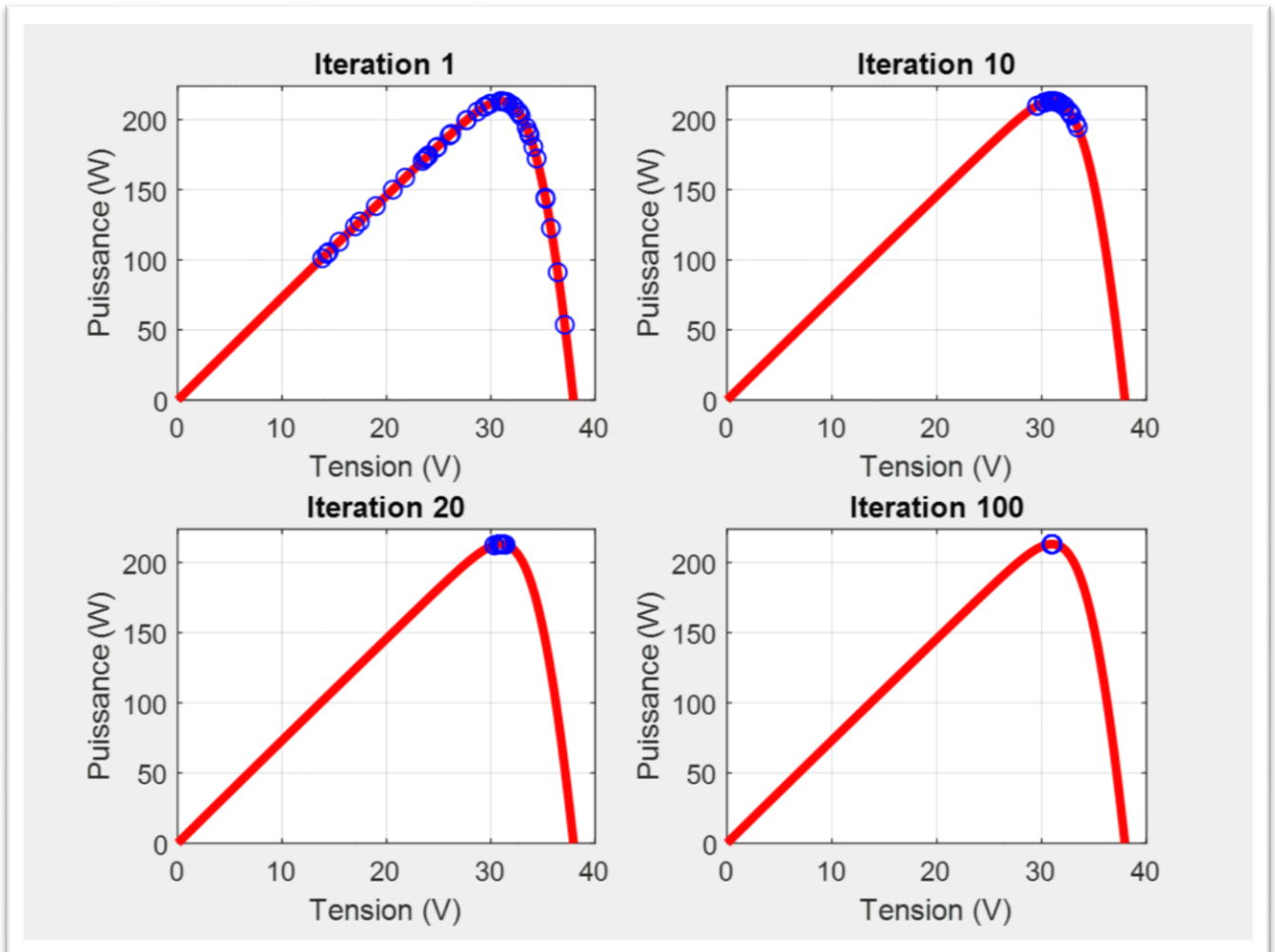


Figure III.3- Suivi MPPT par l’algorithme PSO : Évolution en fonction des itérations.

III.3- La caractéristique puissance en fonction de tension d’un champ PV sous les conditions d’ombrage partiel (PSC) :

On a utilisé le même modèle de simulation (figure III-1) pour tracer le caractéristique $P=f(V)$ mais cette fois on a appliqué des différentes irradiances sur les modules pour simuler le champ sous les conditions d’ombrage partiel (PSC) (Figure III-4).

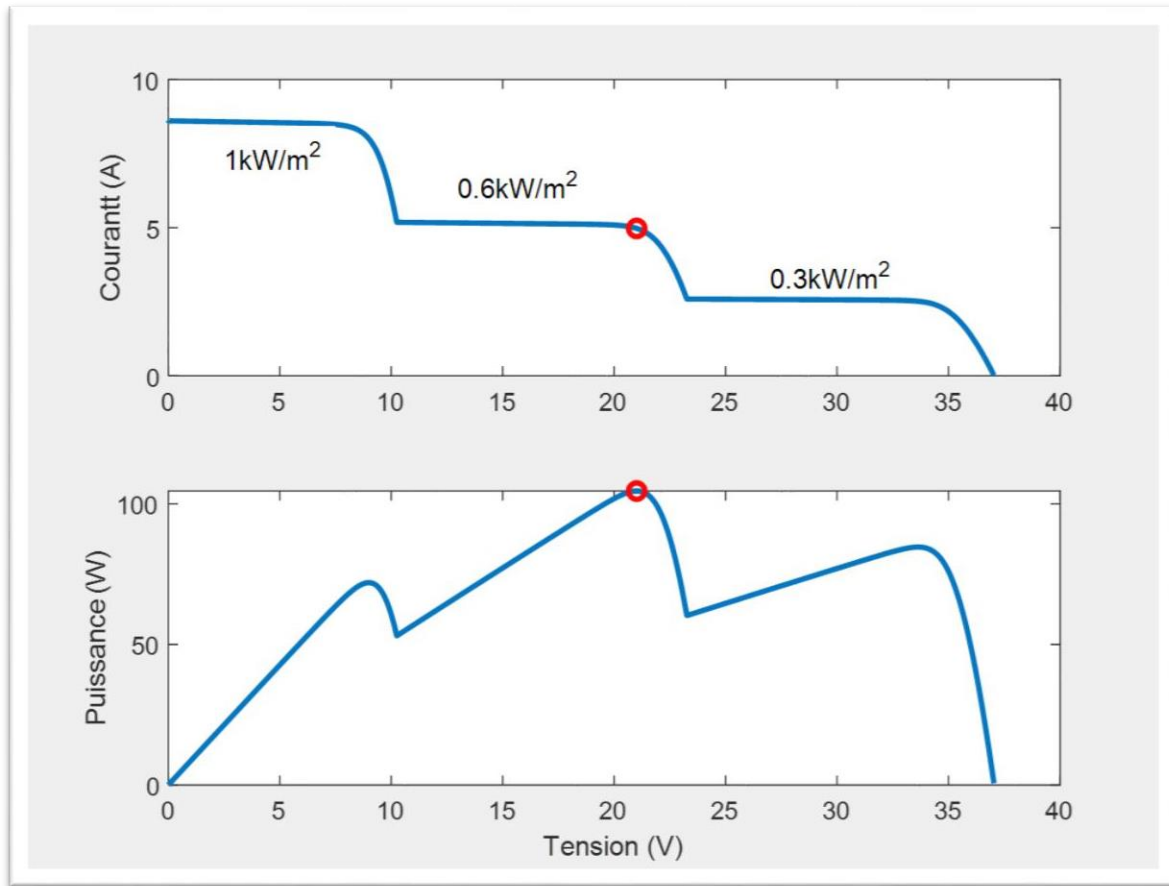


Figure III.4- La caractéristique $P=f(V)$ sous différentes conditions d'ombrage partiel (PSC).

La figure représente les courbes de puissance en fonction de la tension $P=f(V)$ dans le cas d'un ombrage partiel, pour trois configurations d'irradiance différentes appliquées aux modules photovoltaïques. Chaque courbe présente plusieurs maxima locaux, ce qui est typique des situations d'ombrage partiel (PSC). Cela démontre la complexité du suivi MPPT dans ces conditions non linéaires.

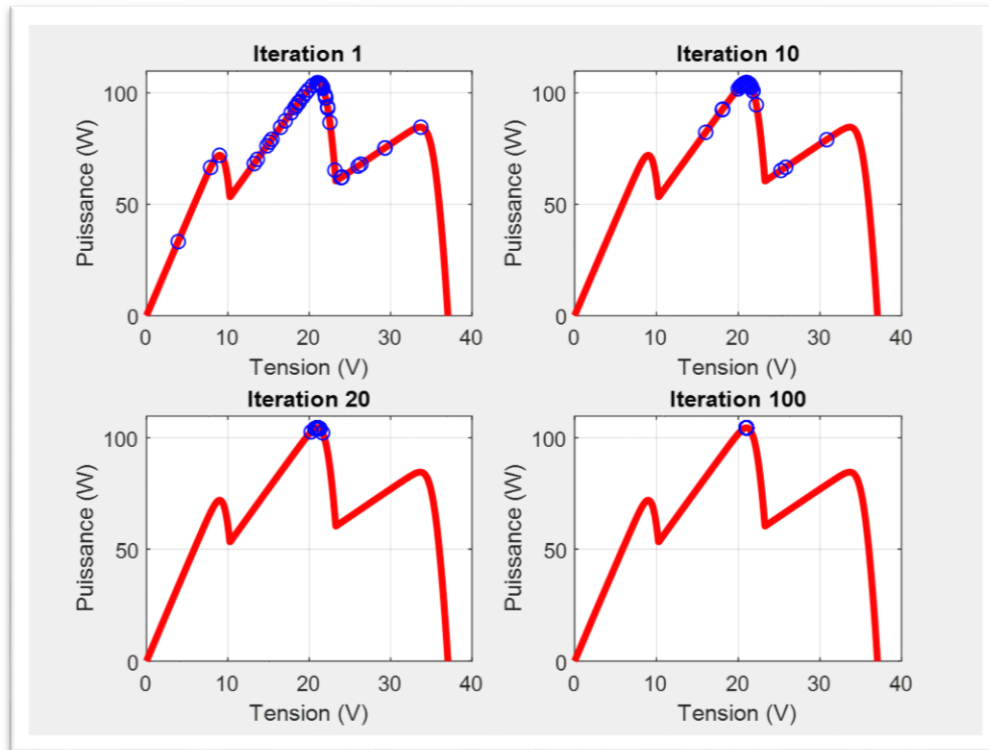


Figure III.5- Suivi du point de puissance maximale (MPP) sur une courbe $P(V)$ sous trois irradiances à différentes itérations de l'algorithme PSO.

La figure III.5 montre l'évolution du processus d'optimisation du point de puissance maximale (MPP) sur une courbe $P(V)$ sous trois irradiances à différentes itérations de l'algorithme PSO. À partir de la 10^e–20^e itération, la majorité des particules convergent autour des points de puissance élevée. Avant la 40^e itération, on observe une convergence nette vers le GMPP dans tous les cas, même en présence de plusieurs maxima locaux.

III.4- MPPT en utilisant un hacheur :

Afin que le module PV fournisse sa puissance maximale disponible, il faut une adaptation permanente de la charge avec le générateur photovoltaïque, cette adaptation pourra être réalisée par l'insertion d'un convertisseur DC-DC (hacheur) contrôlé par un mécanisme de poursuite «Maximum Power Point Tracking» (MPPT), afin d'assurer la puissance maximale. Nous avons testé le fonctionnement du système étudié (Fig III.6) sous une température fixe à 25°C et un éclairement 0.75kW/m². Les résultats de simulation du fonctionnement du système PV de la commande MPPT «PSO» sont représentés par les figures III.7 à III.9. On observe des



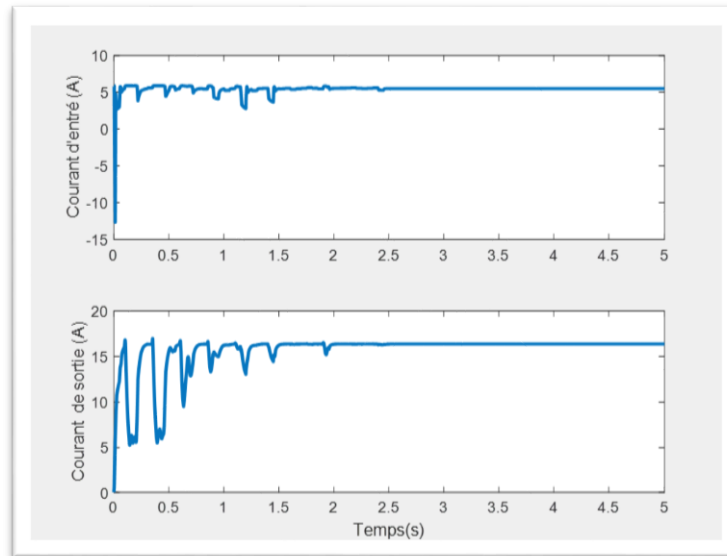


Fig.III.7- Le courant d'entrée et de sortie .

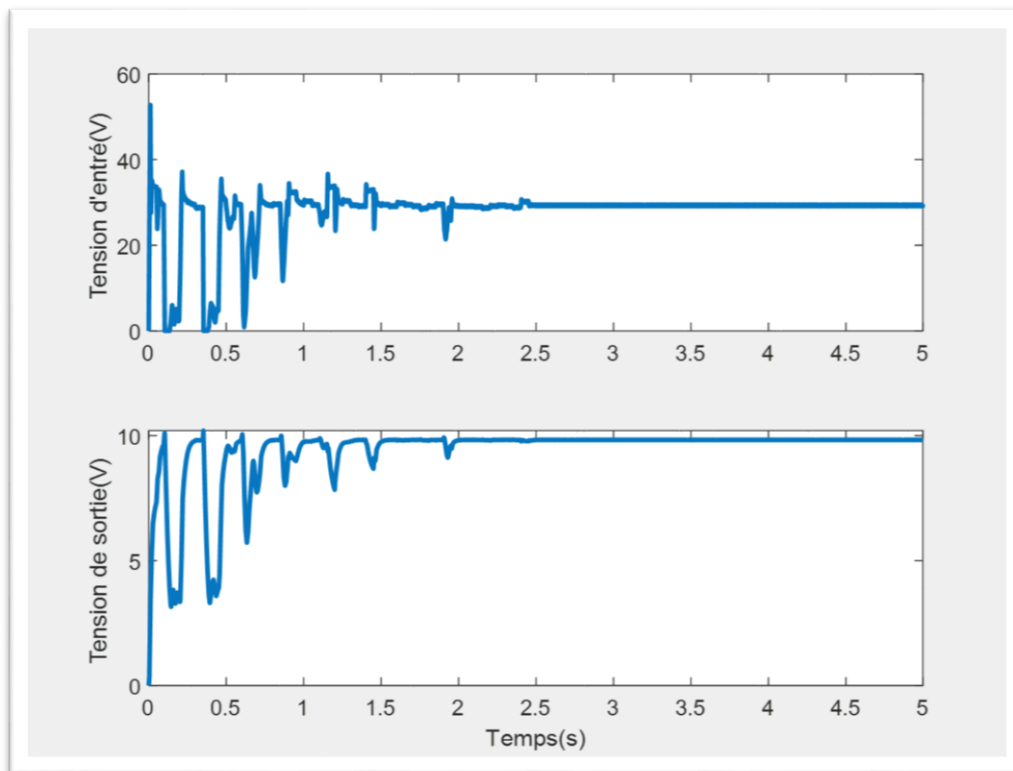


Fig.III.8- La tension d'entrée et de sortie.

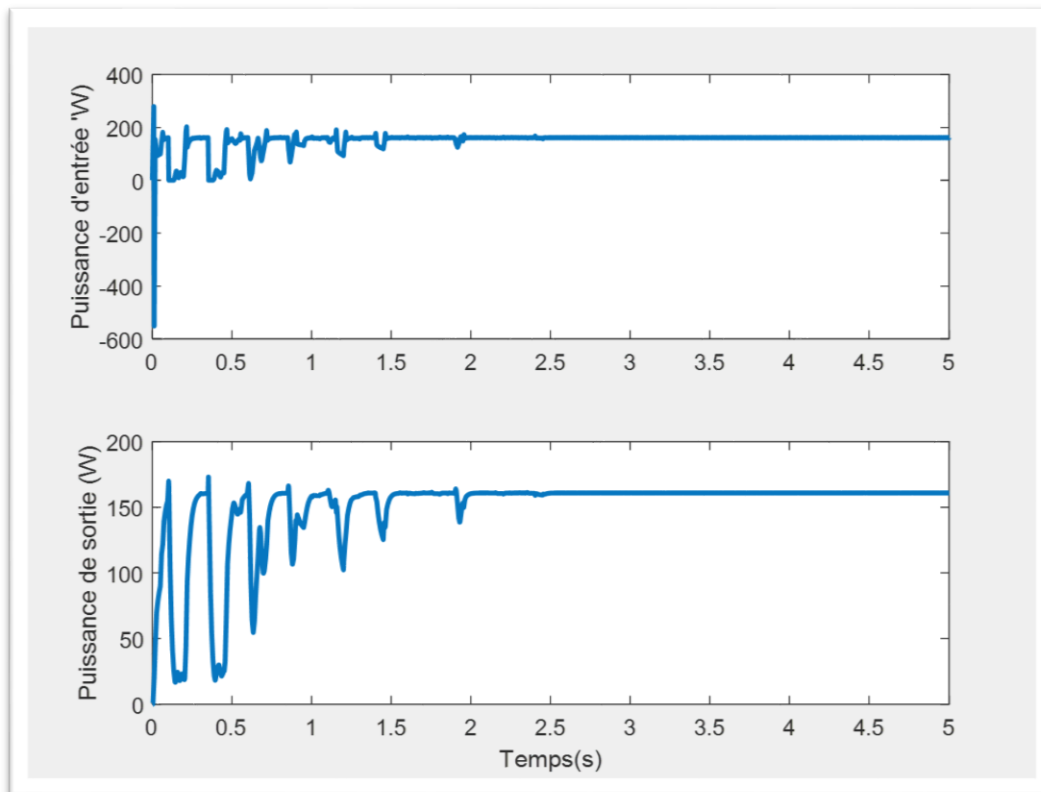


Fig.III.9- La puissance d'entrée et de sortie.

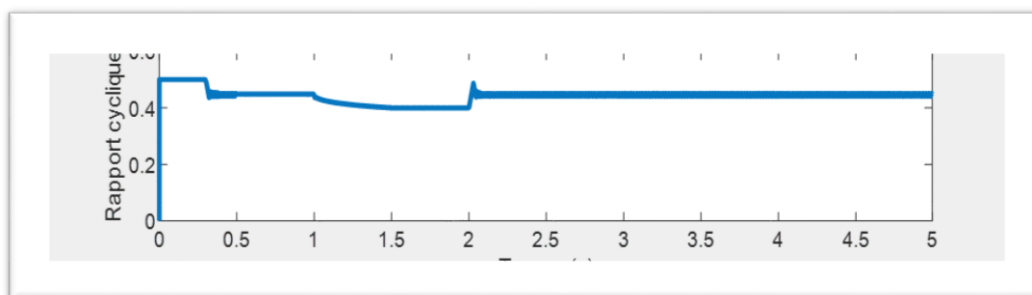


Fig.III.10- Rapport cyclique.

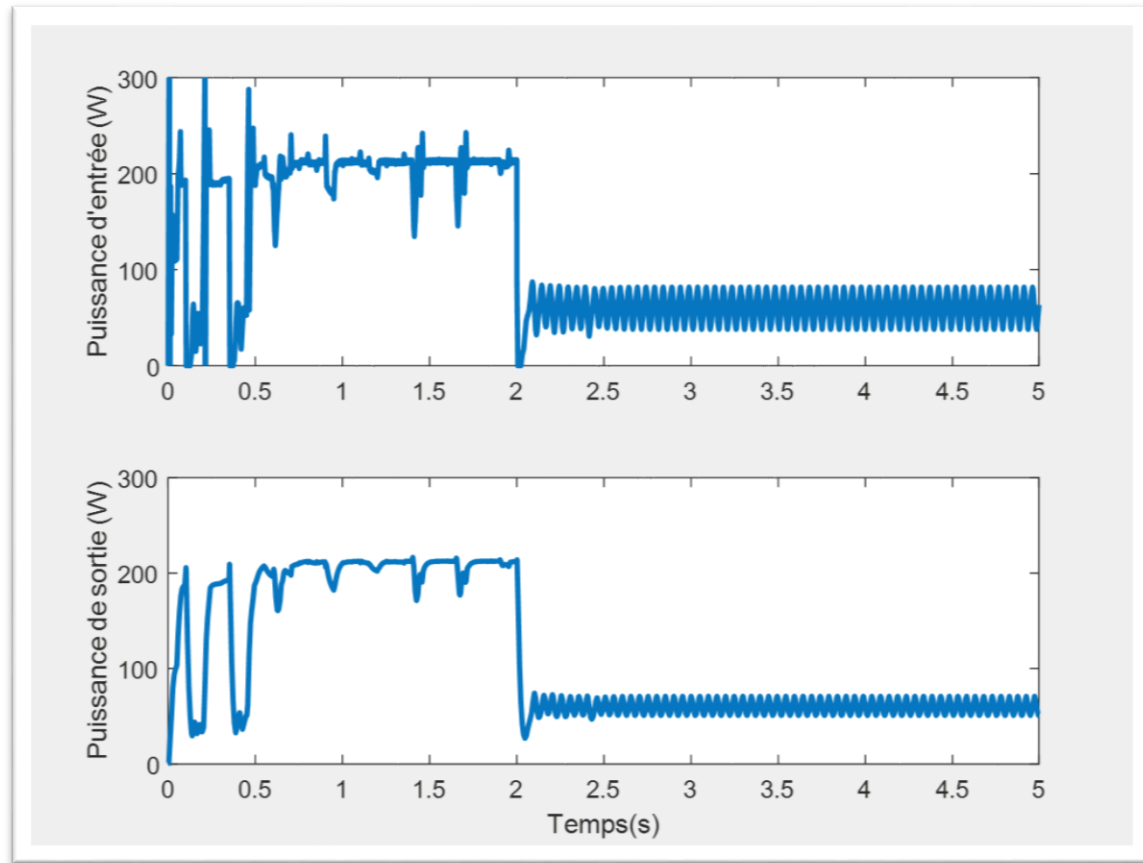


Fig.III.11- Puissance d'entrée et de sortie pour une variation de l'éclairement.

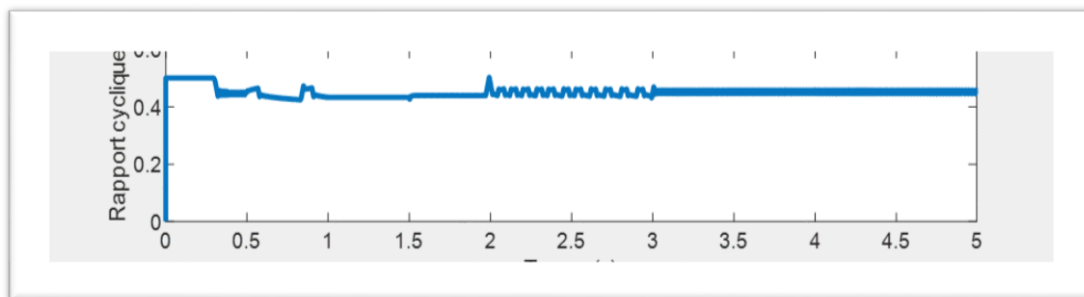


Fig.III.12- Rapport cyclique.

III.5- Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons modélisé l'ensemble de la chaîne de conversion sous Matlab/Simulink et l'algorithme de recherche du point de puissance maximale (MPPT) a été simulé. D'après cette étude, nous avons conclu que l'application de la commande PSO pour le

Chapitre III : Poursuite du point de puissance maximale parla technique PSO.

suivi du point de puissance maximale a montré des résultats particulièrement satisfaisants. Les résultats obtenus montrent que l'utilisation de la commande MPPT permet d'améliorer de manière considérable et efficace le rendement des installations photovoltaïques, en assurant une extraction optimale de l'énergie en fonction des variations d'éclairement. L'algorithme PSO, grâce à sa capacité d'optimisation, permet de suivre le point de puissance maximale de manière réactive et stable, même en présence de fluctuations des conditions environnementales. En conclusion, la méthode PSO, appliquée au suivi MPPT, s'avère être une solution efficace pour optimiser les performances des systèmes photovoltaïques et maximiser leur rendement énergétique.

Conclusion Générale et perspective

L'objectif principal de ce travail était d'étudier, modéliser et simuler un système photovoltaïque intelligent capable d'extraire le maximum d'énergie possible grâce à une méthode avancée de suivi du point de puissance maximale (MPPT), basée sur l'algorithme Particle Swarm Optimization (PSO). Dans un contexte où les énergies renouvelables prennent une place grandissante dans l'ensemble des différentes sources énergétique mondial, améliorer le rendement et l'efficacité des installations photovoltaïques représente un enjeu technologique et environnemental majeur.

Dans un premier temps, nous avons décrit le fonctionnement fondamental de la conversion de l'énergie solaire en électricité à l'aide des cellules photovoltaïques. Cela nous a permis de comprendre la nature non linéaire de leur fonctionnement, ainsi que l'importance de suivre en temps réel le point de puissance maximale. La modélisation du panneau solaire et l'étude des différentes structures de modules PV ont constitué une base solide pour les simulations ultérieures.

Le deuxième volet du travail s'est focalisé sur les différentes méthodes MPPT utilisées pour optimiser l'extraction de la puissance. Nous avons présenté les approches classiques telles que Perturb and Observe (P&O) et la méthode de conductance incrémentale, connues pour leur simplicité mais limitées par leur lenteur et leurs oscillations autour du point de puissance maximale. Ces inconvénients ont motivé l'introduction de méthodes d'optimisation inspirées de l'intelligence artificielle, en particulier l'algorithme PSO, qui repose sur un principe d'auto-organisation et de collaboration entre particules.

Dans le troisième chapitre, une application du PSO dans un système combinant un panneau photovoltaïque, un convertisseur DC-DC abaisseur, et une charge résistive. Les résultats de simulation ont clairement mis en évidence les performances supérieures de la méthode PSO. Celle-ci a montré une convergence plus rapide vers le point optimal, une réduction significative des oscillations en régime permanent, ainsi qu'un meilleur rendement énergétique, ce qui en fait une solution très adaptée aux environnements où l'ensoleillement et la température varient fréquemment.

En conclusion, l'algorithme PSO se révèle être une méthode efficace, stable et robuste pour le suivi du MPP dans les systèmes photovoltaïques. Son intégration dans des contrôleurs

Conclusion Générale et perspective

numériques intelligents ouvre des perspectives très prometteuses pour la gestion de l'énergie dans les installations solaires, notamment dans les micro-réseaux, les systèmes autonomes ou les bâtiments à énergie positive.

Pour prolonger ce travail, il serait intéressant d'implémenter l'algorithme PSO en temps réel sur une carte embarquée (type Arduino ou DSP), afin de valider les performances dans un contexte expérimental. D'autres pistes de recherche pourraient inclure la combinaison du PSO avec d'autres techniques d'intelligence artificielle (comme le fuzzy logic ou les réseaux neuronaux), ou encore l'étude de systèmes hybrides intégrant plusieurs sources d'énergie renouvelable.

Références bibliographies

- [1] NASRI Mehdi & HAMMOUDI Kahina. Techniques MPPT pour système photovoltaïque sous des conditions. Mémoire master, Université A. MIRA-BEJAIA, 2022.
- [2] Cyril Lahore. Optimisation de commandes MPPT. Automatique / Robotique. 2012 Dumas-01304277.
- [3] HETTAK Djamel & BELLILI Djohra. La poursuite du point de puissance maximale (MPPT) d'un système Photovoltaïque Sous Ombrage Total et Partiel. Mémoire master, Université A. MIRA-BEJAIA, 2019.
- [4] HAMZAOUI, Amer. Effet de l'illumination sur les paramètres caractéristiques des cellules solaires au silicium polycristallin. Mémoire de Magister, Université Ferhat Abbas – Sétif, Faculté des Sciences, Département de Physique, École doctorale « Energies Renouvelables », soutenu le 07 mars 2012.
- [5] Ramdani Ferial, Houri Nesrine, Étude et dimensionnement des systèmes photovoltaïques, Mémoire de fin d'études pour l'obtention du diplôme de Master, Université Kasdi Merbah Ouargla, Faculté des Mathématiques et des Sciences de la Matière, Département de Physique, Année universitaire 2020/2021.
- [6] M. L. Louazene, Etude technico-économique d'un système de pompage photovoltaïque sur le site de Ouargla», Mémoire de Magister, Université El Hadj Lakhdar, Batna, Algérie, 2008.
- [7] T. Ben Aoun et M. S. Mouissi, Etude D'un système couplant un générateur photovoltaïque Et Une Charge Electrolytique», Mémoire Master, Université Kasdi Merbah, Ouargla, Algérie, 2015.
- [8] A. Ahmed Azi, Contribution au développement d'un outil d'aide au diagnostic de performances des MPPT dans la chaine de conversion photovoltaïque, Mémoire magister, Université de M'sila, Algérie, 2014.
- [9] Latreche Soufiane, Bouzid Kheir eddine, Étude et Réalisation d'un système photovoltaïque à base d'une carte Arduino Uno, Mémoire de Master Professionnel, Université Kasdi Merbah Ouargla, Faculté des Nouvelles Technologies de l'Information et de la

Communication, Département d'électronique et de télécommunication, Année universitaire 2015/2016.

[10] HAMZAOUI, Amer. Effet de l'illumination sur les paramètres caractéristiques des cellules solaires au silicium polycristallin. Mémoire de Magister, Université Ferhat Abbas – Sétif, Faculté des Sciences, Département de Physique, École doctorale « Energies Renouvelables », soutenu le 07 mars 2012.

[11] Bouchareb, K., & Touati, A. (2021). Modélisation et simulation d'un système PV adapté par une commande MPPT basée sur un mode glissant. Mémoire de Master, Université 8 Mai 1945-Guelma, Faculté des Sciences et de la Technologie, Département de Génie Electrotechnique et Automatique.

[12] Rezki, A. (2012). Synthèse des méthodes de poursuite du point de puissance maximale (MPPT) [Mémoire de Master, École Nationale Polytechnique]. École Nationale Polytechnique, Alger.

[13] DAHMANI, Mohamed. Conception et réalisation d'une commande MPPT par la méthode P&O à base d'un microcontrôleur PIC16F876. Projet de fin d'études, École Nationale Polytechnique, Département d'Électronique, Alger, 2014. Dirigé par M. C. LARBES.

[14] A. Bouchter and C. Mokrane, Comparaison entre différentes techniques de commande MPPT d'un système solaire, Master's thesis, Dept. of Electrical Engineering, Univ. 8 Mai 1945 - Guelma, Guelma, Algeria, 2020.

[15] O. Fellah and H. C. Eddine Sadallah, "Optimisation de la production énergétique d'une chaine photovoltaïque," Master's thesis, Département d'Électrotechnique, Université Badji Mokhtar - Annaba, Annaba, Algérie, 2019.

[16] G. I. Barket, Poursuite du point de puissance maximale MPPT d'un système photovoltaïque sous les conditions PSC basée sur l'algorithme PSO, Mémoire de Master, Univ. Mohamed Khider Biskra, Faculté des Sciences et de la Technologie, Dép. de Génie Électrique, Biskra, Algérie, 2020.13:00