

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Ecole National Polytechnique

Centre de Développement des Technologies Avancées



Projet de fin d'Etudes Pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur d'Etat en Electronique

Thème :

Implémentation software de l'algorithme bio-inspiré SOA pour la commande MPPT

Réalisé par :

BOUGANDOURA Djihane

BOUDJENIH Hadjer

Composition du Jury :

- | | | |
|-------------------------------|-----------------|------------|
| • M. HADDADI Mourad | Professeur, ENP | Président |
| • M. LARBES Cherif | Professeur, ENP | Rapporteur |
| • Mme TITRI Sabrina | MRB, CDTA | Rapporteur |
| • M. TAGHI Mohamed Oussaid | MAA, ENP | Examineur |
| • M. AIT CHEIKH Mohamed Salah | Professeur, ENP | Invité |

ENP 2020

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Ecole National Polytechnique

Centre de Développement des Technologies Avancées



Projet de fin d'Etudes Pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur d'Etat en Electronique

Thème :

Implémentation software de l'algorithme bio-inspiré SOA pour la commande MPPT

Réalisé par :

BOUGANDOURA Djihane

BOUDJENIH Hadjer

Composition du Jury :

- | | | |
|-------------------------------|-----------------|------------|
| • M. HADDADI Mourad | Professeur, ENP | Président |
| • M. LARBES Cherif | Professeur, ENP | Rapporteur |
| • Mme TITRI Sabrina | MRB, CDTA | Rapporteur |
| • M. TAGHI Mohamed Oussaid | MAA, ENP | Examineur |
| • M. AIT CHEIKH Mohamed Salah | Professeur, ENP | Invité |

ENP 2020

ملخص:

من أجل تحسين الطاقة التي توفرها الأنظمة الكهروضوئية، من الضروري إتباع نقطة الطاقة القصوى. تتأثر الطاقة المستخرجة من النظام الكهروضوئي بدرجة الحرارة والإشعاع والتظليل الجزئي. تعرض الألواح الكهروضوئية إلى التظليل الجزئي يؤدي إلى ظهور العديد من القيم القصوى في منحى الخاصية طاقة-توتر، قيمة قصوى عظمى وواحدة أو أكثر من القيم القصوى المحلية. لا تستطيع الأساليب التقليدية تتبّع الحد الأقصى من الطاقة عند حدوث تظليل جزئي.

في هذا العمل نقترح وحدة تحكم لتتبع نقطة الإستطاعة العظمى اعتماداً على خوارزمية النورس المستوحاة من الحيوية، من أجل تقييم أداء وحدة التحكم المقترحة من حيث سرعة التقارب والدقة والاستقرار والمتانة يتم إختبارها في ظل تغيرات الحرارة والإضاءة. ولإثبات تفوق المتحكم المقترح، تم تحليل النتائج المتحصل عليها ومقارنتها مع التقنية القائمة على خوارزمية إستمثال عناصر السرب والتقنية القائمة على الخوارزمية التقليدية (المراقبة و الاضطراب) من حيث سرعة التتبع و الدقة و القدرة على إدارة الظل الجزئي. أظهرت النتائج المتحصل عليها أن وحدة التحكم المقترحة تعطي أداء أفضل في ظل ظروف جوية مختلفة.

الكلمات الدالة: النظام الكهروضوئي، تتبع نقطة الطاقة العظمى، الخوارزميات المستوحاة من الحيوية، خوارزمية تحسين طيور النورس.

Abstract:

In order to improve the power supplied by photovoltaic systems, it is necessary to follow the maximum power point. The power extracted from photovoltaic systems is affected by temperature, irradiation and partial shading. The photovoltaic panels could be partially shaded which leads to the appearance of several maximums in the P-V curve: a global maximum and one or more local maximum values. Conventional MPPT methods are unable follow the global maximum power point, so they are inefficient when partial shading occurs. In this work, we propose an MPPT controller based on a metaheuristic optimization method: Seagull Optimization Algorithm. Tests are developed under variations in temperature and lighting. And to demonstrate the superiority of the proposed controller, the results obtained are analyzed and compared with (P&O_MPPT) a conventional method, and (PSO_MPPT)) a bio-inspired method. The results obtained show that the proposed controller gives better performance under varying atmospheric conditions.

Keywords: Photovoltaic system, Maximum Power Point Tracking (MPPT), bio-inspired algorithms, Seagull Optimization Algorithm.

Résumé :

Afin d'améliorer la puissance fournie par les systèmes photovoltaïques, il est nécessaire de suivre le point de puissance maximale. La puissance extraite des systèmes photovoltaïques est affectée par la température, l'irradiation et l'ombrage partiel. Les panneaux photovoltaïques pourraient être partiellement ombragés ce qui conduit à l'apparition de plusieurs maximums dans la courbe P-V : un maximum global et une ou plusieurs valeurs maximales locales. Les méthodes MPPT conventionnelles sont incapables de suivre le point de puissance maximale globale, elles sont donc inefficaces lorsque l'ombrage partiel se produit. Dans ce travail, on propose un contrôleur MPPT basé sur méthode métaheuristique d'optimisation : Seagull Optimization Algorithm (Algorithme d'Optimisation des Mouettes). Afin d'évaluer les performances du contrôleur en termes de vitesse de convergence, précision, stabilité et robustesse, des tests sont élaborés sous variations de température et d'éclairage. Et pour démontrer la supériorité du contrôleur proposés, les résultats obtenus sont analysés et comparés avec (P&O_MPPT) une méthode conventionnelle, et (PSO_MPPT)) une méthode bio-inspirée. Les résultats obtenus montrent que le contrôleur proposé donne de meilleures performances sous variation des conditions atmosphériques.

Mots clés : Système photovoltaïque, poursuite du point de puissance maximale MPPT, algorithmes bio-inspirés, Algorithme d'Optimisation des Mouettes.

Remerciement

Nous tenons à remercier Monsieur **LARBES Cherif**, Professeur à l'Ecole Nationale Polytechnique d'Alger et nous lui exprimons particulièrement toute notre reconnaissance pour nous avoir fait bénéficier de ses compétences scientifiques, ses qualités humaines et sa constante disponibilité.

Nous tenons à remercier Madame **TITRI Sabrina**, Docteur et Chercheur au Centre de Recherche des Technologies Avancées qui nous a offert la possibilité de réaliser ce mémoire sous sa direction.

Nous tenons à remercier aussi Mlle **AZLI Hadjer** doctorante à l'Ecole Nationale Polytechnique d'Alger pour ses conseils et son aide durant la période du travail.

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

Nos remerciements vont à tous les enseignants du département d'Electronique de l'Ecole Nationale Polytechnique.

Dédicace

*Louange à ALLAH Tout-Puissant qui m'a donné la force et la patience
à achever ce travail*

*Je dédie ce modeste travail à ceux qui m'ont tout donné sans rien me
demander et à qui je dois énormément et qui je ne remercierais*

Jamais assez :

Mes chers parents

Mes grands frères Mohammed et Billal

Ma chère jumelle Roudjina

*À mes amis durant tout mon cycle universitaire, et plus précisément mes
merveilleuses Hadjer et Meryem.*

*À tous nos enseignants du primaire jusqu'à l'ENP, pour leur
contribution à nos éducations,*

À tous qui m'aiment et que j'aime.

Djihane BOUGANDOURA

Dédicace

Avec l'expression de ma reconnaissance, je dédie ce modeste travail à ceux qui, quels que soient les termes embrassés, je n'arrivais jamais à leurs exprimer mon amour sincère.

- *A la mémoire de mon père et Amina. J'espère que, du monde qui est sien maintenant, il apprécie cet humble geste comme preuve de reconnaissance de la part d'une fille qui a toujours prié pour le salut de ses âmes. Puisse Dieu le tout puissant, les avoir en sa sainte miséricorde !*
- *A la femme qui a souffert sans me laisser souffrir, qui n'a jamais dit non à mes exigences et qui n'a épargné aucun effort pour me rendre heureuse : mon adorable mère*
- *A mes chères sœurs et mes frères qui n'ont pas cessé de me conseiller, encourager et soutenir tout au long de mes études.*
- *A mon adorable petite sœur HIBA, qui sait toujours comment procurer la joie et le bonheur pour toute la famille.*

Hadjer BOUDJENI

Table des matières

Liste des figures	11
Liste des tableaux.....	13
Liste des abréviations.....	14
Introduction générale	15
Chapitre 1 : Etat de l'art sur les systèmes photovoltaïques	
1.1. Introduction	18
1.2. Cellule photovoltaïque	18
1.2.1. Principe d'une cellule photovoltaïque.....	18
1.2.2. Les caractéristiques électriques d'une cellule photovoltaïque	19
1.2.3. Modélisation d'une cellule photovoltaïque	20
1.2.3. Caractéristique d'une cellule photovoltaïque.....	22
1.3. Le générateur photovoltaïque.....	25
1.3.1. Structure d'un générateur photovoltaïque	25
1.3.1.1. Association des Cellules Photovoltaïques en Parallèle.....	25
1.3.1.2. Association des Cellules Photovoltaïques en Série	26
1.3.1.3. Association en série parallèle.....	27
1.3.2. Caractéristique Courant-Tension et Puissance-Tension	27
1.3.2.1. Influence de l'éclairement sur les courbes I-V et P-V.....	27
1.3.2.2. Influence de la température sur les courbes I-V et P-V.....	28
1.3.2.3. L'influence d'un éclairement non homogène : l'ombrage partiel	29
1.3.3. Protections d'un générateur photovoltaïques.....	30
1.3.3.1. Diode Anti-Retour	31
1.3.3.2. Diode by-pass	31
1.4. Configurations optimisées des champs solaires photovoltaïques	31
1.5. Connexion générateur photovoltaïque-charge	33
1.5.1. Connexion directe.....	33
1.5.2. Connexion indirecte via un étage d'adaptation	34
1.6. Convertisseurs DC/DC.....	35
1.6.1. Convertisseur Buck Boost	36
1.7. Principe de la recherche de MPP.....	39
1.8. Conclusion	41
Chapitre 2 : Les méthodes de poursuite du point de puissance maximale MPP état de l'art	
2.1. Introduction	43
2.2. Critères de sélection d'une commande MPPT	43

2.3. Méthodes de poursuite du point de puissance maximale MPPT	44
2.3.1. Méthodes conventionnelles	45
2.3.1.1. L'algorithme MPPT de perturbation et observation.....	45
2.3.1.2. Algorithme Incrément de la conductance INC	47
2.3.2. Les méthodes Soft Computing	49
2.3.3.1. Les méthodes d'intelligence artificielle	50
2.3.3.2. Les méthodes bio inspirées	53
2.4. Conclusion	56
Chapitre3 : Méthodes bio inspirées pour la recherche du point de puissance maximale	
3.1. Introduction	58
3.2. Concept de base de l'algorithme d'optimisation Seagull (SOA)	58
3.2.1. Paradigme biologique [24].....	58
3.2.2. Les différentes étapes de l'algorithme [34]	60
3.2.3. Critères de convergence	64
3.3. Application de l'algorithme SOA pour la commande MPPT	65
3.4. Concept de base de l'algorithme PSO	69
3.4.1. Les différentes étapes de l'algorithme PSO	70
3.5. Application de l'algorithme PSO dans une technique MPPT	72
3.6. Conclusion	75
Chapitre4 : Simulation des contrôleurs MPPT : Etude comparative	
4.1. Introduction	77
4.2. L'outil Matlab/Simulink	77
4.3. Identification des paramètres du système photovoltaïque	77
4.4. Influence de l'éclairement et de la température	79
4.5. Conception du convertisseur statique de type Buck-Boost	81
4.6. Paramétrage des algorithmes SOA et PSO	82
4.6.1. Paramétrage de l'algorithme SOA.....	82
4.6.2. Paramétrage de l'algorithme PSO	84
4.7. Poursuite du MPP dans les conditions standards	85
4.8. Tests de robustesse	85
4.8.1. Variation rapide de l'éclairement pour une température fixe	85
4.8.1. Variation rapide de la température pour un éclairement fixe	86
4.9.1. Courbes d'ombrage P-V	87
4.9.2. Poursuite du GMPP à l'aide de MPPT basé sur P&O	89
4.9.3. Poursuite du GMPP à l'aide de MPPT basé sur PSO	90

4.9.4. Poursuite du GMPP à l'aide du MPPT basé sur SOA	91
4.9.5. Evaluation comparative	92
4.9.5.1. Traitement de l'ombrage partiel	92
4.9.5.2. Efficacité statique.....	93
4.9.5.3. Temps de convergence	94
4.10. Conclusion	95
Conclusion générale.....	96
Bibliographie.....	99

Liste des figures

Figure 1. 1. Jonction P-N dans une cellule photovoltaïque.	19
Figure 1. 2. Caractéristiques d'une jonction PN sous éclairement.....	20
Figure 1. 3. Circuit électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque réelle.	20
Figure 1. 4. Caractéristiques I(V) et P(V) d'une cellule photovoltaïque.....	23
Figure 1. 5. Caractéristiques résultant d'un groupement de np cellules en parallèle.....	26
Figure 1. 6. Caractéristiques résultant d'un groupement de ns cellules en série.	26
Figure 1. 7. De la cellule au champ photovoltaïque.....	27
Figure 1. 8. Evolution des caractéristique I(V) et P(v) en fonction de l'irradiation.	28
Figure 1. 9. Evolution des caractéristique I(V) et P(v) en fonction de température.	28
Figure 1. 10. Evolution des caractéristique I(V) et P(v) en fonction de température.....	30
Figure 1. 11. Courbe P – V dans des conditions d'ombrage partiel.	30
Figure 1. 12. Circuit PV avec diodes bypass et diodes de blocage.	31
Figure 1. 13. Différentes configurations de champs photovoltaïques.	33
Figure 1. 14. Couplage direct GPV-Charge.....	34
Figure 1. 15. Connexion d'un GPV à une charge à travers un étage d'adaptation.	34
Figure 1. 16. Schéma du circuit du convertisseur Buck-Boost.....	36
Figure 1. 17. Circuit convertisseur abaisseur-élevateur lorsque le commutateur S est activé.	36
Figure 1. 18. Circuit convertisseur abaisseur-élevateur lorsque l'interrupteur S est désactivé.	37
Figure 1. 19. Courant d'alimentation, courant de diode, courant d'inductance et tension d'inductance respectivement (convertisseur buck-boost).	38
Figure 1. 20. Schéma synoptique du principe de convertisseur MPPT.....	40
Figure 2. 1. Organigramme de l'algorithme P&O.	46
Figure 2. 2. Organigramme de l'algorithme INC.....	48
Figure 2. 3. Classification des méthodes Soft-Computing.	49
Figure 2. 4. Schéma bloc de l'algorithme à base de la logique floue.....	50
Figure 2. 5. La configuration ANN permettant de déterminer le rapport cyclique au MPP.....	52
Figure 2. 6. Méthodes bio-inspirées utilisées avec les techniques MPPT dans un système PV.	54
Figure 3. 1. Déplacement des mouettes.....	59
Figure 3. 2. Migration et comportements d'attaque des mouettes.....	60
Figure 3. 3. Mouvement permettant d'éviter les collisions.	61
Figure 3. 4. Mouvement des agents de recherche vers le meilleur voisin.	62
Figure 3. 5. Convergence vers le meilleur agent de recherche.	63
Figure 3. 6. Comportement d'attaque naturel de la mouette.	64
Figure 3. 7. Organigramme complet de la méthode SOA.	66
Figure 3. 8. Déplacement d'un essaim de poissons et d'oiseaux.	70
Figure 3. 9. Mouvement d'une particule PSO.	72
Figure 3. 10. Organigramme complet de la méthode PSO.	73
Figure 4.1. Les caractéristiques courant-tension et puissance-tension du GPV dans les conditions standards.....	78
Figure 4.2. Les caractéristiques courant-tension et puissance-tension du système PV sous variation uniforme de l'irradiance ($T=25^{\circ}$).....	80
Figure 4.3. Les caractéristiques courant-tension et puissance-tension du système PV sous variation uniforme de la température ($G=1000w/m^2$).....	81
Figure 4.4. Simulation pour différentes valeurs de paramètres du contrôleur SOA_MPPT.	83

Figure 4.5. Evolution de la puissance de sortie des contrôleurs SOA, PSO et P&O MPPT sous conditions standards.....	85
Figure 4.6. Evolution de la puissance du contrôleur SOA, et PSO MPPT pour des changements rapides de l'éclairement.	86
Figure 4.7. Evolution de la puissance du contrôleur SOA, et PSO MPPT pour des changements rapides de la température.....	87
Figure 4.8. Les trois scénarios d'ombrage partiel utilisés.	88
Figure 4.9. Les courbes I-V et P-V utilisées dans la simulation.	89
Figure 4.10. Variation de la puissance du SPV pendant la poursuite du GMPP à l'aide de MPPT basé sur P&O dans les trois scénarios d'ombrage partiel.	90
Figure 4.11. Variation du rapport cyclique, courant, tension et de la puissance du SPV pendant la poursuite du GMPP à l'aide de MPPT basé sur PSO.....	91
Figure 4.12. Variation du rapport cyclique, courant, tension et de la puissance du SPV pendant la poursuite du GMPP à l'aide de MPPT basé sur SOA.....	92

Liste des tableaux

Table 4.1. Les caractéristiques du GPV.	79
Table 4.2. Résultats de simulation pour différentes valeurs des paramètres.	84
Table 4.3. L'efficacité statiques des contrôleurs SOA, PSO et P&O MPPT dans les trois scénarios d'ombrage partiel.....	93
Table 4.4. Le temps de convergence des contrôleurs SOA MPPT et PSO MPPT dans les trois scénarios d'ombrage partiel.....	94

Liste des abréviations

GPV : Générateur Photovoltaïque

PSO : Particle Swarm Optimisation

SPV : Système Photovoltaïque

PV: Photovoltaïque

SOA: Seagull Optimization Algorithm

MPP: Maximum Power Point

GMPP: Global Maximum Power Point

LMPP: Local Maximum Power Point

MPPT : Maximum Power Point Tracking

D : rapport cyclique

CCM : Continuous-Conduction Mode

DCM : Discontinuous-Conduction Mode

DC : Direct Current

V_{PV} : Tension de sortie du module photovoltaïque

I_{PV} : Courant de sortie du module photovoltaïque

P_{PV} : Puissance de sortie du module photovoltaïque

FPGA: Field Programmable Gate Array

FL: Fuzzy Logic

ANN : Artificial neural network

I_{cc} : courant de court-circuit

SSE : somme des erreurs quadratiques

PWM : Pulse Width Modulation (Modulation de largeur d'impulsion).

MSE : Mean square error (moyenne erreurs quadratiques)

KVL : Kirchhoffs Voltage Law

SC : Soft Computing

IA : Intelligence Artificielle

Introduction générale

L'énergie et l'environnement représentent deux éléments de base pour étudier le développement durable d'un pays [1]. Après de nombreux soubresauts, les contraintes environnementales, le rapprochement de l'échéance d'épuisement des ressources fossiles et fissiles ainsi que les soucis d'indépendance énergétique conduisent depuis les années 1990 à un décollage significatif des filières de production d'électricité d'origine renouvelable [2].

L'énergie renouvelable est l'énergie qui provient de ressources naturelles telles que la lumière du soleil, le vent, la pluie, les marées et la chaleur géothermique.

L'électricité solaire photovoltaïque est une source d'énergie renouvelable ayant atteint la maturité technologique. Ses caractéristiques en font une ressource de grand intérêt dans les nombreuses régions de notre planète où les solutions traditionnelles d'électrification sont mal adaptées. Il s'agit en premier lieu des zones d'habitat rural ou isolé, dont beaucoup ne disposeront pas d'électricité distribuée par réseau avant plusieurs décennies [3].

Cependant le développement des systèmes photovoltaïques a mis en évidence plusieurs facteurs affectant directement le rendement de cette technologie. Des études ont permis de mettre en évidence d'une part l'influence de l'ombrage partiel et d'autre part l'influence de l'augmentation de la température sur le rendement des systèmes solaires photovoltaïques.

Les phénomènes d'ombrages partiels en rappel, ont pour conséquence de générer des pertes de puissances élevées, pouvant aller jusqu'à la destruction des panneaux solaires. D'un point de vue économique, ces entraves plombent la rentabilité de la production des systèmes photovoltaïques aussi bien pour la vente, que pour l'autoproduction avec un temps de retour d'investissement trop long et une durée de vie non optimisée des équipements.

Beaucoup de travaux trouvés dans la littérature ont proposé des solutions techniques afin de réduire, ou bien, éliminer ces phénomènes. Le but ultime visé étant de faire fonctionner les systèmes photovoltaïques à leurs points de puissance maximale sous n'importe quelles conditions environnementales.

Plusieurs pics se produisent dans la courbe puissance-tension (P-V) dans des conditions d'ombrage partiel. Dans telles conditions, de nombreuses méthodes conventionnelles de poursuite du point de puissance maximale telles que la technique de perturbation et d'observation peuvent être invalides en raison du blocage dans un point de puissance maximale local. Ces méthodes manquent d'intelligence qui leur permettront de faire la distinction entre un maximum local (LMPP) et un maximum global (GMPP) lorsque la caractéristique P-V est multimodale.

Plusieurs travaux de recherches ont conduit au développement de nouvelles méthodes avancées basées sur l'intelligence artificielle, comme les réseaux neurones artificiel et la logique floue. Ces derniers peuvent suivre le point de puissance maximale globale. Cependant la difficulté actuelle est de trouver celle qui fournit le meilleur rendement par rapport aux exigences du marché, qui exige de plus en plus de solutions efficaces. Afin de palier a cette problématique, durant la dernière décennie, plusieurs chercheurs ont proposé de nouvelles méthodes basées sur des algorithmes inspirés de la nature : *algorithmes bio-inspirés*.

Ainsi, dans le cadre de notre projet de fin d'étude, nous avons proposé un nouvel algorithme pour la poursuite du point de puissance maximale (MPP) dans un système PV. Ce dernier est inspiré du comportement social des mouettes, en l'occurrence Seagull Optimisation Algorithme (*SOA*).

Afin de mettre en évidence la performance de l'algorithme proposé, ce dernier sera comparé avec un algorithme bio-inspiré à savoir Particle Swarm Optimisation *PSO* et un algorithme conventionnel le Perturb and Observe *P&O*.

Les résultats de simulation seront détaillés et discutés.

Ce mémoire est organisé en quatre chapitres.

- Le premier chapitre présente les concepts de base liés aux systèmes Photovoltaïques PV ;
- Le deuxième chapitre présente les différentes méthodes de poursuite du point de puissance maximale ;
- Le troisième chapitre présente les caractéristiques principales de l'algorithme *SOA* (Seagull Optimization Algorithm) et de l'algorithme *PSO* (Particle Swarm

- Optimization). L'application de chaque technique proposée comme MPPT est discutée ;
- Le quatrième chapitre présente une simulation sous MATLAB-SIMULINK du système PV réalisé. Les performances de poursuite et de recherche du MPP en utilisant les algorithmes SOA, PSO et P&O sont évaluées et comparées en termes de vitesse de poursuite, précision et la capacité de gérer les conditions d'ombrage partiel ;

Chapitre 1

Etat de l'art sur les systèmes photovoltaïques

1.1. Introduction

Le soleil est une source d'énergie propre et renouvelable, qui ne produit ni gaz à effet de serre ni déchets toxiques par son utilisation. C'est pourquoi l'homme l'a utilisée pour produire de l'électricité (le solaire photovoltaïque). L'énergie photovoltaïque désigne la transformation d'une source d'énergie lumineuse en électricité et son utilisation. Les cellules solaires et modules photovoltaïques sont des composants de conversion d'énergie qui produisent de l'électricité lorsqu'elles sont exposées à la lumière. On parle généralement d'énergie solaire photovoltaïque.

Dans ce chapitre, nous allons introduire les concepts de bases liés au domaine du solaire photovoltaïques.

1.2. Cellule photovoltaïque

1.2.1. Principe d'une cellule photovoltaïque

L'effet photovoltaïque est mis en œuvre dans la cellule photovoltaïque pour produire de l'électricité à partir du rayonnement solaire. Pour fabriquer les cellules photovoltaïques nous utilisons des matériaux aux propriétés particulières : les semi-conducteurs, et ceci pour deux raisons : ils absorbent facilement la lumière et permettent de générer un champ électrique et une tension électrique.

La cellule photovoltaïque est similaire dans sa réalisation à une diode classique obtenue en constituant une jonction de deux zones de type opposé (jonction PN).

Comme illustré en Figure 1.1, lorsqu'on illumine une jonction PN (dispositif dans lequel le dopage du semi-conducteur passe brusquement d'un type P à un type N), les paires électron-trou qui sont créées dans la zone de charge d'espace de la jonction sont immédiatement séparées par le champ électrique qui règne dans cette région, et entraînées dans les zones neutres de chaque côté de la jonction. Si le dispositif est isolé, il apparaît une différence de potentiel aux bornes de la jonction (photo tension) ; s'il est connecté à une charge électrique extérieure, on observe le passage d'un courant alors

qu'on n'applique aucune tension au dispositif. C'est le principe de base d'une cellule photovoltaïque. [4]

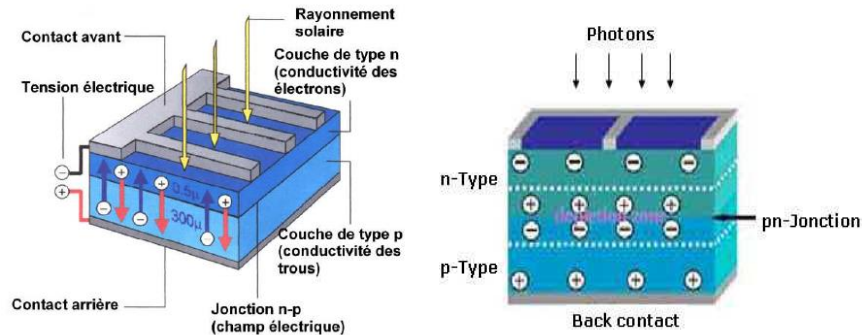


Figure 1. 1 . Jonction P-N dans une cellule photovoltaïque. [4]

1.2.2. Les caractéristiques électriques d'une cellule photovoltaïque

Une cellule solaire photovoltaïque est caractérisée par sa courbe courant-tension qui est subdivisée en quatre quadrants. Cependant le comportement de la cellule photovoltaïque s'étend sur trois zones (I, II et IV) et dépend de sa condition de polarisation comme illustré par la figure 1.2. Dans les zones II et IV, la cellule solaire fonctionne comme un récepteur en dissipant de la puissance. Il faudra donc bannir son fonctionnement dans ces deux zones afin de ne pas la détruire. Dans la zone I, la cellule photovoltaïque fonctionne comme un générateur en fournissant de la puissance. C'est le fonctionnement recherché, l'idéal est de la maintenir dans cette zone de fonctionnement. [5]

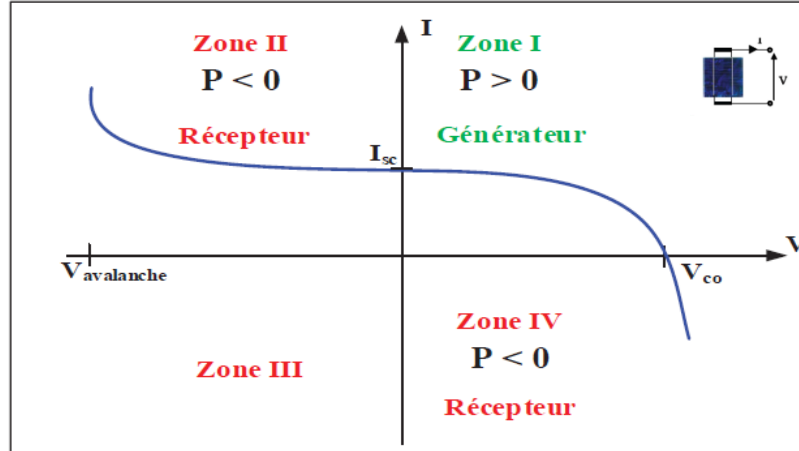


Figure 1. 2. Caractéristiques d'une jonction PN sous éclairement.

1.2.3. Modélisation d'une cellule photovoltaïque

Le schéma équivalent de la cellule photovoltaïque réelle tient compte d'effets résistifs parasites dues à la fabrication comme illustré par la figure 1.3.

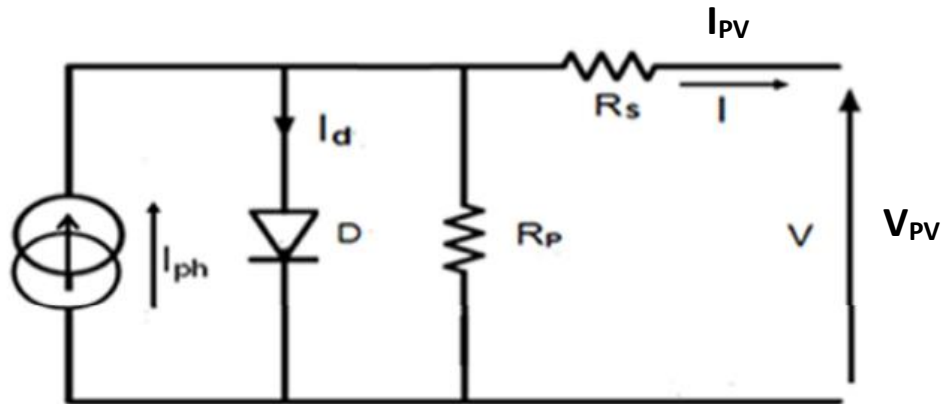


Figure 1. 3. Circuit électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque réelle.

Ce schéma équivalent est constitué d'une diode caractérisant la jonction, une source de courant (I_{ph}) caractérisant le photo-courant, une résistance série (R_s) et une résistance parallèle (R_p) qui est généralement très supérieure à (R_s).

La résistance série : est la résistance interne de la cellule ; elle dépend principalement de la résistance du semi-conducteur utilisé, de la résistance de contact des grilles collectrices et de leurs résistivités.

La résistance parallèle (Shunt) : est due à un courant de fuite au niveau de la jonction ; elle dépend de la façon dont celle-ci a été réalisée. [6]

L'équation mathématique qui modélise le courant de sortie d'une cellule photovoltaïque est représentée comme suit :

$$I_{PV} = I_{Ph} - I_d - I_{Rp} \quad (1.1)$$

Où

I_{PV} : Courant généré par la cellule photovoltaïque [A].

I_{Ph} : Photo courant créé par la cellule (proportionnel au rayonnement incident) [A].

I_d : Courant circulant dans la diode [A].

$$I_{Ph} = [K_I (T_C - T_{REF}) + I_{CC}] * \frac{G}{G_{REF}} \quad (1.2)$$

$$I_d = I_{Sat} \left[\exp \left(\frac{q(V_{PV} + I_{PV} * R_S)}{A * K * T_C} \right) \right] \quad (1.3)$$

$$I_{Sat} = I_0 \left(\frac{T_C}{T_{REF}} \right)^3 \left[\exp \left(\frac{q E_g \left(\frac{1}{T_{REF}} - \frac{1}{T_C} \right)}{A * K} \right) \right] \quad (1.4)$$

$$I_0 = \left[\frac{I_{CC}}{\exp \left(\frac{q * V_{CO}}{K * A * T_C} \right) - 1} \right] \quad (1.5)$$

Où

I_{Sat} : Courant de saturation inverse de la diode [A].

I_0 : Courant de court-circuit de la cellule à la température de référence T_{REF} [A].

I_{CC} : Courant de court-circuit [A].

V_{CO} : Tension de circuit ouvert [V].

$$I_{Rp} = \frac{V_{PV} + (I_{PV} * R_S)}{R_p} \quad (1.6)$$

Où

V_{PV} : Tension de sortie de PV [V].

I_{Rp} : Courant circulant dans la résistance R_p [A].

En substituant les équations (1.2 – 1.3 –1.6) dans l'équation (1.1) ça va nous donner L'équation reliant le courant délivré par une cellule photovoltaïque et la tension à ses bornes est donnée par :

$$I_{PV} = I_{PH} - I_{Sat} \left[\exp \left(\frac{(V_{PV} + I_{PV} * R_S)}{A * V_r} - 1 \right) - \frac{V_{PV} + (I_{PV} * R_S)}{R_p} \right] \quad (1.7)$$

Avec

$$V_r = \frac{kT_C}{q} \quad (1.8)$$

Où

k = Constante de Boltzmann

T = Température en Kelvin

q = Charge de l'électron

Une cellule photovoltaïque (PV) va ainsi produire de l'énergie de manière proportionnelle à l'intensité lumineuse qu'elle reçoit. La température est également un facteur influant sur les caractéristiques I-V d'une cellule photovoltaïque.

A partir de ces équations, une méthodologie simple a été développée pour la détermination des caractéristiques d'une cellule ou d'un panneau photovoltaïque. On introduit les deux paramètres externes de la cellule (facilement mesurables), tels que le courant de court-circuit I_{CC} et la tension de circuit ouvert V_{CO} , pour en déduire l'expression mathématique implicite du courant délivré par une cellule photovoltaïque, ainsi que sa caractéristique I-V.

1.2.3. Caractéristique d'une cellule photovoltaïque

Les cellules photovoltaïques sont caractérisées par un certain nombre de paramètres extrait de la caractéristique courant-tension :

1.2.3.1. Puissance crête d'une cellule PV

La puissance fournie par une cellule photovoltaïque est :

$$P_{PV} = V_{PV} I_{PV} \quad (1.9)$$

La puissance maximale d'une cellule photovoltaïque éclairée est la grandeur essentielle pour évaluer sa performance. La puissance P_{PV} est nulle lorsque $V_{PV} = 0$

(point de court-circuit) de même la puissance P_{PV} est nulle lorsque $V_{PV} = V_{CO}$ (point en circuit ouvert) puisque $I_{PV} = 0$.

Ensuite dans l'intervalle $0 < V_{PV} < V_{OC}$ P_{PV} atteint une valeur maximale.

Elle traduit sur la caractéristique $I-V$ le point du fonctionnement P_{mpp} (V_{mpp} , I_{mpp}) qui est situé au coude de la caractéristique $I-V$ et dit point de puissance maximale où les valeurs de tension V_{mpp} et du courant I_{mpp} appelées également tension et courant maximums respectivement, comme illustré par la figure 1.4.

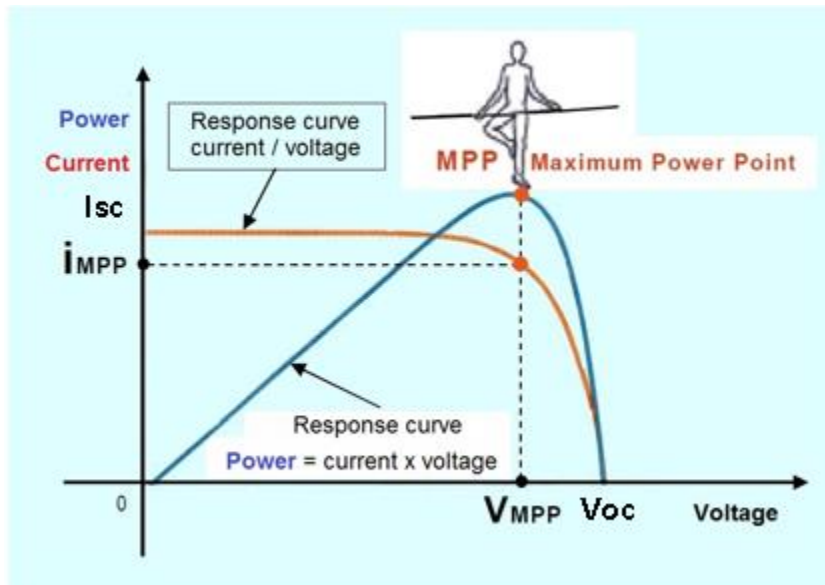


Figure 1. 4. Caractéristiques I(V) et P(V) d'une cellule photovoltaïque.

1.2.3.2. Courant de court-circuit, ICC

Le courant de court-circuit est mesuré en court-circuitant les bornes de la cellule photovoltaïque. C'est le courant lorsque le potentiel appliqué à la cellule photovoltaïque est nul. C'est le plus grand courant que la cellule photovoltaïque peut fournir. Il croît linéairement avec l'intensité d'illumination de la cellule photovoltaïque et dépend de la surface éclairée, de la longueur d'onde du rayonnement, de la mobilité des porteurs et de la température. [7]

1.2.3.3. Tension de circuit-ouvert, V_{CO}

Comme son nom l'indique, c'est la tension aux bornes de la cellule lorsqu'elle n'est pas connectée à une charge ou lorsqu'elle est connectée à une charge de résistance infinie.

Elle dépend essentiellement du type de cellule photovoltaïque (jonction PN, jonction Schottky), des matériaux de la couche active et de la nature des contacts de la couche active-électrode. Elle décroît avec la température et varie peu avec l'intensité lumineuse.

1.2.3.4. Facteur de forme, FF

Un paramètre important est souvent utilisé à partir de la caractéristique (I-V) pour qualifier la qualité d'une cellule photovoltaïque : c'est le facteur de forme (**FF**) « Fill Factor ». Ce coefficient représente le rapport entre la puissance maximale que peut délivrer la cellule notée P_{MPP} et la puissance formée par le rectangle $I_{CC} * V_{CO}$. Il est défini par la relation suivante :

$$FF = \frac{P_{MPP}}{V_{CO} * I_{CC}} = \frac{V_{MPP} * I_{MPP}}{V_{CO} * I_{CC}} \quad (1.10)$$

Ce paramètre compris entre 0 et 1 exprimé en pourcentage (%) qualifie la forme plus ou moins rectangulaire de la caractéristique **I-V** de la cellule photovoltaïque. Si celle-ci était carrée le facteur de forme serait égale à 1, la puissance P_{MPP} sera égale à ($I_{CC} * V_{CO}$). Mais, généralement le facteur de forme prend des valeurs entre 0.6 et 0.85.

1.2.3.5. Rendement de conversion

Le rendement de conversion correspond au rapport entre la puissance électrique maximale délivrée par les cellules photovoltaïques et la puissance lumineuse incidente. Le rendement caractérisant le taux de conversion photons-électrons d'une cellule photovoltaïque, qui est définit comme suit :

$$\eta_{max} = \frac{P_{max}}{G * A_{eff}} \quad (1.11)$$

Avec :

P_{max} = Puissance électrique délivrée par la cellule photovoltaïque (W)

A_{eff} = Surface effective de la cellule photovoltaïque (m²)

G = Irradiation (W/m^2).

En pratique, plusieurs facteurs limitent le rendement de cette photo-conversion. La première limitation vient de la longueur d'onde du rayonnement incident, qui doit être assez faible pour que l'énergie des photons soit supérieure à celle du gap et puisse être absorbée. Une deuxième limitation vient du fait qu'on ne peut pas éviter qu'une certaine proportion des porteurs qui se recombine avant d'atteindre les contacts du dispositif.

1.3. Le générateur photovoltaïque

1.3.1. Structure d'un générateur photovoltaïque

L'association de plusieurs cellules photovoltaïques en série/parallèle donne lieu à un générateur photovoltaïque. Le groupement des cellules dans un panneau solaire diffère d'un générateur à un autre, nous donnons ci-après quelques stratégies de groupements.

1.3.1.1. Association des Cellules Photovoltaïques en Parallèle

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.

Si l'on désire avoir un module PV ayant un courant de sortie plus intense, on peut soit faire appel à des cellules PV de plus grande surface et de meilleur rendement, ou alors associer en parallèle plusieurs cellules PV de caractéristiques similaires.

La figure 1.5 illustre les caractéristiques résultantes (I_{PCC}, V_{PCO}) obtenues en associant en parallèle n_p cellules identiques :

$$I_{PCC} = n_p * I_{CC} \quad \text{et} \quad V_{PCO} = V_{CO}$$

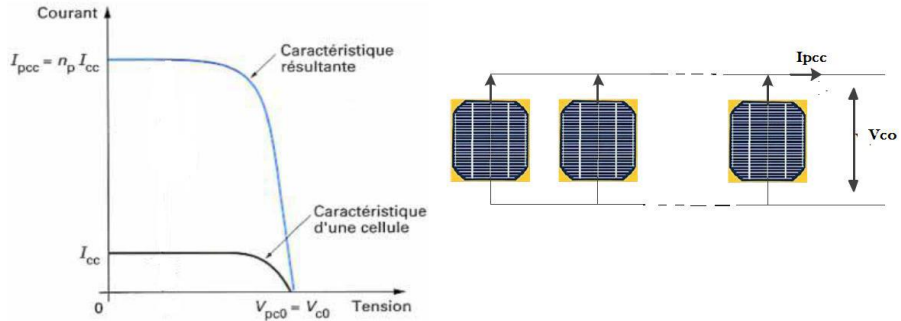


Figure 1. 5. Caractéristiques résultant d'un groupement de n_p cellules en parallèle.

1.3.1.2. Association des Cellules Photovoltaïques en Série

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

La figure 1.6 illustre la caractéristique résultante (I_{sco}, V_{sco}) obtenue en associant en série n_s cellules identiques :

$$I_{sco} = I_{cc} \quad \text{et} \quad V_{sco} = n_s * V_{c0}$$

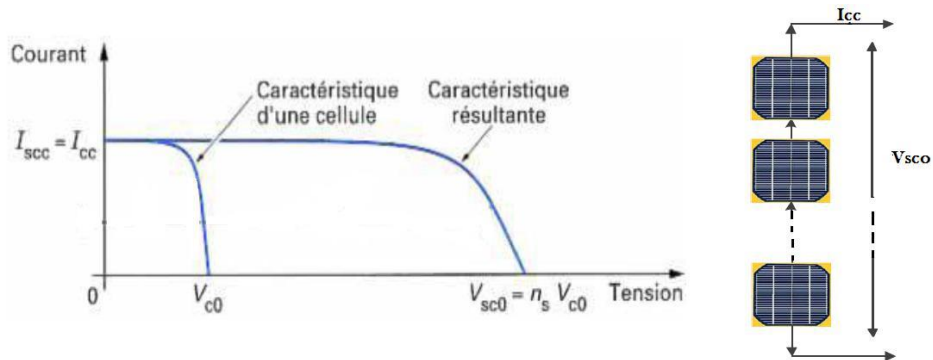


Figure 1. 6. Caractéristiques résultant d'un groupement de n_s cellules en série.

1.3.1.3. Association en série parallèle

Selon l'association en série et/ou parallèle des cellules photovoltaïques, les valeurs du courant de court-circuit I_{CC} et de la tension à vide V_{CO} sont plus ou moins importantes.

Pour qu'un générateur PV ainsi constitué puisse fonctionner de façon optimale, il faut que les (n_s , n_p) cellules se comportent toutes de façon identique. Elles doivent pour cela être issues de la même technologie, des mêmes conditions de fonctionnement (éclairage, température, vieillissement et inclinaison).

Afin d'obtenir des puissances de quelque kW à quelque MW, sous une tension convenable, il est nécessaire d'associer les modules en panneaux, et de les monter en rangées de panneaux série et parallèle pour former ce que l'on appelle un champ photovoltaïque (figure1.7).

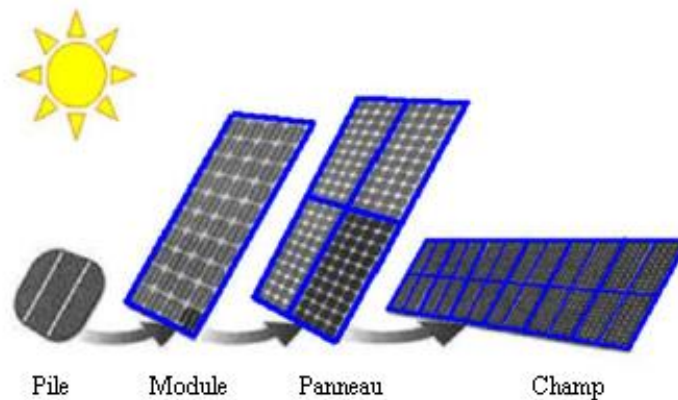


Figure 1. 7. De la cellule au champ photovoltaïque.

1.3.2. Caractéristique Courant-Tension et Puissance-Tension

Les caractéristiques d'un générateur photovoltaïque dépendent de l'éclaircement et de la température.

1.3.2.1. Influence de l'éclaircement sur les courbes I-V et P-V

La caractéristique courant-tension (I-V) d'un générateur photovoltaïque change avec l'irradiation pour une température donnée. Comme illustré en figure 1.8, lorsque

l'irradiation augmente, la courbe se translate vers le haut et vers la droite. Le courant de court-circuit I_{SC} (ou I_{CC}) varie proportionnellement à l'irradiation.

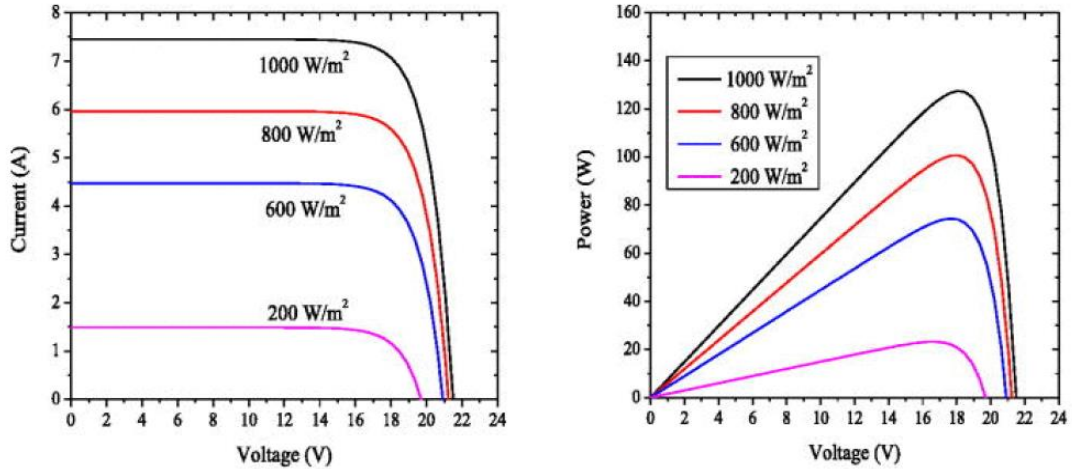


Figure 1. 8. Evolution des caractéristique I(V) et P(v) en fonction de l'irradiation.

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

La température affecte la caractéristique I-V, où on remarque l'augmentation de la tension à vide quand la température diminue, mais le courant de court-circuit diminue dans des proportions moindres (figure 1.9). La diminution du courant de saturation est la principale cause de la chute de courant à basse température.

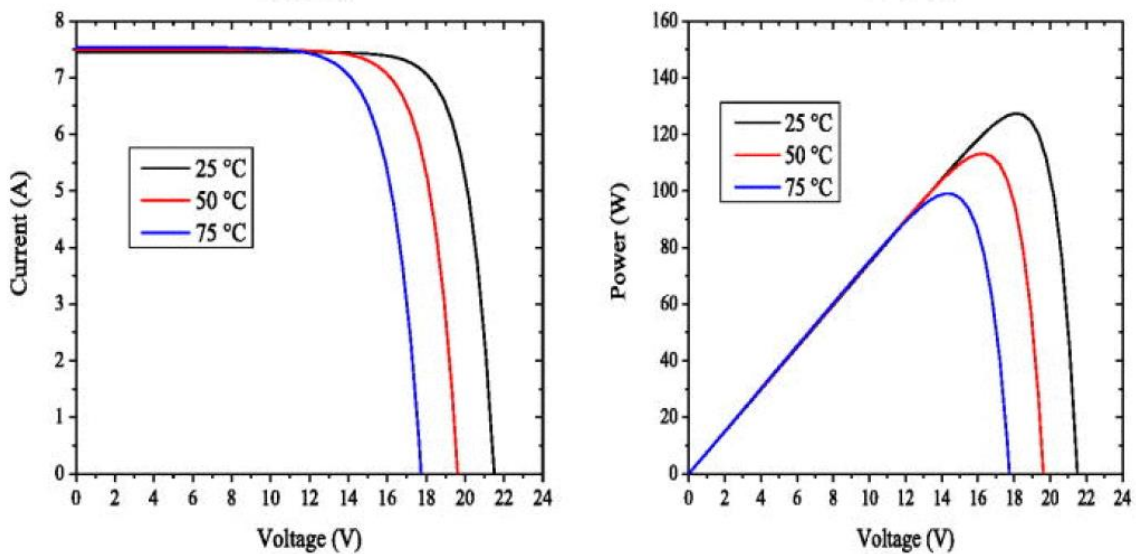


Figure 1. 9. Evolution des caractéristique I(V) et P(v) en fonction de température.

1.3.2.3. L'influence d'un éclairage non homogène : l'ombrage partiel

Le phénomène d'ombrage partiel sur le générateur photovoltaïque est généralement provoqué par des obstacles proches des installations photovoltaïques tels que des arbres, des hautes cheminées, des murs, etc. Ces obstacles pour la plupart sont permanents, prévisibles et détectés à des périodes de l'année dus à la trajectoire du soleil. On remarque également des ombrages partiels éphémères et imprévisibles dus au passage nuageux, des excréments d'oiseaux, la neige, la poussière etc. Peu importe la forme de l'ombrage partiel, les caractéristiques courant-tension $I_{PV} = f(V_{PV})$ et puissance-tension $P_{PV} = f(V_{PV})$ des générateurs photovoltaïques s'en trouvent affectées. Les pertes annuelles d'énergie dues à l'ombrage partiel dans les générateurs photovoltaïques ont été évaluées à environ 3 % à 6%. A long terme, l'ombrage partiel est susceptible d'endommager les panneaux photovoltaïques. En effet lorsque le rayonnement solaire est uniforme, la cellule photovoltaïque est assimilée à une diode qui fonctionne en polarisation directe. Une fois que survient l'ombrage partiel, le courant de court-circuit I_{CC} des cellules ombragées chute considérablement. Étant donné qu'elles sont connectées en série, les cellules sont tenues de drainer toutes, le même courant. Cependant elles en sont incapables ; ceci est dû au fait que certaines cellules photovoltaïques reçoivent de l'ombrage partiellement. Cela conduit les cellules ombragées à fonctionner en polarisation inverse. Dans cette région de polarisation inverse, la cellule photovoltaïque va dissiper de la puissance sous forme de chaleur. Cela a pour conséquence de créer un point chaud (hot spot) capable d'endommager les cellules photovoltaïques ombragées.[5]. Pour protéger les générateurs PV contre ce problème, des diodes bypass sont utilisées. Une diode est connectée antiparallèlement avec un groupe de cellules.

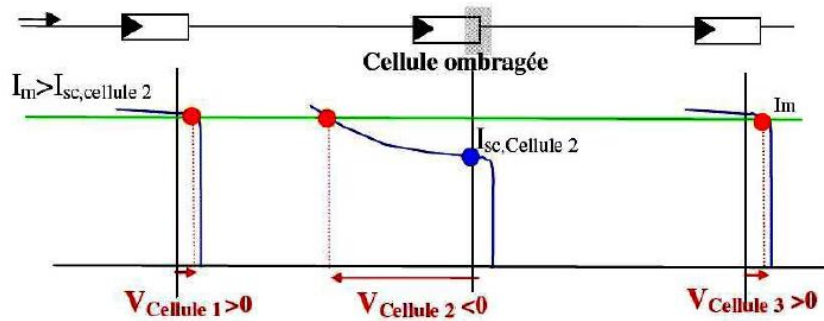


Figure 1. 10. Evolution des caractéristique I(V) et P(v) en fonction de température.

Comme l'illustre la figure ci-dessous, dans des conditions partiellement ombragées, la caractéristique P-V résultante présente plusieurs points de puissance maximale, plusieurs maxima locaux et un maximum global. Selon le type d'ombrage la caractéristique P-V peut prendre diverses formes.

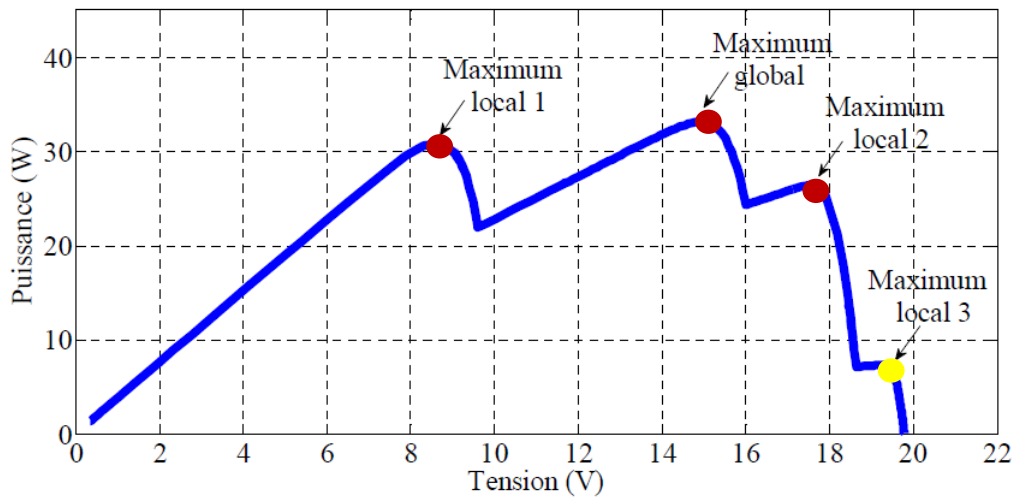


Figure 1. 11. Courbe P – V dans des conditions d'ombrage partiel.

1.3.3. Protections d'un générateur photovoltaïques

Pour garantir une durée de vie importante d'une installation photovoltaïque destinée à produire de l'énergie électrique sur des années, des protections électriques doivent être ajoutées aux modules afin d'éviter des pannes destructrices liées à l'association des cellules en séries et des panneaux en parallèles. Pour cela, deux types de protections classiques sont utilisés dans les installations actuelles.

1.3.3.1. Diode Anti-Retour

Lors de la mise en parallèle des panneaux pour former GPV, les panneaux peuvent débiter les uns dans les autres, la branche avec la tension la plus faible absorbe un courant inverse provenant des autres branches. Ou bien quand une charge en connexion directe peut basculer du mode récepteur au mode générateur, par exemple une batterie durant la nuit. C'est pourquoi on met en série de chaque panneau une diode "anti retour" ou "anti parallèle".

1.3.3.2. Diode by-pass

La diode by-pass est connectée en antiparallèle avec un groupe de cellules, afin de les isoler lorsque l'éclairement n'est pas homogène (partial shading) évitant ainsi l'apparition de points chauds (hotspots) et la destruction des cellules mal éclairées. Sans ces diodes le panneau risquerait de prendre feu à cause de l'échauffement de la cellule occultée qui n'arrivera pas à dissiper la puissance à ses bornes.

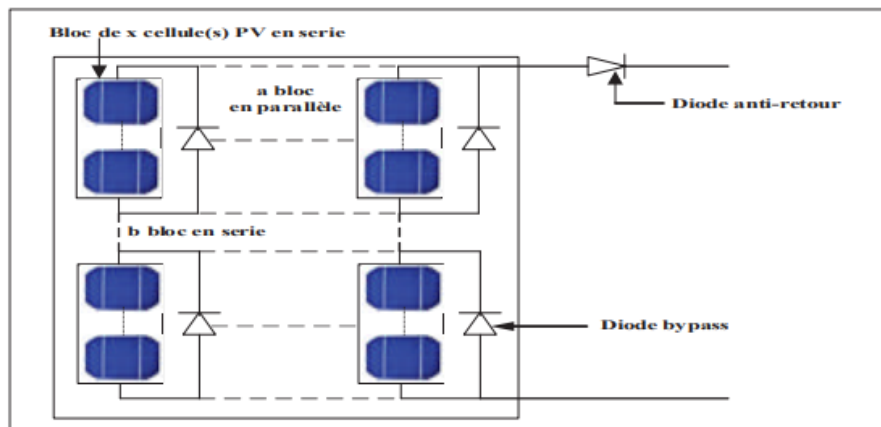


Figure 1. 12. Circuit PV avec diodes bypass et diodes de blocage.

1.4. Configurations optimisées des champs solaires photovoltaïques

On dénombre de multiples configurations de champs photovoltaïques dans la littérature dont les plus connus sont :

- a) **Série-parallèle** : C'est la configuration la plus répandue. Les panneaux sont connectés en série (string), ensuite ces strings sont connectés entre eux en

- parallèle (figure 1.13 a). La puissance produite en sortie se trouve augmentée mais l'inconvénient de cette configuration est qu'elle enregistre beaucoup de pertes de puissances dû aux panneaux montés en série. Il est préconisé dans une telle configuration de limiter le nombre de panneaux photovoltaïques par string et de privilégier un plus grand nombre de connexion parallèle. [5]
- b) **Total cross Tied** : Elle est réalisée en connectant en parallèle tous les panneaux photovoltaïques sur la même ligne des différents strings (figure 1.13b). Cela donne un champ solaire en forme de matrice contenant plusieurs nœuds. La somme des courants dans les différents nœuds et la tension des panneaux photovoltaïques montés en parallèle sont égales. Cette configuration dans la majorité des modèles d'ombrage testés donne de meilleurs résultats comparativement aux trois autres configurations. Cela est dû aux multiples connexions qui permettent de ne pas activer les diodes by-pass dans toutes les conditions d'ombrage. Ce qui permet de monter en tension et en courant tout en minimisant les pertes de puissances. L'inconvénient de cette configuration est qu'elle est plus dispendieuse à mettre en œuvre. [5]
- c) **Bridge Link** : Cette configuration est composée de plusieurs îlots (figure 1.13c). Chaque îlot est composé de deux strings parallèles portant chacun deux panneaux solaires en série avec des liaisons intercalées entre les ponts. Elle permet aussi d'augmenter la tension et le courant tout en limitant les pertes de puissances dans le système photovoltaïque. Comparé à la configuration total cross tied, la configuration bridge link est moins performante pour des cas d'ombrages partiels mais présente une meilleure performance que le total cross tied lorsqu'elle est soumise à un plein ensoleillement. Cela s'explique par le fait qu'elle nécessite moins de filage, donc moins de pertes de puissance. Comparée à la configuration série-parallèle, elle est beaucoup plus dispendieuse à mettre en œuvre mais présente moins de pertes que la configuration série-parallèle. [5]
- d) **Honey Comb** : Elle est formée de deux strings parallèles constitués de trois modules connectés en série (figure 1.13d). Confrontée aux configurations total cross tied et bridge link, la configuration Honey Comb est reconnue comme ayant des performances moyennes car elle enregistre un peu plus de pertes de puissance.

Par contre elle présente une meilleure performance pour un champ solaire aménagé et connecté de manière asymétrique ou lorsque le nombre de colonnes recevant le même ensoleillement est supérieur au nombre de lignes. [5]

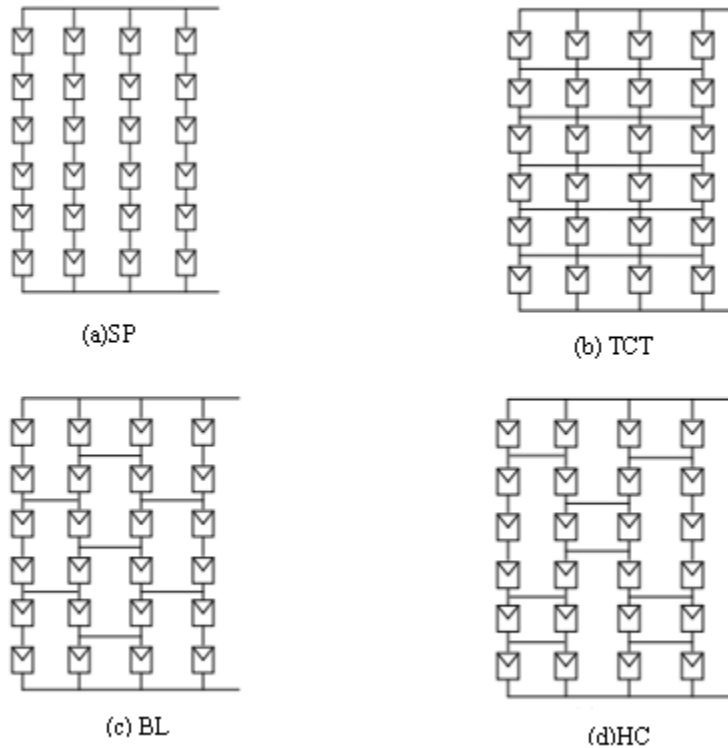


Figure 1. 13. Différentes configurations de champs photovoltaïques.

1.5. Connexion générateur photovoltaïque-charge

1.5.1. Connexion directe

Le système le plus simple que l'on puisse concevoir se compose d'un générateur photovoltaïque (GPV) et d'une charge de type continu (DC) qu'utilise directement la puissance fournie par le GPV. La caractéristique puissance/tension d'un panneau solaire présente un extremum qui varie avec la température, l'éclairement et la nature de la charge. La connexion directe entre le panneau photovoltaïque et la charge est très répandue en raison de sa simplicité de mise en œuvre, ainsi que de son coût minimal de fonctionnement en l'absence d'électronique à l'exception d'une diode antiretour nécessaire parfois pour éviter un éventuel retour du courant. [4]

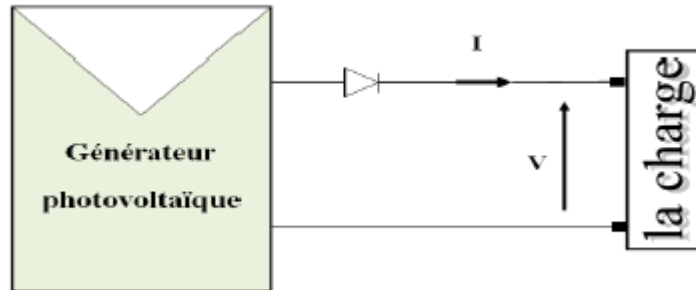


Figure 1. 14. Couplage direct GPV-Charge.

Malheureusement cette configuration a peu de chance de placer le système PV à son point de fonctionnement maximum (MPP). La puissance fournie par le module photovoltaïque est fixée par l'intersection entre la caractéristique courant-tension (I-V) du GPV et celle de la charge. Le transfert de puissance ne pourra donc pas rester optimisé lorsque les caractéristiques fluctuent. Dans le cas d'une charge type batterie, il faut que la tension de la batterie (qui impose la tension du panneau) soit proche de la tension V_{OPT} pour laquelle la puissance délivrée est maximale. [4]

1.5.2. Connexion indirecte via un étage d'adaptation

Pour augmenter la production d'un GPV, un étage d'adaptation entre le panneau photovoltaïque et la charge est ajouté (figure 1.15). Cette adaptation a pour rôle de chercher de façon automatique le MPP du générateur. Cet étage d'adaptation peut être un convertisseur DC-DC.

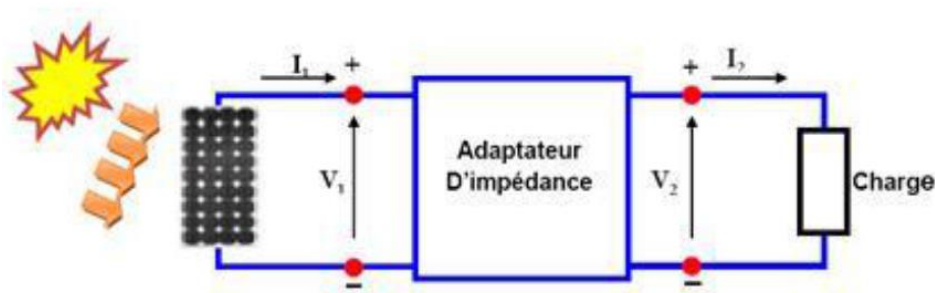


Figure 1. 15. Connexion d'un GPV à une charge à travers un étage d'adaptation.

1.6. Convertisseurs DC/DC

La puissance générée par les systèmes photovoltaïques est très sensible aux conditions climatiques de fonctionnement. Cela est indésirable si on veut exploiter cette énergie et l'utiliser soit pour l'alimentation soit pour le stockage. Pour cela, il faut avoir un étage d'adaptation entre la source (GPV) et la charge. Cela assure la régulation de la tension et du courant de sortie pour qu'ils soient convenables au fonctionnement de la charge ainsi qu'au transfert du maximum de puissance fournie par le générateur. Les adaptateurs communément utilisés sont des convertisseurs statiques continus appelés convertisseurs DC-DC ou hacheurs. Ils sont généralement utilisés dans les circuits fonctionnant en courant continu pour le contrôle de la puissance électrique avec une grande souplesse et un rendement très élevé [9]. Dans le cas des systèmes photovoltaïques, ils permettent de maintenir le point de fonctionnement sur ou assez proche du point optimal pour n'importe quelles conditions de fonctionnement (ensoleillement, température, caractéristiques de la charge, ...etc.).

Plusieurs types de convertisseurs existent, parmi ces types, nous pouvons citer :

- Le convertisseur Buck, hacheur série, permet de convertir une tension continue en entrée en une autre tension continue en sortie avec une valeur plus petite que celle d'entrée ;
- Le convertisseur Boost, hacheur parallèle, convertit une tension continue en entrée en une autre tension continue en sortie avec une valeur plus grande que celle d'entrée ;
- Le convertisseur Buck-Boost combine les propriétés des deux autres convertisseurs. Il convertit la tension continue en entrée en une autre tension continue en sortie avec une valeur plus petite ou plus grande mais de polarité inverse.

Dans ce qui suit, nous allons intéresser au convertisseur type Buck Boost, utilisé dans le cadre de notre travail.

1.6.1. Convertisseur Buck Boost

Le schéma électrique d'un convertisseur Buck–Boost est représenté par la figure.1.16.

Le convertisseur Buck–Boost également appelé *abaisseur–élevateur* par son aptitude à fournir une tension plus faible, ou plus élevée que celle appliquée en entrée. Ceci dépend de la valeur du rapport cyclique D. La figure ci-dessous illustre le circuit du convertisseur. [10]

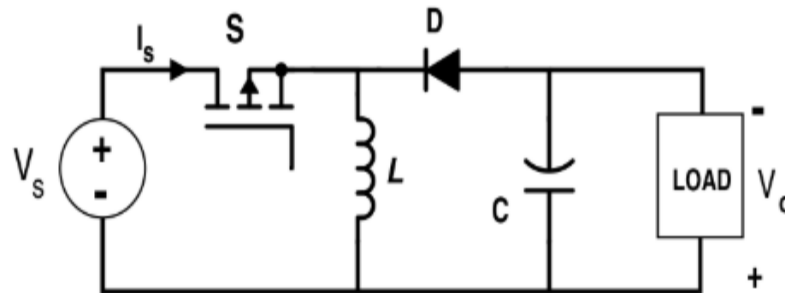


Figure 1. 16. Schéma du circuit du convertisseur Buck-Boost.

Le fonctionnement du convertisseur peut être divisé en deux phases distinctes selon l'état de l'interrupteur S :

- Lorsque l'interrupteur S est activé, comme l'illustre la figure1.17,

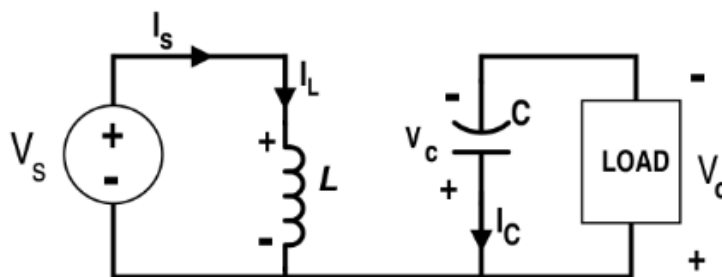


Figure 1. 17. Circuit convertisseur abaisseur–élevateur lorsque le commutateur S est activé.

Les équations de cette phase de fonctionnement sont données par :

$$-V_s + V_L = 0 \tag{1.12}$$

$$-V_c + V_o = 0 \tag{1.13}$$

$$V_C = V_O \quad (1.14)$$

- Lorsque l'interrupteur S est désactivé, comme l'illustre la figure 1.18, alors :

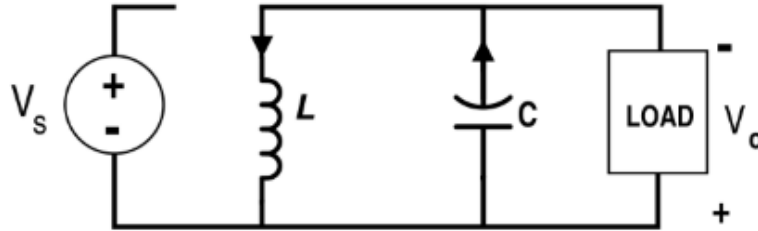


Figure 1. 18. Circuit convertisseur abaisseur-élevateur lorsque l'interrupteur S est désactivé.

Les équations de cette phase de fonctionnement sont données par :

$$-V_L + V_C = 0 \quad (1.15)$$

$$V_C = V_O \quad (1.16)$$

$$-V_O + V_L = 0 \quad (1.17)$$

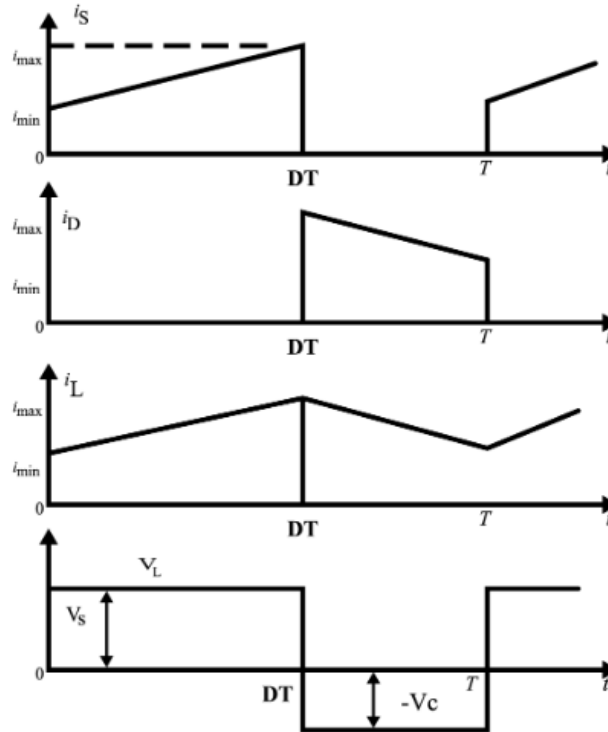


Figure 1. 19. Courant d'alimentation, courant de diode, courant d'inductance et tension d'inductance respectivement (convertisseur buck-boost).

Maintenant, à partir des formes d'onde données dans la Figure1.19,

Lorsque le commutateur S est activé,

$$\text{Augmentation du courant d'inductance} = I_{min} - I_{max} = -\frac{V_s}{L} DT \quad (1.18)$$

Et, lorsque le commutateur S est désactivé,

$$\text{Chute du courant d'inductance} = I_{min} - I_{max} = -\frac{V_c}{L} (1 - D)T \quad (1.19)$$

En égalisant les équations 1.18 et 1.19, nous pouvons obtenir,

$$\frac{V_s}{L} DT = \frac{V_c}{L} (1 - D)T \quad (1.20)$$

$$V_o = V_c = \frac{D}{1-D} V_s \quad (1.21)$$

$$\text{Courant d'inductance moyen} = \frac{I_{max} + I_{min}}{2} \quad (1.22)$$

Comme il n'y a pas de courant d'alimentation pendant la condition d'arrêt,

$$\text{Puissance d'entrée} = P_{IN} = \frac{I_{max} + I_{min}}{2} V_S \quad (1.23)$$

Et,

$$\text{Puissance de sortie} = P_{OUT} = \frac{V_O^2}{R} \quad (1.24)$$

S'il n'y ait pas de perte de commutation $P_{IN} = P_{OUT}$

$$I_{max} + I_{min} = 2D^2 \frac{V_S}{R(1-D)^2} \quad (1.25)$$

$$I_S = \frac{I_{max} + I_{min}}{2} = \frac{D^2}{R(1-D)^2} V_S \quad (1.26)$$

Alors, les grandeurs électriques de sorties (V_O et I_O) dans le convertisseur buck boost sont liées à celles d'entrées (V_S et I_S) en fonction du rapport cyclique D du signal qui commande l'interrupteur du convertisseur.

En faisant varier la valeur du rapport cyclique à une certaine valeur, la tension de sortie est inférieure à la tension d'entrée ($V_O < V_S$), généralement dans la plage $0 < D < 0.5$, donc buck boost fonctionne comme un convertisseur abaisseur. Et la sortie est supérieure à la tension d'entrée ($V_O > V_S$) si le rapport cyclique est dans la plage de $0.5 < D < 1$, agit donc comme un convertisseur survolteur.

1.7. Principe de la recherche de MPP

Vu que le point de puissance maximale dépend du niveau d'ensoleillement et de la température, il n'est jamais fixe et donc il faut un moyen pour le poursuivre au cours du temps. Pour cela, des convertisseurs MPPT sont utilisés. Ces derniers sont des convertisseurs de puissance équipés de commandes MPPT.

De ce fait, l'étage d'adaptation de la figure 1.20 comporte une commande appelée MPPT (Maximum Power Point Tracking) qui recherche automatiquement le point de puissance maximum (MPP) du générateur.

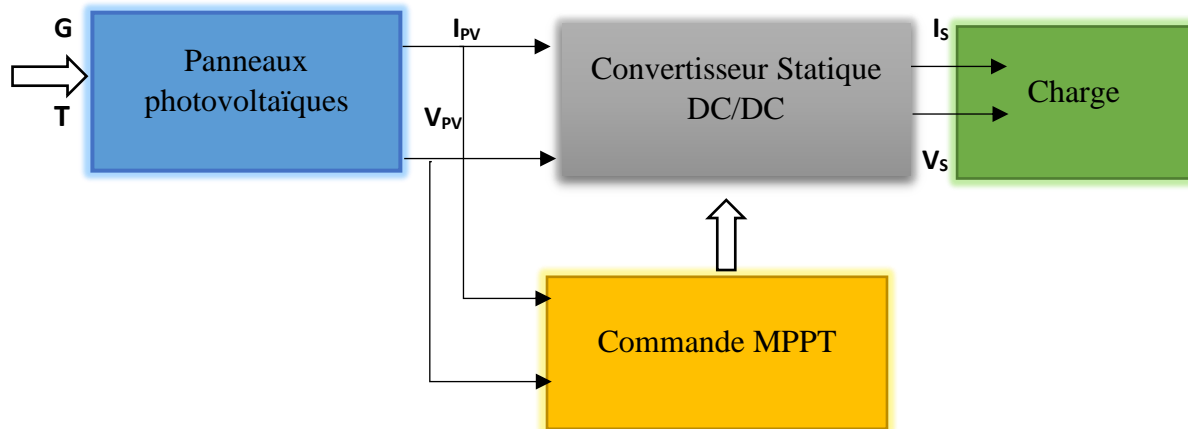


Figure 1. 20. Schéma synoptique du principe de convertisseur MPPT.

Le principe de cette commande est basé sur la variation automatique du rapport cyclique D du convertisseur de façon à amener le point de fonctionnement du générateur à sa valeur optimale de puissance. [11]

D'un point de vue algorithmique, le problème de la recherche du point MPP peut être vu comme étant un problème d'optimisation d'une fonction continue $P = f(V)$ et dont f peut varier au cours du temps selon les conditions climatiques, donc l'algorithme employé doit poursuivre le point MPP au cours du temps.

Plusieurs algorithmes sont proposés dans la littérature, dans le prochain chapitre, nous allons présenter et étudier les algorithmes de commande les plus populaires.

1.8. Conclusion

Ce chapitre présente une introduction aux termes et concepts généraux liées au domaine du photovoltaïque et le principe de conversion de l'énergie solaire en électricité à travers l'effet photovoltaïque. Il décrit l'architecture des systèmes photovoltaïques, le rôle et les caractéristiques de chaque composant dans cette architecture et principalement les cellules photovoltaïques. Finalement, les effets des variations des conditions climatiques sur le fonctionnement de ces systèmes sont décrits. Cela nous a menés aux principes de recherche du point de puissance maximum MPP utilisées pour une meilleure conversion de l'énergie solaire.

Chapitre 2

Les méthodes de poursuite du point de
puissance maximale MPP

état de l'art

2.1. Introduction

La commande MPPT, Maximum Power Point Tracking, est une commande essentielle pour un fonctionnement optimal du système photovoltaïque.

Comme mentionné précédemment, le principe de cette commande, est basé sur la variation automatique du rapport cyclique D du convertisseur en l'amenant à la valeur optimale de manière à maximiser la puissance délivrée par le panneau PV.

Plusieurs algorithmes ont été proposés par la communauté scientifique pour résoudre cette problématique. Allant des méthodes simples, aux méthodes plus performantes utilisant des algorithmes complexes pour le calcul du point de puissance maximale.

Dans ce qui suit, en premier lieu, nous allons introduire les critères de sélections d'une commande MPPT. Par la suite, nous allons présenter de manière générale quelques commandes MPPT utilisées dans la littérature pour la poursuite du MPP d'un module PV.

2.2. Critères de sélection d'une commande MPPT

Vu le nombre de méthodes pour la poursuite du MPP existantes, il n'est pas évident de décider quelle méthode choisir. De ce fait, lors de la sélection d'une méthode MPPT, les critères ci-dessous doivent être pris en considération.

- **La mise en œuvre**

La facilité de mise en œuvre est un facteur important pour décider quelle technique MPPT utiliser. Certaines techniques sont facilement mises en œuvre sans nécessiter d'ajustement ou d'étalonnage sur site. D'autres techniques sont plus complexes et leur étalonnage varie selon l'emplacement du site et les conditions climatiques.

- **Capteurs**

Le nombre de capteurs requis pour mettre en œuvre les MPPT affecte également le processus de décision. Afin de suivre la puissance maximale, il est nécessaire que le tracker connaisse les entrées PV (Irradiance et Température) et les sorties PV (Tension et Courant). Donc, quatre capteurs sont nécessaires. Cependant, certains MPPT utilisent des techniques pour réduire le nombre de capteurs.

- **Efficacité**

L'efficacité du tracker est associée à la précision de poursuite des MPP en un minimum de temps. Certaines méthodes MPPT oscillent autour du MPP en raison de ses techniques d'essai pour rechercher la puissance maximale, ce qui diminue l'efficacité de l'ensemble du système PV.

- **Coût**

Le coût d'un dispositif de poursuite dépend des caractéristiques du système, de son coût matériel, de la complexité de la programmation requise et du nombre de capteurs. Habituellement, le coût des systèmes analogiques est moins cher que les systèmes numériques et ceux qui sont basés sur un microprocesseur ou sur FPGA.

- **Application**

Lors de l'étude des méthodes de poursuite, l'accent est mis souvent sur le contrôle de poursuite lui-même et oublie l'effet de la maximisation de la puissance sur le matériel environnemental dans lequel le PV est connecté. Habituellement, un système PV comprend des batteries dans lesquelles les spécifications de charge et de décharge doivent être prises en compte. Ainsi, le type de batteries, les techniques de charge et les cycles, doivent être pris en compte dans le choix de la technique MPPT.

2.3. Méthodes de poursuite du point de puissance maximale MPPT

Il existe plusieurs méthodes de poursuite du point de puissance maximale qui sont classées selon le type d'implémentation électronique. Au départ, les méthodes

conventionnelles ont été les plus utilisées parce qu'elles résolvaient le problème de poursuite d'une manière générale, mais avec l'avancement technologique, ces méthodes sont devenues pratiquement obsolètes parce qu'elles ont prouvé des inconvénients lors de la recherche du MPP. Ces méthodes présentent soit des perturbations, ou des difficultés pour la dérivation de puissance, ou encore ne prend pas en considération les changements climatiques. Alors, les chercheurs se sont orientés vers de nouvelles méthodes à travers l'intégration de l'intelligence artificielle pour résoudre les problèmes rencontrés.

Dans ce qui suit, nous allons présenter de manière générale quelques commandes MPPT utilisées dans la littérature pour la poursuite du MPP d'un module PV.

2.3.1. Méthodes conventionnelles

Plusieurs méthodes conventionnelles existent dans la littérature. Parmi les méthodes les plus utilisées, nous pouvons citer :

- Perturbation et Observation (P&O, Perturb and Observe) [12, 13,14],
- Conductance Incrémentale (IncCond, Incremental Conductance) [12, 13,14],
- Algorithme à base de la mesure d'une fraction de la tension V_{OC} [15,16],
- Algorithme à base de la mesure d'une fraction du courant I_{cc} [17,18] ;

Nous allons présenter dans ce qui suit, deux des méthodes les plus utilisées.

2.3.1.1. L'algorithme MPPT de perturbation et observation

L'algorithme P&O est sans doute le plus simple à implémenter dans les systèmes PV. De plus, c'est la méthode la plus utilisée.

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 de puissance maximale, 'MPP' et la variation du rapport cyclique est maintenue dans le même sens. Au contraire, si la puissance diminue, on s'éloigne du point de puissance maximale, 'MPP'. Alors, on doit inverser le sens de la variation du rapport cyclique. [11]

La figure.2.1 illustre l'organigramme.

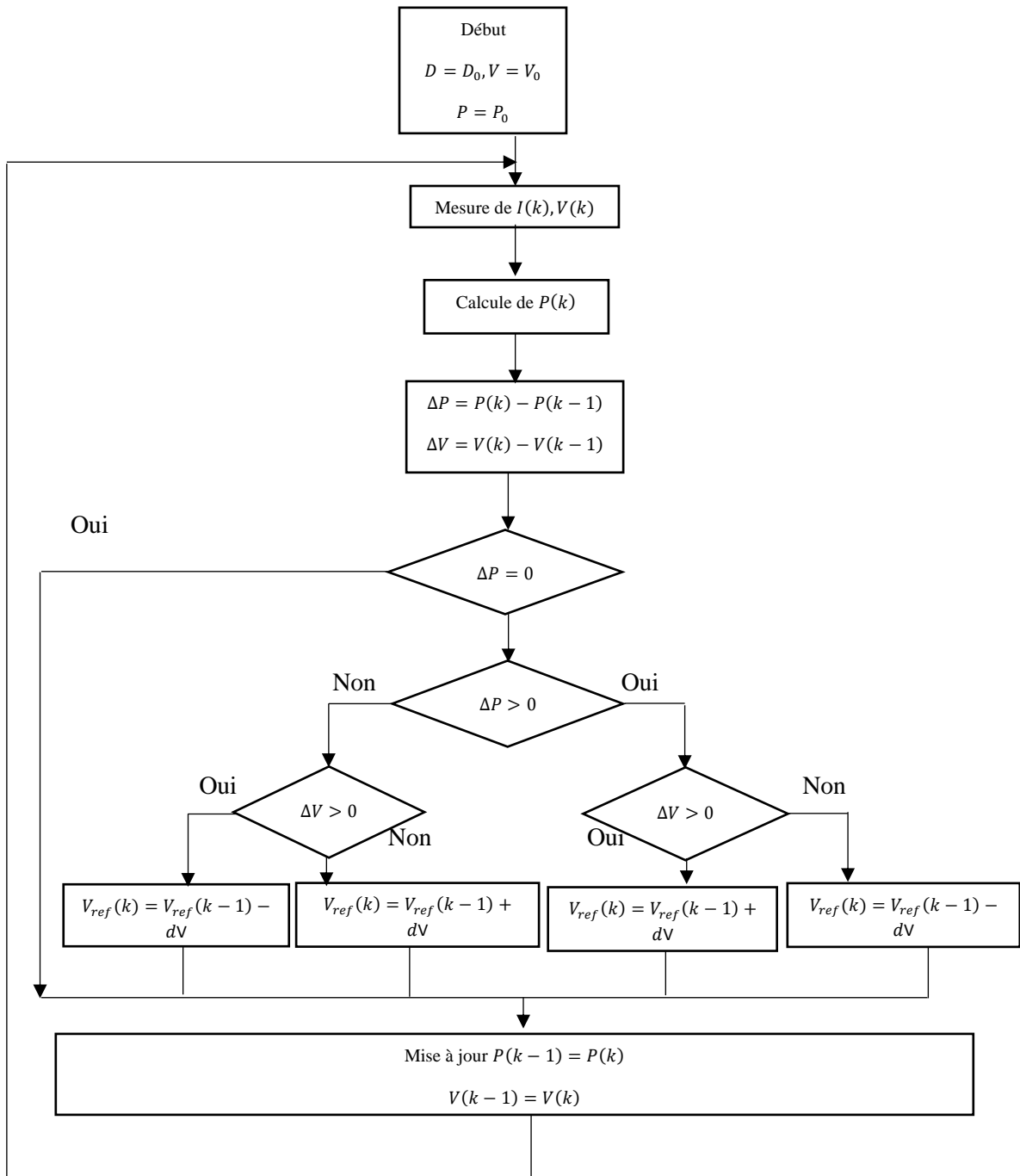


Figure 2. 1. Organigramme de l'algorithme P&O.

2.3.1.2. Algorithme Incrément de la conductance INC

Le principe de cet algorithme est basé sur la connaissance de la valeur de la conductance

$G = \frac{I}{V}$ et sur l'incrément de la conductance dG pour en déduire la position du point de fonctionnement par rapport au point de puissance maximale, 'MPP'. Si l'incrément de la conductance (dG) est supérieur à l'opposé de la conductance (G), on diminue le rapport cyclique. Par contre, si l'incrément de conductance est inférieur à l'opposé de la conductance, on augmente le rapport cyclique. Ce processus est répété jusqu'à atteindre le point de puissance maximale, 'MPP'. [11]

La figure.2.2 illustre l'organigramme.

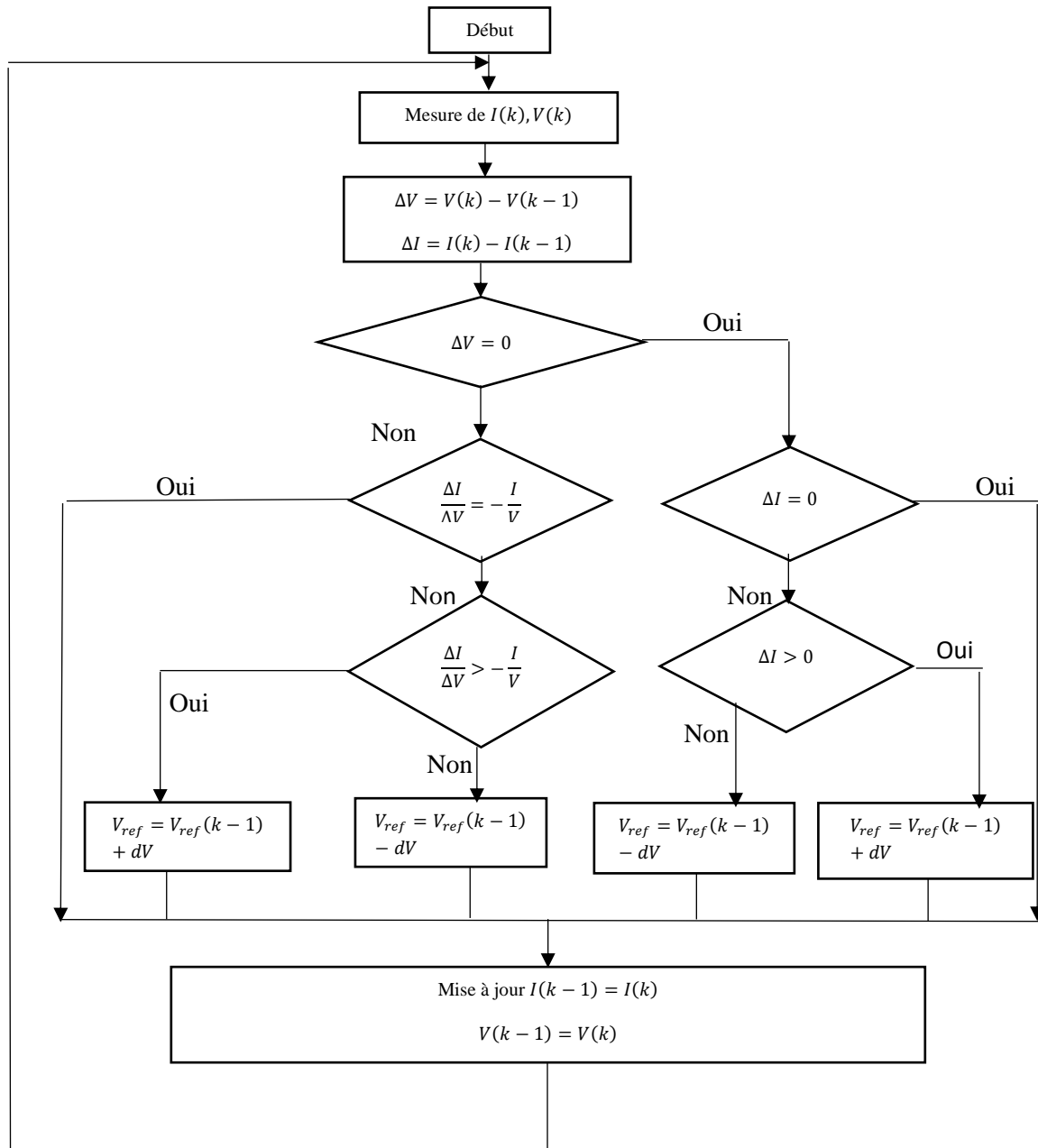


Figure 2. 2. Organigramme de l'algorithme INC.

Malgré la simplicité des méthodes conventionnelles pour la recherche du point MPP, elles présentent, en général, plusieurs inconvénients majeurs, dont :

- Le problème des maxima locaux. En effet, ces méthodes ne font une recherche que sur une zone particulière de l'espace de recherche, c'est pourquoi elles sont juste adaptées au cas où la courbe P-V présente un seul pique. Cela n'est pas le cas dans la réalité où il y a souvent des ombrages partiels qui provoquent plusieurs pics dans la courbe P-V ;

- L'oscillation permanence des méthodes autour du point MPP.

Afin de palier à ces problèmes, comme mentionné précédemment, les méthodes SC sont proposées. Dans ce qui suit, nous allons présenter ces dernières.

2.3.2. Les méthodes Soft Computing

Les méthodes soft-computing sont des méthodes intelligentes relativement nouvelles pour l'optimisation de puissance. Ces dernières regroupent les méthodes d'Intelligence Artificielle (IA) et les méthodes bio inspirées, introduite comme des approches alternatives aux techniques conventionnelles. La figure ci-dessous illustre une classification des méthodes soft computing.

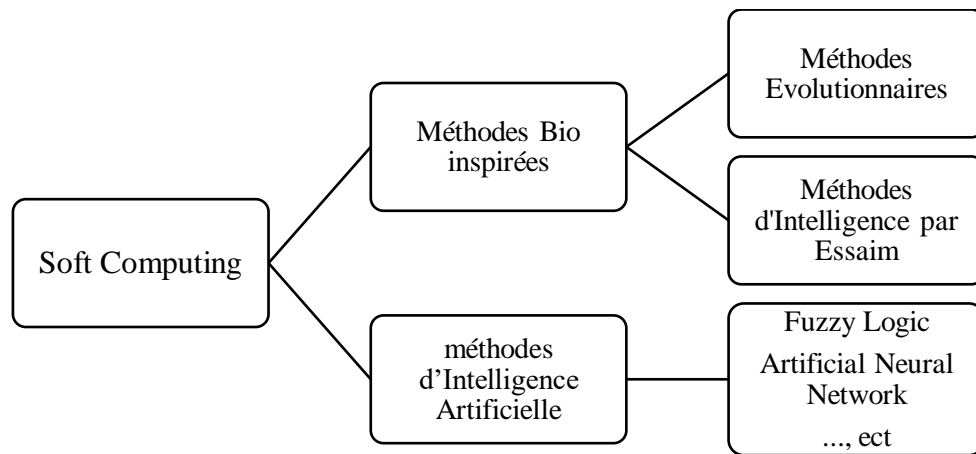


Figure 2. 3. Classification des méthodes Soft-Computing.

Comme l'illustre la figure ci-dessus, les techniques soft computing regroupent un certain nombre de méthodes, allant des celles à base d'intelligence artificielle, tel que les réseaux de neurone, la logique floue, les algorithmes hybrides, etc... jusqu'aux méthodes nouvellement introduites, à savoir les méthodes bio inspirées.

Ces dernières ont connu un engouement de la part de la communauté scientifique. Dans ce qui suit nous allons donner un bref aperçu des méthodes MPPT existantes, conçues autour des réseaux de neurones et de la logique floue. Par la suite, nous allons introduire le nouveau concept du bio inspiré.

2.3.3.1. Les méthodes d'intelligence artificielle

Il ressort de la littérature plusieurs travaux de recherches relatifs aux méthodes MPPT à base d'intelligence artificielle.

Parmi ces derniers, les plus utilisés dans le cadre de la recherche du MPP, nous pouvons citer :

- Les Réseaux de Neurones Artificiels [19, 20,21],
- Fuzzy Logic Controller (FLC_MPPT) [22,23],
- Les Algorithmes Génétiques combinée avec la Logique Floue (GA_FLC_MPPT), [24], ou avec les Réseaux de Neurones Artificiels (GA_ANN_MPPT) [25] ;

2.3.3.1.1. Algorithme à base de la logique floue

La commande à base de la logique floue a été utilisée dans les systèmes de poursuite du point de puissance maximale. Cette commande offre l'avantage d'être une commande robuste et qui ne nécessite pas la connaissance exacte du modèle mathématique du système.

Le principe du contrôleur utilisant la logique floue se base généralement sur deux variables d'entrées qui sont l'erreur (E), la variation d'erreur (ΔE) et une variable en sortie (ΔD), correspondant à la variation du rapport cyclique qui contrôle le signal de commande du convertisseur statique pour la recherche du MPP.

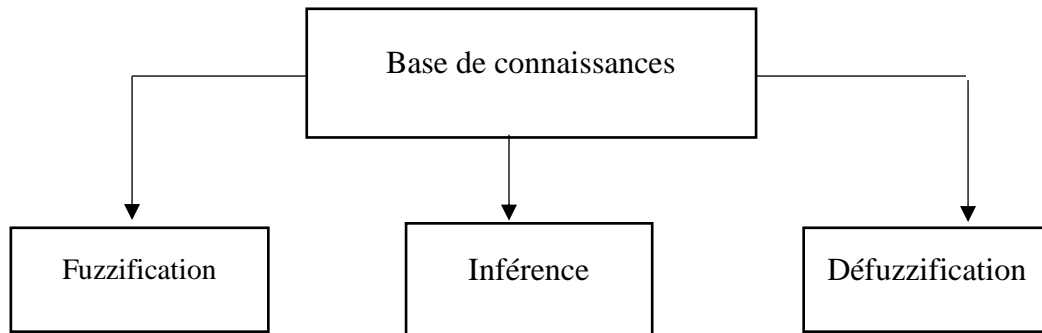


Figure 2. 4. Schéma bloc de l'algorithme à base de la logique floue.

En particulier, cette commande est mieux adaptée aux systèmes non linéaires. Le fonctionnement de cet algorithme se fait en trois blocs (Figure 2.4) :

- La fuzzification,
- L'inférence,
- La défuzzification.

La fuzzification permet la conversion des variables physiques d'entrée en ensembles flous. Dans notre cas, nous avons deux entrées,

- L'erreur
- La variation de l'erreur

On attribue à ces grandeurs des variables linguistiques :

NB (Negatif Big), NS (Negatif Small), ZE (Zéro), PS (Positif Small), et PB (Positif Big).

Dans l'étape d'inférence, on prend des décisions. En effet, on établit des relations logiques entre les entrées et la sortie tout en définissant les règles d'appartenance. Par la suite, on dresse le tableau de règles d'inférence.

Finalement, en défuzzification, on convertit les sous-ensembles flous de sortie en une valeur numérique.

2.3.3.1.2. Réseau de neurones artificiels ANN

Les méthodes à base de réseaux de neurones artificiels ont été considérées comme étant des candidats pour la recherche du MPP en raison des nombreux avantages qu'ils offrent par rapport aux techniques conventionnels. Ils règlent certains problèmes que les méthodes conventionnelles n'ont pas atteint, tel que la vitesse, la précision ou l'efficacité souhaitées.

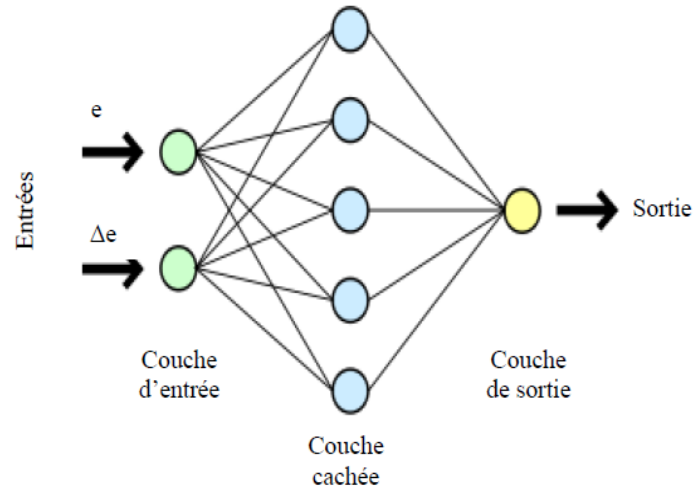


Figure 2. 5. La configuration ANN permettant de déterminer le rapport cyclique au MPP.

Dans la plupart des contrôleurs développés et cités dans le cadre d'optimisation de puissance basé sur ces méthodes, les variables d'entrée du réseau neuronal sont les paramètres du module PV : tension V_{oc} , courant I_{sc} , température et éclairage. La variable de sortie est le rapport cyclique, qui est utilisé afin de forcer le convertisseur de puissance à fonctionner près de MPP. [26]

De par les différents travaux relatifs aux réseaux de neurones artificiels, l'avantage de ces méthodes réside dans le fait que le réseau neuronal formé ne nécessite pas une connaissance approfondie sur les paramètres du PV. Comme, les caractéristiques des PVs dépendent de chaque constructeur, cela implique que le réseau de neurones doit subir un apprentissage afin de garantir un suivi précis du MPP. Ce qui constitue une contrainte majeure. De même que pour les méthodes à base de logique floue, ou le concepteur doit connaître les règles d'inférences, ce qui constitue aussi une contrainte.

De plus ces méthodes sont très gourmandes en calcul intensif. Constituant ainsi un inconvénient majeur pour ces derniers. Ceci a poussé la communauté scientifique à proposer de nouvelles méthodes intelligentes afin de surmonter les limitations des méthodes intelligentes artificielles traditionnelles. Ces méthodes se basent sur le concept du bio inspiré. Dans ce qui suit, nous allons nous intéresser à ses nouvelles méthodes.

2.3.3.2. Les méthodes bio inspirées

Au cours des dernières décennies, de nombreux chercheurs ont accordé plus d'attention aux algorithmes bio-inspirés grâce à leurs capacités de donner des solutions optimales aux problèmes d'optimisation tout en maintenant un équilibre parfait entre les composants.

Ces méthodes sont basées sur l'amélioration itérative d'une population de solutions ou une solution unique (par exemple, Tabu Search) et utilisent principalement la randomisation et la recherche locale pour résoudre un problème d'optimisation donné. [27]

Comme l'illustre la figure 2.6, les deux classes les plus prédominantes des algorithmes bio-inspirés sont les algorithmes évolutifs et les algorithmes basés sur l'intelligence en essaim [28]. Ces algorithmes sont issus de l'étude de l'évolution naturelle et du comportement en essaim des êtres vivants.

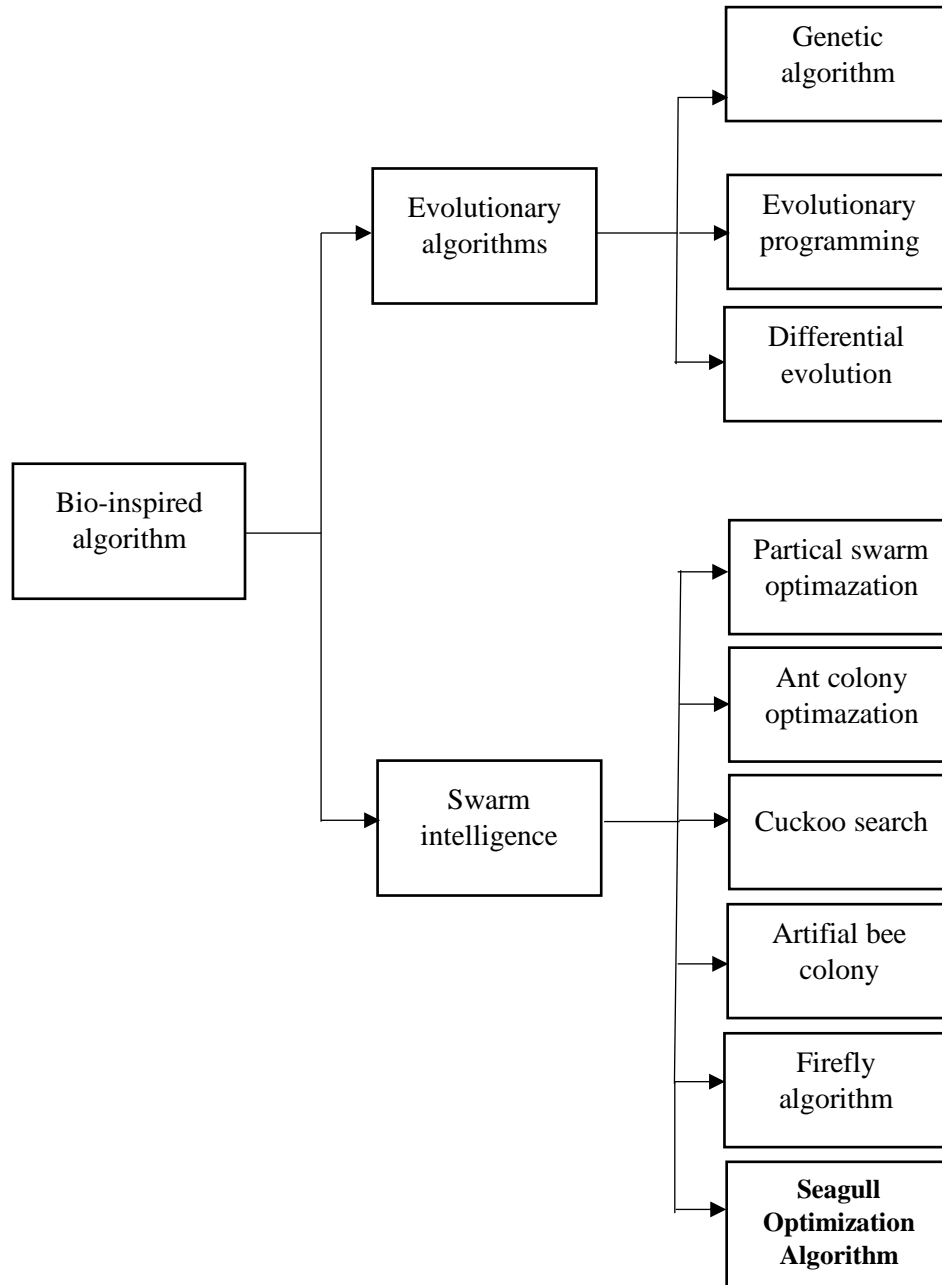


Figure 2. 6. Méthodes bio-inspirées utilisées avec les techniques MPPT dans un système PV.

Étant donné que le problème de poursuite MPP dans un système PV peut être modélisé comme un problème d'optimisation dynamique et multimodal, les méthodes bio-inspirées sont envisagées pour être très efficaces pour traiter la courbe caractéristique P-V dans des conditions d'ombrage partiel. Car ils traitent correctement les problèmes d'optimisation non linéaire et stochastique et montrent des performances excellentes sans

impliquer des calculs mathématiques lourds, ce qui se traduit par une simplicité de calcul, une compréhension facile, une fiabilité et une réponse rapide.

Au vu des avantages tirés des méthodes *Bio Inspirée*, et de l'engouement de la part de la communauté scientifique, ces derniers ont un avenir prometteur dans le domaine des énergies renouvelable, vu le nombre de travaux existant qui reste toujours en dessous.

Parmi les contrôleurs conçus à base d'algorithmes bio inspirés, nous pouvons citer :

- Contrôleur MPPT à base de l'algorithme Ant Colony Algorithm (ACO) [29],
- Contrôleur MPPT à base de l'algorithme Particle Swarm Optimization (PSO) [30],
- Contrôleur MPPT à base de l'algorithme Artificial Bee Colony (ABC) [31],
- Contrôleur MPPT à base de l'algorithme Cuckoo Search Algorithm (CSA) [32],
- Contrôleur MPPT à base de l'algorithme Firefly Algorithm (FA) [33],
- Contrôleur MPPT à base de l'algorithme Bat Swarm Optimization Algorithm (BSO) [26],
- Contrôleur MPPT à base de l'algorithme Flower Pollination Algorithm (FPA) [26],
- Contrôleur MPPT à base de l'algorithme Gray Wolf Optimization (GWO) [26],
- Contrôleur MPPT à base de l'algorithme Generalized Pattern Search (GPS) [26],
- Contrôleur MPPT à base de l'algorithme Shuffled Frog Leaping Algorithm (SFL) [26] ;

Au travers des différents travaux proposés dans la littérature sur les contrôleurs MPPT conçu autour de méthodes bio inspirées, et au vu des avantages de ces méthodes, cela nous a motivé à proposer dans le cadre de notre PFE, une nouvelle technique bio inspirées qui s'inspire du comportement des mouettes **Seagull Optimization Algorithm (SOA)** à travers la mise en œuvre de son modèle mathématique pour trouver le point de puissance maximale d'un générateur photovoltaïque.

Le prochain chapitre portera sur l'étude de cet algorithme.

2.4. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté une étude Bibliographique sur les différents algorithmes de maximisation conventionnelles qui ne sont efficaces que lorsque le rayonnement solaire est uniforme.

Dans le cas d'ombrage partiel, des méthodes avancées de poursuite ont été développées pour détecter le maximum global. Ces méthodes peuvent être répertoriées en deux catégories : les méthodes d'intelligence artificielle et les méthodes méta-heuristiques.

A la fin de ce chapitre nous avons proposé une nouvelle méthode métaheuristique **Seagull Optimization Algorithm (SOA)** pour la commande MPPT.

Chapitre3

Méthodes bio inspirées pour la recherche du
point de puissance maximale

3.1. Introduction

Dans le chapitre précédent, nous avons abordé les différentes méthodes utilisées dans la recherche du point de puissance maximale dans un système photovoltaïque. Nous avons proposé l'algorithme bio-inspiré inspiré des mouettes, Seagull Optimisation Algorithm, SOA pour l'implémentation d'un contrôleur MPPT.

Au cours de ce chapitre nous allons présenter les concepts de base liés à l'algorithme SOA, décrire le modèle mathématique ainsi que les différentes étapes liées à l'algorithme.

De plus, dans le but de comparer les performances du contrôleur proposé, nous avons choisi d'étudier et de développer un contrôleur intelligent conçu autour de l'algorithme PSO. Toutes les étapes de ce dernier seront présentées.

3.2. Concept de base de l'algorithme d'optimisation Seagull (SOA)

3.2.1. Paradigme biologique [24]

L'algorithme SOA utilise une population de candidatures de solutions pour développer une solution optimale au problème considéré. Il a été à l'origine inspiré par la vie artificielle et plus particulièrement par le comportement social des mouettes.

Généralement, les mouettes vivent en colonies. Ils utilisent leur intelligence pour trouver et attaquer la proie. La chose la plus importante sur les mouettes est leurs comportements de migration et d'attaque. La migration est définie comme le mouvement saisonnier des mouettes d'un endroit à un autre pour trouver les sources de nourriture les plus riches et les plus abondantes qui fourniront énergie adéquate.

Le comportement des mouettes est décrit comme suit :

- Pendant la migration, ils voyagent en groupe. Les positions initiales des mouettes sont différentes pour éviter les collisions entre elles.
- En groupe, les mouettes peuvent se diriger vers la direction de la meilleure mouette de survie la plus apte, c'est-à-dire une mouette dont la valeur de fitness est optimale par rapport aux autres.
- En fonction de la mouette la plus optimal, les autres mouettes peuvent mettre à jour leurs positions.

Les mouettes attaquent fréquemment les oiseaux migrateurs et les poissons au-dessus de la mer lorsqu'ils migrent d'un endroit à un autre. Ils peuvent faire leur mouvement spiral de forme naturel pendant l'attaque.



Figure 3. 1. Déplacement des mouettes.

Un modèle conceptuel de ces comportements est illustré à la figure3.2. Ces comportements peuvent être formulés de manière à pouvoir être associée à la fonction objective à optimiser.

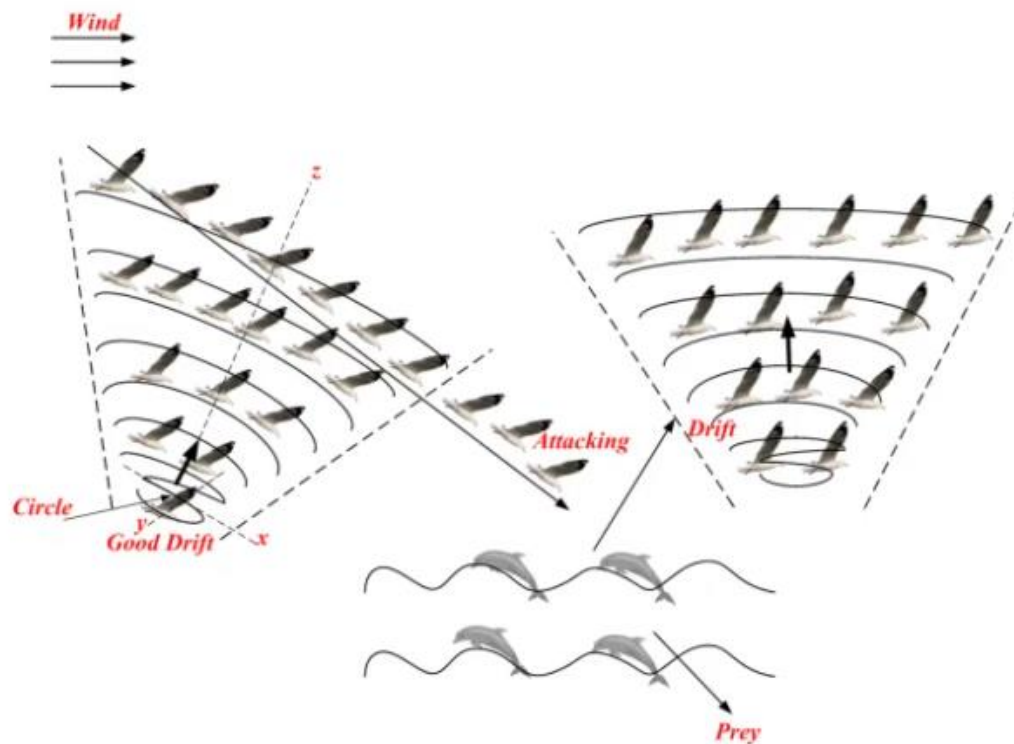


Figure 3. 2. Migration et comportements d'attaque des mouettes.

3.2.2. Les différentes étapes de l'algorithme [34]

Les étapes de l'algorithme sont discutées ci-dessous.

3.2.2.1. Position initiale

Pendant la migration, les mouettes voyagent en groupe. Les positions initiales des mouettes sont différentes pour éviter les collisions entre elles. L'évolution commence avec les individus générés aléatoirement à partir d'une population.

3.2.2.2. Migration (exploration)

Pendant la migration, l'algorithme simule la façon dont le groupe de mouettes se déplace d'une position à l'autre.

Au cours de cette phase, une mouette doit remplir trois conditions :

1. Éviter les collisions

Comme l'illustre la figure.3.3, afin d'éviter l'effet de la collision entre voisins (c.-à-d. des autres mouettes), une variable supplémentaire A est utilisée pour le calcul de la nouvelle position d'agent de recherche.

$$\vec{C}_s = A * \vec{P}_s(x) \quad (3.1)$$

Où :

- \vec{C}_s représente la position de l'agent de recherche qui n'entre pas en collision avec un autre agent de recherche,
- \vec{P}_s représente la position courante de l'agent de recherche,
- x indique l'itération actuelle,
- A représente le comportement de déplacement de l'agent de recherche dans un espace de recherche.

$$A = f_c - (x * (f_c / \text{Maxiteration})) \quad (3.2)$$

Où f_c est introduit pour contrôler la fréquence d'utilisation de la variable A qui est linéairement diminuée de f_c à 0.

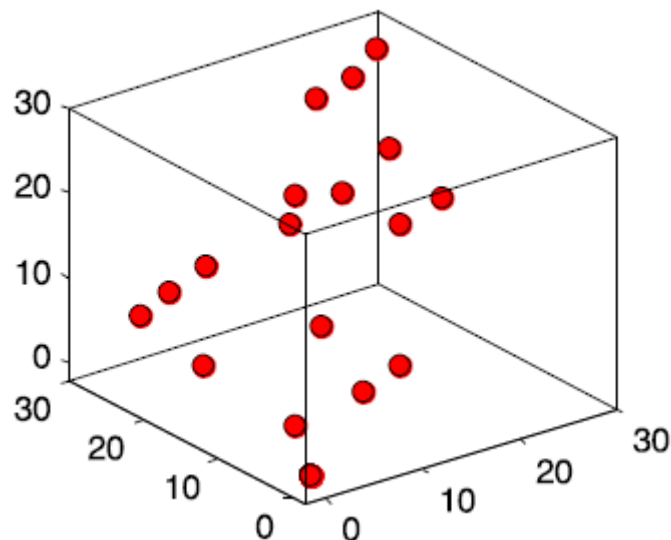


Figure 3. 3. Mouvement permettant d'éviter les collisions.

2. Mouvement vers la direction du meilleur voisin

Après avoir évité la collision entre voisins, les agents de recherche vont se diriger vers la direction du meilleur voisin.

$$\vec{M}_S = B * (\vec{P}_{bs}(x) - \vec{P}_s(x)) \quad (3.3)$$

Où :

\vec{M}_s représente la position de l'agent de recherche \vec{P}_s vers l'agent de recherche le mieux adapté \vec{P}_{bs} (c'est-à-dire la mouette la plus en forme).

Le comportement de B est randomisé, ce qui est responsable d'un bon équilibre entre exploration et exploitation. B est calculé comme suit :

$$B = 2 * A^2 * rd \quad (3.4)$$

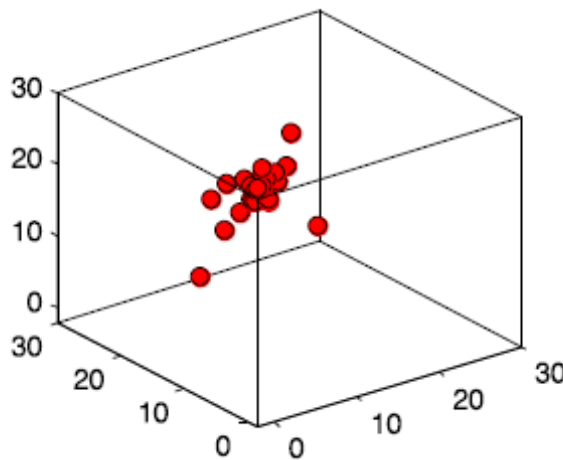


Figure 3. 4. Mouvement des agents de recherche vers le meilleur voisin.

3. Rester proche du meilleur agent de recherche

Enfin, comme l'illustre la figure.3.5, l'agent peut mettre à jour sa position par rapport au meilleur agent de recherche.

$$\vec{D}_S = \vec{C}_S + \vec{M}_S \quad (3.5)$$

Où \vec{D}_S représente la distance entre l'agent de recherche et l'agent de recherche le mieux adapté.

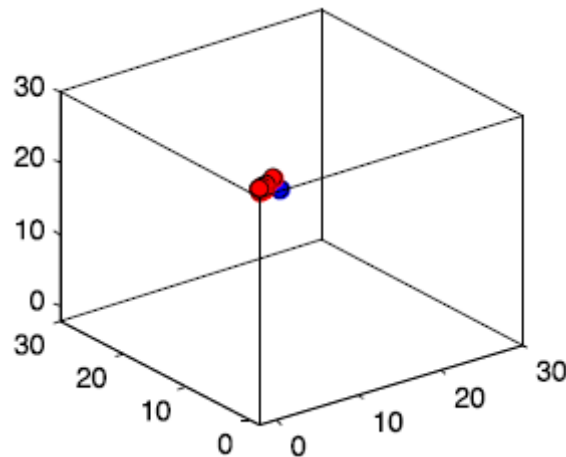


Figure 3. 5. Convergence vers le meilleur agent de recherche.

3.2.2.3. Attaque (exploitation)

L'exploitation vise à exploiter l'histoire et l'expérience du processus de recherche. Les mouettes peuvent modifier l'angle d'attaque en continu ainsi que la vitesse pendant la migration. Ils maintiennent leur altitude en utilisant leurs ailes et leurs poids. En attaquant la proie, le comportement de mouvement en spirale se produit dans l'air, tel qu'il est lustré par la figure.3.6. Ce comportement dans les plans x, y et z est décrit comme suit.

$$x' = r * \cos(k) \quad (3.6)$$

$$y' = r * \sin(k) \quad (3.7)$$

$$z' = r * k \quad (3.8)$$

$$r = u * e^{kv} \quad (3.9)$$

Où :

- r est le rayon de chaque tour de la spirale,
- k est un nombre aléatoire dans la plage $[0 \leq k \leq 2\pi]$.
- u et v sont des constantes pour définir la forme en spirale,
- e est la base du logarithme naturel.

La mise à jour de la position de l'agent de recherche est calculée à l'aide des équations. (3.5) - (3.9).

$$\vec{P}_S(x) = (D_S * x' * y' * z') + \vec{P}_{bs}(x) \quad (3.10)$$

Où $\vec{P}_S(x)$ enregistre la meilleure solution et met à jour la position des autres agents de recherche.

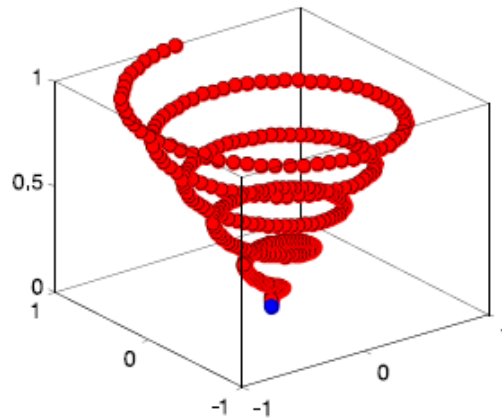


Figure 3. 6. Comportement d'attaque naturel de la mouette.

Ainsi, l'algorithme SOA proposé commence par une population qui est générée de façon aléatoire. Les agents de recherche peuvent mettre à jour leurs positions par rapport aux meilleurs agents de recherche pendant le processus d'itération. A est diminué linéairement de f_c à 0. Pour une transition en douceur entre l'exploration et l'exploitation, la variable B est responsable. Par conséquent, l'algorithme SOA est considéré comme optimiseur global en raison de sa meilleure exploration et la capacité d'exploitation.

3.2.3. Critères de convergence

Le critère d'arrêt indique que la solution est suffisamment proche de l'optimum. La sélection d'un bon critère a un rôle important pour assurer une convergence correcte de l'algorithme. Plusieurs critères d'arrêt du processus d'optimisation sont possibles. L'algorithme peut être arrêté lorsque l'objectif d'optimisation est atteint. En effet, dans certaines tâches d'optimisation, la valeur minimale de la fonction objective est déjà connue. Par exemple, des fonctions d'erreur pour lesquelles l'erreur tolérable est donnée ou des fonctions de test dont les minima sont connus. Si la valeur de la fonction objective du meilleur vecteur se situe dans une

tolérance spécifiée du minimum global, l'optimisation s'arrête. De plus, l'algorithme peut être arrêté après un nombre suffisant de générations pour l'espace de recherche à explorer correctement. Ce critère peut s'avérer coûteux en temps de calcul si le nombre de particules à traiter dans chaque population est important. L'algorithme peut également être arrêté lorsque la population ne se déplace pas assez vite.[35]

3.3. Application de l'algorithme SOA pour la commande MPPT

Les performances de l'algorithme SOA sont exploitées pour la conception d'un contrôleur MPPT. Ce dernier, prendra en charge la recherche du MPP dans le cas des conditions d'ombrage partiel, dans lequel la courbe P-V présente plusieurs MPP.

L'organigramme de la technique MPPT basée sur le SOA proposé est illustré en Figure3.7.

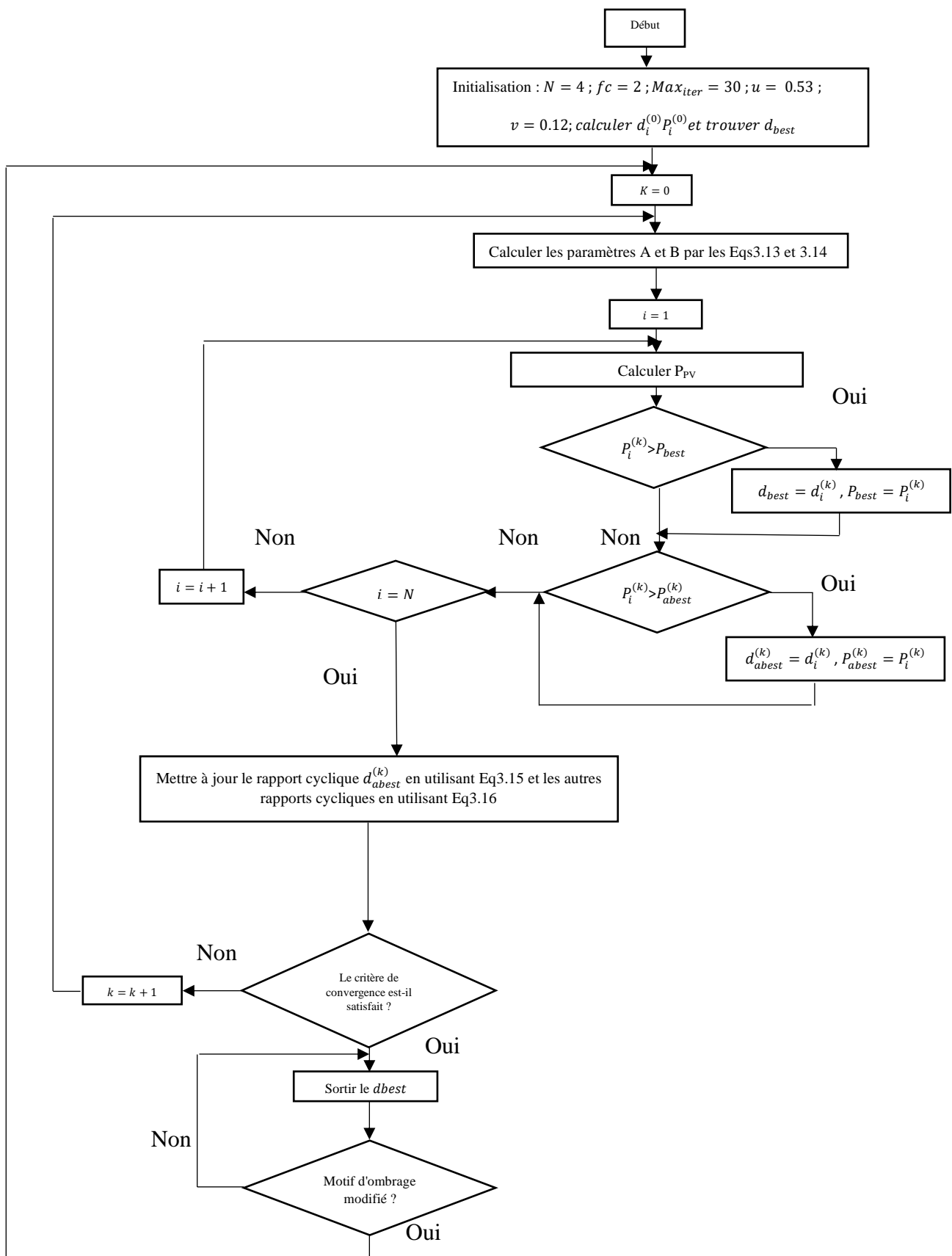


Figure 3. 7. Organigramme complet de la méthode SOA.

Le principe de fonctionnement de la méthode proposée est comme suit :

- **Étape1 : Initialisation**

Afin de démarrer l'optimisation, le rapport cyclique du signal PWM est choisi pour être la variable d'optimisation. Ainsi, il est ajusté directement par le contrôleur MPPT. Initialement, un vecteur de solution de rapports cycliques avec un nombre de N particules est défini. Le nombre de particules dans la population doit être choisi avec soin. Un plus grand nombre de particules permet une poursuite plus précise du MPP même sous des motifs d'ombrage compliqués mais la vitesse de poursuite diminue. À mesure que le nombre de particules augmente, le temps de calcul augmente également.

Par conséquent, la taille de la population doit être choisie de manière à garantir une bonne vitesse et précision de poursuite. Pour trouver un compromis, quatre particules sont considérées dans cette recherche.

Les particules SOA sont généralement initialisées de manière aléatoire dans l'espace de recherche.

$$d = d_i = (d_1, d_2, d_3, d_4) \quad (3.11)$$

Le but du processus d'optimisation est la maximisation de la puissance extraite du système PV, qui est définie comme étant la fonction objectif (P). La fonction d'évaluation de la valeur de fitness est définie comme :

$$P(d_i^k) > P(d_i^{k-1}) \quad (3.12)$$

- **Étape 2 : mise à jour du meilleur rapport cyclique global**

Le meilleur rapport cyclique global, d_{best} , est déterminé en comparant les valeurs de fitness de la population réelle avec la meilleure puissance PV globale obtenue, P_{best} .

- **Étape 3 : mise à jour des paramètres**

A chaque itération les paramètres A et B sont mises à jour en utilisant les équations :

$$A = f_c - (k * (f_c / \text{Maxiteration})) \quad (3.13)$$

$$B = 2 * A^2 * rd \quad (3.14)$$

Où f_c est introduit pour contrôler la fréquence d'utilisation de la variable A qui diminue linéairement de f_c à 0 et k indique l'itération actuelle.

- **Étape 4 : Mettre à jour la position de chaque particule**

Après le processus d'évaluation, les positions de chaque particule dans l'essaim sont mises à jour pour chaque itération.

Pour chaque itération l'algorithme fait ressortir le rapport cyclique d_{abest}^k qui correspond à une meilleure valeur de puissance par rapport aux autres rapports cycliques et mise à jour sa valeur par l'équation :

$$d_{abest}^k = d_{abest}^{k-1} * (1 + 0.005 * (2 * Bd - 1)) \quad (3.15)$$

Bd : Un nombre aléatoire qui prend une valeur de zéro ou un.

Les autres rapports cycliques ce sont mis à jour en utilisant les équations suivantes :

$$d_i^k = (D_S * x' * y' * z') + d_{best} \quad (3.16)$$

$$D_S = A * d_i^{k-1} + B * (d_{best} - d_i^{k-1}) \quad (3.17)$$

$$x' = r * \cos(\varphi) \quad (3.18)$$

$$y' = r * \sin(\varphi) \quad (3.19)$$

$$z' = r * \varphi \quad (3.20)$$

$$r = u * e^{\varphi v} \quad (3.21)$$

r : est le rayon de chaque tour de la spirale.

φ : est un nombre aléatoire dans la plage $[0 \leq \varphi \leq 2]$.

u, v : des constantes pour définir la forme en spirale, et e est la base du logarithme naturel.

- **Étape 5 : Critère de convergence**

L'algorithme continue de calculer les nouveaux rapports cycliques jusqu'à la satisfaction de la contrainte de convergence. Si la différence absolue entre chacun des deux rapports cycliques différents est inférieure à un seuil Δd , alors l'algorithme arrête le processus d'optimisation et fait ressortir d_{best} :

$$|d_i^k - d_j^k| > \Delta d \quad (3.22)$$

- **Étape 6 : Réinitialisation**

En raison des conditions météorologiques et de charges variables, le MPP global est généralement en train de changer.

L'algorithme MPPT devrait avoir la capacité de détecter la variation du motif d'ombrage et de rechercher le nouveau MPP global. Dans ce mémoire, le processus de recherche est initialisé si la condition suivante est remplie :

$$\frac{P_{PVnew} - P_{PVlast}}{P_{PVlast}} > \Delta P \quad (3.23)$$

Où P_{PVnew} et P_{PVlast} sont les valeurs de puissance du panneau photovoltaïque dans deux périodes d'échantillonnage successives et ΔP est la tolérance de puissance.

Comme mentionné précédemment, dans le but de comparer les performances du contrôleur proposé, dans ce qui suit, nous avons développé un contrôleur intelligent conçu autour de l'algorithme PSO.

3.4. Concept de base de l'algorithme PSO

PSO est un algorithme d'optimisation de l'intelligence en essaim développé par Eberhart et Kennedy en 1995[36]. Cet algorithme utilise une population de solutions candidates pour développer une solution optimale au problème considéré. Il a été à l'origine inspiré en général par la vie artificielle et plus particulièrement par le comportement social des animaux en essaim, comme le banc de poissons et le troupeau d'oiseaux. Il est considéré comme l'une des approches prometteuses pour la solution des problèmes d'optimisation globale. Dans cet algorithme, plusieurs agents coopératifs sont utilisés, et chaque agent échange des informations obtenues dans son processus de recherche respectif. Chaque agent, appelé particule, suit deux règles très simples, à savoir suivre la particule la plus performante et se diriger vers les meilleures conditions trouvées par la particule elle-même.



Figure 3. 8. Déplacement d'un essaim de poissons et d'oiseaux.

L'essaim de particules correspond à une population d'agents, appelés particules. Chaque particule est considérée comme une solution du problème et on lui attribue une position et une vitesse. De plus, chaque particule possède une mémoire qui lui permet de se souvenir de ses meilleures performances (en position et en valeur) et des meilleures performances réalisées par les particules voisines : chaque particule a un groupe d'informateurs, historiquement appelé son voisinage. La vitesse d'une particule est alors influencée par les trois composantes : une composante d'inertie, une composante cognitive et une composante sociale. Le premier décrit la tendance de la particule à suivre sa direction actuelle de déplacement. Le second représente la tendance de la particule à se déplacer vers la meilleure position par laquelle elle est déjà passée. La composante sociale caractérise la tendance de la particule à s'appuyer sur l'expérience de ses congénères et, ainsi, à se diriger vers le meilleur site déjà atteint par l'essaim. [35]

3.4.1. Les différentes étapes de l'algorithme PSO

L'algorithme PSO simule le déplacement d'une position à l'autre du groupe de particules. Il utilise un ensemble de solutions (particules) répartis dans l'espace de recherche

continue, en vue d'optimiser une fonction objective. Les différentes étapes de déplacement se fait comme suit :

- Initialiser chaque particule de la population en sélectionnant au hasard des valeurs pour son vecteur de position x_i et sa vitesse v_i .
- Répéter l'étape ;
- Calculer la valeur de fitness de chaque particule i ;
- Mettre à jour les meilleures positions locales pour chaque particule i ;
- Mettre à jour la meilleure position globale de l'essaim ;
- Calculer la vitesse et mettez à jour l'emplacement de chaque particule en utilisant les Eq. (3.24) et Eq. (3.25) ;
- Refaire les étapes jusqu'à ce que le critère d'arrêt soit satisfait.

$$v_i(k + 1) = wv_i(k) + c_1r_1.(p_{besti} - x_i(k)) + c_2r_2.(g_{best} - x_i(k)) \quad (3.24)$$

$$x_i(k + 1) = x_i(k) + v_i(k + 1) \quad (3.25)$$

Où

- x_i est la position de la particule i ;
- v_i est la vitesse de la particule i ;
- k désigne le numéro d'itération ;
- w est le poids d'inertie ;
- r_1 et r_2 sont des variables aléatoires uniformément réparties dans $[0,1]$;
- c_1, c_2 sont le coefficient cognitif et social, respectivement.

La variable p_{besti} , est utilisée pour stocker la meilleure position que la i ème particule a trouvé jusqu'à présent, et g_{best} est utilisé pour stocker la meilleure position de toutes les particules.

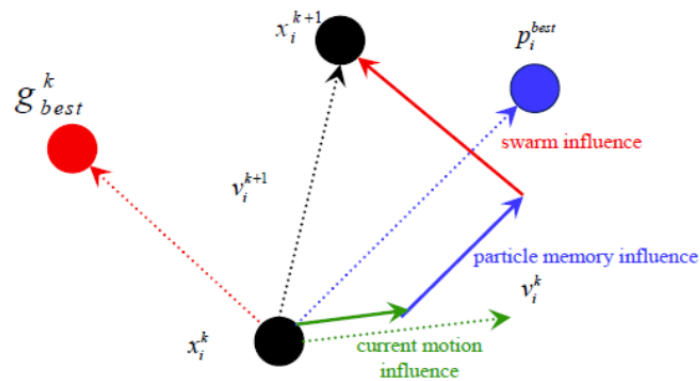


Figure 3. 9. Mouvement d'une particule PSO.

Les facteurs stochastiques permettent aux particules de se déplacer dans l'espace du problème de manière aléatoire. Cette propriété permet une exploration approfondie de l'espace de recherche et augmente la probabilité de trouver la meilleure solution avec une efficacité élevée.

3.5. Application de l'algorithme PSO dans une technique MPPT

Cette section décrit l'utilisation de la méthode PSO dans la résolution du problème lié au contrôleur MPPT dans un système PV.

L'organigramme de l'algorithme PSO pour la commande MPPT est illustré ci-dessous.

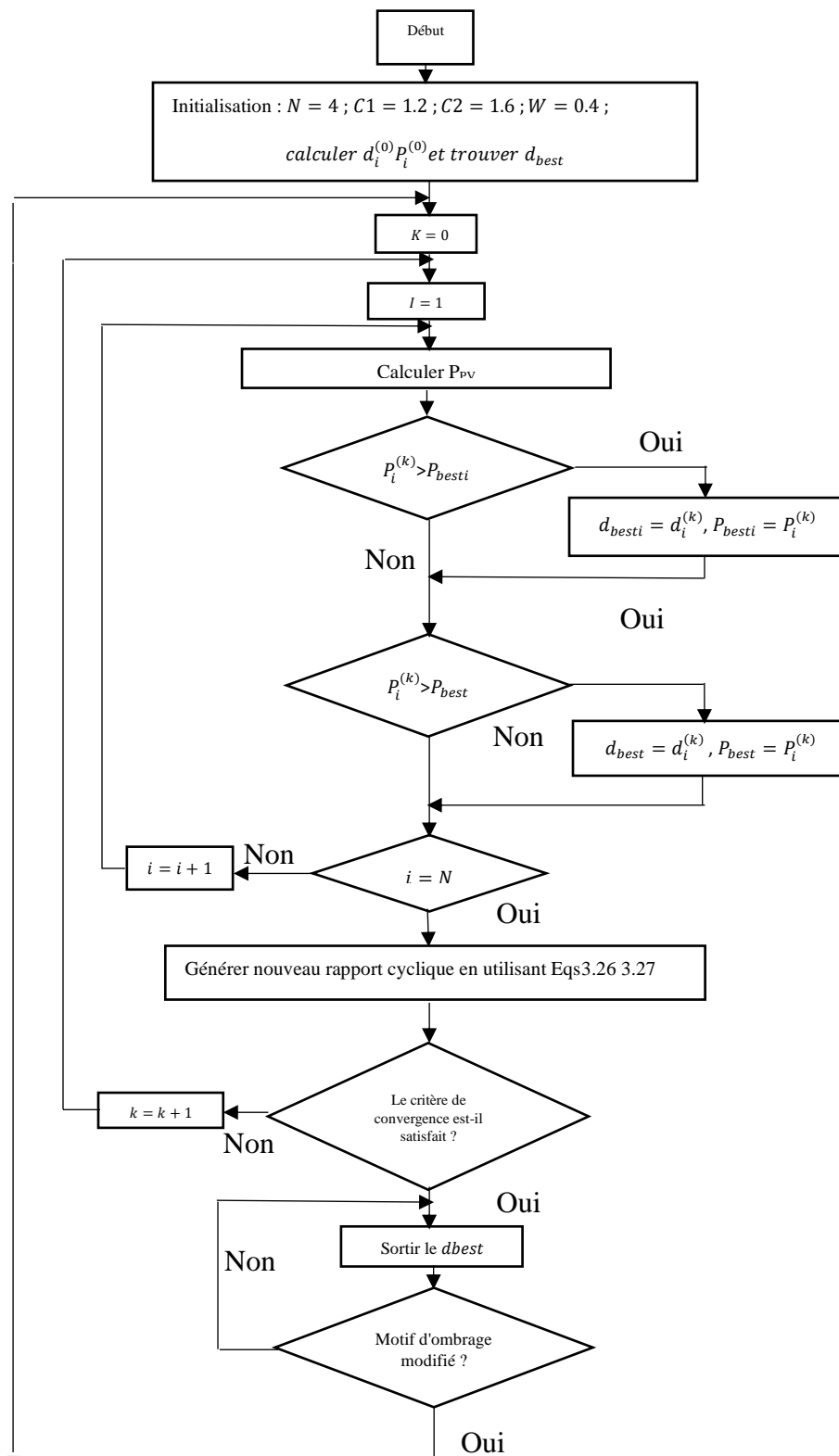


Figure 3. 10. Organigramme complet de la méthode PSO.

Le principe de fonctionnement de la méthode est comme suit :

- **Étape1 : Initialisation**

Initialement, un vecteur de solution de cycles d'utilisation avec un nombre de N particules est défini. Le nombre de particules dans la population doit être choisi avec soin. Un plus grand nombre de particules permet une poursuite plus précise du MPP même sous des motifs d'ombrage compliqués mais la vitesse de poursuite diminue. À mesure que le nombre de particules augmente, le temps de calcul augmente également. Par conséquent, la taille de la population doit être choisie de manière à garantir une bonne vitesse et précision de poursuite. Pour trouver un compromis, quatre particules sont considérées dans ce travail.

- **Étape 2 : mise à jour du meilleur rapport cyclique individuel et global**

Pour chaque rapport cyclique d_i , la puissance de sortie PV correspondante $P(d_i^k)$ est calculée en multipliant la tension mesurée (V_{PV_i}) et le courant (I_{PV_i}). Ensuite, l'algorithme vérifie si cette valeur de rapport cyclique se traduira par une meilleure valeur d'aptitude individuelle (par rapport à l'ancienne P_{besti}). Dans ce cas, la meilleure position personnelle (d_{besti}), ainsi que sa meilleure valeur de fitness individuelle correspondante P_{besti} , sont mises à jour ; sinon, P_{besti} conserve sa valeur actuelle. Le meilleur rapport cyclique de service global, d_{best} , est déterminé en comparant les valeurs de fitness de la population réelle avec la meilleure puissance PV globale obtenue, P_{best}

- **Étape 3 : Mettre à jour la position de chaque particule**

Après le processus d'évaluation, les vitesses et les rapports cycliques de chaque particule dans l'essaim sont mises à jour en utilisant les formules suivantes :

$$d_i^k = v_i(k+1) = wv_i(k) + c_1r_1 \cdot (d_{besti} - d_i(k)) + c_2r_2 \cdot (d_{best} - d_i(k)) \quad (3.26)$$

$$d_i(k+1) = d_i(k) + v_i(k+1) \quad (3.27)$$

- **Étape 4 : Critère de convergence**

Les critères de convergence sont soit la localisation vers une solution optimale, soit l'atteinte du nombre maximum d'itérations. Si le critère de convergence est satisfait, le processus se terminerait. L'algorithme PSO utilise la même condition de convergence que celle utilisée dans la technique MPPT basée sur l'algorithme SOA, illustrée par l'Eq (3.22).

- **Étape 5 : Réinitialisation**

Dans les systèmes PV, la valeur de fitness n'est pas constante car elle change avec les conditions météorologiques et la charge. Par conséquent, le PSO_MPPT doit être réinitialisé et rechercher le nouveau MPP lorsque la sortie du module PV a changé. Pour cette application, l'algorithme PSO proposé est réinitialisé chaque fois que la condition suivante est satisfaite :

$$\frac{P_{PVnew} - P_{PVlast}}{P_{PVlast}} > \Delta P \quad (3.28)$$

3.6. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons décrit les principes de base et les étapes de conception de deux contrôleurs MPPT. Le premier, à savoir, le contrôleur proposé basé sur l'algorithme SOA, ainsi que le second basé sur l'algorithme PSO développé afin de pouvoir le comparer avec le contrôleur proposé.

Dans le prochain chapitre, nous allons présenter l'implémentation de trois contrôleurs MPPT. L'un issue de méthodes conventionnelles à savoir le P&O, les deux autres des méthodes bio inspirées SOA et PSO. Ces techniques seront évaluées et comparées en termes de temps de convergence, précision et la capacité de traiter les conditions d'ombrage partiel (trouver le GMPP).

Chapitre4

Simulation des contrôleurs MPPT : Etude comparative

4.1. Introduction

Au cours de ce chapitre nous allons présenter les résultats de simulations de la commande de la recherche du point de puissance maximale proposée (SOA_MPPT), effectuée avec le logiciel Matlab/Simulink, la performance de la technique proposée sera discutée et comparée avec la technique (PSO_MPPT) en termes de temps de poursuite et de précision. Une comparaison sera présentée également avec la méthode P&O_MPPT en termes d'efficacité et de temps de convergence dans les conditions météorologiques standards et en termes de poursuite du GMPP dans les conditions d'ombrage partiel.

4.2. L'outil Matlab/Simulink

MATLAB fait partie d'un ensemble d'outils intégrés dédiés initialement au traitement du signal. En complément du noyau de calcul Matlab, l'environnement comprend des modules optionnels comme Simulink.

Simulink est une plate-forme de simulations multi-domaines 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. Identification des paramètres du système photovoltaïque

Le modèle Simulink/SimPower du système photovoltaïque proposé se compose d'un champ photovoltaïque de taille 5x1, un convertisseur de type buck-boost et une charge résistive.

Pour la simulation de cette partie, nous allons considérer le cas de 5 modules PV (KC200GT). Chaque module se compose de 54 cellules connectées en série protégées par une diode by-pass montée en antiparallèle.

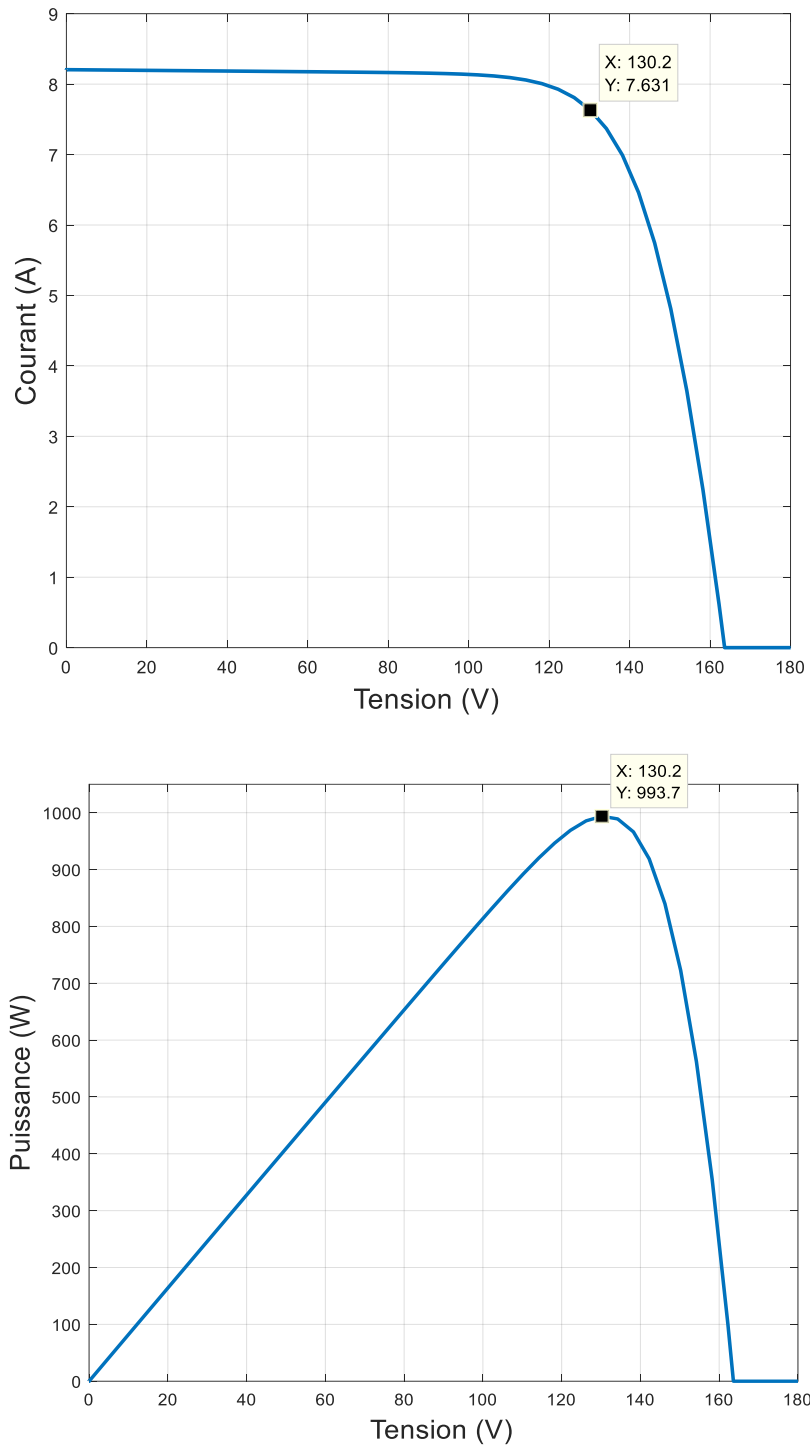


Figure 4. 1. Les caractéristiques courant-tension et puissance-tension du GPV dans les conditions standards.

Table 4. 1. Les caractéristiques du GPV.

Puissance maximal	$P_{max} = 993.74(W)$
Tension à puissance maximal	$V_{mpp} = 131.81(V)$
Courant à puissance maximal	$I_{mpp} = 7.54(A)$
Tension de circuit ouvert	$V_{co} = 163.61(V)$
Courant de court-circuit	$I_{cc} = 8.20(A)$

4.4. Influence de l'éclairement et de la température

L'effet de l'éclairement sur les caractéristiques, courant-tension (I-V) et puissance-tension (P-V), est illustré sur la figure 4.2. Comme il a été mentionné précédemment, le courant est directement proportionnel au niveau de l'éclairement. Une augmentation de l'éclairement conduit à une élévation du photo-courant généré. De plus, le courant de court-circuit est directement proportionnel au photo-courant généré, il est donc directement proportionnel à l'éclairement. En revanche, l'influence de l'éclairement sur la tension en circuit ouvert est relativement petite, car la dépendance du courant généré par la lumière est logarithmique.

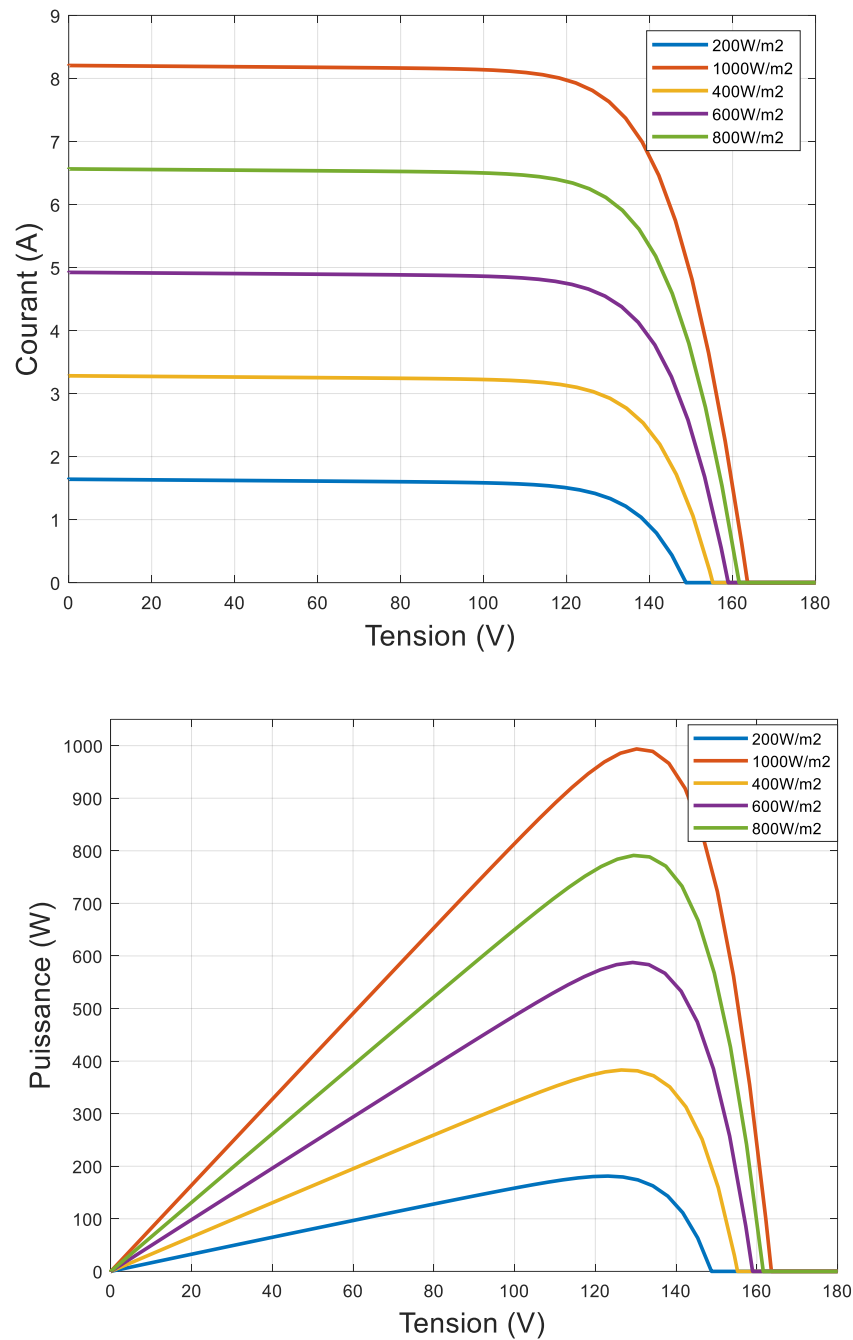


Figure 4. 2. Les caractéristiques courant-tension et puissance-tension du système PV sous variation uniforme de l'irradiance ($T=25^{\circ}$).

D'autre part, la température affecte principalement la tension du PV, La figure 4.3 montre comment les caractéristiques courant-tension- (I-V) et puissance-tension changent avec la température. Lorsque la température augmente, la tension de circuit ouvert diminue. Le courant augmente très peu avec la température mais il ne compense pas la baisse de tension provoquée. C'est pourquoi la puissance PV diminue également. Les fabricants de modules photovoltaïques fournissent dans leurs fiches techniques les coefficients de

température (KV et KI), qui sont les paramètres qui spécifient comment la tension en circuit ouvert, le courant de court-circuit et le maximum de la puissance varient lorsque la température change.

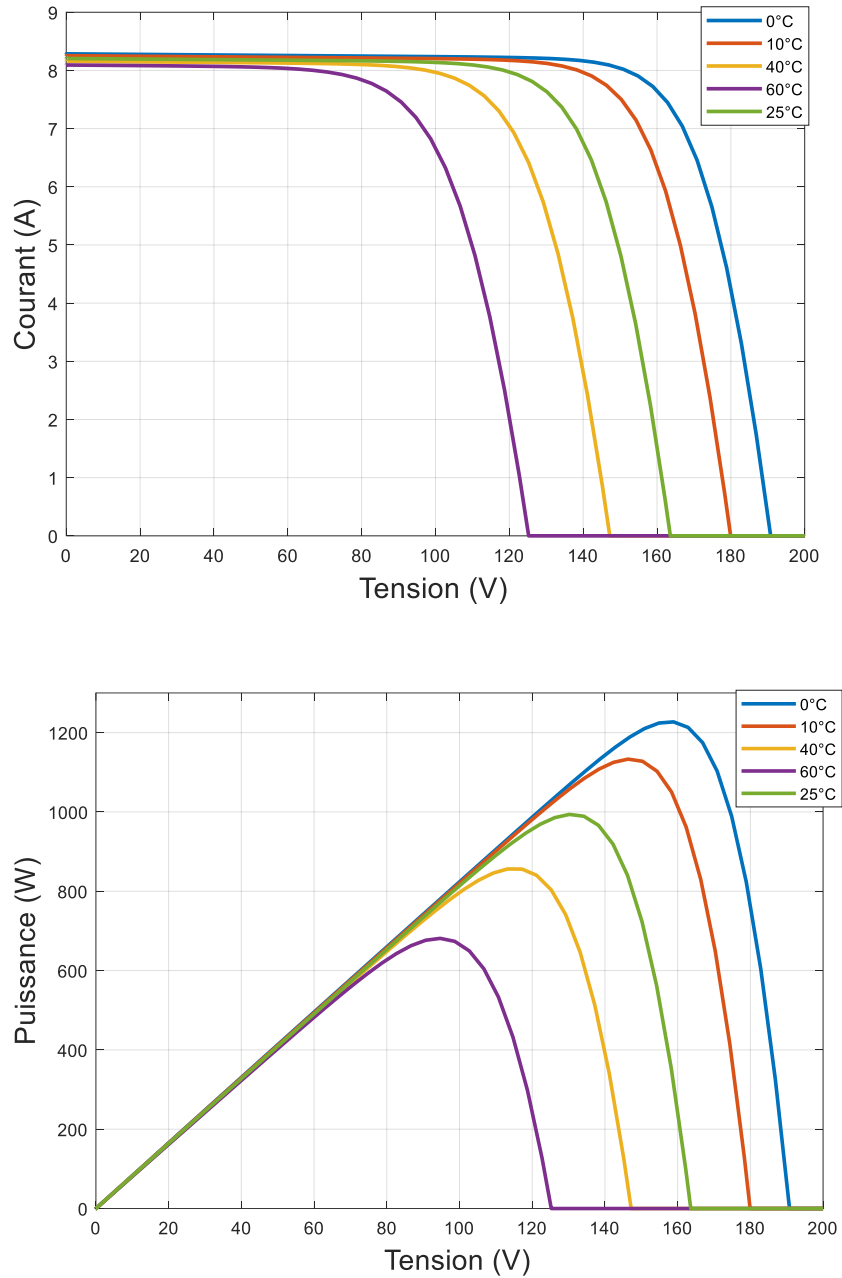


Figure 4. 3. Les caractéristiques courant-tension et puissance-tension du système PV sous variation uniforme de la température ($G=1000w/m^2$).

4.5. Conception du convertisseur statique de type Buck-Boost

La topologie buck-boost est utilisée pour plusieurs raisons, notamment parce qu'elle présente des caractéristiques supérieures, par rapport aux autres types de convertisseurs, en ce

qui concerne les performances de poursuite du MPP du générateur photovoltaïque, et elle permet aussi la poursuite du MPP à tout moment, quelle que soit la température du panneau PV, l'irradiance solaire et charge connectée.

La fréquence de commutation est choisie égale à 10kHz. La détermination des différents composants constituant le circuit buck-boost est une étape critique dans l'implémentation. Le choix des éléments se fait en considérant que le convertisseur est en mode de conduction continu.

$$L \geq R * \frac{(1-D)^2}{2*f} \longrightarrow L \geq 0.0005H$$

$$C_{in} \geq \frac{I_{pvmax}}{f*\delta V_{pv}} \longrightarrow C_{in} \geq 0.0001F$$

$$C_o \geq \frac{D_{max}}{ripple*f*R_o} \longrightarrow C_o \geq 0.0001F$$

Les valeurs des condensateurs, d'inductance et de résistance de sortie utilisées sont :

$$C_{in} = 476\mu F, C_o = 116\mu F, L = 903\mu H, R_o = 17.2\Omega$$

4.6. Paramétrage des algorithmes SOA et PSO

Pour un fonctionnement optimal des contrôleurs MPPT, la phase de paramétrage est nécessaire, en raison de sa grande influence sur ses performances notamment en ce qui concerne le temps de convergence et la précision.

Vu que notre principal travail est de développer l'algorithme SOA pour la commande MPPT, nous allons détailler son paramétrage en présentant un tableau qui comporte certains tests que nous avons faites et les courbes qui les expriment. Alors que pour le contrôleur PSO_MPPT, nous présentons seulement les paramètres de contrôle optimal sélectionnés.

4.6.1. Paramétrage de l'algorithme SOA

Le paramétrage consiste à évaluer le contrôleur en changeant, par tâtonnements des fois (trial and errors approach), les valeurs des paramètres respectifs à savoir : (Max_iter, Nbr_particules, fc, u, v), permettant ainsi de sélectionner les plus appropriés de façon à réduire le temps de convergence et d'optimiser l'efficacité des contrôleurs.

Max_iter : nombre maximale d'itérations ;

Nbr_particules : nombre des mouettes ;

f_c : facteur pour éviter les collisions ;

u, v : des constantes pour définir la forme en spirale ;

P_{pv} : Puissance du module PV ;

T_c : temps de convergence ;

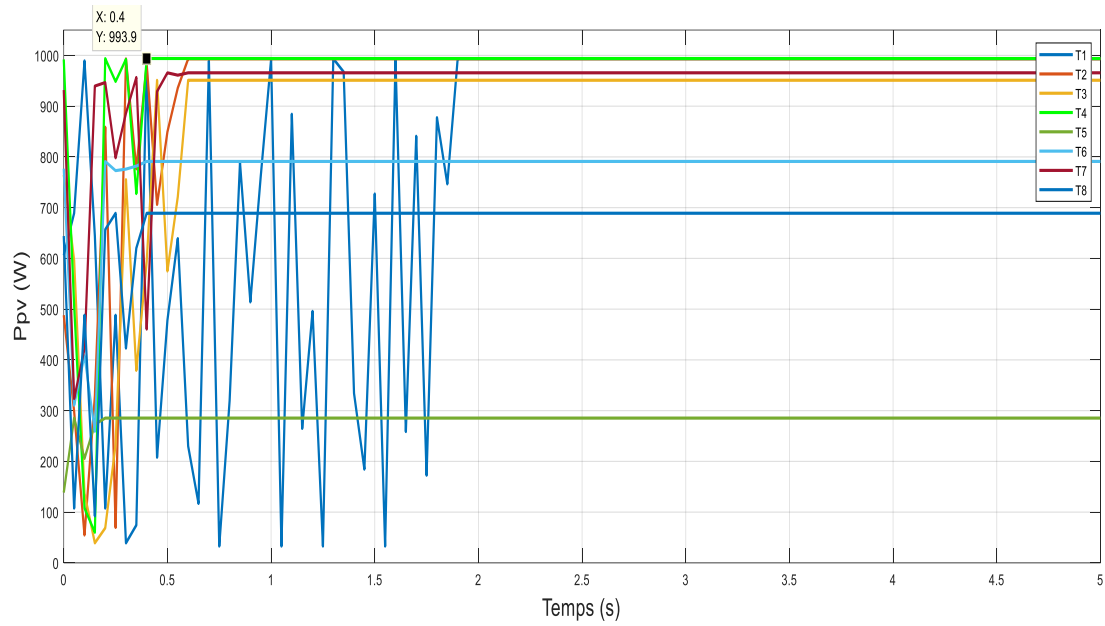


Figure 4. 4. Simulation pour différentes valeurs de paramètres du contrôleur SOA_MPPT.

Table 4. 2. Résultats de simulation pour différentes valeurs des paramètres.

Teste \ Paramètres	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8
Max_iter	60	30	10	30	30	30	30	30
Nbr_particules	6	6	6	4	4	4	3	4
Fc	4	2	2	2	2	2	2	2
U	0.53	0.53	0.53	0.53	1	0.1	0.53	0.25
V	0.12	0.12	0.12	0.12	1	0.1	0.12	0.7
Ppv(W)	993.6	993.3	951.1	993.9	285.3	791.1	965.7	689
Tc (s)	2	0.6	0.6	0.4	0.4	0.4	0.6	0.4

Selon les résultats obtenus, l'utilisation de 30 itérations et un nombre de particules (mouettes) de 4 et $fc=2$ garantit la convergence du contrôleur.

L'utilisation de $u=0.53$ et $v=0.12$ garantit l'obtention de la puissance optimale. Les performances de l'algorithme SOA sont testées sous différents scénarios d'ombrage partiel. Les paramètres utilisés sont $Max_iter=30$, $Nbr_particules=4$, $fc=2$, $u=0.53$ et $v=0.12$. Ces paramètres ont été sélectionnés après une série de simulations. Par conséquent, il peut être confirmé que la combinaison (Max_iter , $Nbr_particules$, fc , u , v) est optimale.

4.6.2. Paramétrage de l'algorithme PSO

Les performances de l'algorithme PSO sont aussi testées sous différents scénarios d'ombrage partiel. Les paramètres utilisés pour l'algorithme PSO sont $W = 0.4$, $C_1 = 1.2$, $C_2 = 1.6$, $\Delta P = 0.5$ et $\Delta d = 0.01$. Ces paramètres ont été sélectionnés après une série de simulations. Par conséquent, il peut être confirmé que la combinaison (W , C_1 , C_2) est la plus optimale.

4.7. Poursuite du MPP dans les conditions standards

La réponse temporelle des contrôleurs SOA_MPPT, PSO_MPPT, et P&O MPPT sous conditions climatiques standards est illustrée sur la figure 4.5. Les signaux de puissances sont superposés afin de pouvoir comparer leurs performances.

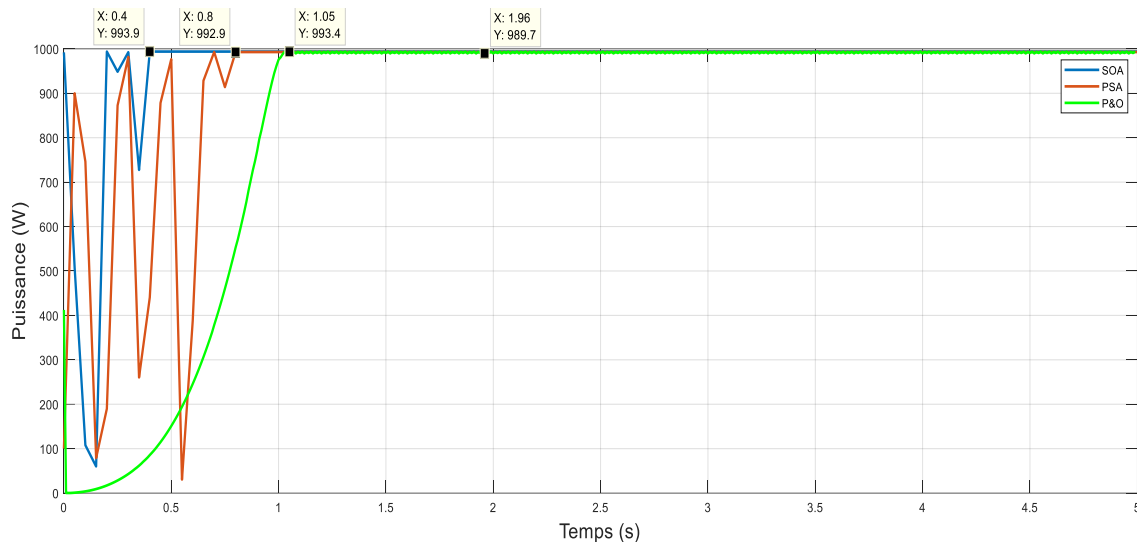


Figure 4. 5. Evolution de la puissance de sortie des contrôleurs SOA, PSO et P&O MPPT sous conditions standards.

D'après les résultats obtenus lors des différentes simulations, nous constatons que le contrôleur P&O MPPT converge de manière un peu lente vers le MPP avec un temps de réponse de 1.05s. De plus, il présente des oscillations causant ainsi une perte d'énergie.

- Les contrôleurs SOA MPPT, PSO MPPT convergent vers le MPP avec des temps de réponse respectifs de 0.4s, 0.8s. Les oscillations autour MPP n'existent pas pour les deux contrôleurs bio-inspirés.

4.8. Tests de robustesse

Pour montrer la robustesse et la fiabilité des contrôleurs abordés, on teste ses capacités à suivre le point de puissance maximale dans le cas des changements rapides des conditions climatiques.

4.8.1. Variation rapide de l'éclairement pour une température fixe

Dans ce test, une augmentation rapide de l'éclairement de 600 à 1000 W/m² est observée à l'instant t=5s. Puis une diminution de l'éclairement se produit à l'instant t=10s de 1000 à 400 W/m². Pendant toute la durée du test la température est maintenue à 25°C.

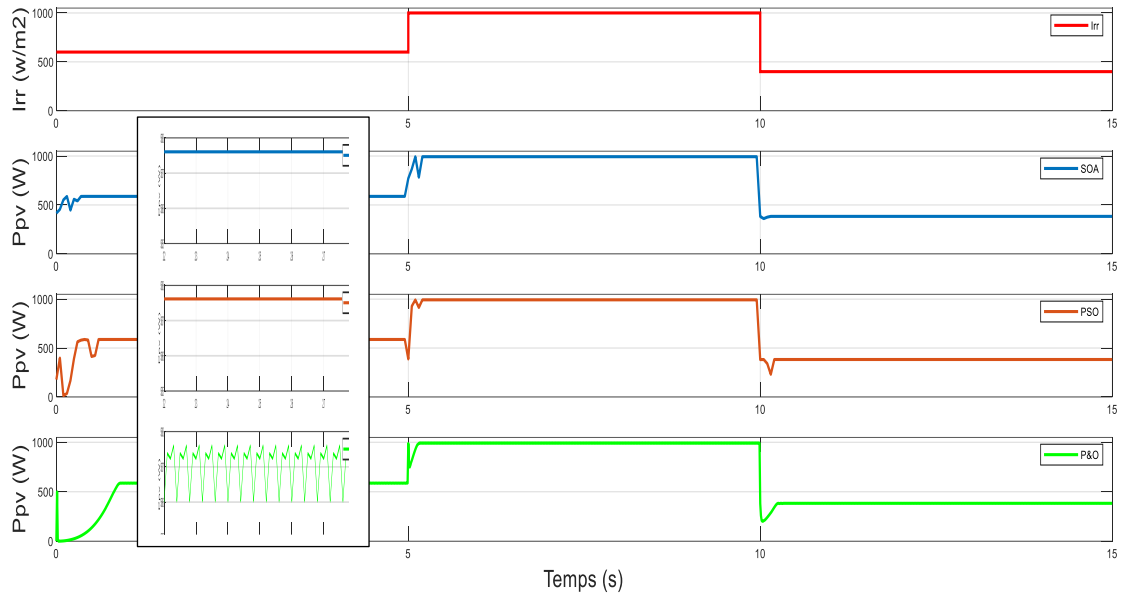


Figure 4. 6. Evolution de la puissance du contrôleur SOA, et PSO MPPT pour des changements rapides de l'éclairement.

La figure 4.6 montre la puissance de sortie du module PV quand les conditions d'éclairement changent rapidement pour les trois contrôleurs proposés. Les résultats soulignent que l'efficacité de poursuite dans toutes les conditions était à 100% avec le contrôleur SOA_MPPT et légèrement supérieure à 99% avec le contrôleur PSO_MPPT. Les deux algorithmes bio-inspirés ne présentent aucune oscillation autour du MPP. La méthode P&O a eu une quantité de pertes de puissance et provoque des oscillations autour du MPP.

4.8.1. Variation rapide de la température pour un éclairement fixe

Dans ce test, une diminution brusque de la température de 45°C à 25°C est observée à l'instant $t=5s$. Puis une autre diminution de température se produit à l'instant $t=10s$ de 25°C à 10°C. Pendant toute la durée du test l'éclairement est maintenu à 1000 W/m².

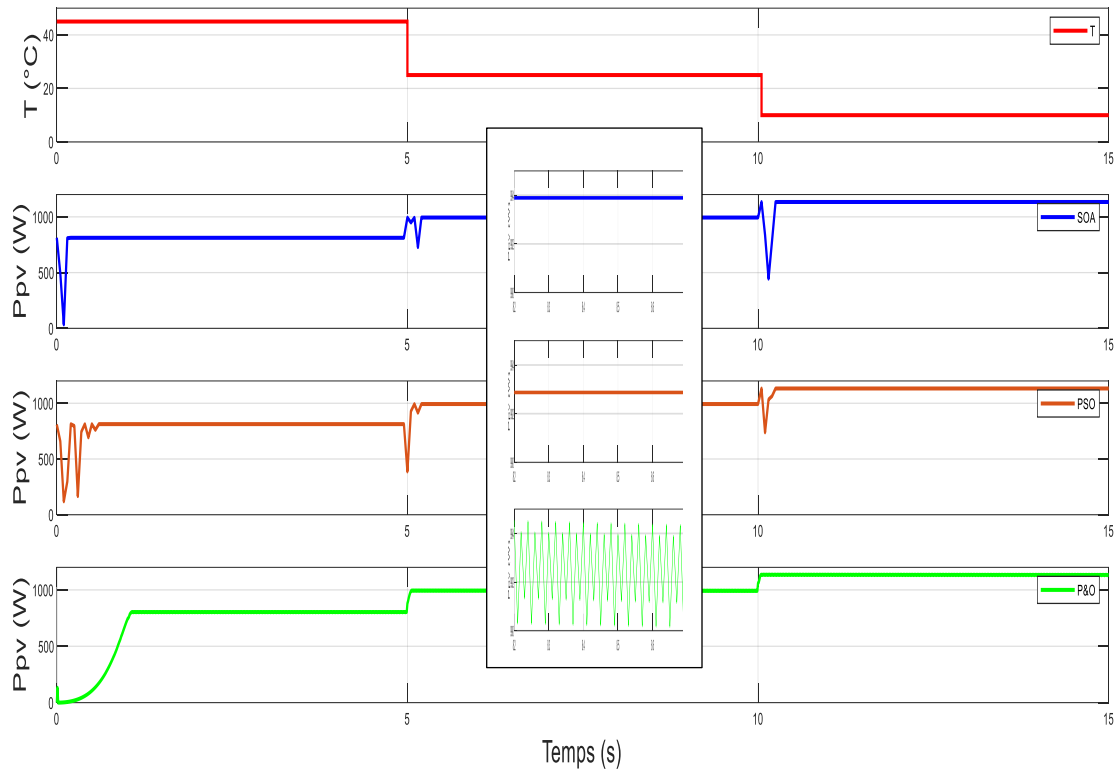


Figure 4. 7. Evolution de la puissance du contrôleur SOA, et PSO MPPT pour des changements rapides de la température.

La figure 4.7 montre la puissance de sortie du module PV dans des conditions de température variables et un éclairement constant pour les trois contrôleurs étudiés. Les résultats montrent que dans toutes les conditions, l'efficacité de poursuite du contrôleur SOA_MPPT est de 100%, tandis que l'efficacité de poursuite du contrôleur PSO_MPPT est légèrement supérieure à 99%. Les deux algorithmes bio-inspirés ne présentent pas d'oscillation autour du MPP. Pour la méthode P&O les oscillations autour du PPM sont toujours présentes.

4.9. Poursuite du GMPP dans les conditions d'ombrage partiel

4.9.1. Courbes d'ombrage P-V

Les contrôleurs sont testés sous trois scénarios d'ombrage partiel différents (figure 4.8). La figure 4.9 montre les différentes caractéristiques P-V et I-V obtenus avec les trois scénarios. La première courbe P-V est caractérisée par la présence de cinq (5) points de puissance maximale. Le point maximum global est situé à droite de cette courbe. Dans la deuxième configuration le point de puissance maximale globale se déplace vers le milieu de la

courbe P-V alors qu'il se déplace vers la gauche dans la troisième configuration. Chaque configuration d'ombrage dure 5s.

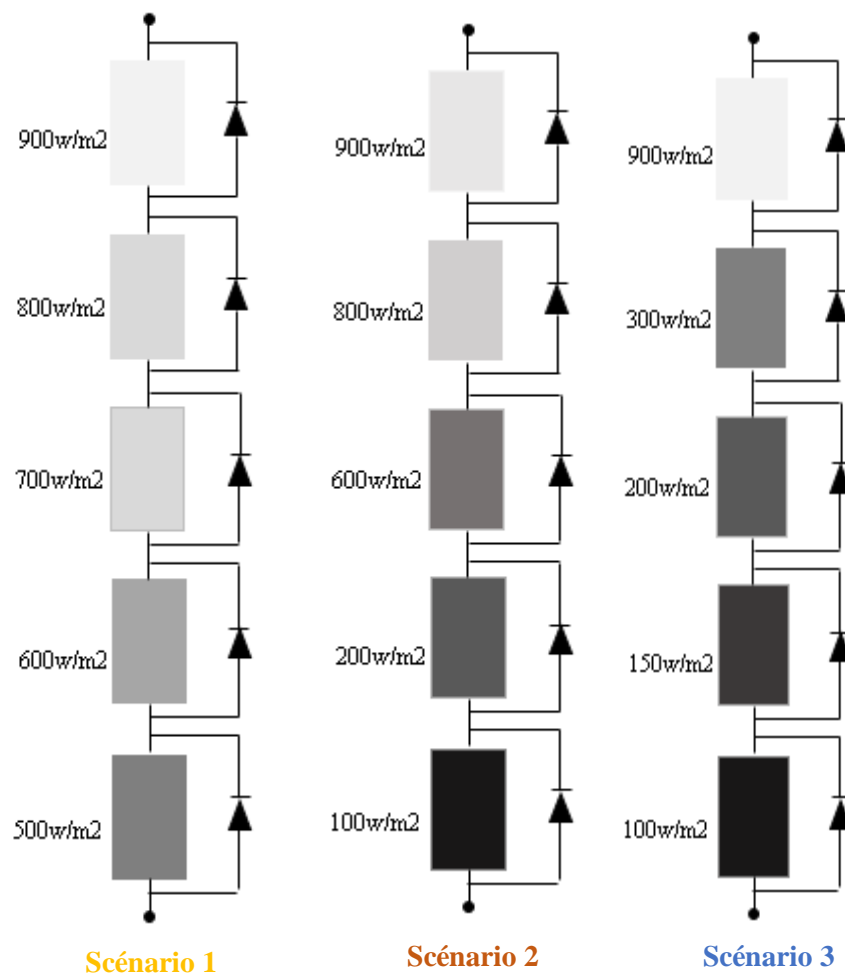


Figure 4. 8. Les trois scénarios d'ombrage partiel utilisés.

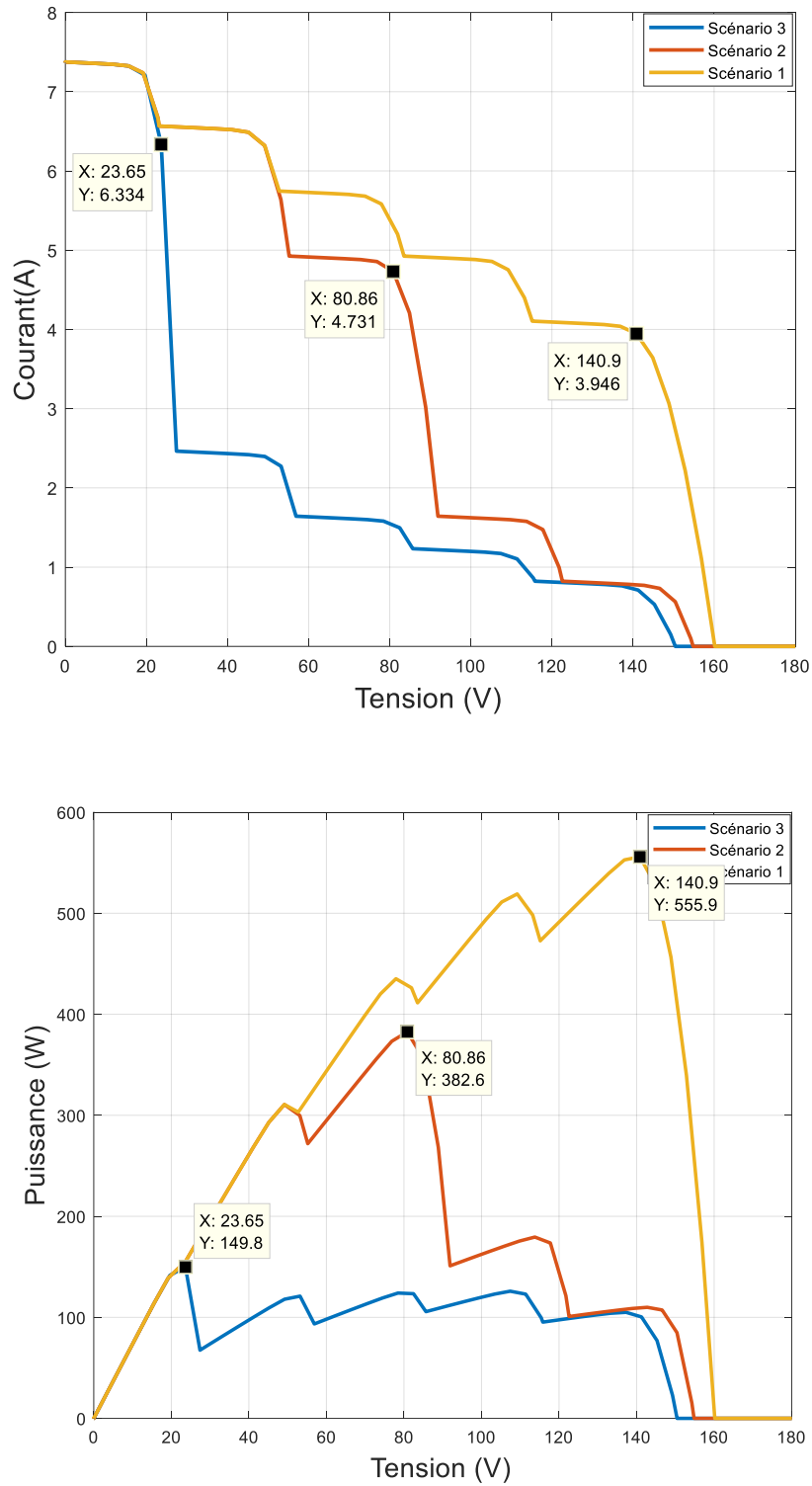


Figure 4. 9. Les courbes I-V et P-V utilisées dans la simulation.

4.9.2. Poursuite du GMPP à l'aide de MPPT basé sur P&O

Les résultats obtenus par l'algorithme P&O sont montrés à la figure 4.10. Un pas de perturbation fixe de $D = 0,001$ est imposé toute les 0.0001 s. Pour la première configuration,

l'algorithme P&O a pu localiser le GMPP, qui se trouve à droite de la caractéristique P-V. Pour le deuxième et troisième scénario, l'algorithme n'a pas pu distinguer le GMPP et il est piégé dans un LMPP. Ces résultats prouvent l'incapacité de l'algorithme P&O à gérer le cas de l'ombrage partiel.

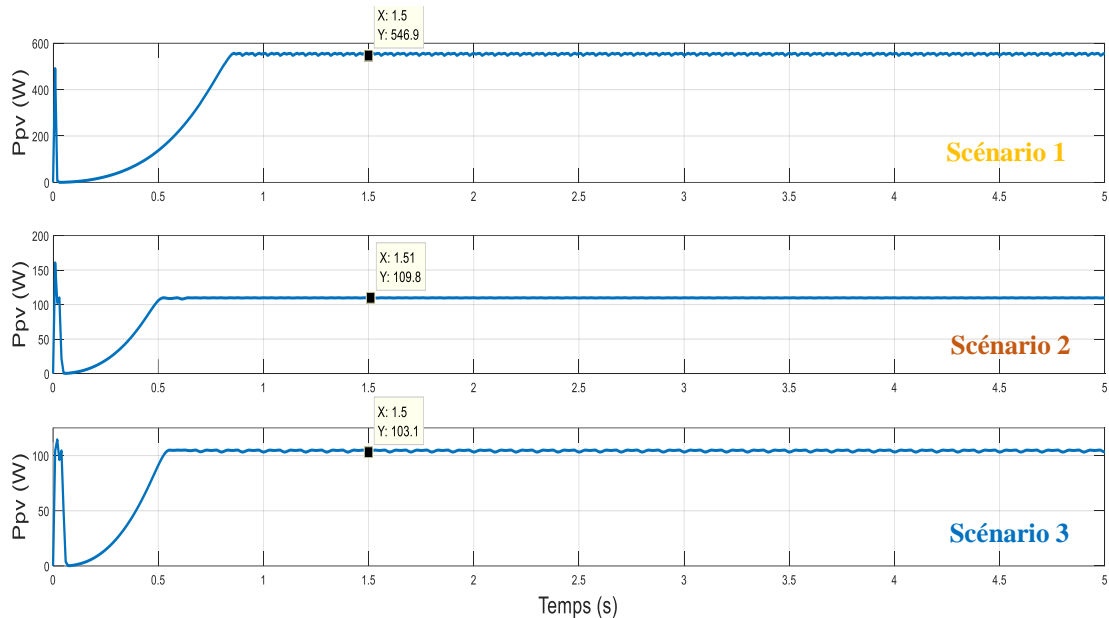


Figure 4.10. Variation de la puissance du SPV pendant la poursuite du GMPP à l'aide de MPPT basé sur P&O dans les trois scénarios d'ombrage partiel.

4.9.3. Poursuite du GMPP à l'aide de MPPT basé sur PSO

Les résultats obtenus par l'algorithme PSO sont montrés à la figure 4.11. Pour les trois scénarios, l'algorithme PSO a pu localiser le GMPP. Ces résultats prouvent la capacité de l'algorithme PSO à gérer le cas de l'ombrage partiel.

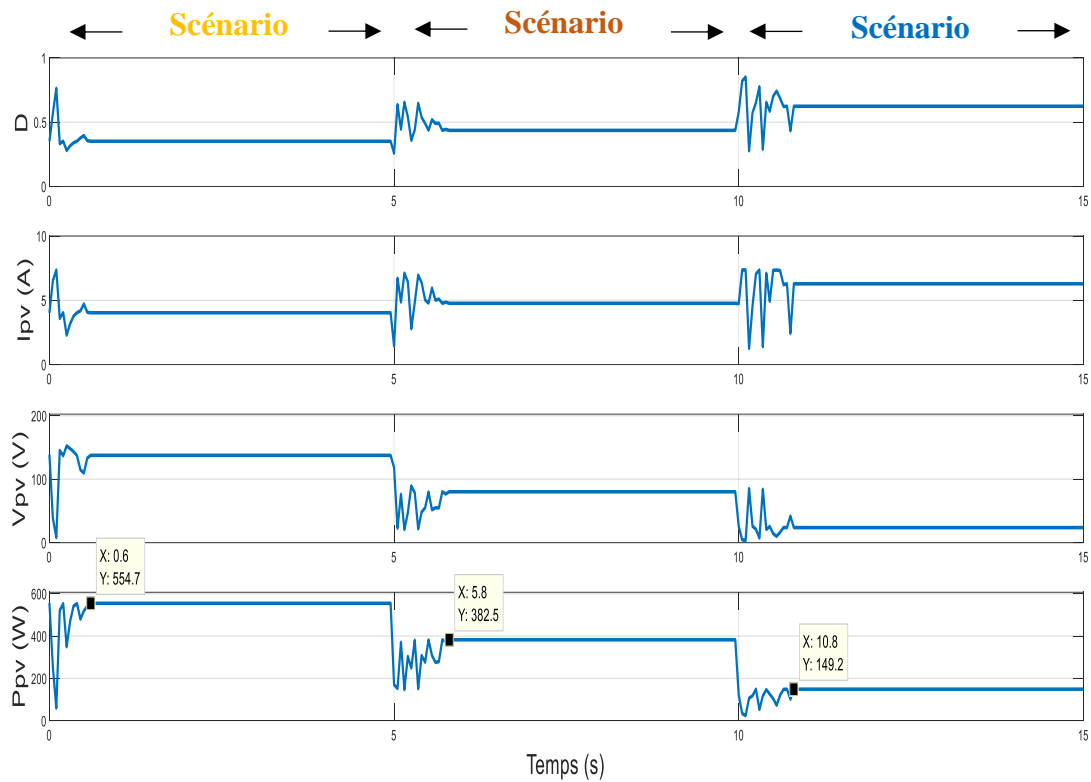


Figure 4. 11. Variation du rapport cyclique, courant, tension et de la puissance du SPV pendant la poursuite du GMPP à l'aide de MPPT basé sur PSO.

4.9.4. Poursuite du GMPP à l'aide du MPPT basé sur SOA

Les résultats obtenus par l'algorithme SOA sont montrés à la figure 4.12. Pour les trois scénarios, l'algorithme SOA a pu localiser le GMPP. Ces résultats prouvent la capacité de l'algorithme SOA à gérer le cas de l'ombrage partiel.

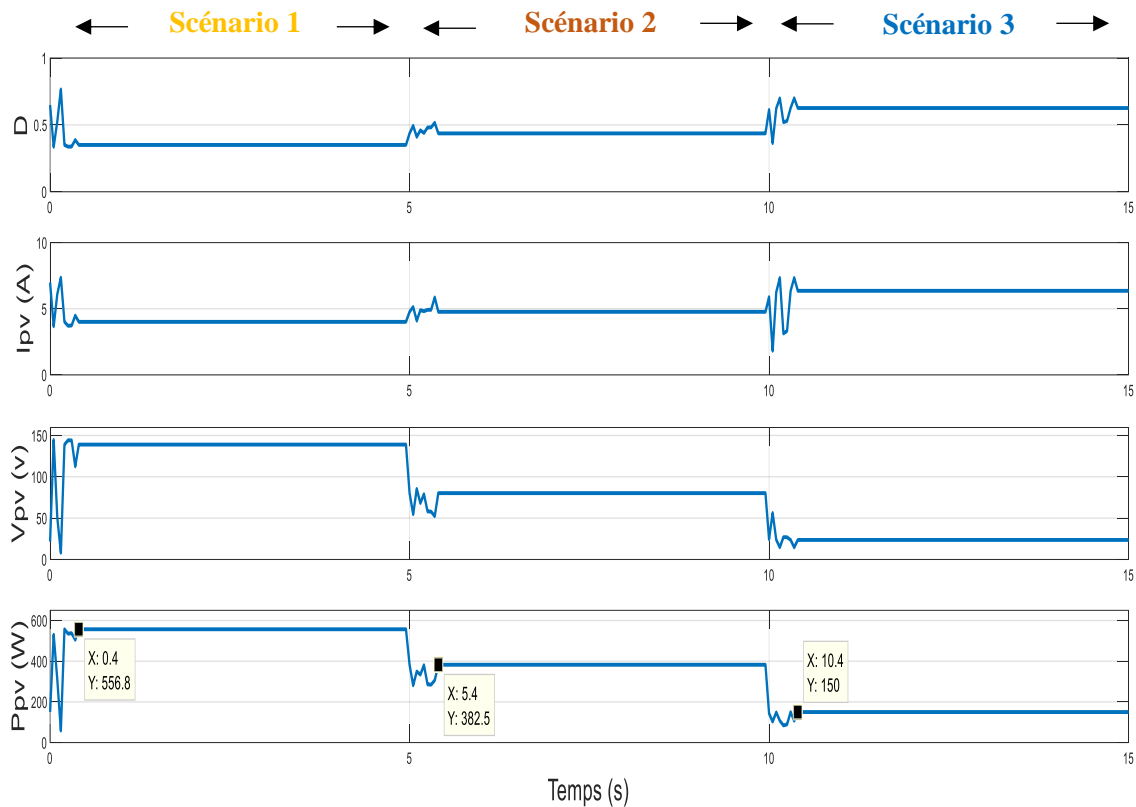


Figure 4. 12.Variation du rapport cyclique, courant, tension et de la puissance du SPV pendant la poursuite du GMPP à l'aide de MPPT basé sur SOA.

4.9.5. Evaluation comparative

4.9.5.1.Traitement de l'ombrage partiel

Comme on peut le remarquer à partir des figures précédentes de poursuite du GMPP, les techniques SOA et PSO ont détecté les changements dans les configurations d'ombrage partiel et ont initiés le processus MPPT. Ils ont également réussi à localiser les maxima globaux dans les trois scénarios d'ombrage partiel. En revanche, la performance de P&O se dégrade significativement dans des conditions d'ombrage partiel car il est souvent coincé dans un LMPP. Pour le premier motif d'ombrage, le MPP global est situé sur le côté droit de la courbe caractéristique P-V. Le suivi de procédure de l'algorithme P&O commence par la transmission du premier rapport cyclique au convertisseur DC-DC. La valeur initiale du rapport cyclique est de 0, ce qui se traduit par une tension au voisinage de la tension de circuit ouvert. La procédure de la perturbation du rapport cyclique se poursuit jusqu'au suivi du premier pic. Ensuite, le P&O oscille autour de ce pic qui est fortuitement celui du GMPP. Pour le deuxième et le troisième scénario d'ombrage, on peut voir que l'algorithme P&O identifie à tort le pic local comme le GMPP en raison de l'incapacité de l'algorithme à différencier le pic local et global. Dans ces deux scénarios, l'algorithme P&O n'a pas pu suivre

GMPP et il est piégé dans les LMPP. Ces résultats prouvent la supériorité des techniques bio-inspirées sur l'algorithme P&O conventionnel pour gérer les courbes caractéristiques P-V dans des conditions d'ombrage partiel.

Puisqu'il a été démontré que la méthode conventionnelle P&O est incapable de suivre le point de puissance globale, nous nous contenterons de ce qui suit de comparer SOA_MPPT avec PSO_MPPT en termes d'efficacité statique et le temps de convergence de la poursuite.

4.9.5.2 . Efficacité statique

Le rendement de poursuite η est défini comme suit :

$$\eta = \frac{P_{MPP}}{P_{max}}$$

Où P_{MPP} est la puissance de sortie moyenne obtenue en régime permanent et P_{max} est la puissance maximale disponible du générateur PV sous un certain modèle d'ombrage.

Le tableau 4.3 présente les résultats de poursuite à l'état stationnaire. Dans les trois conditions d'ombrage partiel, les techniques métaheuristiques SOA MPPT et PSO MPPT sont capable de rechercher et atteindre le GMPP. Le contrôleur SOA MPPT produit une efficacité statique de 100% dans tous les cas d'ombrage partiel étudiés. Et de là nous concluons sa supériorité dans cette étude.

Table 4. 3. L'efficacité statiques des contrôleurs SOA, PSO et P&O MPPT dans les trois scénarios d'ombrage partiel.

Scénarios d'ombrage(W)	La puissance parfaite Pmax	La puissance obtenue		Efficacité statique (%)	
		SOA	PSO	SOA	PSO
Scénario 1	555.86(w)	556.8	554.7	100	99.56
Scénario 2	382.56(W)	382.56	382.55	100	99.99
Scénario 3	150(W)	150	149.22	100	99.48

4.9.5.3. Temps de convergence

Une caractéristique importante des techniques MPPT est leur faible temps de convergence. Le temps de convergence est estimé par la capacité de la technique méta-heuristique à répondre au critère de convergence. Comme mentionné précédemment (chapitre 3), les techniques proposées arrêtent le processus d'optimisation lorsque la différence absolue entre chacun des deux rapports cycliques différents est inférieure à un seuil bien déterminé.

Ensuite, le nombre de perturbations pour répondre à ce critère est enregistré et multiplié par la période d'échantillonnage du contrôleur MPPT (0.05s). Le résultat de cette multiplication est considéré comme le temps de convergence. Un cycle MPPT est obtenu après l'évaluation des quatre rapports cycliques. Un cycle MPPT correspond donc à quatre perturbations. Le tableau 4.4 résume les performances de poursuite des deux algorithmes. Pour le premier scénario d'ombrage, l'algorithme SOA a réalisé la poursuite du GMPP plus rapidement. Il ne faut que 2 cycles MPPT pour atteindre le GMPP. L'algorithme PSO prend 3 cycles MPPT pour répondre au critère de convergence. Pour le deuxième et troisième scénario, on peut remarquer que la méthode SOA a bien localisé le GMPP en 2 cycles MPPT, l'algorithme PSO par contre effectue 4 cycles MPPT pour atteindre l'état stationnaire. Comme on peut le constater, l'algorithme SOA est supérieur en termes de temps de convergence par rapport à la technique PSO.

Table 4. 4. Le temps de convergence des contrôleurs SOA MPPT et PSO MPPT dans les trois scénarios d'ombrage partiel.

Motif d'ombrage N°	Temps de convergence(s)	
	PSO	SOA
Scénario 1	0.6	0.4
Scénario 2	0.8	0.4
Scénario 3	0.8	0.4

4.10. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons analysé les performances de deux contrôleurs MPPT, basés sur les algorithmes SOA et PSO, pour la recherche du GMPP dans un système photovoltaïque. L'environnement Matlab / Simulink est utilisé pour simuler diverses courbes caractéristiques I-V et P-V sous divers scénarios d'ombrage partiel. Une analyse de la robustesse et des performances des MPPT proposés a été réalisée. Une étude comparative entre le MPPT basé sur l'algorithme SOA proposé et le MPPT basé sur l'algorithme PSO ainsi que le MPPT conventionnel P&O est aussi effectuée. À partir des résultats de simulation obtenus, la capacité du contrôleur proposé a atteint les GMPP avec une grande précision et un temps de convergence faible sous différentes conditions d'ombrage partiel. Le contrôleur MPPT basé sur l'algorithme SOA produit une efficacité statique à 100% dans tous les scénarios étudiés.

Conclusion générale

Le but ultime de cette recherche est de contribuer à l'optimisation des systèmes photovoltaïques, par la réduction des pertes notamment celles qui proviennent de la présence de l'ombrage partiel. L'objectif de l'algorithme de poursuite du point de puissance maximale (MPPT) est d'optimiser le point de fonctionnement du système photovoltaïque au point MPP de la courbe I-V où le module produit sa puissance maximale. Cependant, atteindre cet objectif est une tâche exigeante car le MPP sur la courbe caractéristique P-V est instable en raison de la variation continue du rayonnement solaire et de la température. La situation est aggravée dans des conditions d'ombrage partiel où la courbe P-V devient multimodale.

Vu la capacité des méthaheuristes à gérer des fonctions multimodales, un MPPT basé sur l'algorithme SOA a été proposé. La commande MPPT proposée a permis de suivre avec une grande efficacité le point de puissance maximale du générateur PV. De plus, ces performances ont été évaluées en fonction de l'efficacité de poursuite, de la vitesse, des oscillations en régime permanent et de la capacité à gérer l'ombrage partiel.

Dans ce mémoire un convertisseur BUCK-BOOST a été utilisé dans l'optimisation d'un système photovoltaïque. Ce convertisseur de puissance est conçu pour fonctionner en mode courant de conduction continue. La topologie buck-boost est utilisée pour plusieurs raisons, notamment parce qu'elle présente des caractéristiques supérieures (par rapport aux autres types de convertisseurs) en ce qui concerne les performances du MPP du générateur photovoltaïque, et elle permet la poursuite du MPP à tout moment, quelles que soient la température du panneau PV, l'irradiance solaire et la charge connectée.

D'après les résultats de simulation, on conclut que la méthode SOA proposée poursuit le GMPP avec une grande précision et donne une efficacité statique de 100%. De plus, elle surpasse la méthode PSO en termes d'efficacité et temps de convergence et la méthode P&O en termes d'efficacité, temps de convergence et de poursuite du GMPP.

En ce qui concerne les perspectives de ce travail, nous pouvons citer :

- Utiliser l'algorithme proposé pour optimiser la puissance pour différentes configurations du champ photovoltaïque.
- Étendre la comparaison avec autres méta-heuristiques : il serait intéressant de comparer l'algorithme proposé avec d'autres méthaheuristiques telles que l'optimisation par colonies de fourmis (ACO), la recherche de coucou (CS) et l'algorithme de Firfly (FA).

- Implémentation hardware de cet algorithme pour une validation expérimentale.

Bibliographie

- [1] L. LOUKIL, " Les énergies fossiles en Algérie face à un environnement changeant ", مجلة الاجتهاد للدراسات القانونية والاقتصادية, Vol.07, N°.1, pp.449-468, 2018.
- [2] B.MULTON, Production d'énergie électrique par sources renouvelables, Techniques de l'Ingenieur, Mai 2003.
- [3] http://www.biruni.tn/gw_2009_4_3/thumbs/contents-table/71/TM.718697.pdf
Consulté le 03/08/2020.
- [4] D. Meekhun, « Réalisation d'un système de conversion et de gestion de l'énergie d'un système photovoltaïque pour l'alimentation des réseaux de capteurs sans fil autonomes pour l'application aéronautique », Doctorat, Université de Toulouse,2010.
- [5] G.R. TAPSOBA, « Maximisation du transfert de l'énergie d'un champ photovoltaïque tenant compte du phénomène d'ombrage partiel : connexion réseau électrique », maîtrise, ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE UNIVERSITÉ DU QUÉBEC, 2019.
- [6] H.I. Ben Si Lekhal, « Implémentation sur cible FPGA d'un MPPT sous l'effet de l'ombrage », Master, Université SAAD DAHLAB de BLIDA, 2016.
- [7] Z. Bendjellouli. « Contribution à la modélisation d'une cellule solaire », Magistère, UNIVERSITE DE BECHAR, 2009.
- [8] G. Notton, I. Caluianu, I.Colda,S.Caluianu. " Influence d'un ombrage partiel sur la production électrique d'un module photovoltaïque en silicium monocristallin. Revue des Energies Renouvelables", Vol.13, N°. 1, pp.49-62, 2010.
- [9] O. BOUKLI-HACENE. « Conception et réalisation d'un générateur photovoltaïque muni d'un convertisseur MPPT pour une meilleure gestion énergétique », Magistère, UNIVERSITE DE ABOU BAKER BELKAID-TLEMCEM,2011.
- [10] <https://www.allaboutcircuits.com/technical-articles/analysis-of-four-dc-dc-converters-in-equilibrium/>
Consulté le 02/05/2020
- [11] H. Abbas, H. Abid, K. Loukil, A. Toumi, " Etude comparative de cinq algorithmes de commande", Revue des Energies Renouvelables, Vol. 17 N°3., pp. 435 – 445, 2014.

- [12] N. Femia, G.Petrone, G.Spagnuolo, M.Vitelli, "Optimization of perturb and observe maximum power point tracking method", IEEE Trans: Power Electron, Vol. 20, N°4, pp. 963-973, 2005.
- [13] D.P. Hohm, M.E. Ropp, "Comparative Study of Maximum Power Point Tracking Algorithms", Journal Progress in Photovoltaic: Research and Applications, vol.11, N°1, pp.47-62, 2003.
- [14] T. Esum, P. L. Chapman, "Comparison of photovoltaic array maximum power point tracking techniques", IEEE Trans: Energy Conversion, Vol. 22, N° 2, pp. 439-449, 2007.
- [15] K. Sobaihi, « Etude et réalisation d'un hacheur de tracking (MPPT) à contre réaction de Tension », Mémoire de Magister, Ecole Nationale Polytechnique, 2003.
- [16] O. Wasynczuk, "Dynamic behavior of a class of photovoltaic power systems", IEEE PER Power Eng Rev, Vol.3, N°9, pp.7-36,1983.
- [17] A. Al-Amoudi, L. Zhang, "Optimal control of a grid-connected pv system for maximum power point tracking and unity power factor », seventh international conference on power electronics and variable speed drives, N°456, pp. 80-85,1998.
- [18] N. Kasa, T. Lida, H. Iwamoto, "Maximum power point tracking with capacitor identifier for photovoltaic power system", IEE Proc Electr Power Appl, Vol.147, N°6, pp.497-502,2000.
- [19] F.Belhachat, C. Larbes, L. Barazane, « Commande d'un Hacheur MPPT par les Réseaux de Neurones », International Conference On Renewable Energy (ICRE'07), 2007.
- [20] F.Belhachat, « Commande neuro-floue d'un hacheur MPPT », Mémoire de Magister, Ecole Nationale Polytechnique d'Alger ,2007.
- [21]Y-H. Liu, C-L. Liu, J-W. Huang, J-H. Chen, " Neural-network-based maximum power point tracking methods for photovoltaic systems operating under fast changing environments ", Solar Energy, Vol. 89, pp.42-53, 2013.
- [22] G.F.Tchoketch Kebir, « Commande des hacheurs MPPT par la logique floue », Mémoire de Magister, Ecole Nationale Polytechnique ,2006.
- [23] H. Knopf, « Analysis, Simulation, and Evaluation of Maximum Power Point Tracking (MPPT) Methods for a Solar Powered Vehicle », Master Thesis, Portland State University, 1999.

- [24] A. Messai, A. Mellit, A. Guessoum, S.A. Kalogirou, “Maximum power point tracking using GA optimize fuzzy logic controller and its FPGA implementation”, *Solar Energy*, Vol.85, N°2, pp.265–277,2011.
- [25] R. Ramaprabha, V. Gothandaraman, K. Kanimozhi, R. Divya, B.L. Mathur, “Maximum power point tracking using GA-optimized artificial neural network for solar PV system”, *Conference on Electrical Energy Systems (ICEES)*, pp.264 – 268, 2011.
- [26] S. Titri, « Circuit reconfigurables pour la gestion de l'énergie dans les systèmes photovoltaïques ». Doctorat, ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE d'Alger, 2018.
- [27] S.Binitha, SS.Sathya. “A survey of bio inspired optimization algorithms”. *Int J Soft Comput Eng*, Vol.2, N°.02, pp.137-151, 2012
- [28] G. Li, Y.Jin, M.W. Akram, X. Chen, J. Ji, Guiqiang Lia, Y. J. “Application of bio-inspired algorithms in maximum power point tracking for PV systems under partial shading conditions”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol.81, pp. 840–873,2018.
- [29] L. L. Jiang, D. L. Maskell, J. C. Patra, “A novel ant colony optimization-based maximum power point tracking for photovoltaic systems under partially shaded conditions”, *Energy Build*, Vol.58, pp.227–236,2013.
- [30] M. Miyatake, M. Veerachary, F. Toriumi, N. Fujii, H. Ko, “Maximum power point tracking of multiple photovoltaic arrays: a pso approach”, *Journal IEEE Trans: Aerospace and Electronic Systems*, Vol.47, N° 1, pp. 367–380,2011.
- [31] A.S. Benyoucef, A. Chouder, K. Kara, S. Silvestre, O.A. Sahed, “Artificial bee colony-based algorithm for maximum power point tracking (MPPT) for PV systems operating under partial shaded conditions”, *Appl Soft Comput*, Vol.32, pp.38–48,2015.
- [32] J. Ahmed, Z. Salam, “A maximum power point tracking (MPPT) for PV system using cuckoo search with partial shading capability”, *Appl Energy*, Vol.119, pp.118–130,2014.
- [33] G. Lia, Y. Jin, M.W. Akram, X. Chen, J. Jia, “Application of bio-inspired algorithms in maximum power point tracking for PV systems under partial shading conditions”, *review Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol.81, pp. 840–873,2018.
- [34] G. Dhiman, V. Kumar, “Seagull optimization algorithm: Theory and its applications for large-scale industrial engineering problems”. *Knowledge-Based Systems*, pp. 169-196. 2019

[35] K. KACED, «Study of MPPT techniques for photovoltaic systems under partial shading conditions» PhD, ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE, 2018.

[36] R. Ramaprabha, V. Gothandaraman, K. Kanimozhi, R. Divya, B.L. Mathur, “Maximum power point tracking using GA-optimized artificial neural network for solar PV system”, Conference on Electrical Energy Systems (ICEES), pp.264 – 268, 2011.