

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES

**OPTIMISATION D'UN PANNEAU SOLAIRE OMBRAGÉ À L'AIDE DE
L'ALGORITHME PSO**

MÉMOIRE PRÉSENTÉ
COMME EXIGENCE PARTIELLE
DE LA MAÎTRISE EN GÉNIE ÉLECTRIQUE

PAR

KOMLAN WISDOM ATTIPOU

AVRIL 2025

Université du Québec à Trois-Rivières

Service de la bibliothèque

Avertissement

L'auteur de ce mémoire, de cette thèse ou de cet essai a autorisé l'Université du Québec à Trois-Rivières à diffuser, à des fins non lucratives, une copie de son mémoire, de sa thèse ou de son essai.

Cette diffusion n'entraîne pas une renonciation de la part de l'auteur à ses droits de propriété intellectuelle, incluant le droit d'auteur, sur ce mémoire, cette thèse ou cet essai. Notamment, la reproduction ou la publication de la totalité ou d'une partie importante de ce mémoire, de cette thèse et de son essai requiert son autorisation.

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES

MAÎTRISE EN GÉNIE ÉLECTRIQUE (MAÎTRE ES SCIENCE)

Direction de recherche :

Prof. Ahmed Chériti	
Prénom et nom	Directeur de recherche

Jury d'évaluation

Prof. Ahmed Chériti	Directeur de recherche
Prénom et nom	Fonction du membre de jury

Prof. Alben Cardenas	Membre interne
Prénom et nom	Fonction du membre de jury

Prof. Tahar Tafticht	Membre externe
Prénom et nom	Fonction du membre de jury

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier tout d'abord la direction du département Génie électrique de l'Université du Québec à Trois-Rivières d'avoir accepté ma demande d'admission afin de poursuivre mes études en maîtrise génie électrique au Québec.

Je remercie également mon directeur de recherche, le professeur Ahmed Chériti, pour son aide, ses conseils avisés et sa disponibilité tout au long de mon programme de maîtrise.

Je remercie aussi tous les professeurs du département de génie électrique, notamment ceux qui ont enseigné les cours que j'ai eu à faire durant mon cursus. Grâce à vos enseignements et conseils, j'ai pu avancer rapidement dans mon sujet de recherche.

Je remercie et dédie ce modeste travail à mes parents et à mes frères pour leurs encouragements, leurs soutiens qu'ils ne cessent de témoigner envers moi. Que Dieu tout-puissant vous bénisse abondamment.

RÉSUMÉ

L'intégration croissante des énergies renouvelables dans les réseaux électriques soulève un enjeu majeur en termes d'amélioration de l'efficacité des systèmes de conversion. Au sein de ces différentes sources d'énergie, l'énergie photovoltaïque se démarque par son potentiel en matière de rentabilité et par sa diversité d'applications. Toutefois, la faible efficacité des installations photovoltaïques (PV), notamment en cas d'ombrage partiel, représente une contrainte majeure.

Ce travail étudie l'amélioration des panneaux photovoltaïques ombragés en utilisant l'algorithme d'optimisation par essais particuliers. Une revue de littérature approfondie expose les principes fondamentaux des systèmes photovoltaïques, les propriétés des cellules solaires, des panneaux solaires et des convertisseurs CC-CC de type élévateur. Les approches traditionnelles pour le suivi du point de puissance maximale (PPM) sont également discutées dans ce contexte. La seconde section de ce travail se focalise sur une analyse approfondie de l'algorithme PSO et sa mise en application en tant que méthode MPPT appropriée aux contextes complexes d'ombrage partiel. En conclusion, des simulations effectuées à l'aide de MATLAB/Simulink accompagnées d'une expérience pratique sont utilisées pour évaluer l'efficacité de cette méthode en matière de suivi rapide et précis du point de puissance maximale. Les résultats acquis mettent en lumière la solidité et la prééminence de l'algorithme PSO par rapport aux méthodes MPPT classiques, offrant des perspectives inédites pour les dispositifs intelligents photovoltaïques.

Mots-clés : systèmes photovoltaïques, ombrage partiel, algorithme PSO, MPPT, convertisseurs de puissance.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS	iii
RÉSUMÉ.....	iv
TABLE DES MATIÈRES	v
LISTE DES TABLEAUX	x
LISTE DES FIGURES	xi
LISTES DES ABRÉVIATIONS	xiii
CHAPITRE 1- INTRODUCTION GÉNÉRALE.....	1
1.1 Problématique	1
1.2 Objectif.....	2
1.3 Méthodologie	2
CHAPITRE 2- GÉNÉRALITÉS SUR LES SYSTÈMES PHOTOVOLTAÏQUES AVEC COMMANDES MPPT ET HACHEURS.....	4
2.1 Introduction	4
2.2 Historique.....	4
2.3 Système photovoltaïque	5
2.3.1 Cellule photovoltaïque	6
2.3.2 Principe de fonctionnement.....	6
2.3.3 Circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque	8
2.4 Association des modules PV	11
2.4.1 Association en série.....	11
2.4.2 Association en parallèle	12
2.4.3 Association mixte (série-parallèle)	12
2.4.4 Association totalement croisée (Total Cross-Tied TCT).....	13

2.4.5	Association Bridge-Linked (BL)	14
2.4.6	Association Honeycomb	14
2.5	Protection des modules PV	15
2.5.1	Diode de dérivation (bypass)	15
2.5.2	Diode anti-retour	17
2.6	Les performances du générateur photovoltaïque	17
2.6.1	Caractéristique courant-tension.....	17
2.6.1.1	Effet de l'irradiation	18
2.6.1.2	Effet de la température	19
2.6.2	Caractéristique puissance-tension	20
2.6.2.1	Impact de l'irradiation.....	20
2.6.2.2	Impact de la température.....	21
2.7	Convertisseur CC-CC élévateur.....	22
2.7.1	Type de connexion GPV-charge.....	23
2.7.2	Modélisation et principe de fonctionnement du circuit d'un convertisseur CC-CC élévateur.....	24
2.8	Revue de la littérature	26
2.8.1	Technique de la commande MPPT	26
2.8.2	Méthode perturbation et observation (P&O).....	27
2.8.3	Méthode de la conductance incrémentale (INC).....	28
2.9	Conclusion	31
CHAPITRE 3- ALGORTHME PSO		32
3.1	Introduction	32
3.2	Définition	32

3.3	Topologies PSO.....	33
3.3.1	Topologie globale.....	34
3.3.2	Topologie locale	35
3.3.3	Topologie de von Neumann	35
3.4	Modèle mathématique du PSO.....	37
3.5	Avantages et inconvénients du PSO pour le MPPT	41
3.5.1	Avantages	41
3.5.2	Inconvénients	41
3.6	Conclusion	42
CHAPITRE 4- SIMULATION ET ESSAI EXPÉRIMENTAL		43
4.1	Introduction.....	43
4.2	Champ photovoltaïque	43
4.2.1	Effet de l'ombrage sur notre champ photovoltaïque.....	44
4.2.2	Analyse de l'impact de l'ombrage	46
4.3	Dimensionnement du convertisseur élévateur	46
4.3.1	Rapport cyclique (D).....	47
4.3.2	Inductance (L)	48
4.3.3	Capacité de filtrage (C)	48
4.3.4	Résistance de charge (R)	49
4.4	Implémentation de l'algorithme PSO dans stateflow.....	49
4.4.1	Méthodologie pour le choix des paramètres du PSO	50
4.4.1.1	Nombre de particules (N).....	50
4.4.1.2	Facteur d'inertie (w).....	51
4.4.1.3	Constantes d'accélération (c1 et c2)	51

4.4.1.4	Nombre d'itérations (maxcounter)	52
4.4.1.5	Tolérance de convergence (tol)	53
4.4.2	Description de chaque bloc de l'algorithme PSO	54
4.4.2.1	Bloc d'initialisation	54
4.4.2.2	Bloc de calcul	54
4.4.2.3	Bloc PSO	54
4.4.2.4	Bloc update	55
4.4.2.5	Bloc check_convergence	55
4.4.2.6	Bloc check_irradiance	55
4.5	Scénario de simulation	55
4.5.1	Condition sans ombrage	56
4.5.2	Condition d'ombrage partiel	58
4.5.2.1	Méthode P&O	59
4.5.2.2	Méthode PSO	60
4.5.2.3	Comparaison des performances entre le PSO et le P&O	62
4.5.3	Condition d'ombrage total	63
4.5.4	Condition dynamique	65
4.6	Validation expérimentale	67
4.6.1	Description du montage expérimental	68
4.6.2	Acquisition des données	69
4.6.3	Condition uniforme (aucune variation du rayonnement)	70
4.6.4	Condition avec ombrage partiel	73
4.6.4.1	Méthode PSO	74
4.6.4.2	Méthode P&O	75

4.6.4.3	Comparaison entre la méthode PSO et P&O	77
4.6.5	Condition avec ombrage total	77
4.7	Conclusion	78
CHAPITRE 5- CONCLUSION GÉNÉRALE		80
RÉFÉRENCES		82

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 3-1 : Tableau comparatif des topologies	37
Tableau 4-1 : Caractéristiques électriques du module photovoltaïque.....	44
Tableau 4-2 : Valeurs des composants du convertisseur élévateur.....	49
Tableau 4-3 : Paramètres de l'algorithme PSO utilisés pour le suivi MPPT	52
Tableau 4-4 : Tableau comparatif de la méthode P&O et PSO	63

LISTE DES FIGURES

Figure 2-1 : Principe de fonctionnement des cellules photovoltaïques [9]	7
Figure 2-2 : Passage d'une cellule PV vers un champ de panneaux PV [10]	7
Figure 2-3 : Circuit équivalent d'une cellule PV [12]	9
Figure 2-4 : Branchement en série [13]	11
Figure 2-5 : Branchement parallèle [13]	12
Figure 2-6 : Branchement série-parallèle [13]	13
Figure 2-7 : Protections classiques d'un générateur PV	15
Figure 2-8 : Diode de dérivation (Bypass) [18]	16
Figure 2-9 : Caractéristique I-V d'un panneau solaire [MATLAB]	18
Figure 2-10 : Caractéristique I-V d'un panneau solaire avec différentes valeurs de l'irradiation [MATLAB]	19
Figure 2-11 : Caractéristique I-V d'un panneau solaire avec différentes valeurs de la température [MATLAB]	20
Figure 2-12 : Caractéristique P-V d'un panneau solaire avec différentes valeurs de l'irradiation [MATLAB]	21
Figure 2-13 : Caractéristique P-V d'un panneau solaire avec différentes valeurs de la température [MATLAB]	22
Figure 2-14 : Circuit de base d'un convertisseur CC-CC élévateur [29]	25
Figure 2-15 : Organigramme de l'algorithme P&O [33]	28
Figure 2-16 : Organigramme de la conductance incrémentale [34]	30
Figure 3-1 : Stratégie de déplacement d'une particule [36]	33
Figure 3-2 : Schéma typique d'une topologie globale [39]	34
Figure 3-3 : Schéma typique d'une topologie locale [39]	35
Figure 3-4 : Schéma typique d'une topologie de von Neumann [39]	36
Figure 3-5 : Organigramme de l'algorithme MPPT PSO	40
Figure 4-1 : Courbe P-V de notre GPV avec ombrage et sans ombrage [MATLAB]	45

Figure 4-2 : Schéma de simulation du système photovoltaïque avec convertisseur élevateur.....	50
Figure 4-3 : Organigramme de l'algorithme PSO dans Stateflow de MATLAB.....	53
Figure 4-4 : Évolution du courant, tension, puissance et rapport cyclique dans des conditions sans ombrage [MATLAB].....	57
Figure 4-5 : Courbe P-V sous ombrage partiel	58
Figure 4-6 : Évolution du courant, de la tension, de la puissance et du rapport cyclique dans les conditions d'ombrage partiel avec la méthode P&O [MATLAB].	60
Figure 4-7 : Évolution du courant, tension, puissance et rapport cyclique dans des conditions d'ombrage partiel avec la méthode PSO [MATLAB]	61
Figure 4-8 : Courbe comparatif de la puissance avec la méthode PSO et P&O	62
Figure 4-9 : Évolution du courant, tension, puissance et rapport cyclique dans des conditions d'ombrage total [MATLAB].....	64
Figure 4-10 : Évolution du courant, tension, puissance et rapport cyclique dans des conditions d'ombrage dynamique [MATLAB]	66
Figure 4-11 : Banc d'essai	68
Figure 4-12 : Schéma Simulink du système MPPT avec acquisition de données par Arduino	69
Figure 4-13 : Évolution de la puissance dans les conditions uniformes	70
Figure 4-14 : Évolution du rapport cyclique dans les conditions uniformes	71
Figure 4-15 : Caractéristique P-V de notre système PV sans ombrage	72
Figure 4-16 : Caractéristique P-V de notre système PV sous ombrage partiel	73
Figure 4-17 : Évolution de la puissance sous les conditions d'ombrage partiel.....	74
Figure 4-18 : Évolution du rapport cyclique sous les conditions d'ombrage partiel.....	75
Figure 4-19 : Évolution de la puissance sous les conditions d'ombrage partiel avec la méthode P&O	76
Figure 4-20 : Évolution de la puissance sous des conditions d'ombrage total	78

LISTES DES ABRÉVIATIONS

μF :	Microfarad
A :	Ampère
C :	Condensateur
C-Si :	Silicium cristallin
CA :	Courant alternatif
CC :	Courant continu
CO ₂ :	Dioxyde de carbone
f :	Fréquence
FCC:	Fraction de courant de court-circuit
FCO :	Fraction de tension en circuit ouvert
FLC :	Contrôleur de logique floue
GMPP :	Point de puissance maximale globale
GPV :	Générateur photovoltaïque
Hz :	Hertz
I-V :	Courant-tension
I:	Intensité
INC :	Incremental
I _{ph} :	Photocourant de la cellule PV
I _s :	Courant de saturation
K :	Constante de Boltzmann
L:	Inductance
LF:	Logique floue
LMPP :	Point de puissance maximale locale
mF :	Millifarad
mH:	Millihenry
MPP:	Point de puissance maximale

MPPT:	Suivi du point de puissance maximale
N :	Facteur d'idéalité d'une cellule PV
P-V :	Puissance-tension
P :	Puissance
P&O :	Perturb and observe
PSO :	Optimisation par l'essaim de particules
PV :	Photovoltaïque
MLI:	Modulation de largeur d'impulsions
q :	Charge d'un électron
R :	Résistance
RNA :	Réseaux de neurones artificiels
Rs :	Résistance série de la cellule
Rsh :	Résistance shunt de la cellule
T :	Température
V :	Volt
W :	Watt

CHAPITRE 1- INTRODUCTION GÉNÉRALE

1.1 Problématique

En cette période de crise climatique et de transition énergétique à l'échelle mondiale, l'énergie solaire photovoltaïque est devenue une solution indispensable pour atténuer les émissions de gaz à effet de serre et réduire la dépendance aux énergies fossiles. D'après les données de l'Agence Internationale de l'Énergie (AIE), en 2023, la capacité photovoltaïque installée a excédé 1000 GW, ce qui équivaut à environ 12 % de la production d'électricité mondiale, avec un taux de croissance annuel moyen de 20 % au cours des dix dernières années. Cette tendance est due à la diminution constante des coûts des panneaux solaires, qui aurait été estimée à une réduction de 80 % entre 2010 et 2020 [1, 2].

Néanmoins, en dépit de cette adoption généralisée, les systèmes photovoltaïques font toujours face à d'importants défis techniques : lorsqu'une partie des cellules ou des modules est soumise à l'ombre, cela peut entraîner l'apparition de plusieurs points de puissance maximale locale sur la courbe de puissance-tension (P-V), ce qui entraîne une réduction significative de l'énergie extraite. Les variations rapides de l'irradiance, causées par des nuages ou des obstacles naturels, peuvent perturber l'efficacité énergétique des installations. Les méthodes classiques de poursuite du point de puissance maximale (P&O, INC) rencontrent fréquemment des difficultés pour détecter le maximum absolu dans des environnements complexes [3].

Ces contraintes mettent en évidence la nécessité pressante de concevoir des méthodes avancées permettant d'améliorer les performances des systèmes photovoltaïques dans des conditions réelles, caractérisées par des variations fréquentes de l'irradiance et de l'ombrage.

1.2 Objectif

Ce travail de recherche a pour but d'élaborer une technique novatrice de suivi du point de puissance maximale (MPPT) destinée aux systèmes photovoltaïques, en se basant sur l'algorithme d'optimisation par essais particuliers (PSO). Cette méthode, mise en œuvre dans l'espace de travail Stateflow de MATLAB/Simulink, vise à optimiser la performance énergétique des panneaux solaires face aux fluctuations climatiques. Les buts précis de cette étude sont les suivants :

- Analyser l'impact des paramètres clés du PSO (facteur d'inertie, coefficients cognitifs et sociaux) sur ses performances.
- Simuler et valider expérimentalement les performances du PSO en conditions d'ombrage partiel et total.
- Comparer l'efficacité du PSO avec les méthodes MPPT conventionnelles dans des scénarios complexes.

1.3 Méthodologie

Afin d'atteindre ces objectifs, ce mémoire repose sur une méthodologie rigoureuse :

- La modélisation d'un système photovoltaïque a été réalisée en utilisant MATLAB/Simulink pour obtenir les courbes caractéristiques P-V et I-V des modules photovoltaïques dans diverses conditions d'irradiance. Des simulations ont également été effectuées pour représenter des scénarios d'ombrage partiel et total, permettant ainsi de reproduire des environnements complexes.
- L'algorithme PSO a été implémenté afin de maximiser le rapport cyclique du convertisseur CC-CC élévateur et de poursuivre le point de puissance maximale.
- Des expériences ont été menées en laboratoire sur un dispositif photovoltaïque de test, qui était équipé d'un contrôleur Arduino Mega 2560 et d'un

convertisseur élévateur. Les résultats de l'expérience ont été confrontés aux simulations afin d'évaluer la cohérence et la fiabilité de l'algorithme PSO.

CHAPITRE 2- GÉNÉRALITÉS SUR LES SYSTÈMES PHOTOVOLTAÏQUES AVEC COMMANDES MPPT ET HACHEURS

2.1 Introduction

Dans le contexte d'urgence climatique, la recherche sur les énergies renouvelables, en particulier l'énergie solaire photovoltaïque, s'impose plus que jamais comme une priorité. Cette priorité s'explique par le fait que les énergies renouvelables sont considérées comme une source d'énergie inépuisable et non polluante. En plus de cela, l'utilisation de l'énergie solaire offre aux nations et aux particuliers la possibilité de diminuer leur dépendance sur les combustibles fossiles importés. Ce chapitre offre une analyse approfondie des systèmes photovoltaïques, en mettant l'accent sur leurs principes de base, leurs spécifications techniques et les solutions technologiques conçues pour améliorer leur rendement énergétique. Un accent particulier sera mis sur les diverses techniques de suivi du point de puissance maximale (MPPT - Maximum Power Point Tracking), visant à optimiser l'efficacité des panneaux solaires, ainsi que sur l'importance des convertisseurs CC-CC élévateurs, nécessaires pour ajuster l'énergie générée aux demandes électriques.

2.2 Historique

La découverte du phénomène de conversion de la lumière en électricité, appelé effet photovoltaïque, remonte à 1839 et est attribuée au physicien français Alexandre Edmond Becquerel. En menant des expériences avec des électrodes plongées dans une solution conductrice, Becquerel a constaté un courant électrique à la suite d'une exposition de la lumière, posant ainsi les fondements de la technologie photovoltaïque [4].

Les cellules photovoltaïques, constituants essentiels des systèmes photovoltaïques, ont subi une évolution notable. Les cellules en silicium cristallin, qu'elles soient de type monocristallin ou polycristallin, sont prédominantes sur le marché en raison de leur niveau

avancé de développement technologique et de leur meilleur rendement. Dans le domaine de la production commerciale d'énergie solaire, les cellules monocristallines ont généralement des rendements allant de 20 % à 24 %. Grâce à des avancées en laboratoire, il est maintenant possible d'atteindre des rendements supérieurs à 26 %. Les cellules polycristallines, quant à elle, ont des taux de rendement commerciaux allant de 15% à 20% [5]. En parallèle, les cellules à couche mince, comme celles fabriquées en tellurure de cadmium (CdTe) ou en sélénium de cuivre, indium et gallium (CIGS), présentent des avantages en matière de coût et de souplesse mais offrent des rendements inférieurs à ceux des cellules en silicium. Le CdTe a un rendement commercial de 16 % à 18 % et celui du CIGS possède un rendement de 17 % à 20 % [6].

2.3 Système photovoltaïque

Un système photovoltaïque (PV) est un ensemble de composants conçus pour convertir l'énergie solaire en électricité. Ces systèmes sont utilisés pour produire de l'électricité à partir de la lumière du soleil, et ils sont de plus en plus répandus dans le cadre de la transition vers des sources d'énergie plus propres et renouvelables. Un système photovoltaïque conventionnel est constitué de divers composants essentiels, chacun remplissant une fonction spécifique afin de garantir un rendement optimal [7] :

- Les panneaux solaires : composés de cellules photovoltaïques, ces dispositifs absorbent le rayonnement solaire pour le convertir en courant électrique continu (CC). Ils constituent l'élément essentiel du système.
- Onduleur : il a pour fonction de convertir le courant continu (CC) généré par les panneaux solaires en courant alternatif (CA), qui peut être utilisé par les équipements électriques résidentiels ou être injecté dans le réseau électrique.
- Le régulateur de charge MPPT : il permet d'optimiser la production maximale d'énergie des panneaux solaires en ajustant en permanence leur point de fonctionnement, même en présence de fluctuations d'irradiation solaire ou de température.

- Les batteries : dans le contexte des systèmes autonomes, ont pour fonction de stocker l'énergie excédentaire en vue d'une utilisation ultérieure, garantissant ainsi une alimentation ininterrompue même en l'absence de rayonnement solaire.

2.3.1 Cellule photovoltaïque

La cellule photovoltaïque est constituée de semi-conducteurs qui captent l'énergie lumineuse et la convertissent directement en courant électrique. Le fonctionnement de base repose sur les caractéristiques des rayonnements et des semi-conducteurs.

2.3.2 Principe de fonctionnement

La lumière solaire est constituée de photons portant une énergie correspondant aux diverses longueurs d'onde du spectre solaire (Figure 2-1). Lorsqu'un photon entre en collision avec une cellule photovoltaïque, il a la capacité de transférer son énergie à un électron situé dans le matériau semi-conducteur de la cellule. Grâce à cette énergie excédentaire, l'électron peut ainsi se libérer de son orbite habituelle au sein de l'atome, engendrant ainsi un "trou" qui contribuera à la formation d'un courant au sein d'un circuit électrique. On désigne par le terme "paire électron-trou" cette entité. Une cellule photovoltaïque est un dispositif électronique constitué d'une diode, composée de deux couches de semi-conducteurs dopés de manière à ce que l'une soit conductrice des charges négatives et l'autre des charges positives. Ce phénomène engendre un champ électrique constant à l'intérieur de la cellule. Lorsque la paire électron-trou est créée grâce à l'effet diode, les charges négatives sont alors séparées des charges positives. Ainsi, une tension se forme entre les couches N et P de la cellule. Un courant électrique circule lorsqu'une résistance, telle qu'une ampoule, est insérée entre ces contacts [8].

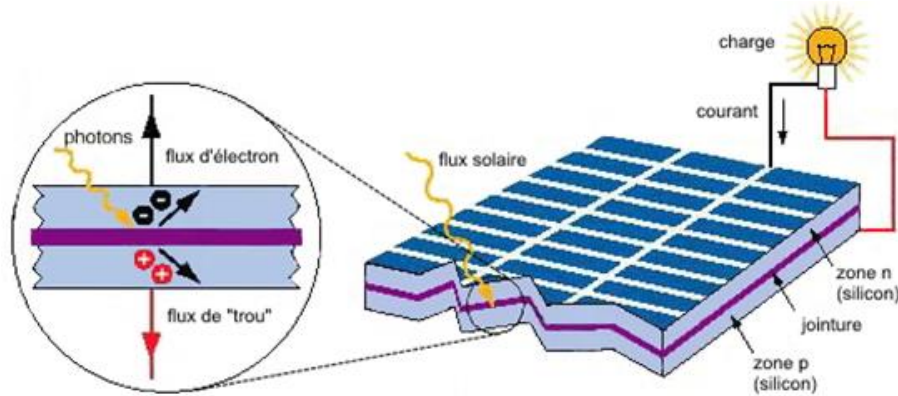


Figure 2-1 : Principe de fonctionnement des cellules photovoltaïques [9]

Les cellules photovoltaïques produisent habituellement une tension relativement basse, d'environ 0,5 à 0,6 V par cellule, ce qui est souvent insuffisant pour de nombreuses applications pratiques. Ainsi, ces cellules sont connectées en série afin d'augmenter la tension ou en parallèle pour augmenter l'intensité du courant. Ces regroupements donnent lieu à la formation de modules photovoltaïques, lesquels peuvent ensuite être assemblés pour constituer des systèmes de forte puissance [7]. La Figure 2-2 illustre le trajet d'une cellule photovoltaïque jusqu'à un champ de panneaux PV.

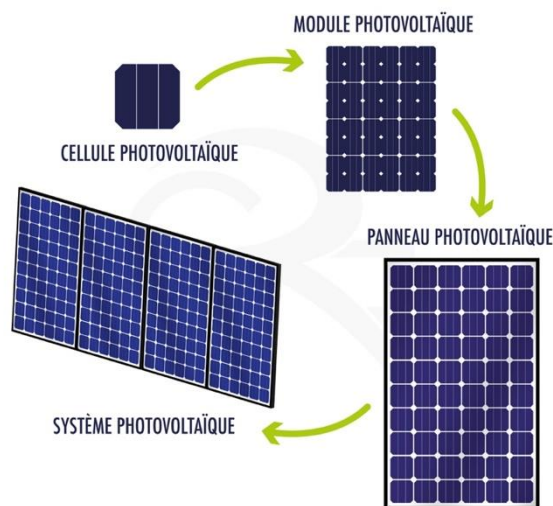


Figure 2-2 : Passage d'une cellule PV vers un champ de panneaux PV [10]

2.3.3 Circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque

Afin de mieux appréhender le fonctionnement électrique des cellules photovoltaïques dans différentes situations d'éclairement et de charge, il est crucial d'étudier en détail le concept du circuit équivalent. Ce modèle propose un cadre analytique qui permet de simuler de façon suffisamment réaliste la réponse électrique de la cellule solaire, tout en tenant compte des approximations inhérentes à la modélisation. Le modèle équivalent standard d'une cellule photovoltaïque se compose des éléments suivants :

- Une source de courant : correspond au courant produit par les photons incidents sur la cellule, connu sous le nom de photocourant (I_{ph}). L'intensité de ce courant est en relation directe avec l'irradiance reçue par la cellule.
- La diode : modélise la jonction P-N du semi-conducteur et rend compte du comportement non linéaire de la cellule.
- La résistance série (R_s) : simule les pertes ohmiques causées par la résistance interne du matériau semi-conducteur et des connexions électriques.
- La résistance shunt (R_{sh}) : correspond aux pertes occasionnées par les courants de fuite circulant à travers la jonction ou les défauts internes de la cellule.

Chaque élément constitutif du circuit équivalent revêt une importance capitale dans l'évaluation des performances et des pertes éventuelles de la cellule. L'analyse de ces composants permettra une meilleure compréhension des processus internes de conversion de l'énergie solaire en électricité [11]. La Figure 2-3 ci-dessous représente le circuit équivalent standard.

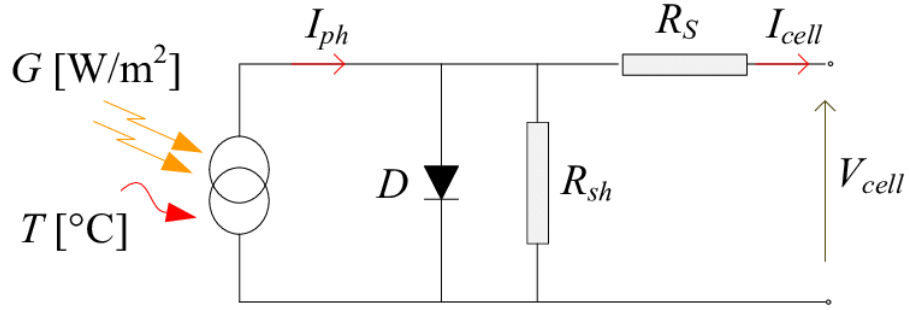


Figure 2-3 : Circuit équivalent d'une cellule PV [12]

La cellule photovoltaïque se distingue par quatre catégories de courants : le courant généré par les photons I_{ph} , le courant de dérivation I_d circulant à travers la diode, le courant I_{sh} de la résistance R_{sh} et le courant de sortie I_{cell} qui circule à travers la résistance série R_s .

Il est à noter que le courant de dérivation I_d et le courant I_{sh} , bien que non représentés explicitement sur la figure, sont implicites dans le modèle. Ils correspondent au courant circulant à travers la diode et la résistance R_{sh} , et interviennent dans l'équation de la caractéristique courant-tension de la cellule photovoltaïque. Ses mentions sont conservées dans le texte afin de respecter la modélisation complète du comportement de la cellule.

Ces quatre flux sont déterminés en se basant sur les équations ci-dessous :

$$I_d = I_s \left(\exp \left(\frac{q \cdot (V_{cell} + R_s \cdot I_{cell})}{N \cdot K \cdot T} \right) - 1 \right) \quad (2-1)$$

$$I_{ph} = [I_{sc} + K_1(T_c - T_{ref})] \frac{G}{G_{ref}} \quad (2-2)$$

$$I_{sh} = \frac{(V_{cell} + R_s \cdot I_{cell})}{R_{sh}} \quad (2-3)$$

Et pour avoir le courant de sortie de la cellule, on établit ses équations suivantes :

$$I_{cell} = I_{ph} - I_d - I_{sh} \quad (2-4)$$

$$I_{cell} = [I_{sc} + K_t(T_c - T_{ref})] \cdot \frac{G}{G_{ref}} - I_s \cdot \left[\exp \left(\frac{q \cdot (V_{cell} + R_s \cdot I_{cell})}{N \cdot K \cdot T} \right) \right] - \frac{(V_{cell} + R_s \cdot I_{cell})}{R_{sh}} \quad (2-5)$$

Avec :

- I_{cell} le courant de sortie de la cellule
- V_{cell} la tension de sortie de la cellule
- I_{ph} le photocourant de la cellule PV
- I_s est le courant de saturation
- q est la charge d'un électron ($1.602 \times 10^{-19} C$)
- V est la tension à la borne de la diode
- K est la constante de Boltzmann ($1.38 \times 10^{-23} J/K$)
- T est la température de la jonction
- N est le facteur d'idéalité d'une cellule PV
- R_s est la résistance série de la diode
- R_{sh} est la résistance shunt de la diode

En combinant les cellules PV en série (pour additionner les tensions de chaque cellule) ou en parallèle (pour additionner les intensités de chaque cellule), il est possible de construire un générateur PV adapté aux besoins spécifiques. Les deux formes de

regroupement sont effectivement envisageables et fréquemment mises en œuvre pour obtenir les valeurs de tension et d'intensité désirées en sortie.

2.4 Association des modules PV

L'association des modules photovoltaïques influence les performances globales du système, qui modifie les paramètres de tension et de courant afin d'optimiser la puissance délivrée tout en garantissant une production constante malgré les fluctuations d'irradiance. En plus des configurations traditionnelles (série, parallèle et mixte), des topologies plus avancées telles que le Total Cross-Tied (TCT), le Bridge-Linked (BL) et le Honeycomb ont été conçues afin d'accroître la résilience aux effets de l'ombrage partiel.

2.4.1 Association en série

Dans un montage en série, tel qu'illustré dans la Figure 2-4, un courant identique traverse chaque cellule, alors que la tension totale est la somme des tensions à travers toutes les cellules.

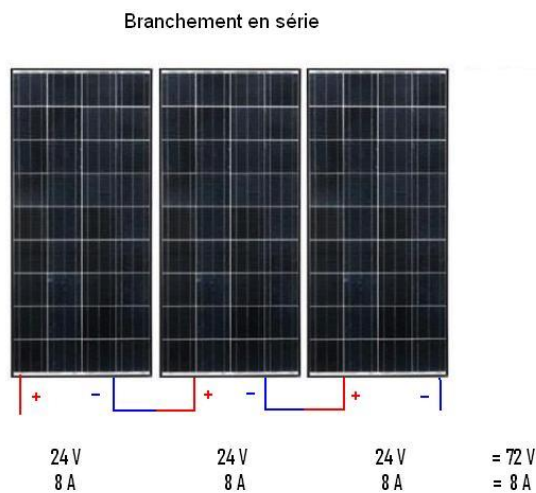


Figure 2-4 : Branchement en série [13]

2.4.2 Association en parallèle

En associant des modules identiques en parallèle, la tension de la branche est équivalente à celle de chaque module, tandis que l'intensité augmente de manière proportionnelle au nombre de modules en parallèle dans la branche. La Figure 2-5 illustre un montage en parallèle.

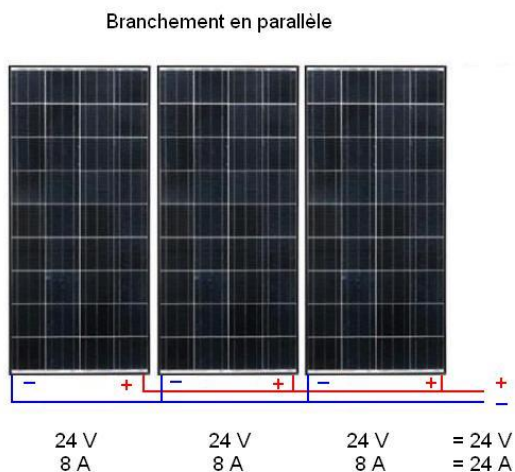


Figure 2-5 : Branchement parallèle [13]

2.4.3 Association mixte (série-parallèle)

L'association mixte combine des groupes en série connectés en parallèle. La Figure 2-6 illustre un branchement série-parallèle.

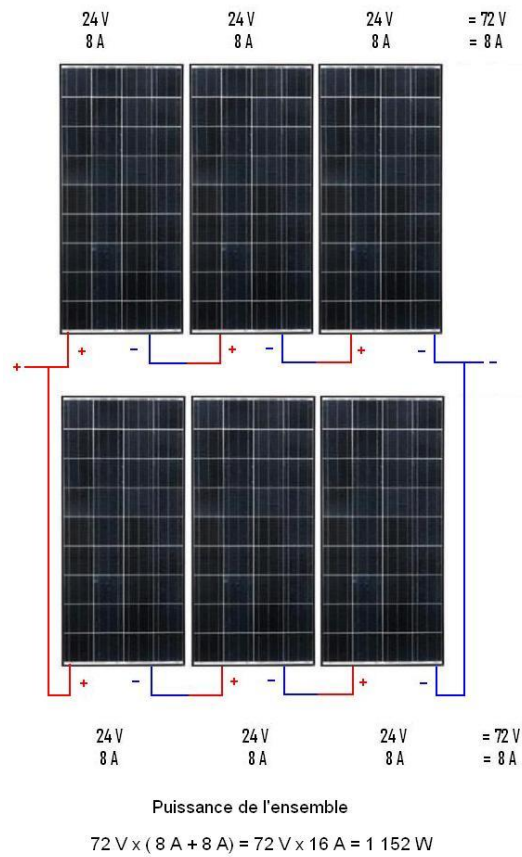


Figure 2-6 : Branchement série-parallèle [13]

2.4.4 Association totalement croisée (Total Cross-Tied TCT)

Dans le cadre de la configuration TCT, les modules sont disposés de manière à former des lignes et des colonnes, où chaque ligne de modules est connectée les uns aux autres à l'aide de jonctions transversales. Ces connexions transversales favorisent une distribution plus homogène du courant. Les caractéristiques de cette configuration sont les suivantes [14]:

- ◆ Minimise les pertes engendrées par l'ombrage partiel en permettant la redistribution du courant vers les branches non ombragées.
- ◆ Facilite la gestion des déséquilibres dus aux fluctuations locales d'irradiance.

Les avantages de cette configuration résident dans sa haute résilience face à l'ombrage partiel et ses pertes globales moindres par rapport aux configurations classiques. En revanche, cela implique une gestion complexe des connexions et une augmentation des coûts de câblage.

2.4.5 Association Bridge-Linked (BL)

Cette disposition inclut des connexions en pont entre les ensembles de modules, facilitant ainsi la déviation efficace du courant autour des modules affectés par l'ombre. Sa caractéristique se définit en combinant les avantages des configurations en série-parallèle et TCT. On obtient une solution offrant une flexibilité accrue pour contourner les modules défaillants ou ombragés [14].

Ils présentent plusieurs avantages :

- ◆ Une résistance renforcée aux ombrages partiels ou dynamiques.
- ◆ Une diminution substantielle des pertes de puissance.

Ses inconvénients sont :

- ◆ La complexité des connexions et du câblage est un point à prendre en considération.
- ◆ Requiert une conception et une installation précises.

2.4.6 Association Honeycomb

La disposition en nid d'abeille repose sur une structure hexagonale des modules interconnectés de manière multiple. Elle optimise l'utilisation des diodes de dérivation afin de gérer les déséquilibres locaux. Cette disposition se distingue par une structure hexagonale qui permet une répartition plus efficace des courants dans le champ photovoltaïque, diminuant ainsi les phénomènes de hotspots et d'irradiance inégale [15].

Les avantages :

- ◆ Extrêmement adaptable aux variations d'ombre complexes et changeantes.

- ◆ Assurer un équilibre efficace des courants électriques dans des environnements présentant des irrégularités.

Les inconvénients de ce système résident dans sa complexité de conception et d'implémentation. Le coût est plus élevé en raison de l'ajout de câblage et de diodes supplémentaires.

2.5 Protection des modules PV

L'intégration de diodes spécifiques comme les diodes de dérivation (bypass) et les diodes anti-retour (Figure 2-7) est cruciale pour assurer la protection électrique et prolonger la durée de vie des panneaux photovoltaïques, particulièrement dans des conditions d'ombrage partiel [16].

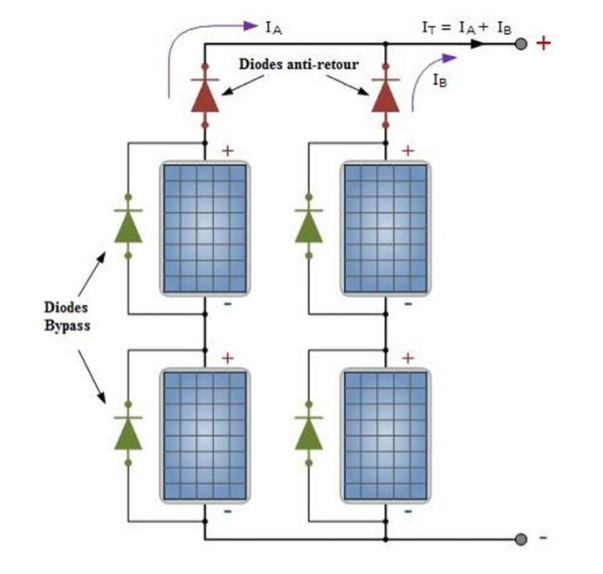


Figure 2-7 : Protections classiques d'un générateur PV

2.5.1 Diode de dérivation (bypass)

Les diodes de dérivation, également connues sous le nom de diodes bypass, jouent un rôle important dans les panneaux solaires, notamment dans les configurations impliquant

plusieurs modules photovoltaïques connectés en série. Ils ont pour fonction principale de préserver les cellules photovoltaïques des conséquences de l'ombrage partiel et des risques de dégradation associés aux points chauds qui peuvent apparaître lorsqu'une partie du panneau solaire est ombragée tandis que d'autres parties sont exposées au soleil.

Le fonctionnement des diodes de dérivation s'explique par le phénomène selon lequel une diminution de l'ensoleillement sur une partie d'un panneau solaire entraîne une réduction de la production de courant par rapport aux cellules solaires exposées directement au soleil. Lorsque toutes les cellules sont connectées en série, le courant généré par le panneau solaire est contraint par la cellule présentant la plus faible performance. Les diodes de dérivation sont installées en parallèle avec des ensembles de cellules (voire des cellules individuelles) afin de dévier le courant et contourner les cellules ombragées. Par conséquent, les autres composants du panneau peuvent maintenir un niveau d'efficacité plus élevé [16, 17].

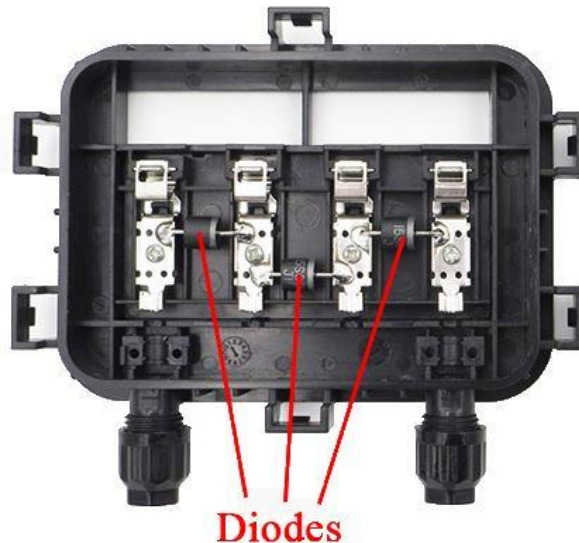


Figure 2-8 : Diode de dérivation (Bypass) [18]

Habituellement, les diodes de dérivation sont placées dans la boîte jonction du panneau solaire (Figure 2-8) ou incorporées directement au panneau. La configuration du panneau

et la probabilité d'un ombrage partiel déterminent le nombre et le positionnement des diodes.

2.5.2 Diode anti-retour

Les diodes anti-retour, également connues sous le nom de diodes de blocage, jouent un rôle crucial dans les installations photovoltaïques, notamment dans les schémas où plusieurs panneaux solaires sont reliés à une batterie à travers un régulateur de charge. Ces dispositifs sont élaborés dans le but d'empêcher le flux électrique de refluer des batteries vers les panneaux solaires en l'absence de lumière solaire, assurant ainsi la protection des cellules photovoltaïques contre d'éventuels dommages et préservant la durabilité de la batterie. Les diodes anti-retour sont essentiellement employées dans les dispositifs photovoltaïques reliés à une batterie, cependant, leur fonction ne se restreint pas exclusivement à ce domaine. Elles sont cruciales dans toute configuration nécessitant de réguler la direction du courant pour préserver les installations [19, 20].

2.6 Les performances du générateur photovoltaïque

Lors de l'évaluation des performances d'un générateur photovoltaïque, il est essentiel de prendre en considération les caractéristiques courant-tension (I-V) et puissance-tension (P-V) du système, ainsi que l'impact de l'irradiation solaire et de la température sur lesdites caractéristiques. Ces composantes offrent des données cruciales concernant l'efficacité du système dans divers contextes environnementaux [21].

2.6.1 Caractéristique courant-tension

La caractéristique I-V d'un module photovoltaïque illustre la relation entre le courant de sortie (I) et la tension de sortie (V) pour diverses intensités d'irradiation solaire et diverses températures. Cette courbe est très importante pour évaluer l'efficacité optimale

d'un panneau solaire, puisqu'elle permet d'identifier le point de puissance maximale (MPP) correspondant au produit maximal de la tension et du courant ($V \times I$). Le Point de Puissance Maximale (MPP) fluctue en fonction du niveau d'irradiation solaire et de la température ambiante [22]. La Figure 2-9 nous montre la caractéristique I-V d'un panneau solaire avec une irradiation de 1kW/m^2 et une température $T = 25^\circ\text{C}$.

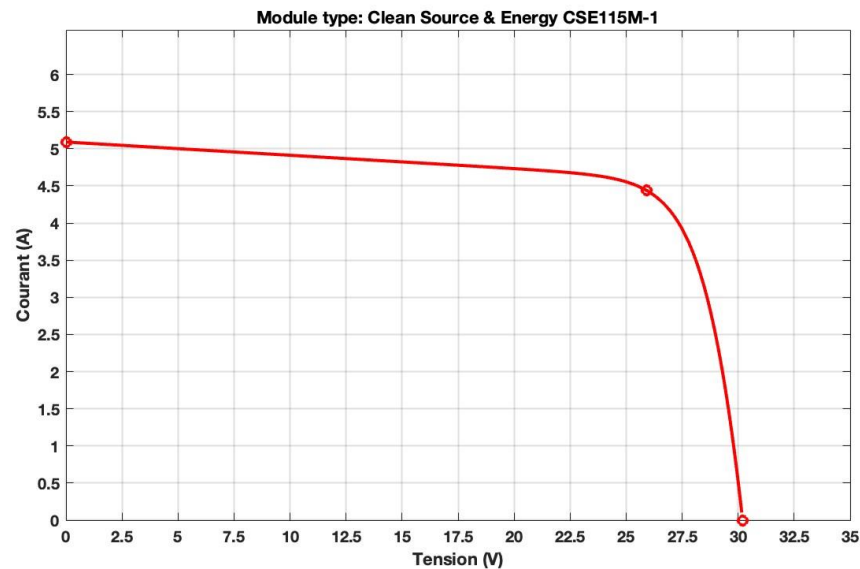


Figure 2-9 : Caractéristique I-V d'un panneau solaire [MATLAB]

2.6.1.1 Effet de l'irradiation

L'exposition au rayonnement solaire influence directement la production de courant d'un panneau photovoltaïque. Lorsque l'irradiation augmente, le courant produit par le panneau solaire augmente de façon presque linéaire. Cela s'explique par l'accroissement du nombre de photons qui atteignent la surface du panneau, ce qui stimule plus d'électrons et génère davantage de courant. La tension de sortie au point de puissance maximale demeure relativement stable, étant donné qu'elle est principalement déterminée par les caractéristiques intrinsèques de la cellule [22]. La Figure 2-10 nous montre l'effet de la variation de l'irradiation sur la caractéristique I-V d'un panneau solaire.

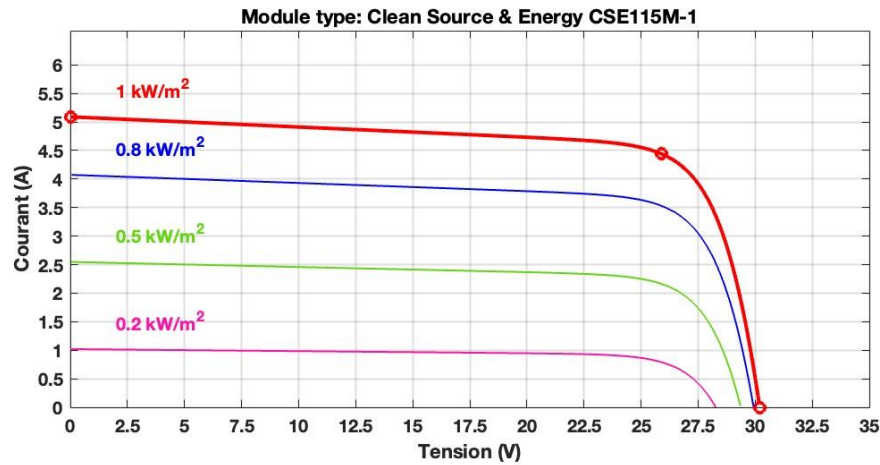


Figure 2-10 : Caractéristique I-V d'un panneau solaire avec différentes valeurs de l'irradiation [MATLAB]

2.6.1.2 Effet de la température

L'impact de la température (Figure 2-11) sur un panneau solaire se manifeste à la fois sur la tension et le courant, bien que la tension soit l'élément le plus significativement affecté. Lorsque la température augmente, la tension de sortie des cellules solaires diminue, ce qui peut entraîner une diminution du rendement global du panneau solaire. Cette observation découle d'une élévation de l'énergie cinétique des électrons au sein du semi-conducteur, entraînant une diminution de la largeur de la bande interdite et une augmentation des courants de fuite.

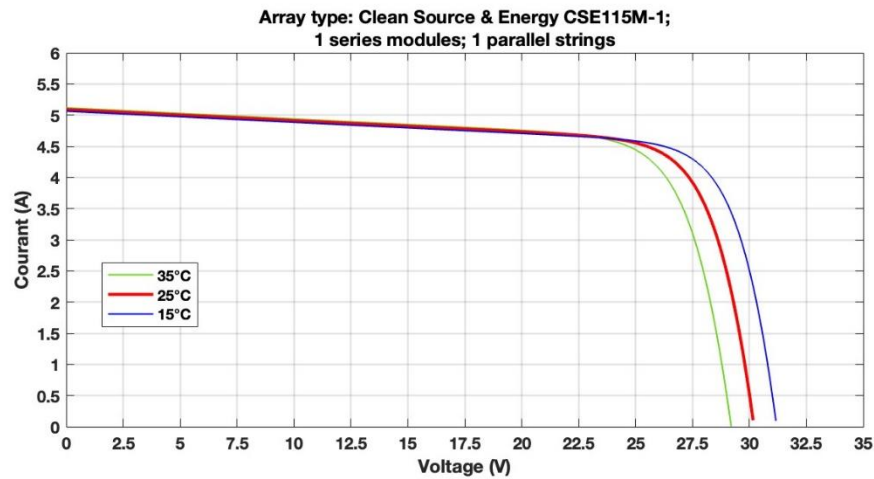


Figure 2-11 : Caractéristique I-V d'un panneau solaire avec différentes valeurs de la température [MATLAB]

Le courant généré (I) demeure presque constant malgré les fluctuations de température, étant donné qu'il est principalement influencé par l'irradiation reçue [22].

2.6.2 Caractéristique puissance-tension

La caractéristique P-V représente l'évolution de la puissance produite ($P = I \times V$) en fonction de la tension de sortie (V). Cette courbe est essentielle pour déterminer le point de puissance maximale (MPP) et évaluer la performance totale du système.

2.6.2.1 Impact de l'irradiation

L'augmentation de l'irradiation (Figure 2-12) se traduit par une augmentation de la quantité de lumière parvenant aux cellules photovoltaïques, induisant ainsi une augmentation proportionnelle du courant produit par le panneau. Cette augmentation du courant entraîne une hausse de la puissance de sortie, car la puissance est le résultat du produit de la tension par le courant ($P = V \times I$). Lorsque l'irradiation augmente, la courbe P-V se déplace vers des valeurs de puissance plus élevées [23].

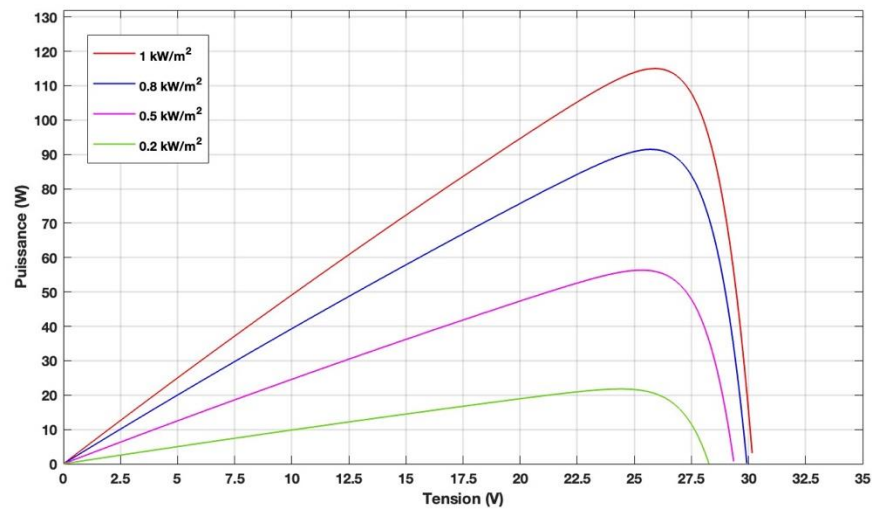


Figure 2-12 : Caractéristique P-V d'un panneau solaire avec différentes valeurs de l'irradiation [MATLAB]

2.6.2.2 Impact de la température

Une augmentation de la température (Figure 2-13) entraîne habituellement une diminution de la tension de sortie des panneaux photovoltaïques. Cette situation découle de l'accroissement de l'agitation thermique des électrons, entraînant ainsi une diminution de l'efficacité de la conversion de l'énergie solaire en électricité. Par conséquent, la capacité maximale de production du panneau solaire diminue [23].

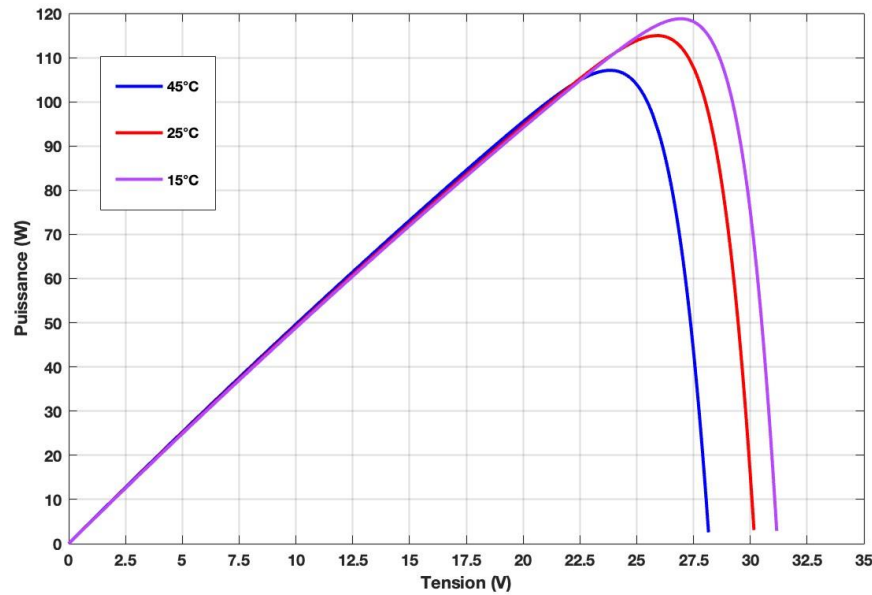


Figure 2-13 : Caractéristique P-V d'un panneau solaire avec différentes valeurs de la température [MATLAB]

Bien que cette section ne traite pas des impacts de l'ombrage sur les rendements des panneaux solaires, cette problématique complexe sera examinée dans le chapitre dédié à la simulation et à la validation expérimentale. Une analyse détaillée sera effectuée afin d'évaluer les effets de l'ombrage, en proposant des solutions basées sur des techniques avancées telles que l'algorithme PSO (Particle Swarm Optimization), qui a été développé dans le but d'optimiser la recherche du point de puissance maximale.

2.7 Convertisseur CC-CC élévateur

Dans le secteur de l'énergie solaire photovoltaïque, il est fréquent d'incorporer un dispositif électronique supplémentaire pour améliorer de manière continue la puissance récupérée par un générateur photovoltaïque. Le rôle de ce module sera de réguler la puissance entre le générateur photovoltaïque (GPV) et la charge, dans le but d'optimiser le couplage entre ces deux composants. Cette phase d'ajustement, fréquemment désignée

sous le terme de suivi du point de puissance maximale (MPPT), correspond en fait à un convertisseur CC-CC élaboré pour opérer dans des conditions spécifiques [24].

Les convertisseurs CC-CC sont des circuits électroniques qui servent à transformer une tension continue (CC) d'un niveau à un autre, principalement dans le but de réguler la tension ou de convertir l'énergie. Les convertisseurs CC-CC opèrent en ajustant le rapport cyclique d'un signal de commutation pour contrôler la tension de sortie [25]. Ils sont principalement constitués de condensateurs, d'inductances et d'interrupteurs de puissance (transistors). Dans un scénario idéal, tous ces dispositifs ne présentent aucune consommation de puissance active, ce qui explique les rendements élevés observés dans les hacheurs.

La méthode de découpage a permis de résoudre les problèmes de rendement insuffisant et d'encombrement des alimentations en série. Dans un système d'alimentation à découpage, la tension d'entrée est modulée à une fréquence spécifique par un transistor qui alterne entre l'état passant et bloqué. Cela conduit à la formation d'un signal de tension en forme de carré, qui peut être ensuite filtré pour produire une tension continue [26].

2.7.1 Type de connexion GPV-charge

Il existe deux configurations principales pour établir la connexion entre le générateur photovoltaïque et la charge : directe et indirecte.

- **Directe** : Dans ce mode de mise en place, le générateur photovoltaïque est relié directement à la charge, sans passer par un dispositif intermédiaire de conversion d'énergie. Ce genre de liaison est habituellement employé pour des applications à basse puissance où les fluctuations de tension et de courant ne sont pas essentielles [27].
- **Indirecte** : Ce montage intègre un système de transformation d'énergie, comme un convertisseur CC-CC, entre le panneau solaire et la charge. Ce dispositif de conversion assure le suivi du point de puissance maximale (MPPT) du

générateur photovoltaïque, assurant ainsi une extraction optimale de la puissance, indépendamment des conditions environnementales [27].

Le choix du convertisseur à utiliser est déterminé par les exigences de tension :

- Le convertisseur abaisseur a pour fonction de réduire la tension électrique.
- Le convertisseur élévateur a pour fonction d'augmenter la tension électrique.
- Le convertisseur abaisseur-élévateur permet de réguler la tension en l'augmentant ou en la diminuant.

Le choix entre une configuration de connexion directe ou indirecte dépend de divers facteurs, notamment [27]:

- ◆ **Exigences en tension** : Si la charge nécessite une tension différente de celle fournie par le générateur photovoltaïque, un raccordement indirect via un convertisseur CC-CC approprié est indispensable.
- ◆ **Type de la charge** : Des charges comme les équipements électroniques délicats peuvent exiger une tension et un courant constants, ce qui explique le recours à un convertisseur CC-CC.
- ◆ **Exigences de performance du système** : Afin d'optimiser les performances du système et d'extraire le plus de puissance possible du générateur photovoltaïque, une liaison indirecte avec MPPT est recommandée.
- ◆ **Coût** : Les liaisons directes sont généralement plus économiques puisqu'elles n'ont pas besoin de convertisseur CC-CC.

2.7.2 Modélisation et principe de fonctionnement du circuit d'un convertisseur CC-CC élévateur

Un convertisseur élévateur de tension, est un dispositif d'électronique de puissance conçu pour accroître la tension d'entrée afin d'obtenir une valeur de sortie supérieure. Le convertisseur élévateur est fréquemment employé dans des contextes nécessitant une élévation de la tension continue issue de la source d'alimentation, tel que dans les

domaines des systèmes photovoltaïques, des véhicules électriques et des appareils portables [28]. La Figure 2-14 illustre le circuit de base d'un convertisseur élévateur.

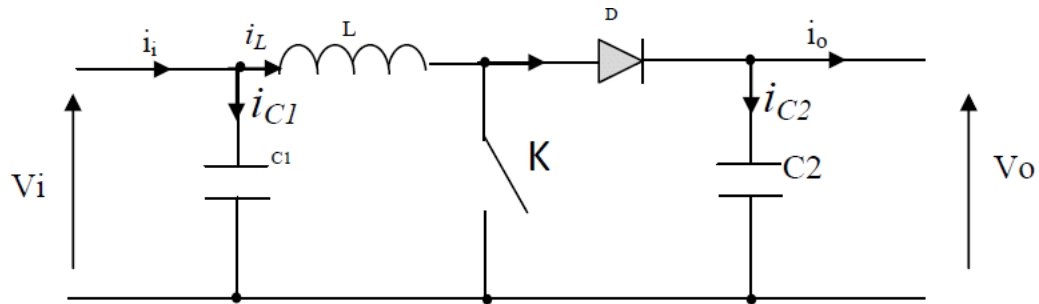


Figure 2-14 : Circuit de base d'un convertisseur CC-CC élévateur [29]

Séquence 1 : phase d'accumulation ($0 < t < \alpha T$)

L'interrupteur (K) est en position fermée, cela autorise le passage du courant à travers l'inductance (L), ce qui entraîne le stockage d'énergie sous forme de champ magnétique. Durant cette étape, la diode (D) est soumise à une polarisation inverse, ce qui empêche le courant de circuler vers la charge. La variation du courant est exprimée par :

$$V_L = L \frac{di_L}{dt} \quad (2-6)$$

Séquence 2 : phase de libération

L'interrupteur (K) est ouvert, le courant passant par l'inductance cherche un chemin pour maintenir sa circulation. La variation rapide du courant entraîne la production d'une tension induite aux bornes de l'inductance. Cette tension s'ajoute à la tension d'entrée, ce qui contraint le courant à circuler à travers la diode (D) en direction du condensateur (C2)

et de la charge (R). Cela se traduit par une tension de sortie plus élevée que la tension d'entrée. La tension de sortie est déterminée de la manière suivante [30]:

$$V_o = V_i + L \frac{di}{dt} \quad (2-7)$$

Équations fondamentales

Dans le cas d'un régime de conduction continue (où le courant circulant dans l'inductance ne s'annule pas), la relation entre la tension d'entrée V_i et la tension de sortie V_o est définie par :

$$V_o = \frac{V_i}{(1 - \alpha)} \quad (2-8)$$

Il est observé que la tension de sortie du convertisseur est fonction uniquement de la tension d'entrée et du rapport cyclique α . Étant toujours situé dans l'intervalle entre 0 et 1, le convertisseur fonctionne toujours comme un élévateur de tension [30].

2.8 Revue de la littérature

2.8.1 Technique de la commande MPPT

Les performances d'un générateur dans un système photovoltaïque (PV) sont influencées par diverses conditions environnementales, telles que l'irradiation solaire et la température. Ces fluctuations ont un impact sur le point de puissance maximale (MPP), qui représente le niveau de puissance maximal fourni par le générateur. Pour optimiser l'utilisation de l'énergie disponible, il est courant d'utiliser des commandes MPPT afin de maintenir en permanence le suivi du point de puissance maximale.

La première technique de suivi du point de puissance maximale (MPPT) a été développée dans les années 1970 pour être utilisée principalement dans le secteur de l'aéronautique, par la société "Honeywell" en collaboration avec le centre de recherche de la NASA. Par la suite, de nombreuses techniques MPPT ont été développées et mises en œuvre. On peut classer ces techniques en deux catégories principales : les MPPT locaux et les MPPT globaux [31].

Les MPPT locaux sont principalement développés pour contrôler le point de puissance maximale des systèmes photovoltaïques dans des conditions d'irradiation uniforme. Toutefois, en cas d'ombrage partiel entraînant l'apparition de plusieurs pics de puissance sur la courbe P-V, ces méthodes révèlent leurs limitations. Elles se limitent à une seule fenêtre de recherche et ne tiennent pas compte des points de puissance maximale globaux (GMPP). Malgré les performances satisfaisantes de ces méthodes traditionnelles dans des environnements simples, leur efficacité diminue lorsqu'elles sont confrontées à des environnements complexes. En revanche, les méthodes optimisées et artificielles se caractérisent par leur aptitude à détecter le GMPP dans des environnements complexes (ombrage partiel ou dynamique), même si leur déploiement requiert une plus grande complexité algorithmique. Parmi les techniques utilisées, on peut citer les méthodes d'intelligence artificielle, les métaheuristiques et les MPPT hybrides [31].

2.8.2 Méthode perturbation et observation (P&O)

L'algorithme de cette méthode est couramment utilisé pour rechercher le point de puissance maximale des panneaux photovoltaïques. Il se caractérise par une structure simple, un coût modéré, une mise en œuvre aisée, un nombre limité de paramètres, la capacité d'incorporer des améliorations et peut conduire à un rendement élevé.

La méthode P&O repose sur la perturbation régulière de la tension de sortie du système photovoltaïque, suivie de l'observation de l'impact de cette perturbation sur la puissance générée. Lorsqu'une perturbation provoque une augmentation de la puissance, cette

perturbation persiste dans la même direction. Lorsque la perturbation provoque une réduction de la puissance, la direction de la perturbation est inversée [32].

L'efficacité de l'algorithme P&O est conditionnée par l'amplitude de la perturbation et la fréquence de son application. Des perturbations excessives peuvent provoquer une instabilité et induire des oscillations du système autour du point de puissance maximale, sans toutefois parvenir à s'y stabiliser de manière durable. Des perturbations de faible amplitude ou de fréquence trop basse peuvent entraîner une réponse lente du système aux variations des conditions environnementales [32]. La Figure 2-15 nous montre le diagramme de cette méthode.

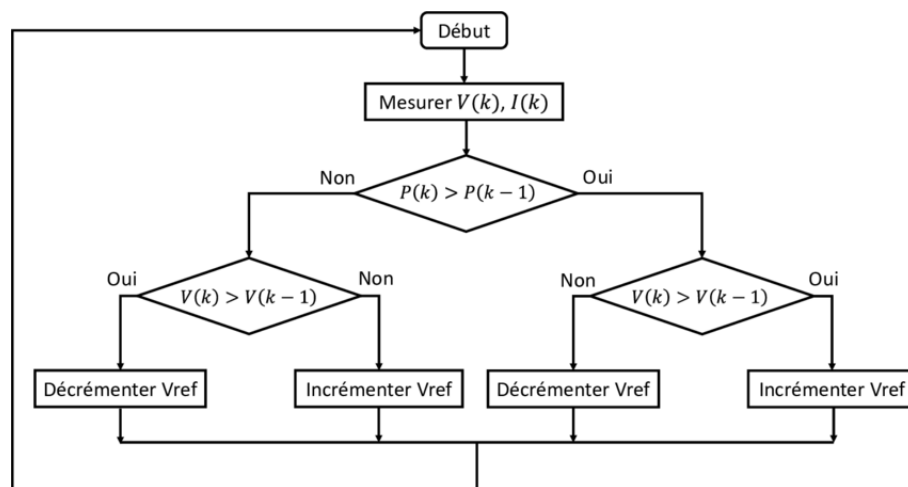


Figure 2-15 : Organigramme de l'algorithme P&O [33]

2.8.3 Méthode de la conductance incrémentale (INC)

Contrairement à la méthode "perturbation et observation" qui implique des perturbations aléatoires et des observations, l'approche de la conductance incrémentale se base sur les variations de conductance (inverse de la résistance) pour détecter de façon plus directe et potentiellement plus rapide le point de puissance maximale [24].

La méthode conductance incrémentale consiste à analyser les variations de tension et de courant afin d'établir si le système est en condition de point de puissance maximale (MPP). L'algorithme repose sur l'hypothèse selon laquelle la dérivée de la puissance par rapport à la tension ($\Delta P/\Delta V$) est égale à zéro au point de puissance maximale (MPP), positive à sa gauche et négative à sa droite.

Afin de mettre en œuvre cette approche, l'algorithme régule la tension de sortie en évaluant à la fois la conductance instantanée (I/V) et la conductance différentielle ($\Delta I/\Delta V$).

L'équation fondamentale appliquée est : $\frac{\Delta I}{\Delta V} + \frac{I}{V} = 0$.

Si $\frac{\Delta I}{\Delta V} + \frac{I}{V} > 0$, cela indique que le point de fonctionnement actuel se situe à gauche du MPP et l'algorithme augmente la tension afin de converger vers le MPP.

Si $\frac{\Delta I}{\Delta V} + \frac{I}{V} < 0$, Cela indique que le point de fonctionnement actuel se situe à droite du MPP et l'algorithme diminue la tension afin de converger vers le MPP [34]. La Figure 2-16 montre l'organigramme de l'algorithme de la conductance incrémentale.

Avantages

- ◆ Précision : l'approche est théoriquement plus précise que Perturb and Observe car elle vise directement le MPP en utilisant les propriétés électriques du système PV.
- ◆ Rapidité de réponse : Elle peut réagir plus rapidement aux changements des conditions environnementales, car elle ajuste la tension de fonctionnement en fonction des calculs dérivés plutôt que par des perturbations aléatoires.
- ◆ Efficacité à diverses conditions : L'algorithme peut être plus efficace dans des conditions météorologiques changeantes ou fluctuantes.

Limites

- ◆ Complexité : Bien que relativement simple à implémenter, l'algorithme de la conductance incrémentale nécessite le calcul de dérivées approximées en temps réel, ce qui peut légèrement augmenter la charge de calcul par rapport à la méthode Perturb and Observe. Toutefois, ces calculs restent élémentaires et faciles à exécuter sur des microcontrôleurs standards.
- ◆ Coût : L'algorithme ne requiert pas nécessairement un matériel plus performant que les autres méthodes classiques. Toutefois, selon la fréquence d'échantillonnage et les ressources disponibles sur le microcontrôleur utilisé, la mise en œuvre de calculs répétés en temps réel peut exiger un traitement légèrement plus rapide, ce qui pourrait influencer le choix du matériel ou du logiciel.

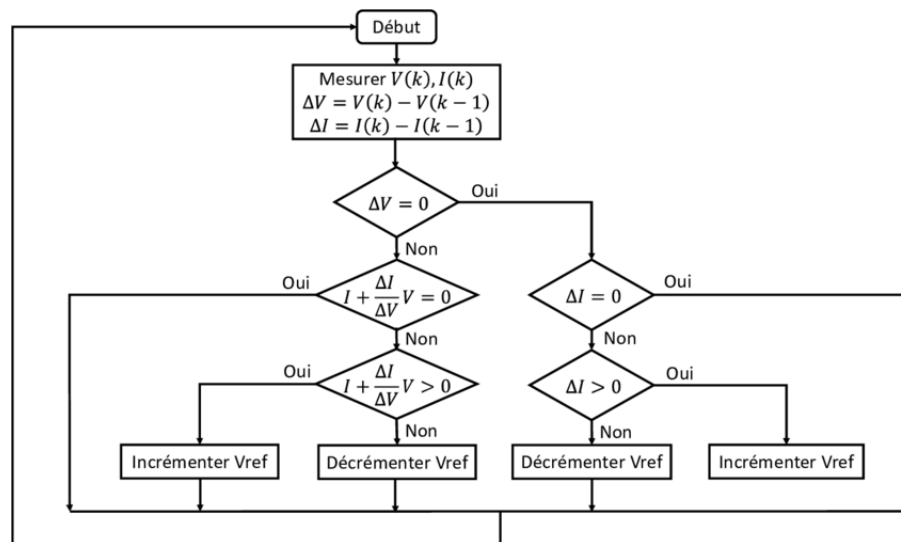


Figure 2-16 : Organigramme de la conductance incrémentale [34]

2.9 Conclusion

Ce chapitre a examiné les bases des systèmes photovoltaïques en analysant en détail leurs composants essentiels et les principes sur lesquels ils reposent. L'importance du convertisseur CC-CC élévateur a été soulignée, car il joue un rôle clé dans l'ajustement de la tension produite par les panneaux solaires pour répondre aux exigences des charges ou des appareils connectés en aval. En raison de sa capacité à augmenter la tension et à offrir de la flexibilité, ce dispositif joue un rôle essentiel dans l'amélioration de l'efficacité des systèmes photovoltaïques.

Les techniques de poursuite du point de puissance maximale (MPPT) ont fait l'objet d'un sommaire, mettant en lumière leur importance cruciale dans l'optimisation de l'extraction d'énergie des panneaux solaires. Malgré l'efficacité des méthodes conventionnelles comme P&O et INC dans des conditions uniformes, elles révèlent leurs limitations face à des phénomènes complexes tels que l'ombrage partiel. Ces contraintes soulignent l'impératif de recourir à des algorithmes sophistiqués afin de relever ces défis.

Cette transition nous amène logiquement vers le chapitre suivant, lequel sera dédié à l'algorithme PSO (Optimisation par Essaim Particulaire). Cette méthode algorithmique, basée sur le concept de swarm intelligence, constitue une approche sophistiquée visant à améliorer le suivi du point de puissance maximale, même dans des environnements complexes. Nous examinerons le principe, les avantages et l'intégration de cette technologie dans les systèmes photovoltaïques, afin de formuler des solutions efficaces visant à optimiser le rendement énergétique.

CHAPITRE 3- ALGORITHMME PSO

3.1 Introduction

L'algorithme d'optimisation par essaim de particules (PSO) est une méthode bio-inspirée qui repose sur les interactions sociales observées dans la nature. Cette méthode, fréquemment employée dans le domaine de l'ingénierie, se révèle particulièrement performante pour la résolution de problèmes complexes liés à l'optimisation. Dans le secteur du photovoltaïque, l'algorithme PSO se caractérise par sa capacité à localiser le Global Maximum Power Point (GMPP), même en présence d'ombrage partiel, une situation où les méthodes classiques rencontrent généralement des difficultés [35].

Ce chapitre présentera de manière succincte le fondement du PSO puis se focalisera sur sa mise en œuvre pour optimiser le rendement des systèmes photovoltaïques dans des environnements caractérisés par une irradiation non uniforme.

3.2 Définition

Le Particle Swarm Optimization (PSO) est une méthode bio-inspirée largement employée dans la résolution de problèmes complexes d'optimisation. Créé en 1995 par Kennedy et Eberhart, cet algorithme est basé sur l'observation du comportement social collectif dans la nature, tel que les déplacements coordonnés des oiseaux ou des bancs de poissons.

Dans l'algorithme PSO, un ensemble de particules parcourt un espace de recherche afin de trouver l'optimum global. Chaque particule, envisagée comme une solution potentielle, est caractérisée par deux paramètres fondamentaux : sa position et sa vitesse. Ces paramètres sont ajustés à chaque itération en se basant sur trois facteurs principaux [36] :

- La vitesse et la position actuelles ;

- La meilleure position individuelle trouvée (composante cognitive) ;
- Et la meilleure solution collective identifiée par l'ensemble des particules (composante sociale).

L'orientation future de chaque particule découle d'un équilibre dynamique entre son vécu personnel et celui de ses voisins, lui offrant la possibilité de jongler entre une exploration globale de l'espace et une exploitation locale des zones prometteuses. De manière graduelle, le groupe d'individus converge vers des solutions optimales en combinant les interactions sociales et la mémoire individuelle.

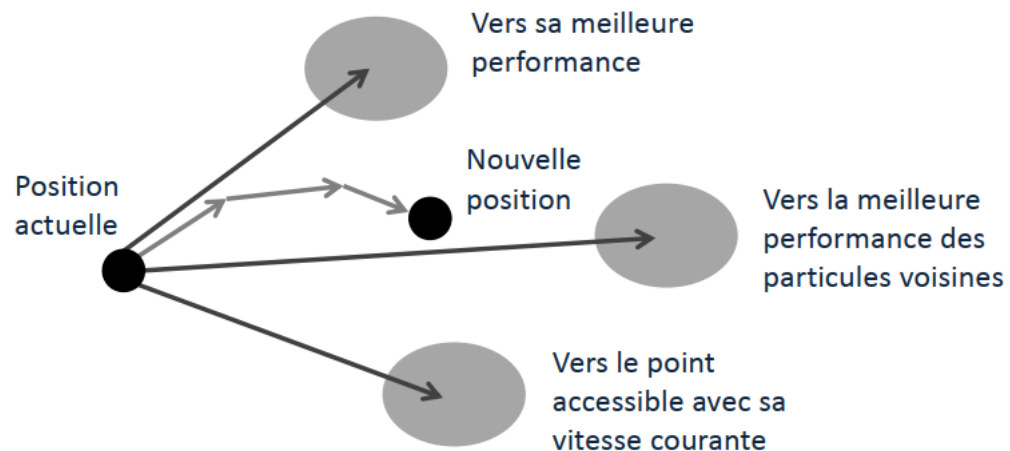


Figure 3-1 : Stratégie de déplacement d'une particule [36]

3.3 Topologies PSO

L'algorithme d'optimisation par essaim de particules (PSO) met en œuvre diverses topologies afin de réguler les interactions entre les particules de l'essaim, ce qui exerce une influence significative sur la dynamique de recherche et les performances de l'optimisation. Les trois principales topologies utilisées dans PSO sont la topologie

globale, la topologie locale et la topologie de von Neumann. Chaque topologie possède des caractéristiques et des applications qui lui sont propres [37].

3.3.1 Topologie globale

La Figure 3-2 illustre un schéma caractéristique d'une topologie globale. Dans ce schéma, chaque nœud (ou particule) est relié à tous les autres nœuds du réseau, ce qui signifie que chaque particule peut interagir ou être influencée par la meilleure position identifiée par n'importe quelle autre particule dans l'essaim. Ainsi, l'algorithme avec cette topologie peut atteindre la convergence rapide, mais il y a un risque de tomber dans un optimum local [38, 39].

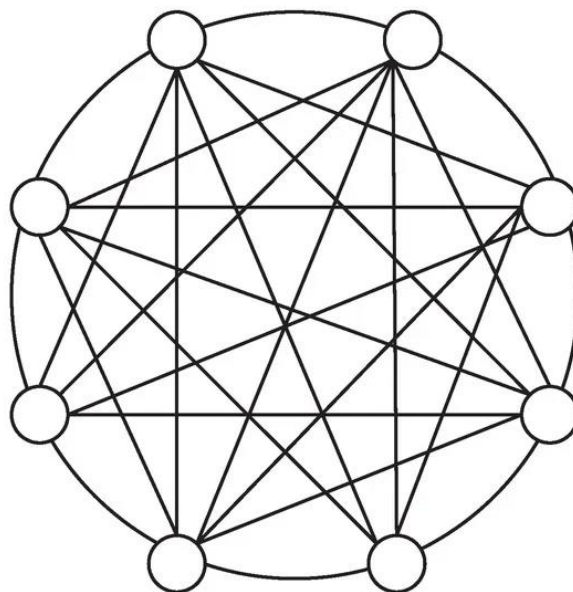


Figure 3-2 : Schéma typique d'une topologie globale [39]

3.3.2 Topologie locale

La Figure 3-3 représente une topologie locale. Dans ce schéma, chaque nœud ou particule est relié uniquement à ses voisins les plus proches, créant ainsi une structure en anneau. Ainsi, chaque particule dans cette topologie est uniquement influencée par les performances de ses voisins immédiats, et non par la performance globale de tout l'essaim. Ce genre de configuration favorise une exploration plus variée de l'espace de recherche en diminuant le risque de convergence prématurée vers des optima locaux non-globaux. Cela est rendu possible en permettant à différentes parties de l'essaim d'explorer de manière indépendante différentes régions [38, 39].

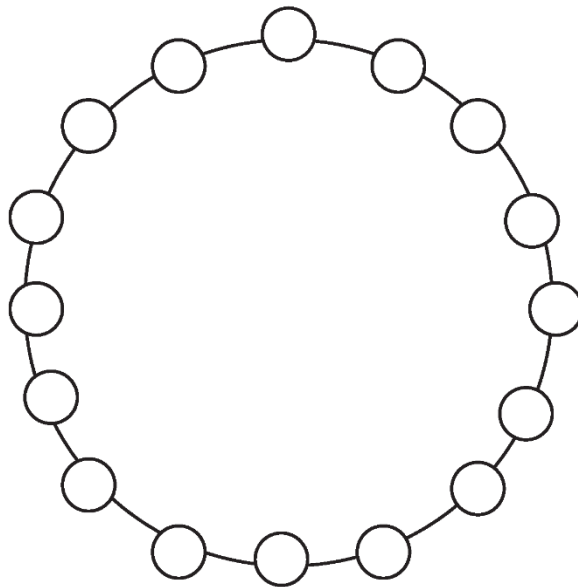


Figure 3-3 : Schéma typique d'une topologie locale [39]

3.3.3 Topologie de von Neumann

La figure présente la topologie de Von Neumann. Cette topologie, baptisée du nom du mathématicien John von Neumann, se présente comme une structure en grille bidimensionnelle dans laquelle chaque nœud (ou particule) est relié exclusivement à ses

quatre voisins les plus proches, à savoir ceux situés au nord, au sud, à l'est et à l'ouest [38, 39].

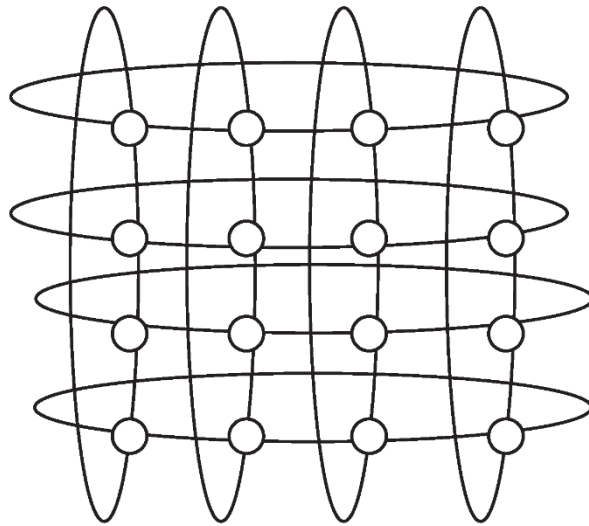


Figure 3-4 : Schéma typique d'une topologie de von Neumann [39]

Avantages

- ◆ Un équilibre approprié entre l'exploration et l'exploitation.
- ◆ La réduction des risques de convergence prématurée est obtenue par une diffusion plus lente des informations.

Limites

- ◆ La complexité de déploiement est légèrement plus élevée par rapport à la configuration en réseau local.

Voici un tableau comparatif des topologies.

Tableau 3-1 : Tableau comparatif des topologies

<i>Critère</i>	Globale	Locale	Von Neumann
<i>Vitesse de convergence</i>	Rapide	Moyenne	Moyenne
<i>Exploration globale</i>	Faible	Élevée	Équilibrée
<i>Sensibilité aux maxima locaux</i>	Élevée	Faible	Faible
<i>Robustesse</i>	Moyenne	Élevée	Élevée

3.4 Modèle mathématique du PSO

Le principe fondamental de l'algorithme d'optimisation par essaim de particules (PSO) repose sur un modèle mathématique élémentaire mais efficace, décrivant la trajectoire d'évolution de chaque particule au sein de l'espace de recherche. Cette partie expose les équations de base du PSO, accompagnées de leur interprétation afin d'améliorer la compréhension de son mécanisme.

Étape 1 : Initialisation de l'essaim

Chaque particule est une solution candidate, généralement définie par un paramètre tel que le rapport cyclique (D) du convertisseur DC-DC élévateur utilisé dans un système PV. Les paramètres initiaux sont :

- Position de chaque particule $x_i(0)$ (par exemple une valeur de D).
- Vitesse de chaque particule $v_i(0)$.
- Meilleure position individuelle P_{best_i} .
- Meilleure position globale g_{best} .

Ces paramètres sont sujets à des évolutions dynamiques, ce qui autorise chaque particule à se déplacer dans l'espace de recherche tout en maintenant un équilibre entre exploration et exploitation.

L'exploration correspond à la capacité de l'algorithme à rechercher de nouvelles régions de l'espace de solutions afin d'éviter les optima locaux. L'exploitation, quant à elle, consiste à affiner la recherche autour des meilleures solutions déjà identifiées afin de converger rapidement vers un optimum global.

Étape 2 : Équation de mise à jour

La nouvelle vitesse et position d'une particule sont données par les équations suivantes :

$$v_i(t+1) = wv_i(t) + c_1r_1(p_{best_i}(t) - x_i(t)) + c_2r_2(g_{best}(t) - x_i(t)) \quad (3-1)$$

Où :

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

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

n_p : nombre de particules dans l'espace de recherche;

w : constante appelée coefficient d'inertie;

c_1 et c_2 : constantes appelées coefficients d'accélération;

r_1 et r_2 : deux nombres choisis aléatoirement entre 0 et 1;

p_{best_i} : la meilleure position de la particule i ;

g_{best} : la meilleure position globale de toutes les particules.

$$x_i(t+1) = x_i(t) + v_i(t+1) \quad (3-2)$$

Étape 3 : Évaluation de la fonction objectif

La fonction objectif est généralement la puissance délivrée par le système PV ($P = V \times I$), calculée pour chaque position $x_i(t)$:

$$f(x_i(t)) = P = V(x_i(t)) \times I(x_i(t))$$

Le but est de maximiser cette fonction.

Étape 4 : Mise à jour des meilleures positions

À chaque itération, les meilleures positions individuelle (\mathbf{p}_{best_i}) et globale (\mathbf{g}_{best}) sont mises à jour en fonction des valeurs maximales de $f(x)$ obtenues :

Si $f(x_i(t)) > f(\mathbf{p}_{best_i})$, alors $\mathbf{p}_{best_i} = x_i(t)$ et si $f(x_i(t)) > f(\mathbf{g}_{best})$, alors $\mathbf{g}_{best} = x_i(t)$. Sinon une optimisation de \mathbf{v}_i et x_i de toutes les particules est appliquée, en utilisant les équations (3-1) et (3-2). Si l'éclairement reste constant, le point de puissance maximale reste constant, il n'est donc pas nécessaire de perturber le système de manière continue pour trouver un nouveau point de puissance maximale.

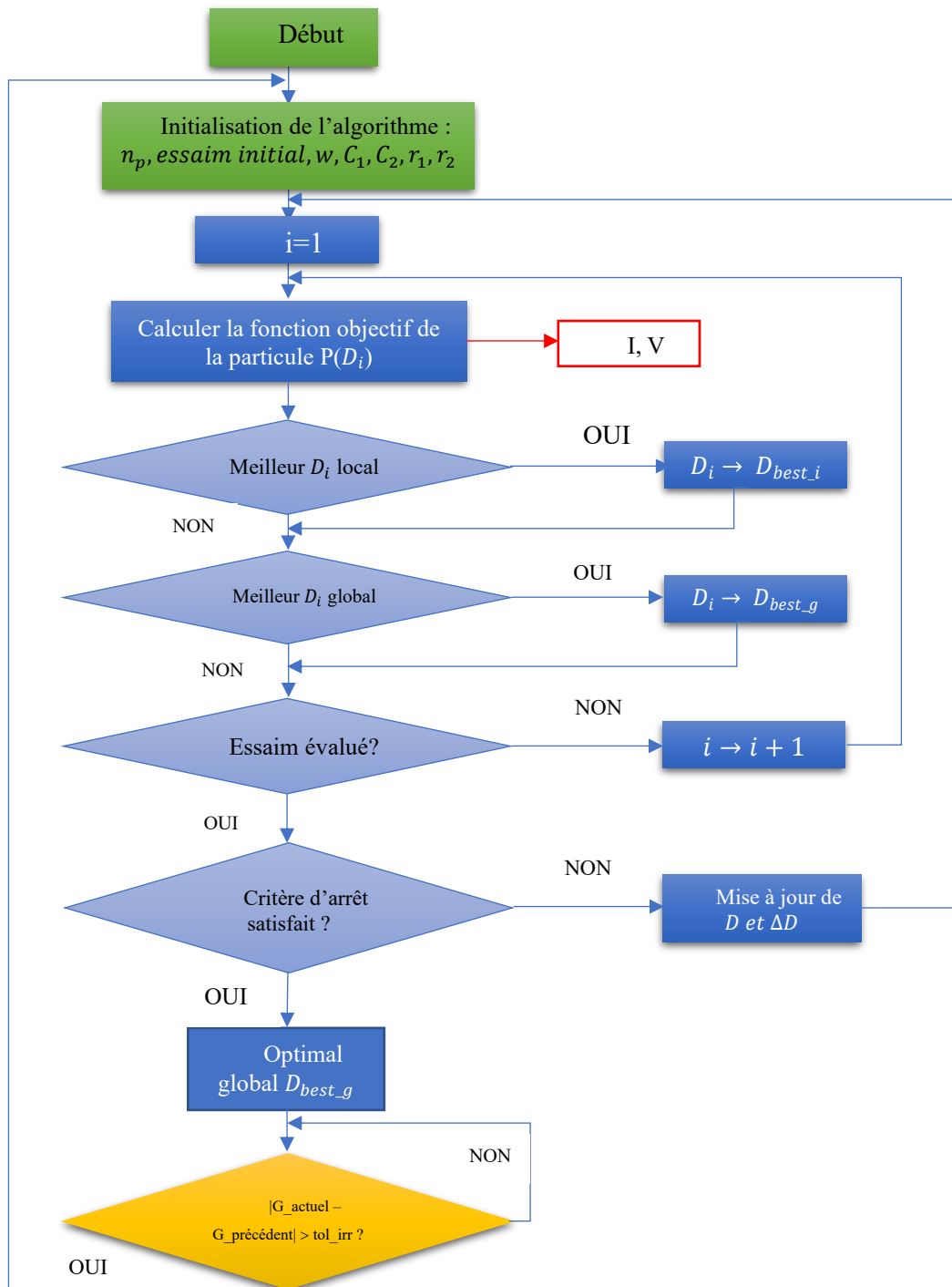


Figure 3-5 : Organigramme de l'algorithme MPPT PSO

3.5 Avantages et inconvénients du PSO pour le MPPT

L'algorithme PSO pour le MPPT présente de nombreux avantages mais possède toutefois certains défis et limitations.

3.5.1 Avantages

Parmi les avantages, nous pouvons citer :

- Le PSO se révèle efficace pour les systèmes photovoltaïques confrontés à des ombrages partiels, dans lesquels la présence de points de puissance maximale locale peut induire en erreur les algorithmes de suivi du point de puissance maximale (MPPT) conventionnels, tels que la méthode perturbation et observation.
- Il détermine le maximum global au sein de courbes P–V comportant plusieurs maxima.
- Le PSO présente une convergence rapide vers le point de puissance maximale et s'ajuste de manière dynamique aux fluctuations rapides des conditions d'irradiation et de température.
- L'algorithme de l'optimisation par essaim de particules (PSO) se caractérise par sa simplicité d'implémentation, nécessitant un nombre restreint de paramètres à ajuster.

3.5.2 Inconvénients

Les défis et limitations de l'algorithme PSO dans le contexte de l'optimisation du point de puissance maximale se manifestent principalement par sa sensibilité aux paramètres d'initialisation.

Bien que la charge de calcul soit modérée et compatible avec des microcontrôleurs standards, le PSO peut tout de même nécessiter un temps de convergence légèrement plus long que des méthodes classiques, en particulier si le nombre de particules est élevé ou si les paramètres sont mal réglés. En effet, l'efficacité du PSO est étroitement liée à la

sélection des coefficients d'accélération et du facteur d'inertie, lesquels jouent un rôle crucial dans l'équilibre entre les phases d'exploration et d'exploitation [40]. En outre, bien que le PSO soit en mesure de détecter le maximum global dans des environnements complexes, tels que ceux présentant un ombrage partiel, il peut parfois exiger un nombre élevé d'itérations pour atteindre la convergence, ce qui prolonge le temps de calcul [41]. Enfin, des oscillations autour du point de puissance maximale peuvent se manifester si les paramètres ne sont pas adéquatement réglés, ce qui entraîne une diminution marginale de l'efficacité énergétique du système photovoltaïque [42].

3.6 Conclusion

Ce chapitre a contribué à approfondir la compréhension de l'algorithme PSO en examinant ses origines, son modèle mathématique, ses topologies et ses applications dans le domaine de l'optimisation du point de puissance maximale (MPPT). Nous avons souligné les atouts de cette méthode, en particulier sa capacité à identifier le point de puissance maximale global dans des environnements complexes tels que ceux présentant un ombrage partiel, tout en mettant en évidence ses défis, tels que la sensibilité aux paramètres et le coût computationnel.

Dans le chapitre suivant, nous allons mettre en pratique ces concepts théoriques à travers des simulations et des expérimentations. Nous procéderons à l'évaluation des performances de l'optimisation par essaim de particules (PSO) dans divers scénarios, allant des conditions idéales aux situations de total ombrage et de dynamique, dans le but de confirmer son efficacité et sa pertinence pratique.

CHAPITRE 4- SIMULATION ET ESSAI EXPÉRIMENTAL

4.1 Introduction

La simulation représente un instrument essentiel pour l'évaluation des performances théoriques d'un système. Elle permet d'évaluer ce dernier dans des conditions contrôlées tout en facilitant la surveillance de ses performances. En établissant un lien entre l'étude théorique et la phase de mise en œuvre, la simulation occupe une fonction essentielle dans le processus de conception.

Dans les systèmes photovoltaïques, l'ombrage partiel, résultant d'une irradiation non uniforme dans des conditions imprévisibles, complique de manière significative la détermination du point de puissance maximale (PPM). Cette problématique requiert une approche à la fois optimisée et robuste afin de garantir une exploitation énergétique efficace du système photovoltaïque.

Ce chapitre expose la simulation ainsi que la mise en œuvre expérimentale de la méthode d'optimisation fondée sur l'algorithme PSO. Les simulations ont été effectuées à l'aide de MATLAB/Simulink, tandis que l'implémentation matérielle ainsi que l'acquisition de données en temps réel ont été réalisées à l'aide d'un contrôleur Arduino Mega 2560. L'ensemble des essais expérimentaux a été réalisé au sein du laboratoire d'électronique de puissance de l'Université du Québec à Trois-Rivières. Enfin, les résultats de la simulation, accompagnés de leur analyse, seront présentés en conclusion de ce chapitre afin d'illustrer les performances de la méthode d'optimisation proposée.

4.2 Champ photovoltaïque

Le champ photovoltaïque (PV) employé dans cette étude est constitué de 2 modules photovoltaïques de type « HES-100-36PV », interconnectés en série. Le tableau 4.1 présente les caractéristiques électriques de notre générateur photovoltaïque.

Tableau 4-1 : Caractéristiques électriques du module photovoltaïque

Puissance maximale (MPP)	100 W
Tension à circuit ouvert (V_{oc})	20.6 V
Tension à puissance maximale (V_{mpp})	18.2 V
Courant de court-circuit (I_{sc})	6.23 A
Courant à puissance maximale (I_{mpp})	5.5 A

4.2.1 Effet de l'ombrage sur notre champ photovoltaïque

L'ombrage constitue un phénomène susceptible de diminuer de manière significative les performances des panneaux solaires, en particulier en entravant leur capacité à produire de l'énergie de manière optimale. Une recherche a révélé qu'un panneau photovoltaïque peut perdre jusqu'à 77,48 % de sa puissance lorsque ne serait-ce qu'une seule cellule est ombragée [43].

De plus, dans les situations d'ombrage partiel, la courbe puissance-tension (P-V) du panneau photovoltaïque exhibe plusieurs points de puissance maximale locaux ainsi qu'un point de puissance maximale global (Figure 4-1), ce qui rend la détermination du point de puissance maximale global particulièrement complexe. Ces maxima locaux résultent de l'interaction entre des zones ombragées et des zones non ombragées, engendrant ainsi des régions de performance variées au sein du panneau [44].

Bien que des technologies telles que les diodes de dérivation soient intégrées dans les panneaux solaires afin de contourner les cellules ombragées, une gestion efficace des maxima locaux et globaux requiert l'application de techniques avancées de suivi du point de puissance maximale (MPPT), telles que l'algorithme de l'optimisation par essaim de particules (PSO). Ces méthodes facilitent l'identification du véritable point de puissance maximale (MPP) global, garantissant ainsi une production énergétique optimale, même dans des conditions d'ombrage complexes.

La Figure 4-1 nous montre la caractéristique P-V de notre générateur photovoltaïque où le panneau 1 est soumis à une irradiance de 1000 W/m^2 et le panneau 2 à 600 W/m^2 . Cette même figure nous permet de visualiser la courbe P-V de notre GPV dans une condition sans ombrage ou dite idéale (tous les panneaux ont une irradiance de 1000 W/m^2). La température est à 25°C .

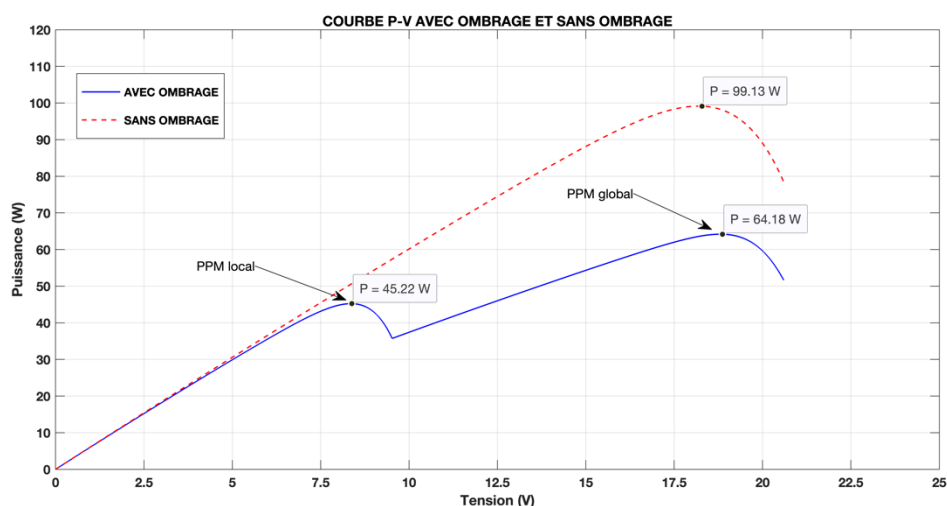


Figure 4-1 : Courbe P-V de notre GPV avec ombrage et sans ombrage [MATLAB]

Le tracé du diagramme P-V non ombragé (en rouge) illustre une augmentation régulière avec une puissance maximale globale (GMPP) de 99.13 W . Cette valeur de puissance correspond au point de fonctionnement optimal attendu, caractérisé par une irradiance uniforme sur l'ensemble des panneaux solaires, leur permettant de fonctionner à pleine capacité.

La courbe P-V, représentée en bleu avec un ombrage, illustre une déformation causée par l'effet de l'ombrage partiel. Deux valeurs maximales sont identifiées : la puissance maximale locale (LMPP) est de 45.22 W et la puissance maximale globale (GMPP) est de 64.18 W .

4.2.2 Analyse de l'impact de l'ombrage

- **Réduction de la puissance** : L'ombrage provoque une diminution significative de la puissance maximale produite, passant de 99.13 W (en l'absence d'ombrage) à 64.18 W (en présence d'ombrage), ce qui représente une perte d'environ 35.26 %. Les diodes de dérivation contribuent à réduire les pertes en court-circuit en court-circuitant les cellules ombragées. Toutefois, leur performance est restreinte en présence de plusieurs maxima locaux.
- **Formation d'un maximum local** : Les conditions d'ombrage partiel engendrent l'apparition de plusieurs points de puissance maximale locale. Cette situation complique la tâche des algorithmes classiques de suivi du point de puissance maximale (MPPT), tels que la méthode Perturb and Observe (P&O), qui peuvent être amenés à converger vers un maximum local plutôt que vers le maximum global.
- **Perturbations de la courbe** : Les variations constatées sur la courbe avec ombrage reflètent les déséquilibres dans la production d'énergie entre les cellules soumises à l'ombrage et celles qui ne le sont pas.

4.3 Dimensionnement du convertisseur élévateur

L'ajustement des composants de notre convertisseur élévateur est crucial pour garantir une performance stable et optimale. Cela nous donnera la possibilité de transmettre l'énergie de notre GPV du côté de la charge. Ce dimensionnement est basé sur les spécificités du système, notamment la puissance de sortie ($P_{out} = 100 \text{ W}$), la tension de sortie ($V_{out} = 38 \text{ V}$), la tension d'entrée ($V_{in} = 18 \text{ V}$), la fréquence de commutation ($f_{sw} = 10 \text{ kHz}$) et une ondulation du courant maximal tolérée de 0.5%.

La discontinuité se produit lors de la chute du courant à travers l'inductance à zéro, ce qui peut provoquer une transition non souhaitée vers le mode de conduction discontinue (DCM). Ceci peut entraîner :

- Une augmentation des pertes de commutation.
- Une altération de la stabilité du système.
- Une diminution de l'efficacité énergétique.

Afin de prévenir ces difficultés, il est essentiel de concevoir les composants (inductance, capacité, etc.) en tenant compte spécifiquement des situations dynamiques, telles que les changements rapides d'irradiance ou les zones d'ombre.

4.3.1 Rapport cyclique (D)

Lorsqu'on traite des paramètres à considérer, il est primordial d'initier l'analyse en profondeur du rapport cyclique. Celui-ci joue un rôle essentiel dans le processus et peut influencer de manière significative les résultats obtenus. Le rapport cyclique, connu sous le nom de rapport de marche, représente la fraction de temps pendant laquelle le convertisseur est actif par rapport à la durée totale de la période du convertisseur. Sous l'hypothèse d'un régime de conduction continue (où le courant dans l'inductance ne s'annule pas), la tension de sortie V_{out} d'un convertisseur élévateur est reliée à la tension d'entrée V_{in} et au rapport cyclique D par la relation de l'équation (2-8). Le rapport cyclique est déterminé en se basant sur l'équation suivante :

$$D = 1 - \frac{V_{in}}{V_{out}} = 1 - \frac{18}{38} \quad (4-1)$$

Le rapport cyclique est $D = 0.5263$ ce qui veut dire que l'interrupteur doit être fermé 52.63 % du temps pour atteindre la tension de sortie requise.

4.3.2 Inductance (L)

L'inductance est calculée de manière à assurer le fonctionnement du convertisseur en mode de conduction continue (Continuous Conduction Mode, CCM) et éviter un fonctionnement en mode discontinu. La valeur minimale de l'inductance est déterminée par :

$$L_{min} = \frac{V_{in} \times (1 - D)}{\Delta I_L \times f_{sw}} \quad (4-2)$$

Où $\Delta I_L = 30\% \times I_{in} = 0.3 \times \frac{P_{out}}{V_{in}}$ est l'ondulation maximale du courant dans l'inductance (20 – 40% du courant nominal).

L'inductance minimale nécessaire est de 0.000516 H soit 516 μ H. Nous allons choisir $L = 680 \mu$ H légèrement supérieure pour augmenter la marge de sécurité, ce qui permet de gérer les variations de courant dues à la discontinuité.

4.3.3 Capacité de filtrage (C)

Le condensateur est conçu de manière à limiter l'amplitude de l'ondulation à une valeur inférieure ou égale à 1% de la tension de sortie. La valeur minimale de la capacité est calculée par :

$$C_{min} = \frac{I_{out} \times D}{f_{sw} \times \Delta V_{out}} \quad (4-3)$$

Où :

$\Delta V_{out} = 1\%$ de la tension de sortie.

Une capacité minimale de 138.4 μ F est donc nécessaire pour réduire efficacement l'ondulation de la tension de sortie. Dans notre cas nous allons choisir $C = 220 \mu$ F, ce qui permet de minimiser les fluctuations de tension.

4.3.4 Résistance de charge (R)

La résistance de charge est donnée par :

$$R = \frac{V_{out}^2}{P_{out}} \quad (4-4)$$

On trouve $R \approx 14.44 \Omega$ mais nous allons prendre une valeur légèrement supérieure pour notre résistance $R = 15 \Omega$. Bien que la charge puisse varier dans une application réelle (par exemple en fonction d'un moteur, d'une batterie ou d'un profil de consommation), nous considérons ici une charge résistive fixe afin de faciliter l'analyse et d'assurer un fonctionnement stable du convertisseur. Cette hypothèse permet également de dimensionner les composants du circuit de manière cohérente tout au long de la simulation.

Les valeurs des composants du convertisseur choisis sont récapitulées par le tableau

Tableau 4-2 : Valeurs des composants du convertisseur élévateur

<i>Composants</i>	$C_{in} (\mu F)$	$C_{out} (\mu F)$	$L (\mu H)$	$f (kHz)$	$R (\Omega)$
<i>Valeurs</i>	220	220	680	10	15

4.4 Implémentation de l'algorithme PSO dans stateflow

Afin d'évaluer l'efficacité des algorithmes MPPT (P&O et PSO), une modélisation de simulation a été élaborée à l'aide de Simulink. Le schéma ci-dessus (Figure 4-2) illustre de manière exhaustive l'agencement du système, englobant le générateur photovoltaïque, le convertisseur élévateur et les modules de contrôle.

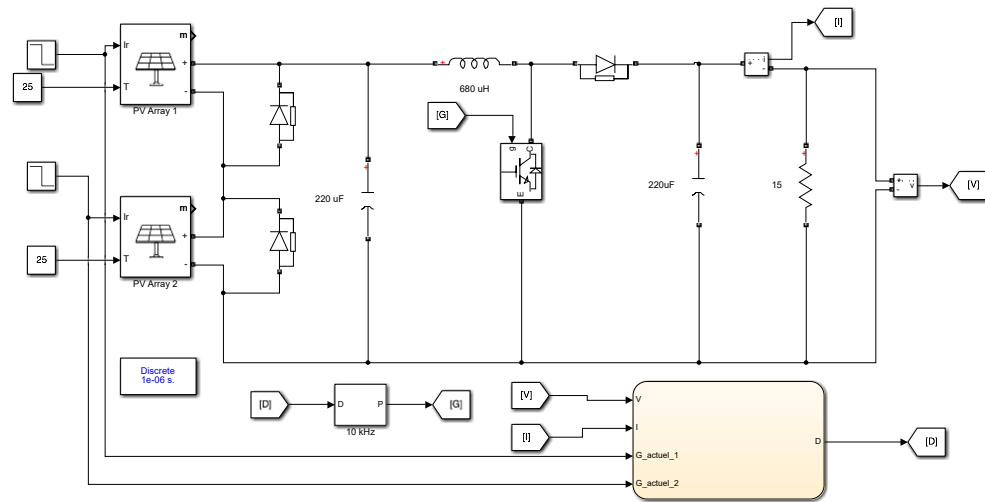


Figure 4-2 : Schéma de simulation du système photovoltaïque avec convertisseur élévateur

L'algorithme PSO a été implémenté dans un diagramme Stateflow pour optimiser le suivi du point de puissance maximale (MPPT) dans un système photovoltaïque. Chaque bloc a été conçu pour répondre à un besoin spécifique, avec des choix méthodologiques adaptés à l'environnement simulé.

4.4.1 Méthodologie pour le choix des paramètres du PSO

4.4.1.1 Nombre de particules (N)

Le choix du nombre de particules dépend de la complexité de l'espace de recherche, par exemple la dimension de la courbe P-V en relation avec la plage de tension ou de courant. Pour des applications MPPT, il est généralement recommandé d'utiliser un minimum de 10 à 30 particules [42].

Un nombre insuffisant de particules peut entraîner un risque de sous-exploration de l'espace de recherche, ce qui peut conduire à une convergence prématurée vers des

maxima locaux. Un excès de particules entraîne une augmentation du temps de calcul sans apporter d'amélioration significative des performances.

4.4.1.2 *Facteur d'inertie (w)*

Il contrôle la persistance des mouvements des particules d'une itération à l'autre. Un w élevé favorise l'exploration globale, alors qu'un w faible encourage une convergence locale. Dans ce cas si la valeur de w est trop élevée, il entraîne une exploration excessive de l'espace par les particules et ralentit ainsi le processus de convergence. Si la valeur de w est trop basse, il entraîne un risque de convergence prématurée vers un maximum local.

4.4.1.3 *Constantes d'accélération ($c1$ et $c2$)*

Le coefficient $c1$ de type cognitif a pour fonction de guider les particules vers leur position optimale individuelle tandis que le coefficient $c2$ (social) a pour fonction de guider les particules vers la meilleure position globale.

Des valeurs trop élevées des coefficients $c1$ et $c2$ entraînent des oscillations significatives autour du GMPP. Les valeurs de $c1$ et $c2$ étant trop faibles, cela entraîne une diminution de l'efficacité de l'optimisation.

Le tableau 4-3 nous indique les valeurs des paramètres de notre algorithme PSO.

Tableau 4-3 : Paramètres de l'algorithme PSO utilisés pour le suivi MPPT

NOM DU PARAMÈTRE	SYMBOLE	VALEUR	DESCRIPTION
COEFFICIENT D'INERTIE	w	0.4	Influence la vitesse précédente de la particule
COEFFICIENT D'ACCÉLÉRATION COGNITIVE	c1	0.5	Pondère l'attraction vers la meilleure position personnelle
COEFFICIENT D'ACCÉLÉRATION SOCIALE	c2	0.5	Pondère vers la meilleure position globale
NOMBRE DE PARTICULES	N	5	Taille de la population d'essaim

4.4.1.4 Nombre d'itérations (maxcounter)

Le nombre d'itérations est fonction de la dimension de l'espace de recherche et du degré de précision souhaité. En général, pour une courbe P-V classique, un nombre d'itérations compris entre 50 et 100 est considéré comme adéquat.

Un nombre insuffisant d'itérations fait en sorte que l'algorithme ne dispose pas du temps nécessaire pour converger vers le GMPP. Un nombre excessif d'itérations entraîne une prolongation inutile du temps de calcul sans pour autant améliorer les performances.

4.4.1.5 Tolérance de convergence (tol)

La tolérance de convergence est définie comme la précision de la convergence vers le GMPP. La valeur standard est $\text{tol} = 0.001$, ce qui équivaut à une variation de 0,1 % dans la puissance mesurée entre deux itérations successives. Une tolérance trop étroite entraîne un ralentissement de l'algorithme. Une tolérance excessive entraîne une diminution de la précision de la convergence.

La Figure 4-3 illustre l'organigramme de l'algorithme MPPT implémenté dans stateflow de MATLAB.

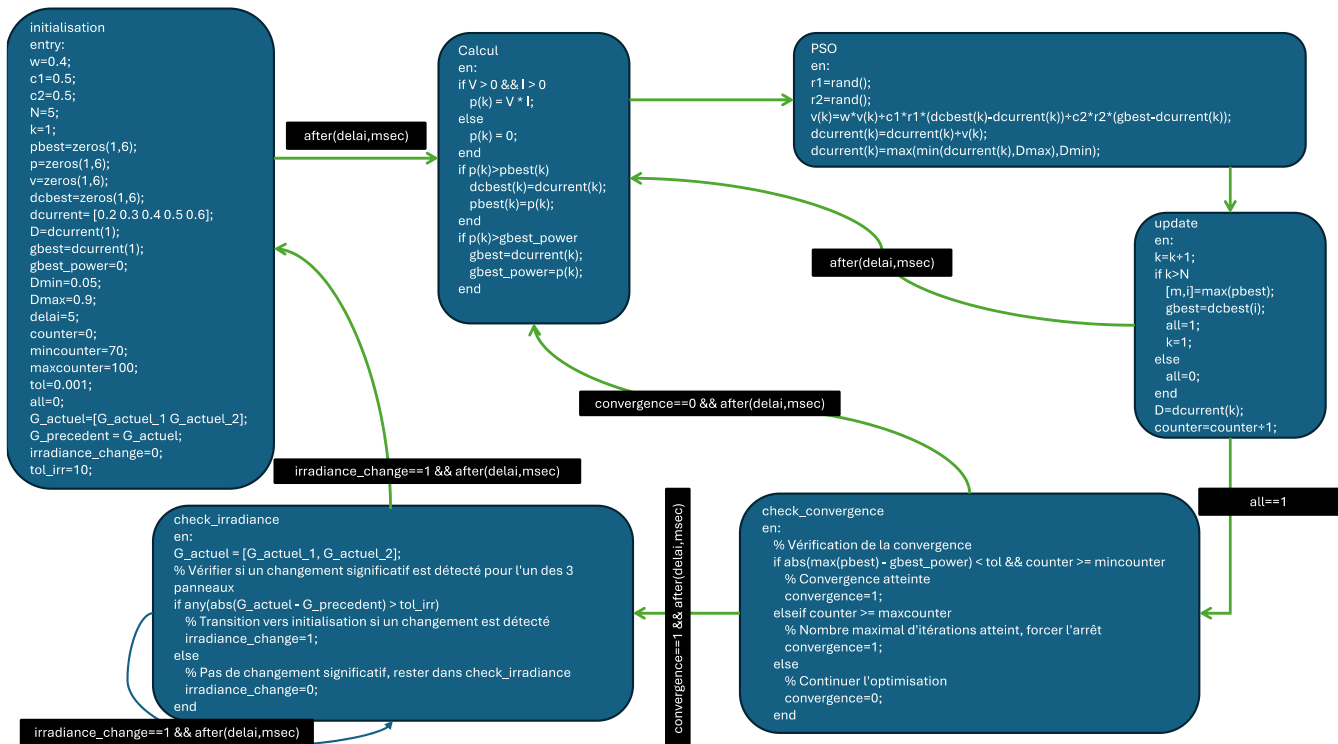


Figure 4-3 : Organigramme de l'algorithme PSO dans Stateflow de MATLAB

4.4.2 Description de chaque bloc de l'algorithme PSO

4.4.2.1 Bloc d'initialisation

Ce bloc initialise l'ensemble des paramètres requis pour le bon fonctionnement du PSO, incluant les coefficients d'inertie (w), d'accélération cognitive ($c1$) et sociale ($c2$), les positions actuelles ($d_{current}$) et les vitesses (v) des particules, ainsi que les meilleures positions locales (p_{best}) et globales (g_{best}). Les bornes des variations (D_{min} , D_{max}) ainsi que les tolérances de convergence (tol) sont également spécifiées.

Des petites valeurs de $c1$ et $c2$, telles que 0.5, ont pour effet de diminuer les transitions brusques vers p_{best} et g_{best} . Ceci entraîne une recherche plus graduelle et stabilisée.

4.4.2.2 Bloc de calcul

Ce bloc effectue le calcul de la puissance instantanée de chaque particule en se basant sur les valeurs de tension (V) et de courant (I). Lorsque la puissance calculée excède $p_{best}(k)$, elle est alors enregistrée en tant que nouvelle meilleure position locale. Lorsqu'elle excède la valeur de g_{best_power} , elle est alors définie comme la nouvelle meilleure position globale.

4.4.2.3 Bloc PSO

Ce bloc calcule les nouvelles valeurs des vitesses (v) et des positions ($d_{current}$) des particules en se basant sur les équations du PSO. Les vitesses sont ajustées en fonction du coefficient w et sont impactées par les positions locales et globales optimales (p_{best} et g_{best}). Ensuite, les positions sont limitées dans l'intervalle entre D_{min} et D_{max} . De plus, les valeurs aléatoires $r1$ et $r2$ sont recalculées pour chaque particule afin d'assurer l'unicité du mouvement des particules. Cela diminue le risque de convergence prématurée de toutes les particules vers un même point. Pour maximiser la diversité des comportements, il est nécessaire que chaque particule possède des valeurs $r1$ et $r2$ indépendantes.

4.4.2.4 *Bloc update*

Ce bloc est responsable de la gestion de l'indexation des particules afin de garantir l'évaluation de chaque particule avant la mise à jour de gbest. Après l'évaluation de toutes les particules (all=1), le cycle passe à l'état suivant.

4.4.2.5 *Bloc check_convergence*

Ce bloc vérifie la convergence de l'algorithme en examinant la différence entre le maximum de pbest et gbest_power par rapport à la tolérance définie. L'algorithme s'arrête lorsque la convergence est atteinte ou lorsque le nombre maximal d'itérations est dépassé. Cela permet de terminer l'optimisation lorsque les changements deviennent négligeables, ce qui réduit le temps de calcul.

4.4.2.6 *Bloc check_irradiance*

Ce bloc est chargé de repérer les variations d'irradiance (G_{actuel}) affectant les panneaux solaires. La détection de cette variation est réalisée en comparant la valeur actuelle d'irradiance G_{actuel} à sa valeur précédemment enregistrée $G_{\text{précédent}}$. Si la variation absolue dépasse un seuil prédéfini (tol_irr), une modification significative est considérée comme détectée. Dans ce cas, le système réinitialise pour recalculer les paramètres et relancer le processus d'optimisation. Un environnement dynamique, tel qu'un ombrage partiel ou des fluctuations climatiques, exige une réinitialisation du PSO afin de s'ajuster aux nouvelles conditions.

4.5 Scénario de simulation

Afin d'étudier les performances de cet algorithme (avec $T = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$), nous allons effectuer les simulations sous 4 scénarios différents :

- Scénario 1 : une condition sans ombrage ($G = 1000 \text{ W/m}^2$) pour tous les panneaux.
- Scénario 2 : condition d'ombrage partiel ($G1 = 1000 \text{ W/m}^2$, $G2 = 600 \text{ W/m}^2$). Autrement dit, le panneau 2 est ombré mais le panneau 1 ne l'est pas.
- Scénario 3 : condition d'ombrage total ($G1 = G2 = 500 \text{ W/m}^2$).
- Scénario 4 : condition dynamique ou encore environnement plus réaliste ($G1 : 1000 \rightarrow 800 \text{ W/m}^2$, $G2 : 1000 \rightarrow 500 \text{ W/m}^2$).

4.5.1 Condition sans ombrage

Dans cette première simulation, nous prenons en compte une situation sans ombrage où une irradiation constante de $G = 1000 \text{ W/m}^2$ est appliquée sur l'ensemble des panneaux, dans le but d'évaluer l'efficacité de l'algorithme PSO dans un contexte optimal. Les résultats sont présentés dans la Figure 4-4.

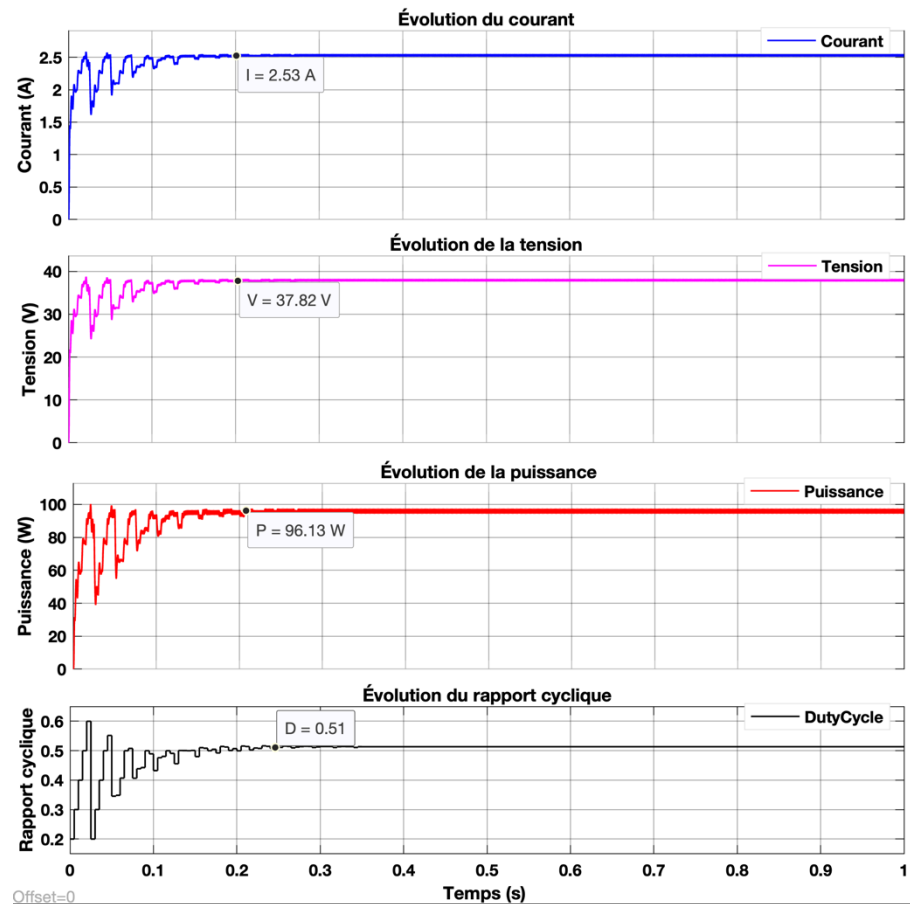


Figure 4-4 : Évolution du courant, tension, puissance et rapport cyclique dans des conditions sans ombrage [MATLAB]

Les résultats obtenus mettent en évidence l'efficacité de l'algorithme PSO dans l'optimisation du point de puissance dans des conditions idéales, en assurant une convergence rapide (inférieure à 0.3 seconde) et en maintenant la stabilité des paramètres tels que le courant à 2.53 A, la tension à 37.82 V, la puissance à 96.13 W et le rapport cyclique à 0.5.

Le PSO a prouvé son efficacité à converger rapidement et de manière précise vers le point de puissance maximale (MPP) dans des conditions optimales. Les oscillations

initiales sont rapidement atténuées, ce qui indique un équilibre satisfaisant entre l'exploration et l'exploitation des particules.

4.5.2 Condition d'ombrage partiel

Dans cette seconde situation simulée, nous allons étudier un cas d'ombrage partiel impliquant les variables $G1 = 1000 \text{ W/m}^2$ et $G2 = 600 \text{ W/m}^2$ qui reflète une condition fréquemment observée dans les environnements concrets où des obstacles partiels tels que des arbres ou des bâtiments impactent une partie du générateur photovoltaïque. La figure 4-5 illustre la courbe P-V sous l'ombrage partiel.

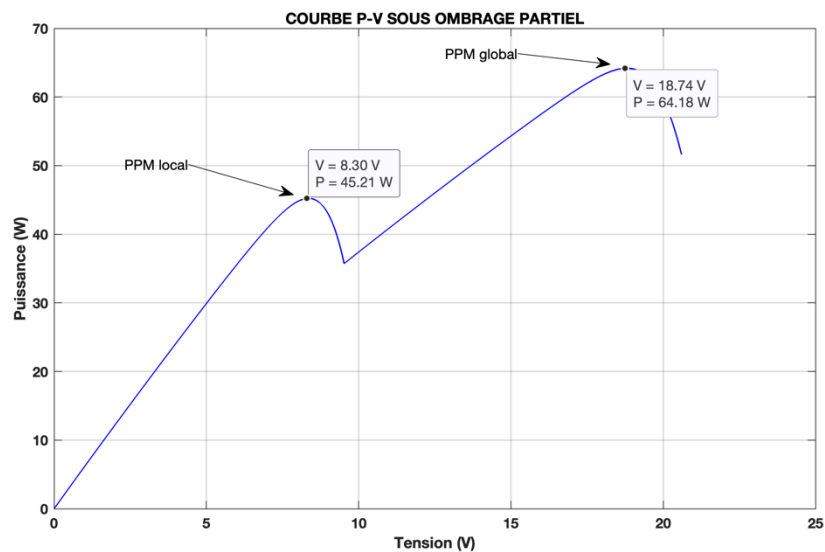


Figure 4-5 : Courbe P-V sous ombrage partiel

Nous pouvons constater sur cette courbe P-V, la présence d'un MPP global de 64.18 W et d'un MPP local de 45.21 W.

4.5.2.1 Méthode P&O

Dans le domaine des systèmes photovoltaïques, la technique de Perturbation et Observation (P&O) est une méthode conventionnelle largement employée pour le contrôle du point de puissance maximale (MPPT). Malgré sa simplicité de mise en œuvre, cette méthode présente des limitations significatives, notamment en cas d'ombrage partiel. Cette partie examine les performances de l'algorithme Perturb and Observe (P&O) dans des situations d'ombrage partiel, en soulignant ses contraintes et en comparant ses résultats à ceux obtenus par l'algorithme PSO.

Pour cette simulation, les conditions identiques à celles employées pour le PSO ont été mises en place afin d'assurer une comparaison cohérente. Le rapport cyclique initial $D = 0.2$ et la variation du rapport cyclique $\text{delai} = 0.001$. Nous avons inséré un délai de 5 millisecondes pour assurer une mesure stable et fiable de la tension et du courant après la mise à jour du rapport cyclique. La Figure 4-6 présente l'évolution du courant, de la tension, de la puissance et du rapport cyclique en fonction du temps.

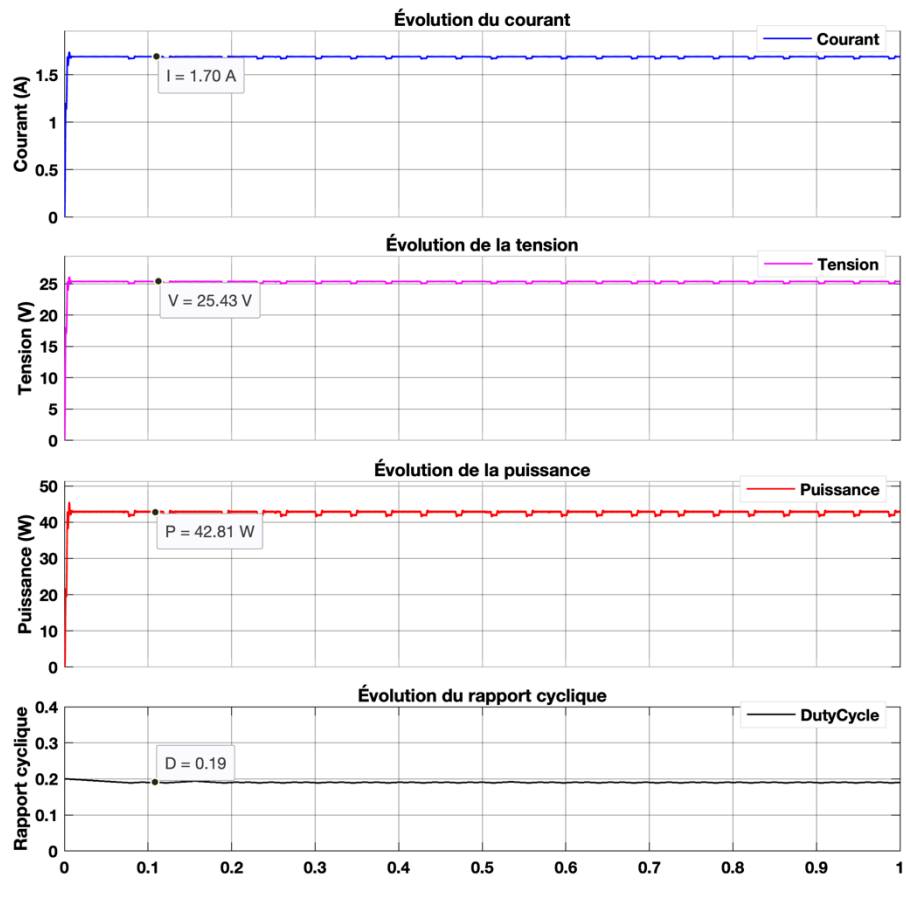


Figure 4-6 : Évolution du courant, de la tension, de la puissance et du rapport cyclique dans les conditions d'ombrage partiel avec la méthode P&O [MATLAB]

Les résultats de la simulation effectuée à l'aide de la méthode P&O révèlent que le courant atteint une valeur stabilisée de 1.7 A, ce qui correspond à un pic local. La tension stabilisée de 25.43 V est jugée insuffisante pour atteindre le GMPP. La valeur maximale de la puissance atteinte s'élève à 42.81 W. Le rapport cyclique (D) quant à lui se stabilise à $D = 0.19$.

4.5.2.2 Méthode PSO

L'objectif de cette simulation est d'évaluer l'efficacité de l'algorithme PSO dans la détermination du point de puissance maximale global, même en présence de plusieurs

maxima locaux dus à une irradiation inégale. Les résultats sont exposés dans la Figure 4-7.

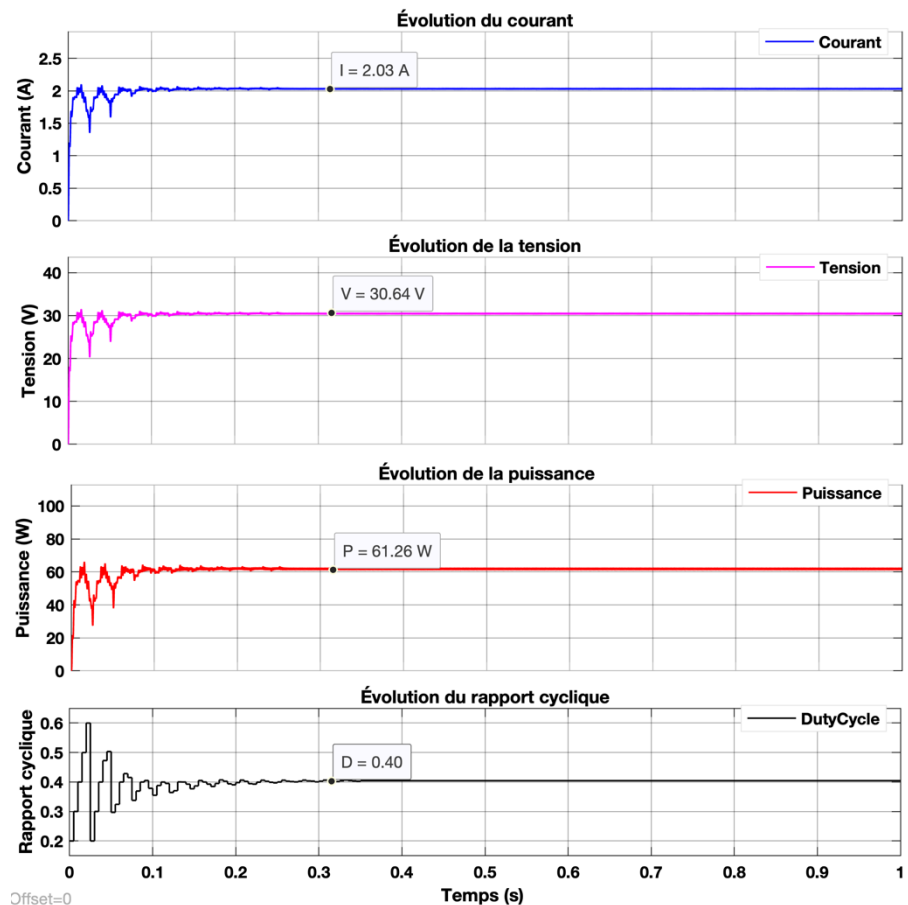


Figure 4-7 : Évolution du courant, tension, puissance et rapport cyclique dans des conditions d'ombrage partiel avec la méthode PSO [MATLAB]

En présence d'un ombrage partiel, les données obtenues indiquent que l'algorithme PSO converge vers le point de puissance maximale global, atteignant une valeur stabilisée de $P = 61.26 \text{ W}$ proche de celle trouvée plus haut sur la courbe P-V. Le courant et la tension se stabilisent à des valeurs respectives de $I = 2.03 \text{ A}$ et $V = 30.64 \text{ V}$, avec un rapport cyclique $D = 0.4$. Les oscillations initiales visibles dans les courbes sont le reflet de la phase d'exploration de l'algorithme, pendant laquelle les particules explorent diverses

solutions afin de contourner la présence de multiples maxima locaux induits par l'irradiance non uniforme. Ces résultats mettent en évidence la capacité du PSO à s'adapter de manière efficace à des environnements complexes caractérisés par un ombrage partiel, en parvenant à identifier le point de puissance maximale global tout en assurant une convergence rapide et une stabilité finale des paramètres.

4.5.2.3 Comparaison des performances entre le PSO et le P&O

La Figure 4-8 ci-dessous illustre la variation de la puissance en fonction du temps pour les deux techniques (P&O et PSO) dans des conditions d'ombrage partiel.

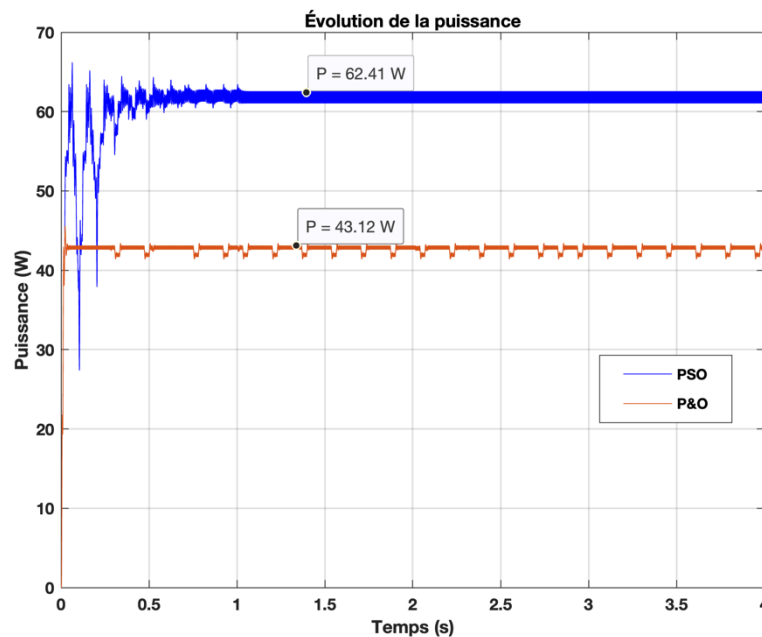


Figure 4-8 : Courbe comparatif de la puissance avec la méthode PSO et P&O

On constate que la méthode P&O atteint une puissance d'environ 43 W, correspondant au maximum local, tandis que l'algorithme PSO converge rapidement vers le GMPP avec

une puissance stabilisée aux alentours de 62 W. L'algorithme PSO converge rapidement vers le GMPP, cependant il manifeste des oscillations initiales importantes avant d'atteindre la stabilité. L'algorithme P&O demeure restreint au sein du LMPP et ne parvient pas à détecter le GMPP en raison des limitations intrinsèques de sa méthodologie.

Ci-dessous un tableau résumant une analyse comparative des deux méthodes.

Tableau 4-4 : Tableau comparatif de la méthode P&O et PSO

Critères	Méthode P&O	Méthode PSO
Puissance atteinte	43.12 W	62.41 W
Temps de convergence	Rapide	Relativement (long)
Oscillations initiales	importantes	Faibles
Capacité à identifier le GMPP	Faible	Élevée

Cette comparaison met en évidence la supériorité de l'algorithme PSO par rapport au P&O en cas d'ombrage partiel, en raison de sa capacité à détecter le point de puissance maximale global (GMPP). Toutefois, cette approche entraîne un temps de convergence légèrement supérieur et une complexité algorithmique accrue. En contraste, le P&O demeure une approche simple et efficace pour les systèmes où l'ombrage partiel est peu fréquent ou insignifiant.

La comparaison avec la méthode P&O a été effectuée uniquement dans le cas d'ombrage partiel, car c'est dans ce contexte que les différences de performance sont les plus significatives. Dans les autres scénarios, le comportement est plus prévisible (point de puissance unique ou dynamique progressive), ce qui rend la comparaison moins pertinente et redondante.

4.5.3 Condition d'ombrage total

Ce troisième scénario examine un cas d'ombrage total dans lequel les trois panneaux solaires sont exposés à un éclairage uniformément réduit, avec $G_1 = G_2 = 500 \text{ W/m}^2$.

Cette configuration, reproduisant des scénarios tels qu'une couverture nuageuse épaisse ou d'un obstacle complet, offre la possibilité d'évaluer la performance de l'algorithme PSO MPPT dans le suivi efficace du point de puissance maximale global, même en présence d'une faible puissance disponible. Ce scénario représente une phase préliminaire essentielle avant d'aborder un cas plus complexe tel que l'ombrage hétérogène, et permet de mettre en évidence la résistance et la fiabilité de l'algorithme dans des situations critiques. Les résultats de cette simulation sont exposés dans la Figure 4-9.

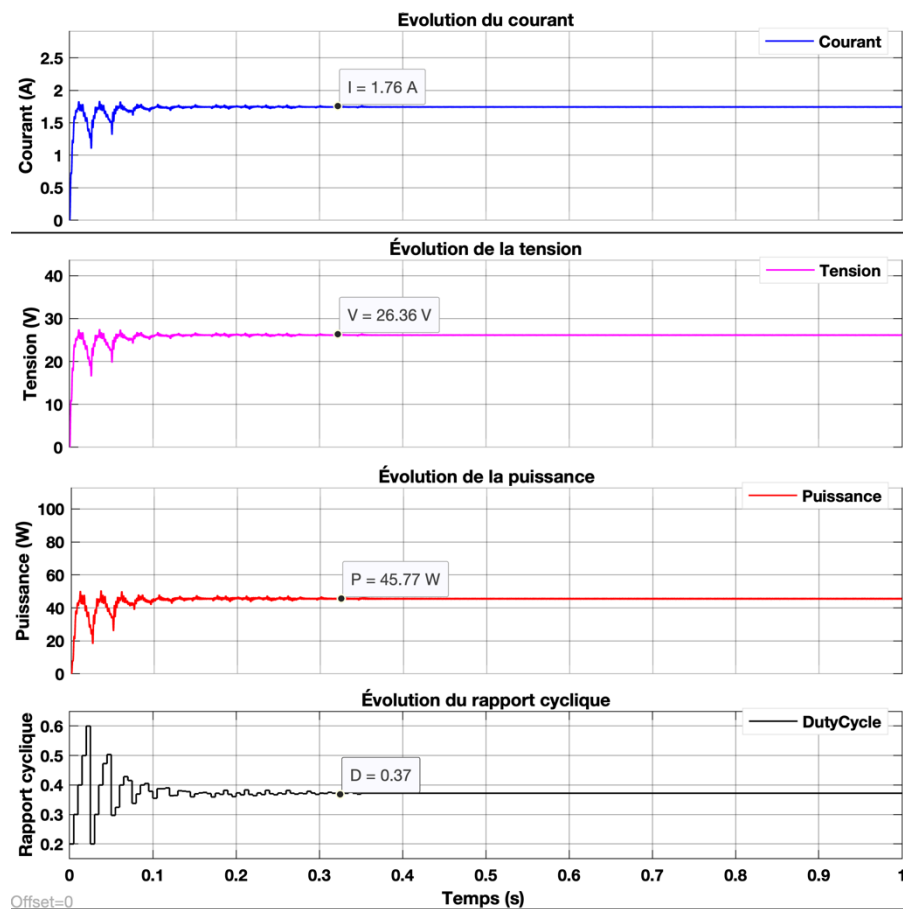


Figure 4-9 : Évolution du courant, tension, puissance et rapport cyclique dans des conditions d'ombrage total [MATLAB]

Les résultats de la simulation effectuée en conditions d'ombrage total, dans lesquelles l'algorithme PSO a été utilisé, démontrent la capacité de celui-ci à détecter et à maintenir

le point de puissance maximale global même en cas de faible irradiation. La puissance finale obtenue, notée $P = 45.77 \text{ W}$, est conforme aux spécifications attendues du générateur photovoltaïque dans de telles conditions d'irradiation.

Les fluctuations initiales constatées sur les graphiques de courant, de tension, de puissance et de rapport cyclique sont le reflet de la phase d'exploration des particules par l'algorithme PSO. Cette étape est rapidement suivie par une convergence vers une solution stable en moins de temps, mettant en évidence la rapidité et l'efficacité de l'algorithme. En revanche, en comparaison avec les situations d'exposition à des niveaux plus élevés de rayonnement (condition idéale ou ombrage partiel), la puissance finale est considérablement diminuée, mettant en évidence l'effet direct d'un ombrage total sur la production d'énergie.

En conclusion, cette simulation atteste de la résilience de l'algorithme PSO dans des situations critiques caractérisées par une faible disponibilité de puissance. Elle démontre aussi sa capacité à s'adapter rapidement et à maintenir des performances optimales, même en situation de contraintes majeures comme l'ombrage total.

4.5.4 Condition dynamique

Ce quatrième scénario prend en compte des conditions dynamiques et réalistes en simulant un ombrage partiel et variable affectant les trois panneaux solaires. Après 1 secondes de simulation, l'intensité lumineuse de chaque panneau varie de manière individuelle : $G1$ diminue de 1000 à 800 W/m^2 et $G2$ de 1000 à 500 W/m^2 . Cette disposition reproduit une situation dans laquelle des ombres en mouvement, telles que celles générées par des nuages ou des obstacles environnants, ont un impact variable sur les panneaux solaires au fil du temps. Le but de cette simulation est d'évaluer la capacité de l'algorithme PSO à s'ajuster rapidement et efficacement à ces variations d'éclairement, assurant ainsi une extraction optimale de la puissance malgré la nature hétérogène et changeante de l'ombrage. L'évaluation des performances de l'algorithme dans ce contexte

dynamique sera essentielle pour confirmer son efficacité dans des cas d'utilisation concrets. Les résultats obtenus sont montrés dans la Figure 4-10.

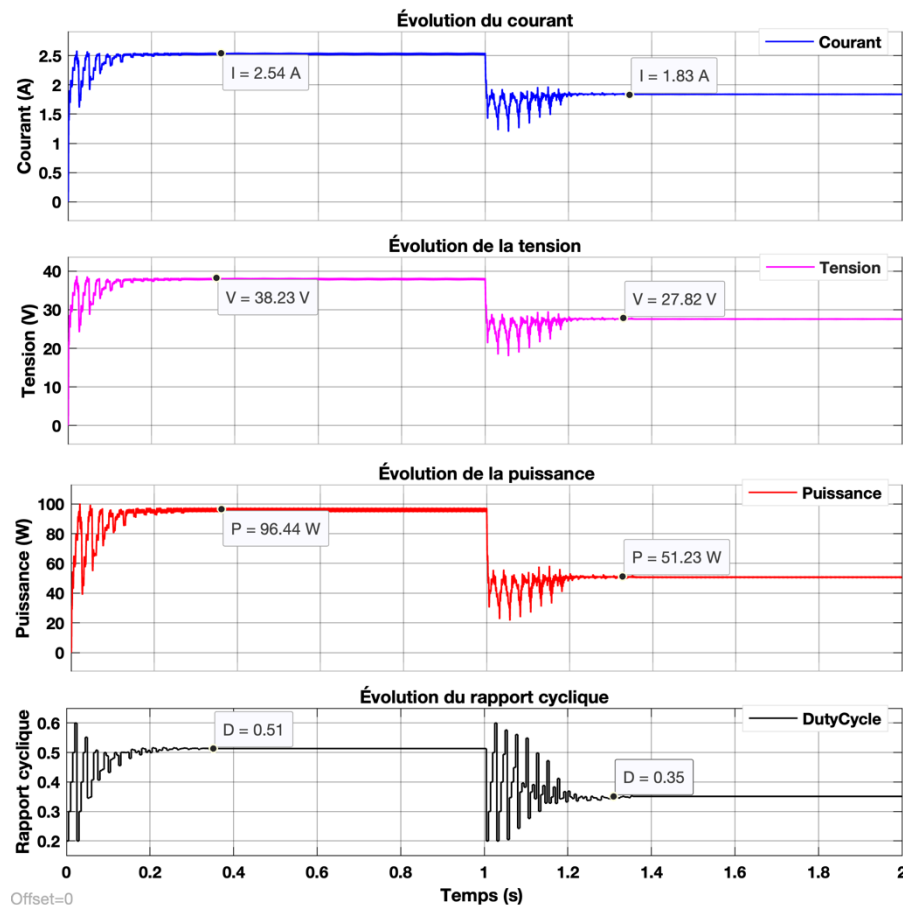


Figure 4-10 : Évolution du courant, tension, puissance et rapport cyclique dans des conditions d'ombrage dynamique [MATLAB]

Les résultats de la simulation dans un environnement dynamique, présentés sur la Figure 4-10, mettent en évidence l'efficacité exceptionnelle de l'algorithme PSO pour s'ajuster à des conditions d'ombrage partiel et changeantes. Devant une variation substantielle de l'intensité lumineuse ($G1$ de 1000 à 800 W/m^2 et $G2$ de 1000 à 500 W/m^2), l'algorithme a promptement adapté le rapport cyclique, le faisant passer d'environ 0.51 à 0.35 en environ 0.3 seconde. Cette adaptation rapide a permis de maintenir le suivi du

point de puissance maximale, lequel a diminué de 96.44 W à 51.23 W, en corrélation avec la baisse de l'éclairement global. En dépit des variations plus prononcées du rapport cyclique, causées par la complexité croissante de la caractéristique puissance-tension due à l'ombrage hétérogène, l'algorithme a prouvé son efficacité à extraire l'énergie disponible.

4.6 Validation expérimentale

Pour confronter les résultats de simulation de l'algorithme PSO à des conditions réelles, une validation expérimentale a été réalisée au laboratoire d'électronique de puissance de l'Université du Québec à Trois-Rivières. Cette phase essentielle a pour objectif de valider la concordance des résultats prometteurs obtenus en simulation avec un système photovoltaïque réel, tout en évaluant la résistance de l'algorithme aux contraintes spécifiques d'un environnement réel.

Il convient de souligner que, à la différence des simulations idéalisées, les conditions expérimentales en laboratoire ne permettent pas de reproduire de manière exacte les conditions standard de test (STC), en particulier en ce qui concerne la température ambiante et le spectre lumineux, étant donné que l'irradiance est générée par des projecteurs et non par un rayonnement solaire direct. Ces divergences, bien qu'entraînant des résultats quantitativement différents, ne compromettent pas l'objectif principal de cette validation, qui vise à évaluer l'efficacité de convergence de l'algorithme PSO et sa capacité à détecter le point de puissance maximale, notamment en cas d'ombrage partiel et total.

Trois scénarios ont été mis en œuvre : un scénario d'éclairement uniforme, un scénario d'ombrage partiel (consistant à occulter des parties spécifiques des panneaux solaires) et un scénario d'ombrage total, ce dernier consiste à cacher l'entièreté des panneaux solaires de tel sorte qu'ils reçoivent un éclairement uniformément faible.

Cette partie examinera en premier lieu la configuration expérimentale, puis exposera le protocole de mesure choisi et évaluera les résultats obtenus pour ces trois cas de figure.

4.6.1 Description du montage expérimental

La configuration expérimentale, illustrée dans la Figure 4-11, repose sur l'utilisation de deux panneaux solaires photovoltaïques d'une puissance de 50 Wc chacun. Ce GPV fournit de l'énergie à un convertisseur DC-DC de type élévateur, contrôlé par un microcontrôleur Arduino Méga 2560. La sélection de ce microcontrôleur a été justifiée par sa large disponibilité, sa programmation aisée à travers l'outil de développement MATLAB et sa compatibilité avec une variété de capteurs et d'actionneurs. L'algorithme PSO est utilisé pour ajuster en temps réel le rapport cyclique du convertisseur sur le microcontrôleur, en générant un signal PWM à une fréquence de 10 kHz.

Pour évaluer l'efficacité du système, des capteurs de courant et de tension sont employés afin de collecter les données d'entrée et de sortie du GPV. Ensuite, ces données sont transférées à un ordinateur à l'aide d'une liaison (câble USB) afin d'être enregistrées et analysées à l'aide du logiciel MATLAB.

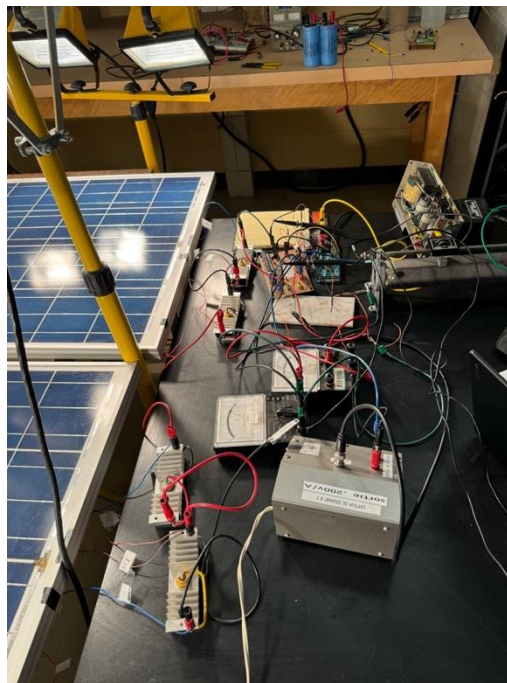


Figure 4-11 : Banc d'essai

4.6.2 Acquisition des données

Ce schéma Simulink (Figure 4-12) illustre la mise en œuvre expérimentale de l'algorithme PSO pour le suivi du point de puissance maximale (MPPT) d'un système photovoltaïque. Les valeurs du courant (I_{pv}) et de la tension (V_{pv}) sont captées en temps réel à partir des entrées analogiques d'une carte Arduino, ce qui permet de surveiller de manière continue les performances du générateur photovoltaïque. Les signaux sont soumis à un filtrage passe-bas afin de réduire le bruit, avant d'être acheminés vers le bloc PSO. Ce bloc est chargé de déterminer le rapport cyclique optimal (D) pour contrôler un convertisseur DC-DC élévateur à l'aide d'un signal PWM de 10 kHz. Les données recueillies sont affichées et sauvegardées en vue d'une analyse approfondie.

Ce modèle sert d'intermédiaire entre les simulations numériques et les expérimentations, en fournissant un cadre adaptable pour évaluer les performances du système tout en tenant compte des contraintes associées aux capteurs, au bruit et aux variations de l'environnement.

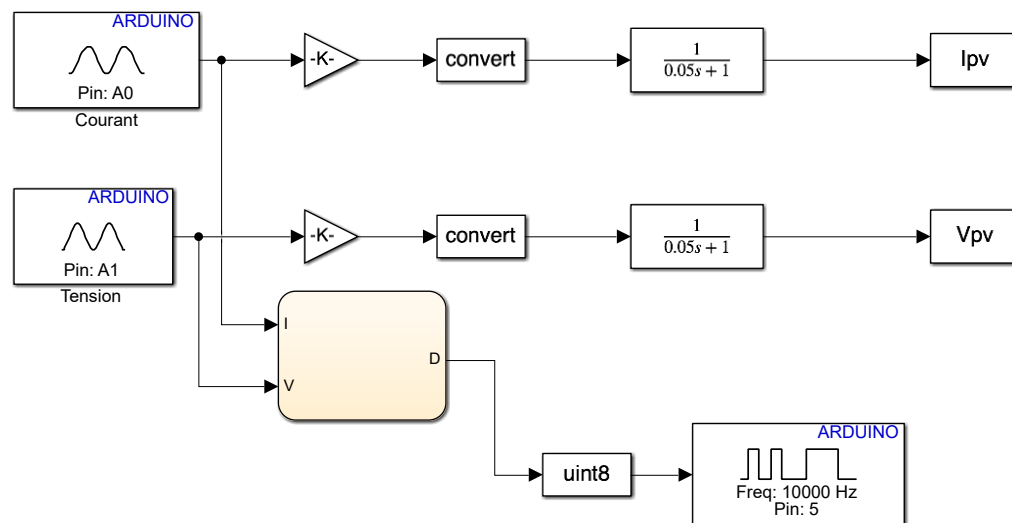


Figure 4-12 : Schéma Simulink du système MPPT avec acquisition de données par Arduino

4.6.3 Condition uniforme (aucune variation du rayonnement)

Les résultats du test initial, effectués dans des conditions uniformes éclairées par des projecteurs, permettent d'évaluer les performances de l'algorithme PSO dans un environnement stable. Même si la valeur précise de l'irradiance (G) n'est pas mesurée, cette disposition met en lumière la capacité du système à atteindre efficacement le point de puissance maximale et à maintenir des paramètres stables pendant tout le test expérimental. Les Figures 4-13 et 4-14 illustrent respectivement l'évolution de la puissance et du rapport cyclique.

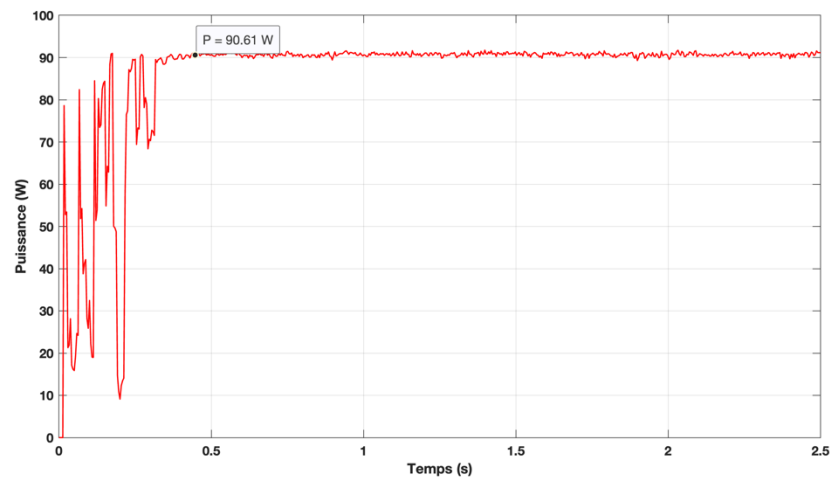


Figure 4-13 : Évolution de la puissance dans les conditions uniformes

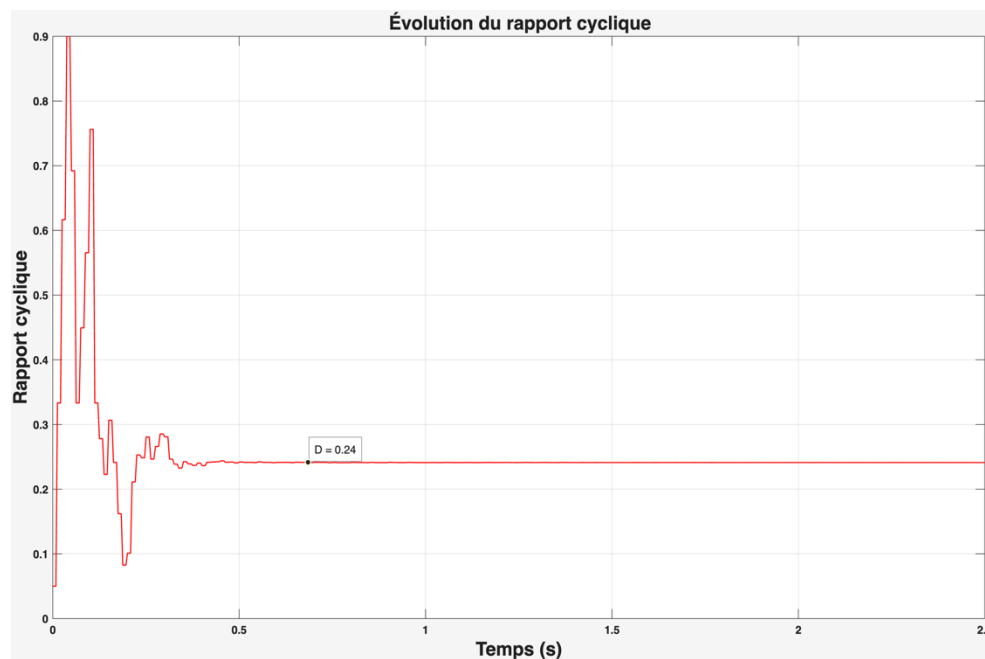


Figure 4-14 : Évolution du rapport cyclique dans les conditions uniformes

La figure ci-dessous illustre la courbe de puissance en fonction de la tension (courbe P–V) obtenue lors de notre essai expérimental dans des conditions sans ombrage. On observe une augmentation progressive de la puissance jusqu’à un point de puissance maximale (MPP) situé à environ 30,33 V pour une puissance d’environ 90,93 W. Cette forme caractéristique en cloche reflète le comportement typique d’un panneau photovoltaïque fonctionnant en conditions optimales d’ensoleillement, sans perturbation. La phase ascendante de la courbe correspond à l’augmentation simultanée de la tension et du courant, tandis que la phase descendante est due à la diminution du courant lorsque la tension approche sa valeur maximale. Cette courbe expérimentale permet ainsi de valider le fonctionnement du système en régime normal, sans perte de performance liée à un phénomène d’ombrage partiel.

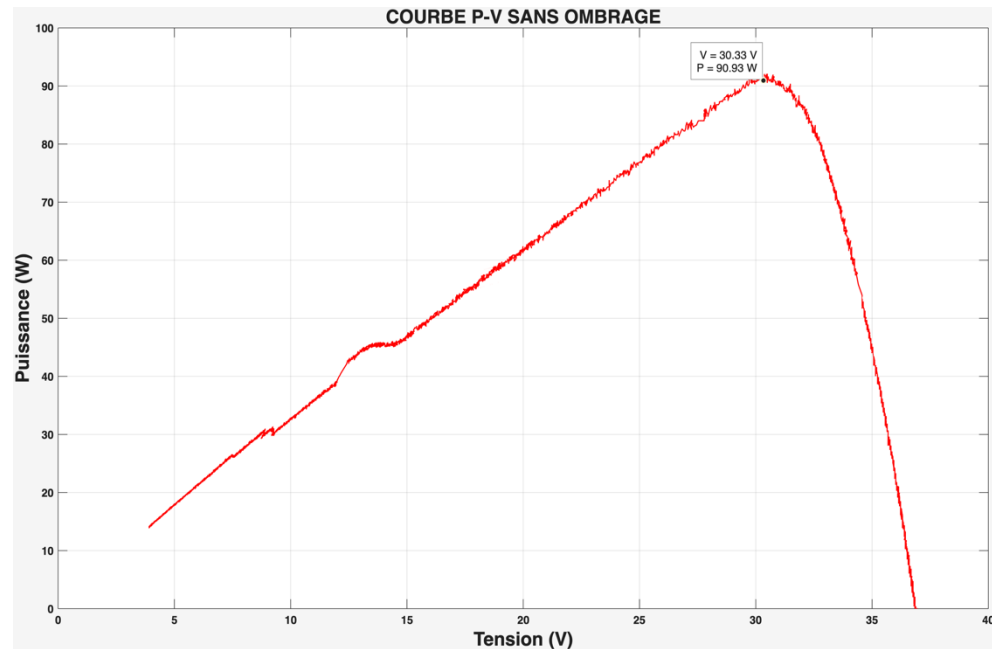


Figure 4-15 : Caractéristique P-V de notre système PV sans ombrage

Les résultats expérimentaux obtenus dans un environnement uniforme sont en accord satisfaisant avec les simulations effectuées dans des conditions similaires. La dynamique des courbes de puissance et du rapport cyclique démontre l'efficacité et la constance avec lesquelles l'algorithme PSO parvient à suivre le point de puissance maximale. La puissance maintenue à environ 90 W et un rapport cyclique final de 0,24 témoignent de l'aptitude de l'algorithme à réguler le convertisseur DC-DC afin d'optimiser la production d'énergie des panneaux solaires.

En confrontant les données expérimentales aux simulations, on constate une similarité dans la vitesse de convergence et la stabilité des paramètres une fois cette phase initiale passée. Ces résultats mettent en évidence la fiabilité du PSO dans le contexte du suivi du point de puissance maximale (MPPT).

4.6.4 Condition avec ombrage partiel

Avant de procéder à l'analyse des résultats expérimentaux, nous allons préalablement exposer la courbe P-V (Figure 4-16) du système dans des conditions d'ombrage partiel. Cette courbe permettra d'identifier les points de puissance maximale (PPM) local et global, fournissant ainsi un cadre de référence pour évaluer la capacité de l'algorithme PSO à converger vers le PPM global malgré la présence de plusieurs maxima locaux.

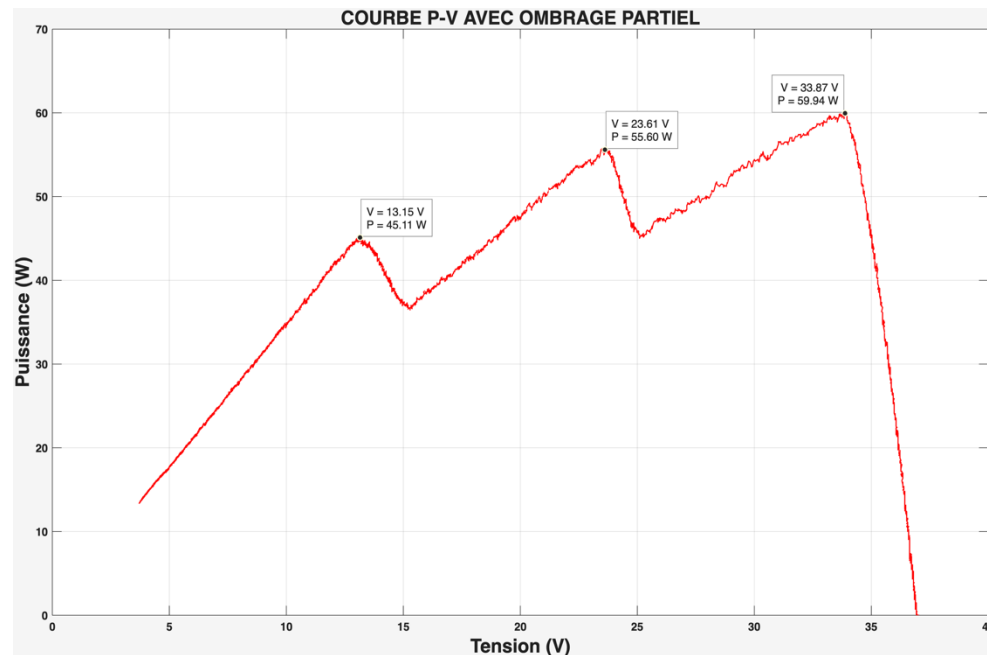


Figure 4-16 : Caractéristique P-V de notre système PV sous ombrage partiel

Lorsque les conditions d'ombrage sont prises en compte, la courbe P-V révèle la présence de plusieurs points de puissance maximale (PPM), comprenant deux points locaux et un point global. Ceci met en lumière les défis associés à l'optimisation sous ombrage, où l'algorithme PSO doit parcourir ces divers maxima afin d'atteindre le PPM global, localisé à une puissance de $P = 59.94 \text{ W}$.

4.6.4.1 Méthode PSO

Les résultats du deuxième essai (Figure 4-17), mené dans des conditions d'ombrage partiel en occultant des zones spécifiques des panneaux solaires, offrent une évaluation de l'efficacité de l'algorithme PSO pour repérer et optimiser le point de puissance maximale global en dépit d'une distribution inégale de l'irradiation. Ce scénario souligne l'efficacité du système dans des contextes complexes où plusieurs points de puissance locaux peuvent se manifester.

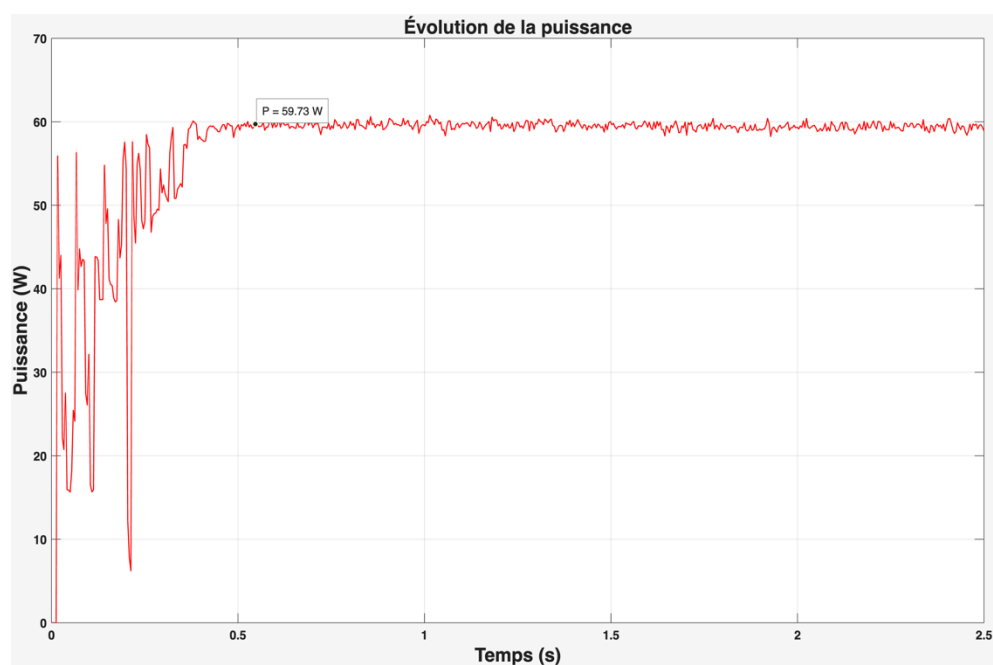


Figure 4-17 : Évolution de la puissance sous les conditions d'ombrage partiel

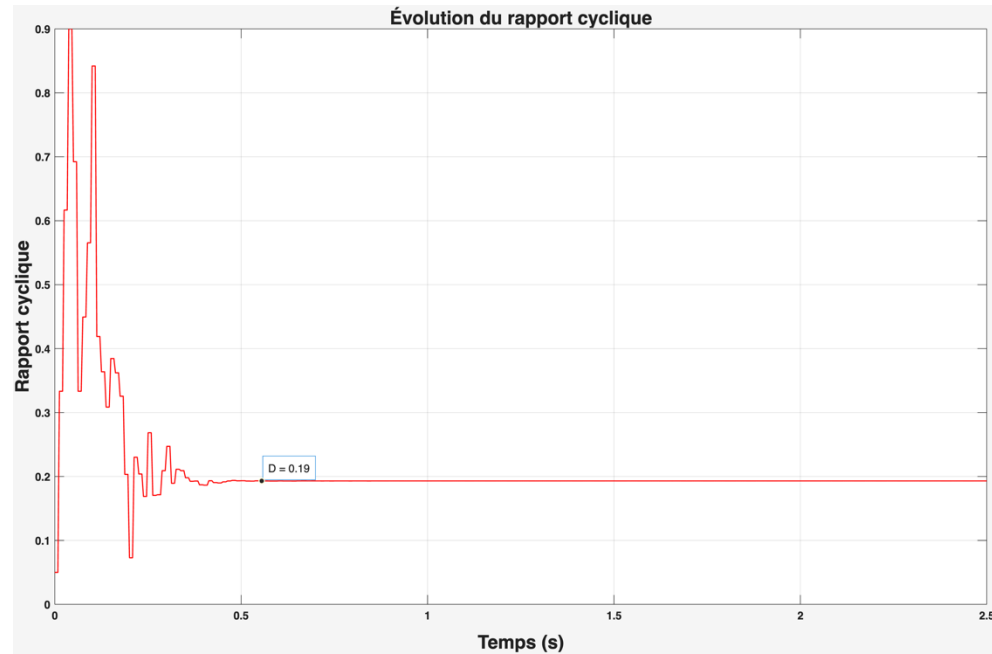


Figure 4-18 : Évolution du rapport cyclique sous les conditions d'ombrage partiel

Le résultat pour l'ombrage partiel démontre une convergence de la puissance vers une valeur stable de $P = 59.73 \text{ W}$, correspondant au point de puissance maximale global identifié antérieurement sur la courbe P-V avec ombrage. L'algorithme PSO a réussi à identifier le maximum global parmi les divers points locaux, ce qui témoigne de son efficacité dans des situations d'irradiance non uniforme. La vitesse de convergence, bien que perturbée par des oscillations initiales liées à l'optimisation, confirme la fiabilité de l'algorithme pour ce cas complexe.

4.6.4.2 Méthode P&O

L'efficacité de la méthode Perturbation et Observation (P&O) a été évaluée expérimentalement afin de vérifier ses performances en présence d'ombrage partiel. Cette partie expose en détail les résultats obtenus et met en lumière les comportements observés

lors des tests. La Figure 4-19 suivante illustre l'évolution de la puissance en fonction du temps.

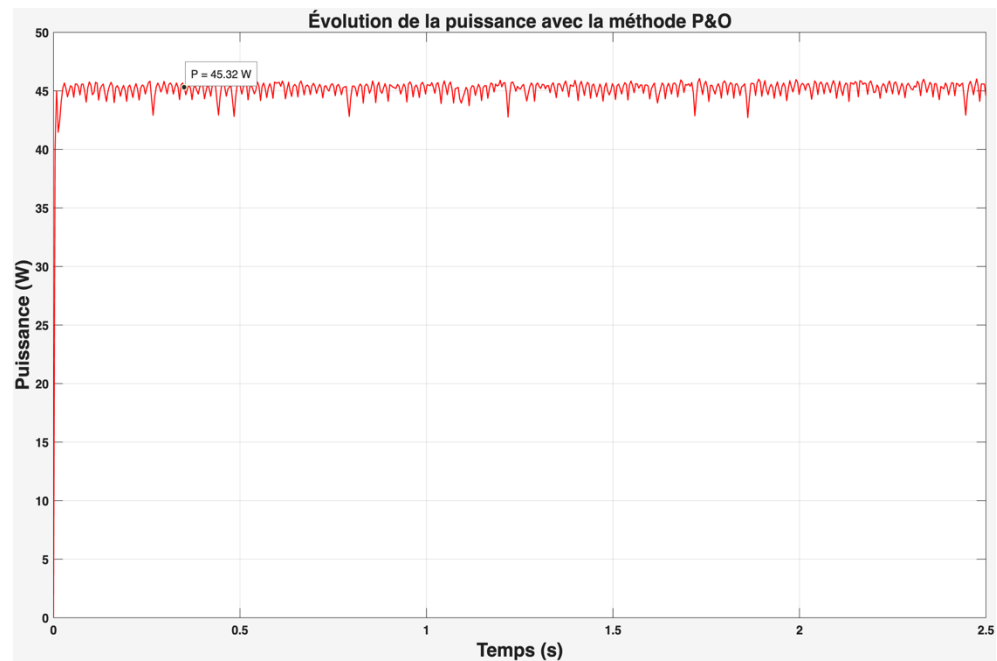


Figure 4-19 : Évolution de la puissance sous les conditions d'ombrage partiel avec la méthode P&O

La puissance stabilisée obtenue s'élève à environ 45,32 W. Ce résultat suggère que l'algorithme P&O tend à converger vers un maximum local plutôt que vers le maximum global de puissance. Des oscillations constantes autour de la valeur stabilisée de la puissance sont observées de manière continue pendant la simulation. Ces fluctuations sont inhérentes à la méthode P&O, laquelle se base sur une perturbation continue afin de réguler le rapport cyclique. Ces fluctuations induisent des pertes d'énergie et une diminution de l'efficacité globale du système.

La méthode P&O atteint rapidement la convergence en seulement 0,1 seconde. Cette efficacité est due à la simplicité de l'algorithme, qui se concentre sur une recherche locale

sans parcourir l'intégralité de l'espace de recherche. Toutefois, cette vitesse se traduit par une perte de précision, car elle ne permet pas d'assurer l'identification du GMPP.

4.6.4.3 *Comparaison entre la méthode PSO et P&O*

La puissance maximale obtenue par la méthode P&O (45,32 W) est moindre que celle obtenue par la méthode PSO, laquelle converge vers le point de puissance maximale global (par exemple : 59,73 W). En termes de stabilité, il convient de noter que, à la différence de la méthode PSO qui se caractérise par des oscillations minimales une fois la convergence atteinte, l'algorithme P&O présente des fluctuations significatives autour de la puissance stabilisée. Le temps de convergence de P&O est plus rapide, cependant cela se fait au détriment de la précision et de l'efficacité énergétique globale. Ce temps de convergence rapide du P&O s'explique par sa structure intrinsèque des algorithmes : le P&O consiste à perturber simplement le rapport cyclique (D) et à observer la réponse immédiate en termes de puissance. Ceci favorise une convergence rapide, mais elle est souvent limitée à un maximum local. L'algorithme PSO met en œuvre une approche de recherche globale et stochastique qui demande plusieurs itérations afin d'explorer l'espace de recherche de manière exhaustive et de converger vers le maximum global. Cette complexité intrinsèque peut entraîner une augmentation du temps de calcul.

4.6.5 **Condition avec ombrage total**

Suite à l'analyse de l'impact de l'ombrage partiel, nous avons mis en place une simulation d'ombrage total, dans laquelle tous les modules photovoltaïques reçoivent une irradiance uniformément basse (tous les panneaux solaires sont couverts). Le but de cette étude est d'évaluer la capacité de l'algorithme PSO à atteindre le point de puissance maximale (MPP) dans un contexte où la disponibilité d'énergie est fortement limitée. La Figure 4-20 ci-dessous présente la variation de la puissance produite par le système photovoltaïque en fonction du temps, dans les conditions d'ombrage total. L'algorithme

PSO est mis en œuvre pour optimiser de manière dynamique le rapport cyclique en vue de maximiser la puissance extraite.

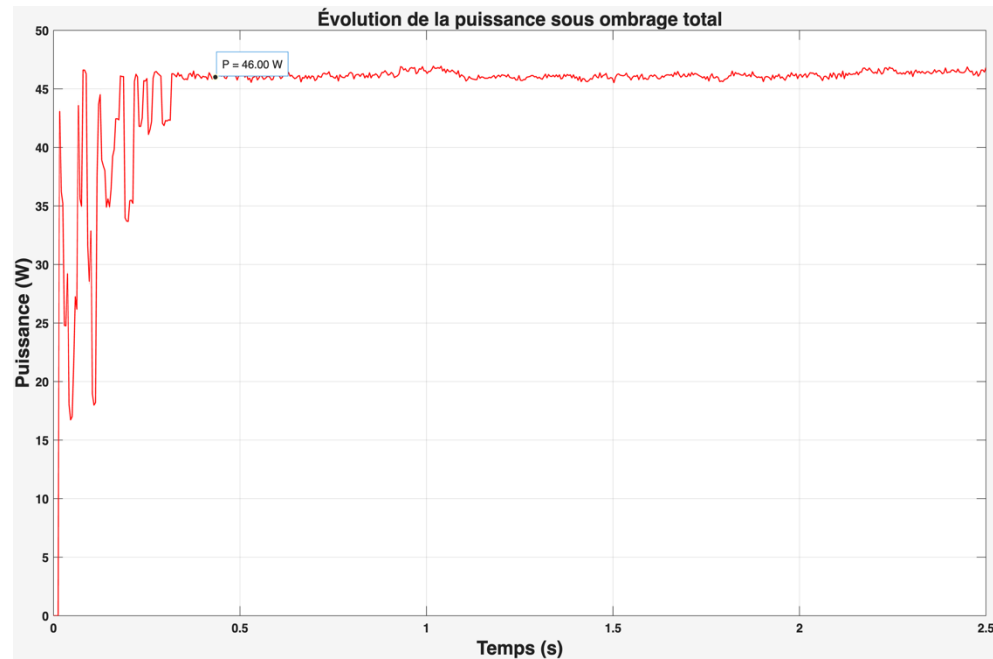


Figure 4-20 : Évolution de la puissance sous des conditions d'ombrage total

Le graphique 4-20 illustre que, après une phase initiale de fluctuations pendant laquelle l'algorithme est exploré, la puissance se stabilise rapidement à environ 46 W. Cette convergence rapide souligne l'efficacité du PSO même dans des conditions extrêmes de faible irradiance.

4.7 Conclusion

Ce chapitre a permis d'évaluer l'efficacité de l'algorithme PSO dans le contexte du suivi du point de puissance maximale (MPPT) pour les systèmes photovoltaïques, en utilisant à la fois des simulations numériques et des expérimentations. Les simulations ont mis en évidence l'efficacité de l'algorithme dans divers scénarios, y compris des conditions

uniformes, de l'ombrage partiel et dynamique, en montrant une convergence rapide vers le point de puissance maximale global tout en évitant les points locaux.

Les résultats de l'expérience, malgré les contraintes pratiques telles que la précision des capteurs, les délais de mesure et les conditions environnementales non optimales, ont validé les conclusions tirées des simulations. L'algorithme a démontré sa résilience en détectant de manière efficace le point de puissance maximale global, même en cas de fluctuations d'irradiance et de situations d'ombrage complexes.

La concordance entre les simulations et les expérimentations valident l'intégration de l'algorithme PSO dans un environnement concret. Ceci souligne le potentiel de ce système pour des applications pratiques, mettant en avant l'importance cruciale d'une calibration précise des paramètres et de l'intégration de composants matériels de haute qualité afin d'optimiser les performances globales.

CHAPITRE 5- CONCLUSION GÉNÉRALE

L'objectif de cette étude était d'analyser et de mettre en œuvre un algorithme de suivi du point de puissance maximale (MPPT) utilisant l'optimisation par essaim de particules (PSO) pour un système photovoltaïque. Un effort particulier a été déployé pour améliorer l'efficacité énergétique, notamment dans des situations d'ombrage.

Afin d'atteindre ce but, une analyse approfondie des concepts fondamentaux de l'énergie photovoltaïque a été menée, incluant le fonctionnement des cellules solaires, les propriétés des panneaux solaires et l'impact des conditions environnementales sur leur rendement. Les méthodes traditionnelles de suivi du point de puissance maximale (MPPT), telles que Perturb and Observe (P&O) et Incremental Conductance (INC), ont été étudiées, mettant en évidence leurs contraintes, notamment en cas d'ombrage.

Par la suite, l'algorithme PSO a été présenté en exposant ses fondements mathématiques et ses diverses topologies. La particularité de cette étude réside dans l'intégration de cet algorithme dans Stateflow de MATLAB pour un système photovoltaïque. Cette méthode innovante propose une représentation graphique du PSO à travers un diagramme d'états et de transitions, ce qui facilite la compréhension de la structure et de la logique de l'algorithme. L'intégration de Stateflow avec Simulink a facilité la simulation complète du système photovoltaïque, incluant l'algorithme PSO, permettant ainsi l'analyse des performances du système dans diverses conditions, notamment en cas d'ombrage partiel et dynamique.

L'utilisation de Stateflow permet d'accroître la flexibilité et la modularité pour ajuster l'algorithme PSO en fonction des exigences particulières du système photovoltaïque. Les résultats expérimentaux obtenus ont validé l'approche proposée en mettant en évidence l'efficacité du PSO intégré dans Stateflow pour détecter de manière rapide et précise le point de puissance maximale global, même dans des conditions de variations d'irradiance et de configurations d'ombrage complexes.

Cette étude, bien que exhaustive, suggère des pistes pour des recherches plus approfondies. L'incorporation de méthodes d'intelligence artificielle dans la prédiction des conditions d'ombrage pourrait accroître l'efficacité du système de manière significative. Par ailleurs, analyser l'influence des paramètres du PSO sur la rapidité de convergence et la stabilité du système pourrait conduire à une optimisation plus poussée des performances.

En conclusion, cette étude a mis en évidence l'efficacité de l'algorithme PSO intégré dans Stateflow pour la maximisation du point de puissance dans les installations photovoltaïques. L'emploi de Stateflow comme outil de modélisation et de simulation apporte une originalité et une pertinence particulière à cette étude dans le domaine de l'optimisation des systèmes photovoltaïques. Les résultats obtenus valident la pertinence de cette méthode pour optimiser l'efficacité énergétique des systèmes photovoltaïques dans des environnements complexes.

RÉFÉRENCES

- [1] T. I. E. Agency. "Renewables." <https://www.iea.org/reports/renewables-2023> (accessed 5 janvier, 2025).
- [2] H. H. Pourasl, R. V. Barenji, and V. M. Khojastehnezhad, "Solar energy status in the world: A comprehensive review," *Energy Reports*, vol. 10, pp. 3474-3493, 2023.
- [3] H. Rejdal and B. E. Medjahed, "Optimisation du fonctionnement d'un champ photovoltaïque sous des conditions d'ombrage partiel," Université de Jijel, 2020.
- [4] F. Z. KHAREF and R. MASMOUDI, "Commande MPPT pour les panneaux photovoltaïques en ombrage," *Commande Electriques*, 2021.
- [5] S. MOSTEFA KARA, "Étude et simulation de cellules photovoltaïques à couches minces à base de CIS et CIGS," 2012.
- [6] H. Victor Du John, D. Jackuline Moni, and D. Gracia, "A detailed review on Si, GaAs, and CIGS/CdTe based solar cells and efficiency comparison," *PRZEGLĄD ELEKTROTECHNICZNY*, ISSN, pp. 0033-2097, 2020.
- [7] B. Gaied Chortane, "Amélioration de l'algorithme MPPT pour un système PV par l'intégration des nouvelles techniques basées sur l'intelligence artificielle," mémoire de maîtrise, École de technologie supérieure, Montréal, Canada, 2022.
- [8] L. Alexandre, "Energie renouvelable: Les cellules photovoltaïques," ed: ENSTA–Energie renouvelable.
- [9] H. H. MOLINARO. "Énergie électrique : génération photovoltaïque." https://eduscol.education.fr/sti/si-ens-paris-saclay/ressources_pedagogiques/energie-electrique-generation-photovoltaique (accessed 3 décembre, 2024).
- [10] G. R. ÉNERGIE. "CELLULE PHOTOVOLTAÏQUE." <https://www.gre-enr.fr/cellule-photovoltaique/> (accessed 3 décembre, 2024).
- [11] E. S. Serinken and R. A. Vural, "Accurate Estimation of PV Cell Equivalent Circuit Parameters with Evolutionary Algorithms," in *2023 14th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO)*, 2023: IEEE, pp. 1-5.
- [12] A. Houari, "Contribution à l'étude de micro-réseaux autonomes alimentés par des sources photovoltaïques," *Université de Lorraine*, 2012.
- [13] Versantdeco. "Branchement des panneaux solaires en série en parallèle." <https://photovoltaique-solaires.blogspot.com/2012/07/branchement-des-panneaux-solaire-en-19.html> (accessed 02 janvier, 2025).
- [14] A. Luque and S. Hegedus, *Handbook of photovoltaic science and engineering*. John Wiley & Sons, 2011.
- [15] D. Kothari, A. Pathak, and U. Pandey, "Comparative study of different solar photovoltaic arrays configuration to mitigate the negative impact of partial shading conditions," *J Mech Contin Math Sci*, vol. 16, pp. 102-111, 2021.
- [16] M. Q. Duong, K. H. Le, T. S. Dinh, M. Mussetta, and G. N. Sava, "Effects of bypass diode configurations on solar photovoltaic modules suffering from shading

- phenomenon," in *2017 10th international symposium on advanced topics in electrical engineering (ATEE)*, 2017: IEEE, pp. 731-735.
- [17] S. Khatoon and M. F. Jalil, "Analysis of solar photovoltaic array under partial shading conditions for different array configurations," in *2014 Innovative Applications of Computational Intelligence on Power, Energy and Controls with their impact on Humanity (CIPECH)*, 2014: IEEE, pp. 452-456.
 - [18] Z. DongShuo. "Diode De Dérivation De La Boîte De Jonction PV Pour La Protection Des Panneaux Solaires." <https://www.dsnsolar.com/info/pv-junction-box-s-bypass-diode-for-solar-panel-54221818.html> (accessed 4 décembre, 2024).
 - [19] D. Chaima, "Etude de l'effet de la tension directe de la diode by-pass sur la puissance maximale d'un système photovoltaïque en présence d'ombrage partiel," Faculté des Sciences et Technologies, 2021.
 - [20] M. Dhimish and A. M. Tyrrell, "Photovoltaic bypass diode fault detection using artificial neural networks," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 72, pp. 1-10, 2023.
 - [21] M. H. HAFFAF Ahmed, "Commande MPPT pour les systèmes photovoltaïques en utilisant PSO," 2021.
 - [22] A. O. M. Yahya, A. K. O. Mahmoud, and I. Youm, "Etude et modélisation d'un générateur photovoltaïque," *Journal of Renewable Energies*, vol. 11, no. 3, pp. 473-483-473-483, 2008.
 - [23] M. Benghanem *et al.*, "Evaluation of the performance of polycrystalline and monocrystalline PV technologies in a hot and arid region: an experimental analysis," *Sustainability*, vol. 15, no. 20, p. 14831, 2023.
 - [24] D. Sera, L. Mathe, T. Kerekes, S. V. Spataru, and R. Teodorescu, "On the perturb-and-observe and incremental conductance MPPT methods for PV systems," *IEEE journal of photovoltaics*, vol. 3, no. 3, pp. 1070-1078, 2013.
 - [25] R. Ahmed and S. C. Mohonta, "Comprehensive Analysis of MPPT Techniques using Boost Converter for Solar PV System," in *2020 2nd International Conference on Sustainable Technologies for Industry 4.0 (STI)*, 2020: IEEE, pp. 1-6.
 - [26] R. Erickson and D. Maksimovich, "Fundamentals of power electronics. Springer Science+ Business Media Inc," 2001.
 - [27] H. Patel and V. Agarwal, "Maximum power point tracking scheme for PV systems operating under partially shaded conditions," *IEEE transactions on industrial electronics*, vol. 55, no. 4, pp. 1689-1698, 2008.
 - [28] T. T. Guingane, Z. Koalaga, E. Simonguy, F. Zougmore, and D. Bonkougou, "Modélisation et simulation d'un champ photovoltaïque utilisant un convertisseur élévateur de tension (boost) avec le logiciel MATLAB/SIMULINK," *Journal International de Technologie, de l'Innovation, de la Physique, de l'Energie et de l'Environnement*, vol. 2, no. 1, 2016.
 - [29] M. M. Kaddour, M. C. D. Eddine, M. D. K. YI, M. B. Adel, and M. A. H. Abdelhak, "Modélisation d'un système photovoltaïque relié au réseau: Contrôle des puissances active et réactive."

- [30] I. Lemita, A. Lemita, and D. Encadre par Ounnas, "Etude et maximisation de puissance d'un système photovoltaïque," 2023.
- [31] J. Dadkhah and M. Niroomand, "Optimization methods of MPPT parameters for PV systems: review, classification, and comparison," *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, vol. 9, no. 2, pp. 225-236, 2021.
- [32] S. A. Mohamed and M. Abd El Sattar, "A comparative study of P&O and INC maximum power point tracking techniques for grid-connected PV systems," *SN Applied Sciences*, vol. 1, no. 2, p. 174, 2019.
- [33] H. LENSARI and A. NECAIBIA, "Optimisation et Réalisation d'un Système de Conversion Photovoltaïque par l'Approche MPPT," Université Ahmed Draia-ADRAR, 2018.
- [34] K. Hussein, I. Muta, T. Hoshino, and M. Osakada, "Maximum photovoltaic power tracking: an algorithm for rapidly changing atmospheric conditions," *IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution*, vol. 142, no. 1, pp. 59-64, 1995.
- [35] S. Mirjalili. "Optimization problems and algorithms." <https://www.udemy.com/course/optimisation/learn/lecture/8186874#overview> (accessed 10 décembre, 2024).
- [36] M. Shoaie, Y. Noorollahi, A. Hajinezhad, and S. F. Moosavian, "A review of the applications of artificial intelligence in renewable energy systems: An approach-based study," *Energy Conversion and Management*, vol. 306, p. 118207, 2024.
- [37] N. Nouaouria, "Une approche d'optimisation par essaim de particules pour la recherche en mémoire de cas," Université du Québec à Montréal, 2013.
- [38] T. M. Shami, A. A. El-Saleh, M. Alswaitti, Q. Al-Tashi, M. A. Summakieh, and S. Mirjalili, "Particle swarm optimization: A comprehensive survey," *Ieee Access*, vol. 10, pp. 10031-10061, 2022.
- [39] S. Abraham, S. Sanyal, and M. Sanglikar, "Particle swarm optimisation based Diophantine equation solver," *International Journal of Bio-Inspired Computation*, vol. 2, no. 2, pp. 100-114, 2010.
- [40] M. Sarvi, S. Ahmadi, and S. Abdi, "A PSO-based maximum power point tracking for photovoltaic systems under environmental and partially shaded conditions," *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, vol. 23, no. 2, pp. 201-214, 2015.
- [41] T. Esram and P. L. Chapman, "Comparison of photovoltaic array maximum power point tracking techniques," *IEEE Transactions on energy conversion*, vol. 22, no. 2, pp. 439-449, 2007.
- [42] K. Ishaque and Z. Salam, "A review of maximum power point tracking techniques of PV system for uniform insolation and partial shading condition," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 19, pp. 475-488, 2013.
- [43] K. Younes, K. Mohamed, and K. Yassine, "Etude et optimisation de la technique MPPT pour un panneau photovoltaïque partiellement ombragé," Université Mouloud Mammeri, 2012.
- [44] R. KHALED KHOUDJA and F. Z. KHEIR, "Etude et réalisation de l'effet de l'ombrage sur les panneaux photovoltaïques," Université Ibn Khaldoun, 2023.