

RÉPUBLIQUE ALGÉRIÈNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITÉ MOHAMED BOUDIAF - M'SILA

FACULTE DE TECHNOLOGIE
DÉPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE
N° 10



DOMAINE : Génie électrique
FILIERE : Electrotechnique
OPTION : Electrotechnique

**Mémoire présenté pour l'obtention
du diplôme de Master Académique**

Intitulé

**Amélioration de la commande MPPT d'un système
photovoltaïque par les techniques intelligentes**

Proposé et dirigé par :

Dr. BOUDJELLAL Bilal

Présenté par :

OUKAF Ameer

BELLAL Abdelkrim

ANNÉE UNIVERSITAIRE : 2020 / 2021

Dédicaces

*Je remercie, en premier lieu, **ALLAH** qui m'a donné ce bien là pour que je vive ce jour, **ALLAH** qui m'a donné la patience et le courage pour que je puisse terminer ce travail.*

*A ma mère, **Fatiha Mezàache**, source et symbole de tendresse, à qui je dois ma réussite, pour ses prières, pour l'éducation qu'elle m'a prodiguée, avec tous les moyens et aux prix de tous les sacrifices qu'elle a consentis à mon égard, pour le sens du devoir qu'elle m'a enseigné depuis mon enfance, pour son immense amour, je te souhaite une vie pleine de bonne santé, je t'aime maman,*

*Un très grand **MERCI** à ma famille : mes parents, mes frères, abd erraouf, Ali, Ibrahim, Abd razak et ma sœur, Inas, pour leur amour, leurs conseils ainsi que leur soutien, qui m'a permis de réaliser ce mémoire.*

Merci enfin à mes ami(e)s, qui ont toujours été là pour moi. Je vous remercie infiniment.

*En second lieu, nous tenons à remercier notre encadreur
« **Dr. BOUDJELLAL Bilal** », son précieux conseil et son aide
durant toute la période du travail.*

Enfin, nous tenons également à remercier toutes les personnes qui ont

OuakafAmeur

Dédicaces

*Je remercier, en premier lieu, **ALLAH** qui m'a donné ce bien là pour que je vive ce jour, **ALLAH** qui m'a donné la patience et le courage pour que je puisse terminer ce travail.*

*A mes parents « **Noureddine et Garmia** » en signe d'amour de reconnaissance pour les sacrifices qu'ils ont fait,
et je remercier très grandement « **Dr. BOUDJELLAL Bilal** »
et l'ensemble des enseignants de notre département génie électrique.*

Je remercier toutes les personnes qui nous ont soutenus d'une façon ou d'une autre.

*A mes chers frères et mes sœurs : Ahlem, Nour, Aya, Doaa, Basmala A ma grande famille **BELLAL**.*

A mes amis, qui je souhaite le succès, pour l'amitié qui nous a toujours unis.

A tous ceux qui m'aiment et que j'aime.

BELLAL Abdelkrim

Remerciements

Tout d'abord, nous remercions Allah.

*A la fin de ce travail, nous remercions sincèrement monsieur
Dr. BOUDJELLAL Bilal pour ses remarques, ses conseils considérables
et ces critiques constructives.*

*Nous remercions également tous les membres du jury qui nous a
fait l'honneur en acceptant d'examiner ce travail.*

*Nous remercions tous les enseignants qui ont encadré durant notre
cursus universitaire.*

Résumé

Avec l'accroissement de l'utilisation de l'énergie solaire comme étant source alternative de production de l'énergie électrique, plusieurs méthodes ont été développées pour la poursuite du point de puissance maximale des panneaux solaires. Ces techniques se différencient selon la simplicité, la rapidité et les outils utilisés.

Il existe des méthodes MPPT conventionnelles souvent utilisées, à savoir la méthode de perturbation et d'observation (P&O) et la méthode de conductance incrémentale (PSO) méthodes dites avancées, Ce mémoire présente une étude comparative entre ces différentes techniques MPPT afin d'analyser et simuler le système global PV sous des conditions de fonctionnement variables. Pour ce faire les, modèles mathématiques des composants du système PV (GPV, convertisseur DC-DC, charge) ont été développés. Les résultats de simulation, obtenus à l'aide d'un outil de simulation, ont prouvé en général que les performances du contrôleur MPPT PSO et flou sont bien meilleures que celles du contrôleur MPPT conventionnel.

Mots clés MPPT - GPV - Convertisseur DC-DC - Boost - PSO - Commandes intelligentes - P&O - Système PV - Modélisation - Simulation.

Table des matières

Table des matières.....	i
Liste des Figures.....	iii
Liste des Tableaux.....	v
Glossaire.....	vii
Nomenclature	viii
Introduction générale	2
Chapitre I. Généralité et étude d'un système photovoltaïque	5
I.1 Introduction.....	5
I.2 Définition et Historique du photovoltaïque	5
I.2.1 Définition.....	5
I.2.2 Historique	5
I.3 L'énergie solaire	6
I.4 Rayonnement solaire.....	7
I.4.1 Différents types de rayonnement.....	7
I.5 Les énergies renouvelables, une priorité en Algérie	9
I.5.1 Potentiel solaire en Algérie.....	10
I.6 Différents types de systèmes photovoltaïques	11
I.6.1 Systèmes photovoltaïques autonomes.....	11
I.6.1.1 Les différentes composantes.....	12
I.6.2 Système PV connecté au réseau.....	13
I.6.3 Les systèmes hybrides.....	14
I.7 La cellule photovoltaïque.....	15
I.7.1 Définition.....	15
I.7.2 Principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque.....	16
I.7.3 Les différents types de cellules solaires (cellules PV).....	16
I.7.4 Nouvelle technologie	17
I.7.5 Comparatif des différentes technologies :.....	18
I.8 Association des cellules	18
I.8.1 Association en série	19
I.8.2 Association en parallèle	19
I.8.3 Association série-parallèle.....	19
I.9 Les convertisseurs	20
I.9.1 Le convertisseur DC– DC	20
I.9.2 Le convertisseur DC– AC	20
I.10 Protection des modules photovoltaïques.....	20
I.11 Les suiveurs solaires	21
I.11.1 Rendement du système poursuite solaire	22
I.12 MATLAB/SIMULINK :.....	22
I.12.1 Caractéristiques du module PV.....	23
I.12.2 Influence de l'éclairement	23
I.12.3 L'influence de la température.....	24
I.13 Avantages et inconvénients d'une installation PV.....	25

I.13.1	Avenir du photovoltaïque	26
I.14	Conclusion	26
Chapitre II. Modélisation et commande d'un système photovoltaïque par la méthode de perturbation et d'observation		28
II.1	Introduction	28
II.2	Modélisation du générateur photovoltaïque	29
II.3	Caractéristiques électriques d'une cellule PV	31
II.3.1	Courant de court-circuit	31
II.3.2	Tension de circuit-ouvert	31
II.3.3	Puissance de la cellule PV	32
II.3.4	Puissance maximale d'une cellule PV	32
II.3.5	Rendement énergétique	33
II.3.6	Facteur de forme	33
II.4	Convertisseurs DC-DC	33
II.4.1	Structure de convertisseur Buck :	34
II.4.1.1	Modèle mathématique équivalent de convertisseur Buck	35
II.4.2	Structure de Convertisseur Boost	37
II.4.2.1	Modèle mathématique équivalent de convertisseur Boost	38
II.5	Connexion directe entre le GPV et la charge	42
II.6	Commande pour la recherche du Point de Puissance Maximale (MPPT)	43
II.6.1	Principe de la commande MPPT	43
II.6.2	Classification Des Commandes MPPT	44
II.6.3	Classification des Commandes MPPT Selon les Paramètres D'entrée	45
II.6.4	Classification des commandes MPPT selon le type de recherche :	45
II.6.4.1	MPPT Indirect :	45
II.6.4.2	MPPT directs :	46
II.6.5	Méthode de perturbation ET d'observation (P&O) :	46
II.7	Simulation du module PV avec la commande P&O	49
II.7.1	Les résultats de simulation de la méthode P&O	50
II.8	Conclusion	53
Chapitre III. Pour suite du point de puissance maximale MPPT du système photovoltaïque par la méthode PSO		55
III.1	Introduction :	55
III.2	Processus d'optimisation	55
III.2.1	Variables du problème	55
III.2.2	Espace de recherche	56
III.2.3	Fonction objectif	Error! Bookmark not defined.
III.2.4	Problème d'optimisation	56
III.2.5	Optimisation par Essaim de Particules (PSO)	57
III.3	Méthode de base	59
III.3.1	Principe de l'Algorithme PSO	60
III.4	Formulation Mathématique de l'Algorithme PSO	60
III.5	Application de la méthode PSO sur l'MPPT	64
III.6	Simulations de la méthode PSO	66
III.7	Etude comparative entre les méthodes PSO et les méthodes classique P&O	69
III.8	Conclusion :	71
Conclusion générale		73
Références bibliographiques		75

Liste des Figures

Figure I.1– Composants du rayonnement solaire.	8
Figure I.2– Modélisation de l'inégale répartition de l'énergie solaire dans le monde.	10
Figure I.3– Moyenne annuelle de l'irradiation solaire globale reçue sur un plan incliné à la latitude du lieu.	11
Figure I.4– Les différents types de systèmes photovoltaïques autonomes.	13
Figure I.5– Systèmes photovoltaïques connectés au réseau.	14
Figure I.6– Configuration du système hybride à bus continu [21].	15
Figure I.7– Le principe de fonctionnement d'une cellule solaire.	16
Figure I.8– Types de cellules solaires.	17
Figure I.9– Association de N modules solaires en série.	19
Figure I.10– Association des modules solaires en parallèle.	19
Figure I.11– Association mixte des modules solaires.	20
Figure I.12– Schématisation d'un GPV élémentaire avec diodes by-pass et diode anti-retour.	21
Figure I.13– Suiveur solaire [35].	22
Figure I.14– Caractéristiques I (V) d'un panneau.	23
Figure I.15– Caractéristiques P (V) d'un panneau solaire pour différents éclaircissements.	24
Figure I.16– L'influence de la température sur la caractéristique $I=f(V)$	24
Figure I.17– L'influence de la température sur la caractéristique $P=f(V)$	25
Figure II.1– Schéma simplifié d'un système PV.	28
Figure II.2– Schéma équivalent électrique de la cellule PV à une diode.	29
Figure II.3– Puissance maximale idéale et pratique.	32
Figure II.4– Périodes de fermeture et d'ouverture d'un commutateur.	34
Figure II.5– convertisseurs d'énergie type (Buck).	34
Figure II.6– Allure des variables dynamiques $I_L(t)$	35
Figure II.7– Caractéristique de la tension et des courants dans le transistor et l'inductance d'un convertisseur Buck [3][9][13].	37
Figure II.8– Convertisseur d'énergie type (Boost)	38
Figure II.9– Caractéristique de la tension et du courant de la hacheur (Boost) [47][49][52].	40
Figure II.10– Connexion directe entre un GPV et une charge.	42
Figure II.11– Points de fonctionnement d'un GPV en connexion directe, en fonction de la ...	42
Figure II.12– Diagramme en circuit d'un système photovoltaïque (PV-Boost-MPPT).	44
Figure II.13– Principe de la commande MPPT.	44
Figure II.14– Caractéristique P_{pv} (V_{pv}) et fonctionnement de la méthode P&O.	46
Figure II.15– Organigramme de la méthode Perturbation et Observation [45][48].	47
Figure II.16– Divergence de la méthode P&O.	48
Figure II.17– schématique de SIMULINK de la méthode P&O.	50
Figure II.18– Changement d'éclaircissement.	50

Figure II.19– Courbe de Rapport cyclique $D(t)$ par la méthode P&O.....	50
Figure II.20– Courbe de puissance $P(t)$ du GPV ($P \& O$).	51
Figure II.21– Courbe de courant $I(t)$ du GPV ($P \& O$).	51
Figure II.22– Courbe de tension $V(t)$ du GPV ($P \& O$).	51
Figure II.23– Courbe de puissance de la sortie P_s ($P \& O$).	52
Figure II.24– Courbe de Courant de la sortie I_s (t) ($P \& O$).	52
Figure II.25– Courbe de Tension de la sortie V_s (t) ($P \& O$).	52
Figure III.1– Déplacement d’une particule	58
Figure III.2– Schéma vectorielle du déplacement d’une particule	62
Figure III.3– Organigramme général de la méthode PSO [68] [75].	63
Figure III. 4– Organigramme de la méthode PSO pour réaliser l’MPPT	65
Figure III.5– schématique de SIMULINK de la méthode PSO.	66
Figure III.6– Changement d’éclairement.	66
Figure III.7- Courbe de Rapport cyclique $D(t)$ par la méthode PSO	67
Figure III.8– Courbe de puissance $P(t)$ du GPV (PSO).	67
Figure III.9 : Courbe de tension $V_{pv}(t)$ du GPV (PSO).	67
Figure III.10 : Courbe de courant $I(t)$ du GPV (PSO).	67
Figure III.11 : Courbe de puissance de la sortie P_s (t) (PSO).	68
Figure III.12 : Courbe de Tension de la sortie V_s (t) (PSO).	68
Figure III.13 : Courbe de Courant de la sortie I_s (t) (PSO).	68
Figure III.14 : Courbe de puissance $P(t)$ du GPV (PSO et P&O).	69
Figure III.15 : Courbe de Tension $V(t)$ du GPV (PSO et P&O).	69
Figure III.16 : Courbe de Courant $I(t)$ du GPV (PSO et P&O).	70
Figure III.17 : Courbe de Puissance de sortie (PSO et P&O).	70

Liste des Tableaux

Tableau I.1 – Quelques valeurs d'albédo [10].	8
Tableau I.2 – Ensoleillement reçu en Algérie par régions climatiques.	10
Tableau I.3 – Comparatif des différentes technologies cellule.	18
Tableau I.4 – Caractéristiques électriques du module PV.	23
Tableau II.1 – Classification des convertisseurs statiques.	41
Tableau II.2 – Caractéristiques majeures des commandes MPPT [61].	49

Glossaire

MCC	Mode de Conduction continue
MLI	Modulation de Largeur d'Impulsion
MPPT	Maximum Power Point Tracking
PV	Photovoltaïque
P&O	Perturbation et observation
PSO	Optimisation par essaim particulier
MPP	Pointe de puissance maximale

Nomenclature

C_{dc}	Condensateur de sortie du convertisseur Boost
C_{pv}	Condensateur d'entier du convertisseur Boost
f_s	Fréquence de système PV
i_{cell}	Le Courant fournie par la cellule photovoltaïque
i_{ph}	Courant photonique, du modèle d'une cellule photovoltaïque
i_{pv}	Courant du système photovoltaïque
I_{sat}	Le courant de saturation
I_{rr}	Le courant de saturation de la diode
I_{sc}	Le courant de court-circuit
V_{oc}	La tension de circuit-ouvert
V_{cell}	La tension aux bornes de la cellule
G	Ensoleillement
Q	Charge de l'électron
A	Coefficient de température de courant photonique
K	Constant de Boltzmann
E_g	L'énergie du band gap
N	Facteur d'idéalité de la jonction
N_s	Nombre de cellules connectées en série
N_p	Nombre de cellules connectées en parallèle
L_{Gpv}	Inductance du convertisseur du système photovoltaïque
P_{pv}	Puissance débitée par la source solaire photovoltaïque

Introduction générale

Introduction générale

La production d'énergie est un défi de grande importance pour les années à venir. En effet, les besoins énergétiques des sociétés industrialisées ne cessent d'augmenter. Par ailleurs, les pays en voie de développement auront besoin de plus en plus d'énergie pour mener à bien leur développement. De nos jours, une grande partie de la production mondiale d'énergie est assurée à partir de sources fossiles. La consommation de ces sources donne lieu à des émissions de gaz à effet de serre et donc une augmentation de la pollution. Le danger supplémentaire est qu'une consommation excessive du stock de ressources naturelles réduit les réserves de ce type d'énergie de façon dangereuse pour les générations futures [1-3].

On distingue deux types d'énergie : les énergies non renouvelables et les énergies renouvelables. Les premières sont dérivées à partir du pétrole, du gaz, du charbon, et d'uranium...Les secondes de l'hydraulique, la biomasse, les déchets, l'éolien, le solaire, le géothermique, etc. [1-3].

Dans ce contexte général, notre étude s'intéresse à la filière photovoltaïque (PV) qui semble une des plus prometteuses avec un taux de croissance mondial très élevé.

L'énergie PV est obtenue directement à partir du rayonnement du soleil. Elle peut même se transformer en énergie électrique grâce à l'effet photovoltaïque [2]. Les panneaux PV composés des cellules PV ont la capacité de transformer les photons en électrons. L'énergie sous forme de courant continu est ainsi directement utilisable [1].

En raison des caractéristiques électriques fortement non linéaires des cellules PV et de leurs associations, le rendement des systèmes PV peut être amélioré par des solutions utilisant les techniques de recherche du point de puissance maximale (dites techniques MPPT). Concernant ce travail, nous nous sommes intéressés essentiellement au développement d'une procédure d'optimisation qui permet la poursuite de point de la puissance maximale (Maximum Power Point Tracking MPPT) d'un générateur photovoltaïque (GPV), pour une bonne exploitation du générateur photovoltaïque. Ainsi qu'optimiser les forces agissant sur les capteurs de force qui sont fixés à la carrosserie du véhicule [59]. En effet, par exemple dans le cas des engins mobiles alimentés par l'énergie photovoltaïque, l'alimentation doit être assurée au point maximal de la puissance (MPPT) quelques soient les conditions météorologiques (Température et éclairement). Ceci nécessite l'implémentation d'une technique de poursuite de point maximale de puissance, telle que la méthode de Perturbation - Observation (P&O) et la méthode PSO.

D'autre part, la PSO a reçu une attention particulière de la part d'un certain nombre de chercheurs dans le domaine de l'électronique de puissance. Vu ses performances, nous l'avons appliquée pour développer une technique MPPT PSO. Le mémoire présenté est organisé en trois chapitres. Après une introduction générale

Le premier chapitre présente d'une manière générale les systèmes photovoltaïques et leurs composants ainsi le principe de la conversion photovoltaïque puis nous donnerons les principales caractéristiques d'un GPV et nous présenterons les systèmes photovoltaïques, avec leurs avantages et leurs inconvénients.

Le deuxième chapitre est consacré à une Modélisation du générateur photovoltaïque et modélisation de deux types de convertisseurs DC-DC à savoir, les convertisseurs Buck et Boost. De plus, il montre quelques techniques de poursuite du point de puissance maximale (MPPT), et nous nous intéresserons à l'étude de la méthode "Perturbation - Observation".

Dans le troisième chapitre, nous présenterons la commande PSO d'un système photovoltaïque pour la recherche du point de puissance maximale (MPP).

Le travail a été complété par une étude comparative avec un test de robustesse entre les méthodes dites conventionnelles à savoir, la méthode Perturbation- Observation (P&O) et celle basée sur la méthode PSO.

Les résultats obtenus mettent en évidence l'avantage de l'approche PSO par rapport à la méthode Perturbation et Observation (P&O). Le mémoire se termine par une conclusion générale et des perspectives.

Chapitre I. Généralité et étude d'un système photovoltaïque

Chapitre I. Généralité et étude d'un système photovoltaïque

I.1 Introduction

L'énergie photovoltaïque est l'un des enjeux de la politique énergétique de notre siècle, qui résulte de la transformation directe de la lumière du soleil en énergie électrique, au moyen d'une photopile. Cette conversion d'énergie s'effectue par le biais d'une cellule dite photovoltaïque (PV) basée sur un phénomène physique appelé effet photovoltaïque qui consiste à produire une force électromotrice lorsque la surface de cette cellule est exposée à la lumière. Il utilise pour se faire des modules photovoltaïques composés de cellules. Ces cellules photovoltaïques sont constituées de semi-conducteurs à base de silicium (Si), de germanium (Ge), de sélénium (Se), etc. Le silicium est actuellement le matériau le plus utilisé pour fabriquer les cellules photovoltaïques, car il est très abondant dans la nature. La tension générée peut varier en fonction du matériau utilisé pour la fabrication de la cellule [4].

Dans ce chapitre, nous commencer par la définition de l'énergie solaire puis la construction des cellules photovoltaïques et leur effet ainsi principe de fonctionnement et Les modes d'exploitation d'un panneau photovoltaïque. Puis nous présentons les différents types des cellules photovoltaïques.

I.2 Définition et Historique du photovoltaïque

I.2.1 Définition

Pour définition le mot " photovoltaïque " vient du grec " photo " qui signifie lumière et de" voltaïque " qui tire son origine du nom d'un physicien italien Alessandro Volta (1754 - 1827) qui a beaucoup contribué à la découverte de l'électricité, alors le photovoltaïque signifie littérairement la lumière électricité [5].

I.2.2 Historique

L'effet photovoltaïque a été découvert en 1839. Cette conversion résulte par la transformation directe de la lumière du soleil en énergie électrique. Bien que le soleil soit une

source énergétique illimitée, l'homme cherche depuis longtemps à profiter de cette source. Dans notre époque, l'humanité se base sur des cellules solaires.

Dates importantes dans l'histoire du photovoltaïque :

- **1839** : Le physicien français Antoine Becquerel découvre l'effet photovoltaïque.
- **1875** : Werner Von Siemens expose devant l'Académie des Sciences de Berlin un article sur l'effet photovoltaïque dans les semi-conducteurs.
- **1887** : L'effet photoélectrique a été compris et présenté en 1887 par Heinrich Rudolf Hertz qui en publia les résultats dans la revue scientifique *Annalen der Physik*.
- **1905** : Einstein expliqua le phénomène photoélectrique en 1905 et obtint le prix Nobel de physique sur ses travaux en 1921.
- **1954** : Trois chercheurs américains, Chapin, Pearson et Prince des laboratoires BELL mirent au point la première cellule photovoltaïque au silicium avec un rendement de 4%, au moment où l'industrie spatiale naissante cherche des solutions nouvelles pour alimenter ses satellites.
- **1958** : Une cellule photovoltaïque avec un rendement de 9 % est mise au point. Les premiers satellites Vanguard alimentés par des cellules photovoltaïques sont envoyés dans l'espace.
- **1973** : La première maison alimentée par des cellules photovoltaïques est construite à l'Université de Wilmington dans l'Etat du Delaware, USA.
- **1983** : La première voiture alimentée par de l'énergie photovoltaïque parcourt une distance de 4 000 km en Australie.
- **1995** : Des programmes de toits photovoltaïques raccordés au réseau ont été lancés, au Japon et en Allemagne, et se généralisent depuis 2001.
- **2000** : Entrée en application le 1er avril 2000 et modifiée en 2004 et en 2009, l'EEG Renewable Energy Sources Act (EEG) est le résultat de la transposition de la directive européenne relative à la promotion des énergies renouvelables dans le secteur de l'électricité.
- **2005** : En décembre 2005 mise en réseau de la première centrale solaire photovoltaïque du groupe Prime Energy à Weil am Rhein (Baden-Württemberg), Hagenheimer strasse 17, 79576 Weil am Rhein [6].

I.3 L'énergie solaire

L'énergie solaire représente une alternative aux énergies fossiles habituelles. Disponible en grande quantité à notre échelle et répartie sur toute la surface de la terre, elle permet de

recupérer jusqu'à 1000W/m² dans les zones tempérées. Que l'on soit en milieu urbain ou au contraire, en site isolé, cette énergie peut être récupérée et utilisée sous forme thermique ou électrique [7], il existe différents types d'énergies solaires [8] :

- a) **L'énergie passive** : Ce type d'énergie va être utilisé pour le chauffage, l'éclairage naturel et la climatisation des locaux.
- b) **L'énergie solaire thermique** : Cette énergie est la transformation des rayons du soleil en énergie thermique (chaleur).
- c) **L'énergie thermodynamique** : Cette énergie est l'une des modes de valorisation du rayonnement solaire direct. Cette technologie consiste à concentrer le rayonnement solaire à l'aide de collecteurs pour chauffer un fluide à haute température qui va produire de vapeur à haute pression qui est ensuite turbinée.
- d) **L'énergie photovoltaïque** : Énergie solaire photovoltaïque Désigne l'énergie récupérée et transformée directement en électricité à partir de la lumière du soleil par des panneaux photovoltaïques. Elle résulte de la conversion directe dans un semi-conducteur d'un photon en électron.

I.4 Rayonnement solaire

L'énergie reçue au niveau du sol est plus faible que 1354 w/m² (la constante solaire) car l'atmosphère absorbe une partie du rayonnement solaire (environ 15%) et la réémet dans toutes les directions sous forme de rayonnement diffus. L'atmosphère réfléchit une autre partie du rayonnement solaire vers l'espace (environ 6%). Le rayonnement global au niveau du sol se définit donc comme la somme du rayonnement direct et du rayonnement diffus, l'énergie reçue par une surface dépend en outre de la saison, de la latitude, des conditions météorologiques, du relief, de la pollution, de l'orientation de la surface considérée, etc...

I.4.1 Différents types de rayonnement

a) Rayonnement direct

C'est la fraction du rayonnement solaire qui arrive directement au sol, dont le trajet est « linéaire » (il y a, en fait, de légères déviations) et unique à un instant donné. Si I est le rayonnement direct [9].

Dans le cas d'un plan horizontal le rayonnement s'écrit :

$$I_h = \sin \times I \quad \text{(I.1)}$$

Avec : h hauteur du soleil.

b) Rayonnement diffus

Le rayonnement diffus est le rayonnement provenant de toute la voûte céleste. Ce rayonnement est dû à l'absorption et à la diffusion d'une partie du rayonnement solaire par l'atmosphère et à sa réflexion par les nuages. Ainsi, par ciel serein, il constitue 20% de l'énergie globale. Par ciel couvert, il correspond à la totalité de l'énergie reçue au sol [10].

c) Rayonnement réfléchi (L'albédo)

C'est le rayonnement qui est réfléchi par le sol ou par des objets se trouvant à sa surface. Ce rayonnement dépend de l'albédo du sol et il peut être important lorsque le sol est particulièrement réfléchissant (eau, neige, etc....).

$$L'albédo Alb = \frac{\text{energie réfléchie}}{\text{energie recue}} \tag{L.2}$$

Surfaces du sol	Albédo
Surface d'eau	0.01 à 0.1
Forêt	0.05 à 0.2
Sol cultivé	0.07 à 0.14
Pierres et rochers	0.15 à 0.25
Champs et prairies	0.1 à 0.3
Sol nul	0.15 à 0.4
Neige ancienne	0.5 à 0.7
Neige fraîche	0.8 à 0.95

Tableau L1 – Quelques valeurs d'albédo [10].

d) Rayonnement global

- Une surface horizontale : C'est l'ensemble du rayonnement d'origine solaire qui parvient sur une surface horizontale sur le globe terrestre. Il comprend donc la composante verticale du rayonnement solaire direct et rayonnement solaire diffus [9].
- Une surface inclinée : Rayonnement global sur une surface inclinée est la somme des rayonnements : Direct, Diffus et Réfléchi.

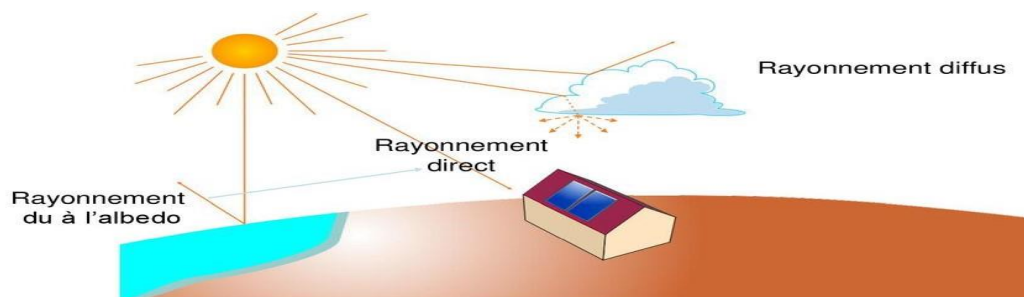


Figure L1– Composants du rayonnement solaire.

I.5 Les énergies renouvelables, une priorité en Algérie

L'Algérie joue un rôle clé dans les marchés mondiaux de l'énergie en tant que producteur et exportateur de gaz naturel et de gaz naturel liquéfié. Le mix énergétique de l'Algérie en 2010 a été presque exclusivement basé sur les combustibles fossiles, en particulier le gaz naturel (93%). Cependant, le pays a un énorme potentiel d'énergie renouvelable, principalement solaire, dont le gouvernement est (ou devrait) en essayant de l'exploiter en lançant un programme d'énergie renouvelable et d'efficacité énergétique ambitieux.

Le programme des énergies renouvelables actualisé consiste à installer une puissance d'origine renouvelable de l'ordre de 22 000 MW à l'horizon 2030 pour le marché national, dont 12 000 MW seront destinés à la consommation interne et le reste pour l'exportation. Le programme est axé sur le développement et l'expansion de l'utilisation des ressources renouvelables, comme l'énergie solaire, le vent, la biomasse, la géothermie et l'hydroélectricité, afin de diversifier les sources d'énergie et promouvoir le développement durable du pays [11-12].

Les projets des énergies renouvelables pour la production de l'électricité dédiés au marché national seront menés en trois phases :

- **Phase 2011-2013** : pour tester les différentes filières d'énergies renouvelables. Comme exemples de projets pilotes, on peut citer la station photovoltaïque de 1MWc à Oued N'chou, 10km au nord de la commune de Ghardaïa, réalisée sur une superficie de 10 hectares, pour un coût global de près de 900 millions de DA, cette mini-centrale est composée de 6000 modules photovoltaïques de différentes technologies ainsi que la station de 10 MW à Adrar, composée de 12 éoliennes.
- **Phase 2014-2015** : déploiement du programme électricité renouvelable et la construction des équipements.

Une puissance totale de près de 650 MW serait installée ;

- **Phase 2016-2020** : déploiement à grande échelle.

Environ 60 centrales solaires photovoltaïques, en se concentrant sur les centrales solaires, parcs éoliens ainsi que des centrales électriques hybrides qui doivent être construites au cours des dix prochaines années.

I.5.1 Potentiel solaire en Algérie

De par sa situation géographique, l'Algérie dispose de l'un des gisements solaires les plus importants au monde. La durée d'insolation sur la quasi-totalité du territoire national dépasse les 2000 heures annuellement et atteint les 3900 heures (hauts plateaux et Sahara). L'énergie reçue quotidiennement sur une surface horizontale de 1 m² est de l'ordre de 5 kWh sur la majeure partie du territoire national, soit près de 1700 kWh /m²/an au Nord et 2263 kWh/m²/an au sud du pays.

La répartition du potentiel solaire par région climatique au niveau du territoire algérien est représentée dans le tableau selon l'ensoleillement reçu annuellement [13].

Régions	Région côtière	Hauts Plateaux	Sahara
Superficie (%)	4	10	86
Durée moyenne d'ensoleillement (Heures/an)	2650	3000	3500
Energie moyenne reçue (KWh/m ² /an)	1700	1900	2650

Tableau I2 – Ensoleillement reçu en Algérie par régions climatiques.

Suite à une évaluation par satellites, l'Agence Spatiale Allemande (ASA) a conclu, que l'Algérie représente le potentiel solaire le plus important de tout le bassin méditerranéen soit 169.000TWh / an pour le solaire thermique, 13,9TWh/an pour le solaire photovoltaïque. Le potentiel solaire algérien est l'équivalent de 10grands gisements de gaz naturel qu'auraient été découverts à Hassi R'Mel.

De par sa situation géographique, l'Algérie dispose d'un gisement solaire énorme comme le montre la figure I.2.

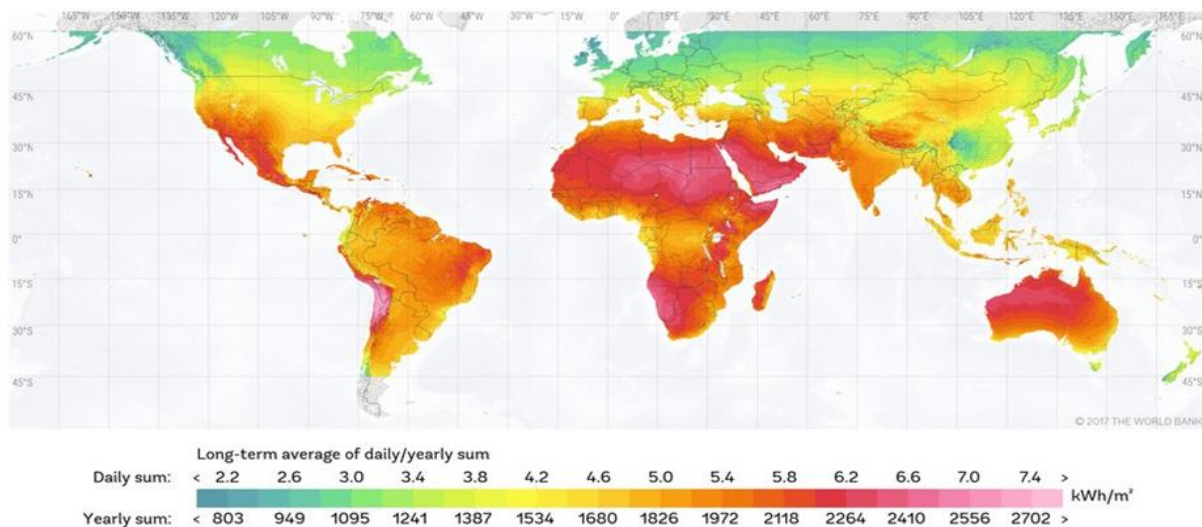


Figure I2– Modélisation de l'inégale répartition de l'énergie solaire dans le monde.

En Algérie, il existe un réseau de 78 stations de mesure météorologiques de l'office national de la météorologie (O N M) réparties sur tout le territoire algérien [14]. Cependant, seules 7 stations météorologiques assurent la mesure des composantes diffuses et globales du rayonnement solaire reçu sur un plan horizontal en raison, soit du manque de fiabilité des appareils de mesure, ou bien, du coût élevé d'un tel appareillage. La durée d'insolation quant à elle, est mesurée par un héliographe dans la majorité des stations de (O.N.M) à cause de la facilité de sa mise en œuvre [15].

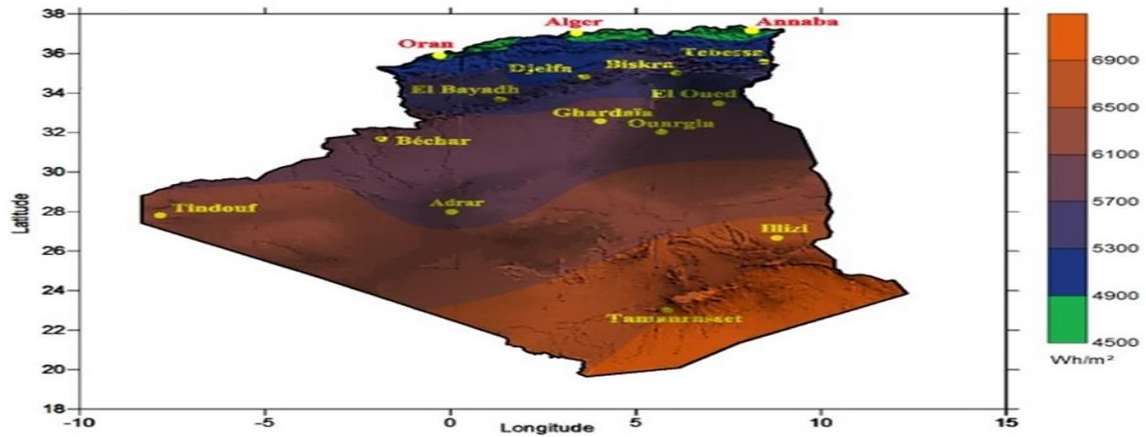


Figure I.3–Moyenne annuelle de l'irradiation solaire globale reçue sur un plan incliné à la latitude du lieu.

I.6 Différents types de systèmes photovoltaïques

On rencontre généralement trois types de systèmes photovoltaïques, les systèmes autonomes, les systèmes hybrides et les systèmes connectés à un réseau [16]. Les deux premiers sont indépendants du système de distribution d'électricité, en les retrouvant souvent dans les régions éloignées.

I.6.1 Systèmes photovoltaïques autonomes

C'est un système photovoltaïque totalement indépendant des autres sources d'énergie et qui fournit à l'utilisateur de l'électricité sans être connecté au réseau électrique. L'utilisation de ce type d'installation consiste à utiliser l'électricité produite directement ou en la stockant dans des batteries. Ils servent habituellement à alimenter les maisons en site isolé, sur des îles, en montagne ainsi qu'à des applications comme le pompage de l'eau. [17]

Ces systèmes sont les suivants :

- Les panneaux solaires montés sur le toit ou dans des espaces ouverts. Les modules Photovoltaïques produisent l'énergie électrique à courant continu (DC).
- Les batteries pour stocker l'énergie continue générée par les panneaux solaires.
- Le contrôleur de charge pour éviter la surcharge de la batterie.
- L'onduleur pour convertir l'électricité produite par le système de courant continu en courant alternatif.

I.6.1.1 Les différentes composantes

On distingue deux types selon les besoins de la charge [18] :

- **Système autonome sans batterie** : Ce type de système ne requiert pas de stockage d'électricité, soit parce que la production d'énergie des cellules est suffisante sous un faible éclairage (ex. : calculatrice), soit que le temps de fonctionnement de la charge n'est pas critique (ex. : pompage photovoltaïque : le réservoir d'eau sert de stockage).
- **Système autonome avec batterie** : C'est la configuration la plus courante des systèmes photovoltaïques autonomes que les anglophones appellent Stand-alone systems. Le champ PV sert de chargeur pour la batterie. L'électricité peut alors être utilisée en tout temps. (Ex. l'éclairage d'une maison la nuit).

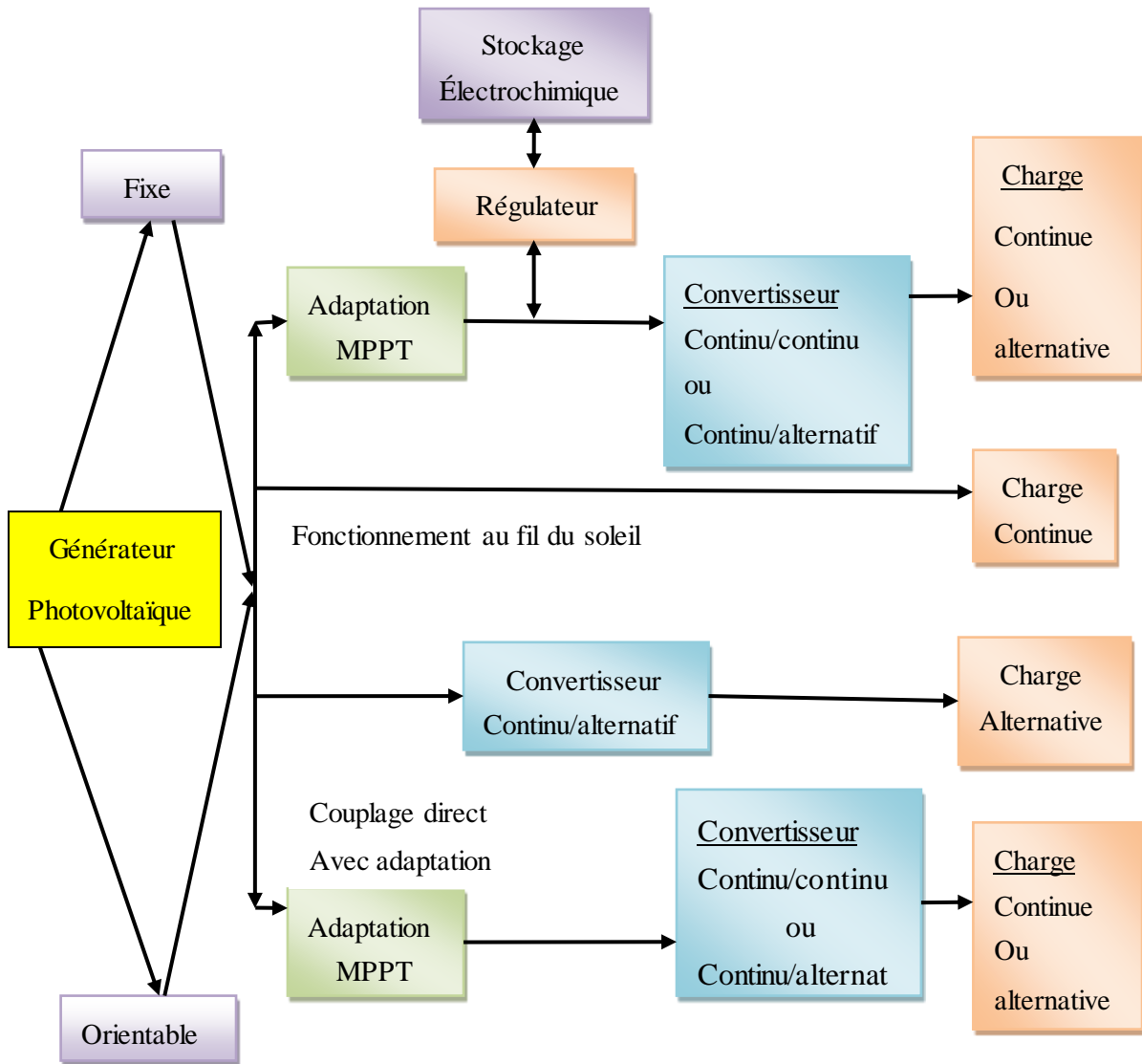


Figure I4– Les différents types de systèmes photovoltaïques autonomes.

I.6.2 Système PV connecté au réseau

À l'aide d'un convertisseur courant continu- courant alternatif, le champ photovoltaïque est couplé directement au réseau électrique. L'énergie est stockée dans le réseau lui-même donc les batteries de stockage ne sont pas nécessaires à moins que l'on veuille une forme autonome d'énergie pendant les pannes d'électricité.

L'énergie produite est consommée sur place et le surplus étant injecté dans le réseau, qui alimente les maisons de nuit ou pendant les jours sans soleil [17].

Ces systèmes sont les suivants :

- Les panneaux solaires montés sur le toit ou dans des espaces ouverts. Les modules photovoltaïques produisent l'énergie électrique à courant continu (DC) ;

- Les batteries pour stocker l'énergie continue générée par les panneaux solaires ;
- Le contrôleur de charge pour éviter la surcharge de la batterie ;
- L'onduleur spécialement conçu pour transformer le courant continu généré par le générateur PV en courant alternatif, qui sera injecté au réseau.

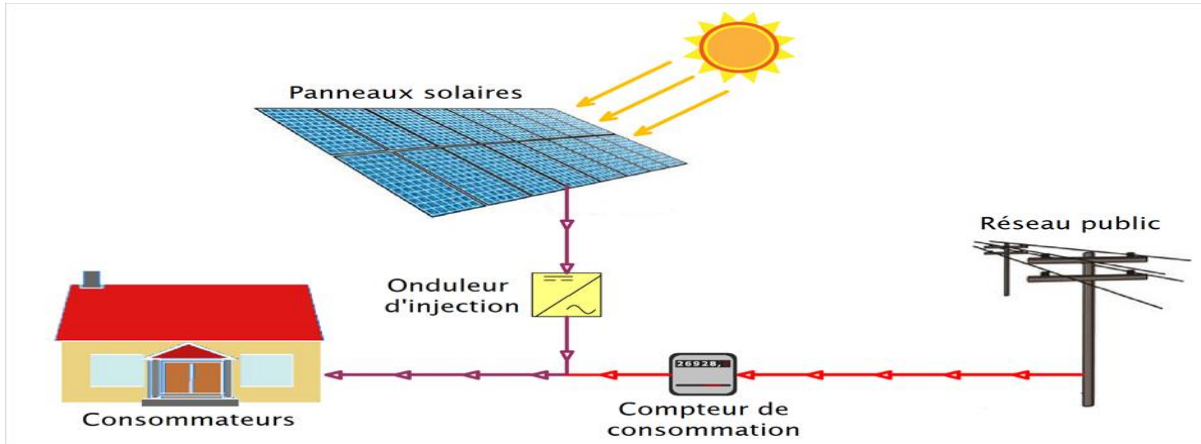


Figure I5– Systèmes photovoltaïque connectés au réseau.

I.6.3 Les systèmes hybrides

Les systèmes d'énergie hybride associent au moins deux sources d'énergie renouvelable aussi une ou plusieurs sources d'énergie classiques. Les sources d'énergie renouvelable, comme le photovoltaïque et l'éolienne ne délivrent pas une puissance constante, mais vu leurs complémentarités, leur association permet d'obtenir une production électrique continue. Les systèmes d'énergie hybrides sont généralement autonomes par rapport aux grands réseaux interconnectés et sont souvent utilisés dans les régions isolées. Les différentes sources dans un système hybride peuvent être connectées en deux configurations, architecture à bus continu et architecture à bus alternatif [19][20].

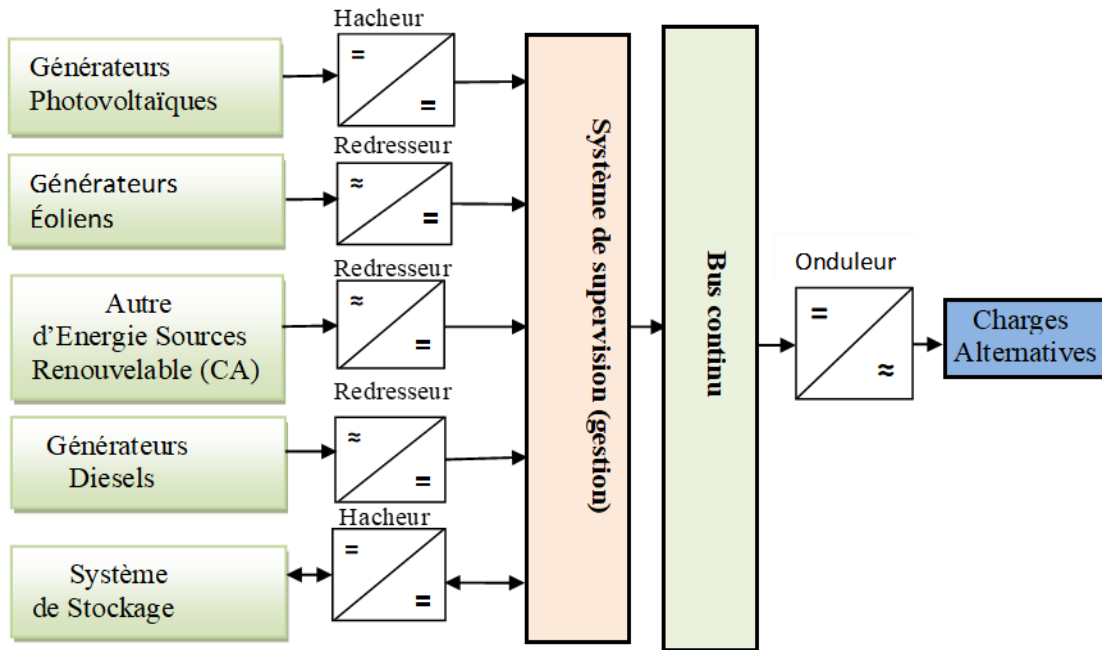


Figure I.6– Configuration du système hybride à bus continu [21].

Dans la première configuration, la puissance fournie par chaque source est centralisée sur un bus continu (voir figure I-18). Ainsi, les systèmes de conversion d'énergie à courant alternatif (CA) fournissent d'abord leur puissance à un redresseur pour être convertie ensuite en courant continu (CC). Les générateurs sont connectés en série avec l'onduleur pour alimenter les charges alternatives. L'onduleur doit alimenter les charges alternatives à partir du bus continu et doit suivre la consigne fixée pour l'amplitude et la fréquence. La fonction spécifique du système de supervision est la commande de mise en marche et arrêt des générateurs et du système de stockage. L'avantage de cette topologie est la simplicité de commande. Dans la seconde configuration tous les composants du système hybride sont reliés à la charge alternative.

I.7 La cellule photovoltaïque

I.7.1 Définition

Une cellule photovoltaïque est un dispositif qui permet de transformer l'énergie solaire en énergie électrique. Cette transformation est basée sur les trois mécanismes suivants :

- Absorption des photons (dont l'énergie est supérieure au gap) par le matériau constituant le dispositif ;
- Conversion de l'énergie du photon en énergie électrique, ce qui correspond à la création de paires électron/trous dans le matériau semi-conducteur ;
- Collecte des particules générées dans le dispositif [22].

I.7.2 Principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque

Une cellule PV est réalisée à partir de deux couches de silicium, une dopée P (dopée au bore) et l'autre dopée N (dopée au phosphore) créant ainsi une jonction PN avec une barrière de potentiel. Lorsque les photons sont absorbés par le semi-conducteur, ils transmettent leur énergie aux atomes de la jonction PN de telle sorte que les électrons de ces atomes se libèrent et créent des électrons (charges N) et des trous (charges P). Ceci crée alors une différence de potentiel entre les deux couches. Cette différence de potentiel est mesurable entre les connexions des bornes positives et négatives de la cellule. A travers une charge continue, on peut en plus récolter des porteurs. La tension maximale de la cellule est d'environ 0.6 V pour un courant nul. Cette tension est nommée tension de circuit ouvert (VOC). Le courant maximal se produit lorsque les bornes de la cellule sont court-circuitées, il est appelé courant de court-circuit (ICC) [23].

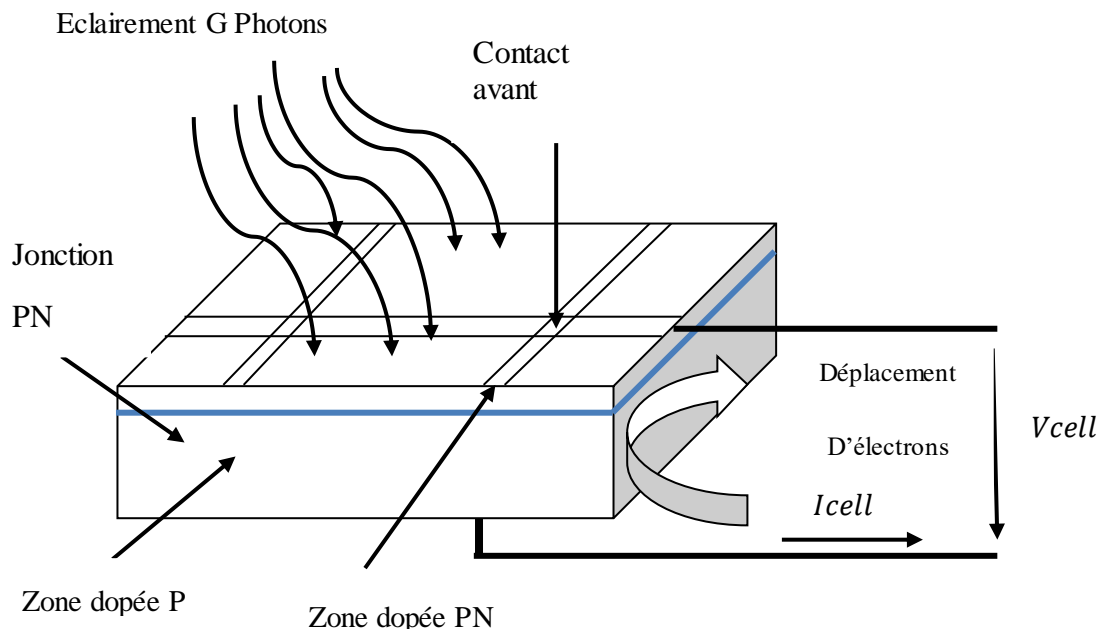


Figure I7– Le principe de fonctionnement d'une cellule solaire.

I.7.3 Les différents types de cellules solaires (cellules PV)

Le silicium est le matériau de base des photopiles. C'est le deuxième élément en termes d'abondance sur notre planète (après l'oxygène), mais il n'existe pas à l'état pur dans la nature (le sable et le quartz en contiennent). Il existe trois catégories principales de photopile au silicium :

a) Le silicium monocristallin :

Il est actuellement l'option la plus populaire pour les cellules commerciales bien que beaucoup d'autres matériaux soient disponibles. Leur méthode de production est laborieuse et

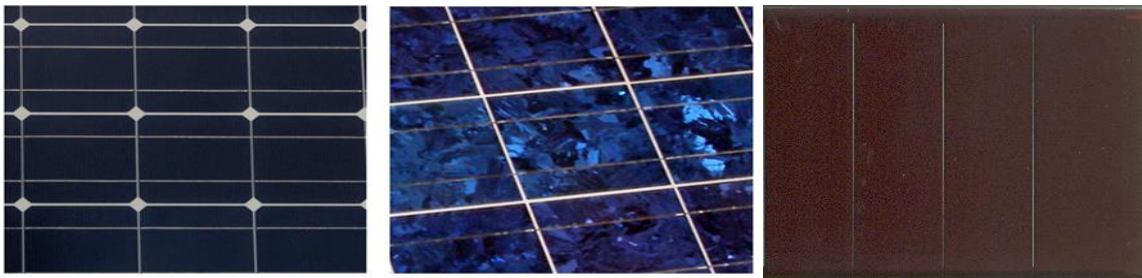
délicate, et donc, très chère. Il présente un taux de rendement excellent (12 – 16% allant jusqu'à 24 % en laboratoire). Le terme « cristallin » implique que tous les atomes dans le matériau PV actif font partie d'une structure cristalline simple où il n'y a aucune perturbation dans les arrangements ordonnés des atomes [24-25] ;

b) Le silicium polycristallin :

Il est composé de petits grains de silicium cristallin. Il a un coût de production moins élevé. L'efficacité de conversion PV pour une cellule à base de silicium polycristallin s'étend de 11 – 13 % (autour de 18 % en laboratoire) [25] ;

c) Le silicium amorphe :

Les cellules amorphes sont utilisées partout où une solution économique est recherchée ou lorsque très peu d'électricité est nécessaire, par exemple pour l'alimentation des montres, des calculatrices, ou des luminaires de secours. Elles se caractérisent par un fort coefficient d'absorption, ce qui autorise de très faibles épaisseurs, de l'ordre du micron. Par contre, son rendement de conversion est entre 8 –10 % (autour de 13 % en laboratoire pour une cellule non dégradée) [24-25].



(a) Cellule monocristallin

(b) Cellule polycristallin

(c) Cellule amorphe

Figure I8– Types de cellules solaires.

I.7.4 Nouvelle technologie

On utilise de plus en plus de matériaux organiques dans le domaine de l'optoélectronique, avec des perspectives d'électronique organique voire moléculaire, pour l'éclairage à l'aide de diodes électroluminescentes organiques (OLED : Organics Light- Emitting Diode). Bien que les optimisations des matériaux à mettre en œuvre ne soient pas les mêmes, le domaine du photovoltaïque bénéficie depuis quelques années des avancées technologiques de l'optoélectronique. Ainsi, bien que cette filière soit vraiment récente, les progrès annuels sont spectaculaires. Les matériaux organiques, moléculaires ou polymériques, à base de carbone, d'hydrogène et d'azote, sont particulièrement intéressants en termes d'abondance, de coût, de poids et de mise en œuvre.

I.7.5 Comparatif des différentes technologies :

Le tableau suivant présente les avantages et les inconvénients pour les technologies les plus utilisées d'une cellule photovoltaïque :

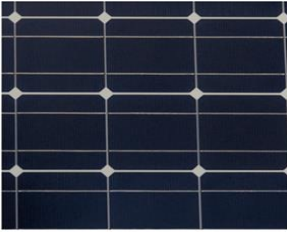

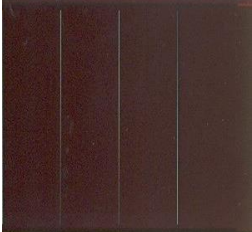
Technologies	Silicium Monocristallin	Silicium Polycristallin	Silicium Amorphe
Cellule Et module			
Rendement	14-17%	12-15%	6-10%
Avantages	Bon rendement Pour une cellule	Bon rendement Pour un module	Facile à Fabriquer
Inconvénients	Coût élevé, perte de matière première en cours de fabrication	Coût élevé, perte de matière première en cours de fabrication	Mauvais Rendement
Durée de vie	35 ans	35 ans	<10 ans
Puissance	100 à 150Wc/m ² 7 M ² /kWc	100Wc/m ² 8M ² /kWc	50Wc/m ² 16 M ² /kWc
Part de marche	43%	47%	10%

Tableau L3 – Comparatif des différentes technologies cellule.

I.8 Association des cellules

Les modules peuvent également être connectés en série et en parallèle afin d'augmenter la tension et l'intensité du courant d'utilisation. Toutefois, il importe de prendre quelques précautions car l'existence de cellules moins efficaces ou l'occlusion d'une ou plusieurs cellules (dus à de l'ombrage, de la poussière, etc.) peuvent endommager les cellules de façon permanente [26].

I.8.1 Association en série

La cellule individuelle, unité de base d'un système photovoltaïque, ne produit qu'une très faible puissance électrique, typiquement de 0.5 W avec une tension de moins d'un volt. Pour produire plus de puissance, les cellules sont assemblées pour former un module (ou panneau). L'association en série des cellules délivre une tension égale à la somme des tensions individuelles et un courant égal à celui d'une seule cellule.

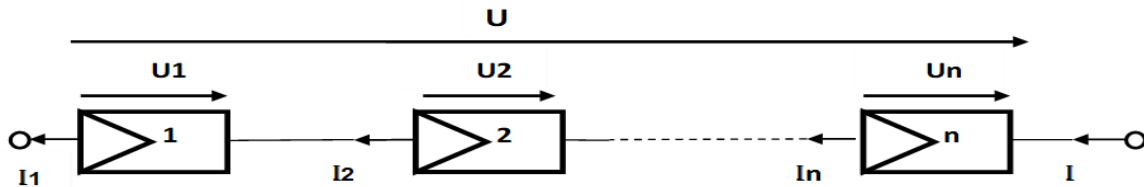


Figure I9– Association de N modules solaires en série.

I.8.2 Association en parallèle

En additionnant des modules photovoltaïques identiques en parallèle, la tension de la branche est égale à la tension de chaque module, alors que leur courant s'ajoute pour donner un courant plus important à la sortie ce qui donne naissance à un champ photovoltaïque de même tension ça caractéristique est représenté ci-dessous[27].

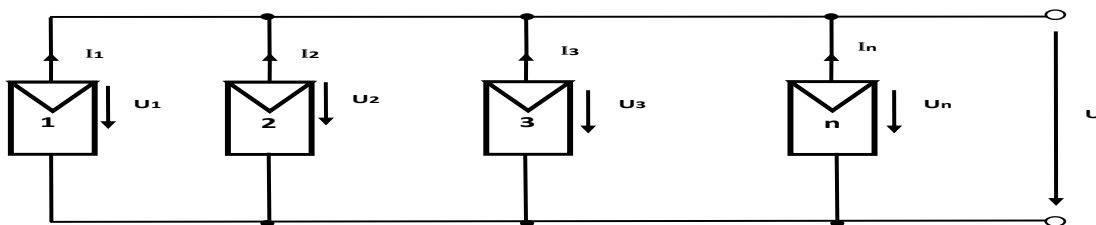


Figure I10– Association des modules solaires en parallèle.

I.8.3 Association série-parallèle

On utilise généralement ce type d'association pour en tirer une tension importante puisque l'association en série des photopiles délivre une tension égale à la somme des tensions individuelles et un courant égal à celui d'une seule cellule. La caractéristique d'un groupement de deux modules solaires est représentée ci-dessous, ce qui peut être généralisé sur une gamme de Ns modules solaires en série. Ce genre de groupement augmente le courant.

Afin d'obtenir des puissances de quelques kW, sous une tension convenable, il est nécessaire d'associer les modules en panneaux et de monter les panneaux en rangées de panneaux série et parallèle pour former ce que l'on appelle un GPV.

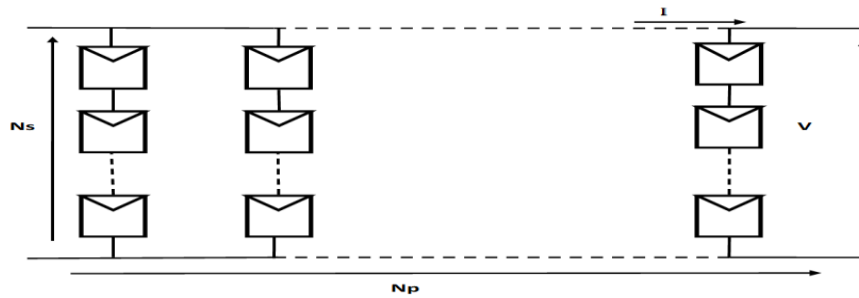


Figure I11– Association mixte des modules solaires.

I.9 Les convertisseurs

Les convertisseurs sont des dispositifs utilisés pour transformer la tension continue obtenue par les panneaux ou les batteries afin de l'adapter aux récepteurs fonctionnant soit à une tension continue différente, soit à une tension alternative [28] ;

Les convertisseurs sont disposés généralement soit entre le PV et la charge (sans stockage avec charge en continu, convertisseur continu-continu), soit entre la batterie et la charge (dans ce cas il sera appelé onduleur ou convertisseur continu alternatif) [29]

I.9.1 Le convertisseur DC– DC

Est un dispositif utilisé pour fournir une tension continue variable à partir d'une tension continue fixe [30].

I.9.2 Le convertisseur DC– AC

Pour alimenter des appareils qui fonctionnent en courant alternatif, le convertisseur doit être interposé entre la batterie et ces appareils. Les convertisseurs les plus utilisés transforment le courant continu issu de la batterie en courant alternatif 220 V/50 Hz ou 380 V/50 Hz [31].

I.10 Protection des modules photovoltaïques

Lors de la conception d'une installation photovoltaïque, il faut assurer sa protection électrique afin d'augmenter sa durée de vie en évitant notamment des pannes destructrices liées à l'association des cellules et de leur fonctionnement. Pour cela, deux types de protection sont classiquement utilisés dans les installations photovoltaïques [32] :

- a) **La diode anti-retour** : empêchant un courant négatif dans les GPV. Ce phénomène peut apparaître lorsque plusieurs modules sont connectés en parallèle, ou bien quand une

charge en connexion directe peut basculer du mode récepteur au mode générateur, par exemple une batterie durant la nuit ;

- b) **Les diodes by-pass** : peuvent isoler un sous-réseau de cellules lorsque l'éclairement n'est pas homogène évitant l'échauffement de la cellule, ce qui est susceptible de la détruire par claquage. Il convient donc de limiter la tension inverse maximale susceptible de se développer aux bornes d'une cellule en plaçant une diode parallèle (by-pass) au niveau de chaque module la diode parallèle limite la tension inverse par sa tension directe puisqu'elle devient passante.

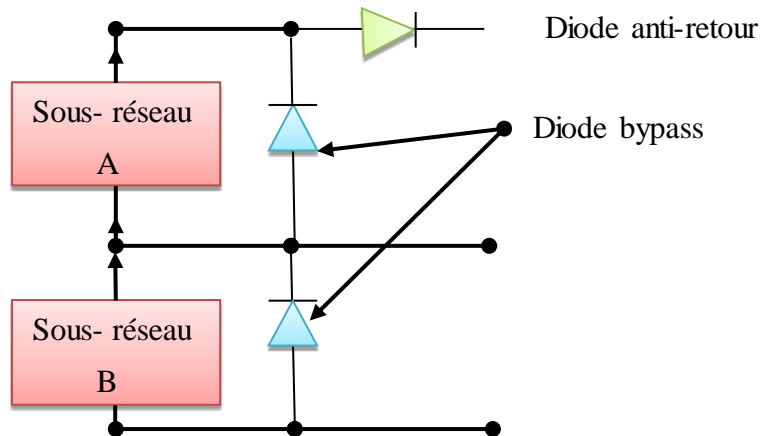


Figure I12– Schématisation d'un GPV élémentaire avec diodes by-pass et diode anti-retour.

I.11 Les suiveurs solaires

La poursuite solaire est une installation solaire qui se base sur le principe du tournesol. Il suit le soleil dans sa course afin d'augmenter l'exposition des panneaux solaires et donc leur rendement. L'idée est que le surplus d'énergie produite grâce à une meilleure orientation du panneau sera plus important que l'énergie perdue pour orienter le panneau de manière optimale. En effet, la poursuite solaire peut augmenter le rendement des panneaux solaires jusqu'à 40% par rapport à une installation fixe orientée plein Sud [33-34]. On distingue principalement le suiveur à un axe, qui permet (généralement) de suivre le soleil d'est en ouest, du suiveur à deux axes qui permet une modification de l'orientation et de l'inclinaison.

Ce dernier cas nécessite l'intervention de deux moteurs. Les principales caractéristiques différenciant les suiveurs du soleil sont les suivantes :

- Le gain en production électrique (par rapport à des panneaux solaires fixes) ;
- L'orientation mono ou multi axiale ;
- La précision du positionnement vis-à-vis du soleil (type d'asservissement) ;
- La robustesse (tenue au vent) et la fiabilité ;
- Le coût.

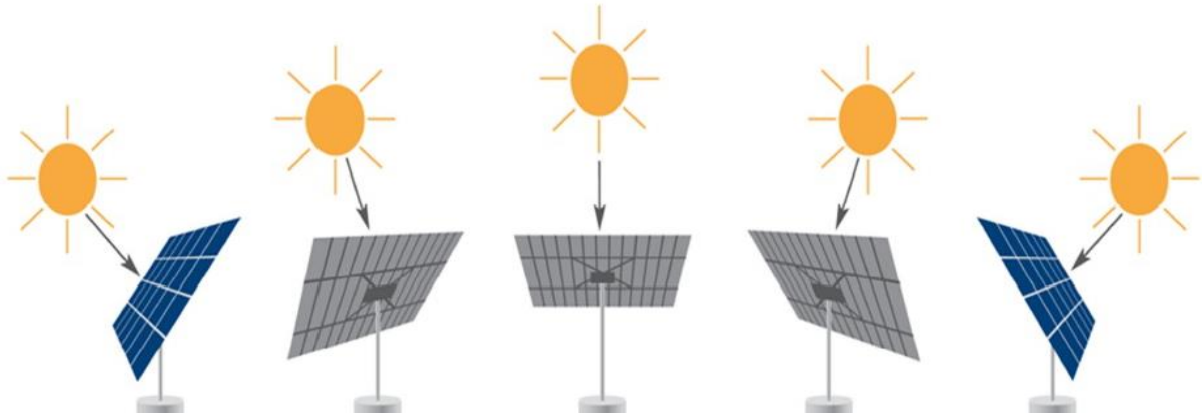


Figure L13– Suiveur solaire [35].

I.11.1 Rendement du système poursuite solaire

Est le rapport de la puissance d'un système de poursuite solaire (tracking) et fixe sur la puissance d'un système fixe [28].

$$RTr = \frac{pm\ trackig - pm\ fixe}{pm\ fixe} \quad (I.3)$$

Où pm est la puissance totale sur le panneau de poursuite solaire et pm est la puissance totale sur le panneau fixe.

Les facteurs suivants peuvent avoir une influence sur le gain de la poursuite solaire [28] :

- La latitude du site d'installation
- L'ensoleillement et la climatologie du site
- La course angulaire de suivi solaire
- La fréquence de positionnement
- La densité de puissance installée et le facteur d'ombre induit.
- Les gains (non comptabilisés) de repli par temps de neige qui peuvent être très importants

I.12 MATLAB/SIMULINK :

C'est un logiciel de simulation, qui fournit une interface graphique permettant de construire des modèles sous forme de diagrammes blocs. Il offre l'avantage de construire des modèles hiérarchisés qui offrent la possibilité de voir le système à différents niveaux. Simulink

offre également la possibilité de construire des modèles modulaires, qui ont l'avantage d'être facilement reliés entre eux afin de simuler un certain système.

I.12.1 Caractéristiques du module PV

Le tableau suivant donne les paramètres électriques d'un panneau solaire de type c-Si M 60 NA42117 que nous avons utilisé en simulation sous Matlab-Simulink. Ce panneau est composé de 60 cellules en poly-cristallin connectées en série ayant une puissance maximale de 250.0575W sous les conditions standards $G=1000W/m^2$ et $T=25^{\circ}C$.

Nom	Valeur
Puissance maximale (P_{max})	250.0575
Courant optimale (I_{ppm})	8.25
Tension optimale (V_{ppm})	30.31
Courant de court-circuit (I_{cc})	8.82
Tension de circuit ouvert (V_{co})	37.9

Tableau I4 – Caractéristiques électriques du module PV.

I.12.2 Influence de l'éclairement

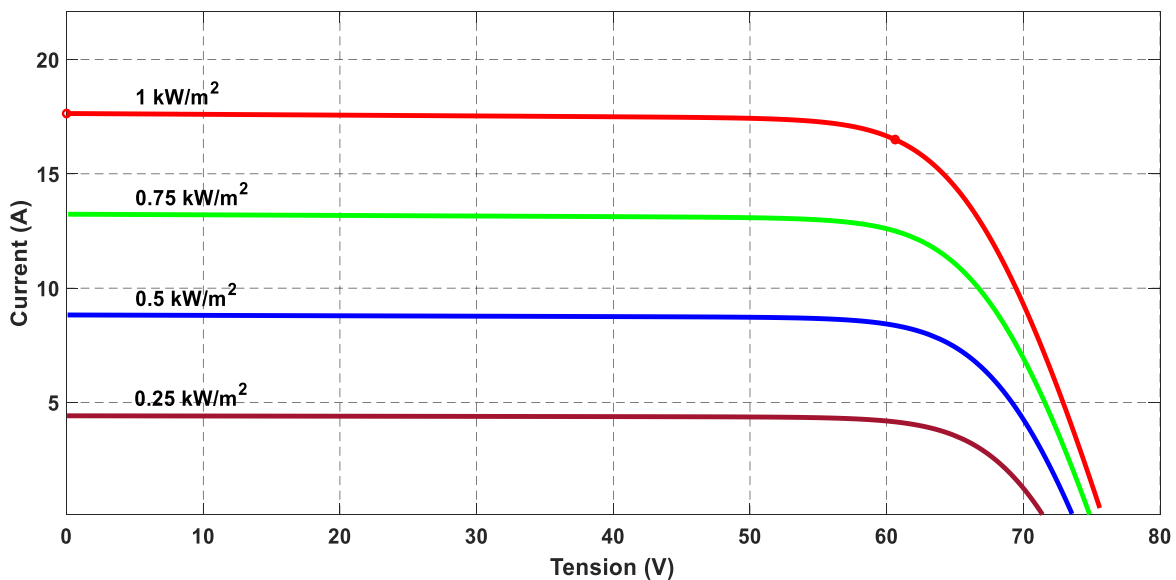


Figure I14– Caractéristiques I (V) d'un panneau.

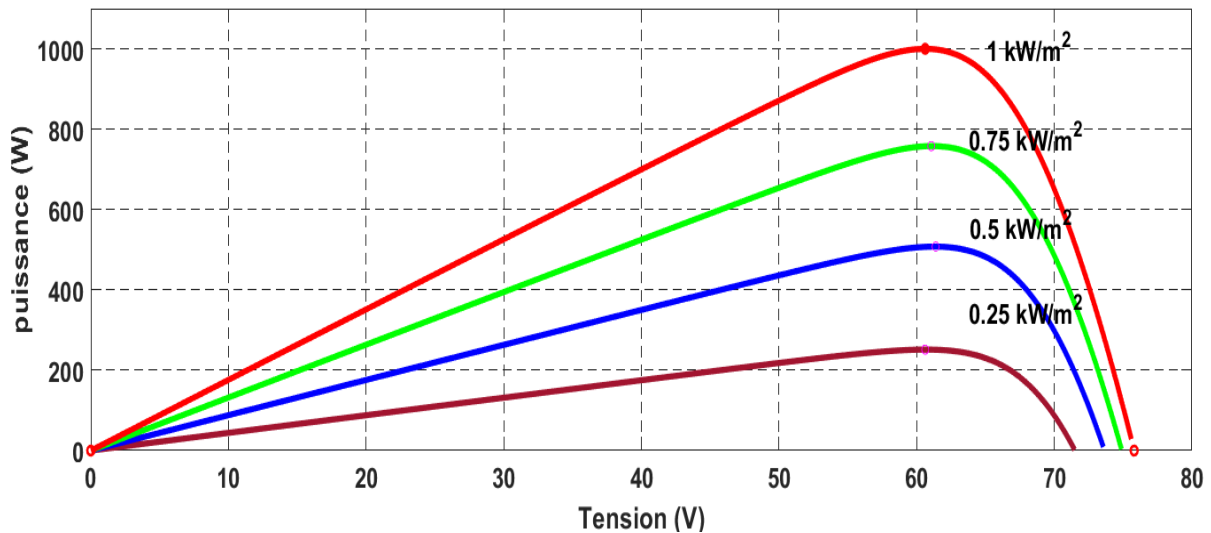


Figure I.15– Caractéristiques P (V) d'un panneau solaire pour différents éclairements.

L'augmentation de l'éclairement provoque une augmentation où le générateur fonctionne comme un générateur de courants, mais il y a une légère augmentation pour la tension en circuit ouvert. Ce faisceau de courbes se trace à température constante, et est illustré un tracé correspondant à une température $T_c = 25^\circ\text{C}$ sur la figure II.14.

I.12.3 L'influence de la température

La température est un paramètre important dans le comportement des cellules. La figure (II.16) montre que l'augmentation de la température entraîne une diminution nette de la tension de circuit ouvert et une augmentation du courant de court-circuit, ainsi qu'une diminution de la puissance maximale (une variation 20°C entraîne une diminution de 10 watts de la puissance maximale).

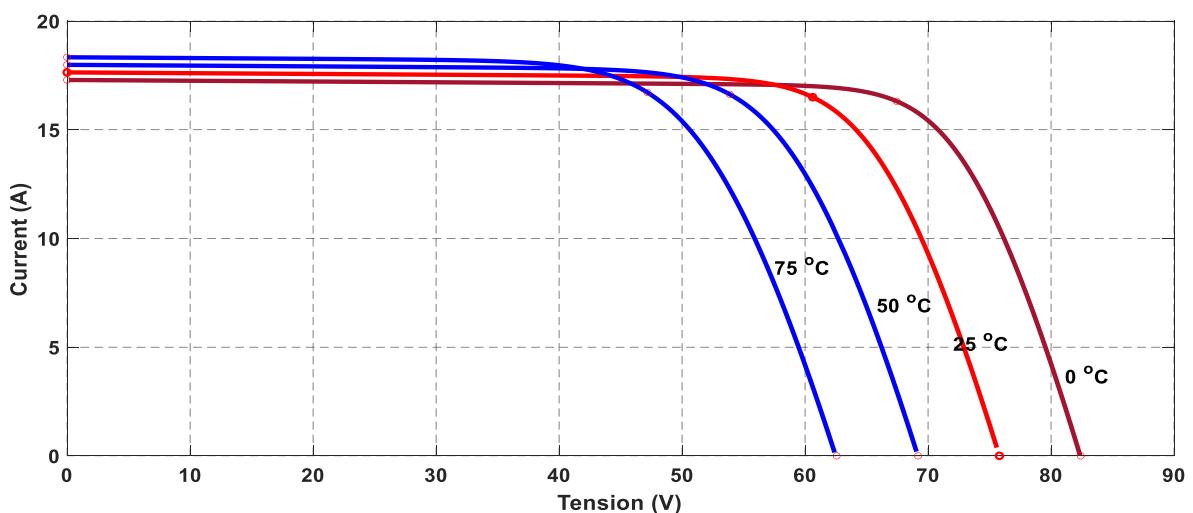


Figure I.16– L'influence de la température sur la caractéristique $I=f(V)$.

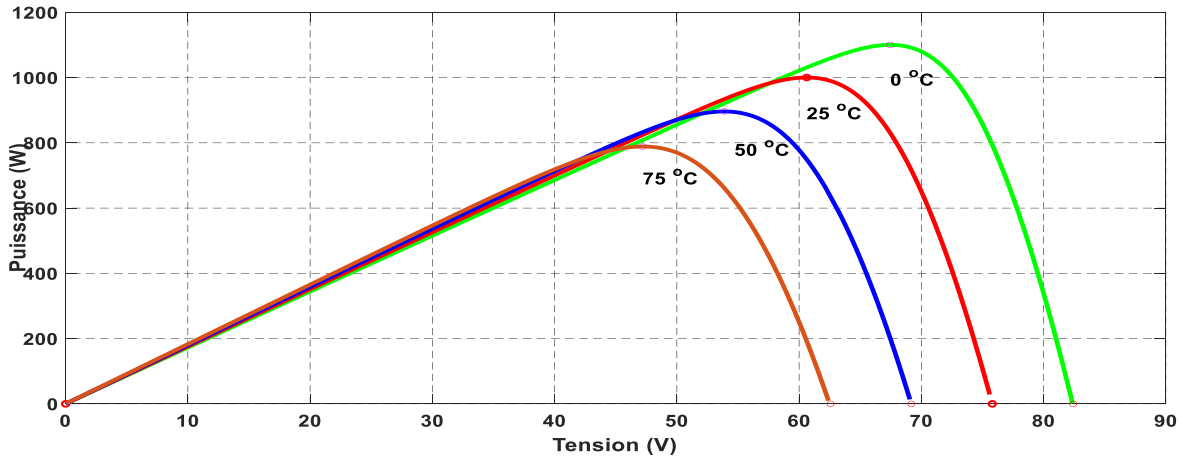


Figure I.17– L'influence de la température sur la caractéristique $P=f(V)$.

I.13 Avantages et inconvénients d'une installation PV

Malgré les avantages qu'elle présente, l'énergie photovoltaïque présente certains inconvénients qui peuvent être résumés comme suit :

a) Avantages

- D'abord une haute fiabilité. L'installation ne comporte pas de pièces mobiles qui la rendent particulièrement appropriée aux régions isolées. C'est la raison de son utilisation sur les engins spatiaux.
- Ensuite le caractère modulaire des panneaux photovoltaïques permet un montage simple et adaptable à des besoins énergétiques divers. Les systèmes peuvent être dimensionnés pour des applications de puissances allant du milliwatt au Mégawatt.
- Le coût de fonctionnement est très faible vu les entretiens réduits et il ne nécessite ni combustible, ni son transport, ni personnel hautement spécialisé.
- La technologie photovoltaïque présente des qualités sur le plan écologique car le produit fini est non polluant, silencieux et n'entraîne aucune perturbation du milieu, si ce n'est par l'occupation de l'espace pour les installations de grandes dimensions [36].

b) Inconvénients

- La fabrication du module photovoltaïque relève de la haute technologie et requiert des investissements d'un coût élevé.
- Le rendement réel de conversion d'un module est faible, de l'ordre de 10-15 % (soit entre 10 et 15 MW/km² par an pour le BENELUX) avec une limite théorique

pour une cellule de 28%. Les générateurs photovoltaïques ne sont pas compétitifs par rapport aux générateurs diesel que pour des faibles demandes d'énergie en régions isolées.

- Tributaire des conditions météorologiques.
- Lorsque le stockage de l'énergie électrique sous forme chimique (batterie) est nécessaire, le coût du générateur est accru.
- Le stockage de l'énergie électrique pose encore de nombreux problèmes. Le faible rendement des panneaux photovoltaïques s'explique par le fonctionnement même des cellules. Pour arriver à déplacer un électron, il faut que l'énergie du rayonnement soit au moins égale à 1 eV. Tous les rayons incidents ayant une énergie plus faible ne seront donc pas transformés en électricité. De même, les rayons lumineux dont l'énergie est supérieure à 1 eV perdront cette énergie, le reste sera dissipé sous forme de chaleur [37].

I.13.1 Avenir du photovoltaïque

Source d'énergie 100% propre et faible pour des usages très variés, elle figurera à l'avenir parmi les principales sources mondiales. Son handicap majeur reste un coût encore élevé comparée aux sources conventionnelles et aux filières renouvelables. Ce coût diminue de 10% par an, et pour accélérer cette baisse, les autorités nationales et internationales doivent engagés une politique de soutien à long terme de la filière photovoltaïque. C'est précisément l'objectif des programmes lancés depuis quelques années dans plusieurs pays industrialisés. Dans notre pays, l'application du PV reste encore modeste. La première utilisation été dans le domaine des télécommunications. Après, certain puits dans les hauts plateaux a été équipés par des systèmes de pompages PV. A nos jours, quelques dizaines de village saharien de la région de Tamanrasset et Adrar jouissent des avantages de cette source d'énergie [38-40].

I.14 Conclusion

Le contenu de ce chapitre a été consacré aux notions de base du développement de l'énergie solaire. On a mis en évidence le principe de fonctionnement de cette technologie, présenter ces composants et nous avons aussi cité les avantages et inconvénients de ce système.

Nous nous sommes intéressé et détaillé le système de conversion photovoltaïque autonome car cette méthode permet d'exploiter l'énergie du soleil à divers fins, nous avons aussi essayé de détailler et d'identifier les majors parties constituantes ce type d'installation tout en expliquant vaguement son processus de production.

**Chapitre II. Modélisation et commande d'un
système photovoltaïque par la méthode de
perturbation et d'observation**

Chapitre II. Modélisation et commande d'un système photovoltaïque par la méthode de perturbation et d'observation

II.1 Introduction

Un système PV raccordé au réseau électrique est composé d'un ensemble d'éléments en partant des panneaux PV et en finissant par le réseau. Plusieurs facteurs agissent sur la performance du système photovoltaïque connecté au réseau. Ces facteurs peuvent être :

- **Naturels** : Tels que les conditions météorologiques comme le rayonnement solaire, la température ambiante et la vitesse du vent.
- **Artificiels** : Basés sur les différentes topologies des appareils conditionneurs (les Convertisseurs DC-DC et les convertisseurs DC-AC).

Dans ce chapitre, nous présentons tout d'abord, des définitions et notions de bases sur les convertisseurs DC-DC et Onduleur DC-AC, ainsi que les modèles mathématiques nécessaires à l'étude de leur comportement lors de la simulation du système PV global. Nous traitons ensuite, en détail, la technique MPPT par les méthodes dites conventionnelles de perturbation et observation (P&O).

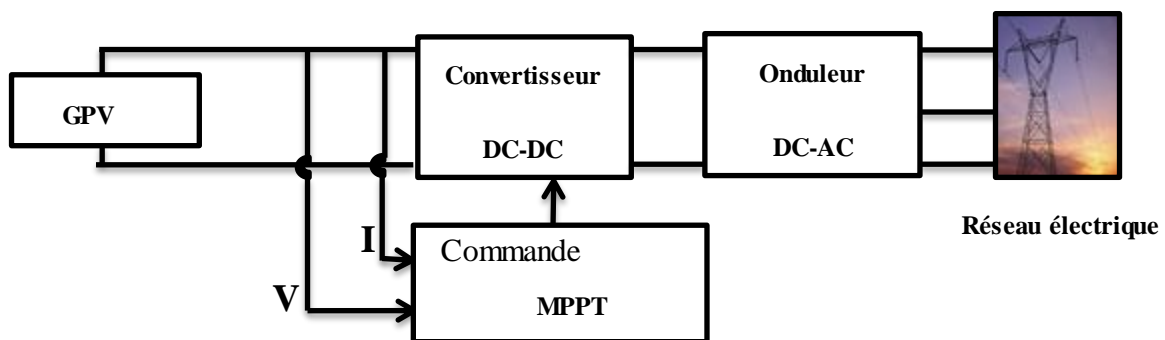


Figure II.1– Schéma simplifié d'un système PV.

II.2 Modélisation du générateur photovoltaïque

La figure I.4 présente le schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque sous éclairage. Il correspond à un générateur de courant I_{ph} monté en parallèle avec une diode. Deux résistances parasites sont introduites dans ce schéma.

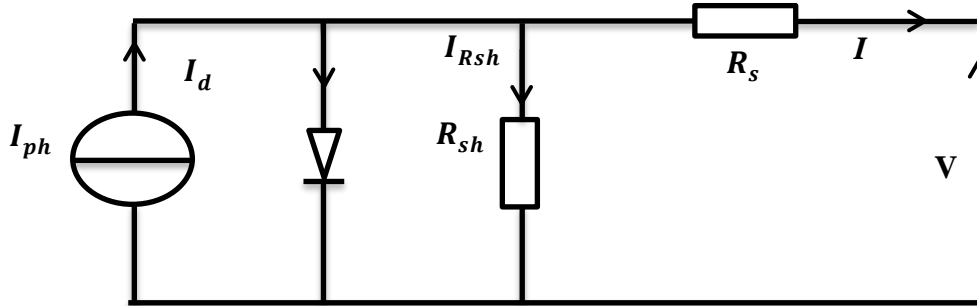


Figure II.2– Schéma équivalent électrique de la cellule PV à une diode.

Ces résistances ont une certaine influence sur la caractéristique $I = f(V)$ de la cellule [41-45]:

- La résistance montée en série (R_s) représente la résistance de contacte et de connexion
- La résistance shunt (R_{sh}) montée en parallèle représente le courant de fuite.
- Une diode en parallèle qui modélise la jonction PN

La loi de Kirchhoff nous permet d'écrire la relation suivante :

$$I_{ph} = I_d + I_{rsh} + I$$

Donc : (II.1)

$$I = I_{ph} - I_d - I_{rsh}$$

Le courant shunt I_{sh} traversant la résistance R_{sh} peut être calculé comme suit :

$$I_{sh} = \frac{V_d}{R_{sh}} = \frac{V + R_s \times I}{R_{sh}} \quad (II.2)$$

Le courant traversant la diode est :

$$I_d = I_{sat} \times \left(e^{\frac{q(V + R_s \times I)}{n \times k \times T}} - 1 \right) \quad (II.3)$$

L'expression résultante à une caractéristique courant-tension (I-V) après tout calcul est :

$$I = I_{ph} - I_{sat} \times \left[\exp\left(\frac{q \times (V + I \times R_s)}{n \times k \times T}\right) - 1 \right] - \frac{V + (I \times R_s)}{R_{sh}} \quad (II.4)$$

Dépendant de l'ensoleillement G [w/m^2] solaire et de la température T [$^{\circ}\text{K}$], Les expressions de (I_{ph}) et de (I_{sat}) le courant de saturation de la diode sont donnés par :

$$I_{pv} = [I_{sc} + (\alpha \times (T - T_r))] \times \frac{G}{1000} \quad (\text{II.5})$$

$$I_{sat} = I_{rr} \times \left(\frac{T}{T_r}\right)^{\frac{3}{n}} \times \exp\left[-\frac{q \times E_g \times \left(\frac{1}{T_r} - \frac{1}{T}\right)}{nK}\right] \quad (\text{II.6})$$

Le courant de saturation I_{rr} de la diode pour la température T_r est calculé par l'équation suivante :

$$I_{rr} = \frac{I_{sc} - \left(\frac{V_{co}}{R_{sh}}\right)}{\exp\left[\left(\frac{q \times V_{co}}{n \times K \times T_r}\right)\right] - 1} \quad (\text{II.7})$$

Dou :

- I_{PV} : Photo courant produit.
- I_{sat} : Courant de saturation de la diode.
- I_d : Courant de diode.
- I_{sc} : courant de court-circuit.
- I : le courant fourni par la cellule(A).
- V : la tension aux bornes de la cellule (V).
- V_{oc} : la tension de circuit –ouvert.
- R_s, R_{sh} : La résistance série et la résistance parallèle, respectivement.
- q : Charge de l'électron ($1.602 \times 10^{-19}\text{C}$)
- K : Constante de Boltzmann ($1.381 \times 10^{-23}\text{J/k}$)
- n : le facteur d'idéalité de la jonction.
- T : la température
- T_r : température de référence (298K)
- E_g : énergie du band gap (pour le silicium cristallin est égale à 1.12 eV)
- G : l'ensoleillement en W/m^2
- α : coefficient de température de I_{PV}

II.3 Caractéristiques électriques d'une cellule PV

Ces paramètres peuvent être déterminés à partir des courbes courant-tension, ou de l'équation caractéristique.

Les plus usuels sont les suivantes [18] :

II.3.1 Courant de court-circuit

C'est le courant pour lequel la tension aux bornes de la cellule ou du générateur PV est nulle. Dans le cas idéal (R_s nulle et R_{sh} infinie), ce courant se confond avec la photo -courant I_{ph} dans le cas contraire, en annulant la tension V dans l'équation (II.8), on obtient :

$$I_{cc} = I_{ph} - I_{sat} \times \left[\exp\left(\frac{q(I_{cc} \times R_s)}{n \times k \times T}\right) - 1 \right] - \left(\frac{I_{cc} \times R_s}{R_{sh}}\right) \quad (\text{II.8})$$

Pour la plupart des cellules (dont la résistance série est faible), on peut négliger le terme $I_{sat} \times \left[\exp\left(\frac{q(I_{cc} \times R_s)}{n \times k \times T}\right) - 1 \right]$ devant h. L'expression approchée du courant de court-circuit est alors :

$$I_{cc} \cong \frac{I_{ph}}{\left(1 + \frac{R_s}{R_{sh}}\right)} \quad (\text{II.9})$$

Quantitativement, il a la plus grande valeur du courant généré par la cellule pratiquement

$$(I_{cc} = I_{ph}) \quad (\text{II.10})$$

II.3.2 Tension de circuit-ouvert

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

$$0 = I_{cc} - I_{sat} \times \left[\exp\left(\frac{q \times V}{n \times k \times T}\right) - 1 \right] - \left(\frac{V}{R_{sh}}\right) \quad (\text{II.11})$$

Dans le cas idéal, sa valeur est légèrement inférieure à :

$$V_{co} = V_t \times L_n \left[\frac{I_{ph}}{I_{sat}} + 1 \right] \quad (\text{II.12})$$

II.3.3 Puissance de la cellule PV

Dans des conditions ambiantes de fonctionnement fixes (éclairage, température, vitesse de circulation de l'air ambiant, etc...), la puissance électrique $P(W)$ disponible aux bornes d'une cellule PV est :

$$P = V \times I \quad (\text{II.13})$$

Avec :

- $P(w)$: Puissance fournie par la cellule PV.
- $V(V)$: Tension mesurée aux bornes de la cellule PV.
- $I(A)$: Intensité débitée par la cellule PV.

II.3.4 Puissance maximale d'une cellule PV

Pour une cellule solaire idéale, la puissance maximale P_{max} correspondrait donc à la tension de circuit ouvert V_{co} multipliée par le courant de court-circuit I_{cc} :

$$P = V_{co} \times I_{cc} \quad (\text{II.14})$$

- $P_{max} (W)$: La puissance fournie par la cellule PV.
- $V_{co}(V)$: La tension de circuit ouvert mesurée aux bornes de la cellule PV.
- $I_{cc}(A)$: L'intensité de court-circuit débitée par la cellule PV.

En pratique, la courbe caractéristique d'une cellule PV est plus "arrondie" (figure II.3), et la tension au point de puissance maximale V_{Pmax} est inférieure à la tension de circuit ouvert V_{co} , de même que le courant fourni I_{Pmax} est inférieur, pour cette même tension, au courant de court-circuit I_{cc} . L'expression de la puissance en ce point est donnée par :

$$P_{max} = V_{pmax} \times I_p \quad (\text{II.15})$$

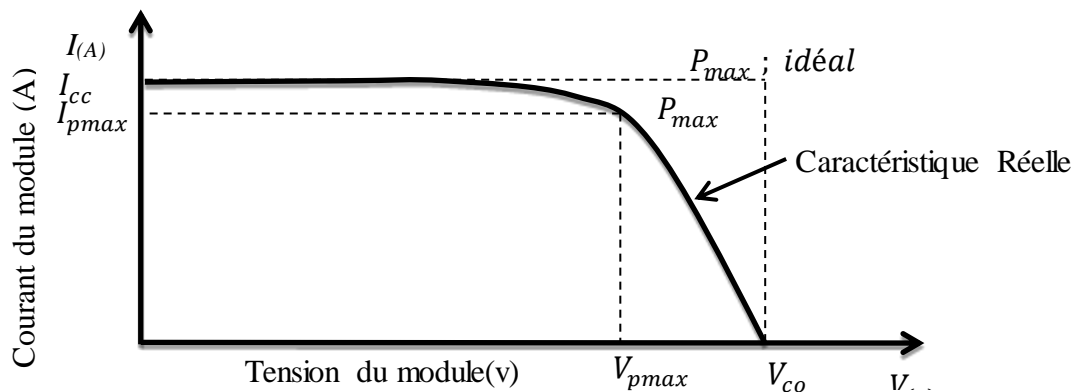


Figure II.3– Puissance maximale idéale et pratique.

II.3.5 Rendement énergétique

C'est le rapport entre la puissance électrique maximale fournie par la cellule P_{max} (I_{opt} , V_{opt}) et la puissance solaire incidente. Il est donné par :

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{inc}} = \frac{I_{max} \times V_{max}}{P_{inc}} \quad (\text{II.16})$$

Avec P_{inc} est égale au produit de l'éclairement et de la surface totale des photopiles. Ce paramètre reflète la qualité de conversion de l'énergie solaire en énergie électrique.

II.3.6 Facteur de forme

On appelle facteur de forme FF, dit aussi facteur de courbe ou facteur de remplissage (fill factor), le rapport entre la puissance maximum fournie par la cellule (I_{max} , V_{max}) et le produit du courant de court-circuit par la tension de circuit-ouvert V_{co} (c'est-à-dire la puissance maximale d'une cellule idéale). Le facteur de forme indique la qualité de la cellule ; plus il s'approche de l'unité plus la cellule est performante, Il est de l'ordre de 0.7 pour les cellules performantes ; et diminue avec la température. Il traduit l'influence des pertes par les deux résistances parasites R_{set} et R_{sh} . Il est défini par :

$$FF = \frac{P_{max}}{I_{cc} \times V_{co}} = \frac{I_{max} \times V_{max}}{I_{cc} \times V_{co}} \quad (\text{II.17})$$

II.4 Convertisseurs DC-DC

Pour la conversion de puissance, il est essentiel que le rendement soit maintenu élevé pour éviter la dissipation de la puissance et pour éviter les échauffements excessifs dans les composants électroniques. Pour cette raison toute la conversion de puissance échangée doit être réalisée autour des composants de stockage d'énergie (inductance et condensateurs) et les commutateurs. Les commutateurs de puissance utilisés dépendent du niveau de la puissance à convertir ou à commander. Les MOSFETS (transistors à effet de champ d'oxyde de métal) sont habituellement utilisés à la puissance relativement basse (quelques kW) et les IGBTs (transistors bipolaires à gâchette isolée) à des puissances plus élevées. Les thyristors ont été généralement utilisés et acceptés dans les plus hauts niveaux de puissance [1][46][2].

Deux topologies de base de circuit de conversion seront décrites dans les paragraphes suivants (DC-DC) : Dans cette partie nous présentons le principe de deux types de convertisseurs DC-DC (Buck, Boost), utilisés fréquemment dans les systèmes photovoltaïques pour générer les tensions et les courants souhaités. Ce type de convertisseurs n'est constitué que par des éléments réactifs (Selfs, Capacités) qui, dans le cas idéal, ne consomment aucune énergie. C'est pour cette raison qu'ils sont caractérisés par un grand rendement [1][47].

Dans ces études, l'interrupteur du convertisseur est attaqué par un signal MLI (modulation de large d'impulsion), avec une fréquence FS fixe et un rapport cyclique α variable [11].

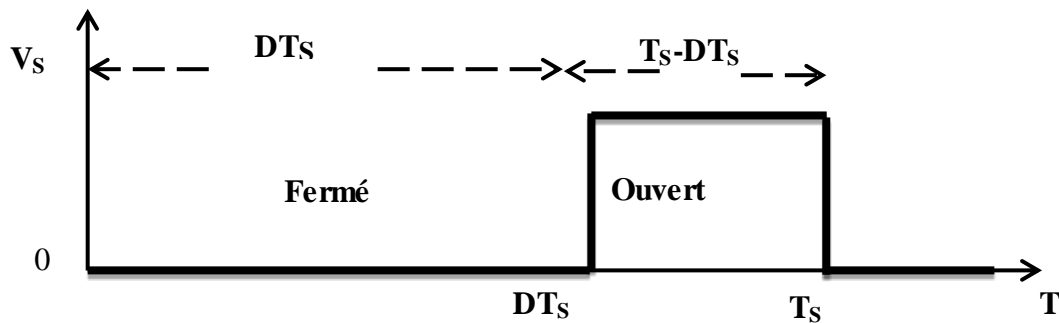


Figure II.4– Périodes de fermeture et d'ouverture d'un commutateur.

II.4.1 Structure de convertisseur Buck :

Un convertisseur Buck, ou hacheur série, est une alimentation à découpage qui convertit une tension continue en une autre tension continue de plus faible valeur, Ce type de convertisseur est utilisé pour des applications que l'on peut classer en deux catégories : [48]

- Les applications visant à obtenir une tension continue fixe (et parfois régulée) à Partir d'un générateur de tension continue supérieure.
- Les applications permettant d'obtenir une tension réglable mais toujours inférieure à celle présente à l'entrée.

Les composants clés sont l'inductance (L), le commutateur (Transistor) (S), la diode (D), et le condensateur(C). Celui-ci se charge par le commutateur (S) et qui maintient la tension à ces bornes jusqu'à l'ouverture de qui fait décharger son énergie à travers la diode sur la charge pour un cycle de période de fonctionnement [1][47][49][50].

Hacheur dévolteur, sous sa forme de base est présenté par la figure (II.5).

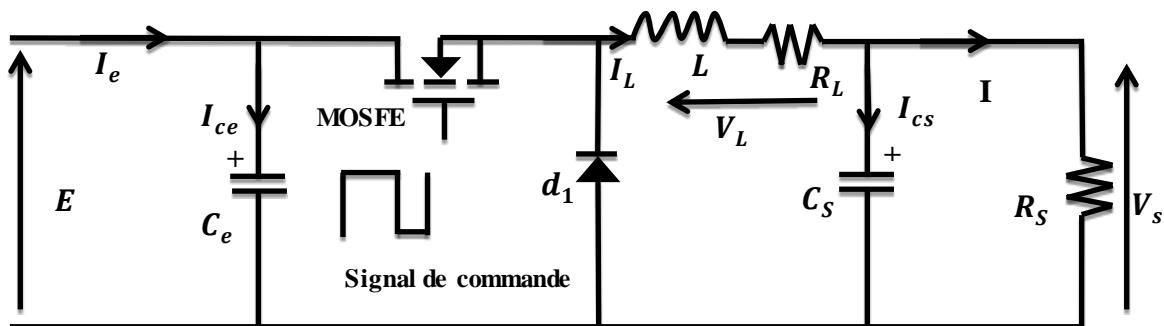


Figure II.5– convertisseurs d'énergie type (Buck).

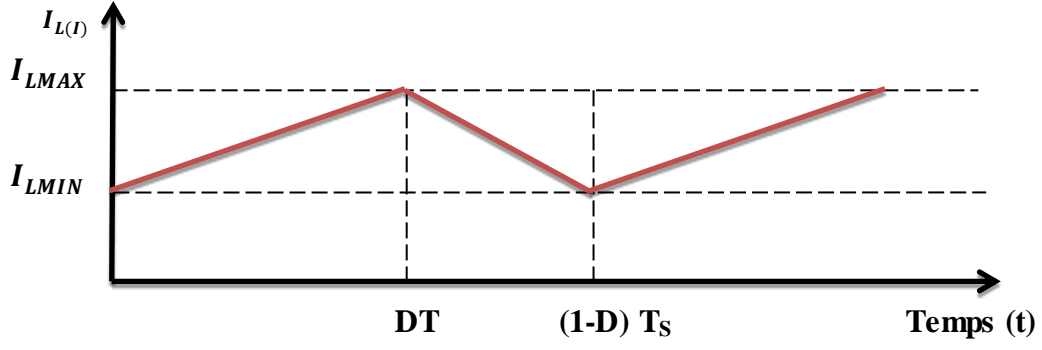


Figure II.6– Allure des variables dynamiques $I_L(t)$.

II.4.1.1 Modèle mathématique équivalent de convertisseur Buck

L'application des lois de Kirchhoff sur les deux circuits équivalents des deux phases de fonctionnement donne

Pour le premier intervalle $0 < t < aTs$ (l'interrupteur fermé) : d_1 : bloqué

$$I_{c1} = c_1 \times \frac{dU_{pv}}{dt} = I_e - I_L \quad (\text{II.18})$$

$$I_{c2} = c_2 \times \frac{dU_s}{dt} = I_L - I_s \quad (\text{II.19})$$

$$V_{pv} = V_L + V_s \quad (\text{II.20})$$

$$V_{pv} = L \frac{dI_L}{dt} + V_s \quad (\text{II.21})$$

$$\frac{dI_L}{dt} = \frac{V_{pv} - V_s}{L} \quad (\text{II.22})$$

$$I_L(t) = \left(\frac{V_{pv} - V_s}{L} \right) t + I_{L0} \quad (\text{II.23})$$

$$I_{Lmax} = \left(\frac{V_{pv} - V_s}{L} \right) (DTs) + I_{Lmin} \quad (\text{II.24})$$

$$\Delta I_L = I_{Lmax} - I_{Lmin} = \left(\frac{V_{pv} - V_s}{L} \right) (DTs) \quad (\text{II.25})$$

Pour le deuxième intervalle $(1 - D)$ (l'interrupteur ouvert) : d_1 : passif

$$I_{c1} = c_1 \times \frac{dU_{pv}}{dt} = I_e \quad (\text{II.26})$$

$$I_{c2} = c_2 \times \frac{dU_s}{dt} = I_L - I_s \quad (\text{II.27})$$

$$V_L = -V_s \quad (\text{II.28})$$

$$L \times \frac{dI_L}{dt} = -V_s \quad (\text{II.29})$$

$$\frac{dI_L}{dt} = \frac{-V_s}{L} \quad (\text{II.30})$$

$$I_L(t) = \frac{-V_s}{L} \times t + I_{L0} \quad (\text{II.31})$$

$$I_{Lmin} = \frac{-V_s}{L} (T_s - DT_s) + I_{Lmax} \quad (\text{II.32})$$

$$\Delta I_L = I_{Lmax} - I_{Lmin} = \frac{-V_s}{L} (T_s - DT_s) \quad (\text{II.33})$$

Donc, à partir des équations (II.35) et (II.34), nous concluons :

$$\left(\frac{V_{pv} - V_s}{L}\right)(DT_s) = \frac{-V_s}{L} (T_s - DT_s) \quad (\text{II.34})$$

Après avoir simplifié l'équation, nous trouver :

$$V_s = D \times V_{pv} \quad (\text{II.35})$$

Si nous admettons que la puissance échangée entre le générateur et la charge se conserve alors nous pouvons écrire pendant la fermeture du transistor MOSFET [42]:

$$V_{pv} \times I_{pv} = V_s \times I_s \quad (\text{II.36})$$

$$V_{pv} = V_s \times \frac{I_s}{I_{pv}} \quad (\text{II.37})$$

En substituant la valeur de l'équation (II.19) par (II.18), nous trouvons :

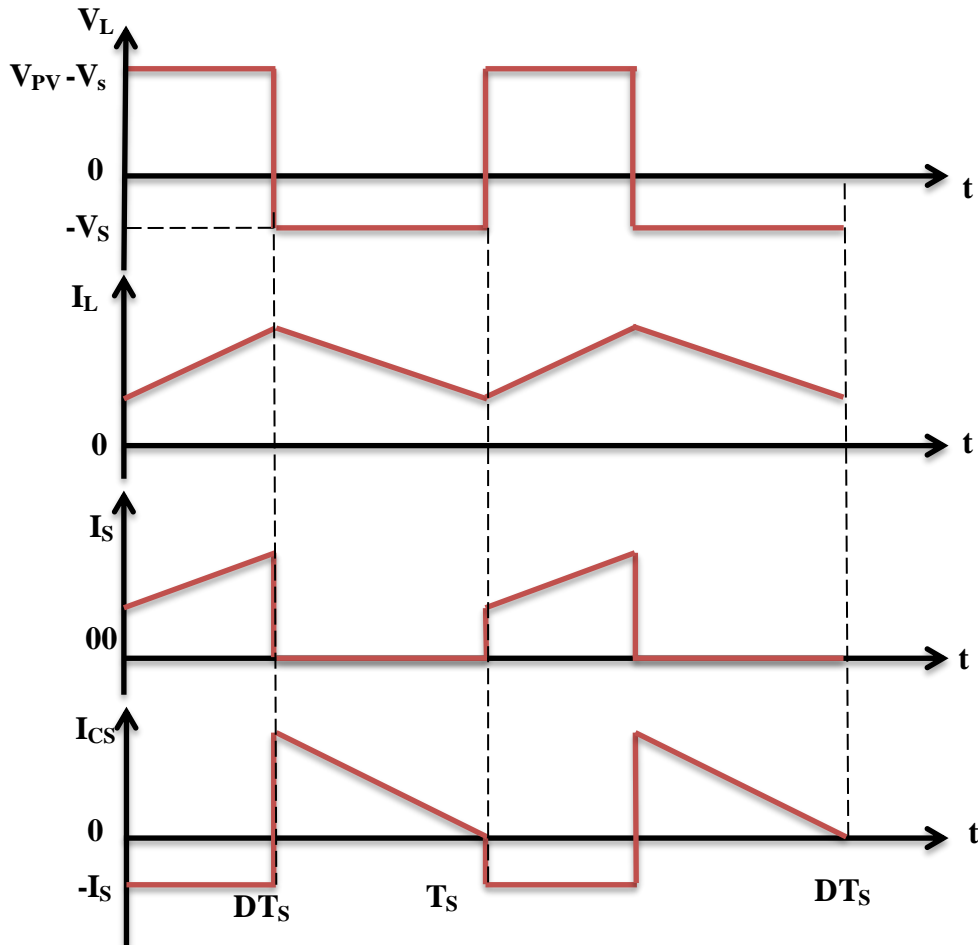


Figure II.7– Caractéristique de la tension et des courants dans le transistor et l'inductance d'un convertisseur Buck [3][9][13].

$$V_s = D \times \frac{V_s \times I_s}{I_{pv}} \quad (\text{II.38})$$

$$I_s = \frac{1}{D} \times I_{pv} \quad (\text{II.39})$$

II.4.2 Structure de Convertisseur Boost

Un convertisseur Boost (ou Step-Up en anglais), ou hacheur parallèle, est une alimentation à découpage qui convertit une tension continue en une autre tension continue de plus forte valeur. On utilise un convertisseur Boost lorsqu'on désire augmenter la tension disponible d'une source continue [48].

Au premier temps (DTs), le transistor (S) est fermé, le courant dans l'inductance croît progressivement, et au fur et à mesure, elle emmagasine de l'énergie, jusqu'à la fin de la première période. Ensuite, le transistor (S) s'ouvre et l'inductance (L) s'opposant à la diminution de courant (I_L), génère une tension qui s'ajoute à la tension de source, qui s'applique sur la charge (R_S) à travers la diode (D) [1][47][51][49][50] .

Son schéma de principe de base est celui de la figure (II.8) :

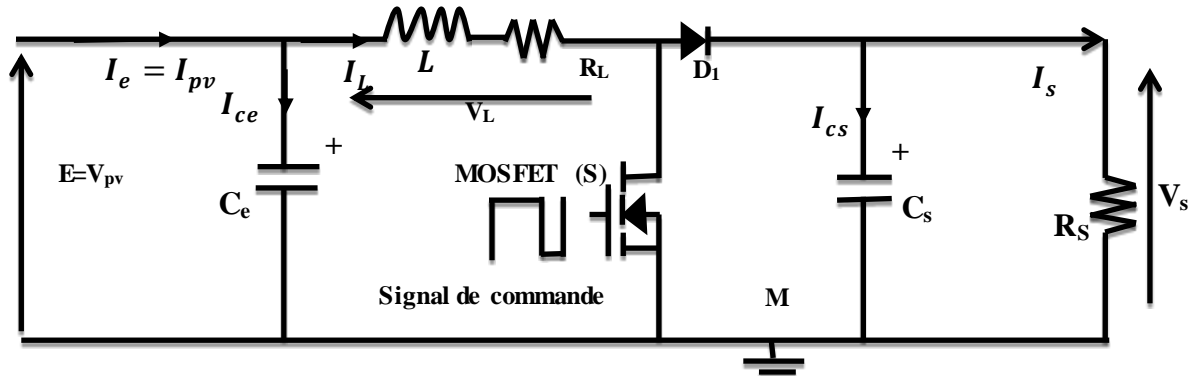


Figure II.8- Convertisseur d'énergie type (Boost)

II.4.2.1 Modèle mathématique équivalent de convertisseur Boost

L'application des lois de Kirchhoff sur les deux circuits équivalents des deux phases de fonctionnement donne Pour le premier intervalle $0 < t < DTs$ (l'interrupteur fermé) :

D1 : bloqué

Avec :

$$I_{c1} = c_1 \times \frac{dU_{pv}}{dt} = I_e - I_L \quad (II.40)$$

$$I_{c2} = c_2 \times \frac{dU_s}{dt} = -I_s \quad (II.41)$$

$$L \frac{dI_L}{dt} = V_{pv} \quad (II.42)$$

$$\frac{dI_L}{dt} = \frac{V_{pv}}{L} \quad (II.43)$$

$$I_L = \frac{V_{pv}}{L} \times t + I_{L0} \quad (II.44)$$

$$I_{Lmax} = \frac{V_{pv}}{L} \times DTS + I_{Lmin} \quad (II.45)$$

$$\Delta I_L = I_{Lmax} - I_{Lmin} = \frac{V_{pv}}{L} \times DTS \quad (II.46)$$

Pour le deuxième intervalle $(1 - D)$ (l'interrupteur ouvert) :

D1 : passion

Avec :

$$I_{c1} = c_1 \times \frac{dU_{pv}}{dt} = I_e - I_L \quad (\text{II.47})$$

$$I_{c2} = c_2 \times \frac{dU_s}{dt} = I_L - I_s \quad (\text{II.48})$$

$$L \frac{dI_L}{dt} = V_{pv} - V_s \quad (\text{II.49})$$

$$L \frac{dI_L}{dt} = V_{pv} - V_s \quad (\text{II.50})$$

$$\frac{dI_L}{dt} = \frac{V_s - V_{pv}}{L} \quad (\text{II.51})$$

$$I_L(t) = \frac{V_s - V_{pv}}{L} \times t + I_{L0} \quad (\text{II.52})$$

$$I_{Lmin} = \frac{V_s - V_{pv}}{L} \times (1 - D) T_s + I_{Lmax} \quad (\text{II.53})$$

$$\Delta I_L = I_{Lmax} - I_{Lmin} = \frac{V_s - V_{pv}}{L} \times (1 - D) T_s \quad (\text{II.54})$$

Donc, à partir des équation (II.46) et (II.53), nous concluons :

$$\frac{V_{pv}}{L} \times D T_s = \frac{V_s - V_{pv}}{L} \times (1 - D) T_s \quad (\text{II.55})$$

Après avoir simplifié l'équation, nous trouver :

$$V_{pv} = (1 - D) \times V_s \quad (\text{II.56})$$

$$V_s = \frac{1}{1-D} \times V_{pv} \quad (\text{II.57})$$

Si nous admettons que la puissance échangée entre le générateur et la charge se conserve alors nous pouvons écrire pendant la fermeture du transistor MOSFET : [4]

$$V_{pv} \times I_{pv} = V_s \times I_s \quad (\text{II.58})$$

$$V_{pv} = V_s \times \frac{I_s}{I_{pv}} \quad (\text{II.59})$$

En substituant la valeur de l'équation (II.58) par (II.56), nous trouvons :

$$V_s = \frac{1}{1-D} (V_s \times \frac{I_s}{I_{pv}}) \quad (\text{II.60})$$

$$1 - D = \frac{I_s}{I_{pv}} \quad (\text{II.61})$$

$$I_s = (1 - D) \times I_{pv} \quad (\text{II.62})$$

Comme présente la figure (II.10), lorsque l'interrupteur du transistor (MOSFET) est sur la position (on), le courant de l'inductance de le hacheur augmente linéairement et à cet instant la diode (d1) est bloquée (off). Et lorsque (S) se met sur la position (off), l'énergie emmagasinée par l'inductance est dissipée dans le circuit (RC) bien que la diode (d1) soit passante.

Les caractéristiques de tension et du courant de charge du convertisseur Boost dans le cas de la conduction continu e sont décrites par la figure (II.10), comme suit [1] :

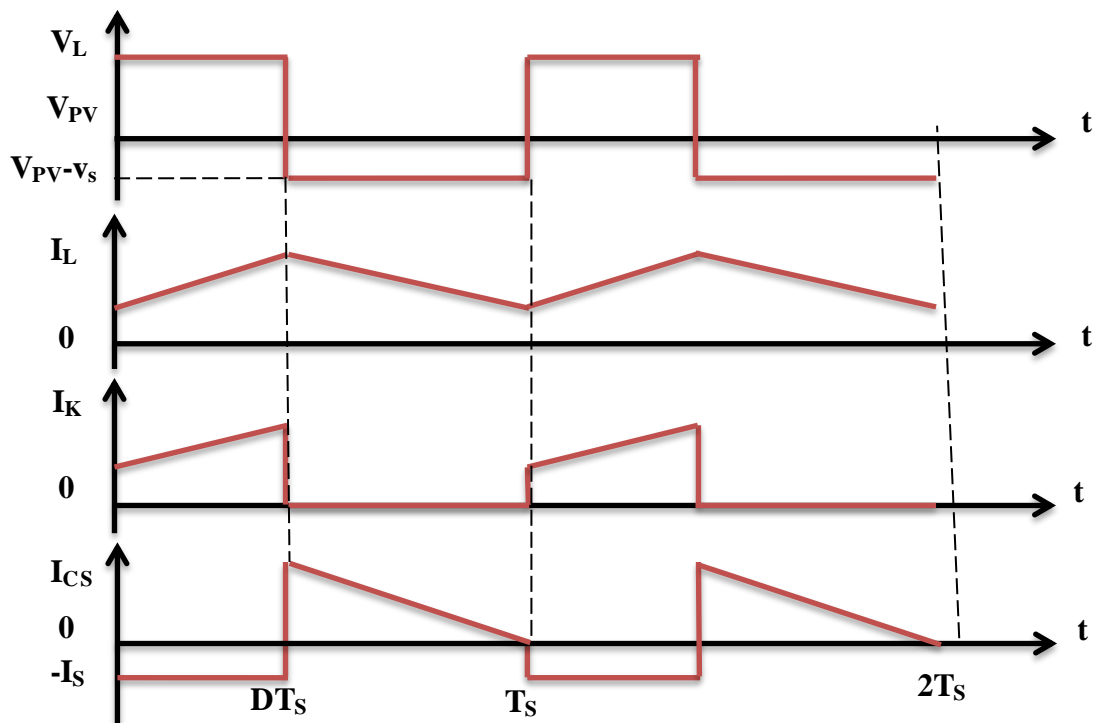


Figure II.9– Caractéristique de la tension et du courant de le hacheur (Boost) [47][49][52].

Le tableau (I) suivant résume les principaux rapports de transformation pour les différentes structures du convertisseur statique connues dans la littérature.

Type	Rapport de transformation	Fonction	Interrupteur	Diode	Transformateur	Complexité
Buck	D	Abaisseur	1	1	Non	Faible
Boost	$\frac{1}{1-D}$	Élévateur	1	1	Non	Faible
Buck-Boost ou cuk	$\frac{-D}{1-D}$	Abaisseur/ Élévateur	1	1	Non	Faible
SEPIC	$\frac{D}{1-D}$	Abaisseur/ Élévateur	1	1	Non	Faible
Fly back	$K \frac{D}{1-D}$	Abaisseur/ Élévateur	1	1	Oui	Moyenne
Push Pull	k. D	Abaisseur/ Élévateur	2	2	Oui	Fort
Forward	k. D	Abaisseur/ Élévateur	1	1	Oui	Moyenne

Tableau II.1 – Classification des convertisseurs statiques.

Certains travaux [53] ont montré que le hacheur Boost a un meilleur rendement dans les applications MPPT. On va s'intéresser dans cette thèse à une adaptation d'un système PV connecté au réseau par le biais du convertisseur Boost.

II.5 Commande MPPT pour un système photovoltaïque

Pour surmonter le problème de rendement des panneaux solaires et obtenir un rendement maximum, il est nécessaire d'optimiser la conception de toutes les parties du système PV. En outre, il est nécessaire d'optimiser les convertisseurs DC-DC employés comme interface entre le générateur PV et la charge afin d'extraire le maximum de puissance d'une manière permanente et ainsi faire fonctionner le GPV à son point de puissance maximum (PPM) sans perte dans l'énergie transférée à l'aide d'un contrôleur MPPT, par conséquent, obtenir une puissance maximum sous la variation de la charge et des conditions atmosphériques (luminosité et température). Un nombre important de technique de commande MPPT ont été élaboré depuis les années 70, commençant par des techniques simples comme les contrôleurs MPPT basés sur le retour d'état de la tension et du courant, aux contrôleurs plus performants

utilisant des algorithmes pour calculer le PPM du GPV, parmi les techniques les plus utilisées nous avons la méthode Perturbation et Observation (P&O).[52]

II.6 Connexion directe entre le GPV et la charge

Dans le cas d'une connexion directe qui est finalement aujourd'hui l'utilisation terrestre la plus répandue de l'énergie solaire, le point de fonctionnement du GPV dépend de l'impédance de la charge à laquelle il est connecté. Ce choix est principalement lié à la simplicité, la fiabilité et le faible coût [52][54][55].

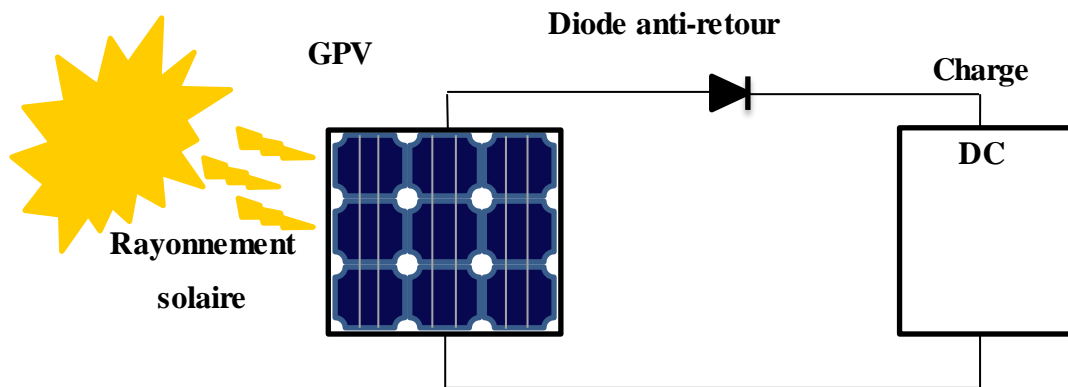


Figure II.10– Connexion directe entre un GPV et une charge.

L'inconvénient pour ce type d'utilisation, la puissance extraite d'un GPV connectée directement à une application est souvent très éloignée du maximum de puissance que peut délivrer le GPV [52][54][55].

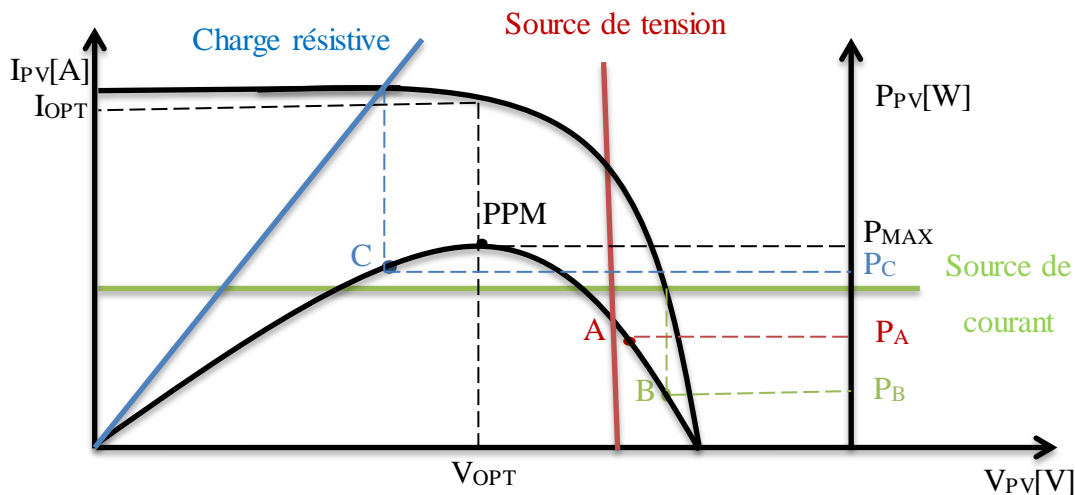


Figure II.11– Points de fonctionnement d'un GPV en connexion directe, en fonction de la Charge [52][54][55].

Comme il est montré dans la figure (II.12), un GPV peut être connecté directement à trois types de charges :

- Une charge de type source de tension continue.
- Une charge de type source de courant continue.
- Une charge purement résistive.

Il y a trois points de fonctionnement A, B, C respectifs qui peuvent être identifiés fournissant une puissance P_A , P_B et P_C . Ces cas de figures montrent que le GPV est mal exploité et ne fournit pas la puissance maximale [52][54][55].

II.7 Commande pour la recherche du Point de Puissance Maximale (MPPT)

De nombreuses recherches ont été développées concernant les différents algorithmes du suivi du point de puissance maximale MPP. En tenant compte des variables des paramètres du système et/ou des changements climatiques [56].

En résumé, la connexion entre une source et une charge peut être optimisée en ajustant le rapport cyclique α du convertisseur statique (CS) au but de maximiser la puissance délivrée à la charge plusieurs étaient appliqués. Parmi ces techniques, on trouve la technique de la Poursuite du Point de Puissance Maximale MPPT [51].

Dans cette partie, on présentera l'aspect théorique de quelques méthodes (classiques et modernes) du suivi du point de fonctionnement à puissance maximale du système photovoltaïque et qui sont :

- Méthode de perturbation et observation (P&O).
- Méthode de la Particle Swarm par le PSO.

II.7.1 Principe de la commande MPPT

Par définition, une commande MPPT, associée à un étage intermédiaire d'adaptation, permet de faire fonctionner un GPV de façon à produire en permanence le maximum de sa puissance. Ainsi, quel que soit les conditions météorologiques (température et irradiation), la commande du convertisseur place le système au point de fonctionnement maximum (VPPM et IPPM) [57]. La chaîne de conversion photovoltaïque sera optimisée à travers un convertisseur statique (CS) commandé par une MPPT [51] [3]. Il peut être représenté par le schéma de la Figure (II.13).

II.7.3 Classification des Commandes MPPT Selon les Paramètres D'entrée.

A. Commande MPPT fonctionnante à partir des paramètres d'entrée du Convertisseur Statique

Il y a un certain nombre de commandes MPPT qui effectue une recherche du PPM selon l'évolution de la puissance fournie par le GPV. Comme la méthode de Perturba & Observe, les algorithmes d'incrément de conductance qui utilisent la valeur de la puissance fournie par le GPV pour l'application d'une action de contrôle adéquate pour le suivi du PPM ou bien Les commandes qui sont basé sur des relations de proportionnalité entre les paramètres optimaux caractérisant le point de puissance maximal (VOPT et IOPT) et les paramètres caractéristiques du module PV (VOC et ICC). Notamment, les MPPT inspirées des réseaux de neurones. Dans ces commandes, soit on fait appel à des systèmes à mémoires informatiques importantes ayant stocké tous les cas possibles, soit les commandes sont encore une fois de plus approximatives. Toutes ces commandes ont comme avantages leurs précisions et leur rapidité de réaction [51] [3].

B. Commandes MPPT fonctionnantes à partir des paramètres de sortie du convertisseur Statique

Dans la littérature, il existe également des algorithmes basés sur les paramètres de sortie des CS. Par exemple Les commandes MPPT basées sur la maximisation du courant de sortie qui sont principalement utilisées quand la charge est une batterie. Dans tous les systèmes utilisant les paramètres de sortie, une approximation de P_{max} est faite travers le rendement du convertisseur. En somme, plus l'étage de conversion est bon, plus cette approximation est valable. Par contre, en général, tous les systèmes avec un seul capteur sont par essence, non précis. La plupart de ces systèmes ont été conçus à l'origine pour le spatial [51][3].

II.7.4 Classification des commandes MPPT selon le type de recherche :

II.7.4.1 MPPT Indirect :

Ce type de commandes MPPT utilise le lien existant entre les variables mesurées (I_{sc} ou V_{oc}), qui peuvent être facilement déterminées, et la position approximative du MPP. Il compte aussi les commandes en se basant sur une estimation du point de fonctionnement du GPV réalisée à partir d'un modèle paramétrique défini au préalable. Il existe aussi des commandes qui établissent une poursuite de la tension optimale en prenant en compte uniquement les variations de la température des cellules donnée par un capteur. Ces commandes ont l'avantage

d'être simples à réaliser. Elles sont plutôt destinées à des systèmes peu coûteux et peu précis devant fonctionner dans des zones géographiques où il y a peu de changements climatiques [51][57][47][3].

II.7.4.2 MPPT directs :

Ces méthodes utilisent les mesures de tension et de courant des panneaux et dont l'algorithme est basé sur la variation de ces mesures. L'avantage de ces algorithmes est qu'ils ne nécessitent pas une connaissance préalable des caractéristiques des GPV. Parmi ces méthodes, on retrouve la méthode de différenciation, la méthode « Perturba & Observe », l'incrément de conductance [57][58].

II.7.5 Méthode de perturbation ET d'observation (P&O) :

Le principe des commandes MPPT de type P&O consiste à perturber la tension V_{PV} d'une faible amplitude autour de sa valeur initiale et d'analyser le comportement de la variation de puissance P_{PV} qui en résulte [59]. Ainsi, c'est la méthode la plus utilisée vu sa simplicité. Une boucle de retour et peu de mesures sont nécessaires. La tension aux bornes des panneaux est volontairement perturbée d'une faible amplitude (augmentée ou diminuée) puis la puissance est comparée à celle obtenue avant perturbation. Précisément, si la puissance aux bornes des panneaux est augmentée à cause de la perturbation, la suivante est faite dans la même direction (cela signifie que le point de fonctionnement se trouve à gauche du MPP). Réciproquement, si la puissance diminue, la nouvelle perturbation est réalisée dans le sens opposé [60].

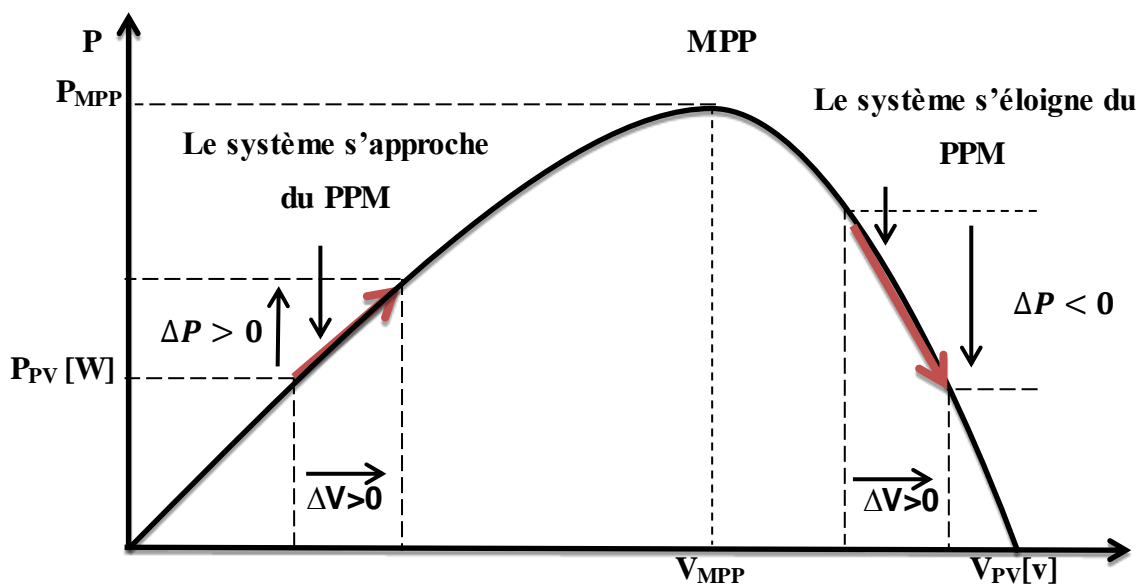


Figure II.14– Caractéristique P_{pv} (V_{pv}) et fonctionnement de la méthode P&O.

A partir de ces diverses analyses sur les conséquences d'une variation de tension sur la caractéristique $P_{pv}(V_{pv})$, il est alors facile de situer le point de fonctionnement par rapport au MPP, et de faire converger ce dernier vers le maximum de puissance (voir la figure II.14). En résumé, si Figure (II.14) : Organigramme de la méthode Perturbation et Observation [45][48].

Suite à une perturbation de tension, la puissance PV augmente, la direction de perturbation est maintenue. Dans le cas contraire, elle est inversée pour reprendre la convergence vers le nouveau MPP. Un organigramme de fonctionnement de cette méthode est montré dans la figure (II.14) [60].

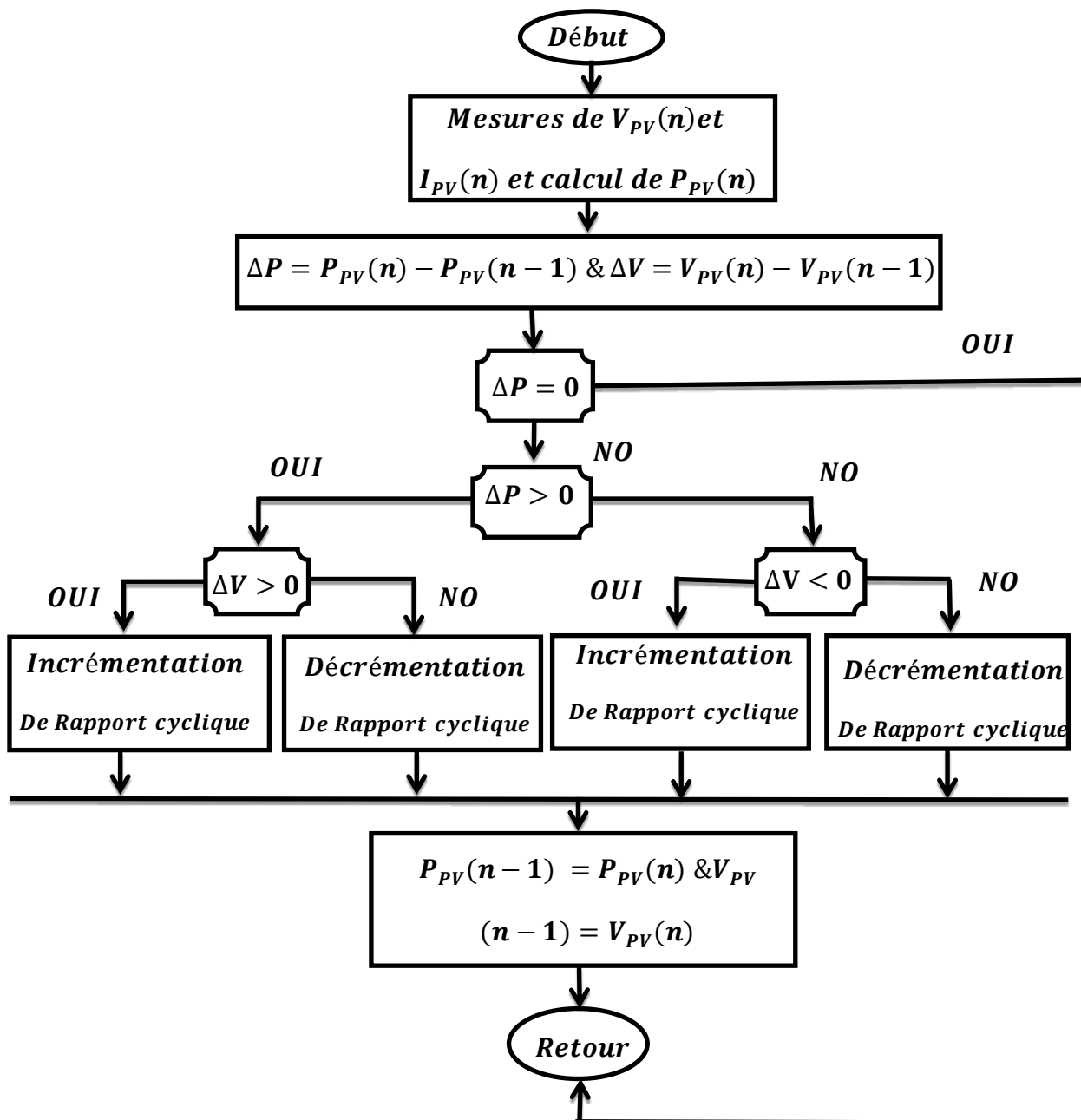


Figure II.15– Organigramme de la méthode Perturbation et Observation [45][48].

La méthode P&O est largement utilisée de par sa facilité d'implémentation, cependant elle présente quelques problèmes liés aux oscillations autour du PPM qu'elle engendre en régime établi car la procédure de recherche du PPM doit être répétée périodiquement, obligeant le système à osciller en permanence autour du PPM, une fois ce dernier atteint. Ces oscillations dépendent de la largeur du pas de la perturbation [55] :

- Si la largeur du pas est grande, l'algorithme du MPPT répondra rapidement aux changements soudains des conditions de fonctionnement, mais les pertes seront accrues dans les conditions stables ou lentement changeantes.
- Si la largeur du pas est très petite, les pertes dans les conditions stables ou lentement changeantes seront réduites, mais le système ne pourra plus suivre les changements rapides de la température ou de l'insolation.

Il faut donc trouver un compromis entre précision et rapidité. Ce qui rend cette commande difficile à optimiser. Un autre inconvénient de la méthode P&O lors d'un changement rapide des conditions atmosphériques. Figure (II.16) Commencant par un point de fonctionnement A, si les conditions climatiques restent constantes, une perturbation ΔV dans la tension V amènera le point de fonctionnement au point B, et le sens de la perturbation sera inversé à cause de la diminution de la puissance. Par contre, si par exemple l'éclairement augmente et déplace la courbe de puissance de P1 à P2, sur un cycle du MPPT, le point de fonctionnement sera déplacé de A vers C. Cela représente une augmentation de la puissance, l'algorithme précédent réagit comme si cette augmentation est produite par l'effet de perturbation précédente, alors il continue dans la même direction qui est une mauvaise direction, ce qu'il éloigne du vrai point de puissance maximale. Ce processus continu jusqu'à la stabilité de l'ensoleillement où il revient au vrai point de puissance maximale. Ceci cause un retard de réponse lors des changements soudains des conditions de fonctionnement et des pertes de puissance [51][58].

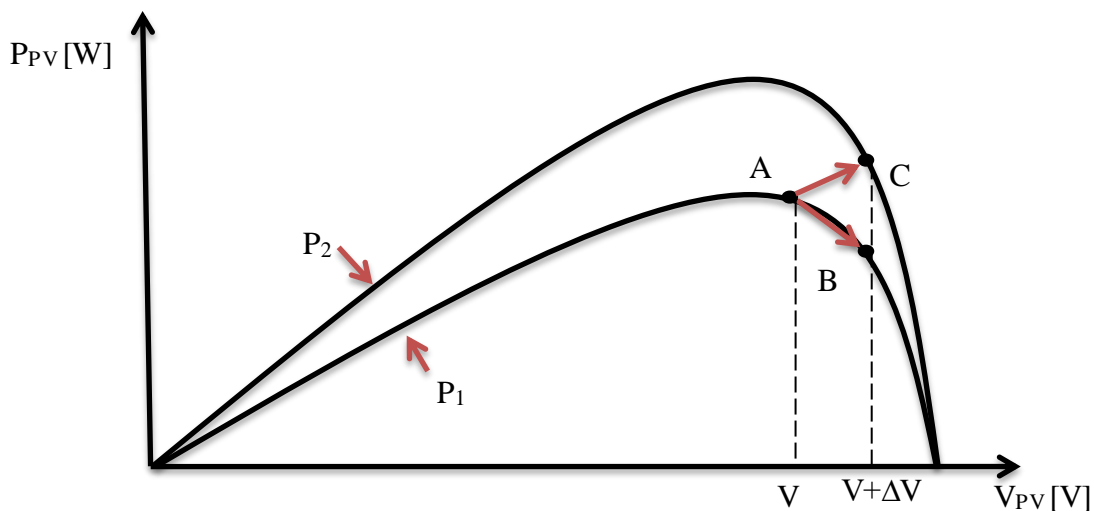


Figure II.16– Divergence de la méthode P&O.

Dans le tableau suivant sont résumés les principaux aspects du MPPT à prendre en Considération [61].

Méthode MPPT	Connaissance des paramètres du GPV	Nécessité d'une mise à jour périodique	Mode d'implantation	Complexité D'implantation	Vitesse de Recouvrement du PPM	Type et Nombre De capteur	Rendement (%)
P&O	Non	Non	Analogique où Numérique	Basse	Variable	1 capteur courant. 1 capteur tension.	81-96
Inc-cond	Non	Non	Numérique	Moyenne	Variable	1 capteur courant. 1 capteur tension.	90-98
Hill climbing	Non	Non	Analogique où Numérique	Basse	Variable	1 capteur courant. 1 capteur tension.	95-99
Fonction de VCO	Oui	Oui	Analogique où Numérique	Moyenne	Moyenne	1 capteur tension	88
Fraction Icc	Oui	Oui	Analogique où Numérique	Moyenne	Moyenne	1 capteur courant	
Logique Floue	Oui	Oui	Numérique	Haute	Rapide	Variable	
Réseau de Neurones	Oui	Oui	Numérique	Haute	Rapide	Variable	
Balayage Du Courant	Oui	Oui	Numérique	Haute	Lentement	1 capteur courant. 1 capteur tension.	
PSO	Oui	Non	Numérique	Haute	Rapide	1 capteur courant. 1 capteur tension.	Très haute

Tableau II.2 – Caractéristiques majeures des commandes MPPT [61].

II.8 Simulation du module PV avec la commande P&O

Nous présentons ci-dessous les résultats de simulation (sous Matlab/Simulink), du fonctionnement d'un panneau photovoltaïque de type Siemens SM110-24, avec l'application de l'algorithme P&O.

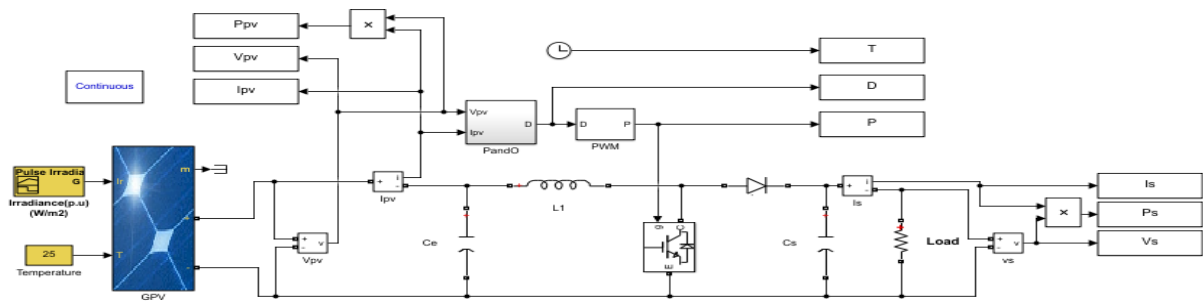


Figure II.17– schématique de SIMULINK de la méthode P&O.

II.8.1 Les résultats de simulation de la méthode P&O

Pour présenter l'effet de l'éclairement sur la puissance et tension et courant de générateur photovoltaïque, on fait maintenir la température à une valeur constante=25°C et on fait varier rapidement l'éclairement plusieurs fois de sens croissant de 500 W/m² et 1000 W/m² à l'intervalle de temps [1s :1.25s] puis avec une diminution rapide de 1000 W/m² et 800 W/m² à l'intervalle de temps [2s :2.09s] pour créer plusieurs points de puissance maximale que le contrôleur doit les suivre, ainsi on a zoomé la zone de régime permanent en l'intervalle de temps [1.25s :2s] où les conditions climatiques ont été maintenues constantes (T=25 °C et E= 1000 w/m²).

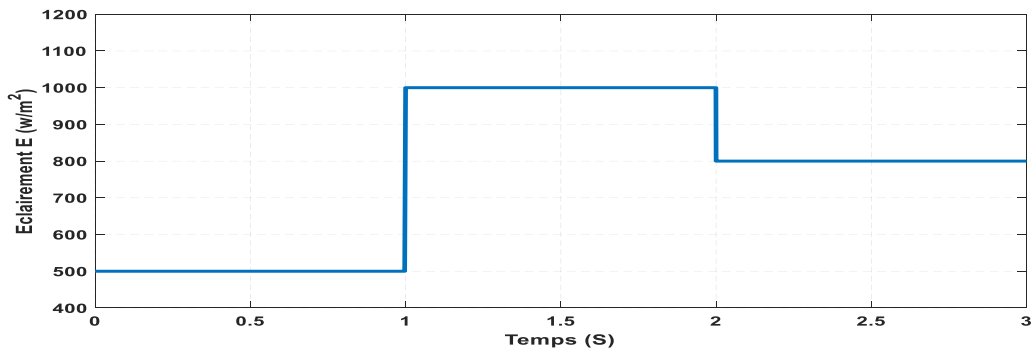


Figure II.18– Changement d'éclairement.

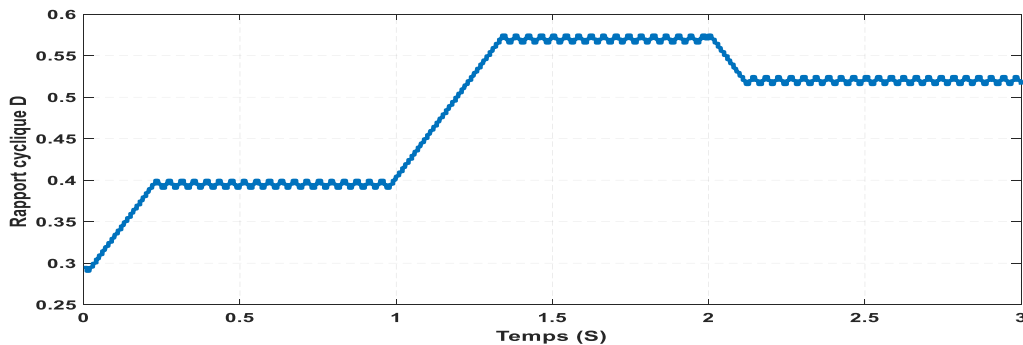


Figure II.19– Courbe de Rapport cyclique D(t) par la méthode P&O.

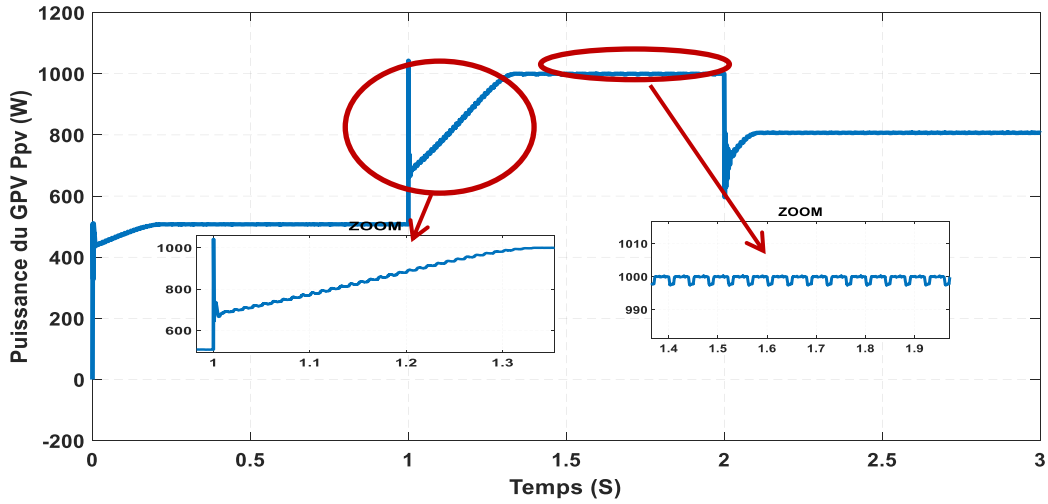


Figure II.20– Courbe de puissance $P(t)$ du GPV (P&O).

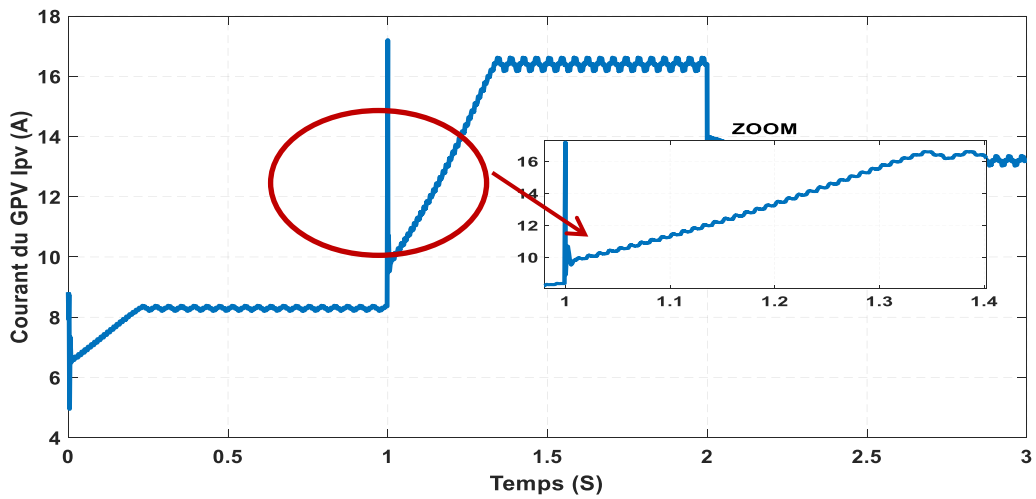


Figure II.21– Courbe de courant $I(t)$ du GPV (P&O).

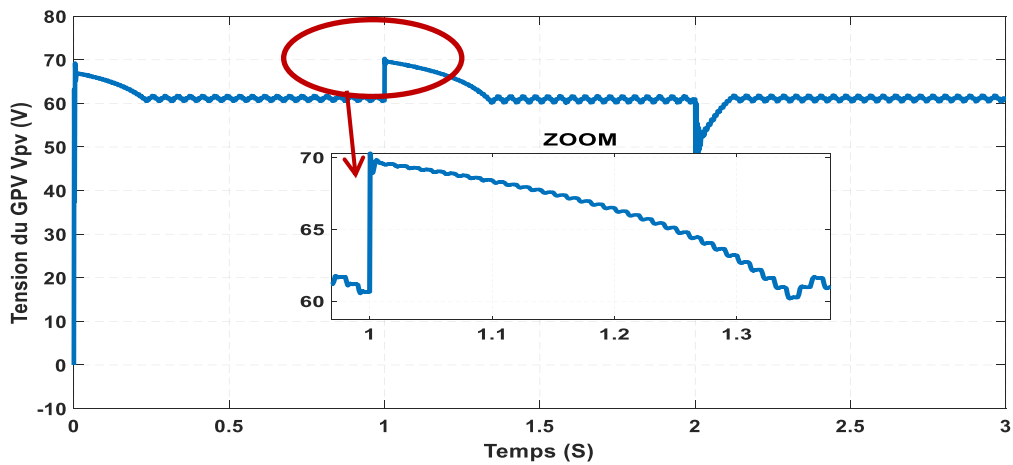


Figure II.22– Courbe de tension $V(t)$ du GPV (P&O).

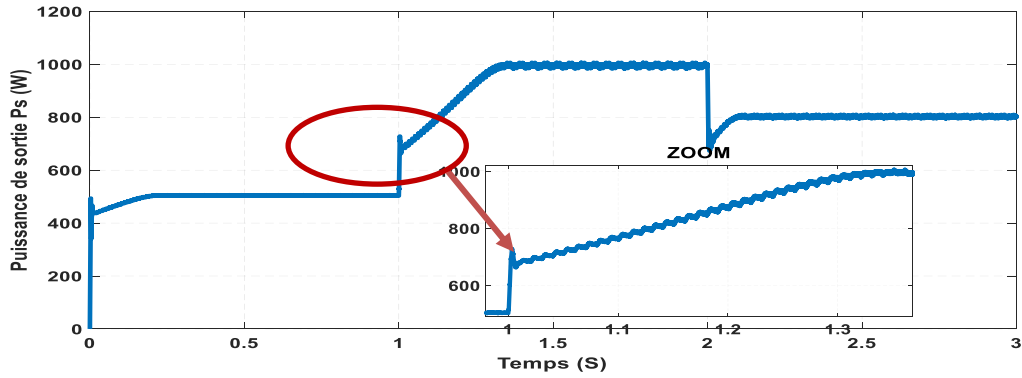


Figure II.23– Courbe de puissance de la sortie P_s (P&O).

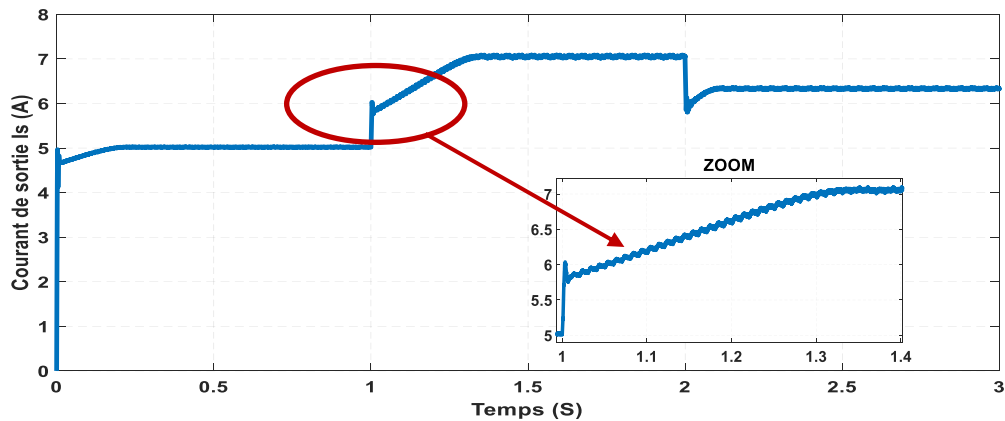


Figure II.24– Courbe de Courant de la sortie I_s (t) (P&O).

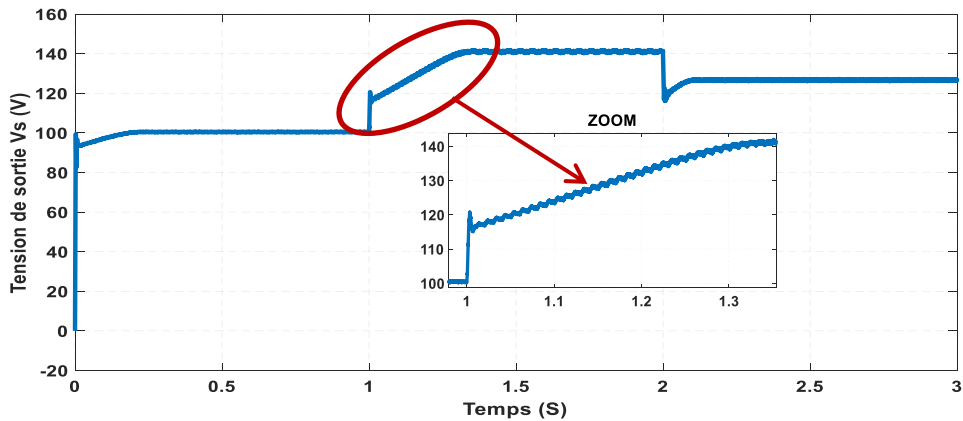


Figure II.25– Courbe de Tension de la sortie V_s (t) (P&O).

On remarque qu'il existe une relation de proportionnalité entre la puissance et l'éclairement. La figure (II.23) 'zoom' représente la puissance de sortie du GPV qui va augmenter rapidement jusqu'au niveau de régime permanent 998 W où elle se stabilise, ainsi elle présente une oscillation importante autour du point de la puissance maximale.

D'après les résultats de simulation obtenus, on constate que les courbes de la puissance, de la tension et du courant présentent des oscillations dans le régime permanent ainsi que le défaut d'une impulsion temporaire en régime transitoire.

II.9 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudié la modélisation et commande d'un système photovoltaïque constitué d'un GPV, d'un convertisseur Boost, d'une résistance et d'un contrôleur MPPT. Le contrôleur utilisé est basé sur de technique classique P&O, leurs performances sous des conditions de fonctionnement variables sont évaluées et analysées par simulation à l'aide de Matlab/ Simulink. Des résultats satisfaisants ont été obtenus avec les méthodes conventionnelles. Le fonctionnement sous des accroissements lents de puissance, provoqués par des augmentations lentes et rapides d'ensoleillement. Il existe des inconvénients de cette technique, tels que le temps de réponse et l'oscillation en régime permanent au niveau de la puissance maximale.

**Chapitre III. Poursuite du point de puissance
maximale MPPT du système photovoltaïque par la
méthode PSO**

Chapitre III. Poursuite du point de puissance maximale MPPT du système photovoltaïque par la méthode PSO

III.1 Introduction :

Prévision a toujours été un défi crucial pour les organisations qui jouent un rôle important dans la prise de nombreuses décisions cruciales. Beaucoup d'efforts ont été consacrés au cours des dernières décennies pour développer et améliorer les modèles de prévision de séries chronologiques. Dans ces modèles, la plupart des chercheurs ont supposé une relation linéaire entre les valeurs passées de la variable prévisions. Bien que l'hypothèse linéaire, il est plus facile de manipuler les modèles mathématiques dans ce chapitre, nous allons détailler le principe de fonctionnement d'un PSO [62].

Plusieurs techniques sont utilisées pour suivre le point de puissance maximale d'une source PV, les plus développées se basent sur les méthodes méta heuristiques [63].

Ces méthodes sont largement appliquées aux différents domaines notamment dans le domaine de l'optimisation de l'énergie électrique [61].

Les méta-heuristiques sont souvent employées pour leur facilité de programmation et de manipulation. Elles sont en effet facilement adaptables à tout type de problème d'optimisation. Parmi les méta-heuristiques l'algorithme d'optimisation par essaims de particules [61].

Dans ce chapitre on va expliquer le point de puissance maximale et citer des méthodes permettant de suivre ce point, puis expliquer l'une des méthodes méta heuristiques qui base sur l'algorithme PSO, son principe, et la technique d'application de cet algorithme sur l'MPPT.

III.2 Processus d'optimisation

III.2.1 Variables du problème

C'est à l'utilisateur de définir les variables du problème. Il peut avoir intérêt à faire varier un grand nombre de paramètres pour augmenter les degrés de liberté de l'algorithme afin de

découvrir des solutions nouvelles. Autrement, s'il a une vue suffisamment précise de ce qu'il veut obtenir, il peut limiter le nombre de variables à ceux qui sont essentielles. [62].

III.2.2 Espace de recherche

L'espace de recherche est infini, seule la population initiale est confinée dans un espace fini. Mais dans le cas des algorithmes de type Monte Carlo et génétique, il est généralement nécessaire de définir un espace de recherche fini. Cette limitation de recherche n'est généralement pas problématique. En effet, ne serait-ce que des raisons technologique ou informatique, les variables sont en général naturellement limitées [62].

III.2.3 Fonction objective

Un algorithme d'optimisation nécessite généralement la définition d'une fonction rendant compte de la pertinence des solutions potentielles, à partir de la grandeur à optimiser. C'est la fonction d'adaptation f (ou fitness fonction). L'algorithme convergera vers un optimum de cette fonction, quelle que soit sa définition. La fonction f doit donc exprimer le plus fidèlement possible le désir de l'utilisateur sous forme mathématique. [62]

III.2.4 Problème d'optimisation

Un problème d'optimisation au sens générale est défini par un ensemble de solutions possibles S , dont la qualité peut être décrite par une fonction objective f .

On cherche alors à trouver la solution S^* possédant la meilleure qualité $f(S^*)$ par la suite on peut chercher à minimiser ou maximiser $f(S)$. [64][62]

Un problème d'optimisation peut présenter des contraintes d'égalité ou d'inégalité, si $f(S)$ change avec le temps ou encore multi-objectif si plusieurs fonctions objectives doivent être optimisées.

Il existe des méthodes déterministes permettant de résoudre certains problèmes en temps fini ;

Ces méthodes nécessitent généralement un certain nombre de caractéristique de la fonction objectif, comme la stricte convexité, la continuité ou encore la dérivabilité. On peut citer comme exemple la méthode programmation linéaire quadratique ou dynamique, la méthode du gradient, la méthode de Newton, ...etc. [62].

III.2.5 Optimisation par Essaim de Particules (PSO)

La résolution satisfaisante d'un problème d'optimisation difficile, qui comporte un grand nombre de solutions sous-optimales, justifie souvent le recours à une Meta heuristique puissante. La majorité des algorithmes utilisés pour résoudre ces problèmes d'optimisation sont les Meta heuristiques à population. Parmi celles-ci, nous nous intéressons à l'Optimisation par Essaim Particulaire (OEP, ou PSO en anglais) qui est apparue en 1995 [30][32]. PSO a attiré beaucoup de chercheurs et a été exploité dans différents domaines d'optimisation. Cette méthode est devenue de plus en plus populaire. Elle s'inspire de la dynamique d'animaux se déplaçant en groupes compacts (essaims d'abeilles, vols groupés d'oiseaux, bancs de poissons) [64][65].

Chaque membre d'un groupe d'oiseaux qui détermine sa vitesse en fonction de leur expérience personnelle ainsi que l'information obtenue grâce à l'interaction avec d'autres membres du troupeau. Cette idée a été le principe de base pour optimisation par essaim de particules (PSO). Chaque oiseau, appelé particule, vole dans l'espace des solutions du problème d'optimisation la recherche de la meilleure solution, et donc sa position représente une solution potentielle au problème [62] [64] [65].

L'essaim de particules correspond à une population d'agents simples, appelés particules. Chaque particule est considérée comme une solution du problème, où elle possède une position (la vectrice solution) et une vitesse. [61][64][65] De plus, chaque particule possède une mémoire lui permettant de se souvenir de sa meilleure performance (en position et en valeur) et de la meilleure performance atteinte par les particules « voisines » (informatrices) : chaque particule dispose en effet d'un groupe d'informatrices, historiquement appelé son voisinage [61] [64] [65].

Un essaim de particules, qui sont des solutions potentielles au problème d'optimisation, « survole » l'espace de recherche, à la recherche de l'optimum global. Le déplacement d'une particule est influencé par les trois composantes suivantes :

- Une composante physique : la particule tend à suivre sa direction courante de déplacement ;
- Une composante cognitive : la particule tend à se diriger vers le meilleur site par lequel elle est déjà passée ;
- Une composante sociale : la particule tend à se fier à l'expérience de ses congénères et, ainsi, à se diriger vers le meilleur site déjà atteint par ses voisins.

La stratégie de déplacement d'une particule est illustrée dans la Figure III.1.

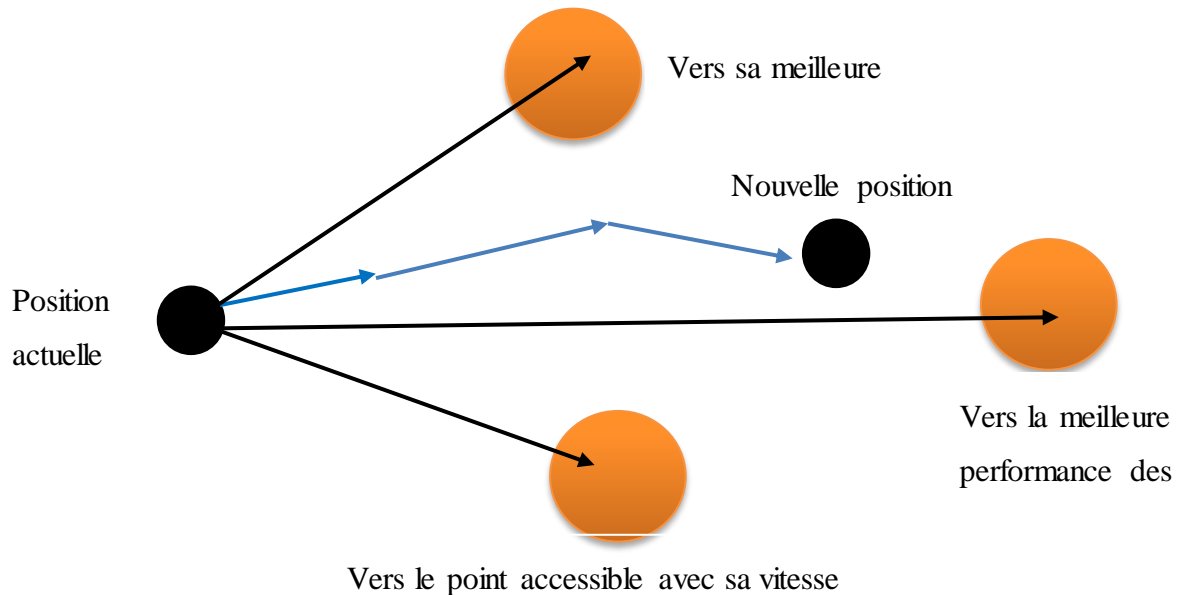


Figure III.1– Déplacement d'une particule

L'algorithme de la PSO est extrêmement simple, mais des spécifications et quelques paramètres sont toutefois exigés [66]. Chaque agent ou particule est caractérisée par :

- Une position et une vitesse ;
- Le coût de la fonction objectif pour sa position acquise en cours ou précédemment (*pbest*) ;
- La connaissance de ses voisins dont elle fait partie ;
- La meilleure position précédemment du groupe jusqu'à lors (*gbest*).

Dans l'algorithme, la population est initialisée aléatoirement. A chaque itération la particule fait un compromis entre trois choix possibles :

- Suivre sa propre voie ;
- Retourner vers sa meilleure position obtenue ;
- Se diriger vers la meilleure position obtenue dans son voisinage.

Au départ de l'algorithme, un essaim est réparti au hasard dans l'espace de recherche, chaque particule ayant également une vitesse aléatoire. Ensuite, à chaque pas de temps : Chaque particule est capable d'évaluer la qualité de sa position et de garder en mémoire sa meilleure performance, c'est-à-dire la meilleure position qu'elle a atteinte jusqu'ici (qui peut en fait être parfois la position courante) et sa qualité (la valeur en cette position de la fonction à optimiser).

- Chaque particule est capable d'interroger un certain nombre de ses congénères de son voisinage et d'obtenir de chacune entre elles sa propre meilleure performance.
- A chaque pas de temps, chaque particule choisit la meilleure des meilleures performances dont elle a connaissance, modifie sa vitesse en fonction de cette information et de ses propres données et se déplace en conséquence. A partir des quelques informations dont elle dispose, une particule doit décider de son prochain mouvement, c'est-à-dire décider de sa nouvelle vitesse.

Pour ce faire, elle combine trois informations :

- Sa vitesse actuelle.
- Sa meilleure position actuelle.
- La meilleure performance (vitesse et position) de ses voisines.

Le hasard joue un rôle, grâce à une modification aléatoire limitée des coefficients de confiance, ce qui favorise l'exploration de l'espace de recherche. Naturellement, pour pouvoir être programmé, tout ceci est formalisé dans des équations de mouvement. Un point intéressant est que, contrairement à bien d'autres heuristiques qui restent purement expérimentales, il existe une analyse mathématique précisant les conditions de convergence et le choix des paramètres [66].

III.3 Méthode de base

La procédure de la norme PSO se résume comme suit [62] [67] :

- **Étape 1** : Initialiser une population de particules à des positions aléatoires et des vitesses, où chaque particule contient D variables.
- **Étape 2** : chaque particule et sa valeur objective égal à son courant la position et la valeur objective, et soit g Évaluer les valeurs objectives de toutes les particules. Soit p et sa valeur objective être égale à la position et l'objectif valeur de la meilleure particule initiale.
- **Étape 3** : Mise à jour de la vitesse et de la position de chaque particule.
- **Étape 4** : Évaluer les valeurs objectives de toutes les particules.
- **Étape 5** : Pour chaque particule, de comparer sa valeur actuelle objectif. Si la valeur Actuelle vaut mieux, puis mettre à jour p avec la valeur objective de ses p meilleur et sa valeur objective avec la position actuelle et la valeur objective.
- **Étape 6** : Déterminer la meilleure particule de l'essaim en cours avec la meilleure valeur Objective. Si la valeur objective est meilleure que la valeur objective de g ,

Mise à jour g et son objective valeur de la position et de la valeur objective de la courante meilleure particule.

- **Étape 7** : Si un critère d'arrêt est rempli, veuillez indiquer g de sortie et ses valeur objective.

III.3.1 Principe de l'Algorithme PSO

On dispose d'une fonction objective (une fonction coût) à optimiser dans un sens ou dans l'autre. Un essaim est un ensemble de particules positionnées dans l'espace de recherche de la fonction objective. Le principe de l'algorithme consiste à déplacer ces particules dans l'espace de recherche afin qu'elles trouvent la solution optimale [62]. Chacune de ces particules est dotée :

- D'une position, c'est-à-dire ses coordonnées dans l'ensemble de définition.
- D'une vitesse qui permet à la particule de se déplacer. De cette façon, au cours des itérations, chaque particule change de position. Elle évolue en fonction de son meilleur voisin, de sa meilleure position, et de sa position précédente. C'est cette évolution qui permet de tomber sur une particule optimale.
- D'un voisinage, c'est-à-dire un ensemble de particules qui interagissent directement sur la particule, en particulier celle qui a le meilleur critère.

III.4 Formulation Mathématique de l'Algorithme PSO

Dans un espace de recherche de dimension D , la particule i de l'essaim est modélisée par son vecteur position $\vec{X}_i = (X_{i_1}, X_{i_2}, \dots, X_{i_d})$ et par son vecteur vitesse $\vec{V}_i = (V_{i_1}, V_{i_2}, \dots, V_{i_d})$.

La qualité de sa position est déterminée par la valeur de la fonction objective en ce point. Cette particule garde en mémoire la meilleure position par laquelle elle est déjà passée, que l'on

Note : $\vec{Pbest}_i = (pbest_{i_1}, pbest_{i_2}, \dots, pbest_{i_D})$ La meilleure position atteinte par les particules de l'essaim est notée $\vec{Gbest}_i = (gbest_{i_1}, gbest_{i_2}, \dots, gbest_{i_D})$ Au temps t , le vecteur de la vitesse est calculé à partir de l'équation III.1, [144] [148-153].

$$v_{ij}(t) = wv_{ij}(t-1) + c_1r_1(p_{ijbest}(t-1) - x_{ij}(t-1)) + c_2r_2(g_{ijbest}(t-1) - x_{ij}(t-1)) \quad (\text{III.1})$$

$$j \in \{1, \dots, D\}$$

La position au temps t de la particule i est alors définie par l'équation III.2 [68] [72] :

$$x_{ij}(t) = x_{ij}(t-1) + v_{ij}(t), j \in \{1, \dots, D\} \quad (\text{III.2})$$

Où :

- w Est en général une constante appelée, coefficient d'inertie, c_1 et c_2 sont deux constantes appelées coefficients d'accélération, r_1 et r_2 sont deux nombres aléatoires tirés uniformément dans $[0,1]$ à chaque itération et pour chaque dimension.
- $wv_{ij}(t-1)$ Correspond à la composante physique du déplacement. Le paramètre w contrôle l'influence de la direction de déplacement sur le déplacement futur. Il est à noter que, dans certaines applications, le paramètre w peut-être variable.
- $c_1r_1(p_{ijbest}(t-1) - x_{ij}(t-1))$ Correspond à la composante cognitive du déplacement où c_1 contrôle le comportement cognitif de la particule.
- $c_2r_2(g_{ijbest}(t-1) - x_{ij}(t-1))$ Correspond à la composante sociale du déplacement, où c_2 contrôle l'aptitude sociale de la particule.

Les gammes appropriées de valeurs pour c_1 et c_2 sont de 1 à 2, mais 2 est le plus approprié dans beaucoup de cas [68] [74].

Avec :

- p_{ijbest} : La meilleure position locale (de la particule i).
- g_{ijbest} : La meilleure position globale (de toutes les particules de l'essaim).
- $v_{ij}(t)$: La vitesse de la particule i à l'instant t
- $x_{ij}(t)$: La position de la particule i à l'instant t .
- w : Le poids de chaque individu (Constante).
- $r_1 r_2$: Nombres aléatoires entre 0 et 1.
- $c_1 c_2$: Coefficients d'accélération (constantes).

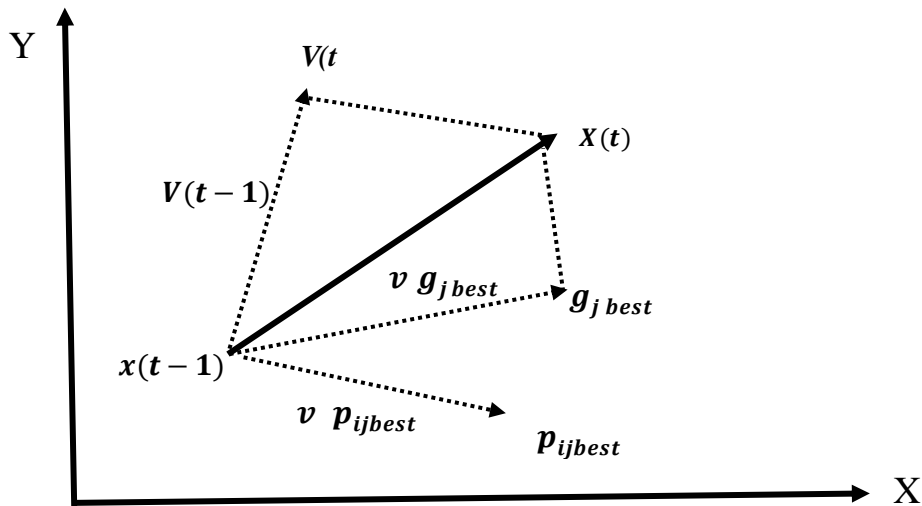


Figure III.2– Schéma vectorielle du déplacement d'une particule

A chaque itération de l'algorithme, chaque particule est déplacée suivant les équations (VI.1) et (VI.2). Une fois le déplacement des particules effectué, les nouvelles positions sont évaluées. Les \bar{P}_{best} ainsi que \bar{G}_{best} sont alors mises à jour. Cette procédure est résumée par l'algorithme III.1.

Algorithme III.1 : Algorithme d'optimisation par l'essaim de particules [68].

Initialisation aléatoire des positions et des vitesses de chaque particule

Pour chaque particule $i \bar{P}_{i_{best}} = \bar{X}_i$

Tant que le critère d'arrêt n'est pas atteint faire

Pour $i = 1$ à N faire

Déplacement de la particule à l'aide de l'équation III.1 et III 2

Évaluation des positions

Si $f(\bar{X}_i) < f(\bar{P}_{i_{best}})$

$\bar{P}_{i_{best}} = \bar{X}_i$

Fin Si

Si $f(\bar{P}_{i_{best}}) < f(\bar{G}_{best})$

$\bar{G}_{best} = \bar{P}_{i_{best}}$

Fin Pour

Fin Tant que

La Figure III.3 montre l'organigramme général de la méthode PSO, [68] [69] :

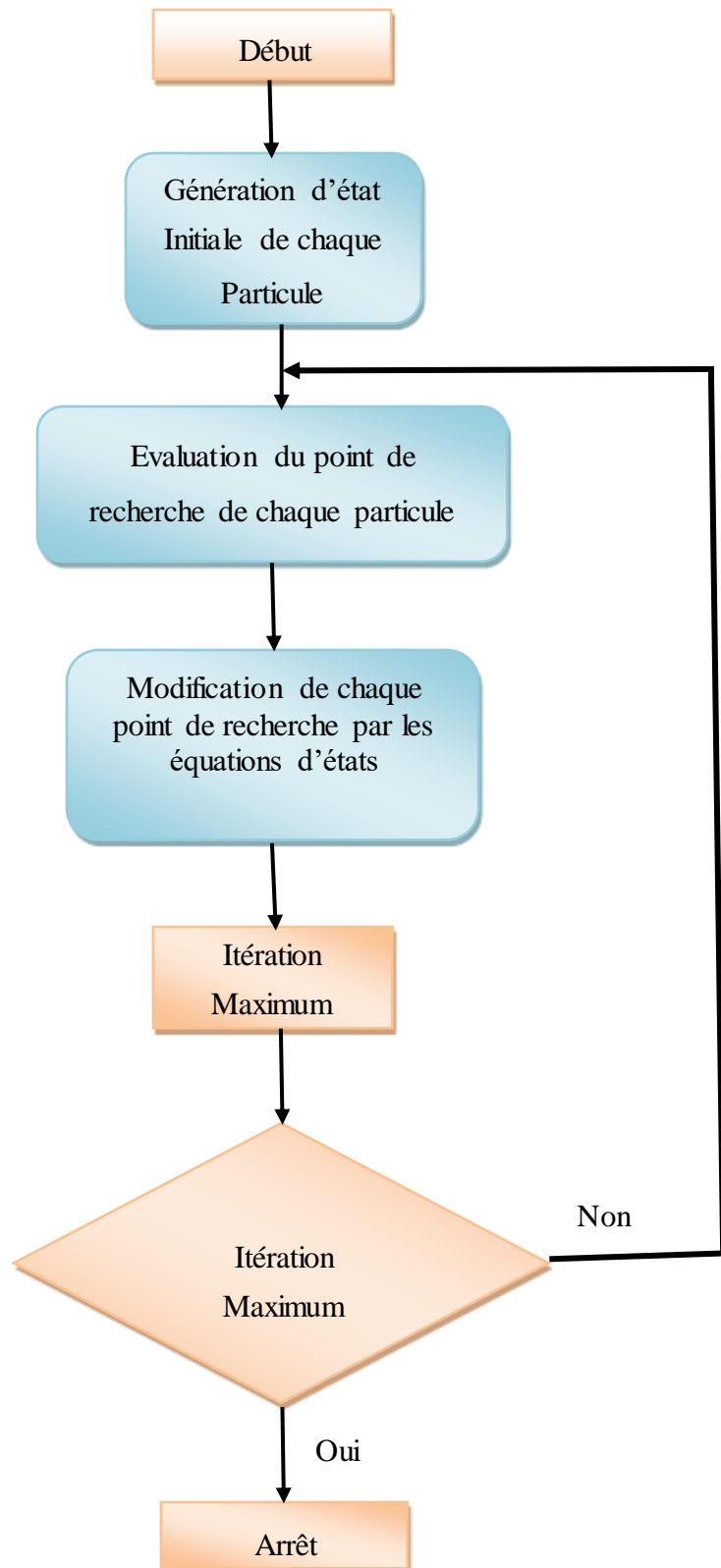


Figure III.3– Organigramme général de la méthode PSO [68] [75].

III.5 Application de la méthode PSO sur l'MPPT

Lors de l'application de la technique du PSO pour suivre le point de puissance maximale MPP, chaque paramètre de l'algorithme PSO aura son équivalent dans les paramètres de la technique MPPT, et cela peut être exprimé comme suit :

$$\Delta D_i = X_i(t) \quad (\text{III.3})$$

$$\Delta D_i = V_i(t) \quad (\text{III.4})$$

$$p_{best} = D p_{best} \quad (\text{III.5})$$

$$g_{best} = D g_{best} \quad (\text{III.7})$$

$$F(x) = P(D) \quad (\text{III.8})$$

Pour mieux comprendre, on réécrit les équations (III.2) et (III.3) en utilisant les paramètres de l'MPPT :

$$D_i(t+1) = D_i(t) + \Delta D_i(t+1) \quad (\text{III.9})$$

$$\text{tel que : } i \in \{1, \dots, np\}$$

$$\Delta D_i(t+1) = w \cdot \Delta D_i(t) + c_1 \cdot r_1 \cdot [D p_{best} - D_i(t)] + c_2 \cdot r_2 \cdot [D g_{best} - D_i(t)] \quad (\text{III.10})$$

Tel que :

- $D_i(t+1)$: Le rapport cyclique de la particule i à l'instant $(t+1)$.
- $D_i(t)$: Le rapport cyclique de la particule i à l'instant (t) .
- $\Delta D_i(t+1)$: La variation du rapport cyclique de la particule i à l'instant $(t+1)$.
- $D p_{best}$: Le meilleur rapport cyclique de la particule i .
- $D g_{best}$: Le meilleur rapport cyclique global (de toutes les particules de l'essaim).

L'organigramme suivant (Figure III.7) explique les étapes de cette application :

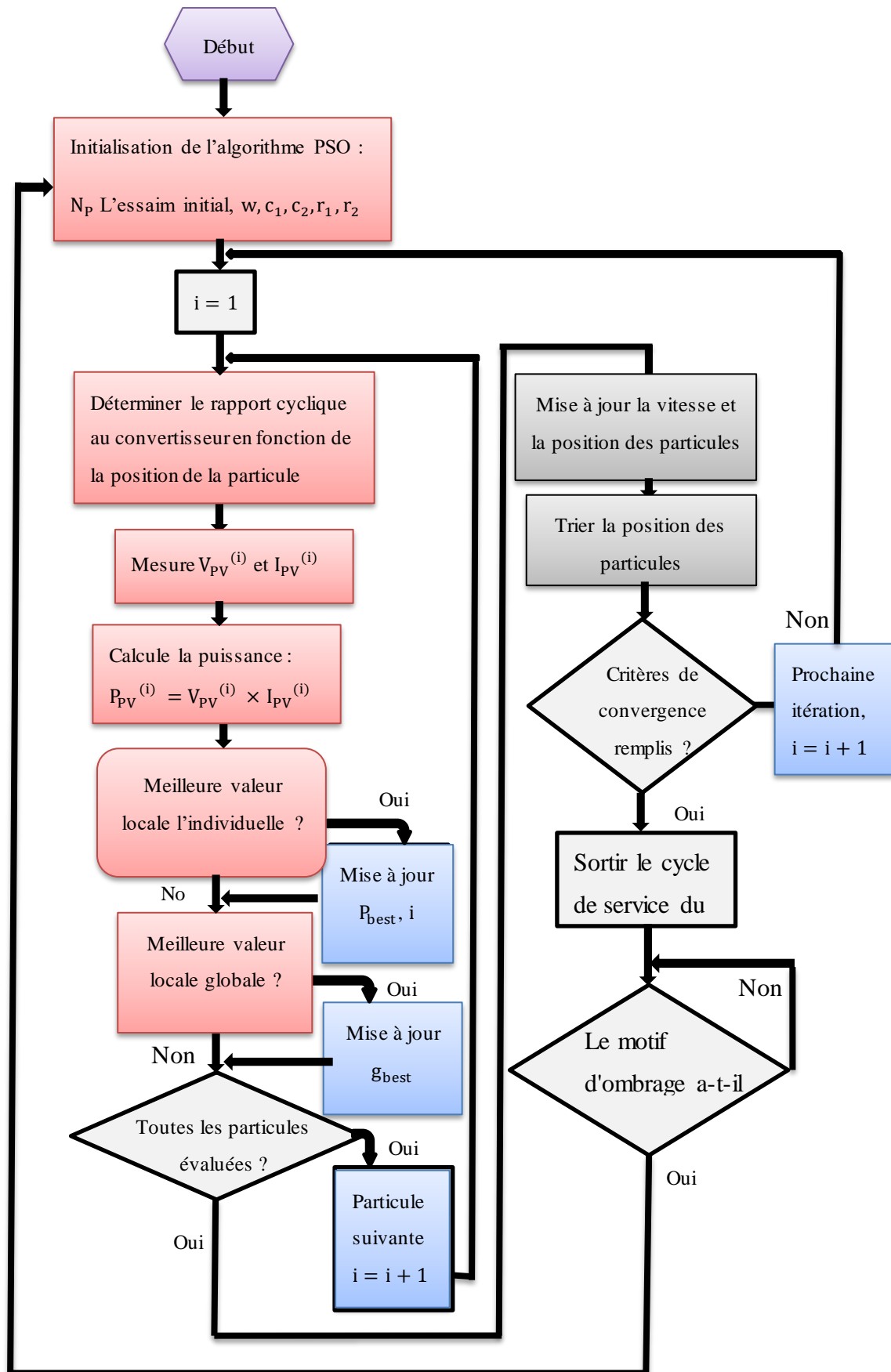


Figure III. 4– Organigramme de la méthode PSO pour réaliser l'MPPT

III.6 Simulations de la méthode PSO

Nous présentons ci-dessous les résultats de simulation (sous Matlab/Simulink), du fonctionnement d'un panneau photovoltaïque de type Siemens c-Si M60na42117, avec l'application de l'algorithme PSO.

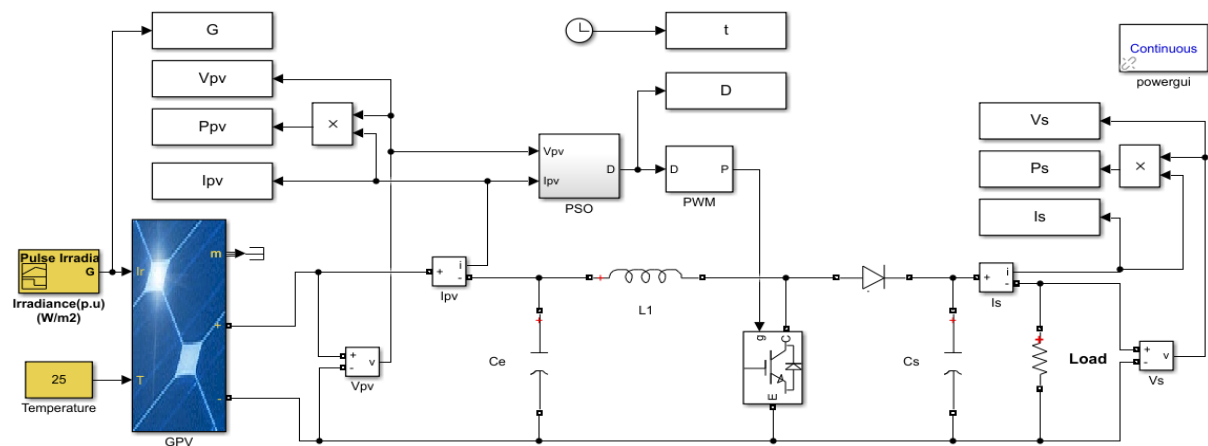


Figure III.5– schématique de SIMULINK de la méthode PSO.

Pour la température constant et éclairc ement variable présenter l'effet de l'éclairc ement E sur la puissance et tension et courant de générateur photovoltaïque, on fait maintenir la température à une valeur constante=25°C et on fait varier rapidement l'éclairc ement plusieurs fois de sens croissant de 500 W/m² et 1000 W/m² a l'intervalle de temps [1s :1.15s] puis avec une diminution rapide de 1000 W/m² et 800 W/m² a l'intervalle de temps [2s :2.085s] pour créer plusieurs points de puissance maximale que le contrôleur doit les suivre, ainsi on a zoomé la zone de régime permanent en l'intervalle de temps [1.15s :2s] où les conditions climatiques ont été maintenues constantes (T=25 °C et E= 1000 w/m²).

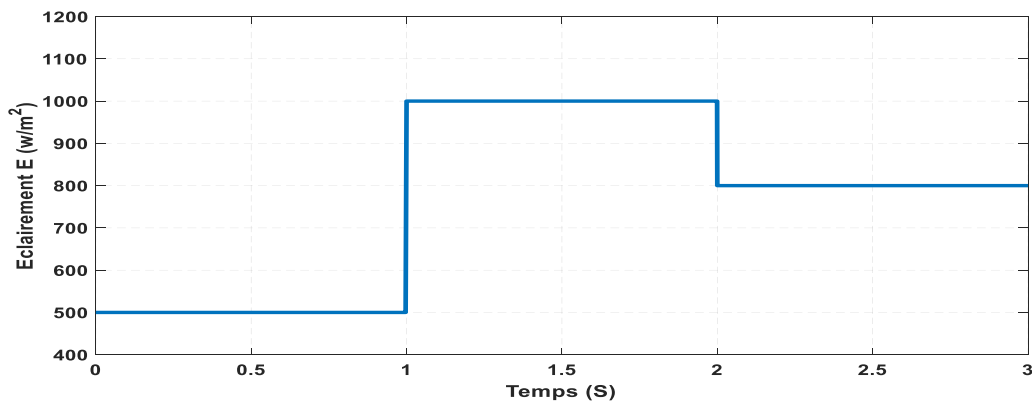


Figure III.6– Changement d'éclairc ement.

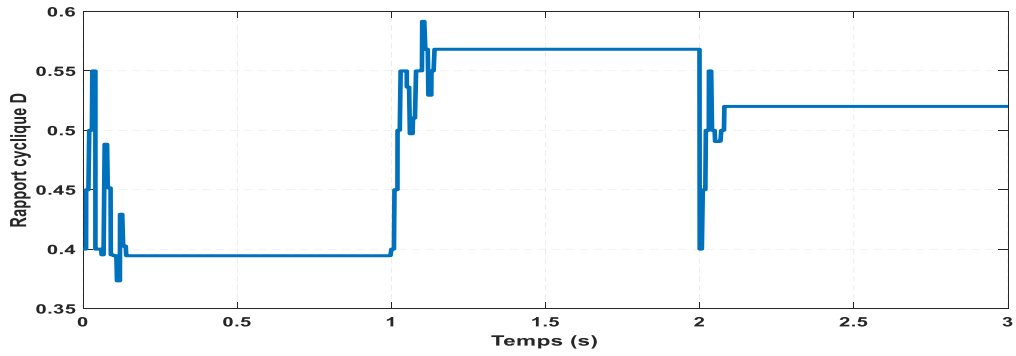


Figure III.7- Courbe de Rapport cyclique $D(t)$ par la méthode PSO

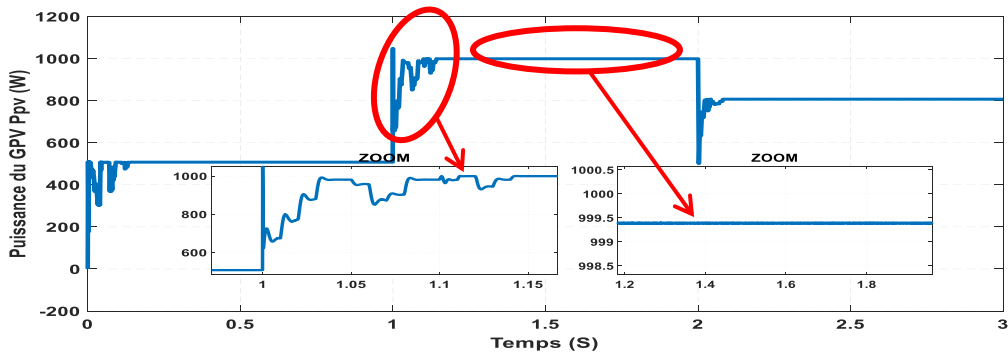


Figure III.8- Courbe de puissance $P(t)$ du GPV (PSO).

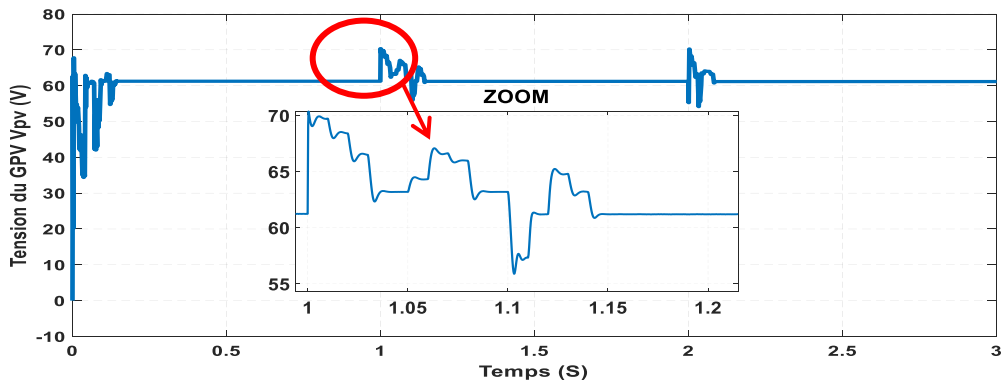


Figure III.9 : Courbe de tension $V_{pv}(t)$ du GPV (PSO).

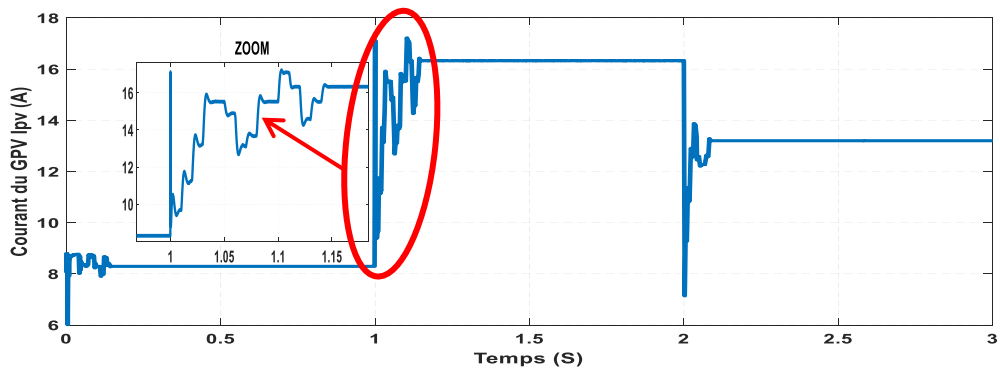


Figure III.10 : Courbe de courant $I(t)$ du GPV (PSO).

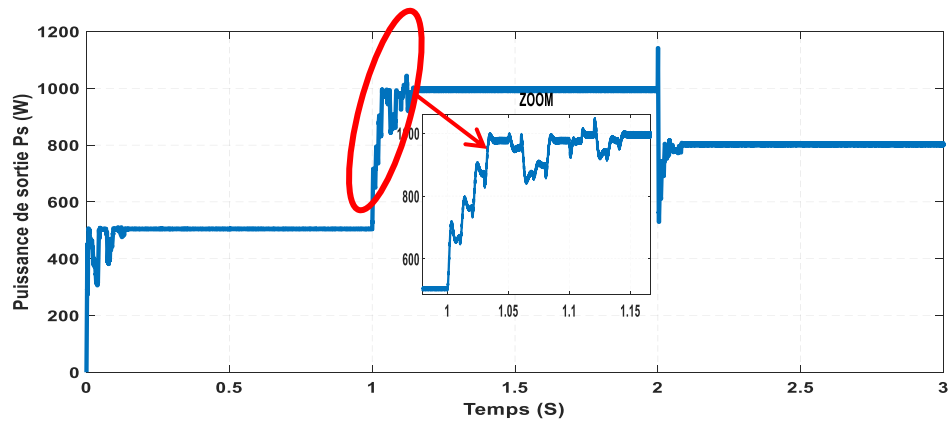


Figure III.11 : Courbe de puissance de la sortie $P_s(t)$ (PSO).

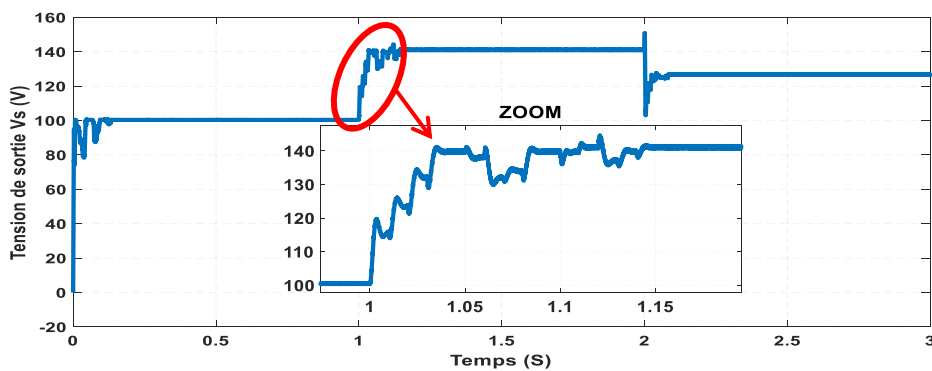


Figure III.12 : Courbe de Tension de la sortie $V_s(t)$ (PSO).

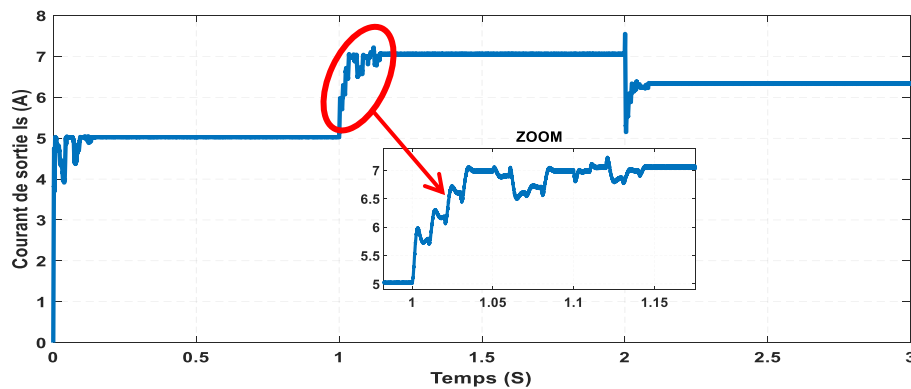


Figure III.13 : Courbe de Courant de la sortie $I_s(t)$ (PSO).

On remarque qu'il existe une relation de proportionnalité entre la puissance et l'éclairement. La figure III.8 'zoom' représente la puissance de sortie du GPV qui va augmenter rapidement jusqu'au niveau de régime permanent 999.45 W où elle se stabilise, ainsi elle ne présente aucune oscillation autour du point de la puissance maximale.

D'après les résultats de simulation obtenus, montrent que le contrôle à base de la PSO répond correctement aux caractéristiques du panneau. On constate que les courbes de la puissance, de la tension et du courant ne présentent pas d'oscillations dans le régime permanent ainsi qu'aucun défaut d'une impulsion temporaire en régime transitoire.

III.7 Etude comparative entre la méthode PSO et la méthode classique P&O

Pour montrer l'intérêt de la commande PSO par rapport à la commande classique P&O, on a fait une étude comparative et on a obtenu les résultats de simulation en fonctionnement avec conditions environnementales stables dans ce cas de simulation, les paramètres de la température $T=25C^{\circ}$ et l'ensoleillement $E=1000w/m^2$ sont moningénue constante.

Les figures suivantes montrent, à titre de comparaison, les résultats de simulation pour les méthodes PSO et les méthodes P&O.

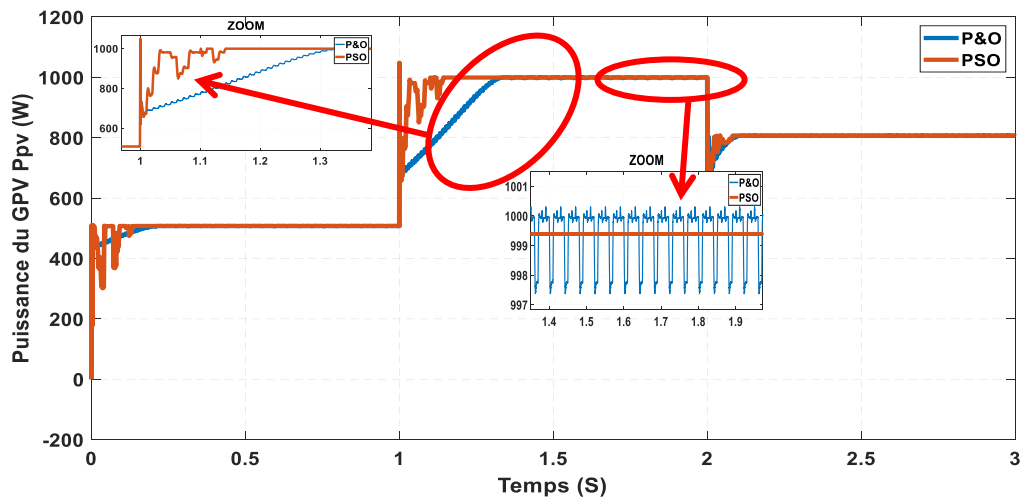


Figure III.14 : Courbe de puissance P(t) du GPV (PSO et P&O).

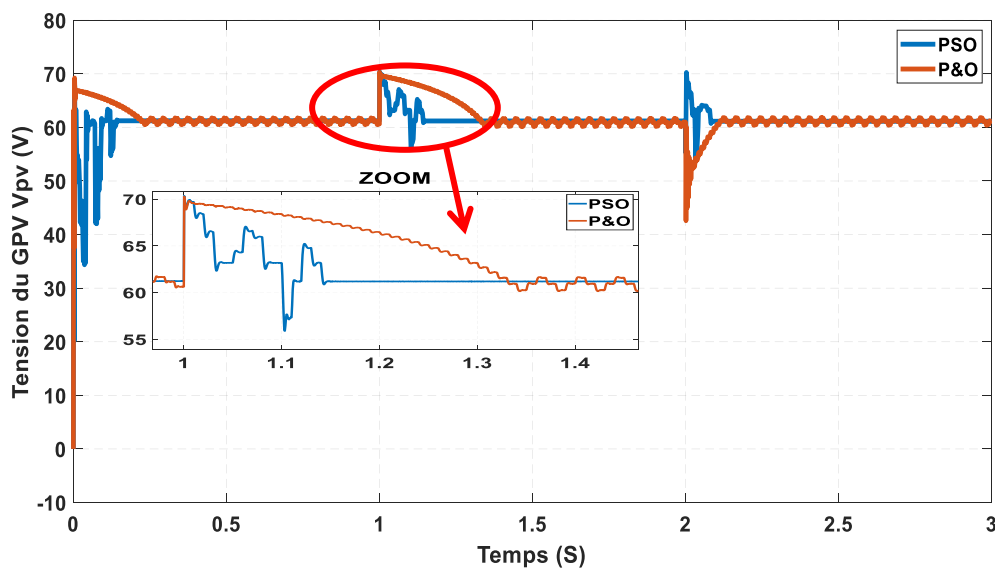


Figure III.15 : Courbe de Tension V(t) du GPV (PSO et P&O).

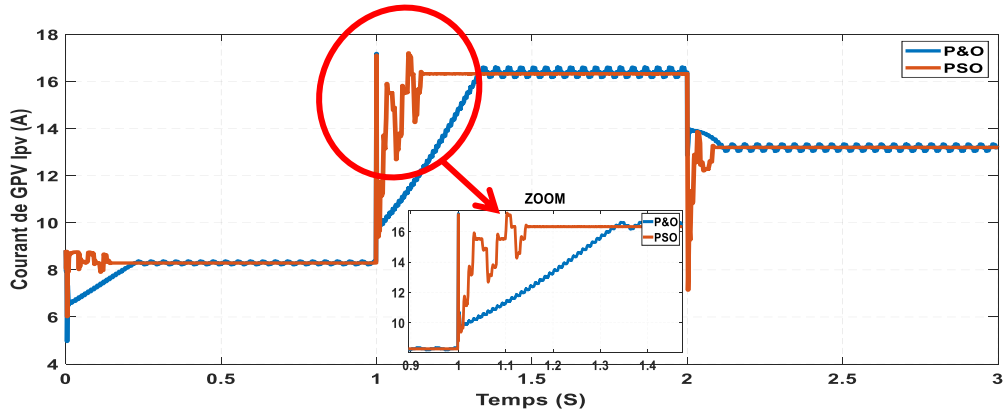


Figure III.16 : Courbe de Courant $I(t)$ du GPV (PSO et P&O).

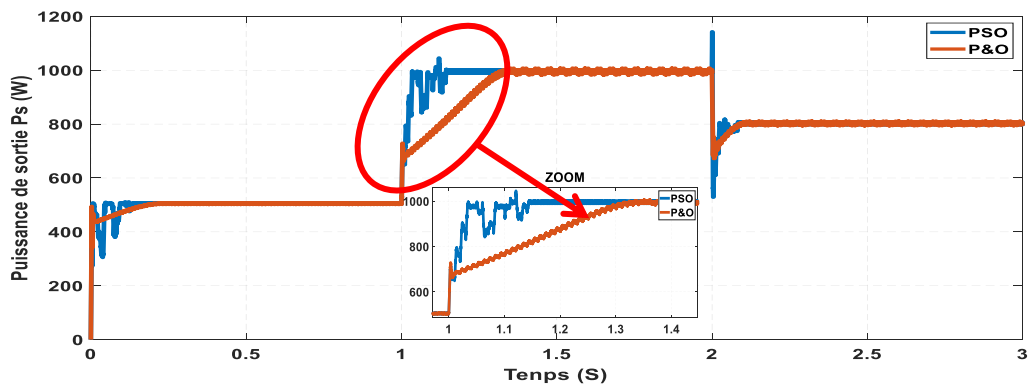


Figure III.17 : Courbe de Puissance de sortie (PSO et P&O).

D'après les résultats de simulation obtenus, on remarque que les méthodes PSO conduit à des meilleures performances, avec l'absence des oscillations dans le régime permanent, et un temps de réponse plus rapide.

III.8 Conclusion :

L'optimisation par essais de particules présente un fort potentiel d'application pratique, mais le choix de paramètres reste l'un des problèmes de l'optimisation par particules d'essaim, c'est difficile de trouver des bons paramètres adaptés à la structure du problème.

Les résultats obtenus avec la méthode PSO sont meilleurs que ceux obtenus avec des Algorithmes de contrôle conventionnels P&O. Ainsi le contrôle par méthodes PSO peut être vu comme un pas vers un rapprochement entre le contrôle mathématique précis et la prise de décision humaine.

Ce dernier a prouvé qu'il a de meilleures performances, temps de réponse rapide et erreur à l'état permanent très faible, et qu'il est robuste aux différentes variations des conditions atmosphériques.

Une étude comparative de commande proposée (classiques et modernes) a montré que le contrôleur basé sur la commande par méthodes PSO optimise mieux la puissance de fonctionnement du système.

Conclusion générale

Conclusion générale

Le travail présenté dans ce mémoire traite de la modélisation et de l'optimisation d'un générateur photovoltaïque fonctionnant avec un convertisseur BOOST et une charge R. Ce convertisseur présente l'avantage d'être un élévateur de tension ce qui permet à ce système de s'adapter aux changements météorologiques et pour extraire le maximum de puissance disponible.

L'étude sur les générateurs photovoltaïques nous a permis de bien comprendre le fonctionnement de la cellule photovoltaïque et l'application des modules photovoltaïques dans la production de l'électricité. (Une première fois la commande MPPT classique en l'occurrence P&O et puis la commande MPPT PSO). Dans ce cadre nous avons présenté les systèmes d'énergie renouvelable en portant un intérêt particulier au système photovoltaïque qui est constitué essentiellement par un générateur photovoltaïque (GPV) et un convertisseur DC-DC Boost. Le modèle électrique à une seule diode du GPV décrit par le modèle mathématique est étudié. De même pour le convertisseur Boost qui est dont le modèle électrique et les équations mathématiques explicités. Différentes simulations, sous l'environnement Matlab/Simulink, sont réalisées pour mettre en évidence l'influence des variations des conditions climatiques sur le MPP où la puissance de fonctionnement du système est maximale. La commande MPPT soit classique P&O ou PSO permet la meilleure connexion entre le générateur photovoltaïque (GPV) et la charge et elle force le de faire fonctionner toujours au point de puissance maximale, cependant, l'étude comparative des résultats de simulation a permis de constater que la commande MPPT PSO conduit à des meilleurs performances (réduction du temps de réponse et de l'erreur en régime permanent).

Par ce travail, nous souhaitons d'avoir apporté une contribution à l'étude des caractéristiques photovoltaïques de la cellule solaire, l'étude des systèmes photovoltaïques autonomes et les commandes MPPT P&O et PSO.

D'après les résultats obtenus et les observations enregistrées, des perspectives de recherche à compléter ce travail et des réalisations pratiques intéressantes envisageables à la commande des systèmes PV connecté au réseau :

- Stratégies d'amélioration des performances des PSO (w , x , c_1 , c_2).
- Connecté système photovoltaïque au réseau par l'onduleur.
- Système photovoltaïque dans des conditions d'ombrage partiel.
- Commande MPPT d'un système photovoltaïque par les réseaux de neurones Artificiels.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- [1] Mr. Yassine LASMI ‘Optimisation de la poursuite du point de puissance maximale (MPPT) d’un système photovoltaïque par les techniques intelligentes.’ Université Sétif -1 (ALGERIE) Faculté de Technologie .2013.
- [2] M. SLAMA Fateh ‘Modélisation d’un système multi générateurs photovoltaïques interconnectés au réseau électrique’ UNIVERSITE FERHAT ABBAS - SETIF- UFAS (ALGERIE) Faculté de Technologie Mémoire de Magister. 2012
- [3] RAKZA Badr Eddine et OUANAS Souhila <<MODÉLISATION ET COMMANDE DU SYSTÈME PHOTOVOLTAÏQUE PAR LES RÉSEAUX DE NEURONES>>, Mémoire présenté pour l’obtention Du diplôme de Master Académique, UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M’SILA, 2016/2017.
- [4] NDIAYE Papa Amadou et KAWTHER Achari, ‘‘ Modélisation et Contrôle d’un Système Photovoltaïque Connecté au Réseau ‘’, Mémoire de Master, Université 8 Mai 1945 – Guelma, 2019.
- [5] Kawther A., ‘‘ Production d’énergie électrique à partir de l’énergie photovoltaïque ‘’, Mémoire de License, Université de Guelma, 2017.
- [6] <https://www.prime-energy-technics.ch/actualites/histoire-du-photovoltaique>
- [7] Zidane M’hamed, Cheurfa Abdelbaqi, ‘‘ Optimisation de commandes MPPT ’’, Mémoire de master, Département de Génie électrique, université Abderrahmane-Mira de Bejaia, 2020
- [8] Zidane M’hamed, Cheurfa Abdelbaqi, ‘‘ Etude Et Simulation D’une Commande MPPT Pour Système PV ’’, Mémoire de master, Département de Génie électrique, université Abderrahmane-Mira de Bejaia, 2020.
- [9] MISSOUM MOHAMMED, ‘‘les énergies renouvelables dans l’habitat’’, Mémoire de Magistère, UNIVERSITE HASSIBA BENBOUALI DE CHLEF, 2011.
- [10] MISSOUM MOHAMMED, ‘‘ Analyse optimisée de système de pompage photovoltaïque’’, Mémoire de Magistère, UNIVERSITE HASSIBA BENBOUALI DE CHLEF, 2011.
- [11] Bouzeria Hamza, ‘‘ modelisation et commande d’une chaine de Conversion photovoltaïque ’’, these doctorat 3ème cycle LMD, 2016.

- [12] J. Royer, T. Djiako, E. Schiller, B. Sada SY, « Le pompage photovoltaïque : manuel de cours à l'intention des ingénieurs et des techniciens », IEPF, Université d'Ottawa, EIER, CREPA, 1998.
- [13] A, Mefti ; M, Y, bouroubi ; H, Mimouni. Evaluation du potentiel énergétique solaire, Bulletin des Energies Renouvelables, N°2, p 12, décembre. (2002). F. Baudoin, M. lavabre, Capteurs ; principe et utilisation.
- [14] M, Capderou. Atlas solaire de l'Algérie, O.P.U, Alger. (1985). Guehza Med lazhar impact de l'espace entre la vitre de protection et la vitre intermédiaire sur le rendement du capteur plan à double vitrage, mémoire magister université de Ouargla.
- [15] K, Merzouk. Potentiel énergétique éolien, Bulletin des Energies Renouvelables, N°1, p 11, Juin. (2002).
- [16] Labouret, M. Viloz, « Energie solaire photovoltaïque », Le manuel du professionnel, Edition DUNOD, Paris - France, Août 2003.
- [17] ARBOUZ Brahim, BENHAMADA Ali, "Energie solaire photovoltaïque", Mémoire de master, Université Djilali Bounaama de Khemis Miliana Dunod.
- [18] J.Royer, T.Djiako, E.Schiller, B.Sada SY, «Le pompage photovoltaïque: manuel de cours à l'intention des ingénieurs et des techniciens», IEPF, Université d'Ottawa, EIER, CREPA, 1998.
- [19] Abou El-Maaty Metwally Metwally Aly Abd El-Aal. Modelling and simulation of a photovoltaic fuel cell hybrid system, Thèse de doctorat de l'Université de Kassel, Germany, 2005.
- [20] I. Vechiu, Modélisation et analyse de l'intégration des énergies renouvelables dans un réseau autonome, Thèse de doctorat de l'université du Havre, 2005
- [21] Dr. KECHIDA RIDHA Maître de conférences classe B « Polycopié de cours UED 1.1 intitulé, Energies Renouvelables » Université Echahid Hamma Lakhdar El Oued 2019
- [22] KHENTACHE Yamina, KHANOUCHE Sarah « Simulation, Fabrication et analyse de cellules photovoltaïques à contacts arrières interagites », Mémoire de master, Département de Génie électrique, université
- [23] NDIAYE Papa Amadou KAWTHER Achari, " MODELISATION D'UN SYSTEME DE PRODUCTION ELECTRIQUE PAR LA CELLULE PHOTOVOLTAIQUE ", Mémoire de Master,
- [24] LITIM Ahlam et ABID Zouleykha (Application de la Logique Floue pour la Poursuite du Point de Puissance Maximale d'un Générateur Photovoltaïque) Mémoire de Fin d'Etudes, 2017.

- [25] ARBOUZ Brahimand BENHAMADA Ali, ‘‘Energie solaire photovoltaïque’’, Mémoire du diplôme Master Université Djilali Bounaama de Khemis Miliana
- [26] LITIM Ahlam et ABID Zouleykha (Application de la Logique Floue pour la Poursuite du Point de Puissance Maximale d'un Générateur Photovoltaïque) Mémoire de Fin d'Etudes, 2017.
- [27] M.S.Fateh. Modélisation d'un système multi générateurs photovoltaïques interconnectés au réseau électrique. Mémoire de Magister, Université FERHAT ABBAS DE SETIF, 2011. , 2008
- [28] Labouret, A. and M. Viloz, Energie solaire photovoltaïque. 4^e édition. 2006 : Dunod.
- [29] . Belarbi, M., ‘‘Modélisation et Simulation d'un Système de pompage Photovoltaïque’’. 2006, Mémoire de magister en électronique Université des sciences et de La technologie d'oran.
- [30] Vighetti, S., Systèmes photovoltaïques raccordés au réseau : Choix et Dimensionnement des étages de conversion. 2010, Institut National Polytechnique de Grenoble-INPG.
- [31] B. Mamri, M.Z., ‘‘contribution de système photovoltaïque avec pompage’’. 2006, Mémoire d'ingénieur en électronique, Université de Constantine.
- [32] Angel Cid Pastor. Conception et réalisation de modules photovoltaïques électroniques. Micro et nanotechnologies/Microélectronique. INSA de Toulouse, 2006. Français.
- [33] J. Bione, O.C. Vilela and N. Fraidenraich, «Comparison of the Performance of PV Water Pumping Systems Driven by Fixed, Tracking and V-Trough Generators», Solar Energy, Vol. 76, N°3, pp. 703 – 711, 2004
- [34] H.Wenzl & all, « Life prediction of batteries for selecting the technically most suitable and cost effective battery », Journal of power sources, Vol 144, pp.373-384, 2005
- [35] Document, «Contrôle des Systèmes DEGERtraker», DEGER energie GmbH, 72160 Horb/Germany. <http://www.degerenergie.de>.
- [36] Borni Abdelhakim "Etude et régulation d'un circuit d'extraction de la puissance maximale d'un panneau solaire", Mémoire magistère Constantine, 2009..
- [37] J. Royer, T. Djiako, E. Schiller, B. SadaSy, "Le pompage photovoltaïque », Manuel décours à l'intention des ingénieurs et des techniciens, IEPF/Université d'Ottawa/EIER/CREPA. Canada, 1998B. Wafa S. SAMAH, « étude comparative des systèmes de pompage photovoltaïque Mémoire ingénieurs. Biskra, 2006.

- [38] Borni Abdelhalim "Etude et régulation d'un circuit d'extraction de la puissance maximale d'un panneau solaire", Mémoire magistère Constantine, 2009 Tekkouk Adda benattia. Livre 'Synthèse et simulation de la poursuite du point de puissance maximale'
- [39] . Royer, T. Djiako, E. Schiller, B. Sada Sy, "Le pompage photovoltaïque" , Manuel de cours à l'intention des ingénieurs et des techniciens, IEPF/Université d'Ottawa/EIER/CREPA. Canada, 1998..
- [40] B. Wafa S. Samah, « étude comparative des systèmes de pompage photovoltaïque" Mémoire ingénieurs. Biskra, 2006
- [41] T.T. Guingane, Z. Koalaga, E. Simonguy, F. Zougmore, 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
- [42] Tekkouk Adda benattia. Livre 'Synthèse et simulation de la poursuite du point de puissance maximale'
- [43] H. Yatimi, E. Aroudamet M. Louzazni ' Modélisation et Simulation du Module photovoltaïque sous MATLAB/SIMULINK' published by EDP Sciences, 2014
- [44] Aicha DJALAB ' Diagnosis of faults in a renewable Energy system based on artificial intelligence technique : Application on a photovoltaic system' Mémoire du diplôme de Doctorat Université Ziane Achour Université of Djelfa.
- [45] Boudjellal Bilal ' Caractérisation des défauts des convertisseurs statiques intégrés dans un système électrique à énergie renouvelable' Mémoire du diplôme de Doctorat UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA 2017
- [46] A. Lyes, « Etude de la connexion au réseau électrique d'une centrale photovoltaïque," UNIVERSITE MOULOUD MAMMARI DE TIZI OUZOU Mémoire de Magister, 2011
- [47] M. SLAMA Fateh ' Modélisation d'un système multi générateurs photovoltaïques interconnectés au réseau électrique' UNIVERSITE FERHAT ABBAS - SETIF- UFAS (ALGERIE) Faculté de Technologie Mémoire de Magister. 2012
- [48] GOAR Noureddine et MAHMOUDI Abdelkader ' Réalisation d'un convertisseur DC/DC dans une chaîne de conversion d'énergie photovoltaïque' Mémoire de Fin d'étude En vue de l'obtention du diplôme de Master, Université Larbi Ben M'Hidi - Oum El Bouaghi, 2016-2017

- [49] Zaiem Kamar MÉMOIRE Master “ Commande d’un système photovoltaïque par contrôleur Neuro-Flou Réduit “ UNIVERSITÉ BADJI MOKHTAR- ANNABA Année 2019
- [50] RAKZA Badr Eddine et OUANAS Souilla <<MODÉLISATION ET COMMANDE DU SYSTÈME PHOTOVOLTAÏQUE PAR LES RÉSEAUX DE NEURONES>>, Mémoire présenté pour l’obtention Du diplôme de Master Académique, UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M’SILA, 2016/2017.
- [51] HAKOUMI Ahmed et BENAMAR Abdeljalil “ Commande MPPT et contrôle d’un système photovoltaïque 3KW par la logique floue’ ’ THESE DE Master Université Ahmed Daria Adrar
- [52] NDIAYE Papa Amadou et KAWTHER Achari “ Production d’énergie électrique à partir d’un système photovoltaïque” Mémoire du diplôme de Master Université 8 Mai 1945 – Guelma 2018/2019.
- [53] BOUZEGANE Mhenna et GAOUAOUI Ferhat “ Alimentation d’un moteur à courant continu par une source photovoltaïque” Mémoire du diplôme de Master Université Mouloud Mammeri De Tizi-Ouzou 2018 .
- [54] CABAL Cédric “Optimisation énergétique de l’étage d’adaptation électronique dédié a la conversion photovoltaïque” Mémoire du diplôme du doctorat de L’Université de Toulouse
- [55] BENBOUHANI SALAH et HAMAOUI AMEL” Contrôle et adaptation d’un système PV par la commande MPPT” Mémoire du diplôme de Master UNIVERSITE D’ADRAR – 2015
- [56] Cylia TIGRINE et Ouerdia Ait Ouali “ Etude et simulation des techniques MPPT d’un système photovoltaïque” Mémoire de Fin d’étude En vue de l’obtention du diplôme de Master, Université A. MIRA-BEJAIA ,2018-2019
- [57] Zahar soria et Makhlouf cheyma “ Etude et Simulation d’un Générateur Photovoltaïque Muni d’un Convertisseur MPPT pour une Meilleur Gestion Energétique” Mémoire du diplôme de Master UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M’SILA 2016 /2017
- [58] BENZAIT Bachir et TOUAHRIA Djamal Eddine “ Etude comparative des algorithmes P&O et INC pour l’optimisation de l’énergie photovoltaïque” Mémoire du diplôme de Master Université de Ghardaïa 2019/2020
- [59] Rachid Alik, El Mehdi Mellouli and El Houssaine Tissir “ Optimization of Higher-Order Sliding Mode Control Parameter using Particle Swarm Optimization for Lateral Dynamics of Autonomous Vehicles” Easy Chair Preprint № 2844, 03-03- 2020

- [60] Dr. BELAID LALOUNI Sofia Cours Energie Solaire Photovoltaïque Université A. MIRA de BEJAIA
- [61] ZAGHBA Layachi ‘‘ Etude et Commande Adaptative par les Techniques Intelligentes Des Systèmes Non linéaires Application aux Systèmes Photovoltaïques’’ Mémoire du diplôme du doctorat Université Mohamed Khider – Biskra -2017
- [62] BERKANI Abdelhakim ‘‘ Métaheuristique Hybride Réseaux de Neurones Artificiels-PSO du Recuit Simulé pour la Commande d’un Procédé Industriel Non-linéaire’’ Mémoire de Fin d’étude En vue de l’obtention du diplôme de Master Université de Batna, 2012/2013.
- [63] Abbas El Dor ‘‘ Perfectionnement des algorithmes d’optimisation par essaim particulaire : applications en segmentation d’images et en électronique’’ HAL Id : tel-00788961 - 15 Feb 2013
- [64] CHALANE Idir.et OUARI Tarek.’’ Optimisation des paramètres d'un PID par essais particuliers (PSO). Présenté en vue de l’obtention du diplôme de Master en Automatique, Université A. MIRA de Bejaia, 2017
- [65] Abbas El Dor ‘‘ Perfectionnement des algorithmes d’optimisation par essaim particulaire : applications en segmentation d’images et en électronique’’ HAL Id : tel-00788961 - 15 Feb 2013.
- [66] Youcef BEKAKRA, Contribution à l’Etude et à la Commande Robuste d’un Aérogénérateur Asynchrone à Double Alimentation, 2014, Thèse de Doctorat en sciences, Université Mohamed Khider – Biskra
- [67] Ali M. Eltamaly et M. S. Al-Saud et A. G. Abo-Khalil ‘‘ Performance Improvement of PV Systems’ Maximum Power Point Tracker Based on a Scanning PSO Particle Strategy’’ 2020
- [68] Youcef Bekakra, « Contribution à l’Etude et à la Commande Robuste d’un Aérogénérateur Asynchrone à Double Alimentation », thèse de Doctorat en sciences, université de Biskra,2014.
- [69] J. Kennedy, R. Eberhart, « Particle swarm Optimization », Proc. Of IEEE International Conf. On Neural Networks, pp. 1942-1948, 1995.
- [70] c. blum, d. Merkle, « Swarm intelligence, introduction and applications », Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2008.
- [71] A. Rioland, A. Eudes, « Optimisation par essaim particulaire pour un problème d’ordonnancement et d’affectation de ressources », Rapport de Projet 3ème année Modélisation et Calcul Scientifique, Institut Supérieur d’Informatique de Modélisation et de Leurs Applications Complexe des Cezeaux, Aubiere Cedex, 2007.

- [72] Y. Cooren, « Perfectionnement d'un algorithme adaptatif d'optimisation par essaim particulaire - applications en génie médical et en électronique », Thèse de Doctorat de l'Université Paris 12, Val de Marne, 2008.
- [73] J. Adeline Sneha, V. Bens Joie Victor, J. Aran Glenn, « indirect field oriented speed control of an induction motor drive by using pso algorithm », International Journal For Technological Research In Engineering, Volume 1, Issue 11, July-2014 ISSN (Online) : 2347 – 4718.
- [74] R. Eberhart, Y. Shi, « Comparing inertial weights and constriction factor in particle swarm optimization », Proceeding of the International Congress on Evaluating Computation, San Diego, California, IEEE Service Center, Piscataway, NJ, pp. 84- 88, 2000.
- [75] Pablo García-Triviño, Francisco Llorens-Iborra, Carlos A. García-Vázquez, Antonio J. Gil-Mena, Luis M. Fernández-Ramírez, Francisco Jurado, « Long-term optimization based on PSO of a grid-connected renewable energy/battery/ hydrogen hybrid system », *intern'a*

**MEMOIRE DE FIN D'ETUDES EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME
DE MASTER EN GENIE ELECTRIQUE
SPECIALITE : ELECTROTECHNIQUE**

Proposé et dirigé par :

Dr. BOUDJELLAL Bilal

Présenté par :

OUKAF Ameer

BELLAL Abdelkrim

Thème :

**Amélioration de la commande MPPT d'un système
photovoltaïque par les techniques intelligentes**

Résumé :

Avec l'accroissement de l'utilisation de l'énergie solaire comme étant source alternative de production de l'énergie électrique, plusieurs méthodes ont été développées pour la poursuite du point de puissance maximale des panneaux solaires. Ces techniques se différencient selon la simplicité, la rapidité et les outils utilisés.

Il existe des méthodes MPPT conventionnelles souvent utilisées, à savoir la méthode de perturbation et d'observation (P&O) et la méthode de conductance incrémentale (PSO) méthodes dites avancées, Ce mémoire présente une étude comparative entre ces différentes techniques MPPT afin d'analyser et simuler le système global PV sous des conditions de fonctionnement variables. Pour ce faire les modèles mathématiques des composants du système PV (GPV, convertisseur DC-DC, charge) ont été développés. Les résultats de simulation, obtenus à l'aide d'un outil de simulation, ont prouvé en général que les performances du contrôleur MPPT PSO et flou sont bien meilleures que celles du contrôleur MPPT conventionnel.

Mots clés MPPT - GPV- Convertisseur DC-DC - Boost - PSO -Commandes intelligentes -P&O - Système PV - Modélisation - Simulation.

N° d'ordre : 10