

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITÉ IBN-KHALDOUN DE TIARET
FACULTÉ DES SCIENCES APPLIQUÉES
DÉPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE



MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

Pour l'obtention du diplôme de Master

Domaine : Sciences et Technologie

Filière : Électrotechnique

Spécialité : Commandes électriques

THÈME

Application du contrôle intelligent d'un hacheur Boost dans un système de conversion d'énergie solaire

Préparés par : MERAOUAH Mustapha et MIRA Ali

Devant le Jury :

| Nom et prénoms | Grade | Qualité |
|--|---------------------------------|-------------------|
| SEBAA Morsli | MCA | Président |
| LARBI Mhamed AIT MIMOUNE Hamiche | Pr MAA | Examineurs |
| MIHOUB Youcef HSAINNE Said HOUSSEYN Chaib | MCB Pr Doctorant | Encadrants |

PROMOTION 2019 /2020

REMERCIEMENTS

Louange à Allah le tout puissant et miséricordieux, qui nous a donné la force et la patience pour accomplir ce modeste travail.

Nous tenons à remercier nos encadreurs Monsieur MIHOUB Youcef, HASAINNE Said et CHAIB Housseyn pour leur précieux conseils et leur aide durant toute la période du travail.

Nos vifs remerciements s'adressent également aux membres du jury : Monsieur SEBAA Morsli pour avoir accepté de présider la soutenance de notre travail ainsi que Messieurs Larbi Mhamed et Ait Mimoune Hamiche pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre recherche en acceptant d'examiner notre travail et de l'enrichir par leurs propositions.

Enfin, nous remercions tous les enseignants du département de Génie Electrique d'avoir contribué à notre formation.

*Nous remercions tous les membres du Laboratoire GEGI
Nous remercions toute personne ayant contribué de près ou de loins pour l'élaboration de ce travail.*

| | |
|---|----|
| Introduction générale..... | 1 |
| Chapitre I : Généralités sur les systèmes Photovoltaïques. | |
| I.1 Introduction | 5 |
| I.2 Energie solaire..... | 5 |
| I.2.1 Soleil..... | 5 |
| I.2.2 Rayonnement solaire..... | 5 |
| I.2.3 Types d'énergie solaire | 6 |
| I.2.3.1 L'énergie photovoltaïque..... | 6 |
| I.2.3.2 L'énergie solaire thermique | 7 |
| I.2.3.3 L'énergie solaire thermodynamique..... | 8 |
| I.2.4 Le potentiel solaire..... | 8 |
| I.3 L'effet photovoltaïque | 9 |
| I.4 La cellule photovoltaïque | 9 |
| I.4.1 Dispositifs à semi-conducteurs..... | 10 |
| I.4.2 Dopage des semi-conducteurs..... | 10 |
| I.4.2.1 Dopage de type N..... | 10 |
| I.4.2.2 Dopage de type P..... | 10 |
| I.4.3 La jonction P-N..... | 11 |
| I.4.4 Principe de fonctionnement..... | 12 |
| I.4.5 Les différents types des cellules..... | 12 |
| I.4.5.1 Cellule en silicium monocristallin..... | 13 |
| I.4.5.2 Cellule en silicium polycristallin..... | 13 |
| I.4.5.3 Cellule en silicium amorphe..... | 13 |
| I.5 Caractéristiques électriques d'une cellule photovoltaïque | 13 |
| I.6 Paramètres de la cellule PV..... | 15 |
| I.6.1 Courant de court-circuit (I_{cc})..... | 15 |
| I.6.2 Tension en circuit ouvert V_{co} | 16 |
| I.6.3 Facteur de forme (FF)..... | 16 |
| I.6.4 Le rendement énergétique..... | 16 |
| I.7 Générateur photovoltaïque et ses performances | 16 |
| I.7.1 Caractéristique courant-Tension..... | 17 |
| I.7.1.1 Les zones de caractéristique I-V d'un générateur photovoltaïque..... | 17 |
| I.7.2 Influence de l'éclairement et la température sur les courbes $I=f(V)$ et $P=f(V)$ | 18 |
| I.7.3 Influence de la résistance série R_s | 20 |
| I.7.4 Influence de la résistance shunt R_{sh} | 20 |
| I.7.5 Influence de l'association série des cellules PV | 21 |
| I.7.6 Influence de l'association parallèle des cellules PV..... | 21 |
| I.7.7 Influence de l'association mixte (série +parallèle) des cellules PV..... | 22 |
| I.8 Chaînes de conversion photovoltaïque | 22 |
| I.8.1 Systèmes PV isolé (autonome)..... | 22 |
| I.8.2 Systèmes PV connectés au réseau | 23 |
| I.8.3 Système PV hybride | 23 |
| I.9 Avantages et inconvénients d'une installation PV | 24 |
| I.9.1 Avantages..... | 24 |

| | | |
|-------|--------------------|----|
| I.9.2 | Inconvénients..... | 24 |
| I.10 | Conclusion | 24 |

Chapitre II : Modélisation du système photovoltaïque

| | | |
|----------|---|----|
| II.1 | Introduction | 27 |
| II.2 | Modélisation du GPV..... | 27 |
| II.3 | Caractéristique de GPV..... | 28 |
| II.3.1 | Influence de l'éclairement sur les courbes $I_{pv}=f(V_{pv})$ et $P=g(V_{pv})$ | 31 |
| II.3.2 | Influence de la température sur les courbes $I_{pv}=f(V_{pv})$ et $P=g(V_{pv})$ | 32 |
| II.4 | Convertisseur DC/DC (Hacheur)..... | 33 |
| II.5 | Hacheur Boost | 33 |
| II.5.1 | Fonctionnement..... | 33 |
| II.5.2 | Détermination des paramètres du hacheur Boost..... | 36 |
| II.5.2.1 | Calcul de l'inductance L..... | 37 |
| II.5.2.2 | Calcul du condensateur C..... | 38 |
| II.6 | Modèle Simulink du Hacheur Boost..... | 39 |
| II.7 | Conclusion | 40 |

Chapitre III : Contrôle intelligent appliqué à la MPPT

| | | |
|-----------|---|----|
| III.1 | Introduction | 43 |
| III.2 | Technique MPPT..... | 43 |
| III.2.1 | Principe de la Recherche du MPP | 44 |
| III.3 | Méthodes MPPT Classiques..... | 45 |
| III.3.1 | Méthode perturber et observer (P&O)..... | 45 |
| III.3.1.1 | Organigramme Perturber et Observer (P&O)..... | 46 |
| III.3.1.2 | Avantages et inconvénients de P&O..... | 46 |
| III.3.2 | Méthode de Hill Climbing..... | 47 |
| III.3.2.1 | Organigramme Hill Climbing | 47 |
| III.3.2.2 | Avantages et inconvénients de Hill Climbing | 48 |
| III.3.3 | Méthode conductance incrémental | 48 |
| III.3.3.1 | Organigramme d'incrémental de la conductance | 48 |
| III.3.3.2 | Avantages et inconvénients | 50 |
| III.4 | Techniques MPPT intelligentes | 50 |
| III.4.1 | MPPT à base de logique floue..... | 50 |
| III.4.2 | Avantages et inconvénients de la logique floue..... | 51 |
| III.4.3 | MPPT floue proposée..... | 52 |
| III.4.4 | MPPT à base de techniques neuro-floues..... | 53 |
| III.4.4.1 | Réseaux de neurones..... | 53 |
| III.4.4.2 | Architectures des réseaux de neurones..... | 55 |
| III.4.4.3 | Types d'apprentissages..... | 55 |
| III.4.4.4 | Avantages et inconvénient des réseaux neurone | 56 |
| III.4.4.5 | Types de combinaison neuro-flous..... | 56 |
| III.4.5 | MPPT neuro-floue proposée | 57 |
| III.5 | Conclusion | 57 |

Chapitre IV : Résultats de simulation.

| | | |
|--------|--|----|
| IV.1 | Introduction | 61 |
| IV.2 | Simulation du système PV avec la MPPT P&O | 62 |
| IV.3 | Simulation de système PV avec la MPPT floue proposée | 64 |
| IV.4 | Simulation de système PV avec MPPT Neuro-floue | 66 |
| IV.4.1 | Choix de la structure du réseau neuronal | 66 |
| IV.5 | Comparaison des résultats des commandes MPPT | 70 |
| IV.6 | Conclusion | 73 |
| | Conclusion générale | 75 |
| | Annexes | 77 |
| | Références Bibliographiques..... | 81 |

Chapitre I : Généralités sur les systèmes Photovoltaïques

| | |
|---|----|
| Figure I. 1 : Analyse spectrale du rayonnement solaire..... | 6 |
| Figure I. 2 : Schéma de fonctionnement de l'énergie photovoltaïque | 7 |
| Figure I. 3 : Schéma de fonctionnement de l'énergie solaire thermique..... | 7 |
| Figure I. 4 : Energie solaire thermodynamique | 8 |
| Figure I. 5 : Carte du monde de l'ensoleillement moyen annuel | 9 |
| Figure I. 6 : Dopage de type N..... | 10 |
| Figure I. 7 : Dopage de type P..... | 11 |
| Figure I. 8 : Jonction P-N..... | 11 |
| Figure I. 9 : Principe de fonctionnement d'une cellule solaire..... | 12 |
| Figure I. 10 : Différents types de cellule PV | 13 |
| Figure I. 11 : Schéma équivalent électrique d'une cellule photovoltaïque..... | 14 |
| Figure I. 12 : Caractéristique $I=f(V)$ d'un module photovoltaïque..... | 17 |
| Figure I. 13 : Différentes zones de Caractéristique I-V d'un générateur photovoltaïque..... | 18 |
| Figure I. 14 : Influence de l'éclairement sur la caractéristique $I=f(V)$ | 18 |
| Figure I. 15 : Influence de l'éclairement sur la caractéristique $P=f(V)$ | 19 |
| Figure I. 16 : Influence de la température sur la caractéristique $I=f(V)$ | 19 |
| Figure I. 17 : Influence de la température sur la caractéristique $P=f(V)$ | 20 |
| Figure I. 18 : Influence de la résistance série..... | 20 |
| Figure I. 19 : Influence de la résistance shunt..... | 21 |
| Figure I. 20 : Association en série des cellules PV..... | 21 |
| Figure I. 21 : Association en parallèle des cellules PV..... | 22 |
| Figure I. 22 : Association mixte des cellules PV..... | 22 |
| Figure I. 23 : Structure d'un système PV autonome..... | 23 |
| Figure I. 24 : Structure d'un système PV connecté au réseau..... | 23 |

Chapitre II : Modélisation du système photovoltaïque

| | |
|--|----|
| Figure II. 1 : Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque..... | 27 |
| Figure II. 2 : Synoptique du modèle amélioré de la cellule photovoltaïque sous Simulink-MATLAB..... | 29 |
| Figure II. 3 : Caractéristique courant-tension du GPV avec les conditions standards..... | 30 |
| Figure II. 4 : Caractéristique puissance-tension du GPV avec les conditions standards..... | 30 |
| Figure II. 5 : Influence de variation de l'éclairement sur les caractéristiques I-V du GPV pour $T= 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ | 31 |
| Figure II. 6 : Influence de la variation de l'éclairement sur les caractéristiques P-V du GPV pour $T= 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ | 31 |
| Figure II. 7 : Influence de la variation de température sur la caractéristique I-V de GPV pour $E=1000\text{ W/m}^2$ | 32 |
| Figure II. 8 : Influence de la variation de température sur la caractéristique P-V de GPV pour $E=1000\text{ W/m}^2$ | 32 |
| Figure II. 9 : Hacheur Boost..... | 33 |
| Figure II. 10 : Circuit équivalent du Boos quand l'interrupteur est fermé..... | 33 |
| Figure II. 11 : Circuit équivalent du Boost quand l'interrupteur est ouvert..... | 35 |
| Figure II. 12 : Formes d'ondes des courants et tensions du convertisseur Boost | 36 |
| Figure II. 13 : Ondulation du courant..... | 37 |
| Figure II. 14 : Ondulation de tension..... | 38 |
| Figure II. 15 : Schéma block Simulink du Hacheur Boost..... | 39 |
| Figure II. 16 : Courant de l'inductance..... | 39 |
| Figure II. 17 : Courant de sortie du hacheur Boost..... | 40 |
| Figure II. 18 : Tension d'entrée et de sortie du Boost..... | 40 |

Chapitre III :Contrôle intelligent appliqué à la MPPT

| | |
|--|----|
| Figure III. 1 : Schéma de principe du convertisseur MPPT..... | 43 |
| Figure III. 2 : Fluctuation du PPM avec l'intensité d'éclairement (a) et la charge R (b)..... | 44 |
| Figure III. 3 : Principe de la méthode P&O..... | 45 |
| Figure III. 4 : Algorithme de P&O classique..... | 46 |
| Figure III. 5 : Relation entre la puissance du GPV et le rapport cyclique du convertisseur statique..... | 47 |

Liste des figures et des tableaux

| | |
|--|----|
| Figure III. 6 : Algorithme type de la commande Hill Climbing..... | 48 |
| Figure III. 7 : Organigramme de l'algorithme MPPT de l'incrémentale de la conductance..... | 50 |
| Figure III. 8 : Structure générale d'un système flou..... | 51 |
| Figure III. 9 : Les fonctions d'appartenances des entrées..... | 53 |
| Figure III. 10 : Les fonctions d'appartenances de sortie..... | 53 |
| Figure III. 11 : Neurone biologique et neurone formel..... | 54 |
| Figure III. 12: Exemples de fonctions d'appartenance..... | 54 |
| Figure III. 13 : Réseau non bouclé..... | 55 |
| Figure III. 14 : Réseau bouclé..... | 55 |
| Figure III. 15 : Système neuro-floue Coopératif..... | 57 |
| Figure III. 16 : Système neuro-floue concurrent..... | 57 |

Chapitre IV : Résultats de simulation.

| | |
|---|----|
| Figure IV. 1 : Schéma bloc Simulink du système global..... | 61 |
| Figure IV. 2 : Schéma bloc Simulink de la technique P&O..... | 62 |
| Figure IV. 3 : Puissance de sortie du GPV avec la MPPT P&O..... | 63 |
| Figure IV. 4 : Tension de sortie du GPV avec la MPPT P&O..... | 63 |
| Figure IV. 5 : Puissance de sortie du hacheur Boost avec la MPPT P&O..... | 63 |
| Figure IV. 6 : Tension de sortie du hacheur Boost avec la MPPT P&O..... | 63 |
| Figure IV. 7 : Comparaison entre la puissance de sortie du GPV et de sortie du hacheur Boost avec P&O..... | 63 |
| Figure IV. 8 : Schéma bloc Simulink la MPPT floue proposée..... | 64 |
| Figure IV. 9 : Puissance de sortie du GPV avec la MPPT..... | 65 |
| Figure IV. 10 : Tension de sortie de GPV avec la MPPT..... | 65 |
| Figure IV. 11 : Puissance de sortie du hacheur..... | 65 |
| Figure IV. 12 : Tension de sortie du Hacheur..... | 65 |
| Figure IV. 13 : Comparaison entre la puissance de sortie du GPV et du Hacheur Boost avec la MPPT floue..... | 65 |
| Figure IV. 14 : Schéma structurel de réseaux de neurones artificiels utilisé..... | 66 |
| Figure IV. 15 : Bloc d'apprentissage utilisé..... | 67 |
| Figure IV. 16 : Performances d'apprentissage du réseau de neurones artificiel utilisé..... | 67 |
| Figure IV. 17 : Schéma de principe de l'apprentissage neuro-floue proposée..... | 68 |
| Figure IV. 18: Schéma de principe de la MPPT neuro-floue proposée..... | 68 |
| Figure IV. 19 : Puissance à la sortie de GPV avec la MPPT..... | 69 |
| Figure IV. 20: Tension à la sortie de GPV avec la MPPT..... | 69 |
| Figure IV. 21 : Puissance de sortie du hacheur Boost avec la MPPT Neuro-floue..... | 69 |
| Figure IV. 22 : Tension de sortie du hacheur Boost avec la MPPT Neuro-floue..... | 69 |
| Figure IV. 23 : Comparaison entre la puissance de sortie du GPV et du hacheur Boost avec la MPPT Neuro-floue..... | 69 |
| Figure IV. 24 : comparaison de puissance obtenue par les 3 techniques dans le cas de changement d'irradiation..... | 70 |
| Figure IV. 25: Variation de puissance de sortie par rapport la tension du GPV avec les trois techniques MPPT dans le cas du changement d'irradiation et température T=25°C..... | 71 |
| Figure IV.26 : Rapport cyclique des trois techniques dans le cas du changement d'irradiation et température T=25°C..... | 72 |

Liste des tableaux

| | |
|--|----|
| Tableau I. 1: Potentiel solaire en Algérie..... | 8 |
| Tableau III. 1: Les règles utilisées pour déterminer la sortie ΔD | 52 |
| Tableau III. 2: Les règles utilisées dans MPPT Neuro-floue déterminer la sortie ΔD | 57 |

Liste des symboles

| Symbole | Signification | Unité |
|----------------|--|---------------------|
| E_{ref} | L'ensoleillement de référence en condition nominal (1000). | [W/m ²] |
| I_D | Courant de diode. | [A] |
| I_L | Le courant aux bornes d'inductance du « Boost ». | [A] |
| I_{cc} | Le courant de court-circuit. | [A] |
| I_{mpp} | Le courant de point maximal. | [A] |
| I_{ph} | Courant photonique. | [A] |
| I_{pv} | Le courant délivrée par le module PV. | [A] |
| I_s | Le courant de sortie du « boost ». | [A] |
| I_{sat} | Courant de saturation. | [A] |
| K_i | Coefficient de la température en court-circuit. | [A/°C] |
| K_v | Coefficient de la température en circuit ouvert. | [V/°C] |
| P_{max} | La puissance maximal | [W] |
| R_s | La résistance série de la cellule PV. | [Ω] |
| R_{sh} | La résistance shunt/parallèle de la cellule PV. | [Ω] |
| T_{ref} | La température de référence en condition nominal. | [K] |
| V_{co} | La tension en circuit ouvert. | [V] |
| V_e | La tension d'entrée du « Boost ». | [V] |
| V_{mpp} | La tension de point maximal. | [V] |
| V_{pv} | La tension délivrée par le module PV. | [V] |
| V_s | La tension de sortie du « Boost ». | [V] |
| V_t | La tension thermique. | [V] |
| f | Fréquence de coupure de convertisseur. | [Hz] |
| i_e | Le courant d'entrée du « boost Boost ». | [A] |

Liste des symboles

| Symbole | Signification | Unité |
|----------------|---|---------------------|
| ΔI | L'ondulation de courant. | [A] |
| ΔT | Déférence entre la température de cellule et température nominal. | [K] |
| ΔV | L'ondulation de la tension de sortie. | [V] |
| E | L'ensoleillement du module PV. | [W/m ²] |
| K | La constante Boltzmann ($1.381 \cdot 10^{-23}$) | Joule/Kelvin |
| T | La température du module PV. | [K] |
| n | Le facteur d'idéalité de diode. | --- |
| q | La charge d'électron ($1.602 \cdot 10^{-19} c$). | [C] |
| α, D | Rapport cyclique de convertisseur [0 ; 1]. | --- |
| η | Le rendement énergétique. | --- |
| λ | La longueur d'onde. | [m] |

| Acronyme | Signification |
|-----------------|---|
| ANFIS | Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System Système adaptatif à inference neuro-floue. |
| DC | Courant Continu |
| FF | Facteur de Forme |
| FLC | Fuzzy Logic Controller ou Contrôleur à base de Logique Floue. |
| GPV | Générateur Photovoltaïque |
| HC | Hill Climbing |
| INC | Conductance Incrémentale |
| MLI | Modulation de Largeur d'Impulsion |
| MPPT | Maximum Power Point Tracking ou Poursuite du Point de Puissance Maximale. |
| nntool | Neural Networks Toolbox |
| P&O | Perturber et Observer |
| PV | Photovoltaïque |
| RNA | Réseaux de Neurones Artificiels |

Introduction générale

Dans l'histoire de l'humanité, l'énergie est la base de toute activité, l'utilisation des énergies renouvelables est très ancienne puisqu'elles ont été pendant longtemps la première possibilité de produire l'énergie. La révolution industrielle a changé cette situation. Ce changement a été marqué lors du 19^{ième} siècle avec le charbon et la découverte des machines à vapeur . Au 20^{ième} siècle, l'apparition du pétrole, du gaz et du nucléaire a affaibli l'utilisation des énergies renouvelables [1].

Aujourd'hui, une grande partie de la demande mondiale en énergie est assurée à partir de ressources fossiles. Quoique, ces réserves de combustibles fossiles sont limitées, la consommation de ces sources donne lieu à des émissions de gaz à effet de serre et donc une augmentation de la pollution. Certains pays développés se sont orientés vers les énergies renouvelables telle que : l'énergie solaire, éolienne , biomasse...etc.

La source d'énergie solaire est le soleil. Cette étoile fournit une énergie lumineuse grandiose à la terre qui réchauffe cette planète et constitue un élément nécessaire de survie pour beaucoup d'êtres vivants. Le problème réside dans le fait que la forme sous laquelle nous recevons cette énergie n'est pas nécessairement de forme directement utilisable. C'est pourquoi, nous devons utiliser des processus de conversion de l'énergie. Les cellules solaires photovoltaïques permettent de convertir l'énergie lumineuse du soleil en énergie électrique. Ainsi, il existe des zones dans le monde plus favorisées en potentiel que d'autres du point de vue ensoleillement. Elles sont répertoriées sous forme d'atlas et mettent en évidence des «gisements solaires » [2].

L'adaptation des niveaux de tension et de courant des éléments de l'énergie électrique (panneaux solaires, charge, batteries et réseaux) par rapport à un bus continu nécessite un convertisseur statique DC-DC [3]. Dans un système photovoltaïque, les convertisseurs DC-DC employés sont de types Buck, Boost et Buck-Boost. Dans notre étude, nous nous intéressons au convertisseur de type Boost.

Les convertisseurs statiques DC-DC, permettent de générer une tension continue variable à partir d'une tension continue fixe. Le hacheur Boost joue le rôle d'un élévateur de tension c'est-à-dire, la tension d'entrée sera augmentée grâce à la structure de ce convertisseur. Il consomme peu de puissance et permet d'avoir de très bons rendements.

Les panneaux solaires, bien qu'ils soient de plus en plus performants, ont des rendements qui restent assez faibles (autour de 20%), c'est pourquoi il faut exploiter le maximum de puissance qu'ils peuvent générer en réduisant au maximum les pertes d'énergie. Une caractéristique importante de ces panneaux est la puissance maximale disponible qui est fournie seulement en un seul point de fonctionnement appelé « Maximum Power Point » (MPP), défini par une tension et courant donnés. Ce point se déplace en fonction des conditions

météorologiques (ensoleillement, température, etc.) ainsi que des variations de la charge. Extraire le maximum de puissance nécessite donc un mécanisme de poursuite de ce point qu'on appelle « Maximum Power Point Tracking » MPPT.

Beaucoup de méthodes MPPT ont été proposées dans la littérature telles que la méthode perturber et observer P&O, la méthode Hill Climbing HC et la méthode de conductance incrémentale INC. Les techniques de contrôle intelligents ont été aussi proposées pour améliorer les performances de ces méthodes. En particulier la logique floue, les réseaux de neurones artificiels et la combinaison entre deux connue sous le nom de techniques neuro-floues qui présentent une très bonne alternative. Le choix de cette solution se justifie par la fait que l'intelligence artificielle permet de captiver le savoir-faire de l'opérateur et la connaissance du système et s'en passer du modèle mathématique qui n'est pas toujours facile à être déterminé.

L'objectif de ce travail est l'application d'un contrôle intelligent sur la MPPT qui va agir sur le rapport cyclique qui va commander le hacheur Boost destiné à la conversion photovoltaïque. Deux solutions seront proposées à savoir la MPPT à base de logique floue et une deuxième qui utilisera une architecture neuro-floue. Un système de règle floues sera utilisé comme modèle de référence. Les données obtenues serviront pour l'apprentissage d'une structure neuronale en mode hors-ligne. Une fois l'apprentissage terminé cette structure neuronale sera appliquée en mode de fonctionnement en ligne.

Le mémoire présenté est organisé en quatre chapitres :

Le premier chapitre est consacré à la présentation d'une manière générale des systèmes photovoltaïques. Les caractéristiques et le fonctionnement des cellules photovoltaïques seront détaillés.

Le second chapitre présente la modélisation du système photovoltaïque et ses caractéristiques. Nous présentons le convertisseur statique utilisé à savoir le hacheur Boost par son schéma équivalent et son fonctionnement. Par la suite nous passerons à sa modélisation et sa simulation en boucle ouverte.

Le troisième chapitre est concerné par la présentation des méthodes MPPT classiques telles que la méthode P&O, HC et INC. Les deux solutions proposées basées sur la logique floue et les réseaux de neurones artificiels seront expliquées. Un rappel théorique sur les techniques intelligente est aussi inclus afin de mieux comprendre le fonctionnement des MPPT proposées.

Dans le dernier chapitre, le développement du modèle sous l'environnement MATLAB/Simulink est expliqué. Les résultats de simulation sont présentés, interprétés et comparés pour les différentes stratégies développées.

Chapitre I : Généralités sur les systèmes Photovoltaïques.

I.1 Introduction

L'énergie photovoltaïque résulte de la transformation directe de la lumière du soleil en énergie électrique aux moyens des cellules basées 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.

En effet 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 [3].

Ce chapitre est concerné par la présentation et le fonctionnement des systèmes photovoltaïques d'une manière générale.

I.2 Energie solaire

L'énergie solaire est une énergie renouvelable. C'est la fraction de l'énergie électromagnétique provenant du Soleil, traversant l'atmosphère qui en absorbe une partie, et parvenant à la surface de la Terre. Elle est également une source d'énergie intermittente (pas d'énergie solaire la nuit).

I.2.1 Soleil

Le soleil est une étoile de forme pseudo sphérique dont le diamètre atteint 1391000 km , Il est situé à une distance moyenne de 149675108 km de la terre, il est constitué principalement de gaz, dont la fusion continue produit une quantité d'énergie phénoménale [4].

La fusion des atomes d'hydrogène en atomes d'hélium permet en effet d'atteindre des températures de l'ordre de 20 millions de degrés Kelvin. Cette énergie se traduit par l'émission d'un rayonnement composé de longueurs d'ondes.

I.2.2 Rayonnement solaire

Le soleil émet un rayonnement électromagnétique compris dans une bande de longueur d'onde variant de $0,22 \mu\text{m}$ à $10 \mu\text{m}$. La figure (I.1) représente la variation de la répartition spectrale énergétique [5].

L'énergie associée à ce rayonnement solaire se décompose approximativement à :

- 9% dans la bande des ultraviolets ($< 0,4 \mu\text{m}$),
- 47% dans la bande visible ($0,4$ à $0,8 \mu\text{m}$),
- 44% dans la bande des infrarouges ($> 0,8 \mu\text{m}$).

L'atmosphère terrestre reçoit ce rayonnement à une puissance moyenne de 1,37 kilowatt au mètre carré (kW/m^2), à $\pm 3\%$, selon que la terre s'éloigne ou se rapproche du soleil dans sa rotation autour de celui-ci. L'atmosphère en absorbe toutefois une partie, de sorte que la quantité d'énergie atteignant la surface terrestre dépasse rarement $1200 W/m^2$. La rotation et l'inclinaison de la terre font également que l'énergie disponible en un point donné varie selon la latitude, l'heure et la saison. Enfin, les nuages, le brouillard, les particules atmosphériques et divers autres phénomènes météorologiques causent des variations horaires et quotidiennes qui tantôt augmentent, tantôt diminuent le rayonnement solaire et le rendent diffus, la figure I.1 montre, l'analyse spectrale du rayonnement solaire.

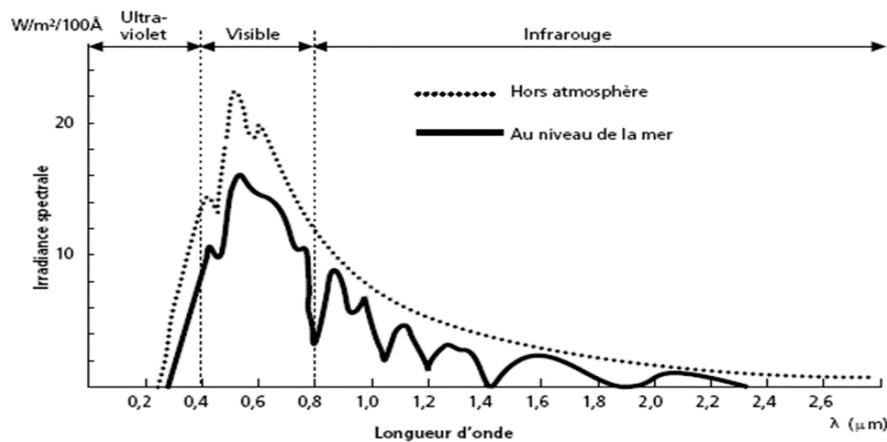


Figure I.1 : Analyse spectrale du rayonnement solaire.

I.2.3 Types d'énergie solaire

Il existe différents types d'énergies solaires tout d'abord nous allons les citer et ensuite les expliquer :

- L'énergie thermique,
- L'énergie photovoltaïque,
- L'énergie thermodynamique.

I.2.3.1 L'énergie photovoltaïque

L'effet photovoltaïque a été découvert par Alexandre Edmond Becquerel en 1839, cette forme d'énergie reste aujourd'hui quantitativement négligeable mais on lui prédit un grand avenir, son coût baissera fortement dans les années à venir. Cette énergie sera durable et ne devra nécessiter aucun entretien. Elle peut répondre aux besoins en énergie électrique d'une maison, contrairement aux autres formes d'énergies solaires qui ne produisent que de la chaleur grâce aux capteurs du panneau qui transforme les rayonnements du soleil en énergie photovoltaïque. Une cellule photovoltaïque est un composant électronique qui, exposé à la lumière, génère une tension électrique, ces cellules se présentent sous la forme de deux fines plaques, le courant qui en ressort est de forme continue (figure I.3).

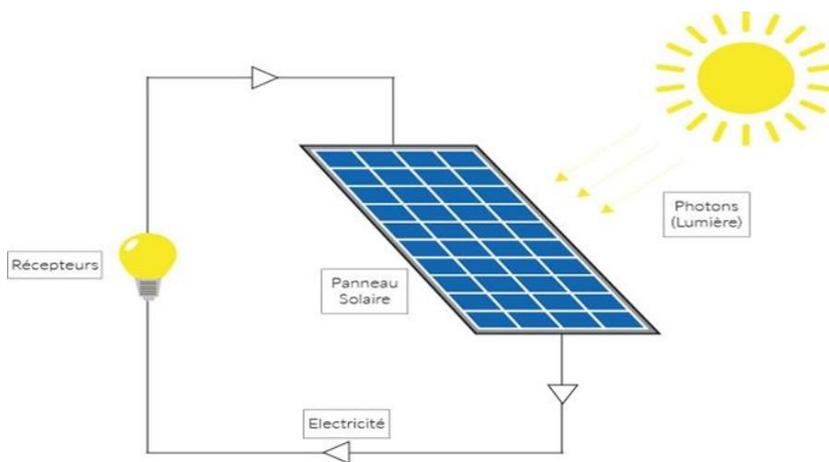


Figure I. 2 : Schéma de fonctionnement de l'énergie photovoltaïque [6].

I.2.3.2 L'énergie solaire thermique

Cette énergie est la transformation des rayons du soleil en énergie thermique c'est-à-dire en chaleur (figure (I.4)). Cette énergie peut être utilisée directement soit pour le chauffage ou pour obtenir de l'eau chaude.

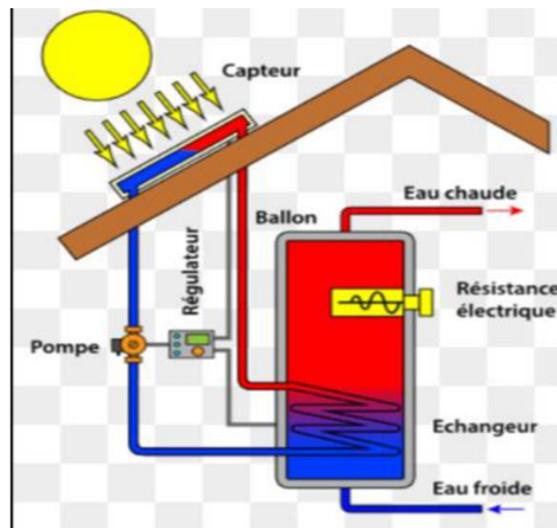


Figure I. 3 : Schéma de fonctionnement de l'énergie solaire thermique.

Le principe général est de concentrer les rayons solaires en un seul endroit. Ceux-ci sont alors piégés par des capteurs solaires thermiques vitrés qui transmettent l'énergie solaire à des absorbeurs métalliques. Ces mêmes absorbeurs réchauffent alors un réseau de tuyaux où circule un fluide caloporteur (c'est-à-dire un fluide qui reçoit de la chaleur en un point de son circuit et qui la cède en un autre point). Cet échangeur va ensuite chauffer à son tour de l'eau stockée dans un cumulus, cette même eau ira alimenter le chauffe-eau (pour l'eau sanitaire) et les systèmes de chauffages solaires.

I.2.3.3 L'énergie solaire thermodynamique

L'énergie solaire thermodynamique est un moyen de produire de l'électricité et d'accumuler l'énergie thermique nécessaire à cette production pendant plusieurs heures après le coucher du soleil, dans des centrales solaires à concentration. Le principe est de concentrer la chaleur du soleil par des miroirs (voir figure I.5) pour chauffer une fluide haute température (plusieurs centaines de degrés) afin de générer de la vapeur par échange thermique pour ensuite produire de l'électricité au moyen d'une turbine. Le fluide utilisé peut conserver sa chaleur pendant plusieurs heures après le coucher du soleil, cela permet de produire de l'électricité en début de soirée, au moment où la consommation est la plus importante.



Figure I. 4 : Energie solaire thermodynamique [7].

I.2.4 Le potentiel solaire

L'Algérie dispose d'un des gisements solaires les plus élevés au monde, grâce à sa situation géographique (figure I.6). La durée d'insolation sur la quasi-totalité du territoire national dépasse les 2000 heures annuellement et peut atteindre les 3900 heures (hauts plateaux et Sahara). L'énergie reçue quotidiennement sur une surface horizontale de $1m^2$ est de l'ordre de 5 kWh sur la majeure partie du territoire national [8], le tableau I.1 indique le potentiel solaire algérien dans les régions.

Tableau I. 1: Potentiel solaire en Algérie.

| 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 |

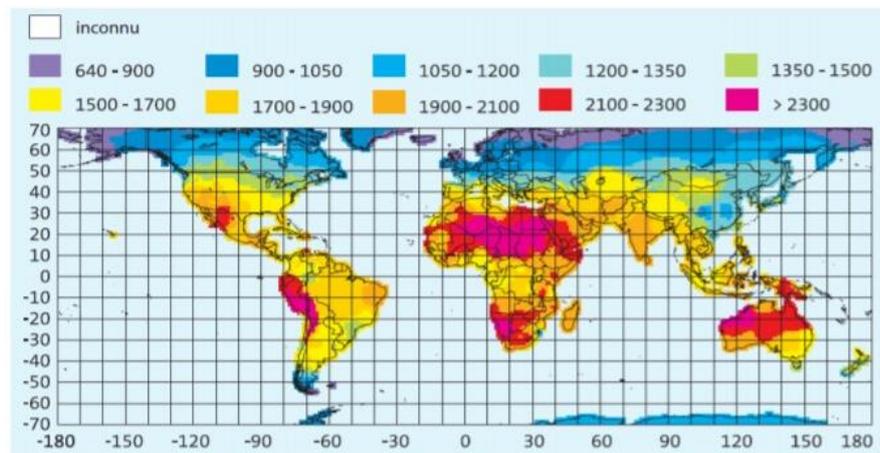


Figure I. 5 : Carte du monde de l'ensoleillement moyen annuel [9].

I.3 L'effet photovoltaïque

L'effet photovoltaïque est un processus de transformation de l'énergie émise par le soleil, sous forme de photons, en énergie électrique à l'aide de composant semi-conducteur appelé cellule solaire.

L'effet photovoltaïque ne peut se produire que s'il existe une barrière de potentiel dans le semi-conducteur avant qu'il ne soit éclairé. Une telle barrière existe à l'interface entre deux volumes dopés différemment c'est à dire où l'on a introduit deux types différents d'impuretés à concentration différente, par exemple de type P-N. Si ce matériau est éclairé, les charges électriques, rendus mobiles par la lumière (l'effet photoélectrique), seront séparées par la barrière avec d'un côté les charges positives et de l'autre côté les charges négatives [4].

Parmi les matériaux semi-conducteurs les plus utilisés on trouve le silicium, le germanium, le sulfure de Gallium et l'arséniure de Gallium.

I.4 La cellule photovoltaïque

La cellule photovoltaïque est un composant électronique qui produit de l'électricité quand il est exposé à la lumière (photons), grâce à l'effet photovoltaïque. Une cellule PV donc 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 supérieur au gap) par le matériau constituant le dispositif ; conversion de l'énergie de photons en énergie électrique, ce qui correspond à la création des paires électrons/trous dans le matériau semi-conducteur ; collecte des particules générées dans le dispositif.

Le matériau constituant la cellule PV doit posséder deux niveaux d'énergie est être assez conducteur pour permettre l'écoulement du courant. Un champ électrique permettant de dissocier les paires électrons/trous créés est nécessaire. Pour cela on utilise le plus souvent une jonction P-N [10].

I.4.1 Dispositifs à semi-conducteurs

Les semi-conducteurs sont des matériaux dont la conductivité est intermédiaire entre celle des conducteurs et celle des isolants. Cette conductivité des semi-conducteurs, à la différence de celle des conducteurs et des isolants, dépend fortement de leur pureté, des irrégularités de leur structure, de la température et d'autres quantités physiques et chimiques.

Cette propriété représente leur avantage principal puisqu'elle permet la construction de la plupart des composants électroniques ayant des caractéristiques très diversifiées.

I.4.2 Dopage des semi-conducteurs

Le dopage d'un matériau consiste à introduire dans sa matrice des atomes d'un autre matériau. Ces atomes vont se substituer à certains atomes initiaux et ainsi introduire davantage d'électrons ou de trous. Les atomes de matériau dopant sont également appelés impuretés, et sont en phase diluée : leur concentration reste négligeable devant celle des atomes du matériau initial.

Dans un semi-conducteur intrinsèque, ou pur, il n'y a aucun atome dopant. Tous les électrons présents dans la bande de conduction proviennent donc de la bande de valence. Il y a donc autant d'électrons que de trous : $n = p = n_i$; n_i : est la concentration intrinsèque. Tout dopage sert à modifier cet équilibre entre les électrons et les trous, pour favoriser la conduction électrique par l'un des deux types de porteurs.

Il existe deux types de dopage :

I.4.2.1 Dopage de type N

La figure I.7 représente dopage de type N était consisté à ajouter un atome de phosphore au sein de la structure cristalline du silicium. Le phosphore disposant de 5 électrons sur sa couche électronique externe va s'associer avec 4 atomes de silicium, laissant ainsi libre un électron : Cet ajout a pour effet de donner à la structure cristalline une charge globale négative.

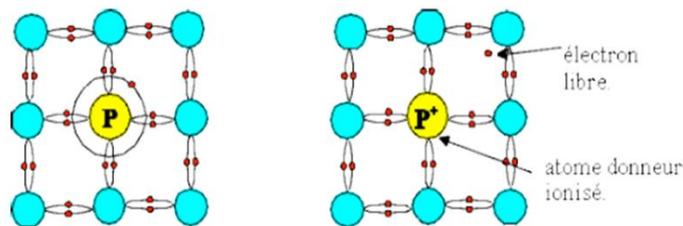


Figure I.6 : Dopage de type N.

I.4.2.2 Dopage de type P

La figure I.8 représente dopage de type P était consisté à ajouter un atome de bore au sein de la structure cristalline du silicium. Le bore disposant de 3 électrons sur sa couche électronique externe va s'associer avec 4 atomes de silicium, laissant ainsi libre un trou : Cet ajout a pour effet de donner à la structure cristalline une charge globale positive.

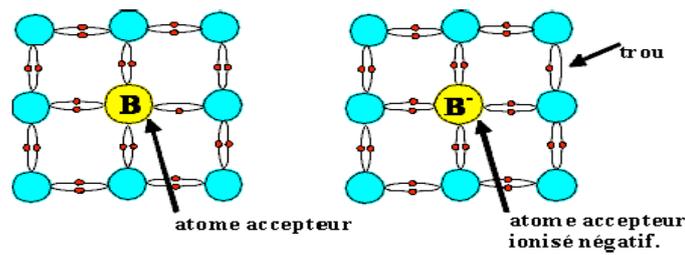


Figure I.7 : Dopage de type P.

I.4.3 La jonction P-N

La jonction P-N est à la base de la plupart des applications des semi-conducteurs. Elle est créée par la mise en contact d'un semi-conducteur de type P et d'un semi-conducteur de type N (théoriquement). Dans la zone de contact, les électrons libres du segment N pénètrent dans le segment P et se recombinent avec les trous. De même, les trous du segment P pénètrent dans le segment N et se recombinent avec les électrons. Ce phénomène est appelé diffusion. Il en résulte, au niveau de la transition des segments, l'apparition d'une zone exempte de charges mobiles appelée Zone de transition (aussi nommée Zone de Charge d'espace ou Zone d'épuisement), où seuls demeurent les atomes d'impuretés fixes (ions accepteurs dans le segment P, ions donneurs dans le segment N) et les atomes de semi-conducteur neutres. Les charges constituées par les ions fixes sont à l'origine d'un champ électrique E dans la zone de transition, et par la même d'une différence de potentiel V_0 (appelée barrière de potentiel) aux bornes de cette zone. Cette zone possède une grande impédance. Le champ électrique E tend à maintenir les porteurs majoritaires dans leurs régions respectives et s'oppose ainsi à la cause qui lui donne naissance, ce qui conduit à un état d'équilibre [11], ce phénomène est représenté dans la figure I.9. Cependant, le champ électrique E n'interdit pas le passage des porteurs minoritaires présents dans les segments de type P et N (courant de "saturation" I_{sat}). Ce mouvement est toutefois équilibré par les porteurs majoritaires qui possèdent l'énergie nécessaire au franchissement de la barrière de potentiel.

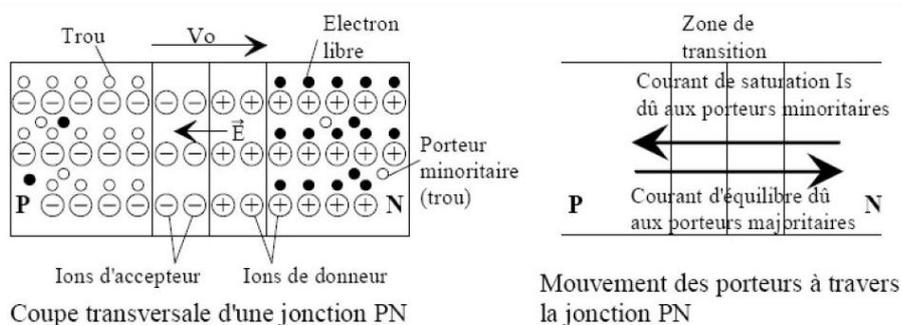


Figure I.8 : Jonction P-N.

I.4.4 Principe de fonctionnement

L'effet photovoltaïque utilisé dans les cellules solaires permet de convertir directement l'énergie lumineuse des rayons solaires en électricité par le biais de la production et du transport dans un matériau semi-conducteur de charges électriques positives et négatives sous l'effet de la lumière. Ce matériau comporte deux parties, l'une présentant un excès d'électrons et l'autre un déficit en électrons, dites respectivement dopée de type N et dopée de type P.

Lorsque la première est mise en contact avec la seconde, les électrons en excès dans le matériau N diffusent dans le matériau P. La zone initialement dopée N devient chargée positivement, et la zone initialement dopée P chargée négativement. Il se crée donc entre elles un champ électrique qui tend à repousser les électrons dans la zone N et les trous vers la zone P. Une jonction P-N a été formée. En ajoutant des contacts métalliques sur les zones N et P, une diode est obtenue. Lorsque la jonction est éclairée, les photons d'énergie égale ou supérieure à la largeur de la bande interdite communiquent leur énergie aux atomes, chacun fait passer un électron de la bande de valence dans la bande de conduction et laisse aussi un trou capable de se mouvoir, engendrant ainsi une paire électron-trou. Si une charge est placée aux bornes de la cellule, les électrons de la zone N rejoignent les trous de la zone P via la connexion extérieure, donnant naissance à une différence de potentiel le courant électrique circule, la figure I.10 représente le principe de la conversion PV.

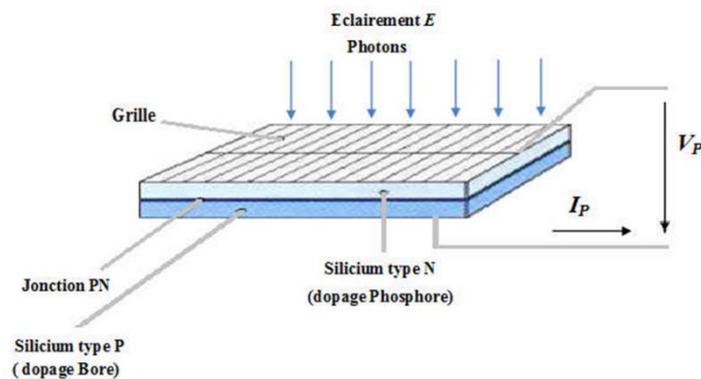


Figure I.9 : Principe de fonctionnement d'une cellule solaire.

I.4.5 Les différents types des cellules

Il existe plusieurs types de cellules en fonction de la structure microscopique du silicium (figure I.10):

- Cellule en silicium monocristallin,
- Cellule en silicium polycristallin,
- Cellule en silicium amorphe.

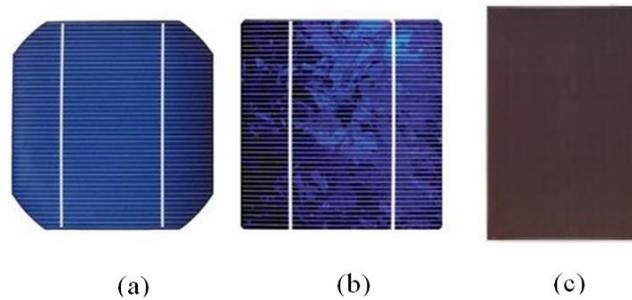


Figure I.10 : Différents types de cellule PV. (a) Silicium monocristallin, (b) silicium polycristallin, (c) silicium amorphe.

I.4.5.1 Cellule en silicium monocristallin

Lors du refroidissement, le silicium fondu se solidifie en ne formant qu'un seul cristal de grande dimension. On découpe ensuite le cristal en fines tranches qui donneront les cellules. Ces cellules sont en général d'un bleu uniforme.

I.4.5.2 Cellule en silicium polycristallin

Les cellules polycristallines sont composées d'un agglomérat de cristaux. Elles aussi proviennent du sciage de blocs de cristaux, mais ces blocs sont coulés et sont dès lors hétérogènes. Leur rendement de 13 % et jusqu'à 20 % au laboratoire [12].

I.4.5.3 Cellule en silicium amorphe

Les cellules de silicium amorphe diffèrent des cellules présentées précédemment puisque leur structure présente un haut degré de désordre dans la structure des atomes [13]. L'utilisation de silicium amorphe pour les cellules solaires a montré de grands avantages.

I.5 Caractéristiques électriques d'une cellule photovoltaïque

La figure (I.11) 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, ces résistances ont une certaine influence sur la caractéristique $I = f(V)$ de la cellule.

- **La résistance série (R_s)** : est la résistance interne de la cellule ; elle dépend de la résistance du semi-conducteur utilisé, de la résistance de contact des grilles collectrices et de la résistivité de ces grilles.
- **La résistance shunt (R_{sh})** : est due à un courant de fuite au niveau de la jonction ; elle dépend de la façon dont celle-ci a été réalisée.
- **La diode** : Cette diode est en parallèle qui modélise la jonction PN.

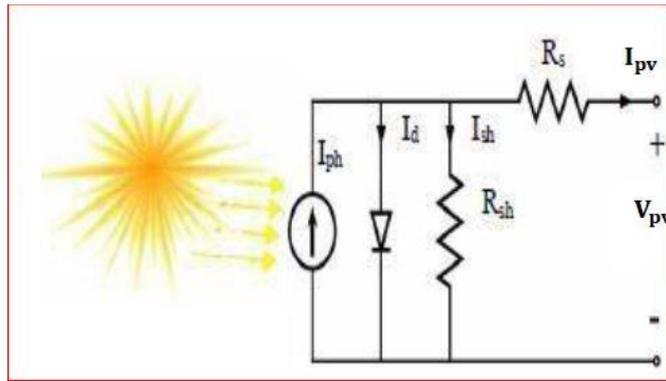


Figure I. 11 : Schéma équivalent électrique d'une cellule photovoltaïque.

Le modèle mathématique pour la caractéristique courant –tension d'une cellule PV du circuit équivalent simplifier est déduire à partir de la loi de Kirchhoff :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_d - I_{sh} \quad (I.1)$$

$$I_d = I_{sat} \left(e^{\frac{V_D}{n \cdot V_t}} - 1 \right) \quad ; \quad V_t = \frac{K \cdot T}{q} \quad (I.2)$$

Donc, la relation (I.2) sera

$$I_d = I_{sat} \left(e^{\frac{q(V_{pv} + R_s \cdot I_{pv})}{n \cdot K \cdot T}} - 1 \right) \quad (I.3)$$

Le courant dans la résistance shunt est calculé par :

$$I_{sh} = \frac{V_{pv} + R_s \cdot I_{pv}}{R_{sh}} \quad (I.4)$$

Et on déduit l'expression du court fourni par une cellule PV :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_{sat} \left(e^{\frac{q(V_{pv} + R_s \cdot I_{pv})}{n \cdot K \cdot T}} - 1 \right) - \frac{V_{pv} + R_s \cdot I_{pv}}{R_{sh}} \quad (I.5)$$

Où :

I_{pv} : est le courant fournit par le module PV.

I_{ph} : est le photo-courant dépendant de l'éclairement (E).

I_{sat} : est le courant de saturation.

K : est la constante de Boltzmann ($1.381. 10^{-23}$ joule/Kelvin).

q : est la charge d'électron ($1.602. 10^{-19}$ c).

T : est la température du module PV en Kelvin (K).

n : est le facteur d'idéalité de la jonction ($1 < n < 3$).

V_{pv} : est la tension délivrée par le module PV

R_s : est la résistance série représentant les diverses résistances de contacts et de connexions.

R_{sh} : est la résistance shunt caractérisant les courants de fuite de la jonction.

I.6 Paramètres de la cellule PV

D'après les courbes courant-tension ou l'équation caractéristique en pouvant être déterminé quatre grandeurs caractéristiques principales du fonctionnement des cellules solaires [14]:

- ❖ Le courant de court-circuit I_{cc} ,
- ❖ La tension en circuit ouvert V_{co} ,
- ❖ Le facteur de forme FF,
- ❖ Le rendement de conversion d'énergie η .

I.6.1 Courant de court-circuit (I_{cc})

C'est le courant pour lequel la tension aux bornes de la cellule est nulle. Dans le cas idéal (R_s nulle et R_{sh} infinie), ce courant se confond avec le photo-courant I_{ph} dans le cas contraire, en annulant la tension V_{pv} dans l'équation (I.6), on obtient [14]:

$$I_{cc} = I_{ph} - I_{sat} \left(e^{\frac{R_s I_{cc}}{n V_t}} - 1 \right) - \frac{R_s \cdot I_{cc}}{R_{sh}} \quad (I.6)$$

Pour la plupart des cellules (dont la résistance série est faible), on peut négliger le terme $I_{sat} \left(e^{\frac{q \cdot (R_s \cdot I_{cc})}{n \cdot K \cdot T}} - 1 \right)$ devant I_{ph} , l'expression approchée du courant de court-circuit est alors :

$$I_{cc} \cong \frac{I_{ph}}{\left(1 + \frac{R_s}{R_{sh}} \right)} \quad (I.7)$$

Dans le cas idéal ($R_s \rightarrow 0$ et $R_{sh} \rightarrow \infty$) ou dans le cas approximatif suivant :

$$R_{sh} = \frac{1}{G_{sh}} = \frac{1}{G_{sh}} \gg R_s \rightarrow \frac{R_s}{R_{sh}} \ll 1 \rightarrow 1 + \frac{R_s}{R_{sh}} \approx 1 \quad (I.8)$$

Le courant de court-circuit I_{cc} se confond avec le photo courant I_{ph} :

$$I_{cc} \approx I_{ph} \quad (I.9)$$

I.6.2 Tension en circuit ouvert V_{co}

La tension à circuit ouvert est obtenue quand le courant qui traverse la cellule est nul, elle dépend de la barrière d'énergie et de la résistance shunt. Elle décroît avec la température et varie peu avec l'intensité lumineuse.

$$V_{co} = n \cdot V_t \cdot \log \left(1 + \frac{I_{ph}}{I_{sat}} \right) \quad (I.10)$$

I.6.3 Facteur de forme (FF)

On appelle facteur de forme **FF** le rapport entre la puissance maximale que peut fournir une cellule ($P_{max} = I_{mpp} \cdot V_{mpp}$) et le produit du courant de court-circuit I_{cc} par la tension de circuit ouvert V_{co} . Le facteur de forme indique la qualité de la cellule ; il peut nous renseigner sur le vieillissement 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_s et R_{sh} est défini par :

$$FF = \frac{P_{max}}{I_{cc} V_{co}} = \frac{I_{mpp} V_{mpp}}{I_{cc} V_{co}} \quad (I.11)$$

I.6.4 Le rendement énergétique

On appelle rendement énergétique le rapport de la puissance maximale fournie par la cellule P_{max} sur la puissance du rayonnement solaire incident (P_i) :

$$\eta = \frac{P_{Max}}{P_i} = \frac{I_{mpp} \cdot V_{mpp}}{\phi \cdot S} \quad (I.12)$$

Où :

S : est la surface de la cellule.

ϕ : est le flux incident.

I.7 Générateur photovoltaïque et ses performances

Le générateur photovoltaïque est un ensemble d'équipements mis en place pour exploiter l'énergie photovoltaïque afin de satisfaire les besoins en charge. En fonction de la puissance désirée, les modules peuvent être assemblés en panneaux pour constituer un « champ photovoltaïque ».

Un module photovoltaïque est constitué d'un ensemble de cellules photovoltaïques élémentaires montées en série et/ou en parallèle afin d'obtenir des caractéristiques électriques désirées tels que : la puissance, le courant de court-circuit ou la tension en circuit ouvert [6].

I.7.1 Caractéristique courant-Tension

La figure (I.12) montre la caractéristique courant-tension d'une cellule PV à une température fixée et à une certaine ambiante irradiation [15], les conditions standards (irradiation $1000W/m^2$ et de température $(25^{\circ}C)$).

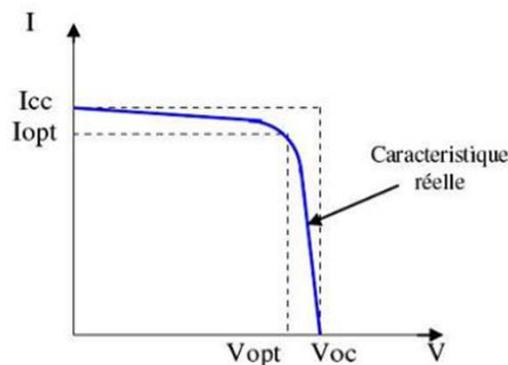


Figure I. 12 : Caractéristique $I=f(V)$ d'un module photovoltaïque.

I.7.1.1 Les zones de caractéristique I-V d'un générateur photovoltaïque

La caractéristique fondamentale du générateur photovoltaïque donnée pour un éclairage et une température donnée, n'impose ni le courant ni la tension de fonctionnement, seule la courbe $I = f(V)$ est fixée. C'est la valeur de la charge aux bornes du générateur qui va déterminer le point de fonctionnement du système photovoltaïque, la figure (I.13) représente trois zones essentielles [5]:

- **La zone (1)** : où le courant reste constant quelle que soit la tension, pour cette région, le générateur photovoltaïque fonctionne comme un générateur de courant.
- **La zone (2)** : correspondant au code de la caractéristique, la région intermédiaire Entre les deux zones, représente la région préférée pour le fonctionnement du Générateur, où le point optimal (caractérisé par une puissance maximale) où -nous pouvons le déterminer.
- **La zone (3)** : qui se distingue par une variation de courant correspondant à une tension presque constante, dans ce cas le générateur est assimilable à un générateur de tension.

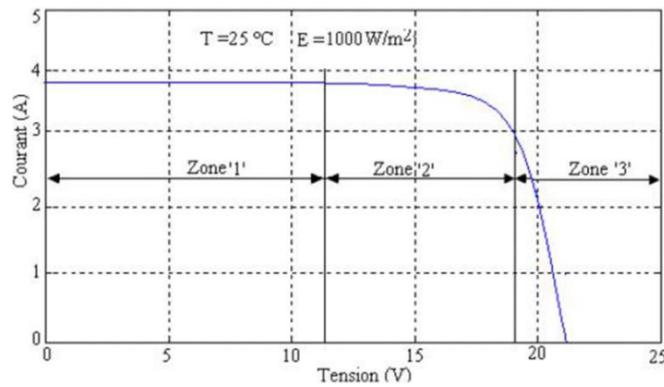


Figure I.13 : Différentes zones de Caractéristique I-V d'un générateur photovoltaïque.

I.7.2 Influence de l'éclairement et la température sur les courbes $I=f(V)$ et $P=f(V)$

La figure (I.14) représente l'influence de l'éclairement sur la caractéristique $I = f(V)$ à une température constante.

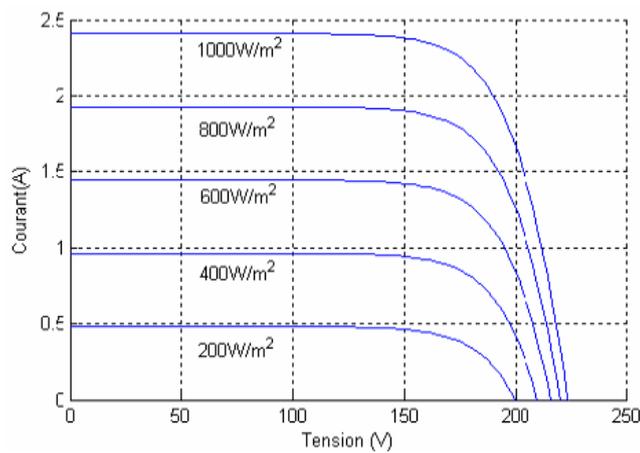


Figure I.14 : Influence de l'éclairement sur la caractéristique $I=f(V)$.

La figure (I.15) illustre la variation de la puissance délivrée par le générateur en fonction de la tension pour différentes valeurs d'éclairement, ce qui nous permet de déduire l'influence de l'éclairement sur la caractéristique $P(V)$.

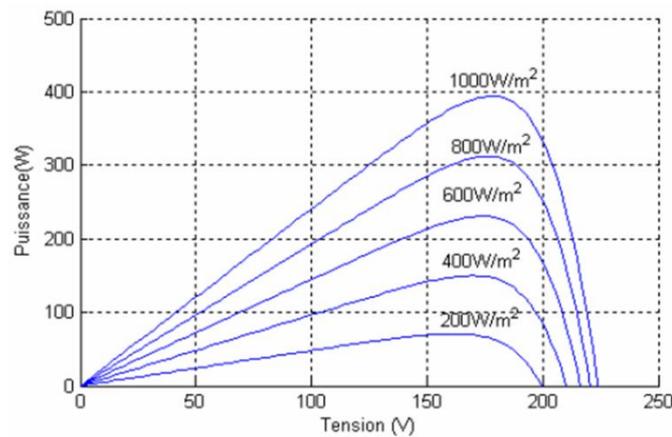


Figure I. 15 : Influence de l'éclairement sur la caractéristique $P=f(V)$ [10].

On remarque bien que la puissance et le courant varie proportionnellement avec l'éclairement et la puissance maximale correspond à l'irradiation nominal, par contre la tension varie légèrement. La figure (I.16) montre l'influence de la température sur la caractéristique $I = f(V)$, il est essentiel de comprendre l'effet de changement de la température d'une cellule solaire sur la caractéristique I-V dont le courant dépend de la température puisque le courant augmente légèrement à mesure que la température augmente, mais la température influe négativement sur la tension de circuit ouvert. Quand la température augmente la tension de circuit ouvert diminue. Par conséquent la puissance maximale du générateur subit une diminution [15].

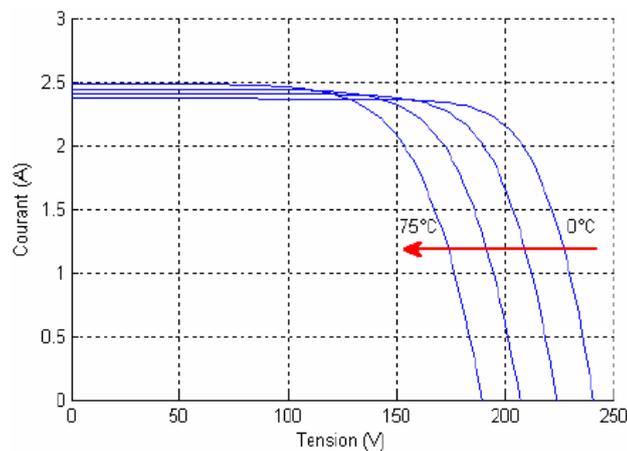


Figure I. 16 : Influence de la température sur la caractéristique $I=f(V)$.

Nous présentons ci-dessous les caractéristiques P-V dans la figure (I.17) d'un module photovoltaïque pour un niveau d'ensoleillement G donné et pour différentes températures.

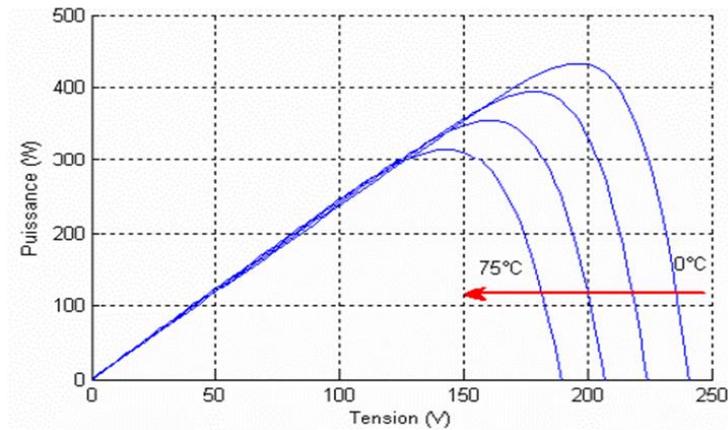


Figure I.17 : Influence de la température sur la caractéristique $P=f(V)$.

I.7.3 Influence de la résistance série R_s

La résistance série agit sur la pente de la caractéristique dans la zone où la photodiode se comporte comme un générateur de tension, et lorsqu'elle augmente elle diminue la valeur de courant de court-circuit I_{cc} (figure I.18) [16].

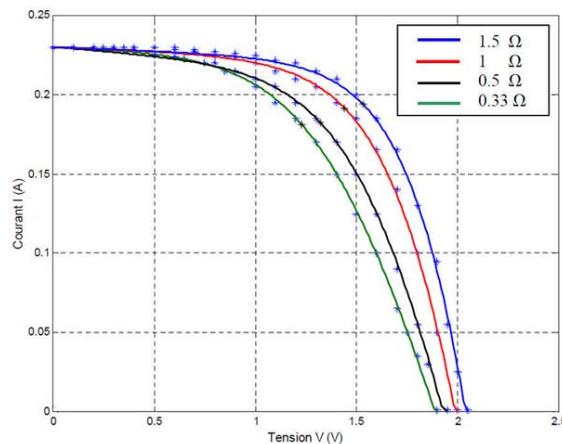


Figure I.18 : Influence de la résistance série.

I.7.4 Influence de la résistance shunt R_{sh}

Il s'agit le plus souvent d'une conductance de fuite. C'est comme si l'on devait soustraire au photo-courant, le courant de diode. La résistance shunt est en général très élevée. On peut percevoir une anomalie à la caractéristique par la présence d'une légère pente au voisinage du point de court-circuit. Une résistance shunt trop faible aura un impact sur la tension de circuit ouvert de la cellule ; à cause de cela une photopile dont la résistance shunt est trop faible ne donnera plus de tension sous faible éclairage, la figure I.19 représente l'influence de la résistance shunt.

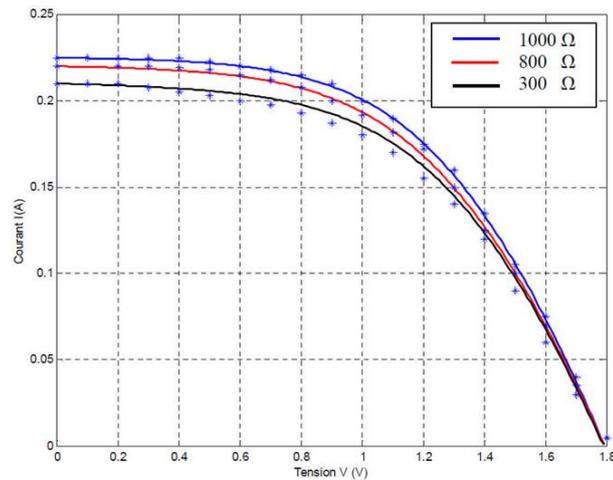


Figure I. 19 : Influence de la résistance shunt.

I.7.5 Influence de l'association série des cellules PV

La cellule individuelle ne produit qu'une très faible puissance électrique, pour produire plus de tension, il faut assembler N_s modules en série. L'association en série des cellules délivre une tension égale à la somme des tensions individuelles et un courant égal à celui d'une cellule (figure I.20).

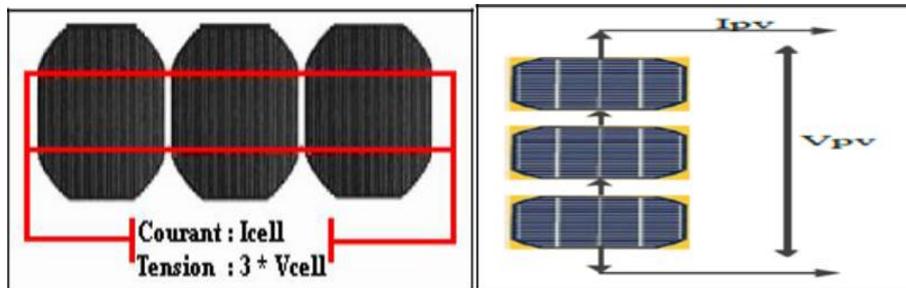


Figure I. 20 : Association en série des cellules PV.

I.7.6 Influence de l'association parallèle des cellules PV

En additionnant les cellules (les modules) identiques en parallèle, la tension de la branche est égale à la tension de chaque cellule (chaque module) et l'intensité augmente proportionnellement au nombre de cellules (de modules) en parallèle dans la branche (voir la figure I.21) [17].

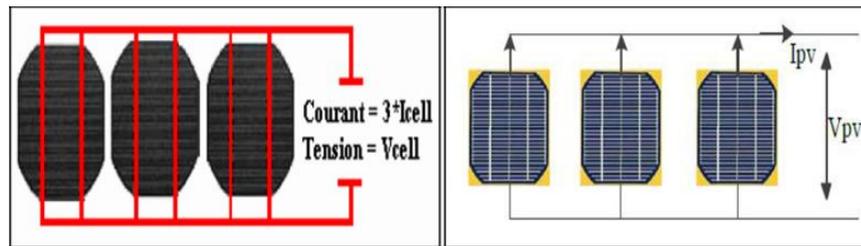


Figure I.21 : Association en parallèle des cellules PV.

I.7.7 Influence de l'association mixte (série +parallèle) des cellules PV

Pour obtenir une satisfaction en courant et en tension, on est obligé d'utiliser un groupement mixte, c'est-à-dire série parallèle comme montre dans la figure I.22.

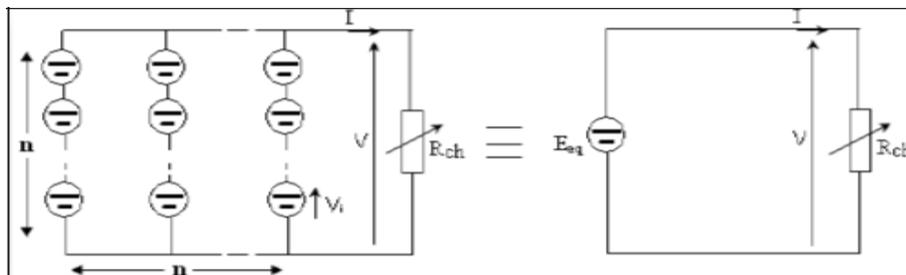


Figure I.22 : Association mixte des cellules PV.

I.8 Chaînes de conversion photovoltaïque

La chaîne de conversion solaire photovoltaïque ou le système PV comporte en plus de l'élément principal qui est le générateur PV qui représente plus de 50% du coût total de la chaîne, des éléments secondaires comme le système de stockage ainsi que l'étage d'adaptation de puissance. Souvent, le système de stockage comprend un ou plusieurs batteries rechargeables. Les batteries sont un article très coûteux et doivent être choisis avec prudence. Pour l'étage d'adaptation n'est autre qu'un convertisseur statique DC/DC ou DC/AC. La durée de vie des modules PV est entre 20 et 30 ans et celle des batteries atteint 8 à 10 ans.

Les systèmes PV sont classés en trois grandes catégories selon la manière dont l'énergie est utilisée.

I.8.1 Systèmes PV isolé (autonome)

Le rôle des systèmes autonomes est d'alimenter un ou plusieurs consommateurs situés dans une zone isolée du réseau électrique. Comme on le remarque sur la Figure I.23 qui représente l'exemple d'un système PV autonome, qui est constitué par un système de stockage associé aux générateurs PV pour assurer l'alimentation à chaque instant et pendant plusieurs jours malgré l'intermittence de la production et des convertisseurs statiques pour l'étage d'adaptation entre le générateur PV et les charges [18].

I.8.2 Systèmes PV connectés au réseau

Un tel système s'installe sur un site raccordé au réseau, généralement sur des habitations ou des entreprises qui souhaitent recourir à une forme d'énergie renouvelable et qui bénéficient d'un bon ensoleillement, voir figure (I.24).

L'énorme avantage de cette solution est l'absence de batterie. On ne stocke plus l'énergie, on l'injecte directement dans le réseau local ou national. Et ceci sans limite quantitative, donc toute l'énergie est récupérée. Il y a un compteur qui tourne dans un sens pour la consommation, et un autre dans l'autre sens pour la production. Mais il faut tout de même convertir le courant continu des panneaux en alternatif au travers d'un onduleur et celui-ci doit être homologué par la compagnie d'électricité qui va recevoir ce courant. Car il doit respecter des normes sur sa qualité « sinusoïdale » [19].

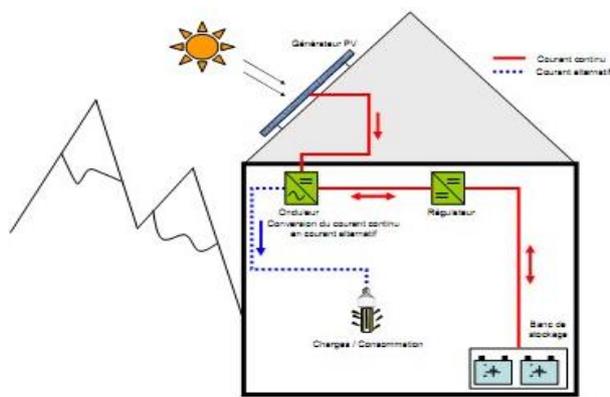


Figure I. 23 : Structure d'un système PV autonome.

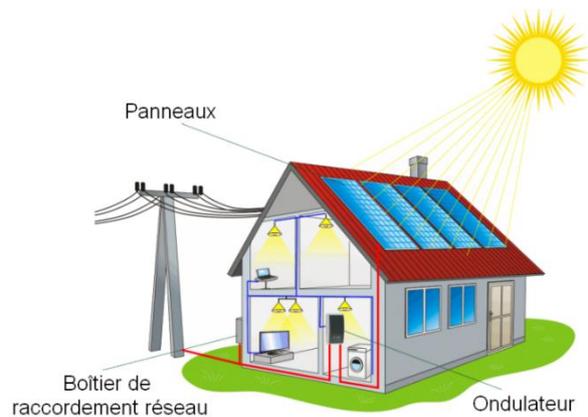


Figure I. 24 : Structure d'un système PV connecté au réseau.

I.8.3 Système PV hybride

Les systèmes hybrides sont composés d'un générateur photovoltaïque combiné à une ou plusieurs sources d'énergies renouvelables ou à un groupe électrogène, ou aux deux à la fois. Ces systèmes peuvent posséder des batteries qui peuvent aussi être rechargées par l'autre source en cas de décharge [1].

I.9 Avantages et inconvénients d'une installation PV

L'installation PV basée sur une source d'énergie gratuite et renouvelable qui présente des avantages et aussi des inconvénients.

I.9.1 Avantages

- Énergie maîtrisable et adaptable aux situations de toutes les régions,
- Le coût de fonctionnement est très faible par rapport aux autres énergies,
- L'investissement et le rendement sont prévisibles à long terme,
- Des systèmes simples et rapides à installer qui nécessitent très peu de maintenance.

I.9.2 Inconvénients

- Les panneaux solaires coûtent excessivement cher, du fait de la haute technicité qu'ils requièrent.
- La production d'électricité ne se fait que le jour alors que la plus forte demande se fait la nuit,
- A besoin de beaucoup d'espace,
- Le rendement maximum d'un panneau solaire s'obtient uniquement quand la surface du panneau est strictement perpendiculaire aux rayons solaires.

I.10 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté des généralités sur les systèmes photovoltaïques en commençant par l'énergie solaire et en passant sur l'effet photovoltaïque et le dopage des semi-conducteur pour arriver au principe de fonctionnement et les paramètres d'un système photovoltaïque. L'étude de la caractéristique courant-tension ainsi que l'influence de l'éclairement et la température constituent une étape indispensable qui permettra d'étudier et mieux comprendre le fonctionnement de la chaîne photovoltaïque.

Dans le prochain chapitre, nous allons introduire la modélisation de GPV et les convertisseurs statiques DC/DC à savoir le hacheur de type Boost.

Chapitre II :

Modélisation du système photovoltaïque.

II.1 Introduction

Après avoir étudié et cité les différents composants d'un générateur photovoltaïque, nous passons maintenant à l'étude des convertisseurs statiques dont l'utilisation s'avère nécessaire pour stocker l'énergie photovoltaïque dans des batteries, ou pour alimenter une charge continue.

On s'intéresse dans ce chapitre à l'étude de modélisation qui est une étape fondamentale qui permet d'introduire un certain nombre de modèles puis d'évaluer la caractéristique de chaque élément de l'installation ainsi que les paramètres constitutants, en suite l'étude du convertisseur DC/DC de type Boost et ses simulations sous l'environnement du logiciel Matlab.

II.2 Modélisation du GPV

Le module fait intervenir un générateur de courant pour la modélisation d'une diode pour les phénomènes de polarisation de la cellule, une résistance série R_s représentant les diverses résistances de contacts et de connexions et une résistance parallèle R_{sh} caractérisant les divers courants de fuites dus à la diode et aux effets de bords de la jonction.

Le générateur photovoltaïque est représenté par un modèle standard à une seule diode, établit par shockley pour une seule cellule PV, et généralisé à un module PV en le considérant comme un ensemble de cellules identiques branchées en série-parallèle.

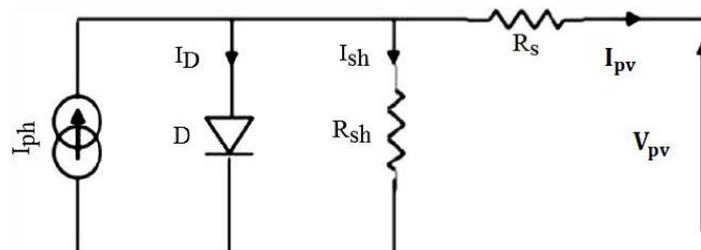


Figure II. 1 : Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque.

Ce schéma équivalent est constitué d'une diode (D) caractérisant la jonction, une source de courant I_{ph} caractérisant le photo-courant, une résistance série R_s représentant les pertes par effet joule, et une résistance shunte R_{sh} caractérisant un courant de fuite entre la grille supérieure et le courant arrière qui est généralement très supérieure à R_s .

L'équation qui est caractérisant le courant de la cellule photovoltaïque d'après la loi de nœud est (II.1) :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_D - I_{sh} \quad (\text{II.1})$$

Où I_{ph} est le photo-courant et I_D le courant qui traversent la diode, I_{sh} est le courant de la résistance shunt.

Les expressions du photo-courant est donnée par l'équations (II.2):

$$I_{ph} = (I_{cc} + K_i \cdot \Delta T) \cdot \frac{E}{E_{ref}} \quad (II.2)$$

Avec I_s est le courant de saturation donnée par l'expression (II.3) :

$$I_s = \frac{I_{cc} + K_i \cdot \Delta T}{e^{\frac{V_{oc} + K_v \cdot \Delta T}{n V_t}} - 1} \quad (II.3)$$

Où I_{cc} est le courant de court-circuit, K_i le coefficient de la température de court-circuit, K_v le coefficient de la température en circuit ouvert, E l'irradiance solaire et E_{ref} est l'irradiance solaire nominale.

L'équation de la caractéristique tension-courant d'un générateur photovoltaïque contient N_{pp} des modules en parallèle et N_{ss} des modules en série est donnée par l'expression (II.4) :

$$I_{pv} = N_{pp} I_{ph} - N_{pp} I_s \left(e^{\frac{V_{pv} + (R_s N_{ss} / N_{pp}) I_{pv}}{n V_t N_{ss}}} - 1 \right) - \frac{V_{pv} + (R_s N_{ss} / N_{pp}) I_{pv}}{R_{sh} N_{ss} / N_{pp}} \quad (II.4)$$

$$I_m = I_{ph} - I_d \quad (II.5)$$

$$V_{ta} = \frac{1}{n V_t} \quad (II.6)$$

II.3 Caractéristique de GPV

Le modèle du GPV sous l'environnement de Matlab Simulink représenté dans la figure II.2 comporte les blocs de circuit équivalent de panneau PV, le bloc de visualisation des résultats, et a partir des équations donné dans le chapitre précédentes (I.3 et I.4) et les équations (II.3, II.4, II.5 et II.6) les blocs des calculs des courants I_s , I_D , I_{ph} , I_{pv} et I_m .

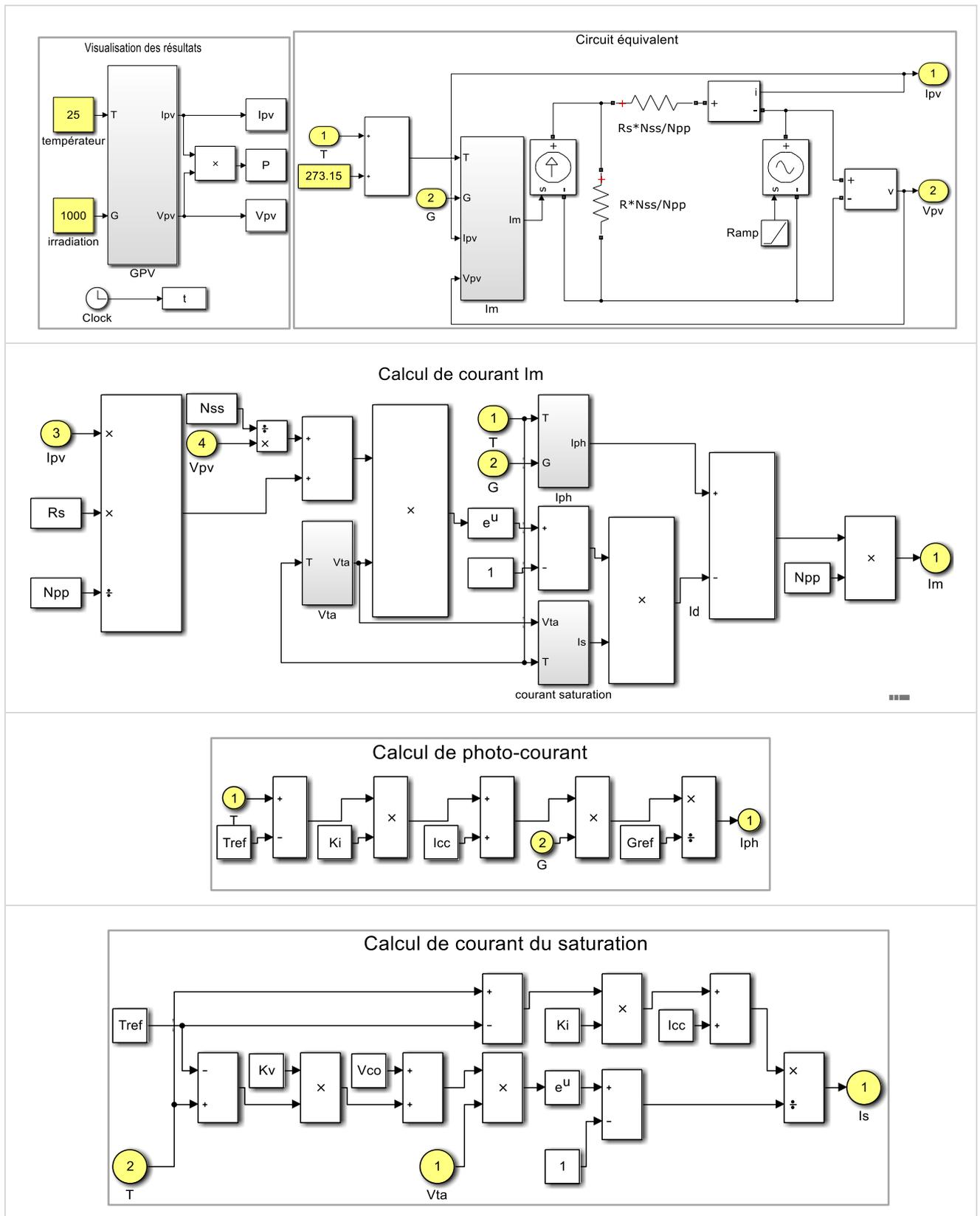


Figure II. 2 : Synoptique du modèle amélioré de la cellule photovoltaïque sous Simulink-MATLAB.

Les blocs de visualisation des résultats, permettent de visionner le courant délivré et la tension aux bornes du générateur photovoltaïque, ainsi que sa puissance électrique.

Les caractéristiques principales de la cellule solaire $I_{pv} = f(V_{pv})$ et $P = g(V_{pv})$ qui montre comment une cellule solaire répondra à toutes les charges possibles, en générale, les caractéristiques de notre cellule PV dans les conditions standards à 1000 (W/m²) et 25°C sont données par les deux figures II.3, II.4:

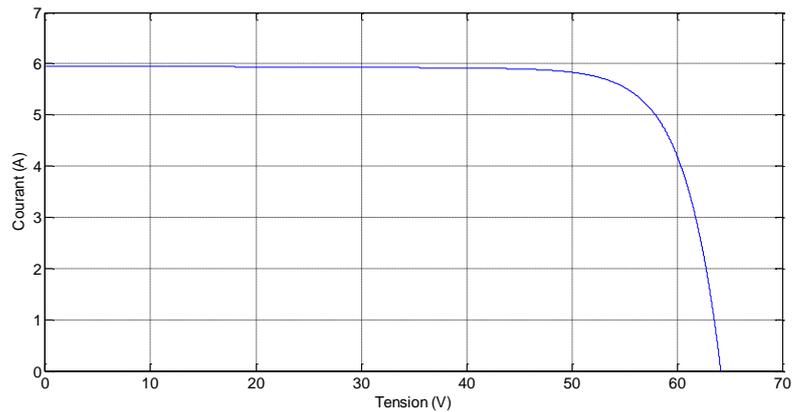


Figure II. 3 : Caractéristique courant-tension du GPV avec les conditions standards.

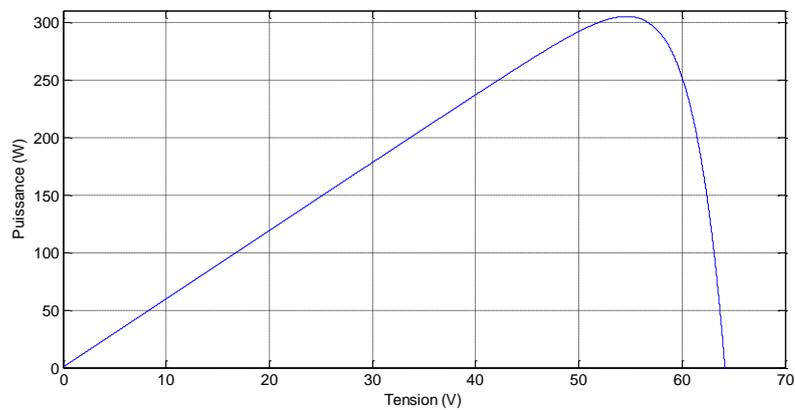


Figure II. 4 : Caractéristique puissance-tension du GPV avec les conditions standards.

II.3.1 Influence de l'éclairement sur les courbes $I_{pv}=f(V_{pv})$ et $P=g(V_{pv})$

Pour visualiser l'influence de l'éclairement, en faisant varier l'éclairement entre 250 w/m² et 1000 w/m² avec un pas de 250 avec une température fixe ($T=25^{\circ}\text{C}$), la caractéristique $I_{pv} = f(V_{pv})$ est donnée par la figure II.5.

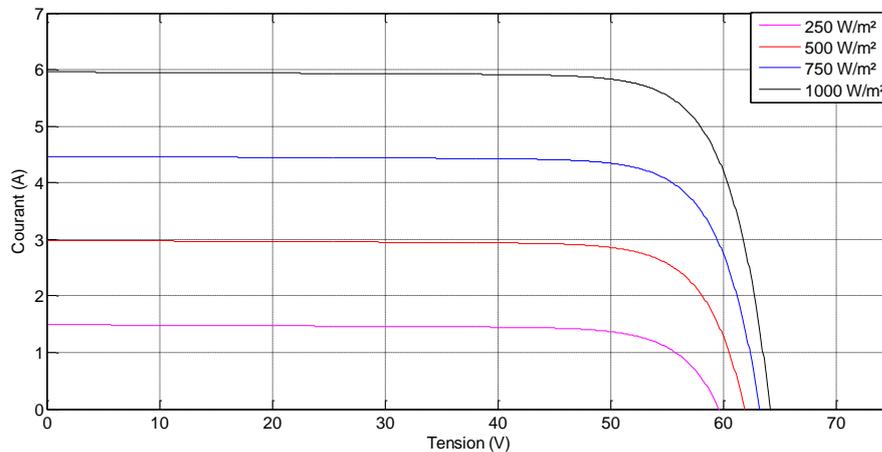


Figure II. 5 : Influence de variation de l'éclairement sur les caractéristiques I-V du GPV pour $T= 25^{\circ}\text{C}$.

On remarque que la valeur du courant de court-circuit est directement proportionnelle à l'éclairement. Par contre, la tension en circuit ouvert ne varie pas dans les mêmes proportions, elle reste quasiment identique même à faible éclairement.

Dans l'autre côté la caractéristique $P = g(V_{pv})$ est donnée par la figure II.6, on remarque que la valeur du courant de court-circuit est directement proportionnelle à l'éclairement.

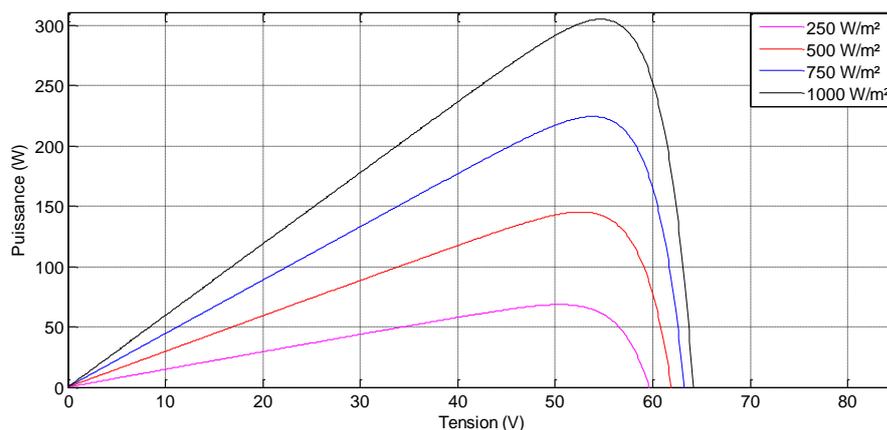


Figure II. 6 : Influence de la variation de l'éclairement sur les caractéristiques P-V du GPV pour $T= 25^{\circ}\text{C}$.

II.3.2 Influence de la température sur les courbes $I_{pv}=f(V_{pv})$ et $P=g(V_{pv})$

Les caractéristiques de courant et de la puissance en fonction de la tension du panneau photovoltaïque dans le cas où on fixe l'éclairement ($E=1000 \text{ W/m}^2$) et on varie la température avec les valeurs suivantes 0, 10, 25 et 50 °C, sont illustrées par les figures II.7 et II.8 respectivement.

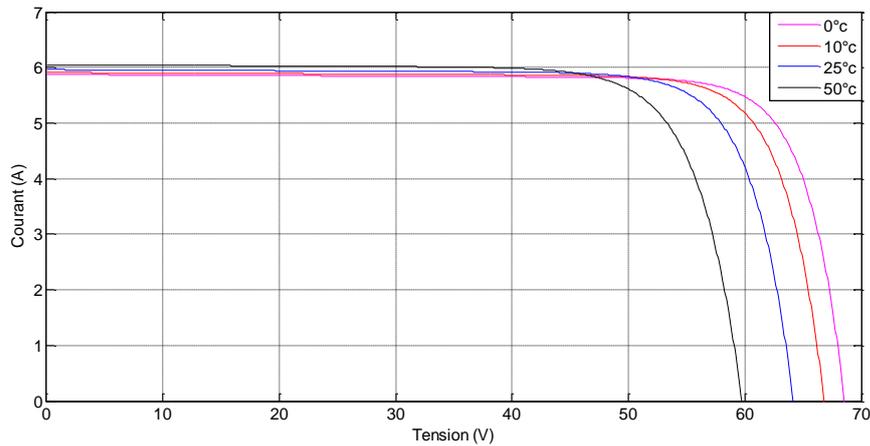


Figure II. 7 : Influence de la variation de température sur la caractéristique I-V de GPV pour $E=1000 \text{ W/m}^2$.

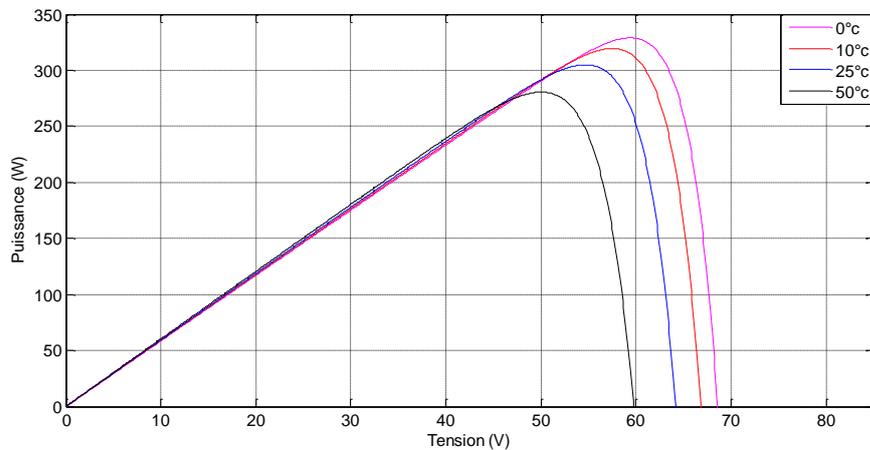


Figure II. 8 : Influence de la variation de température sur la caractéristique P-V de GPV pour $E=1000 \text{ W/m}^2$.

On remarque que la température a une influence négligeable sur la valeur du courant de court-circuit. Par contre, la tension en circuit ouvert baisse assez fortement lorsque la température augmente, par conséquent la puissance extractible diminue.

II.4 Convertisseur DC/DC (Hacheur)

Le hacheur est un convertisseur continue/continue permet de convertir une énergie continue à un niveau donné de tension (ou de courant) en une énergie continue à un autre niveau de tension (ou de courant). Son utilisation s'avère nécessaire pour stocker l'énergie photovoltaïque dans des batteries, ou pour alimenter une charge continue.

Le hacheur se compose de condensateurs, d'inductances et de commutateurs. Tous ces dispositifs dans le cas idéal ne consomment pas de puissance active, c'est la raison pour laquelle les hacheurs ont de bons rendements.

II.5 Hacheur Boost

Le convertisseur Boost est connu par le nom d'élévateur de tension peut être représenté par le circuit de la figure (II.9).

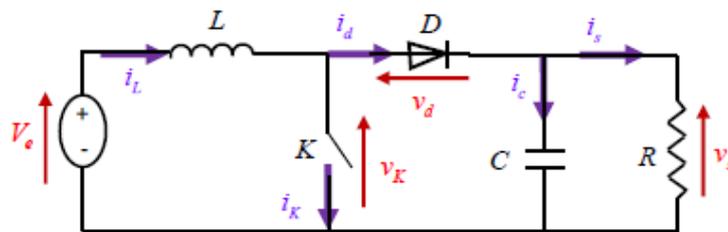


Figure II. 9 : Hacheur Boost.

C'est un convertisseur direct **DC-DC**. La source d'entrée est de type courant continu (inductance en série avec une source de tension) et la charge de sortie est de type tension continue (condensateur en parallèle avec la charge résistive). L'interrupteur **K** peut être remplacé par un transistor puisque le courant est toujours positif et que les commutations doivent être commandées (au blocage et à l'amorçage).

II.5.1 Fonctionnement

L'interrupteur **K** est fermé pendant la fraction αT de la période de découpage **T** ($0 < t < \alpha T$). Le courant traversant **L** va augmenter linéairement et une énergie sera stockée dans **L** voir la figure II.10.

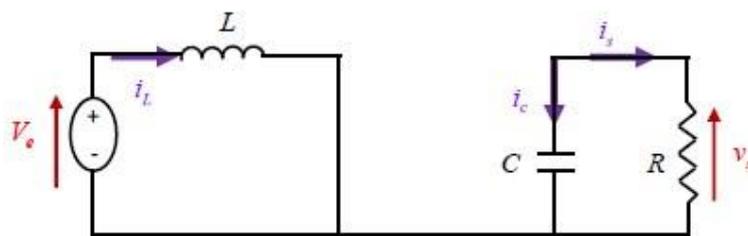


Figure II. 10 : Circuit équivalent du Boos quand l'interrupteur est fermé.

$$L \frac{di_L}{dt} = V_e \quad (\text{II.7})$$

$$i_L = I_{min} + \frac{V_e}{L} t \quad (\text{II.8})$$

Avec : I_{min} la valeur minimale du courant dans l'inductance à l'instant $t = 0$.

A l'instant : $t = \alpha T$, le courant dans l'inductance atteint sa valeur maximale I_{max}

$$I_{max} = I_{min} + \frac{V_e}{L} \alpha T \quad (\text{II.9})$$

Soit $\Delta i_L = I_{max} - I_{min}$ l'ondulation du courant dans la l'inductance.

De l'expression (II.7) on exprime l'ondulation de courant dans l'inductance :

$$\Delta i_L = \frac{\alpha V_e}{L} T = \frac{\alpha V_e}{L f} \quad (\text{II.10})$$

Avec :

f : la fréquence de découpage,

L : Valeur de l'inductance de lissage (H),

V_e : Tension aux bornes du générateur(V),

T : Période de découpage du signal de l'interrupteur $T = \frac{1}{f}$ en secondes (s),

α : Rapport cyclique du signal de l'interrupteur $\alpha = \frac{t_{on}}{T}$

i_L : Courant de l'inductance.

Pour tracer les formes d'ondes, dans l'instant ($0 < t < \alpha T$) on a :

$$\begin{cases} V_K(t) = 0 \\ i_d(t) = 0 \\ V_L(t) = V_e \end{cases} \quad (\text{II.11})$$

Lors du blocage du transistor ($\alpha T < t < T$), la diode D assure la continuité du courant dans l'inductance. L'énergie emmagasinée dans cette inductance est alors déchargée dans le condensateur et la résistance de la charge. Le circuit du convertisseur sera comme montré dans la figure (II.11).

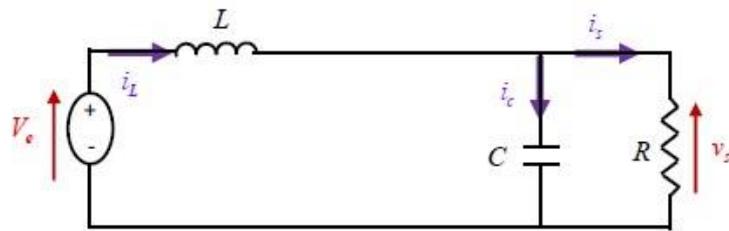


Figure II. 11 : Circuit équivalent du Boost quand l'interrupteur est ouvert.

$$L \frac{di_L}{dt} = V_e - V_s \quad (\text{II.12})$$

$$i_L = I_{max} + \frac{V_e - V_s}{L} (t - \alpha T) \quad (\text{II.13})$$

En faisant l'égalité des valeurs de l'ondulation du courant tirées des équations (II.8) et (II.12), on peut déduire la valeur moyenne de la tension de sortie V_s :

$$V_s = \frac{1}{1 - \alpha} V_e \quad (\text{II.14})$$

On remarque qu'on peut contrôler la tension de sortie du convertisseur en faisant varier sa tension d'entrée ou son rapport cyclique. Ce dernier étant toujours compris entre 0 et 1, alors le montage fonctionne en élévateur de tension.

En appliquant le principe de conservation de puissance entre l'entrée et la sortie du convertisseur, on peut établir la valeur moyenne du courant dans l'inductance en fonction du courant moyen dans la charge et du rapport cyclique :

$$I_L = \frac{1}{1 - \alpha} I_s \quad (\text{II.15})$$

Pendant la première séquence de fonctionnement ($0 < t < \alpha T$), seul le condensateur donne de l'énergie à la charge, on peut écrire :

$$C \frac{dv_s}{dt} = -i_s \quad (\text{II.16})$$

Dans la fraction ($\alpha T < t < T$), on a :

$$\begin{cases} V_K(t) = V_s \\ i_K(t) = 0 \\ V_L(t) = V_e - V_s \end{cases} \quad (\text{II.17})$$

Avec :

V_s Tension de sortie du convertisseur (V),

i_s Courant de sortie du convertisseur (A).

Les formes d'ondes en conduction continue sont représentées à la figure (II.12), en régime permanent, la valeur moyenne de la tension aux bornes de l'inductance est nulle.

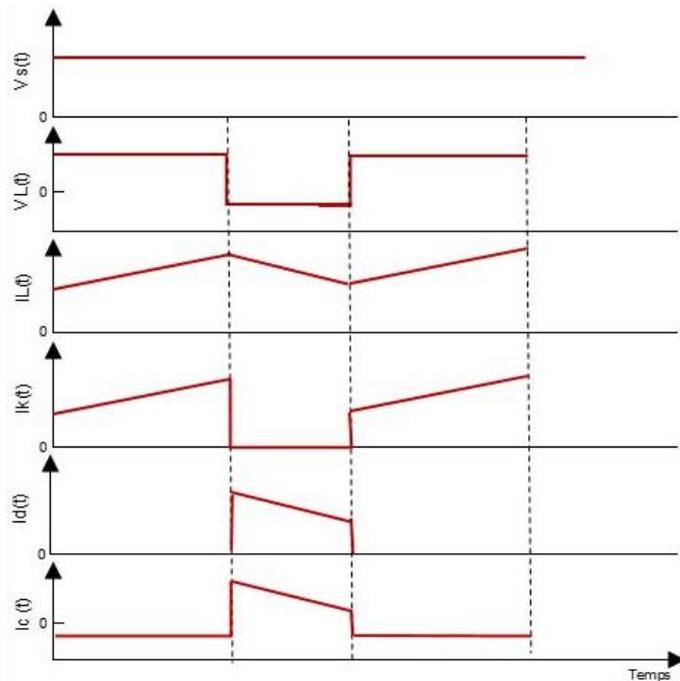


Figure II. 12 : Formes d'ondes des courants et tensions du convertisseur Boost.

II.5.2 Détermination des paramètres du hacheur Boost

L'inductance de lissage L est utilisée pour limiter l'ondulation du courant dans le convertisseur et dans la source V_e . Le condensateur de filtrage permet de limiter les ondulations de tension dues au découpage en sortie du convertisseur.

II.5.2.1 Calcul de l'inductance L

L'ondulation de courant dans l'inductance est calculée en considérant la tension de sortie continue, c'est-à-dire en négligeant l'ondulation de tension vis-à-vis de la valeur moyenne (figure II.13).

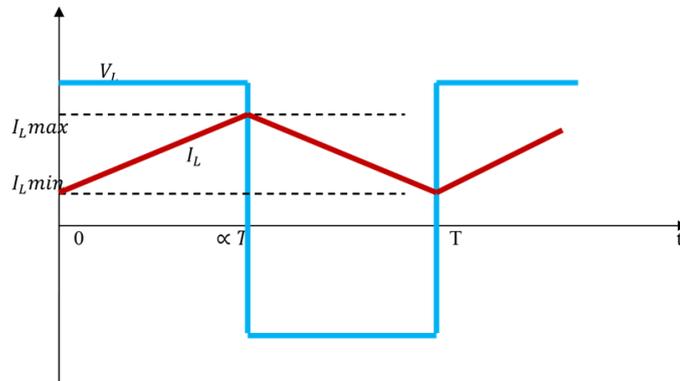


Figure II. 13 : Ondulation du courant.

Calculons l'ondulation du courant pour $0 \leq t \leq \alpha T$

$$V_L(t) = \frac{V_e}{L} + I_{L \min} \quad (\text{II.18})$$

En $t = \alpha T$

$$I_L(\alpha T) = \frac{V_e}{L} \alpha T + I_{L \min} \quad (\text{II.19})$$

$$I_L(\alpha T) = I_{L \max} \quad (\text{II.20})$$

D'où :

$$\Delta I_L = I_{L \max} - I_{L \min} \quad (\text{II.21})$$

$$\Delta I_L = \frac{V_e}{L \cdot f} \alpha \quad (\text{II.22})$$

A partir de (II.14 et II.22) nous pouvons écrire :

$$\Delta I_L = \frac{\alpha(1-\alpha)}{L \cdot f} V_s \quad (\text{II.23})$$

Où :

$I_{L \min}$ Courant minimum dans l'inductance(A),

$I_{L \max}$ Courant maximum dans l'inductance(A).

II.5.2.2 Calcul du condensateur C

Ce condensateur doit pouvoir tenir le courant à fournir lors des pics de puissance, l'ondulation de tension en sortie résulte du courant alternatif dans le condensateur voir (II.14).

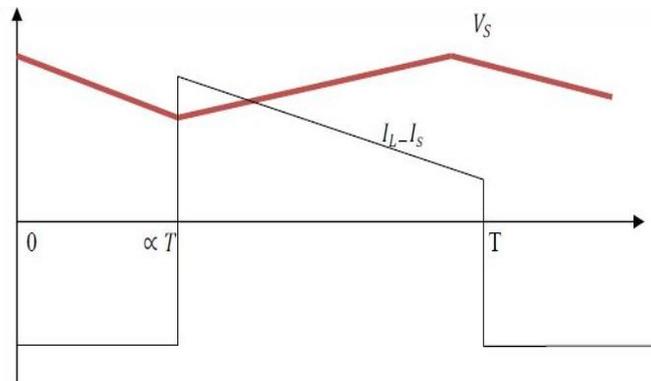


Figure II. 14 : Ondulation de tension.

Calculons l'ondulation de la tension pour $0 \leq t \leq \alpha T$

$$V_s(t) = V_{smax} - \frac{i_s}{c} t \quad (\text{II.24})$$

En $t = \alpha T$

$$V_s(\alpha T) = V_{smax} - \frac{i_s}{c} \alpha T \quad (\text{II.25})$$

D'où :

$$\Delta V_s = V_{smax} - V_{smin} = \frac{i_s}{cf} \alpha \quad (\text{II.26})$$

A partir de II.15 et II.26 nous pouvons écrire :

$$\Delta V_s = \frac{\alpha(1 - \alpha)}{c.f} \quad (\text{II.27})$$

Où :

C : valeur du condensateur de filtrage (F).

V_{smin} : Tension minimum aux bornes de condensateur(V).

V_{smax} : Tension maximum aux bornes de condensateur(V).

ΔV_s : Ondulation de tension aux bornes de condensateur(V).

La capacité du condensateur est calculée en fonction de l'ondulation maximale de la tension souhaitée.

II.6 Modèle Simulink du Hacheur Boost

Dans l'environnement Simulink de Matlab nous avons vérifié que le hacheur Boost permet d'élever la tension (figure II.15), pour les paramètres suivantes ($V_e=100V$, $L=0.00175H$, $R=15$, $C=0.0022$, $\alpha=50\%$) nous obtenons les résultats montrés dans les figures II.16 à II.18

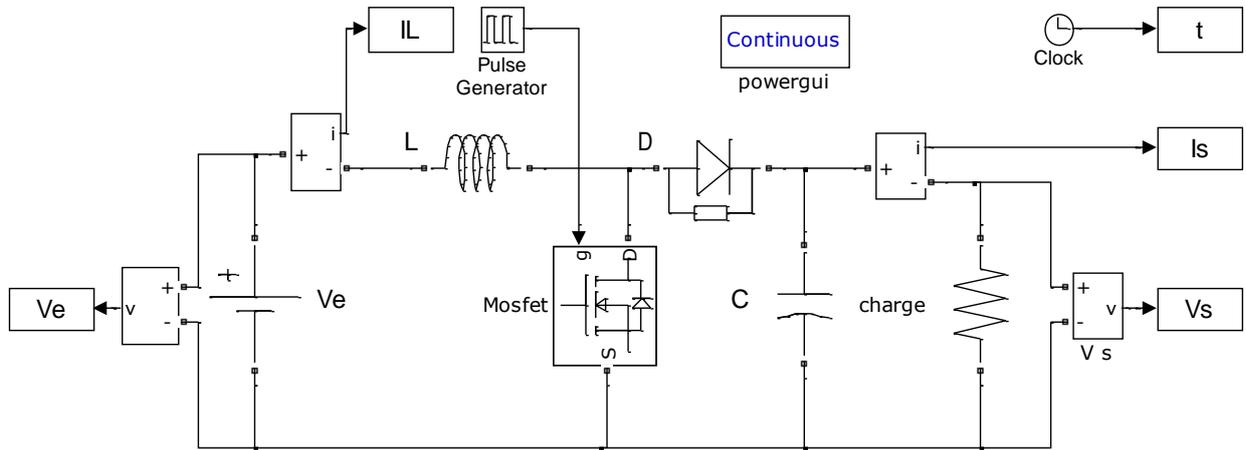


Figure II. 15: Schéma block Simulink du Hacheur Boost.

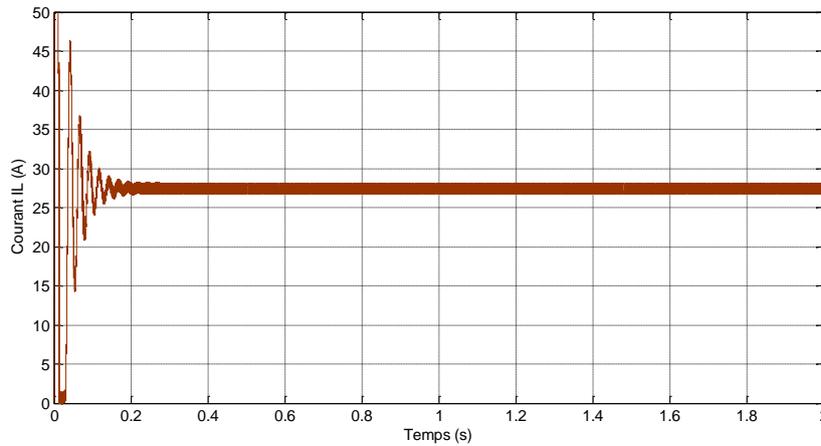


Figure II. 16: Courant de l'inductance.

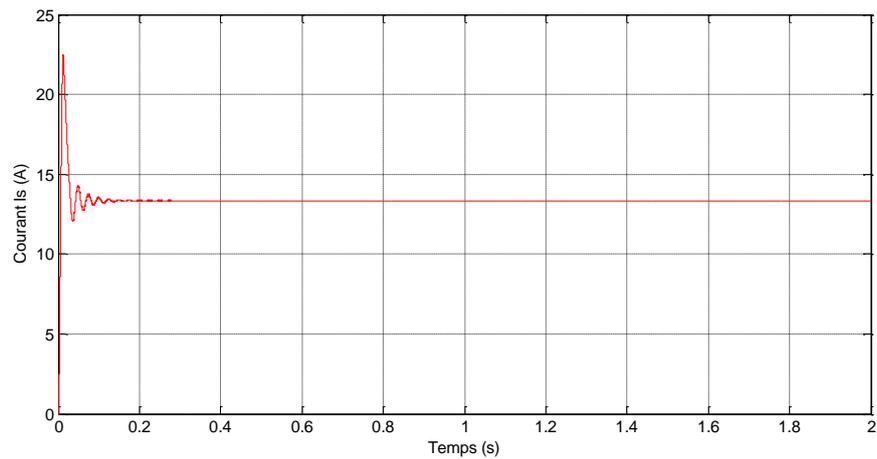


Figure II. 17 : Courant de sortie du hacheur Boost.

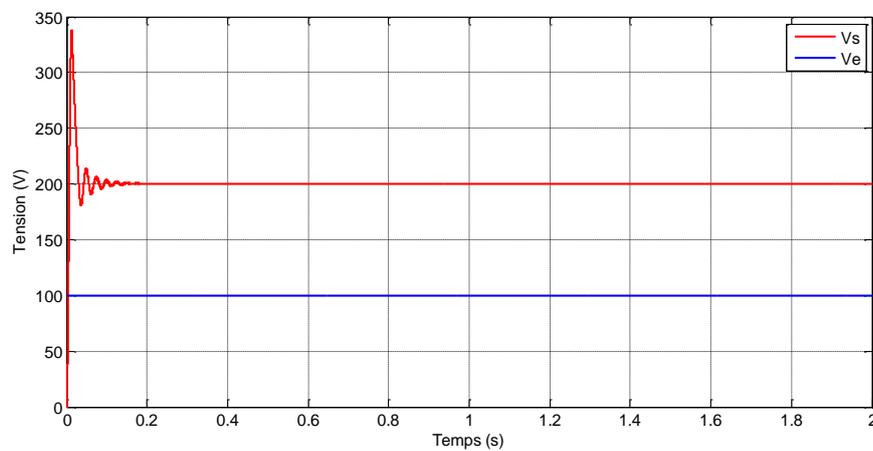


Figure II. 18 : Tension d'entrée et de sortie du Boost.

Les résultats de simulation montrent que le convertisseur Boost a effectué son rôle correctement par l'augmentation de la tension de sortie par rapport à la tension d'entrée, par contre le courant de sortie est inférieur à l'entrée.

II.7 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté la modélisation et la simulation d'un générateur photovoltaïque et d'un hacheur survolteur (Boost). Après, nous avons étudié l'influence de l'éclairement et de la température sur un module PV.

Aussi, nous avons présenté le circuit électrique et le principe de fonctionnement du hacheur Boost. Les résultats de simulation obtenus confirment le fonctionnement correct puisque'il fournit dans les conditions optimales une tension de sortie supérieure à celle d'entrée.

Dans le chapitre prochain, on présentera les différentes techniques de commande MPPT classique et intelligentes qui sont appliquées au convertisseur survolteur (Boost) pour maximiser la puissance.

Chapitre III : Contrôle intelligent appliqué à la MPPT.

III.1 Introduction

Les lois de commandes spécifiques existent pour amener des dispositifs à fonctionner à des points maximums de leurs caractéristiques sans que ces points soient connus à l'avance, ou à quel moment ils ont été modifiés. Pour le cas de sources énergétiques, cela se traduit par des points de puissance maximum. Ce type de commande est appelé dans la littérature « Recherche du Point de Puissance Maximum » ou bien « Maximum Power Point Tracking » en anglo-saxon (MPPT).

Le principe de ces commandes est d'effectuer une recherche du point de puissance maximal (PPM) tout en assurant une parfaite adaptation par le hacheur Boost entre le générateur et sa charge de façon à transférer le maximum de puissance, on a vu dans le chapitre précédent que les caractéristiques d'un générateur photovoltaïque dépendent de l'éclairement solaire et de la température. Ces variations climatiques entraînent des fluctuations du point de puissance maximal [20].

Dans ce chapitre nous allons étudier la connexion directe entre le générateur photovoltaïque et la charge grâce au convertisseur Boost contrôlé par des techniques de commande MPPT classique (P&O, Hill Climbing et Conductance Incrémentale) puis par l'application du contrôles intelligents où deux stratégies seront proposée à savoir la MPPT floue et la MPPT neuro-floue.

III.2 Technique MPPT

Les cellules photovoltaïques sont utilisées pour fournir de l'énergie dans de nombreuses applications électriques. Pour obtenir la puissance maximale du panneau solaire, un suiveur du point de puissance maximum (MPPT : Maximum Power Point Tracking) est utilisé pour la commande du hacheur [21]. Cette technique a été développée depuis 1968, elle est essentielle pour un fonctionnement optimal du système photovoltaïque. Par conséquent, plusieurs travaux ont porté sur les systèmes photovoltaïques et ont essayé de développer des algorithmes permettant d'extraire le maximum d'énergie convertie par le panneau [22].

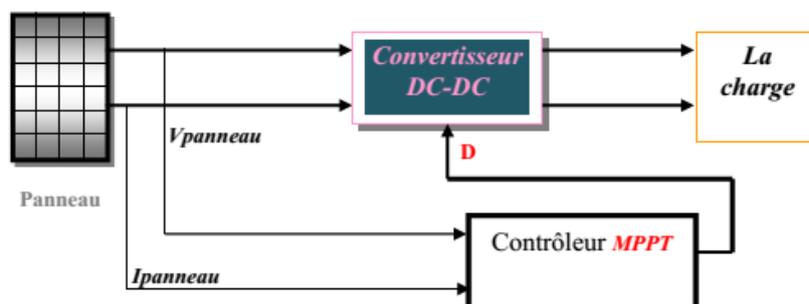


Figure III. 1 : Schéma de principe du convertisseur MPPT.

III.2.1 Principe de la Recherche du MPP

Ce principe assure que le système sera toujours amené à son optimum de puissance est décrit schématiquement par la figure (III.2).

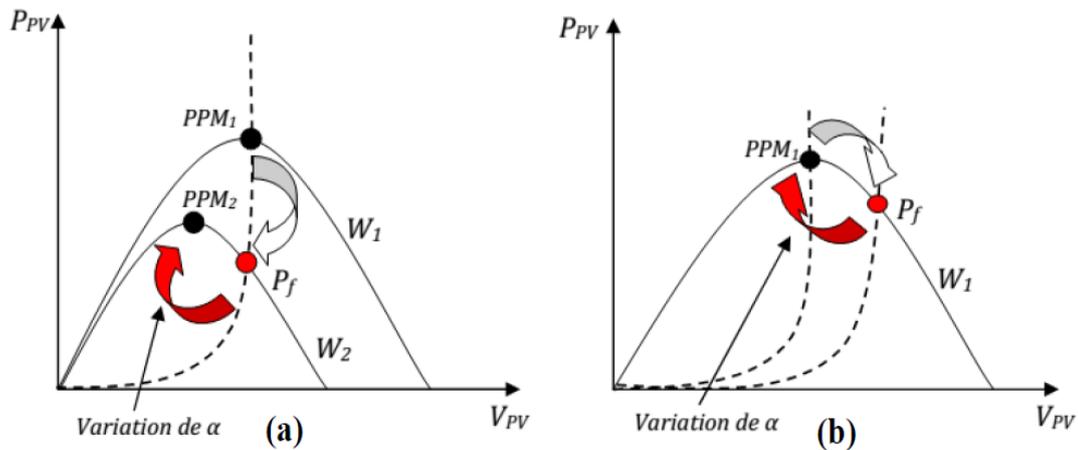


Figure III. 2 : Fluctuation du PPM avec l'intensité d'éclairage (a) et la charge R (b).

La puissance incidente W_1 n'est maximale que pour un rapport cyclique optimal (α_{1opt} : point PPM1 sur la figure (III.2_a)). Une variation de W_1 à W_2 mené, conséquemment, le fonctionnement du système au point de fonctionnement P_f , alors, assurer une puissance maximale au nouveau point PPM2 exige d'ajuster le rapport cyclique à la valeur α_{2opt} :

De même, une variation de la charge R figure (III.2_b) : le point de puissance maximale dévie d'abord de sa position optimale (PPM1) et donc pour revenir vers ce même PPM1, il faut agir sur le rapport cyclique « α ». De cette manière, le système sera toujours amené à son optimum de puissance [23].

La comparaison des P_a et P_b mesurées respectivement aux instants $(t - 1)$ et (t) , permet de chercher le point de la puissance maximale, figure (III.3) en incrémentant ou diminuant le rapport cyclique α . Si la dérivée est positive ($P_a < P_b$), cela signifie que nous nous rapprochons du PPM en incrémentant α , et si la dérivée de la puissance est négative ($P_a > P_b$), cela veut dire que nous l'avons dépassé nous devons décrémente α .

Une fois α modifié, P_a prend la valeur P_b et on effectue une nouvelle mesure de I_{pv}, V_{pv} pour calculer la nouvelle puissance P_b .

III.3 Méthodes MPPT Classiques

III.3.1 Méthode perturber et observer (P&O)

D'après les recherches scientifiques, la méthode Perturber & Observer (P&O) est la plus adaptée dans le domaine du photovoltaïque. Cette dernière est une approche largement répandue pour la détermination du point PPM., ce dernier utilise comme entrée les valeurs de la tension V du panneau et le courant I du panneau, et comme sortie soit la valeur de la tension de référence V_{ref} soit le rapport cyclique. Comme son nom indique la méthode de P&O, fonctionne par la perturbation du système soit par l'augmentation ou la diminution de la tension de fonctionnement et d'observer son impact sur la puissance de sortie du panneau. D'après la figure III.3, si une incrémentation positive de la tension V_{pv} engendre une augmentation de la puissance P_{pv} cela signifie que le point de fonctionnement se trouve à gauche du PPM, donc on devrait continuer dans la même direction pour atteindre le PPM. Si au contraire, cela implique que le système a déjà dépassé le MPP, donc la perturbation devrait être inversée. Un raisonnement similaire peut être effectuée lorsque la tension décroît. Il est alors facile de situer le point de fonctionnement par rapport au PPM sur la caractéristique $P_{pv}(V_{pv})$ et de faire converger ce dernier vers le maximum de puissance à travers un ordre de commande adapté. Le premier inconvénient de cette méthode est que l'on impose toujours une oscillation autour du PPM. En effet, cette oscillation est nécessaire pour connaître les variations de la puissance de sortie du générateur et ainsi réajuster le rapport cyclique du convertisseur en faisant en sorte que le point de fonctionnement oscille le plus près possible du PPM, même si les conditions de fonctionnement sont inchangées [1, 24].

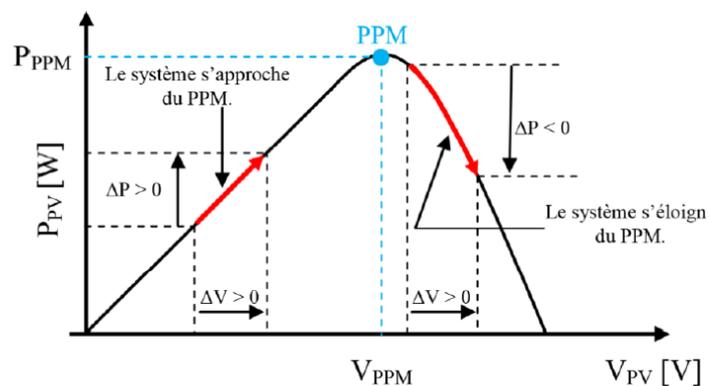


Figure III. 3 : Principe de la méthode P&O

La puissance du PV doit être déterminée à chaque instant dans ce type de commande. La P&O est aujourd'hui largement utilisée de par sa facilité d'implémentation. Ce type de commande permet d'obtenir un rendement plus important durant une journée relativement ensoleillée, où le PPM évolue lentement et proportionnellement avec le soleil. Par contre, pour une journée avec de forts et fréquents changements d'irradiations, cette commande présente beaucoup plus de pertes, en raison du temps de réponse de la commande pour atteindre le nouveau PPM [1].

III.3.1.1 Organigramme Perturber et Observer (P&O)

La figure III.4 montre l'organigramme de l'algorithme de la méthode 'P&O', d'après cette figure, la tension et le courant V_{pv} et I_{pv} , sont mesurés pour calculer la puissance de sortie du GPV $P_{pv}(k)$ de la rangée. Cette valeur $P_{pv}(k)$ est comparée à la valeur $P_{pv}(k-1)$ de la dernière mesure. Si la puissance de sortie a augmenté, la perturbation continuera dans la même direction. Si la puissance a diminué depuis la dernière mesure, la perturbation de la tension de sortie sera renversée en direction opposée du dernier cycle [25].

Si $\Delta P = P(k) - P(k-1) > 0$ et si $\Delta V = V(k) - V(k-1) > 0$, on diminue le rapport cyclique $D(k)$; Sinon on augmente $D(k)$.

Si $\Delta P < 0$ et si $\Delta V > 0$, on augmente le rapport cyclique $D(k)$; si $\Delta V < 0$, on diminue $D(k)$.

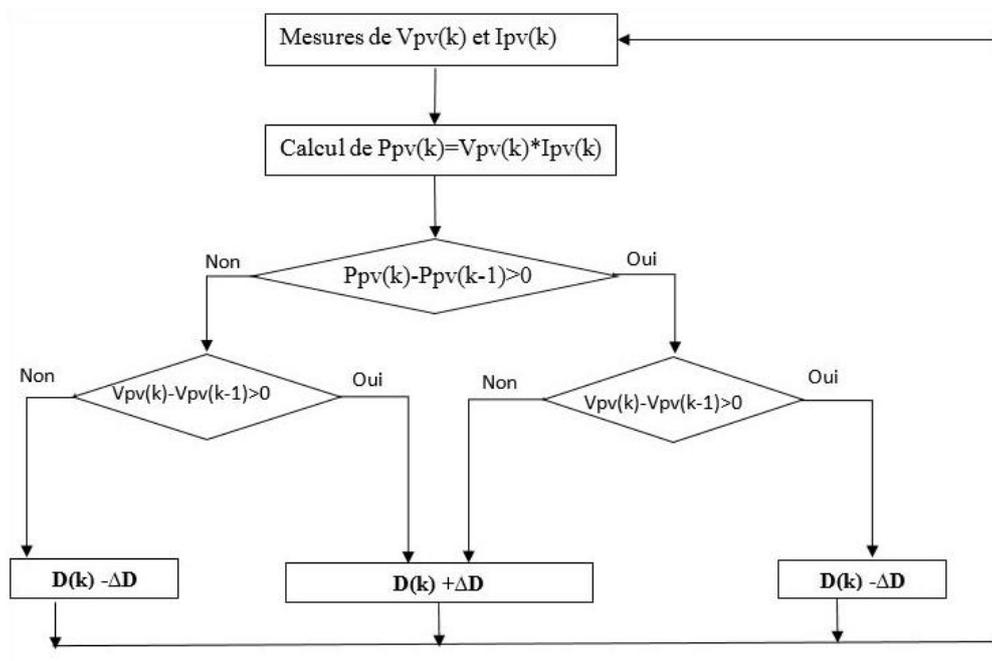


Figure III. 4 : Algorithme de P&O classique.

III.3.1.2 Avantages et inconvénients de P&O

Avantages

- Structure de régulation simple
- Nombre des paramètres mesures réduit

Inconvénients

- Dépassement du point maximum optimal en cas de changement rapide des conditions atmosphériques.

III.3.2 Méthode de Hill Climbing

La technique de contrôle nommée Hill Climbing est basée sur la caractéristique $P(\alpha)$ qui présente un maximum à $\frac{dP}{d\alpha} = 0$ comme le montre la figure III.5

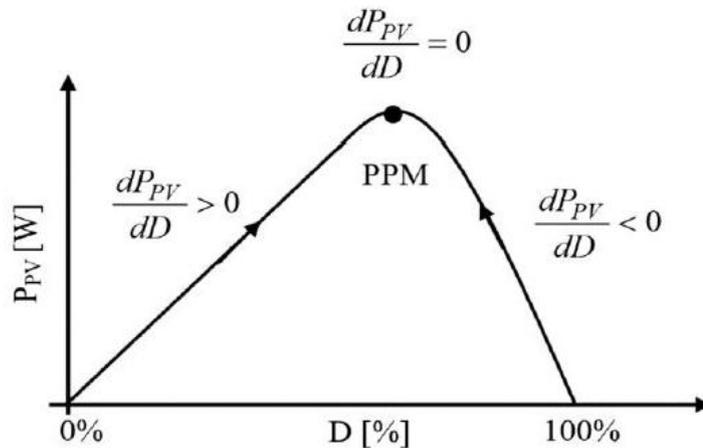


Figure III. 5 : Relation entre la puissance du GPV et le rapport cyclique du convertisseur statique.

Le principe de la commande « Hill Climbing » consiste à perturber le rapport cyclique à faire déplacer le point de fonctionnement le long de la caractéristique du générateur présentant un maximum. La recherche s'arrête théoriquement quand le point de puissance maximal est atteint [26].

III.3.2.1 Organigramme Hill Climbing

L'algorithme de cette méthode est illustré sur la figure III.6 La variable $sens(n)$ correspond à une variable qui prend le signe « 1 » ou « -1 » suivant la direction que l'on doit donner à la recherche pour augmenter la puissance en sortie du panneau symbolise la variable d'incrément du rapport cyclique. Périodiquement, la puissance $P_{pv}(n)$ est comparée à la valeur déterminée précédemment $P_{pv}(n - 1)$. En fonction du résultat de la comparaison, le signe de la valeur $sens(n)$ change ou reste identique. Ce qui a pour effet d'incrémenter ou de décrémenter la valeur du rapport cyclique. Une fois le PPM atteint, le système oscille autour de ce dernier indéfiniment rejoignant [27].

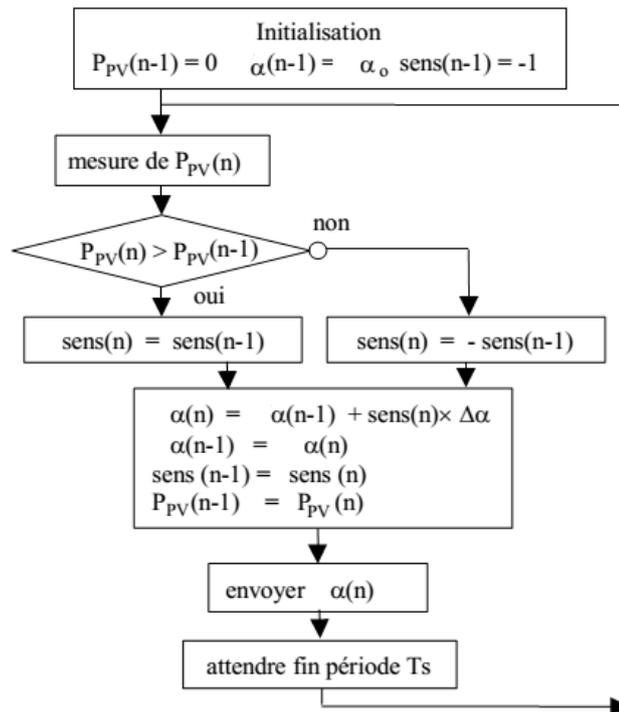


Figure III. 6 : Algorithme type de la commande Hill Climbing.

III.3.2.2 Avantages et inconvénients de Hill Climbing

Avantages

- Simple à mettre en œuvre.

Inconvénients

- Oscillations autour du PPM en régime établi,
- Perte occasionnelle de la recherche du PPM lors de changement rapide des conditions climatiques.

III.3.3 Méthode conductance incrémental

Cette technique est basée sur la connaissance de la variation de conductance du GPV et des conséquences sur la position du point de fonctionnement par rapport à un PPM. Ainsi, la conductance du module photovoltaïque est définie par le rapport entre une variation élémentaire de courant et la tension du GPV. ($dG = dI/dV$) [28].

III.3.3.1 Organigramme d'incrémental de la conductance

L'algorithme d'incrémental de la conductance est basé sur le fait que le point de puissance maximale (MPP) n'est atteint que si dP/dV est nulle. Les caractéristiques du module photovoltaïque sur la figure III.7 prouvent plus loin que la dérivée est supérieure à zéro à gauche du MPP et inférieure à zéro à droite du MPP. Ceci mène à l'ensemble d'équations suivant :

$$\left(\frac{dP}{dt}\right) = 0 \quad \text{pour} \quad V = V_{mpp} \quad (\text{III.1})$$

$$\left(\frac{dP}{dt}\right) > 0 \quad \text{pour} \quad V < V_{mpp} \quad (\text{III.2})$$

$$\left(\frac{dP}{dt}\right) < 0 \quad \text{pour} \quad V > V_{mpp} \quad (\text{III.3})$$

Sachant que $P=I \times V$ la dérivée du produit par rapport V et I donne la relation suivante :

$$\frac{dP}{dV} = \frac{d(V \times I)}{dV} = V \cdot \frac{dI}{dV} + I \cdot \frac{dV}{dV} \quad (\text{III.4})$$

$$\frac{dP}{dV} = V \cdot \frac{dI}{dV} + I \quad (\text{III.5})$$

A partir de III.1 et III.5 en peut écrire :

$$\frac{dI}{dV} = -\frac{I}{V} \quad (\text{III.6})$$

Les changements par accroissement nécessaires dV et dI sont obtenus en comparant les valeurs mesurées les plus récentes pour V et I à ceux mesurées durant le cycle précédent :

$$dV(k) = V(k) - V(k-1) \quad (\text{III.7})$$

$$dI(k) = I(k) - I(k-1) \quad (\text{III.8})$$

La fonction centrale pour trouver le MPP utilise les conditions suivantes :

$$I + V \cdot \frac{dI}{dV} = 0 \quad (\text{III.9})$$

$$I + V \cdot \frac{dI}{dV} > 0 \quad (\text{III.10})$$

Si la relation (III.9) est vraie, le MPP est atteint et aucun changement de la tension $V(k)$ n'est nécessaire. Si la relation (III.10) est fautive, selon que $V(k)$ est supérieure ou inférieure à V_{mpp} , la tension $V(k)$ est ajustée en conséquence.

Si le système fonctionnait au MPP pendant le cycle précédent, le changement par accroissement de la tension de fonctionnement serait zéro ($dV(k)=0$). Ceci mènerait à une

division par l'erreur zéro. Si $=0$, l'ajustement de la tension du système est évité. Si $\neq 0$, les équations (III.9) et (III.10) sont employées pour déterminer si le système fonctionne au-dessus ou au-dessous de V_{mpp} et un ajustement correspondant à la tension de fonctionnement sera réalisé en conséquence.

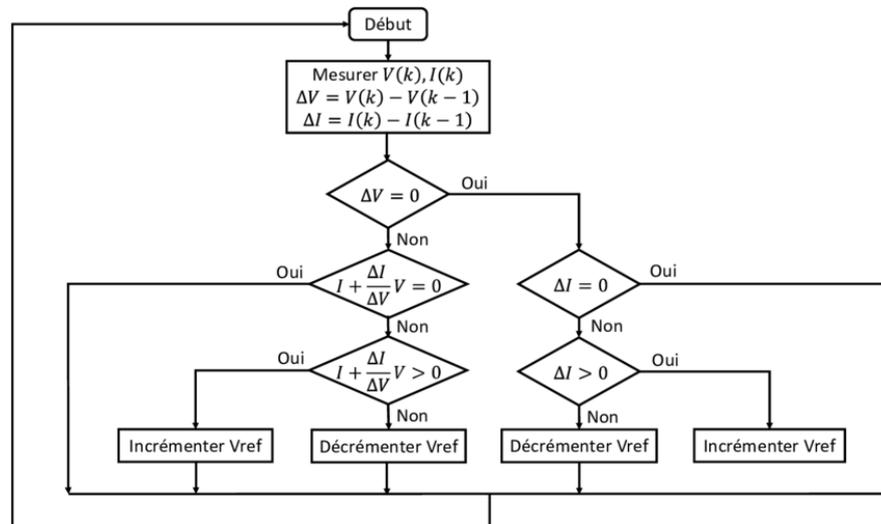


Figure III. 7 : Organigramme de l'algorithme MPPT de l'incrémentale de la conductance.

III.3.3.2 Avantages et inconvénients

L'avantage principal de cet algorithme est qu'il offre un bon rendement même sous un changement rapide des conditions atmosphériques. En outre, il réalise l'oscillation inférieure autour du MPP que la technique de P&O.

L'inconvénient est que le circuit de commande est complexe et très coûteux [21].

III.4 Techniques MPPT intelligentes

Ces dernières années des techniques de commandes plus robuste ont été associées à la commande MPPT telle que la logique floue, réseaux de neurones et les système neuro-flous.

III.4.1 MPPT à base de logique floue

La commande par logique floue a été utilisée dans les systèmes de poursuite du point maximum de puissance MPPT, cette commande offre l'avantage d'être une commande robuste, relativement simple à élaborer et elle ne nécessite pas la connaissance exacte du modèle à réguler [29]. La mise en place d'un contrôleur flou se réalise en trois étapes, qui sont : la fuzzification, l'inférence et la défuzzification.

Le principe général et la théorie de base de la logique floue est la description d'un phénomène qui contient en général des expressions floues comme : Chaud, froid. Rapide, lent. Grand, moyen, petit. Max, min. Positive, nulle, négative...etc.

Les éléments constituant la théorie de base de la logique floue sont : Les variables linguistiques et les ensembles flous, les fonctions d'appartenance [30].

Un contrôleur flou sous sa forme générale remplace le contrôleur classique dans une boucle de régulation, il est considéré comme étant un système expert. Ce contrôleur est constitué de quatre blocs principaux (figure III.8) :

- Fuzzificateur,
- Base de connaissances floues,
- Engine d'inférence floues,
- Defuzzificateur.

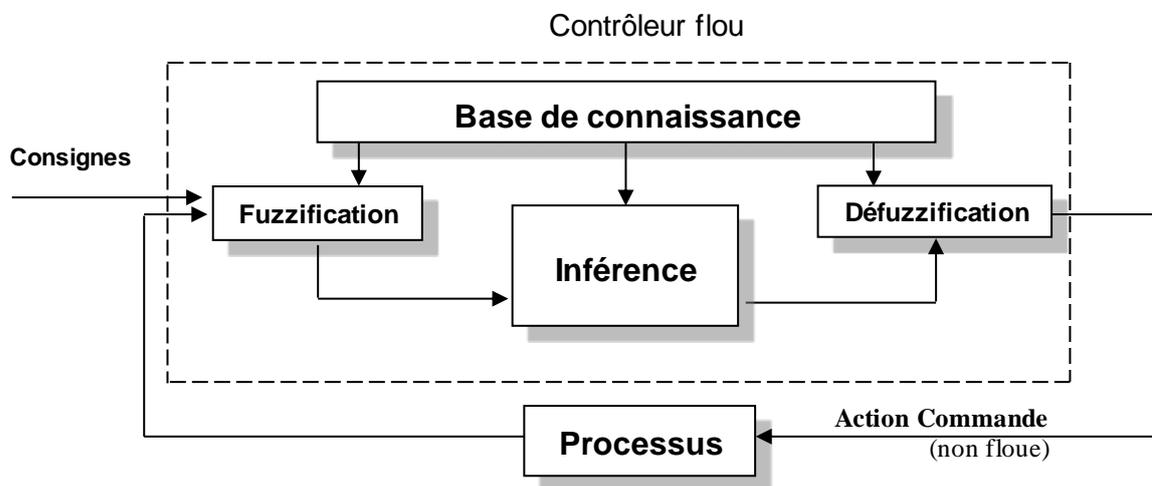


Figure III. 8 : Structure générale d'un système flou.

III.4.2 Avantages et inconvénients de la logique floue

Avantages

- Théorie simple et s'applique à des systèmes complexes,
- Pas de modèles mathématiques requis du procédé à asservir,
- Possibilités de commande auto-adaptative aux variations du procédé.

Inconvénients

- Technique de réglage essentiellement empirique,
- Performances dépendent de l'expertise,
- Il n'existe pas de théorie générale qui caractérise rigoureusement la stabilité, la robustesse (difficultés de certification dans le transport, espace...) [31].

III.4.3 MPPT floue proposée.

Dans notre travail, la MPPT floue proposée est basée sur un système flou avec deux d'entrées et une sortie, les variables d'entrée du contrôleur flou sont l'erreur $e(k)$ et la variation de l'erreur $\Delta e(k)$ c'est deux variables sont données par les équations (III.11) et (III.12) tandis que la variable de sortie du contrôleur Fuzzy est la variation du pas (ΔD) pour ajuster le rapport cyclique.

$$e(k) = \frac{P_{pv}(k) - P_{pv}(k-1)}{V_{pv}(k) - V_{pv}(k-1)} \quad (\text{III.11})$$

$$\Delta e(k) = e(k) - e(k-1) \quad (\text{III.12})$$

Les fonctions d'appartenance des variables d'entrées et de sorties utilisées dans ce modèle sont données par les figures (III.9) et (III.10). Toutes les fonctions d'appartenance sont de forme triangulaire et se composent de cinq ensembles flous qui sont notes NG (Négative Grande), NP (Négative Petite), ZE (zéro), PP (Positive Petite) et PG (Positive Grande). La base de règles floues est une collection de règles si-alors que toutes les informations sont disponibles pour les paramètres contrôles. Puisque le nombre de fonctions d'appartenance de chaque entrée est 5, alors les règles d'inférence floue du FLC consistent en 25 règles illustrées dans le tableau (III.1). Ces règles sont utilisées pour déterminer la sortie du contrôleur afin de suivre le point de puissance maximale. La méthode de Mamdani est utilisée comme une méthode d'interface floue avec l'opération max-min combinée à la loi floue dans ce travail. La sortie du Fuzzy propose est défuzzifier pour calculer ΔD .

Tableau III. 1: Les règles utilisées pour déterminer la sortie ΔD [32].

| e \ Δe | | NG | NP | ZE | PP | PG |
|---|--|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| NG | | ZE | PG | PG | PG | PG |
| NP | | PG | PP | PP | ZE | ZE |
| ZE | | PP | ZE | ZE | ZE | NP |
| PP | | ZE | ZE | NP | NP | NG |
| PG | | PG | ZE | NP | NG | ZE |

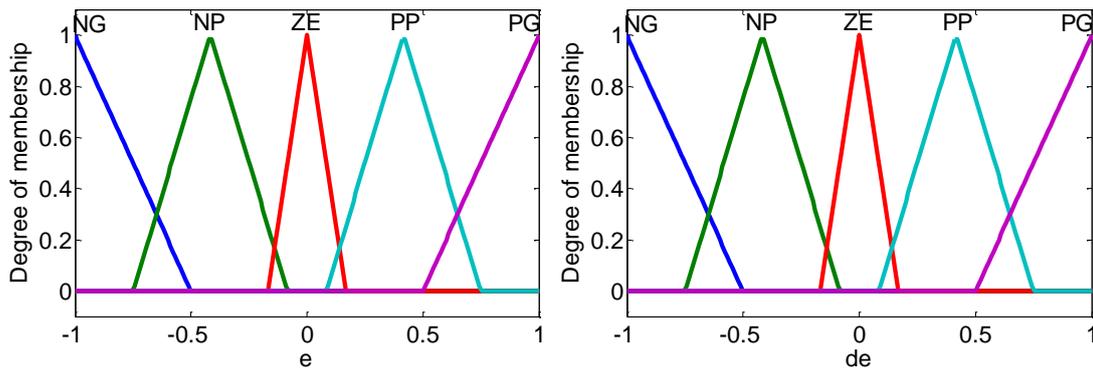


Figure III. 9 : Les fonctions d'appartenances des entrées.

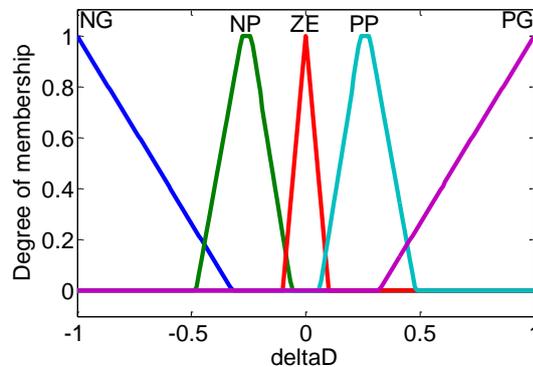


Figure III. 10 : Les fonctions d'appartenances de sortie.

III.4.4 MPPT à base de techniques neuro-floues.

Pendant que les réseaux neuronaux sont intéressants pour reconnaître des modèles, ils ne peuvent pas expliquer comme ils atteignent leurs décisions. De même pour les systèmes de la logique floue qui peuvent raisonner avec l'information imprécise, est intéressants pour expliquer leurs décisions mais ne peuvent pas automatiquement acquérir les règles qu'ils utilisent pour prendre ces décisions. Pour cela, une approche a été développée qui est principalement connu comme approche Neuro-Floue [33].

III.4.4.1 Réseaux de neurones

Les réseaux de neurones artificiels sont des réseaux fortement connectés de processeurs élémentaires fonctionnant en parallèle. Chaque neurone artificiel reçoit un nombre variable d'entrées en provenance de neurones amont. A chacune de ces entrées est associé un poids w abréviation de weight (poids en anglais) représentatif de la force de la connexion. Chaque

processeur élémentaire est doté d'une sortie unique, qui se ramifie ensuite pour alimenter un nombre variable de neurones aval. A chaque connexion est associé un poids (voir la figure III.11) [34].

Les réseaux de neurones sont des puissants calculateurs, tolérants aux pannes et leurs habilités d'apprendre et généraliser leurs connaissances les rendent des outils très efficace.

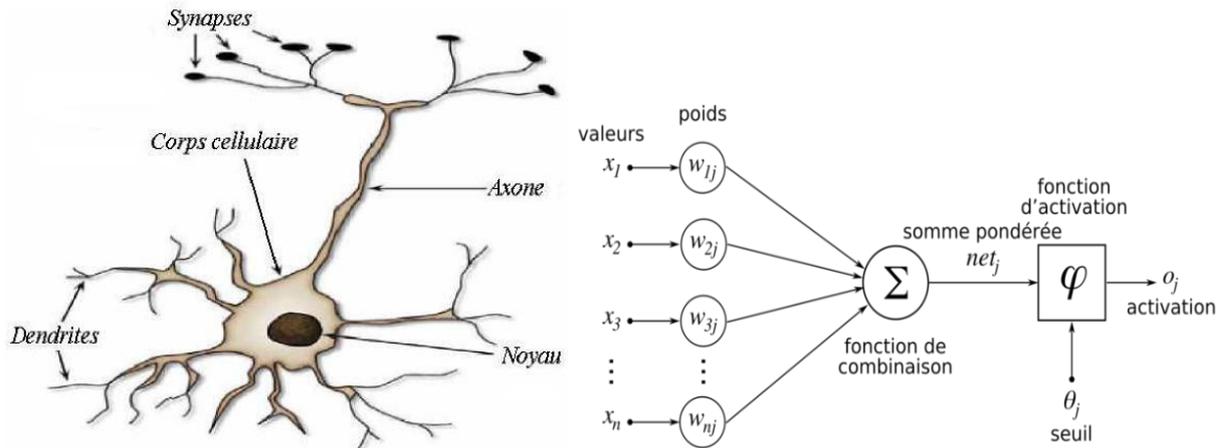


Figure III. 11 : Neurone biologique et neurone formel.

La fonction d'activation (ou fonction de seuillage, ou encore fonction de transfert) sert à introduire une non-linéarité dans le fonctionnement du neurone.

Les fonctions de seuillage (exemple voir figure III.12) présentent généralement trois intervalles:

1. En dessous du seuil, le neurone est non-actif (souvent dans ce cas, sa sortie vaut 0 ou -1).
2. Aux alentours du seuil, une phase de transition.
3. Au-dessus du seuil, le neurone est actif (souvent dans ce cas, sa sortie vaut 1).

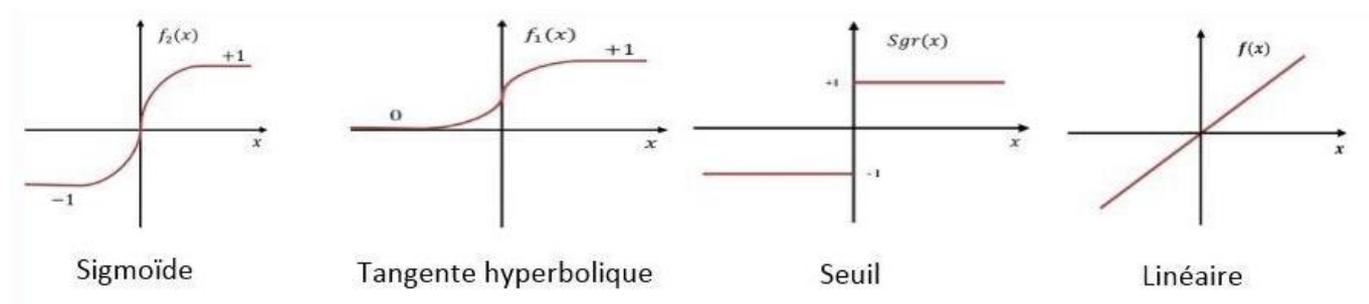


Figure III. 12: Exemples de fonctions d'appartenance.

III.4.4.2 Architectures des réseaux de neurones

Il existe principalement deux types d'architectures : réseaux bouclés et réseaux non bouclés. Les réseaux non bouclés sont unidirectionnels sans retour arrière (feed-forward). Le signal de sortie est directement obtenu après l'application du signal d'entrée. Si tous les neurones ne sont pas des organes de sortie, on parle de neurones cachés (figure III.13). Les réseaux de neurones bouclés ou avec retour en arrière (feedback network ou récurrent Network), sont dans la figure III.14

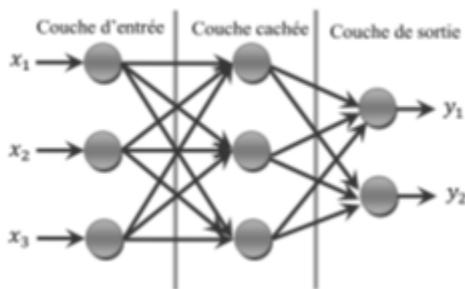


Figure III. 13 : Réseau non bouclé.

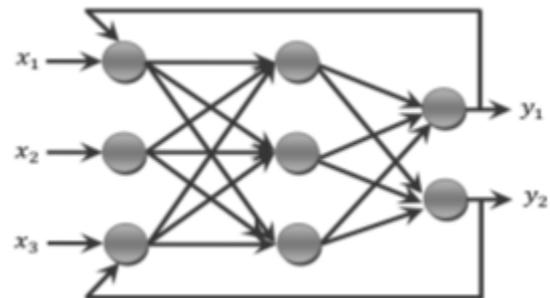


Figure III. 14 : Réseau bouclé.

III.4.4.3 Types d'apprentissages

Il existe principalement trois types d'apprentissage :

- Apprentissage supervisé qui nécessite un 'professeur' qui présente au réseau des couples de vecteurs entrée-sortie désiré. Il est effectué de la façon suivante : On présente au réseau les valeurs d'entrées et on calcule sa sortie correspondante, ensuite les poids sont ajustés de manière à réduire l'erreur de sortie. La rétro-propagation est la méthode d'apprentissage la plus utilisée pour l'entraînement des réseaux statiques.
- Apprentissage non supervisé où la connaissance de la sortie désirée n'est pas nécessaire. Dans ce cas, le réseau organise lui-même les entrées qui lui sont représentées de façon à optimiser un critère de coût donné et sans qu'on lui fournisse d'autres éléments de réponses. Cette propriété est appelée propriété d'auto organisation [apprentissage].
- Apprentissage auto-supervisé où le réseau de neurone évalue lui-même ses performances, sans l'aide d'un « professeur ». Un objet est présenté à l'entrée du réseau de neurones, on a indiqué la classe à laquelle appartient cet objet. Si le réseau ne le classe pas correctement, il mesure lui-même l'erreur qui le faîte, et propage cette erreur vers l'entrée. Le réseau procède à autant d'itérations qu'il est nécessaire jusqu'à obtenir la réponse correcte [35].

L'apprentissage est une phase du développement d'un réseau de neurones durant laquelle le comportement du réseau est modifié jusqu'à l'obtention du comportement désiré. Cette modification consiste à modifier les poids des connexions entre les neurones en suivant certaines [36]. Il existe plusieurs algorithmes d'apprentissage tel que : La règle de Hebb, l'apprentissage de Boltzmann, la règle de correction d'erreurs, l'algorithme de la rétro-propagation du gradient de l'erreur et l'algorithme de Levenberg-Marquardt.

III.4.4.4 Avantages et inconvénient des réseaux neurone

Avantages

- Richesse de choix de réseaux, types, architecture et fonctions d'activations,
- Les réseaux de neurones peuvent apprendre et généraliser à partir des simples données d'entrée et de sortie, le modèle n'est pas nécessaire,
- Les réseaux de neurones sont également capables d'analyser des relations spatiales et topologiques.

Inconvénients

- La nature non linéaire des RNA peut piéger l'utilisateur dans un minimum local,
- Un réseau de neurones est une « boîte noire » qui n'explique pas ses décisions [34],
- Le temps d'apprentissage peut être long,
- Le choix des conditions initiales constituent un problème

III.4.4.5 Types de combinaison neuro-flous

Il y a plusieurs possibilités pour combiner les réseaux de neurone et les systèmes flous. On note en particulier :

- le système neuro-floue coopératif où l'un des deux système, flou ou neuronal, intervient une seul fois pour effectuer une tâche spécifique. Les résultats obtenus par le premier système son injectée et utilisé dans le deuxième système.
- Système neuro-floue concurrent où l'un des deux système, floue ou neuronal, intervint continuellement pour effectue une tâche spécifique les résultats obtenus par le premier système son injectée et utilisé dans le deuxième système. En générale les réseaux de neurones se placent soit en amont pour le traitement des entrées, soit en aval pour la génération de sortie.
- Les systèmes neuro- flous hybrides où la combinaison est homogène. Il peut être soit, un réseaux neuronal mené des paramètres floue nommé réseau de neurone floue ; ou un système floue dont les paramètres sont ajustés par l'apprentissage grâce au réseau de neurone nommé système floue neuronal [37]. Les systèmes utilisés dans ce type sont GARIC, FAUCON, ANFIS, NEFCON AMUSEMENT, SONFIN, et beaucoup d'autres [33].

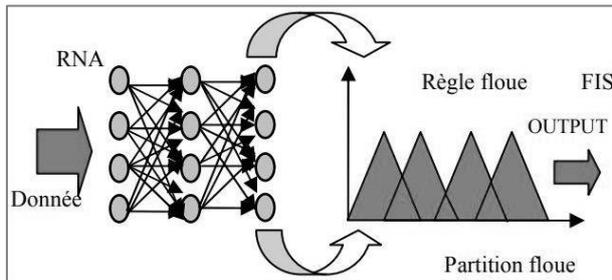


Figure III. 15 : Système neuro-floue Coopératif

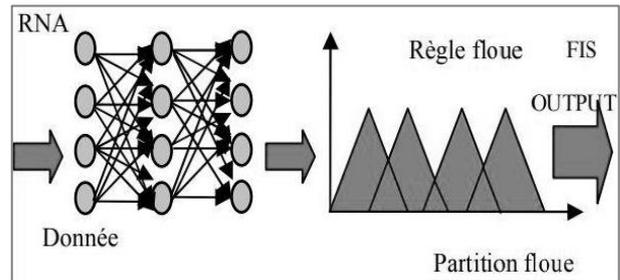


Figure III. 16 : Système neuro-floue concurrent

III.4.5 MPPT neuro-floue proposée

Dans notre étude on utilise un système neuro-flou coopératif où un système flou est utilisé pour fournir les données d'apprentissage à un réseau de neurones qui sera utilisé dans le système global. On va procéder en deux étapes :

- **Etape 1 :** un système flou construit avec deux entrées qui sont l'erreur $e(k)$ et la variation de l'erreur $\Delta e(k)$ et une sortie qui est la variation du pas (ΔD), avec l'utilisation des mêmes fonctions d'appartenance du contrôleur flou précédent. Les règles d'inférence floue du FLC consistent en 25 règles illustrées dans le tableau (III.2).
- **Etape 2 :** Dans cette étape le système de réseau neurone prendre les résultats obtenus dans l'étape précédant et injecté dans les réseaux de neurones pour faire un apprentissage dans le mode hors ligne. Lorsque apprentissage est terminée on peut utiliser les réseaux de neurones comme une commande MPPT Neuro-floue.

Tableau III. 2: Les règles utilisées dans MPPT Neuro-floue déterminer la sortie ΔD [38].

| e \ Δe | NG | NP | ZE | PP | PG |
|----------------|----|----|----|----|----|
| NG | ZE | ZE | PG | PG | PG |
| NP | ZE | ZE | PP | PP | PP |
| ZE | PP | ZE | ZE | ZE | NP |
| PP | NP | NP | NP | ZE | ZE |
| PG | NG | NG | NG | ZE | ZE |

III.5 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté différentes techniques MPPT. Nous avons commencé par les méthodes classique tel que P&O, HC et IC qu'ont un organigramme simple à implémenté et un théorie simple aussi. Par la suite nous avons proposé une MPPT floue une MPPT Neuro-floue avec un aperçu théorique pour faciliter son étude. Dans le prochaine chapitre nous effectuerons la simulation et la comparaison des MPPT proposées.

Chapitre IV : Résultats de simulation.

IV.1 Introduction

Ce chapitre fait l'objet d'une comparaison des résultats de simulation obtenus avec l'outil Matlab Simulink relatifs aux différentes techniques MPPT à savoir :

- Commande P&O,
- Commande MPPT basée sur la logique floue
- Commande MPPT basée sur la technique Neuro-floue,

Le but de ces essais est de vérifier le fonctionnement de chaque technique et comparer les performances de chaque méthode.

Nous avons procédé à la simulation du système ci-dessous, sous les conditions standard (température 25°C et un éclairement $1000 \text{ W}/\text{m}^2$). Notre choix a été de prendre V_{pv} et I_{pv} du PV comme entrées du bloc de la commande et le rapport cyclique D comme sortie.

La figure (IV.1) montre le schéma bloc Simulink du GPV connecté à une charge résistive par un convertisseur Boost, les paramètres du Hacheur BOOST sont donnés dans l' Annexe A.

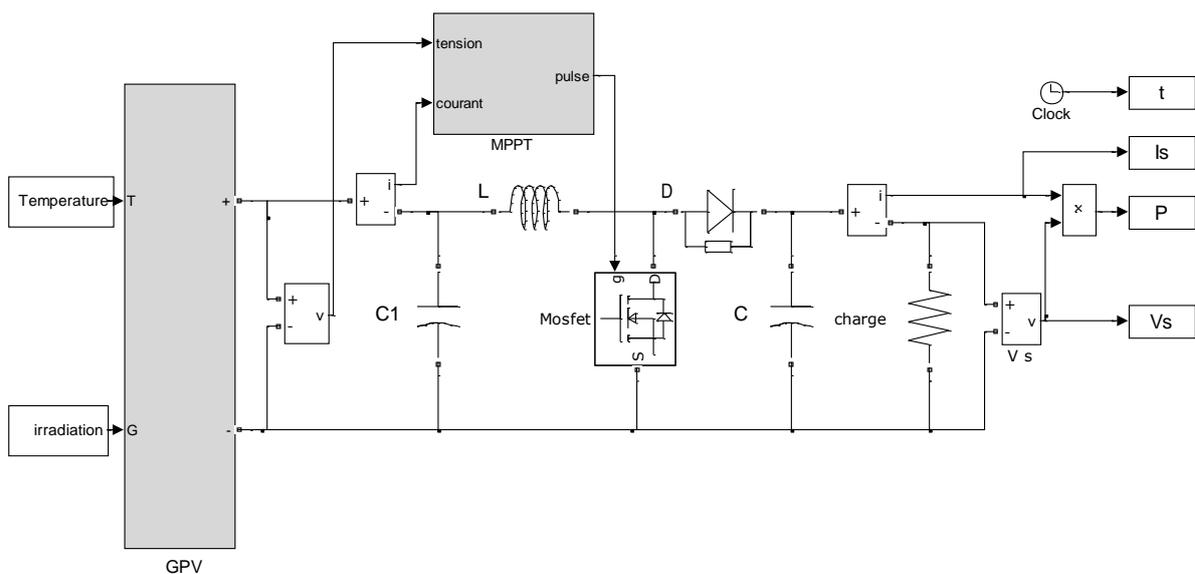


Figure IV. 1 : Schéma bloc Simulink du système global.

IV.2 Simulation du système PV avec la MPPT P&O

Dans cette technique MPPT, la valeur du pas de variation du rapport cyclique est fixée à 0,001. La technique MLI triangulaire est utilisé dans le contrôleur MPPT (voir la figure IV.2) afin de générer un train d'impulsions pour contrôler l'état de l'interrupteur du Hacheur Boost.

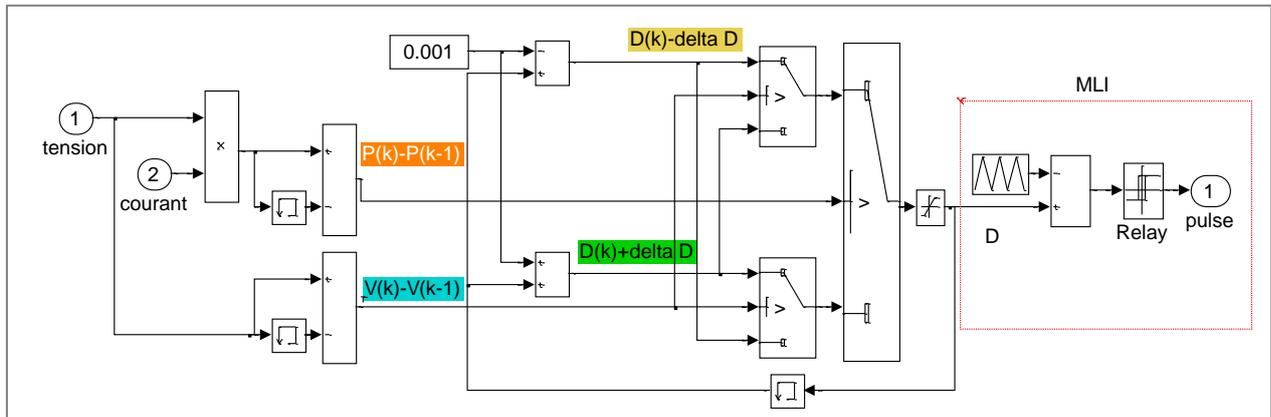


Figure IV. 2 : Schéma bloc Simulink de la technique P&O.

Les figures IV.3 et IV.4 représentent respectivement la tension V_{pv} et la puissance P_{pv} de sortie du GPV. A partir de ces deux figures, on peut observer que la tension et la puissance de sortie sont fluctuantes et présentent des ondulations.

La puissance de sortie P du convertisseur Boost et la tension V_s aux bornes de la charge du système PV sont présentées respectivement sur les figures IV.5 et IV.6. les résultats obtenus confirment que l'algorithme P&O est capable de suivre le point de puissance maximum ainsi que transfert de la puissance générée par GPV à la charge.

La figure IV.7 présente une comparaison entre la puissance P_{pv} et la puissance de sortie du hacheur Boost en utilisant l'algorithme P&O. Cette figure montre que l'algorithme P&O et le convertisseur Boost donnent un meilleur contrôle de la puissance dans la sortie du système.

Avec la présence des changements considérables et des ondulations dans la puissance de sortie du GPV, le convertisseur améliore efficacement les variations et la forme de cette grandeur.

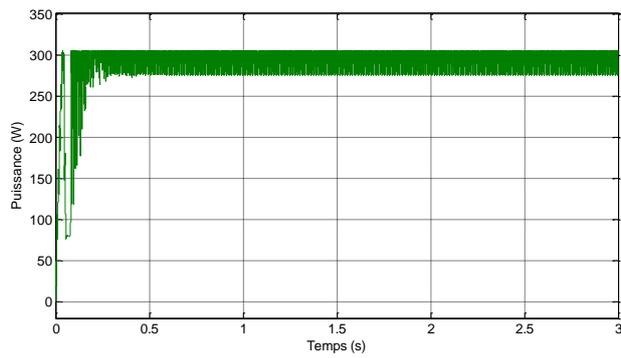


Figure IV. 3 : Puissance de sortie du GPV avec la MPPT P&O

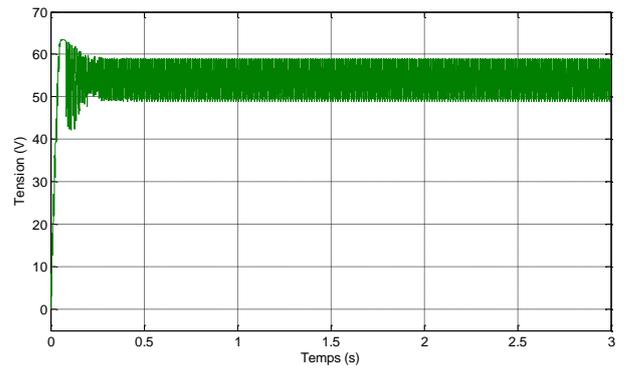


Figure IV. 4 : Tension de sortie du GPV avec la MPPT P&O.

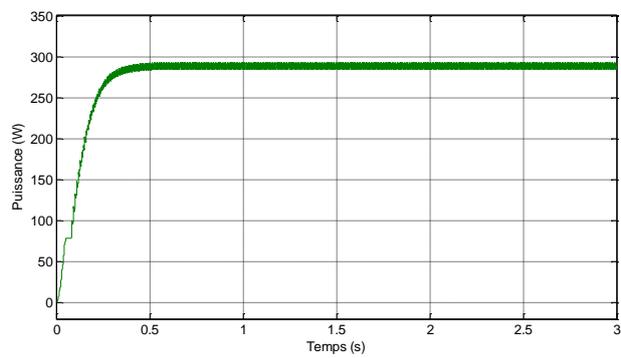


Figure IV. 5 : Puissance de sortie du hacheur Boost avec la MPPT P&O

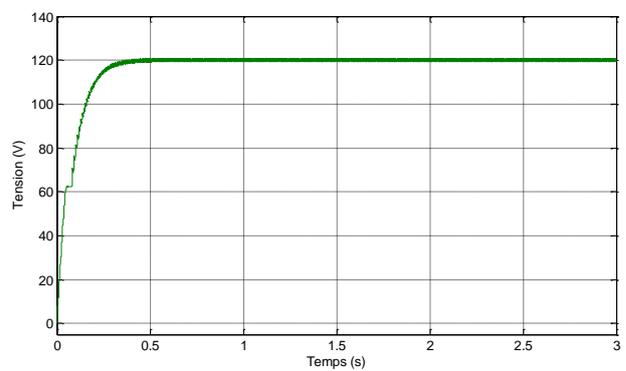


Figure IV. 6 : Tension de sortie du hacheur Boost avec la MPPT P&O

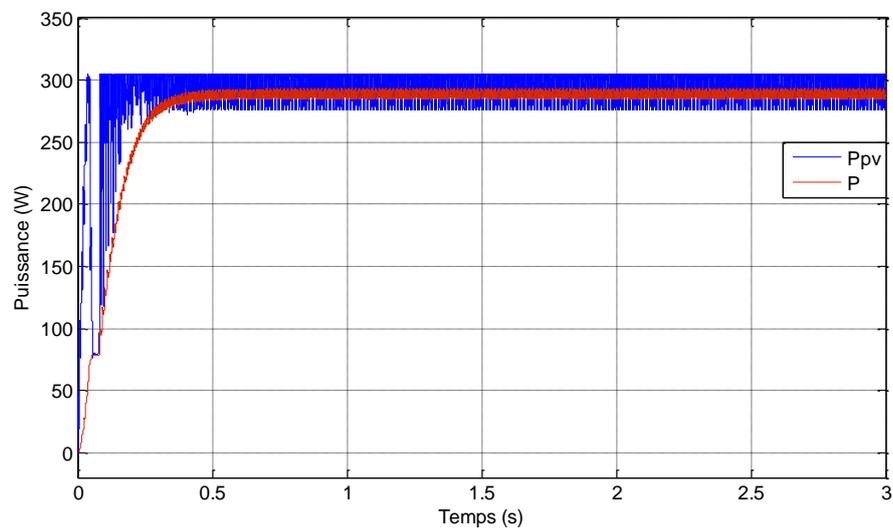


Figure IV. 7 : Comparaison entre la puissance de sortie du GPV et de sortie du hacheur Boost avec la MPPT P&O.

IV.3 Simulation de système PV avec la MPPT floue proposée

Le contrôleur flou proposé utilise l'erreur de la variation de puissance par rapport à la tension ainsi que la variation de cette erreur pour agir sur le rapport cyclique en incrémentant ou en décrémentant ce dernier. Ce contrôleur flou est basé sur la connaissance préalable du système par un expert. La figure (IV.8) montre le schéma bloc Simulink relatif à cette technique.

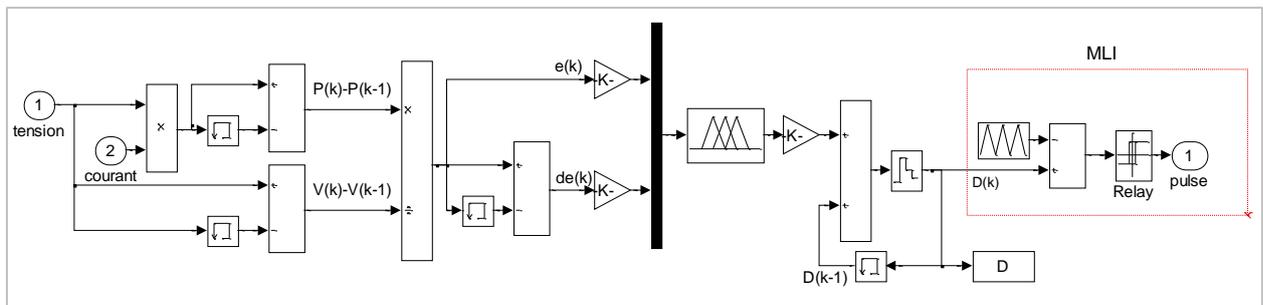


Figure IV. 8 : Schéma bloc Simulink la MPPT floue proposée.

Les résultats de la simulation de la puissance et la tension de sortie du GPV du GPV avec MPPT floue sont présentés dans les figures IV.9, IV.10. On remarque la présence des grandes fluctuations de tension et de puissance et une grande bande d'oscillation dans le régime transitoire.

On peut remarquer à partir de la figure IV.11 et la figure IV.12 que l'implémentation de la MPPT floue a amélioré la réponse en terme de régime transitoire et en qualité du signal avec moins de fluctuations en régime permanent.

La figure IV.13 montre une comparaison entre la puissance de sortie du GPV P_{pv} et la puissance à la sortie de hacheur Boost en utilisant la MPPT floue P .

A partir de ces résultats obtenus, on peut observer que l'algorithme MPPT basé sur la logique floue traite les fluctuations et les oscillations GPV.

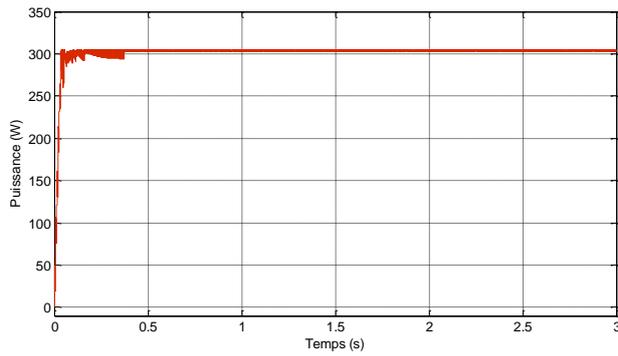


Figure IV. 9 : Puissance de sortie du GPV avec la MPPT floue

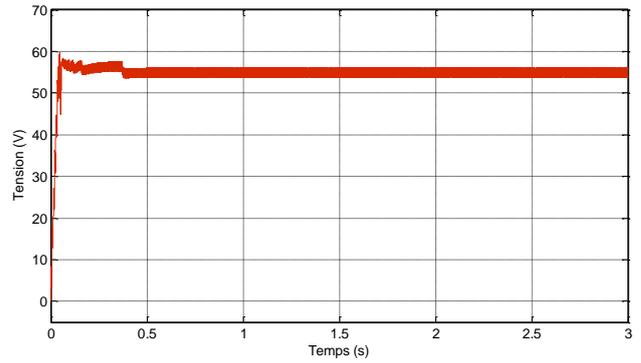


Figure IV. 10 : Tension de sortie de GPV avec la MPPT floue.

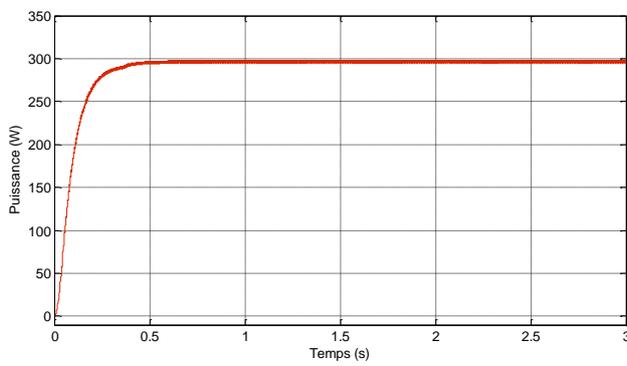


Figure IV. 11 : Puissance de sortie du hacheur Boost avec la MPPT floue.

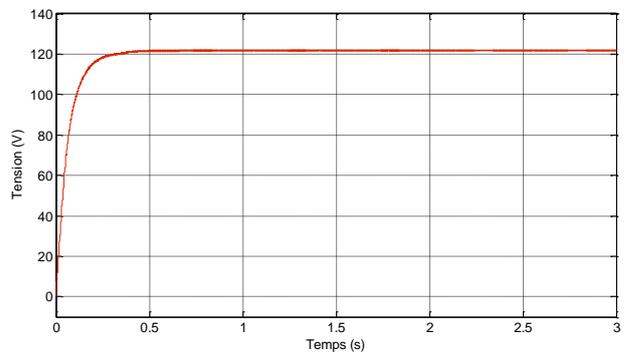


Figure IV. 12 : Tension de sortie du Hacheur Boost avec la MPPT floue.

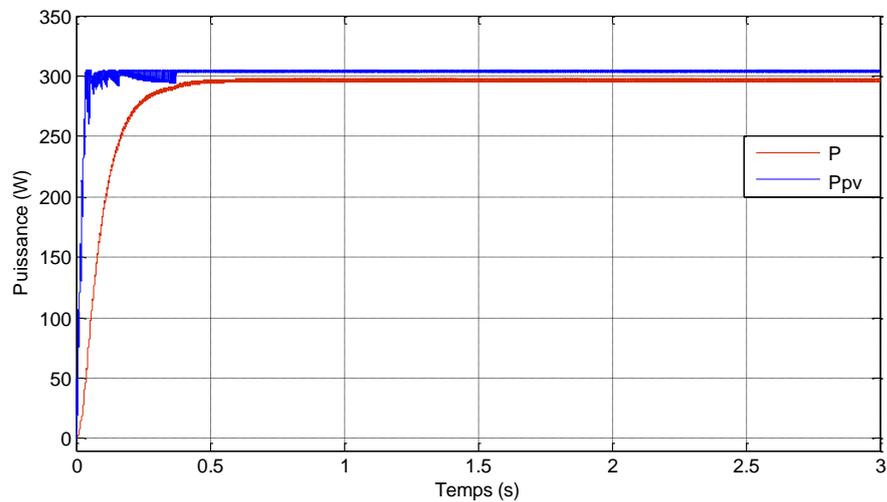


Figure IV. 13 : Comparaison entre la puissance de sortie du GPV et du Hacheur Boost avec la MPPT floue.

IV.4 Simulation de système PV avec MPPT Neuro-floue

Le système flou régit par les règles du tableau III.2 avec les mêmes fonctions d'appartenances d'entrées et de sortie dans la commande MPPT floue proposée (la tension V_{pv} , courant I_{pv} et la sortie pour varier le rapport cyclique D. la simulation de ce système dans le modèle global permet de générer les données qui serviront de modèle de référence. Nous allons prendre ces données pour faire l'apprentissage hors ligne pour générer un système des réseaux de neurone.

IV.4.1 Choix de la structure du réseau neuronal

L'utilisation de la boîte à outils Matlab réseaux de neurones (Neural Network Toolbox) par l'utilisation de la commande « nntool » permet de générer l'éditeur des réseaux de neurones voir Annexe B.

La Figure (IV.14) montre bien que notre réseau est constitué de trois couches à savoir :

- Une couche d'entrée composée de deux neurones, dont le rôle est de transmettre les valeurs des entrées qui correspondent aux variables (V_{pv} , I_{pv}) vers la couche suivante appelée « couche cachée » ;
- Une couche cachée dotée de dix neurones avec des fonctions d'activations choisies de type sigmoïde tangentielle (tansig).
- Une couche de sortie avec un seul neurone représentant le rapport cyclique de hacheur Boost dont la fonction d'activation employée est de type identité ou linéaire (purline).

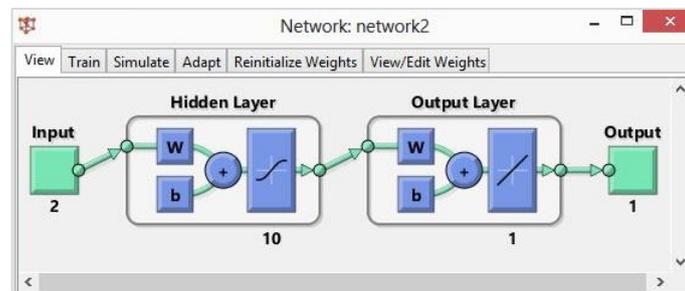


Figure IV. 14 : Schéma structurel de réseaux de neurones artificiels utilisé.

Le bloc d'apprentissage sur MATLAB est représenté dans la figure IV.15, après plusieurs essais nous avons choisi les paramètres d'apprentissage suivants :

- L'algorithme d'apprentissage par paquets du réseau (traindtx variable learning rate backpropagation),
- l'algorithme d'apprentissage incrémental du réseau (learngdm),
- fonction de performance (MSE main square error),
- fonction de division des données, (par default = dividerand),

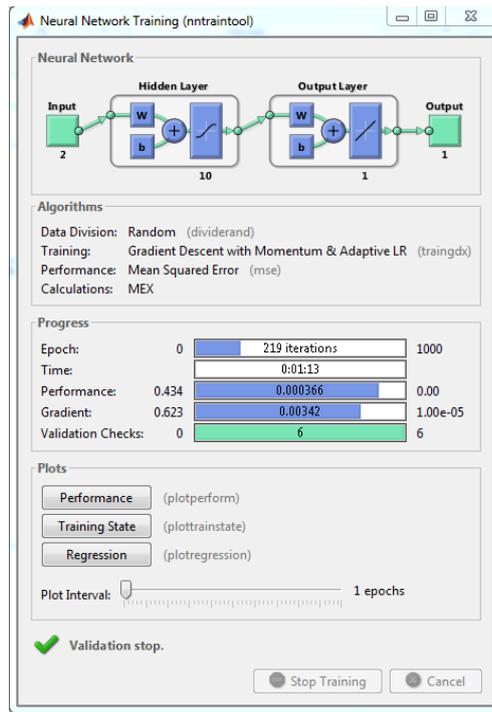


Figure IV. 15 : Bloc d'apprentissage utilisé.

Les performance sont illustré dans la figure IV.16.

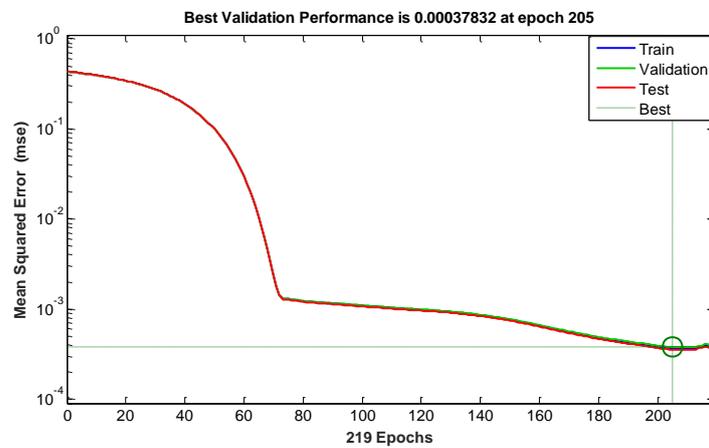


Figure IV. 16 : Performances d'apprentissage du réseau de neurones artificiel utilisé.

Le bloc utilisé dans cette technique est représenté dans la figure IV.17 et IV.18 :

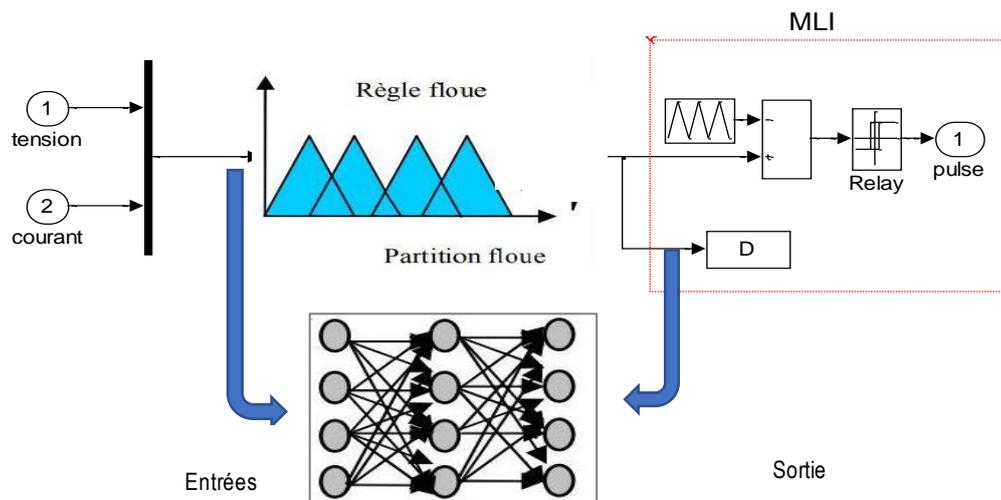


Figure IV. 17 : Schéma de principe de l'apprentissage neuro-floue proposée.

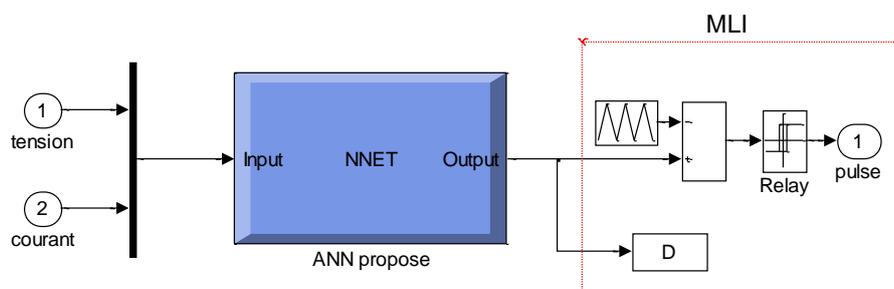


Figure IV. 18: Schéma de principe de la MPPT neuro-floue proposée.

Les résultats de la simulation du GPV avec la MPPT neuro-floue proposée sont présentés dans les figures IV.19,IV.20 qui montrent la puissance et la tension de sortie du GPV. On remarque moins de fluctuations de tension et de puissance et une petite bande d'oscillation.

On peut observer à partir de les figures IV.21,IV.22 que l'implémentation de la MPPT neuro-floue a amélioré la réponse en donnant très bon résultat.

Dans la réponse du MPPT neuro-floue il n'y a pas des fluctuations alors la bande des oscillations est très petite. Cela indique que la commande MPPT neuro-floue offre un meilleur contrôle pour le suivi du MPP.

La figure IV.23 montre une comparaison entre la puissance de sortie du GPV P_{pv} et la puissance à la sortie de hacheur Boost en utilisant la MPPT Neuro-floue P . A partir des résultat obtenue on peut confirmer que l'algorithme MPPT Neuro-floue a éliminé les fluctuations.

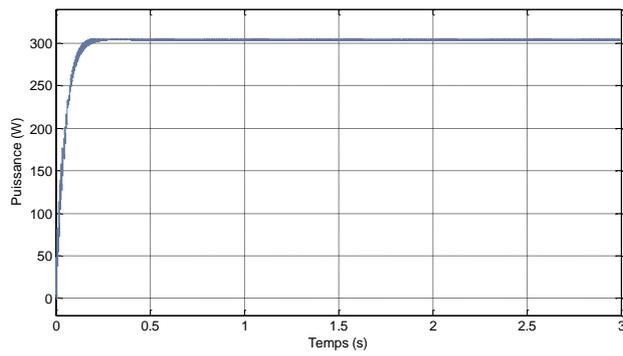


Figure IV. 19 : Puissance à la sortie de GPV avec la MPPT Neuro-floue.

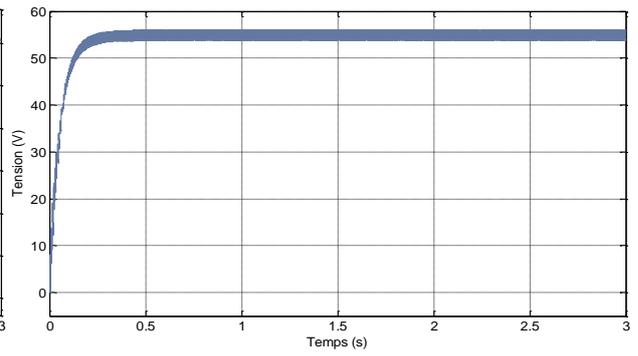


Figure IV. 20: Tension à la sortie de GPV avec la MPPT Neuro-floue

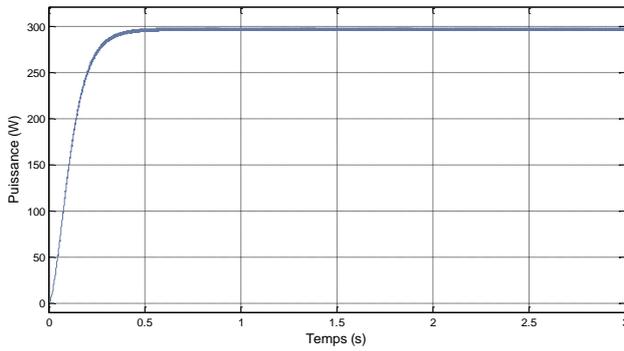


Figure IV. 21 : Puissance de sortie du hacheur Boost avec la MPPT Neuro-floue.

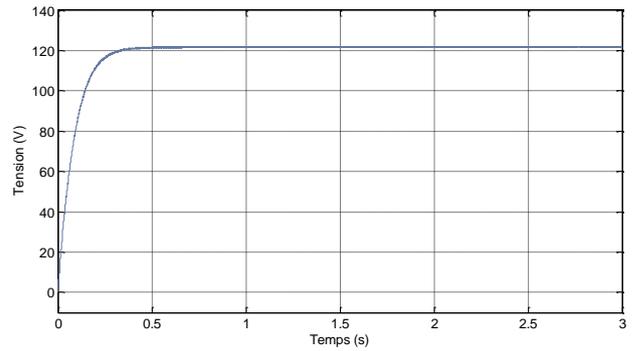


Figure IV. 22 : Tension de sortie du hacheur Boost avec la MPPT Neuro-floue.

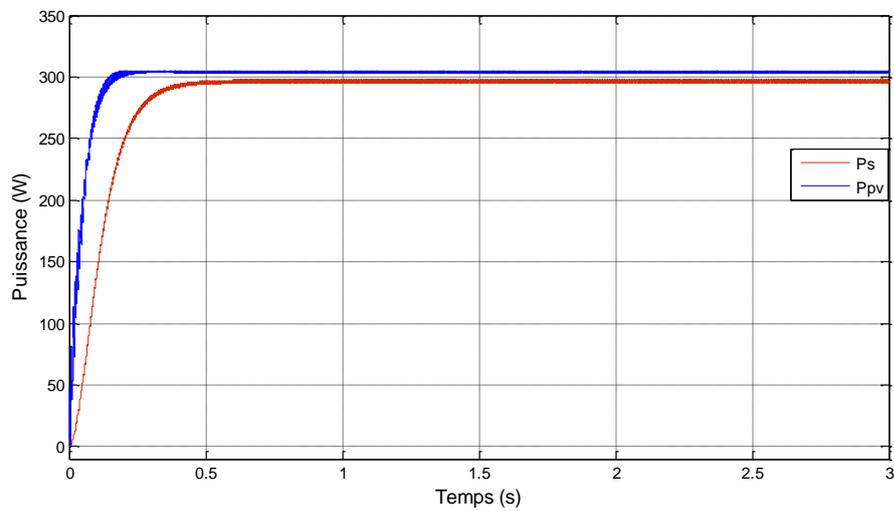


Figure IV. 23 : Comparaison entre la puissance de sortie du GPV et du hacheur Boost avec la MPPT Neuro-floue.

IV.5 Comparaison des résultats des commandes MPPT

La comparaison entre les techniques de commande MPPT pour contrôler la puissance du GPV est basée sur la forme de la réponse, le temps de réponse et l'ondulation de la tension de sortie du système. Nous avons simulé le système global avec un changement d'irradiation pour trois valeurs d'irradiation à $t=0s$ $E=500 \text{ W/m}^2$, à $t=1.5s$ $E=750 \text{ W/m}^2$ et à $t=3s$ $E=1000 \text{ W/m}^2$ avec une température fixe ($T=25^\circ\text{C}$). La figure IV.24 montre une comparaison entre la puissance de sortie du hacheur Boost obtenue avec la technique P&O, MPPT floue et MPPT Neuro-floue.

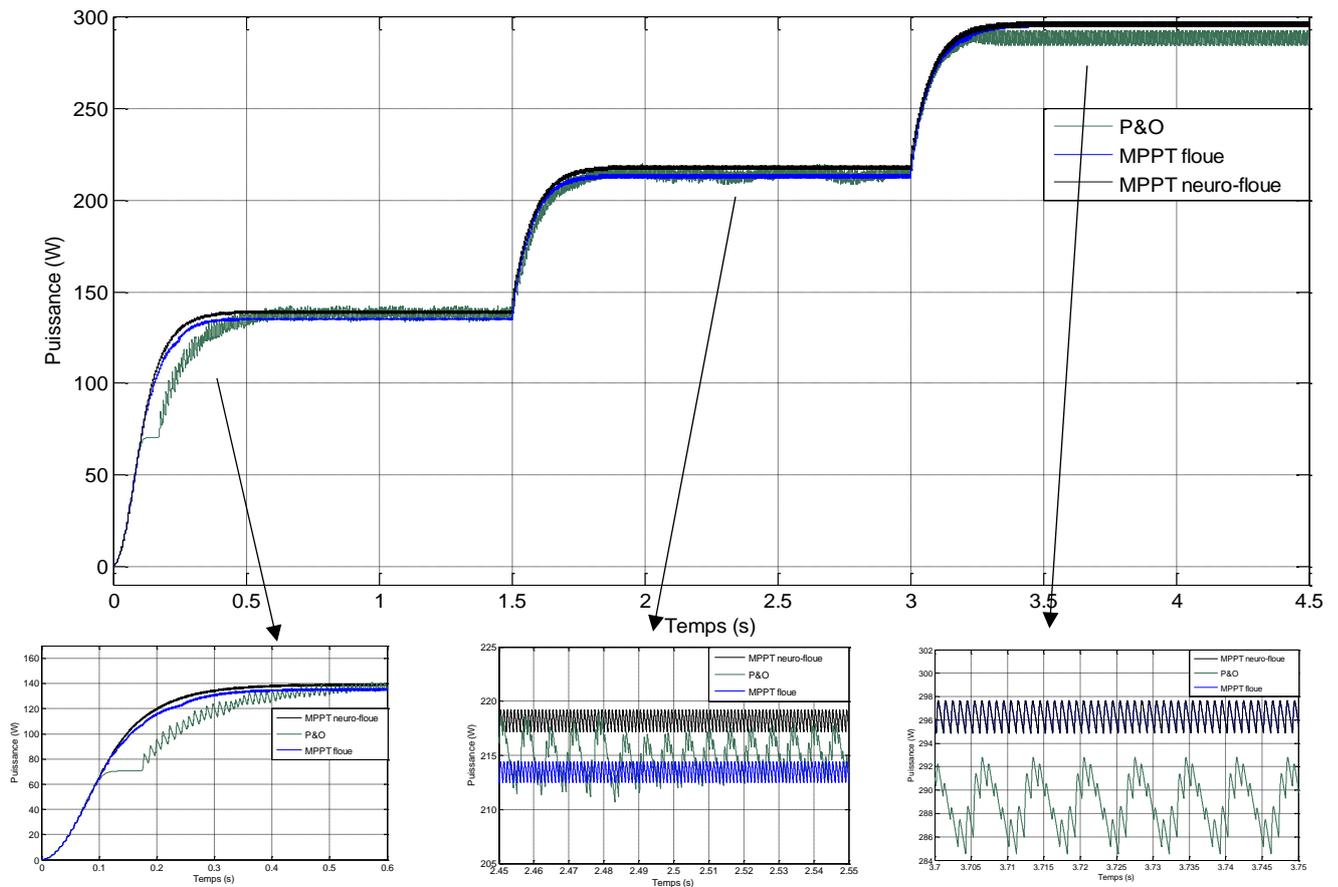


Figure IV. 24 : comparaison de puissance obtenue par les 3 techniques dans le cas de changement d'irradiation.

La figure IV.25 montre la puissance de sortie du système en fonction de la tension du GPV. On note que la MPPT floue et MPPT neuro-flou donne de meilleures performances par rapport à l'algorithme P&O avec moins d'oscillations et plus de précision.

À partir des résultats et des figures précédentes obtenus de simulations, on peut observer que la MPPT neuro-floue peut suivre le MPP plus précisément et plus rapidement que la technique P&O et MPPT flou dans le cas de changement climatique rapide (changement d'irradiation rapide). La forme de la réponse dans la méthode P&O est plus oscillatoire car l'algorithme fait en sorte que le système oscille autour du MPP en raison que le pas de perturbation (ΔD) fixe.

Dans la technique de commande P&O, si la valeur de pas (ΔD) est très petite, le temps de réponse devient trop long mais la précision est insuffisante. Par contre si la valeur de pas est grande, la puissance de système ne devient pas précise et en aura des résultats mauvais en raison que la bande d'oscillation autour du point maximal est grande bien que le temps de réponse est diminué.

Mais dans le cas du MPPT flou et MPPT Neuro-floue proposée, peu importe la valeur de pas ΔD la mieux adapté pour suivre le point maximal avec précision et fournit une réponse de la meilleure qualité car ses deux techniques fournissent un pas (ΔD) variable. L'erreur statique est moindre dans MPPT neuro-flou par rapport aux autres dans les cas $E=500$ et 750 W/m^2 , mais dans la troisième région la courbe de MPPT flou et Neuro-flou sont identiques.

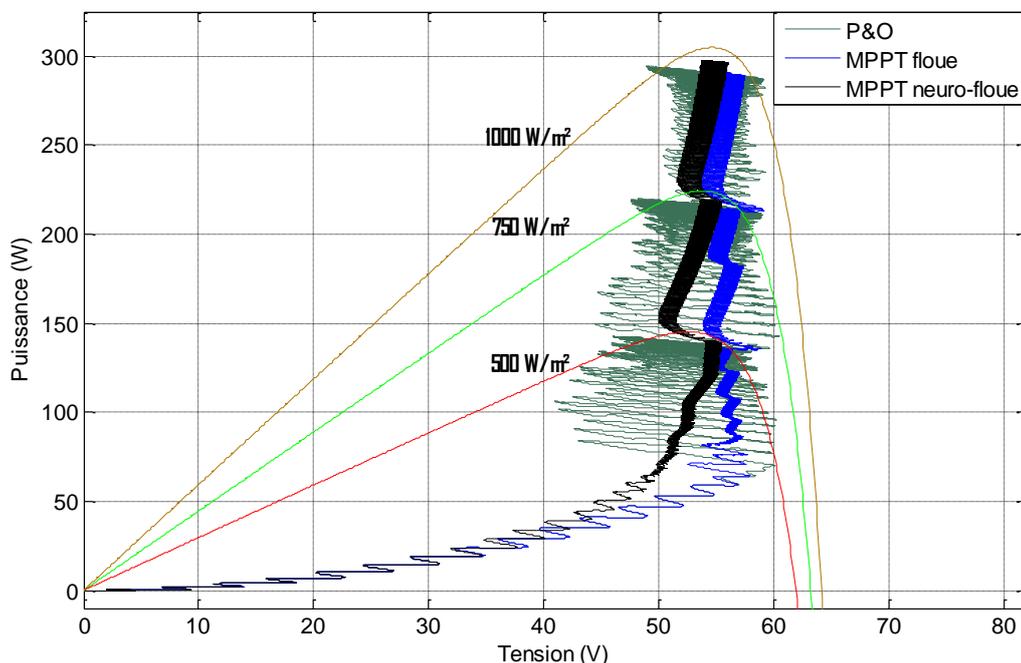


Figure IV. 25: Variation de puissance de sortie par rapport à la tension du GPV avec les trois techniques MPPT dans le cas du changement d'irradiation et température $T=25^{\circ}C$.

Le rapport cyclique D varie entre 0 et 1 pour différentes valeurs d'éclairement et pour les trois méthodes (P&O, MPPT flou et MPPT Neuro-floue) comme l'indique la figure IV.26

Pendant le changement d'éclairement, le rapport cyclique du convertisseur généré par les trois techniques, augmente vers une valeur qui correspond au PPM pour chaque éclairement.

On note que la forme de courbe du rapport cyclique obtenue par la technique MPPT floue et la technique MPPT neuro-floue présente moins d'oscillation que celle obtenue avec la technique P&O.

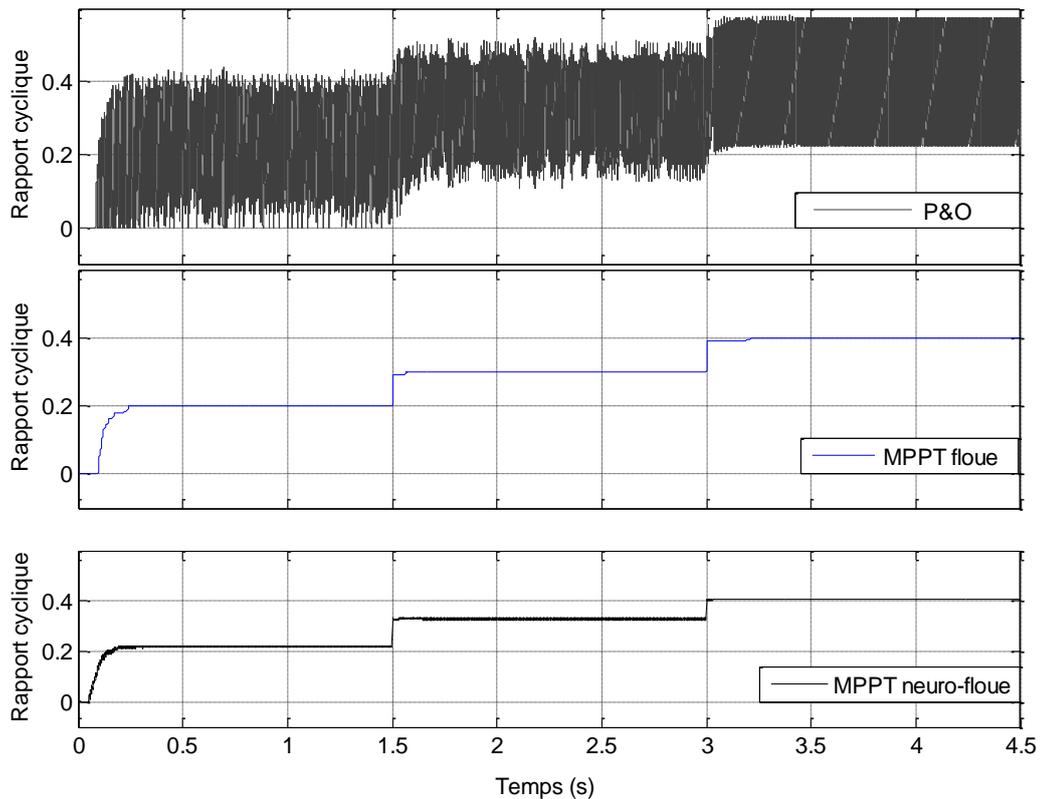


Figure IV.26 : Rapport cyclique des trois techniques dans le cas du changement d'irradiation et température $T=25^{\circ}\text{C}$.

IV.6 Conclusion

Nous avons analysé dans l'environnement Matlab Simulink le fonctionnement électrique d'un système PV adapté par un convertisseur Boost régulé par des commandes MPPT.

L'objectif a été de vérifier et de comparer la commande MPPT P&O, avec la MPPT floue et la MPPT neuro-floue proposées.

Les résultats de simulation obtenus ont montré l'efficacité des deux solutions proposées en particulier la MPPT neuro-floue qui a donné une meilleure précision que les autres techniques dans le cas de changement climatique rapide (changement d'irradiation). Les MPPT intelligentes assurent une bonne poursuite de PPM, malgré les variations de conditions climatiques (irradiation) avec un temps de réponse rapide et moins des ondulations

Conclusion générale

La production d'électricité à partir de panneaux PV est intermittente. Elle est en fonction du rayonnement solaire, et aussi la température reçue sur Terre. Pour assurer le fonctionnement d'un générateur photovoltaïque à son point de puissance maximale, l'utilisation des contrôleurs MPPT robuste aux changements climatiques est recommandée.

Le travail présenté dans ce mémoire porte sur la modélisation et la simulation du fonctionnement d'un système photovoltaïque (PV) commandé par des techniques MPPT intelligentes assurant la poursuite de la puissance maximale fournie par le générateur PV.

Pour ce faire, il a été nécessaire de donner quelques notions de base sur le système photovoltaïque, le principe de fonctionnement de la cellule et ses différentes caractéristiques électriques pour pouvoir modéliser et simuler son fonctionnement.

La présentation du modèle du générateur Photovoltaïque permet de visualiser les caractéristiques courant-tension et puissance-tension pour une température et un éclairement fixe ($T_c=25^\circ\text{C}$, $G=1000\text{ W/m}^2$). Nous avons étudié l'effet de la variation d'éclairement à température fixe. De même nous avons fixé l'éclairement pour faire varier la température. L'étude nous a permis de confirmer et de visualiser l'effet de l'augmentation la température qui conduit à une baisse de la puissance et inversement l'augmentation de l'éclairement est proportionnel à la puissance fournie.

L'intelligence artificielle qui est le projet de remplacer le savoir humain par des programmes informatiques et qui a pour objectif de copier l'expérience de l'opérateur ou de la connaissance d'un système sans utiliser son modèle mathématique. Il existe une approche basée sur le raisonnement qui a pour forme générale (Si : condition Alors Conclusion). La logique floue fait partie de cette approche. La deuxième approche est purement numérique où des données sont traitées et considère le système comme une boîte noire. Les réseaux de neurones artificiels font partie de cette approche. L'apprentissage est la propriété principale de cette méthode. La combinaison des avantages de ces deux techniques intelligentes est utilisée pour obtenir des architectures différentes appelées techniques neuro-floues.

Dans notre cas nous avons utilisé un nombre de règles pour agir sur la MPPT en se basant sur la logique floue en suite nous avons utilisé d'autres règles pour obtenir des données qui serviront à l'apprentissage d'un réseau neuronal

les résultats obtenus avec ces deux solutions proposées ont confirmé l'efficacité de l'intégration des techniques de commandes intelligentes pour améliorer les performances dynamiques avec l'obtention d'un maximum d'extraction de puissance et avec moins d'ondulations.

Les résultats de simulation obtenus lors de notre travail sont très encourageants et par la poursuite des recherches dans ce sens nous pouvons également envisager :

L'introduction d'autres techniques intelligentes telles que les algorithmes génétiques,

La commande d'un système connecté au réseau,

Une réalisation pratique qui permettra de valider les algorithmes proposés.

Annexes

Module PV utilisé

Nous avons choisi Le sunpower E18 305 SOLAR PANEL . Qui est un panneau photovoltaïque composé de 96 cellules monocristallines en, ayant une puissance maximale de 305 W et considéré dans les conditions standards (STC: Standard Test Conditions)

$E=1000 \text{ W/m}^2$; $T_c = 25^\circ\text{C}$.

Pour réaliser la modélisation de ce module, nous avons utilisé MATLAB comme outil de tests et de simulation.

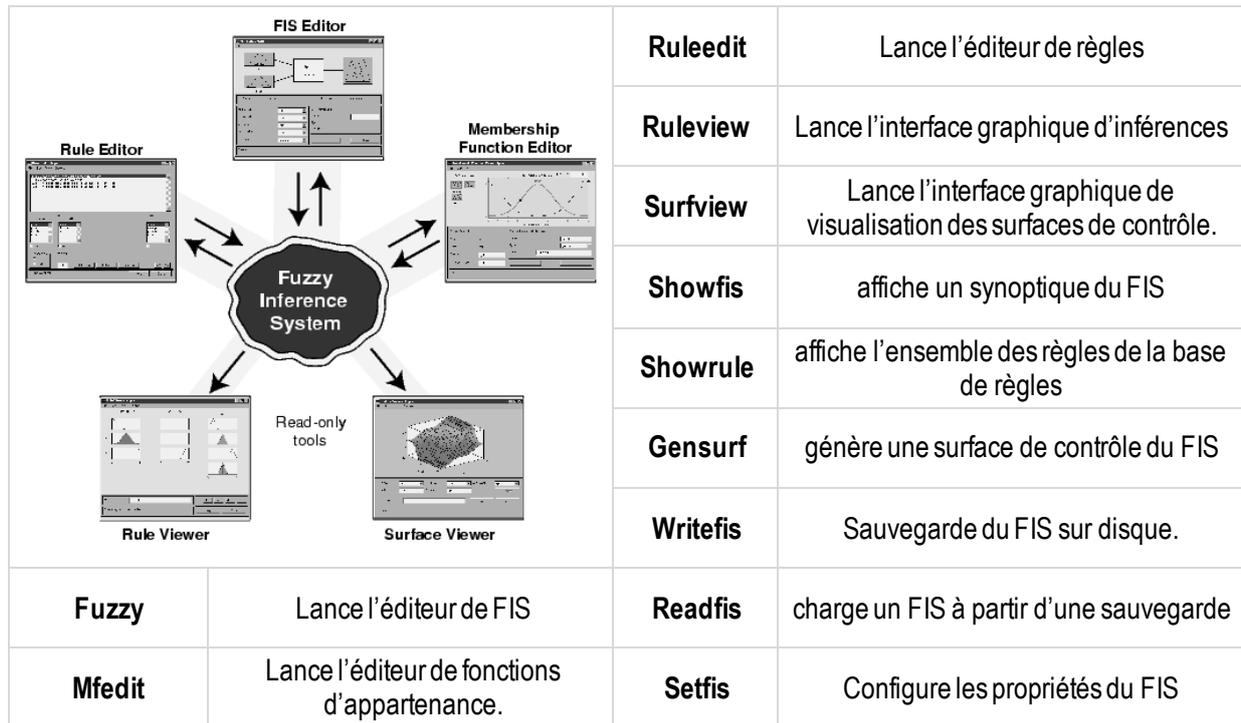
| Grandeurs | Valeurs |
|---|----------------------------|
| Puissance maximale du module P_{max} | 305 w |
| Tension de circuit ouvert V_{co} | 64.2 V |
| Courant de court-circuit I_{cc} | 5.96 A |
| Tension optimale V_{mpp} | 54.7 V |
| Courant optimale I_{mpp} | 5.58 A |
| Résistance série R_s | 0.037998 Ω |
| Résistance shunt R_{sh} | 993.51 Ω |
| Nombre des cellules en séries N_s | 96 |
| Nombre des cellules en parallèle N_p | 1 |
| Coefficient de la température en court-circuit K_i | 0.0035 A/ $^\circ\text{C}$ |
| Coefficient de la température en circuit ouvert K_v | -176,6mV / K |

Hacheur Boost utilisé

Nous avons utilisé les paramètres du hacheur Boost suivantes dans le modèle Simulink [32]:

| Paramètres | Valeurs |
|--|-------------|
| Fréquence de commutation f | 1 KHz |
| Capacité à l'entrée du Hacheur Boost C_1 | 1 mF |
| Capacité C | 3 mF |
| Inductance L | 1.5 mH |
| Resistance R | 50 Ω |

- les principales commandes utilisées pour générer ces éditeurs et ces interfaces graphiques



Cette boîte à outils possède 3 éditeurs

- FIS Editor** l'éditeur des systèmes d'inférence flou qui l'éditeur principal pour définir le nombre d'entrées et de sorties, leur noms ainsi que le type : Mamdani ou sugeno
- Membership Function Editor** : éditeur de fonctions d'appartenance qui donne la main pour insérer, supprimer et paramétrer les fonction d'appartenances. C'est là aussi qu'on peut définir l'univers de discours
- Rule Editor** : éditeur de règles et de fonctions d'appartenance qui permettent de saisir l'ensemble des règle reliant les entrées et les sorties du FIS. On peut ajouter supprimer et modifier une règle changer de connecteur et /ou et encore plus modifier le poids
- Rule viewer** et **surface viewer** : interfaces graphiques qui permettent de visualiser les inférences directement sur la base de règles, ainsi que des surfaces de contrôle. Dans la fenêtre du Rule viewer, on peut vérifier le fonctionnement du système en appliquant des entrées nettes (valeurs numériques pour voire le fonctionnement du systèmes et obtenir la sortie nette).

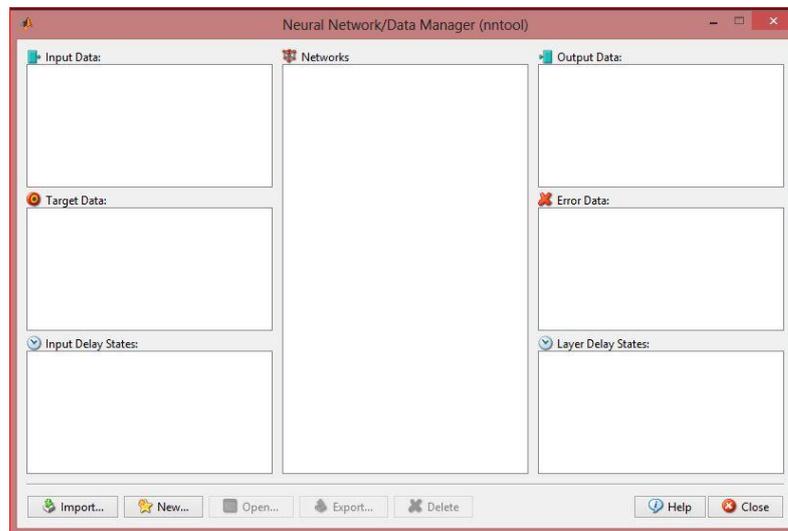
Choix des gains de normalisation : $K_{e\ initial} = \frac{1}{|2 \times e_{max}|}$ et $K_{de\ initial} = \frac{1}{|\Delta e_{max}|}$

- Après les calculs des gains initiales nous avons commencé de tolérer jusqu'à obtenir les performances requises

| Essais retenus | K_e | K_{de} | S | Observation |
|----------------|--------|----------|------|---------------------|
| (1) | 0.001 | 0.5 | 0.5 | Manque de précision |
| (2) | 0.0015 | 0.0001 | 0.1 | Manque de précision |
| (3) | 0.003 | 0.5/75 | 0.01 | Acceptable |

| Programme d'apprentissage. | |
|---|--|
| <code>x=[Vpv lpv];</code> | Vecteur de données d'entrées |
| <code>y=D ;</code> | Vecteur de données de sortie |
| <code>P1=x'; T1=y';</code> | Variables utilisés pour créer un réseau neuronal |
| <code>net=newff(P1,T1,10,{'tansig','purelin'},'traingdx');</code> | Paramètres de configuration du réseau neuronal |
| <code>net.trainParam.show=50;</code> | Paramètres d'apprentissage |
| <code>net.trainParam.lr=0.01;</code> | |
| <code>net.trainParam.epochs=1000;</code> | |
| <code>net.trainParam.goal=0;</code> | |
| <code>net1=train(net,P1,T1);</code> | Réseau neuronal obtenu après l'apprentissage |

Boite de dialogue pour créer et modifier les paramètre du réseau neuronal avant l'apprentissage



Références Bibliographiques

Bibliographie

| | |
|------|--|
| [1] | B. Fatima, « Modélisation et simulation des sources de production décentralisée Application à l'intégration d'un générateur PV à stockage dans un réseau électrique », Thèse de doctorat, Université Abdelhamid Ibn Badis, Mostaganem, 2018. |
| [2] | F. Slama, « Modélisation d'un système multi générateurs photovoltaïques interconnectés au réseau électrique », Mémoire de Magister, Université Ferhat Abbas, Setif, 2011. |
| [3] | B. Zerguine, « Modélisation d'un système de production électrique par la cellule photovoltaïque », Mémoire de Magister, Université Badji Mokhtar, Annaba, 2010. |
| [4] | N. Kehoul et K. Khentache, « Etude comparative des modèles d'une cellule photovoltaïque », Mémoire de Master, Université Abderrahmane Mira, Bejaia, 2012. |
| [5] | M. I. Krim et H. E. Debbah, « Etude par simulation d'un générateur photovoltaïque », Mémoire de Master, Université Badji Mokhtar Annaba, 2018. |
| [6] | www.hellowatt.fr . |
| [7] | www.lenergiesoutcompris.fr . |
| [8] | A. Daoud, « Contrôle de la Puissance d'un Générateur Photovoltaïque pour le Pompage Solaire », Thèse de Doctorat, Université Mohamed Boudiaf, Oran, 2013. |
| [9] | www.futura-sciences.com . |
| [10] | N. S. A. Hadj Zoubir et F. Si djilani, « Etude et réalisation d'un hacheur Boost destiné à la conversion photovoltaïque », Mémoire de Master, Université Ibn Khaldoun, Tiaret, 2018. |
| [11] | O. Boukli Hacene, « Conception et réalisation d'un générateur photovoltaïque muni d'un convertisseur MPPT pour une meilleure gestion énergétique », Mémoire de Magister, Université Abou Bakr Belkaid, Tlemcen, 2011. |
| [12] | Y. Garah, « Etude d'une chaîne de conversion d'énergie Photovoltaïque raccordée au Réseau électrique », Mémoire de Master, Université Larbi Ben M'Hidi, Oum El Bouaghi, 2015. |
| [13] | M. Ayachi et O. Hamdoud, « Etude comparative entre différents modèles électriques photovoltaïques », Mémoire de Master, Université Larbi Ben M'hidi, Oum El Bouaghi, 2012. |
| [14] | Z. Bendjellouli, « Contribution à la modélisation d'une cellule solaire », Mémoire de Magister, Université de Bechar, 2009. |
| [15] | T. E. Korichi, « Modélisation et commande d'un système photovoltaïque connecté au réseau électrique », Mémoire de Master, Université Mohamed Boudiaf, M'sila, 2016. |
| [16] | D. Boukhers, « Optimisation d'un système d'énergie photovoltaïque application au |

Bibliographie

| | |
|------|--|
| | pompage », Mémoire de Magister, Université Mentouri, Constantine, 2007. |
| [17] | . Y. Abdelmoula, « Etude et simulation des sources renouvelables dans le réseau électrique : Générateurs photovoltaïques », Mémoire de Master, Université Mohamed Seddik Ben Yahia, Jijel, 2019. |
| [18] | R. Yann, « Gestion des flux énergétiques dans un système photovoltaïque avec stockage connecte au réseau », Thèse de Doctorat, Université Joseph Fourier, 2009. |
| [19] | S. Ferdjani et O. Maatallah, « Etude et réalisation d'un Hacheur Boost commandé par le μ C ARDUINO en vue d'implémenter des commandes MPPT », Mémoire de Master, Université Ahmed Draia, Adrar, 2019. |
| [20] | A. Hakoumi et A. Benamar, « Commande MPPT et contrôle d'un système photovoltaïque 3KW par la logique floue », Mémoire de Master, Université Ahmed Draia, Adrar, 2019. |
| [21] | L. I. Djellal et Y. Dib, « Etude comparative de deux commandes MPPT appliquées », Mémoire de Master, Université Abou-Bekr Belkaid, Tlemcen, 2017. |
| [22] | H. Abbes, H. Abid, K. Loukil, A. Toumi et M. Abid, « Etude comparative de cinq algorithmes de commande MPPT pour un système photovoltaïque », International Journal of Control, Energy and Electrical Engineering (CEEE), 2013. |
| [23] | M. Dris, « Contribution à la modélisation d'un système de production d'énergie électrique hybride « Eolien – Photovoltaïque » », Thèse de Doctorat, Université Mohamed Khider, Biskra, 2019. |
| [24] | A. Talha et S. Boukhalfa, « Développement d'une Méthode MPPT pour un Système Photovoltaïque », Conférence, Alger, 2010. |
| [25] | N. Aouchiche, M. S. Aït Cheikh et A. Malek, « Poursuite du point de puissance maximale d'un système photovoltaïque par les méthodes de l'incrémentation de conductance et la perturbation & observation », Revue des Energies Renouvelables Vol. 16 N°3 (2013) 485- 498, 2013. |
| [26] | M. Dariga, « Réalisation d'un système de conversion et de gestion de l'énergie d'un système photovoltaïque pour l'alimentation des réseaux de capteurs sans fil autonomes pour l'application aéronautique », Thèse de doctorat, Université de Toulouse, 2010. |
| [27] | M. Amarouayache, « Contribution à l'optimisation d'une chaîne de conversion d'énergie photovoltaïque », Thèse de doctorat, Université Constantine 1, 2014. |
| [28] | N. Berreziga et S. Babou, « Commande directe par la méthode Incremental Conductance (Inc-Cond) d'un panneau photovoltaïque », Mémoire de Master, Université Mouloud Mammeri, Tizi Ouzou, 2018. |
| [29] | F. Tati et O. Ben Lamoudil, « Etude et Réalisation d'un Système Photovoltaïque Optimisé par flou », Mémoire de Master, Université Kasdi Merbah, Ouargla, 2018. |
| [30] | M. T. Messaoudi, « Simulation d'un système photovoltaïque autonome régulé par |

Bibliographie

| | |
|------|--|
| | logique floue », Mémoire de Master, Université Kasdi Merbah, Ouargla, 2015. |
| [31] | M. Moussaoui, « Contrôleur flou testable », Mémoire de Magister, Université Ferhat Abbas, Setif, 2009. |
| [32] | P. Anwasha et C. B. Kanhu, «Fuzzy Logic Based Maximum Power Point Tracking Algorithm for Photovoltaic Power Generation System », Journal of Green Engineering, <i>Vol. 6 4</i> , 403–426., 2017. |
| [33] | M. Rafik, « Contribution à la surveillance dynamique des systèmes de production évolutifs par les systèmes Neuro-Flous Temporels », Thèse de Doctorat, Université de Batna 2012. |
| [34] | B. A. Sediri, « Commande MPPT à base d'un réseau de neurone artificiel Pour un système photovoltaïque », Mémoire de Master, Université Badji Mokhtar, Annaba, 2019. |
| [35] | O. Ben Cheikh et Y. Biteur, « Étude et réalisation d'un système de poursuite du point de puissance maximale en utilisant les réseaux de neurones artificiels », Mémoire de Master, Université Kasdi Merbah, Ouargla, 2018. |
| [36] | D. Kadous, « Utilisation des réseaux de neurones comme outil du datamining : Génération de modèle comportemental d'un processus physique à partir de données », Mémoire de Master, Université Abou Bakr-Belkaid, Tlemcen, 2012. |
| [37] | A. Taleb, « Contribution des réseaux neuro-flous et algorithmes génétiques à la reconnaissance de la parole », Thèse de Doctorat, Université Mohamed Boudiaf, Oran, 2010. |
| [38] | A. Harrag et S. Messatli, «IC-based Variable Step Size Neuro-Fuzzy MPPT Improving PV systeme performances », Technologies and Materials for Renewable Energy, Environment and Sustainability, TMREES18, Athens, Greece 19–21 September 2018. |

ملخص

الهدف من هذا العمل هو تحسين استخراج الطاقة من الألواح الكهروضوئية من خلال تطبيق التحكم الذكي. يعتمد ناتج GPV على العديد من العوامل المناخية ، مثل ضوء الشمس ودرجة الحرارة. ومع ذلك ، يعد التتبع في الوقت الفعلي لنقطة تشغيل MPP المثلى ضروريًا لتحسين الكفاءة. تم اقتراح حلين ، وهما MPPT الضبابي والثاني الذي سيستخدم بنية عصبية غامضة. سيتم استخدام نظام القواعد الغامض كنموذج مرجعي. سيتم استخدام البيانات التي تم الحصول عليها لتعلم البنية العصبية في وضع عدم الاتصال. سيتم تطبيق هذه البنية العصبية للتحكم في MPPT الضبابية العصبية. يتم تنفيذ العمل في بيئة Matlab / Simulink. تظهر نتائج المحاكاة التي تم الحصول عليها باستخدام وحدات التحكم الذكية الخاصة بهم متابعة جيدة للغاية لـ PPM للوحة الكهروضوئية مع تموج أقل.

الكلمات المفتاحية: نظام كهروضوئي، محول P&O، boost، MPPT floue، MPPT neuro-floue

Résumé

l'objectif de ce travail est d'optimiser l'extraction de l'énergie générée par un panneau PV par l'application d'un contrôle intelligent. La puissance de sortie du générateur photovoltaïque (GPV) dépend de plusieurs facteurs climatiques, tels que l'ensoleillement et la température. Cependant, une poursuite en temps réel du point optimal de fonctionnement MPP est nécessaire pour optimiser le rendement. Deux solutions sont proposées à savoir la MPPT floue et une deuxième qui utilisera une architecture neuro-floue. Un système de règle floues sera utilisé comme modèle de référence. Les données obtenues serviront pour l'apprentissage d'une structure neuronale en mode hors-ligne. Cette structure neuronale sera appliquée pour la commande MPPT neuro-floue. Le travail est réalisé sous l'environnement Matlab/Simulink. Les résultats de simulation obtenus avec ses contrôleurs intelligents, montrent une très bonne poursuite du PPM du Panneau PV avec moins d'ondulation.

Mots clés: Système PV, Hacheur Boost, P&O, MPPT floue, MPPT neuro-floue.

Abstract

The objective of this work is to optimize the extraction of energy generated by a PV panel through the application of intelligent control. The output power of the photovoltaic generator (GPV) depends on several climatic factors, such as sunlight and temperature. However, real-time tracking of the optimum MPP operating point is necessary to optimize efficiency. Two solutions are proposed, namely the fuzzy MPPT and a second which will use a neuro-fuzzy architecture. A fuzzy rule system will be used as a reference model. The data obtained will be used for learning a neural structure in offline mode. This neural structure will be applied for the neuro-fuzzy MPPT control. The work is carried out under the Matlab / Simulink environment. The obtained simulation results with intelligent controllers, show a very good continuation of the PPM of the PV panel with less ripple.

Keywords: PV system, BOOST converter, P&O, Fuzzy MPPT, neuro-fuzzy MPPT.