

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur
et de la Recherche Scientifique
Université Akli Mohand Oulhadj - Bouira -
Tasdawit Akli Muḥend Ulḥağ - Tubirett -



وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
جامعة أكلي محمد أولحاج
- البويرة -

Faculté des Sciences et des Sciences Appliquées

كلية العلوم والعلوم التطبيقية

Référence :/MM/2021

المرجع :م / م / 2021

Mémoire de Master

Présenté au

Département : Génie Électrique
Domaine : Sciences et Technologies
Filière : Electromécanique
Spécialité : Electromécanique

Réalisé par :

Ferroum Abdelhak
Et

Badis Saleh Eddine

Thème

Control MPPT d'une Installation Photovoltaïque Par Neuro-Flou

Soutenu le : **30/10/2021**

Devant la commission composée de :

Mr : Benghenia Hadj Abdelkader
Mr : Toaufek Mohamed Yaakoub
Mr : Kherchi Mohamed

MCB
MAA
MCA

Univ. Bouira
Univ. Bouira
Univ. Bouira

Président
Encadreur
Examinateur

Dédicaces

Cet humble acte est dédié : A mes honorables parents, que Dieu prolonge leur vie et vous protège. Ce fut un honneur pour moi de participer à ce cours. Merci pour le soutien moral inestimable et tous les encouragements que j'ai reçus de vous deux. Je vous souhaite à la fois santé et longue vie. A tous mes frères Hussein, Fares et Zineddine et mes sœurs Amira et Nessma à mon cher Pénom Badis Salah Eddine pour son soutien et un merci spécial à mes amis Ayache Mohamed Amin, Mefti Nabil, Merabet Hamza, djouabi Saïd.

FERROUM ABDELHAK

Remerciements

***TOUT D'ABORD, JE REMERCIE DIEU TOUT-PUISSANT DE
M'AVOIR DONNE DU COURAGE, DE LA PATIENCE ET DE
LA FORCE PENDANT TOUTES CES ANNEES SCOLAIRES,
GRACE AUXQUELLES CE TRAVAIL A ETE REALISE.
JE TIENS A EXPRIMER MES REMERCIEMENTS ET MA
GRATITUDE AU DIRECTEUR EXECUTIF « MR. TAOUFEK
MOHAMMAD YAAKOUB » POUR SON SERIEUX, SA
COMPETENCE ET SES CONSEILS. ET POUR LA CONFIANCE
QU'IL M'A DONNEE EN MENANT CE TRAVAIL, SANS
M'ARRETER. MES REMERCIEMENTS A LA FACULTE DE
SCIENCE ET SCIENCE APPLIQUE DEPARTEMENT DE
GENIE ELECTRIQUE, ET A TOUS LES ENSEIGNANTS QUI
M'ONT ENSEIGNE PENDANT LES ANNEES DE COURS.
JE REMERCIE EGALEMENT LES MEMBRES DU JURY QUI
ONT ACCEPTE LE VERDICT DANS CE TRAVAIL.
ENFIN, JE REMERCIE EGALEMENT TOUTE MA FAMILLE
ET LES PERSONNES QUI M'ONT BIENTOT AIDE A
REDIGER CET OUVRAGE.***

SOMMAIRE

Sommaire

TABLE DES MATIERES	III
LISTE DES FIGURES.....	IV
LISTE DES TABLEAUX	V
LISTES DES ACRONYMES ET SYMBOLES.....	VI
INTRODUCTION GENERALE	VII

CHAPITRE 01

SYSTEME PHOTOVOLTAÏQUE ASSOCIE

CONVERTISSEUR

1.1. INTRODUCTION.....	2
1.2. L'ENERGIE SOLAIRE.....	2
1.3. HISTORIQUE DE L'ENERGIE PHOTOVOLTAÏQUE.....	3
1.4. LES SYSTEMES PHOTOVOLTAÏQUES.....	3
1.5. LES PANNEAUX PHOTOVOLTAÏQUES.....	4
1.6. DIFFERENTS TYPES DES CELLULES SOLAIRES.....	4
1.7. MODULE PHOTOVOLTAÏQUE.....	6
1.8. L'EFFET PHOTOVOLTAÏQUE.....	6
1.9. LA CELLULE PHOTOVOLTAÏQUE.....	7
1.10. FABRICATION DE LA CELLULE PHOTOVOLTAÏQUE.....	7
1.11. ASSEMBLAGE DES MODULES PHOTOVOLTAÏQUES.....	8
1.11.1. ASSOCIATION EN SERIE.....	8
1.11.2 ASSOCIATION EN PARALLELE.....	8
1.11.3. ASSOCIATION EN SERIE - PARALLELE.....	9
1.12. PRINCIPE DE LA CONVERSION PHOTOVOLTAÏQUE.....	9
1.13. MODELISATION ET CIRCUIT EQUIVALENT D'UNE CELLULE PHOTOVOLTAÏQUE.....	10
1.14. LE GENERATEUR PHOTOVOLTAÏQUE.....	11
1.15. LES CARACTERISTIQUE (L'INFLUENCE DE LA TEMPERATURE ET DE L'ECLAIREMENT).....	12
1.15.1. INFLUENCE DU L'ECLAIREMENT SUR LES CARACTERISTIQUES (I-V) ET (P-V).....	12
15.2 INFLUENCE DE LA TEMPERATURE SUR LES CARACTERISTIQUES (I-V) ET (P-V).....	13
1.16. AVANTAGES ET INCONVENIENTS DE L'ENERGIE PHOTOVOLTAÏQUE.....	13
1.16.1. AVANTAGE.....	13

1.16.2. INCONVENIENTS.....	14
1.17. CONVERTISSEUR STATIQUE DC/DC (HACHEURS).....	14
1.18. TYPES DES CONVERTISSEURS DC-DC.....	15
1.18.1. HACHEUR SURVOLTEUR (BOOST).....	15
1.18.1.1. MODELE MATHEMATIQUE EQUIVALENT.....	16
1.18.1.2. PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT.....	17
1.18.2. CONVERTISSEUR ABAISSEUR (BUCK).....	17
1.18.2.1. MODELE MATHEMATIQUE EQUIVALENT.....	18
1.18.2.2. PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT.....	19
1.18.3. CONVERTISSEUR INVERSEUR (BUCK – BOOST).....	19
1.19. CONCLUSION.....	20

CHAPITRE 02

MPPT DANS LES SYSTEME PHOTOVOLTAIQUE ' METHODE CLASSIQUE '

2.1. INTRODUCTION.....	21
2.2. LA COMMANDE (MPPT).....	21
2.3. PRINCIPE DE MPPT.....	21
2.4. TECHNIQUES DE RECHERCHE DE POINT DE PUISSANCE MAXIMAL MPPT.....	22
2.4.1. LA METHODE PERTURBATION & OBSERVATION (P&O).....	22
2.4.2. LA METHODE INCREMENTATION DE LA CONDUCTANCE (INC COND).....	23
2.5. RESULTATS DE SIMULATION ET INTERPRETATION.....	26
2.5.1. POUR UNE TEMPERATURE $T = 25\text{ C}^\circ$ ET POUR UN ECLAIREMENT FIXE.....	27
INTERPRETATION	
2.5.2. POUR UNE TEMPERATURE $T = 25\text{ C}^\circ$ ET UN ECLAIREMENT VARIE.....	28
INTERPRETATION	
2.5.3. COMPARAISON ENTRE LES DEUX METHODES A UNE TEMPERATURE FIXEE $T = 25\text{ C}^\circ$ ET UN ECLAIREMENT VARIE.....	28
INTERPRETATION	
2.6. LES AVANTAGES ET LES INCONVENIENTS.....	29
2.6.1. AVANTAGES.....	29
2.6.2. INCONVENIENTS.....	30
2.7. CONCLUSION.....	30

CHAPITRE 03

MPPT PAR METHODE INTELLIGENT ‘COMPARAISON AVEC METHODE CLASSIQUE ‘

- 3.1. INTRODUCTION.....31
- 3.2. LES METHODE INTELLIGENCE.....31
- 3.3. DEFINITION DU SYSTEME NEURO-FLOU.....32
- 3.4. PRINCIPE DU SYSTEME NEURO-FLOU.....32
- 3.5. ARCHITECTURES NEURO-FLOUES.....33
 - 3.5.1. PREMIERE ARCHITECTURE.....33
 - 3.5.2. DEUXIEME ARCHITECTURE.....34
 - 3.5.3. TROISIEME ARCHITECTURE.....34
- 3.6. COMMANDE NEURO-FLOU ADAPTATIVE (ANFIS: ADAPTATIVE NETWORK FUZZY INFERENCE SYSTEM) ...35
 - 3.6.1. COMMANDE FLOUE DE TYPE TAKAGI-SUGENO.....35
 - 3.6.1.1. PREMIERE COUCHE (FUZZIFICATION).....36
 - 3.6.1.2. DEUXIEME COUCHE (REGLES FLOUES).....37
 - 3.6.1.3. TROISIEME COUCHE (NORMALISATION).....37
 - 3.6.1.4. QUATRIEME COUCHE (CONSEQUENCE OU DEFUZZIFICATION).....37
 - 3.6.1.5. CINQUIEME COUCHE (SOMMATION).....37
 - 3.6.2. PRINCIPE DE TYPE TAKAGI – SUGENO.....37
- 3.7. CREATION DU CONTROLEUR NEURO-FLOUE.....39
- 3.8. RESULTATS DE SIMULATION ET INTERPRETATION.....44
 - 3.8.1. POUR UNE TEMPERATURE $T = 25\text{ C}^\circ$ ET POUR UN ECLAIREMENT FIXE.....44
INTERPRETATION
 - 3.8.2. POUR UNE TEMPERATURE $T = 25\text{ C}^\circ$ ET UN ECLAIREMENT VARIE.....45
INTERPRETATION
 - 3.8.3. COMPARAISON ENTRE LES DEUX METHODES A UNE TEMPERATURE FIXEE $T = 25\text{ C}^\circ$ ET UN ECLAIREMENT VARIE.....45
INTERPRETATION
- 3.9. CONCLUSION46

Liste des figures

FIGURE. 1.1. PRINCIPE DE LA CONVERSION PHOTOVOLTAÏQUE DE L'ENERGIE SOLAIRE.....	3
FIGURE. 1.2. SCHEMA SIMPLIFIE D'UN SYSTEME PV.....	4
FIGURE. 1.3. IMAGE CORRESPONDANTE A UN PANNEAU PHOTOVOLTAÏQUE.....	4
FIGURE. 1.4. MODULE PHOTOVOLTAÏQUE.....	6
FIGURE. 1.5. L'EFFET PHOTOVOLTAÏQUE.....	6
FIGURE. 1.6. COUPE TRANSVERSALE D'UNE CELLULE PV TYPIQUE	7
FIGURE. 1.7. REPRESENTATION SCHEMATIQUE D'UNE CELLULE SOLAIRE.....	7
FIGURE. 1.8. ASSOCIATION DE N MODULES SOLAIRES EN SERIE.....	8
FIGURE. 1.9. ASSOCIATION DES MODULES SOLAIRES EN PARALLELE.....	8
FIGURE. 1.10. ASSOCIATION MIXTE (SERIE-PARALLELE).....	9
FIGURE. 1.11. PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT D'UNE CELLULE PHOTOVOLTAÏQUE.....	10
FIGURE. 1.12. UNE CELLULE PHOTOVOLTAÏQUE : DONT (A) : EST SA STRUCTURE PHYSIQUE ET (B) : EST SON MODELE DE CIRCUIT ELECTRIQUE.....	10
FIGURE. 1.13. CARACTERISTIQUES (I-V) DU MODULE PV POUR DIFFERENTES VALEURS D'ÉCLAIREMENTS.....	12
FIGURE. 1.14. CARACTERISTIQUES (P-V) DU MODULE PV POUR DIFFERENTES VALEURS D'ÉCLAIREMENTS.....	12
FIGURE. 1.15. CARACTERISTIQUES (I-V) DU MODULE PV POUR DIFFERENTES VALEURS DE TEMPERATURE.....	13
FIGURE. 1.16. CARACTERISTIQUES (P-V) DU MODULE PV POUR DIFFERENTES VALEURS DE TEMPERATURE...	13
FIGURE. 1.17. SYMBOLE D'UN CONVERTISSEUR DC-DC.....	15
FIGURE. 1.18. CIRCUIT ELECTRIQUE DE CONVERTISSEUR BOOST.....	15
FIGURE. 1.19. SCHEMA ELECTRIQUE D'UN CONVERTISSEUR BOOST FERME.....	16
FIGURE. 1.20. SCHEMA ELECTRIQUE D'UN CONVERTISSEUR BOOST OUVERT.....	16
FIGURE. 1.21. SCHEMA ELECTRIQUE D'UN CONVERTISSEUR BUCK.....	17
FIGURE. 1.22. SCHEMA ELECTRIQUE D'UN CONVERTISSEUR BUCK FERME.....	18
FIGURE. 1.23. SCHEMA ELECTRIQUE D'UN HACHEUR BUCK OUVERT.....	18
FIGURE. 1.24. SCHEMA ELECTRIQUE D'UN CONVERTISSEUR BUCK-BOOST.....	19
<hr/>	
FIGURE. 2.1. CHAINE DE CONVERSION D'ENERGIE SOLAIRE COMPRENANT UNE COMMANDE MPPT.....	22
FIGURE. 2.2. PRINCIPE DE LA MPPT AVEC LA METHODE P&O.....	22
FIGURE. 2.3. ALGORITHME DE LA METHODE P&O.....	23
FIGURE. 2.4. CARACTERISTIQUE DE FONCTIONNEMENT DE LA METHODE INC COND.....	24
FIGURE. 2.5. ALGORITHME DE LA METHODE INCREMENT DE CONDUCTANCE.....	26

FIGURE. 2.6. SCHEMA BLOCK DE SIMULATION D'UN TECHNIQUE P&O.....	27
FIGURE. 2.7.A. GRAPHE DE PUISSANCE D'UN ECLAIREMENT CONSTANT DE TECHNIQUE P&O.....	27
FIGURE. 2.7.B. GRAPHE DE PUISSANCE D'UN ECLAIREMENT CONSTANT DE TECHNIQUE (INC COND).....	27
FIGURE. 2.7.C. GRAPHE DE PUISSANCE D'UN ECLAIREMENT VARIABLE DE TECHNIQUE P&O.....	28
FIGURE. 2.7.D. GRAPHE DE PUISSANCE D'UN ECLAIREMENT VARIABLE DE TECHNIQUE (INC COND).....	28
FIGURE. 2.8. COMPARATIVE LES RESULTATS DES TECHNIQUES MPPT « P&O » ET « INC COND ».....	29
<hr/>	
FIGURE. 3.1. PRINCIPE DU SYSTEME NEURO-FLOU.....	33
FIGURE. 3.2. DIFFERENTES ARCHITECTURES DES SYSTEMES NEURO-FLOU.....	33
FIGURE. 3.3. PREMIERE ARCHITECTURE NEURO-FLOUE.....	34
FIGURE. 3.4. DEUXIEME ARCHITECTURE DES RESEAUX NEURO-FLOU, REALISATION EN SERIE.....	34
FIGURE. 3.5. RESEAU DE NEURONES FONCTIONNANT EN AVAL D'UN SYSTEME FLOU.....	35
FIGURE. 3.6. ARCHITECTURE D'ANFIS.....	36
FIGURE. 3.7. STRUCTURE DE BASE DU CONTROLEUR FLOUE.....	39
FIGURE 3.8 : GRAPHE DE PUISSANCE D'UN ECLAIREMENT CONSTANT DE TECHNIQUE NEURO-FLOU.....	44
FIGURE 3.9 : GRAPHE DE PUISSANCE D'UN ECLAIREMENT VARIABLE DE TECHNIQUE NEURO-FLOU.....	45
FIGURE 3.10 : COMPARATIVE LES RESULTATS ENTRE P&O ET NEURO-FLOU.....	45

Liste des tableaux

TABLEAU. 1.1. TYPES DE PANNEAU PHOTOVOLTAÏQUE.....	05
TABLEAU. 2.1. PARAMETRES DU PANNEAU PV.....	26
TABLEAU. 2.2. COMPARAISON DES TECHNIQUES MPPT « P&O » ET « INC COND ».....	28

Listes des Acronymes et Symboles

Acronymes

GPV	GENERATEUR PHOTOVOLTAÏQUE.
BOS	Balance of system
PV	Photovoltaïque
MPPT	Maximum power point tracking
INC	Incrémentale conductance
FLC	Fuzzy Logic Contrôler
ANN	Artificiel neural network
PSO	Particule Swarm Optimisation
GA	Génétique algorithme
P&O	Perturbation et Observation
DC/DC	Convertisseur continu-continu
ANFIS	Adaptative Neuro Fuzzy Inférence System
RN	Réseau de Neurone
FTS	Flou Takagi-Sugeno
D	Droit
G	Gauche
L	Loin
P	Petit
Ref	Reference
M	Moyen
T	Très

Symboles :

I_{pv}	Courant Photovoltaïque
I_{ph}	Photo-courant
q	Charge de l'électron (coulomb)
V_{pv}	Tension de sortie de la Photovoltaïque.
R_s	Résistance série (Ω)
R_p	Résistance parallèle (Ω)
K	Constant de Boltzmann (J/k)
T	Température ($^{\circ}C$)
N_s	Nombre de modules en séries
N_p	Nombre de modules en parallèles
G	Eclairement W/m^2
X_1	Variable d'entrée
V_s	Tension sur la borne de charge d'écrivant (V)
V_0	Tension d'entrée (V)
I_{mp}	Courant au point de puissance maximale (A)
V_{mp}	Tension au point de puissance maximale (V)
P_{max}	Puissance maximale
N	Nombre de cellule
e	Erreur
G_{ci}	Conductance instantanée
Y	Variable de sortie
E	Variable d'entrée
n	Le nombre de règles flou que contient la base de règles.
μ_{Ai}	Fonction d'appartenance
N_c	Nœud circulaire
$\Delta\alpha$	Rapport cyclique
μ_{Bi-2}	Fonction d'appartenance

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

Les énergies renouvelables et notamment l'énergie photovoltaïque, qui est l'une des énergies les plus renouvelables au monde, sont devenues des sources très prometteuses de ressources énergétiques d'avenir pour tout pays, d'abord en raison de leur nature particulière, mais aussi en raison de la baisse des réserves de ressources traditionnelles (pétrole, gaz, etc.), et la croissance la démographie et l'économie de ce pays, encouragent la production de plus d'énergie électrique.

L'énergie photovoltaïque est obtenue directement à partir du rayonnement solaire. Elle peut même être convertie en énergie électrique grâce à l'effet photoélectrique. Les panneaux photovoltaïques constitués de cellules photovoltaïques ont la capacité de convertir des photons en électrons. Ainsi, l'énergie sous forme de courant continu est directement utilisable [2].

L'efficacité des systèmes photovoltaïques peut être améliorée avec des solutions qui utilisent des techniques de recherche de point de puissance maximale (appelées technologies MPPT).

Il existe de nombreuses méthodes largement mises en œuvre pour le suivi des MPP. Les méthodes les plus courantes sont : « perturbation et surveillance » (P&O), incrémentation de la conductance (Inc_cond). Ces technologies ont certes montré une bonne efficacité mais ont également montré des limites, telles qu'une lenteur et une erreur dynamiques assez importantes par rapport aux nouvelles technologies intelligentes telles que la logique floue, les réseaux de neurones et les neurones flous. Dans la plupart des cas les systèmes de réseaux de neurones flous utilisent 25 bases ou plus.

Pour cela, nous avons organisé notre travail en trois chapitres comme suit :

Dans le premier chapitre, nous donnerons un aperçu des systèmes photovoltaïques. En présentant le générateur photovoltaïque et son principe de fonctionnement, nous présenterons également les convertisseurs stationnaires DC/DC.

Dans la deuxième partie consacrée à la description de la commande MPPT, de ses différentes techniques. Notre étude est basée sur des techniques de « perturbation et observation » (P&O) et de conduction additionnelle (Inc_cond) ; Comparaison des deux technologies.

Dans le troisième et dernier chapitre, nous présenterons les résultats de la modélisation et de la simulation par MATLAB-SIMULINK que nous avons effectuées pour la technique du neurone flou et comparerons les résultats obtenus avec les systèmes classiques ((P&O) et (Inc_cond)).

CHAPITRE 01 : SYSTEME PHOTOVOLTAÏQUE ASSOCIE AU CONVERTISSEUR

1.1. Introduction :

Face à une demande énergétique croissante, il est nécessaire de trouver d'autres solutions pour répondre à ces exigences, par exemple en développant le potentiel solaire le plus abondant de ces pays [1].

Dans ce chapitre, on va présenter le système photovoltaïque, nous étudions les panneaux photovoltaïques et différents types de cellules photovoltaïques où les cellules solaires convertissent généralement la lumière du soleil en énergie électrique avec une basse tension limitée. On va décrire brièvement les cellules et leurs principes de fonctionnement ainsi que la modélisation d'une cellule photovoltaïque (CPV) Ces cellules sont intégrées et connectées ensemble pour donner les modules solaires disponibles dans le commerce, qui sont ensuite connectés pour former un générateur photovoltaïque (GPV) basé sur les exigences de tension et de courant du système, un dispositif qui permet la conversion directe de la lumière en énergie électrique l'influence des différents paramètres météorologiques (la température et l'éclairement), puis citer quelques avantages et inconvénients

Dans un système de conversion d'énergie photovoltaïque, la conversion de puissance peut comprendre deux étapes, la première est la conversion DC / DC, puis la conversion DC / AC. Dans le système photovoltaïque, le convertisseur DC / DC a généralement pour fonction d'augmenter la tension afin que l'onduleur puisse atteindre un courant sinusoïdal avec la tension, et le convertisseur est utilisé pour faire correspondre la source d'alimentation et le puits de charge. Dans ce chapitre nous nous intéressons aux études typiques des convertisseurs DC / DC.

1.2. L'énergie solaire :

L'électricité est l'une des formes d'énergie les plus polyvalentes et est la mieux adaptée à divers besoins. Il est si polyvalent qu'il est difficile d'imaginer une société technologiquement avancée qui ne l'utilise pas aujourd'hui. Le système photovoltaïque est utilisé depuis 40 ans. L'application démarre à partir du programme spatial et est utilisée pour la transmission radio par satellite. Ils continuent à utiliser des balises en mer et des équipements dans des endroits éloignés de tous les pays / régions du monde, utilisant des batteries pour stocker l'énergie électrique pendant des heures sans lumière

du soleil [2].

Le principe de l'énergie solaire photovoltaïque consiste à transformer le rayonnement solaire en électricité à l'aide d'une cellule photovoltaïque.

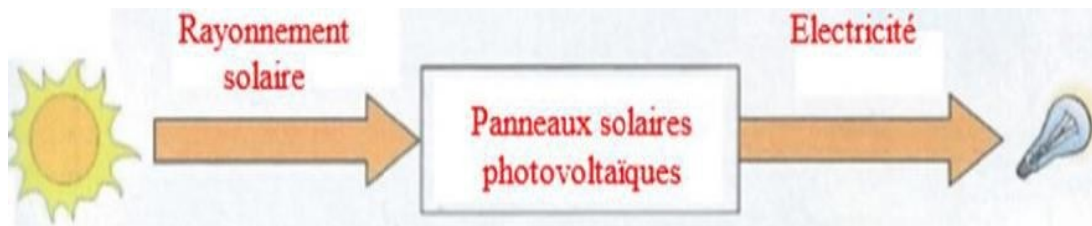


Figure 1.1 : principe de la conversion photovoltaïque de l'énergie solaire [3].

1.3. Historique de l'énergie photovoltaïque :

Quelques dates importantes dans l'énergie photovoltaïque [4] :

1839 : le physicien français Edmond Becquerel découvre l'effet photovoltaïque.

1875 : Werner Von Siemens expose un article sur l'effet photovoltaïque dans les semi-conducteurs devant l'Académie des sciences de Berlin.

1954 : Trois chercheurs américains Chapin, Pearson et Prince construisent une cellule photovoltaïque.

1959 : les États-Unis mettent en orbite Vanguard, le premier satellite alimenté par des cellules photovoltaïques

1973 : L'Université du Delaware construit la première maison alimentée par des cellules photovoltaïques.

1983 : La première voiture alimentée par l'énergie photovoltaïque a parcouru 4000 kilomètres en Australie.

1.4. Les systèmes photovoltaïques :

Le système photovoltaïque est composé d'un champ de module et d'un ensemble de composants, qui sont adaptés à la puissance générée par le module selon les spécifications du récepteur, également appelé « équilibre du système » ou BOS, compris tous les équipements entre les champs de module [5].

Bien que le système de production d'énergie photovoltaïque soit la base que représente le système, le module de production d'énergie photovoltaïque ne peut à lui seul faire beaucoup de choses : pour répondre aux exigences définies, en effet, le module de production d'énergie photovoltaïque doit être étroitement lié au système complet correspondant à une application très spécifique. Par conséquent, un système photovoltaïque sera constitué des générateurs susmentionnés, généralement associés à un ou plusieurs des éléments suivants :

- Panneaux photovoltaïques (+ structure porteuse).

- Convertisseur DC / AC.
- Un convertisseur AC / AC.
- Réseau électrique.

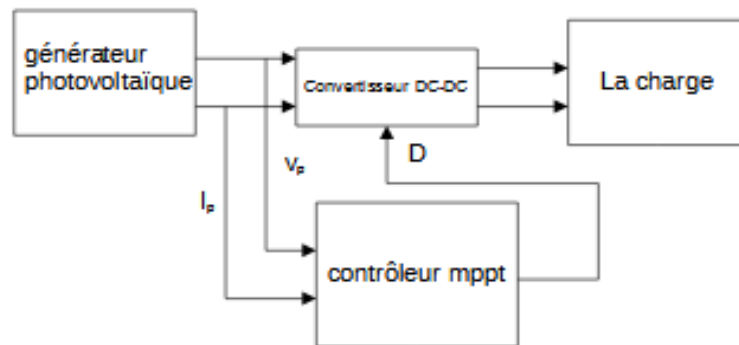


Figure 1.2 : Schéma simplifié d'un système PV.

1.5. Les panneaux photovoltaïques :

Le panneau solaire consiste en des modules photovoltaïques interconnectés en série et/ou parallèles pour produire la puissance requise. Ces modules sont montés sur un cadre métallique qui reste et admet le champ solaire avec un angle d'inclinaison spécifique pour augmenter la puissance de la même température avec un éclairage homogène, L'association de cellules photovoltaïques série est l'augmentation de la tension, ainsi que la tension résultante de l'alimentation de chaque cellule. Au contraire, l'électricité augmente dans l'association parallèle [6].



Figure 1.3 : image correspondante à un panneau photovoltaïque.

1.6. Différents types des cellules solaires :

Les différences matériaux utilisés l'un des facteurs qui influencent les performances d'une cellule photovoltaïque est la qualité des matériaux utilisés dans sa fabrication. Votre retour peut varier de 17% à la plus efficace à moins de 10% pour moins efficace. Il existe 3 types de matériaux largement utilisés dans l'industrie photovoltaïque. Tous sont Silicium qui est un semi-conducteur. [7].

Technologies	Monocrystalline	Polycrystalline	Amorpha
Cellule et module			
Caractéristique de cellule	<p>Très bon rendement: 14 à 20% une</p> <p>Durée de vie: Importante (25ans)</p> <p>Cout de fabrication: Elevé</p> <p>Puissance: 100 à 150 WC /m²</p> <p>Rendement faible sous un faible éclairement</p> <p>Pert de rendement avec l'élévation de la température</p> <p>Fonctionne qu'avec un fort ensoleillement</p> <p>Couleur bleue</p> <p>Uniforme</p>	<p>Bon rendement: 11 à 15 %</p> <p>Durée de vie: Important (25ans)</p> <p>Cout de fabrication: meilleur marché que les panneaux monocristallins</p> <p>Puissance: 100Wc/m²</p> <p>Rendement faible sous un foible éclairement</p> <p>Pert de rendement avec l'élévation de la temperature</p> <p>Possède une meilleure résistance à une haute de temperature</p>	<p>Faible efficacité : 5% à 9%</p> <p>Durée de vie : Très important (20 ans)</p> <p>Coût de fabrication : moins cher que les autres technologies</p> <p>50Wc / m² Faible rendement en plein soleil</p> <p>Meilleure résistance à haute température</p> <p>Peut fonctionner même dans des conditions de faible luminosité</p> <p>Peut être utilisé pour les panneaux flexibles</p>
Part de Marché	43%	47%	10%

Tableau 1.1 : Types de panneau photovoltaïque [3].

1.7. Module Photovoltaïque :

Le composant le plus important de toute installation PV est le module photovoltaïque, qui consiste en des cellules solaires Interconnectées. Ces modules sont connectés pour former des champs afin qu'ils puissent répondre à différents besoins en énergie. La figure représente un module photovoltaïque. Des modules supplémentaires plus puissants sont disponibles sur le marché, en particulier pour la connexion, mais il reste encore une limite de poids et de manutention [8].



Figure 1.4 : Module photovoltaïque.

1.8. L'effet photovoltaïque :

L'énergie photovoltaïque (PV) est le processus de conversion directe de la lumière en énergie électrique. Contrairement au solaire passif, qui utilise des éléments structurels des bâtiments pour mieux le chauffer (ou le refroidir), le solaire actif utilise du liquide de refroidissement (liquide ou gaz) pour transmettre et stocker la chaleur du soleil (on pense). L'énergie photovoltaïque n'est pas une forme d'énergie thermique. Il utilise des cellules solaires pour convertir directement l'énergie solaire en énergie électrique [9].

En 1839, le physicien français Edmond Becquerel (Edmond Becquerel) a observé pour la première fois l'effet photoélectrique, c'est-à-dire la production d'électricité directement à partir de la lumière. Cependant, ce n'est que dans les années 1950 que les chercheurs des Bell Labs ont réussi à fabriquer la première cellule solaire, qui est le composant principal du système photovoltaïque [9].

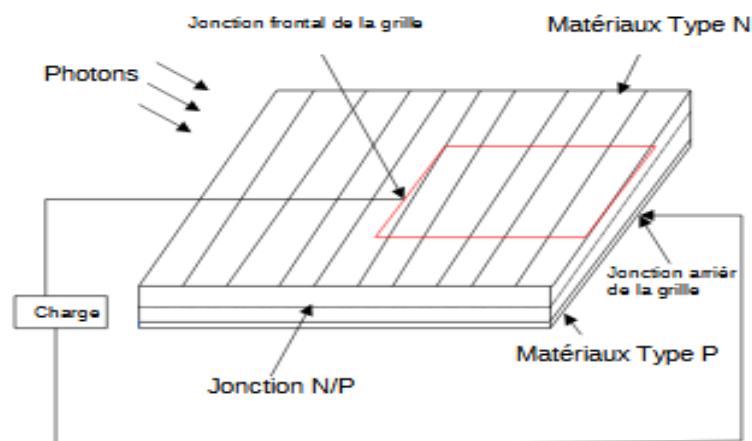


Figure 1.5 : L'effet photovoltaïque.

1.9. La cellule photovoltaïque :

Les cellules photovoltaïques sont des composants photovoltaïques capables de convertir directement la lumière du soleil en énergie électrique grâce à un processus appelé « effet photovoltaïque » découvert par E. Becquerel en 1839. Ils sont constitués de matériaux semi-conducteurs. La structure la plus simple d'une cellule photovoltaïque présente une jonction entre deux régions de dopage différent (homojonction) ou entre deux matériaux différents (hétérojonction). Le but de la structure photovoltaïque est de générer un champ électrique interne [10].

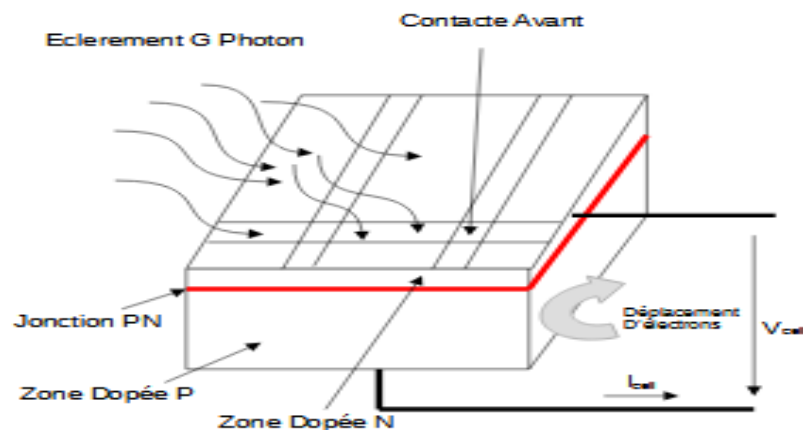


Figure 1.6 : Coupe transversale d'une cellule PV typique [11].

1.10. Fabrication de la cellule photovoltaïque :

Les cellules photovoltaïques sont fabriquées en combinant deux couches de silicium avec N et l'autre dopée P, Cela crée une traversée des deux zones opposées N et P et crée un champ électrique qui conserve la séparation des charges positives des négatif (bande interdite) dans laquelle un électron ne peut circuler qu'une excitation externe : dans notre cas, c'est le rayon solaire, qui doit être supérieur à l'écart [12].

La figure suivante nous montre une représentation de squelette d'une cellule solaire :

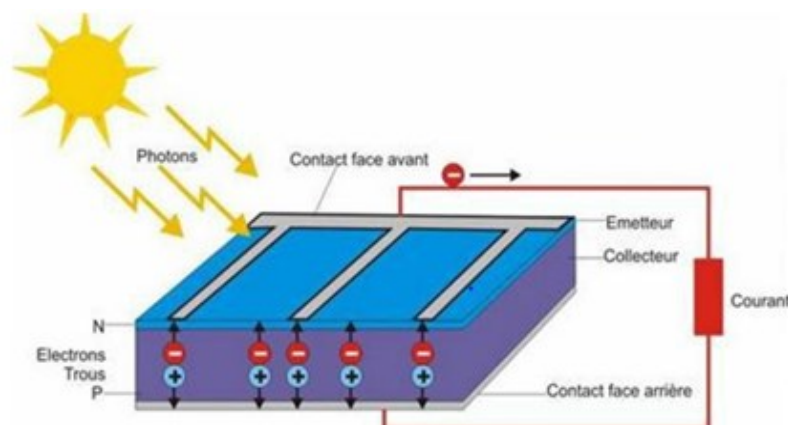


Figure 1.7 : représentation schématisée d'une cellule solaire [12].

1.11. Assemblage des modules photovoltaïques :

Afin d'augmenter la tension de fonctionnement, les cellules photovoltaïques sont connectées en série. Les modules peuvent également être connectés en série et en parallèle pour construire le champ photovoltaïque afin d'augmenter la tension et l'intensité d'utilisation. Toutefois, il est important de prendre quelques précautions car l'existence de cellules moins efficaces et l'occlusion d'une ou plusieurs cellules (dus à de l'ombrage, de la poussière, etc....), peuvent endommager les cellules de façon permanente [13].

1.11.1. Association en série :

En ajoutant la même cellule ou module en série, le courant de la branche reste le même mais la tension augmente proportionnellement au nombre de cellule (modules) connectées en série.

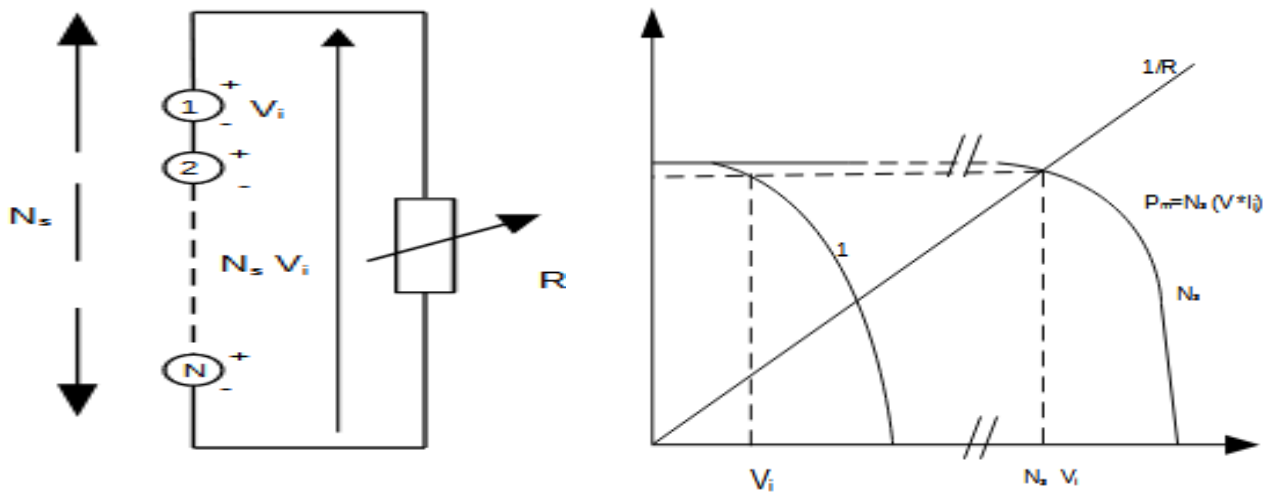


Figure 1.8 : Association de N modules solaires en série [14].

1.11.2 Association en parallèle :

En ajoutant les mêmes modules en parallèle, la tension de la branche est égale à la tension de chaque module, et le courant augmente proportionnellement au nombre de modules connectés en parallèle dans la branche.

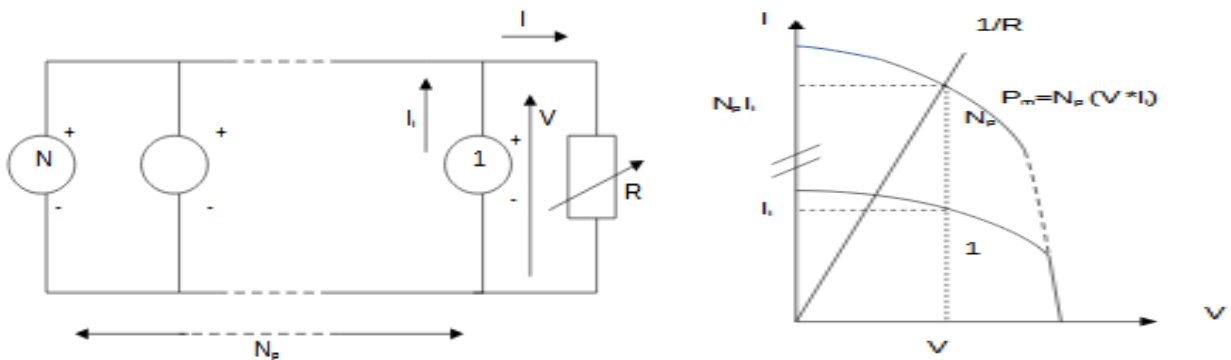


Figure 1.9 : Association des modules solaires en parallèle [14].

1.11.3. Association en série - parallèle :

Afin de répondre aux exigences de courant et de tension, un groupement mixte doit être utilisé, c'est-à-dire série-parallèle.

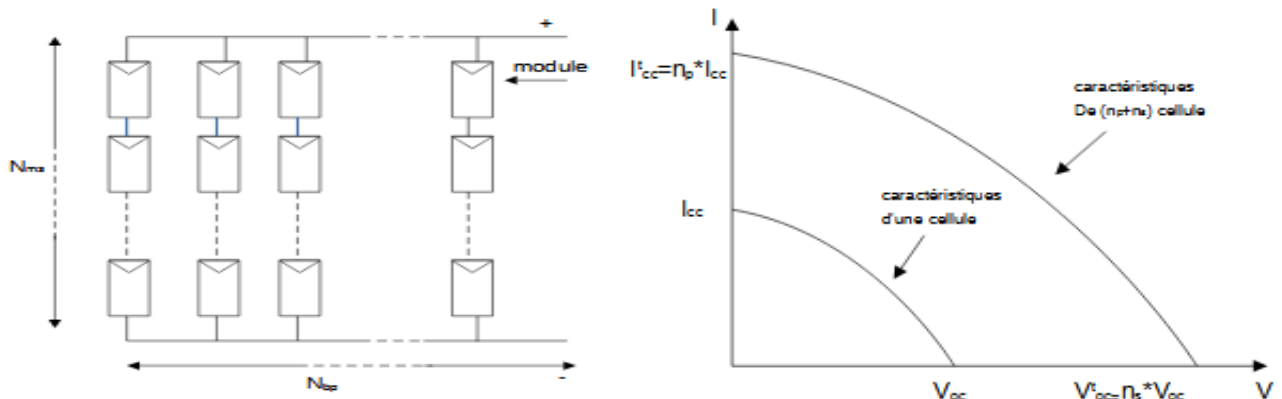


Figure 1.10 : Association mixte (série-parallèle).

1.12. Principe de la conversion photovoltaïque :

La conversion de l'énergie solaire en énergie électrique est basée sur l'effet photoélectrique, c'est-à-dire de produire la capacité des photons, de charger des chargeurs (électrons et trous) dans un matériau. Lorsqu'un semi-conducteur est éclairé avec un rayonnement de longueur d'onde adéquate (la résistance des photons doit être au moins égale à l'écart d'énergie du matériau), il permet l'énergie des transitions électroniques de photons absorbés de la bande de Valence à la ligne de semi-conducteurs. Pour que les paires de trous d'électrons puissent être générées, ce qui peut être généré au transport de l'électricité (photoconductivité) peut contribuer à travers le matériau de polarisation. Maintenant, lorsqu'une transition PN est allumée, les paires de trous d'électrons générés dans la zone de positionnement de la transition sont immédiatement déconnectées par le champ électrique qui prévaut dans cette zone et est activé de chaque côté dans les régions neutres. Les carrefours. Lorsque l'appareil est isolé, il semble une différence potentielle dans les connexions de connexion (photosing); Si elle est connectée à une charge électrique externe, le passage d'un courant est observé, tandis qu'une tension n'est pas effectuée sur le périphérique. Le principe d'une cellule photovoltaïque est basé sur le phénomène physique appelé effet photovoltaïque. Il est de déterminer une force électromotrice lorsque la surface de cette cellule est exposée au rayonnement solaire [12].

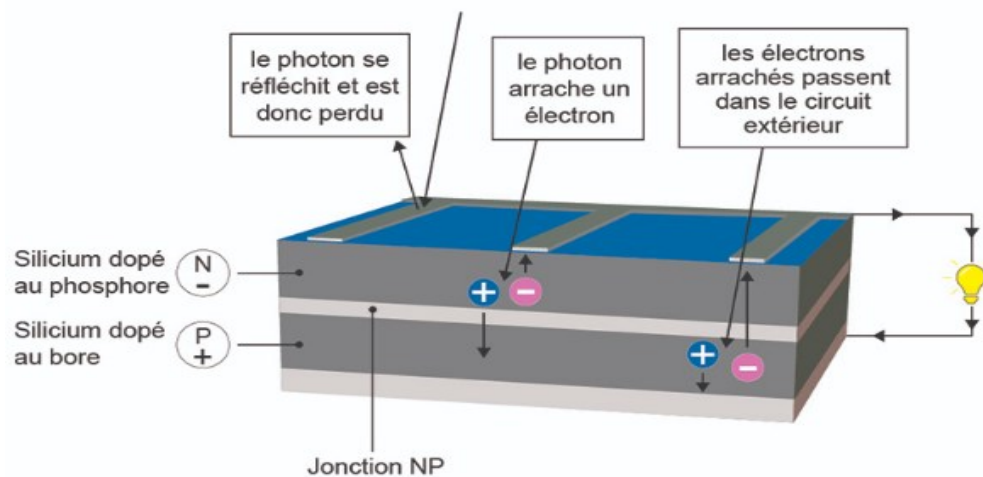


Figure 1.11 : Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque [14].

1.13. Modélisation et circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque :

Pour établir un modèle équivalent d'une cellule photovoltaïque correcte sans considération du courant et de la tension, il est nécessaire de faire un choix bien déterminé des circuits électriques qui le constituent et de comprendre la configuration physique et les caractéristiques électriques des éléments de la cellule. Pour cela, plusieurs modèles mathématiques sont développés pour représenter le comportement non linéaire des jonctions des semi-conducteurs. Il y a deux modèles d'une cellule photovoltaïque, à savoir le modèle à deux diodes et le modèle à une diode [16].

La meilleure façon et la plus classique de modéliser une cellule photovoltaïque est le modèle à une seule diode (one diode model) comme indiqué sur la figure qui suit :

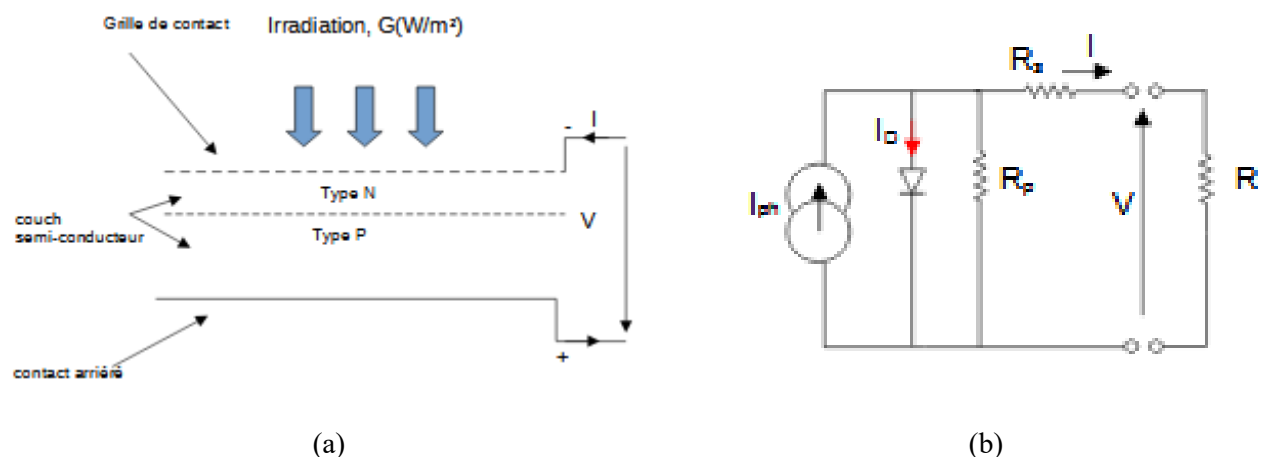


Figure 1.12 : une cellule photovoltaïque : dont (a) : est sa structure physique et (b) : est son modèle de circuit électrique [12].

Ce schéma équivalent est le plus simple de la cellule photovoltaïque à jonction PN idéale il comprend une source de courant I_{light} (I_{ph}) qui modélise le courant photoélectrique, associée à une diode en parallèle (D) qui modélise la jonction P-N en plus des deux résistances parasites qui sont

introduites dans ce schéma (R_s et R_p) :

Ces résistances auront un certain impact sur les caractéristiques de la cellule $I = f(V)$: avec R_s dépend principalement de la résistance du semi-conducteur utilisé.

Les lois de Kirchhoff nous permettent d'écrire la relation suivante :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_{sat} \left[e^{\left(\frac{q(V_{pv} + (I_{pv} \times R_s))}{n \times K \times T} \right)} - 1 \right] - \frac{V_{pv} + (I_{pv} \times R_s)}{R_p} \quad 1.1$$

Avec :

I_{sat} : Courant de saturation de diode, dépendant de la température.

I_{ph} : Photo courant, dépendant de l'intensité de l'irradiation.

n : est le facteur d'idéalité de la jonction ($1 < n < 3$) ex : $n = 1.6$

R_p : Résistance parallèle, représentant l'admittance parallèle du générateur de courant

R_s : Résistance en série, modélisant les pertes ohmiques du matériau et des contacts.

V_{pv} : Tension aux bornes de la cellule.

I_{pv} : Courant fourni par la cellule ;

A : Indice du matériau (compris entre 1 et 2 selon de la technologie).

$$V_t = \frac{N_s \times T \times K}{q} \quad 1.2$$

N_s : Nombre des cellules connectées en séries.

K : Constante de Boltzmann = 1380.10^{-23} J / K

T : Température en Kelvin

q : Charge de l'électron = $1.602.10^{-19}$ C

1.14. Le générateur photovoltaïque :

Le générateur photovoltaïque est un ensemble d'équipements qui utilise l'énergie photovoltaïque pour répondre à la demande de charge. Selon la puissance requise, les modules peuvent être assemblés en panneaux pour former un « champ photovoltaïque ». Le panneau solaire est connecté au récepteur sans aucun autre composant et fonctionne "sur le soleil", c'est-à-dire que l'énergie électrique fournie au récepteur est fonction de l'énergie solaire. Par conséquent, il atteint son maximum lorsque le soleil atteint son point le plus élevé et atteint zéro la nuit [9].

Cependant, généralement, la demande de puissance ne correspond pas à la durée d'ensoleillement et une intensité régulière est requise (par exemple, alimenter un réfrigérateur ou le mettre sous tension). Ensuite, le système est équipé de batteries, qui peuvent stocker

et restituer l'électricité à temps [9].

Par conséquent, le régulateur est essentiel pour protéger la batterie contre les surcharges ou les décharges profondes qui affectent gravement sa durée de vie. Pour de nombreuses applications, le courant continu généré par le générateur photovoltaïque est converti en courant alternatif à l'aide d'un onduleur. Le générateur photovoltaïque GPV est modélisé par l'équation suivante :

$$I_{PV} = (N_{PP}I_{Ph} - N_{PP}) \times \left(e^{\frac{N_{SS}V_{PV} + R_S I_{PV} (N_{SS}/N_{PP})}{(V_t * A * N_{SS})}} - 1 \right) - \frac{N_{SS}V_{PV} + R_S I_{PV} (N_{SS}/N_{PP})}{R_p (N_{SS}/N_{PP})} \quad 1.3$$

1.15. Les Caractéristique (L'influence de la température et de l'éclairement) :

1.15.1. Influence du l'éclairement sur les caractéristiques (I-V) et (P-V) :

Les figures (1.13) et (1.14) montrent les courbes I-V et P-V de modules photovoltaïques sous différents niveaux de rayonnement solaire à une température fixe T = 25 C °. De toute évidence, le rayonnement solaire a une forte influence sur le courant de court-circuit. Le courant de court-circuit Isc change proportionnellement à l'évolution du rayonnement solaire. Veuillez également noter que la tension en circuit ouvert Voc chute légèrement.

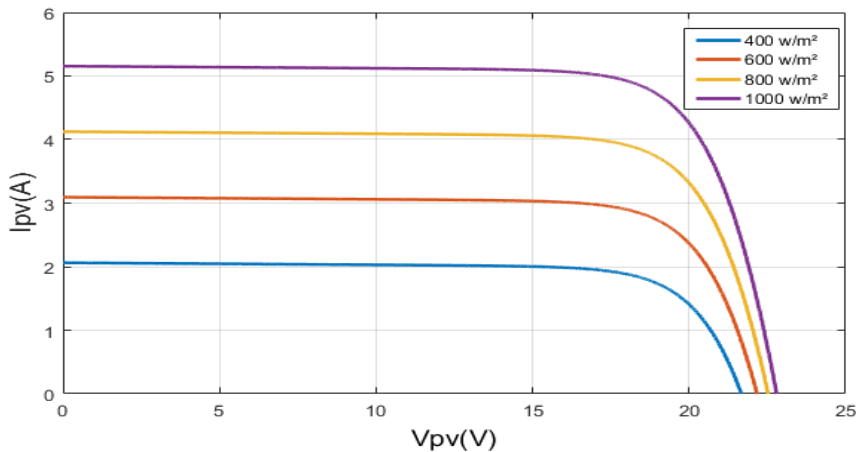


Figure 1.13 : Caractéristiques (I-V) du module PV pour différentes valeurs d'éclairements [17].

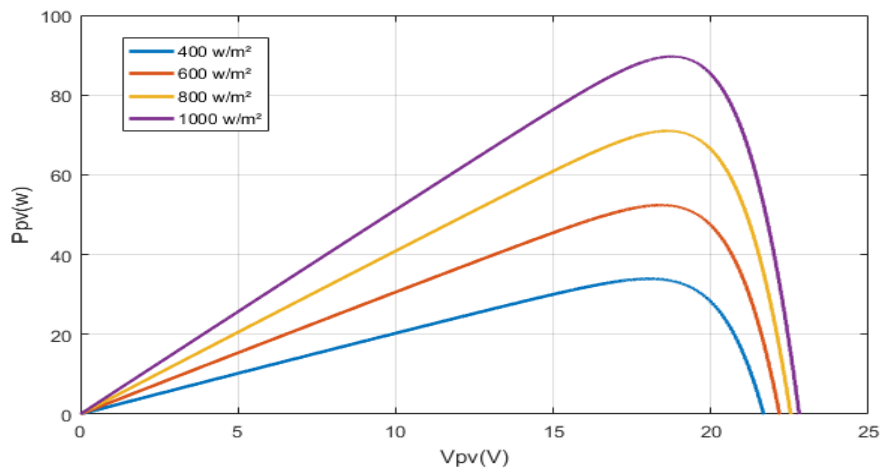


Figure 1.14 : Caractéristiques (P-V) du module PV pour différentes valeurs d'éclairements [17].

1.15.2 Influence de la Température sur les caractéristiques (I-V) et (P-V) :

Comme tous les autres dispositifs à semi-conducteurs, les cellules solaires sont également très sensibles à la température et la température a un impact majeur sur les performances des cellules photovoltaïques. Dans l'expérience, nous avons remarqué que le courant de court-circuit varie peu avec la température, tandis que la tension à vide a une plus grande influence (environ $-0,4\% / K$). Par conséquent, la température a un impact significatif sur le rendement des cellules photovoltaïques (la perte de puissance est d'environ 9 à 15% (augmentation de 30°)). L'influence du rayonnement solaire sur la puissance maximale utilisable est plus grande que l'influence des changements de température.

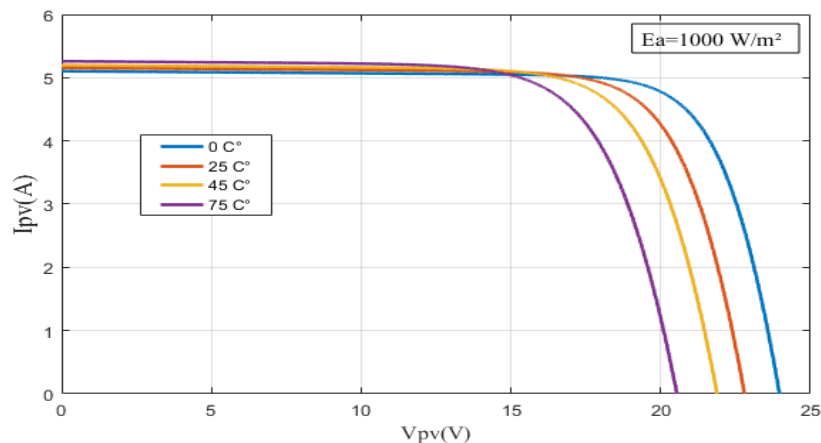


Figure 1.15 : Caractéristiques (I-V) du module PV pour différentes valeurs de température [17].

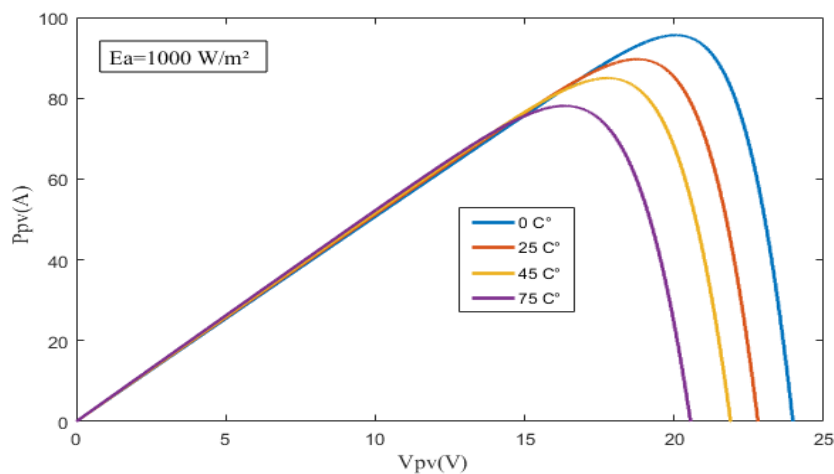


Figure 1.16 : Caractéristiques (P-V) du module PV pour différentes valeurs de température [17].

1.16. Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque :

1.16.1. Avantage :

- Tout d'abord, une grande fiabilité. L'appareil n'a pas de pièces mobiles, il est donc particulièrement adapté aux zones reculées. C'est pourquoi il est utilisé sur des engins spatiaux.
- Le caractère modulaire des panneaux photovoltaïques permet alors un montage simple et une adaptation aux différents besoins énergétiques. La taille du système peut être adaptée aux

applications de puissance allant des milliwatts aux mégawatts.

- Les coûts de fonctionnement sont très bas en raison d'une maintenance réduite et il n'y a pas besoin de carburant, de transport ou de personnel hautement professionnel.
- La technologie photovoltaïque a une qualité écologique, car le produit final est sans pollution, silencieux et n'interférera pas avec l'environnement, à moins qu'il n'occupe un grand espace d'installation [18].

1.16.2. Inconvénients :

- La fabrication de modules photovoltaïques est de haute technologie et nécessite des investissements importants.
- L'efficacité de conversion réelle du module est très faible, environ 10 à 15%, et la limite théorique de l'unité est de 28%. Les générateurs photovoltaïques ne concurrencent les générateurs diesel que parce que la demande d'énergie dans les régions éloignées est faible.
- Cela dépend des conditions météorologiques.
- Si vous avez besoin de stocker de l'énergie électrique sous forme chimique (batterie), cela augmentera le coût du générateur.
- Il existe encore de nombreux problèmes dans le stockage de l'énergie électrique.
- La raison du faible rendement des panneaux photovoltaïques est que la batterie fonctionne normalement. Pour déplacer des électrons, l'énergie rayonnée doit être au moins égale à 1 eV. Par conséquent, toute lumière incidente avec une énergie inférieure ne sera pas convertie en énergie électrique. De même, Les rayons lumineux avec une énergie supérieure à 1 eV perdront cette énergie et le reste sera dissipé sous forme de chaleur [18].

1.17. Convertisseur statique DC/DC (hacheurs) :

Un convertisseur statique est un dispositif à semi-conducteur qui convertit l'énergie électrique disponible sous une forme appropriée pour alimenter la charge. Les convertisseurs statiques sont des dispositifs avec des composants électroniques qui peuvent modifier la tension et / ou la fréquence des ondes électriques [19].

Les convertisseurs DC-DC (ou hacheurs) sont utilisés dans les systèmes solaires pour faire correspondre les sources d'alimentation à amplitude variable (panneaux photovoltaïques) avec des charges qui nécessitent généralement une tension DC constante.

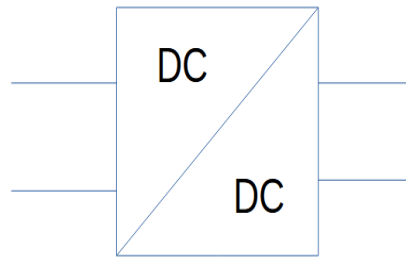


Figure 1.17 : Symbole d'un convertisseur DC-DC.

1.18. Types des convertisseurs DC-DC :

La topologie non isolée n'a pas de transformateur d'isolement. Ils sont généralement utilisés pour entraîner des moteurs à courant continu [20].

Ces topologies sont divisées en trois catégories :

- Hacheur dévolteur (ou Buck).
- Hacheur survolteur (ou Boost).
- Survolteur-Dévolteur (hacheur Buck-boost).

1.18.1. Hacheur survolteur (Boost) :

Le convertisseur boost est connu par le nom d'élévateur de tension. Le schéma de la figure (1.18) représente le circuit électrique du boost. Au premier temps (αT), le transistor (S) est fermé, le courant dans l'inductance croît progressivement, et stocker progressivement de l'énergie jusqu'à la fin de la première étape. Ensuite, le transistor (S) s'ouvre et l'inductance (L) s'opposant à la diminution de courant (I_L), génère une tension qui s'ajoute à la tension de source, qui s'applique sur la charge (R) à travers la diode (D) [21].

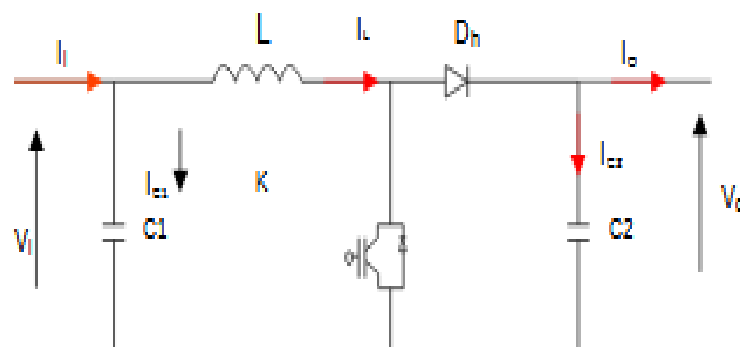


Figure 1.18 : Circuit électrique de convertisseur boost.

1.18.1.1. Modèle mathématique équivalent :

La figure (1.18) montré le schéma du circuit équivalent d'un convertisseur boost avec l'interrupteur K, fermé et ouvert.

Pour la première période $0 < t < DT$

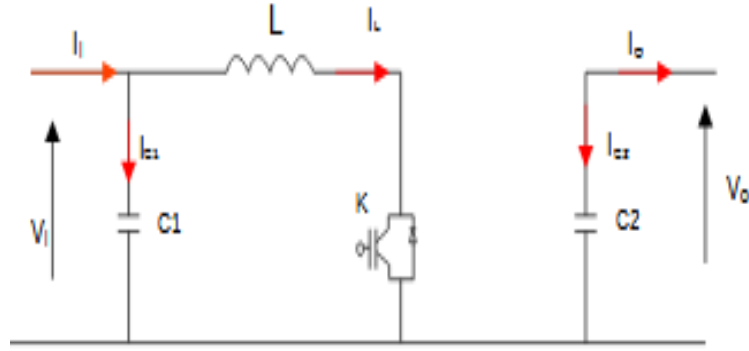


Figure 1.19 : Schéma électrique d'un convertisseur boost fermé

L'application des lois de Kirchhoff sur les circuits équivalents des deux phases de fonctionnement donnent les équations suivantes :

$$\begin{cases} I_{c1}(t) = c1 \frac{dV_i(t)}{dt} = I_i(t) - I_L(t) \\ I_{c2}(t) = c2 \frac{dV_o(t)}{dt} = -I_o(t) \\ V_L = L \frac{dI_L(t)}{dt} = V_i(t) \end{cases} \quad 0 < t < DT \quad 1.4$$

D : le rapport cyclique.

Pour la deuxième période (1-D)

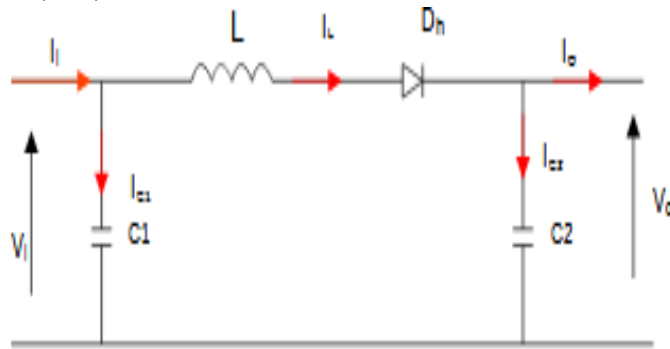


Figure 1.20 : Schéma électrique d'un convertisseur boost ouvert.

$$\begin{cases} I_{c1}(t) = c1 \frac{dV_i(t)}{dt} = I_i(t) - I_L(t) \\ I_{c2}(t) = c2 \frac{dV_o(t)}{dt} = I_L(t) - I_o(t) \\ V_L = L \frac{dI_L(t)}{dt} = V_i(t) - V_o(t) \end{cases} \quad DT < t < (1-D) \quad 1.5$$

En arrangeant les termes des équations précédentes (1.4) et (1.5), on obtient la modélisation dynamique du convertisseur boost.

$$\begin{cases} I_L(t) = I_i(t) - C1 \frac{dV_i(t)}{dt} \\ I_o(t) = (1 - D)I_L - C2 \frac{dV_o(t)}{dt} \\ V_i(t) = L \frac{dI_L(t)}{dt} + (1 - D)V_o \end{cases} \quad DT < t < (1-D) \quad 1.6$$

1.18.1.2. Principe de fonctionnement :

Selon l'état du commutateur K, le fonctionnement du convertisseur Boost peut être divisé en deux étapes différentes :

Lorsque l'interrupteur "K" est fermé, l'inductance est chargée, et le courant $i(t)$ du module de cellule solaire augmente progressivement pendant $t \in [0, DT]$, puis la diode (Dh) est éteinte, la charge est alors déconnectée de l'alimentation électrique. Le condensateur C alimente la charge.

Lorsque "K" est connecté, l'interrupteur Dh est fermé : la déconnexion du courant provoque une surtension, donc l'utilité de la diode est de protéger K en empêchant le retour de courant, et le condensateur est utilisé pour lisser la tension de sortie. Dans cette séquence, l'énergie stockée dans l'inductance L revient au condensateur et charge R pendant $t \in [DT, 1-D]$. Par conséquent, le taux de conversion $M(d)$ s'écrit comme suit : [22, 23].

$$M(d) = \frac{V_0}{V_i} = \frac{1}{d} - \frac{1}{(1-D)} \quad 1.7$$

En écrivant que la tension aux bornes de l'inductance est nulle, on arrive à :

$$V_0 (1-D) = V_i \quad 1.8$$

1.18.2. Convertisseur abaisseur (Buck) :

C'est un convertisseur direct DC-DC. Les convertisseurs abaisseurs peuvent souvent être trouvés dans la littérature pour les hacheurs abaisseurs ou les hacheurs en série. La source d'entrée est de type tension continue et la charge de sortie continue de type source de courant. L'interrupteur K (Figure 1.21) 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) [24].

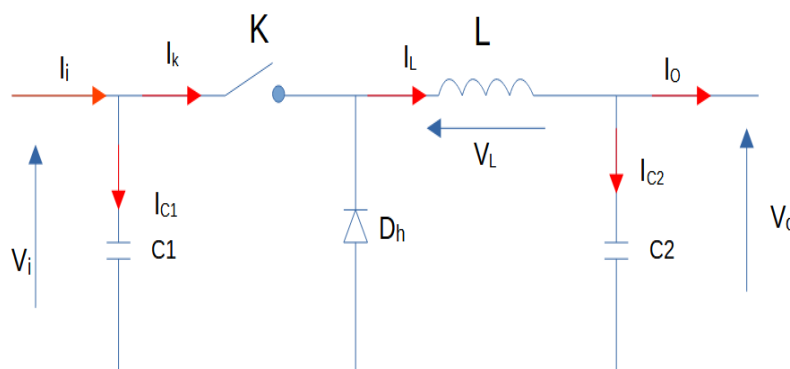


Figure 1.21 : Schéma électrique d'un convertisseur Buck.

1.18.2.1. Modèle mathématique équivalent :

Comme pour le convertisseur Buck nous devons faire la représentation du circuit équivalent par les deux états du commutateur et de tirer par suite le modèle mathématique reliant les variables d'entrée/sortie.

La figure (Figure 1.21) montre le schéma du circuit équivalent d'un convertisseur Buck avec le commutateur fermé.

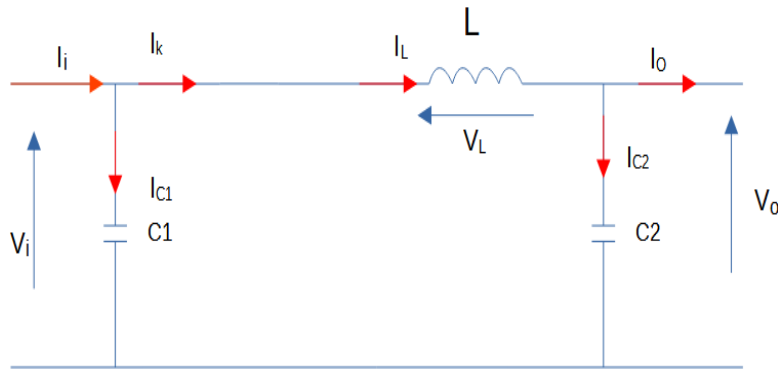


Figure 1.22 : Schéma électrique d'un convertisseur Buck fermé.

Lorsqu'on applique la loi de Kirchhoff sur le circuit ci-dessus (figure 1.22) on aura les équations suivantes :

$$\left\{ \begin{array}{l} I_{c1}(t) = c1 \cdot \frac{dvi(t)}{dt} = Ii(t) - IL(t) \\ I_{c2}(t) = c2 \cdot \frac{dv0(t)}{dt} = Ii(t) - I0(t) \\ VL(t) = L \cdot \frac{dIL(t)}{dt} = -V0(t) \end{array} \right. \quad 1.9$$

Tandis que (Figure 1.23) représente le convertisseur dévolteur avec le commutateur ouvert pendant $(1-\alpha) T_e$.

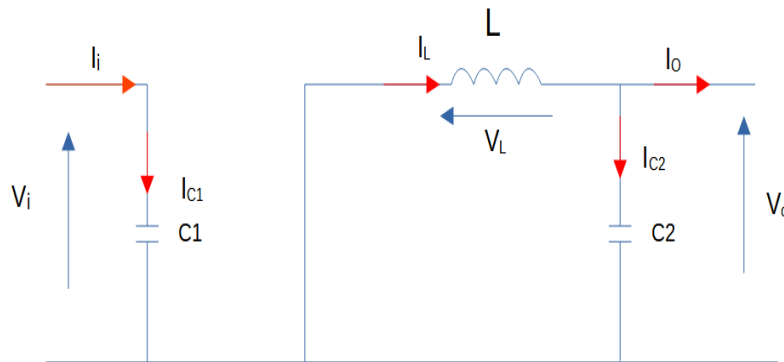


Figure 1.23 : Schéma électrique d'un hacheur Buck ouvert.

$$\left\{ \begin{array}{l} I_{c1}(t) = c1 \cdot \frac{dvi(t)}{dt} = I_i(t) \\ I_{c2}(t) = c2 \cdot \frac{dv0(t)}{dt} = I_L(t) - I_0(t) \\ V_L(t) = L \cdot \frac{dI_L(t)}{dt} = -V_0(t) \end{array} \right. \quad 1.10$$

1.18.2.2. Principe de fonctionnement :

Quand l'interrupteur est fermé pendant la durée αT_e , la tension appliquée aux bornes de la diode. L'interrupteur est commandé à la fréquence de découpage. La source V_i fournit de l'énergie à la charge et à l'inductance. Pendant le temps t_e $[\alpha T_e, T_e]$ l'interrupteur s'ouvre et l'énergie emmagasinée dans l'inductance commande la circulation du courant dans la diode de roue libre D. La tension à ses bornes est donc nulle [25].

Pour calculer la relation entre la tension d'entrée et celle de sortie, on exprime que la tension moyenne aux bornes de l'inductance est nulle [26] :

$$V_0 = \alpha \cdot V_i \quad 1.11$$

1.18.3. Convertisseur inverseur (BUCK – BOOST) :

La troisième topologie de base du convertisseur est donnée par (Figure 1.24). Dans ce dispositif, la tension peut être augmentée ou diminuée selon le schéma de commutation. Cependant, le signe de la tension de sortie est opposé à celui de la tension d'entrée. Lorsque le transistor est en position (passant), le courant dans l'inducteur augmente et l'énergie est stockée. Lorsque l'interrupteur est sur la position (arrêt), la tension aux bornes de l'inducteur s'inverse et l'énergie stockée est transférée à la charge via la diode. Dans ce cas, l'équation de tension sur la borne de charge décrivant l'opération de conduction continue est la suivante [27] :

$$V_s = \frac{\alpha}{\alpha-1} * V \quad 1.12$$

Le circuit électrique de base d hacheur dévolteur-survolteur, et les caractéristiques du courant et de la tension de charge sont données par la Figure 1.24 :

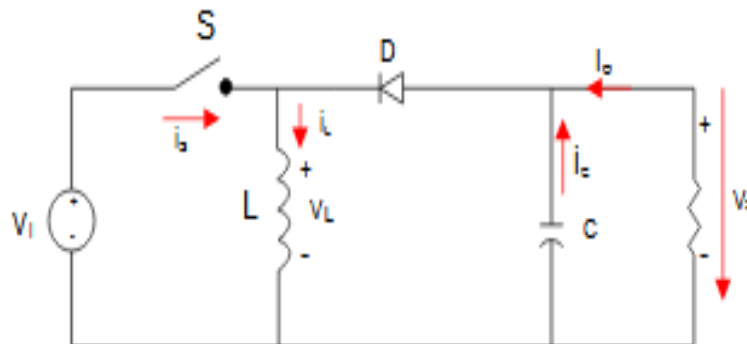


Figure 1.24 : schéma électrique d'un convertisseur Buck-Boost [23].

1.19. Conclusion :

Nous sommes concentrés sur les difficultés inhérentes à l'optimisation de la conception des systèmes photovoltaïques. En effet, à la source, pour les panneaux photovoltaïques, la production d'électricité varie fortement en fonction de l'éclairage, de la température et du vieillissement global du système. Nous montrons également que ce panneau doit fonctionner le plus souvent possible dans son meilleur mode. La solution habituelle est d'introduire un convertisseur statique.

Chapitre 02

MPPT DANS LES SYSTEME PHOTOVOLTAÏQUE

2.1. Introduction :

Après avoir dans le chapitre précédent une étude détaillée sur le convertisseur statique DC-DC, on présentera dans ce chapitre la commande de ce convertisseur qui permet la recherche et la poursuite du point de puissance maximale, appelé ‘maximal power point tracking’ et quelques techniques MPPT existantes qui permettent de faire fonctionner le GPV à sa puissance maximale. La conception d’un étage d’adaptation muni d’un algorithme MPPT permet d’optimiser la conversion énergétique et de relier aisément un GPV à sa charge. On trouve dans la littérature des algorithmes basés sur les méthodes suivantes, telles que : Perturber & Observer, ‘P&O’ et Incrément de la conductance, ‘INC’. Il existe aussi des commandes dites intelligentes basées sur la logique floue, les réseaux de neurones et Neuro-floue.

2.2. La commande (MPPT) :

Le MPPT (Maximum Power Point Tracker) est un principe comme son nom l’indique, il permet de suivre le point de puissance maximum d’un générateur non linéaire. Les systèmes MPPT sont généralement associés à des générateurs photovoltaïques.

La poursuite du point maximum de la puissance (MPPT) est une partie essentielle dans les systèmes photovoltaïques. Plusieurs techniques sont développées depuis 1968 date de publication de la première loi de commande de ce type adaptées à une source d’énergie renouvelable de type PV. Ces techniques se différencient entre elles par leur complexité, nombre de capteurs requis, la vitesse de convergence, coût, rendement et domaine d’application [28].

2.3. Principe de MPPT :

Par définition, une commande MPPT, associée à un étage intermédiaire d’adaptation, permet de faire fonctionner un générateur PV de façon à produire en permanence le maximum de sa puissance. Ainsi, quels que soient les conditions météorologiques (température et l’éclairement), la commande du convertisseur place le système au point de fonctionnement maximum (V_{mpp} , I_{mpp}) [28].

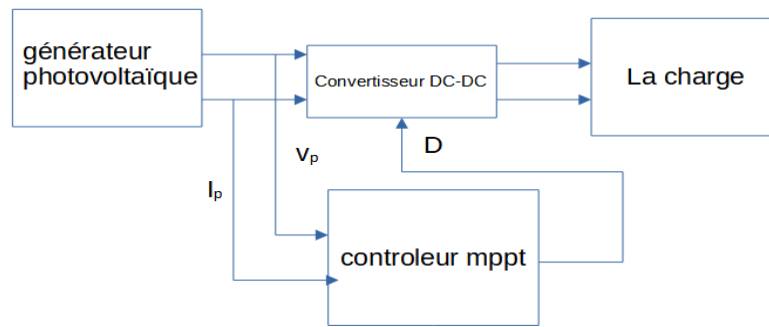


Figure 2.1 : Chaîne de conversion d'énergie solaire comprenant une commande MPPT.

2.4. Techniques de recherche de point de puissance maximal MPPT :

Ce problème de pistage a fait l'objet de nombreuses recherches jusqu'à présent, et plusieurs méthodes ont été développées et utilisées, dans cette partie nous présenterons l'aspect théorique de quelques méthodes classiques classées en deux familles : Internet ou techniques d'escalade (HC) telles que la perturbation. Et des technologies de surveillance (P&O), de conduction additive (In_Cond.) et des méthodes telles que les technologies modernes d'intelligence artificielle (IA), y compris le contrôle de logique floue (FLC). Réseau de neurones artificiels (ANN), Optimisation de l'essaimage de particules (PSO) et technologie d'algorithme génétique (GA) pour surveiller le point de fonctionnement à la puissance maximale du système PV.

2.4.1. La méthode Perturbation & Observation (P&O) :

L'algorithme PO consiste à modifier le point de fonctionnement du module PV, en augmentant ou diminuant le facteur de marche d'un convertisseur continu-continu on, augmente et diminue la tension de fonctionnement et on observe son effet sur la puissance (P). Si la puissance augmente ($\Delta P > 0$) l'algorithme perturbe le système dans le même sens. Sinon ($\Delta P < 0$), le système est perturbé dans la direction opposée. Comme son nom l'indique, cette méthode fonctionne en perturbant le système et observant l'impact sur la puissance à la sortie du GPV [29]. La figure 2.2 illustre son principe de fonctionnement.

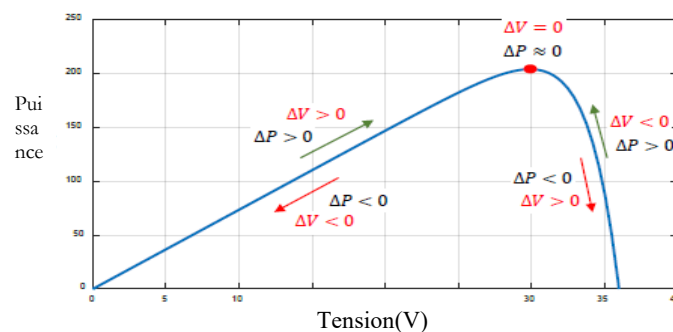


Figure 2.2 : Principe de la MPPT avec la méthode P&O [30].

L'organigramme de cette méthode est donné par la (figure 2.3). On mesure le courant et la tension du GPV puis on calcule la nouvelle puissance $P(t)$ et la variation de la tension (ΔV), si la puissance a augmenté ($\Delta P > 0$) on est donc dans le bon sens, on continue ainsi d'augmenter V (si $\Delta V > 0$) ou on continue de la diminuer (si $\Delta V < 0$), sinon ($\Delta P < 0$) il faut inverser (augmenter V si $\Delta V < 0$ et diminuer si $\Delta V > 0$).

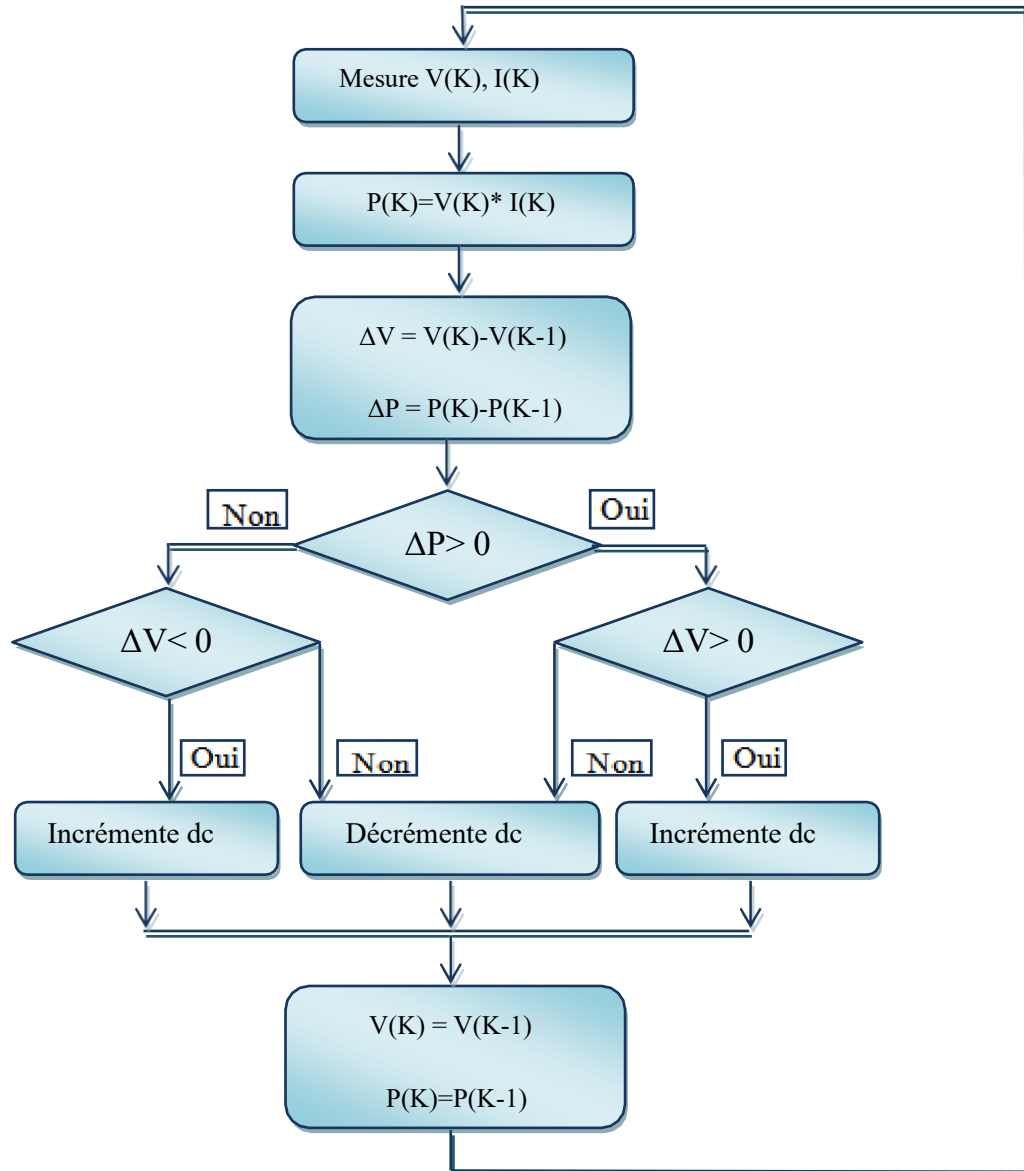


Figure 2.3 : Algorithme de la méthode P&O.

2.4.2. La méthode incrémentation de la conductance (Inc_cond) :

L'incrément de conductance est une commande de MPPT, qui repose sur la compréhension du changement de conductance du réseau photovoltaïque pour comprendre la position relative du MPP et sur l'application des actions de contrôle appropriées pour poursuivre le MPP. Par conséquent, la

conductance d'un panneau photovoltaïque est définie par le rapport du courant à la tension du générateur photovoltaïque, comme indiqué ci-dessous [31].

$$G = \frac{I_{pv}}{V_{pv}} \quad 2.1$$

Et la variation de la conductance peut être définie par :

$$\Delta G = \frac{\Delta I_{pv}}{\Delta V_{pv}} \quad 2.2$$

Cette commande est basée sur le fait que la pente de la courbe caractéristique de puissance du panneau est nulle au MPP, positive à gauche et négative à droite.

Si $dP/dV = 0$ au MPP

Si $dP/dV > 0$ à gauche de MPP

Si $dP/dV < 0$ à droite de MPP

Puisque :

$$\frac{dp}{dv} = \frac{d(Iv)}{dt} = I+V \cdot \frac{dI}{dV} = I+V \cdot \frac{\Delta I}{\Delta V} \quad 2.3$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\Delta I}{\Delta V} = \frac{-1}{V} \\ \frac{\Delta I}{\Delta V} > \frac{-1}{V} \\ \frac{\Delta I}{\Delta V} < \frac{-1}{V} \end{array} \right. \quad 2.4$$

Alors, l'équation (2.5) peut être écrite comme suit :

$dI/dV = -I/dV$ au Mpp

$dI/dV > -I/dV$ à gauche du MPP 2.5

$dI/dV < -I/dV$ à droite du M

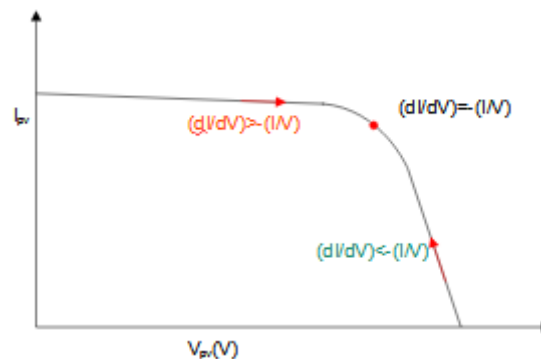


Figure 2.4 : Caractéristique de fonctionnement de la méthode Inc Cond [32].

Par conséquent, MPP peut être poursuivi en comparant la conductance instantanée ($G_{ci} = I/V$) avec

l'augmentation de la conductance ($\Delta G_{ci} = \Delta I = \Delta V$) V_{ref} est la tension de référence à laquelle le panneau PV est forcé de fonctionner. Dans MPP, $V_{ref} = V_{MPP}$ maintiendra le point de fonctionnement correspondant une fois qu'il atteint MPP, à moins qu'un changement de ΔI ne soit remarqué, ce qui indique que les conditions atmosphériques ont changé, et donc MPP a également changé. L'algorithme augmente ou diminue V_{ref} pour suivre le nouveau MPP. La taille de l'incrément détermine la vitesse à laquelle MPP le poursuit. Un suivi rapide peut être obtenu avec des incréments plus importants, mais le système ne peut pas fonctionner avec précision au MPP et osciller autour de celui-ci. Comme pour la méthode P&O, il y a donc un compromis entre vitesse et précision. Cette méthode peut être améliorée en rendant le point de fonctionnement proche du MPP dans la première étape, puis en utilisant l'algorithme Inc Cond pour suivre avec précision le MPP dans une deuxième étape.

Généralement, le point de fonctionnement initial est réglé pour correspondre à une charge résistive proportionnelle au rapport de la tension en circuit ouvert V_{OC} au courant de court-circuit ISC. S'il y a plusieurs maxima locaux, ces deux solutions assurent que le vrai MPP continue.

Une façon moins évidente de mettre en œuvre la méthode Inc Cond consiste à utiliser la conductance instantanée et l'incrément de conductance pour générer un signal d'erreur. D'après l'équation (2.6), l'erreur au MPP est nulle. Par conséquent, le régulateur PI peut être utilisé pour éliminer cette erreur.

$$e = \frac{I}{V} + \frac{dI}{dV} \quad 2.6$$

Deux capteurs sont nécessaires pour la mesure instantanée de la tension et du courant des panneaux photovoltaïques. La méthode Inc_Cond est très adaptée pour être contrôlée par un microcontrôleur, elle peut enregistrer les valeurs de tension et de courant précédentes dans la mémoire. Surveillez la tension et le courant du panneau afin que le contrôleur puisse calculer la conductance et la conductance incrémentielle et déterminer son comportement. Cet algorithme implique de nombreux calculs. La commande MPPT Inc_Cond est illustrée à la figure.

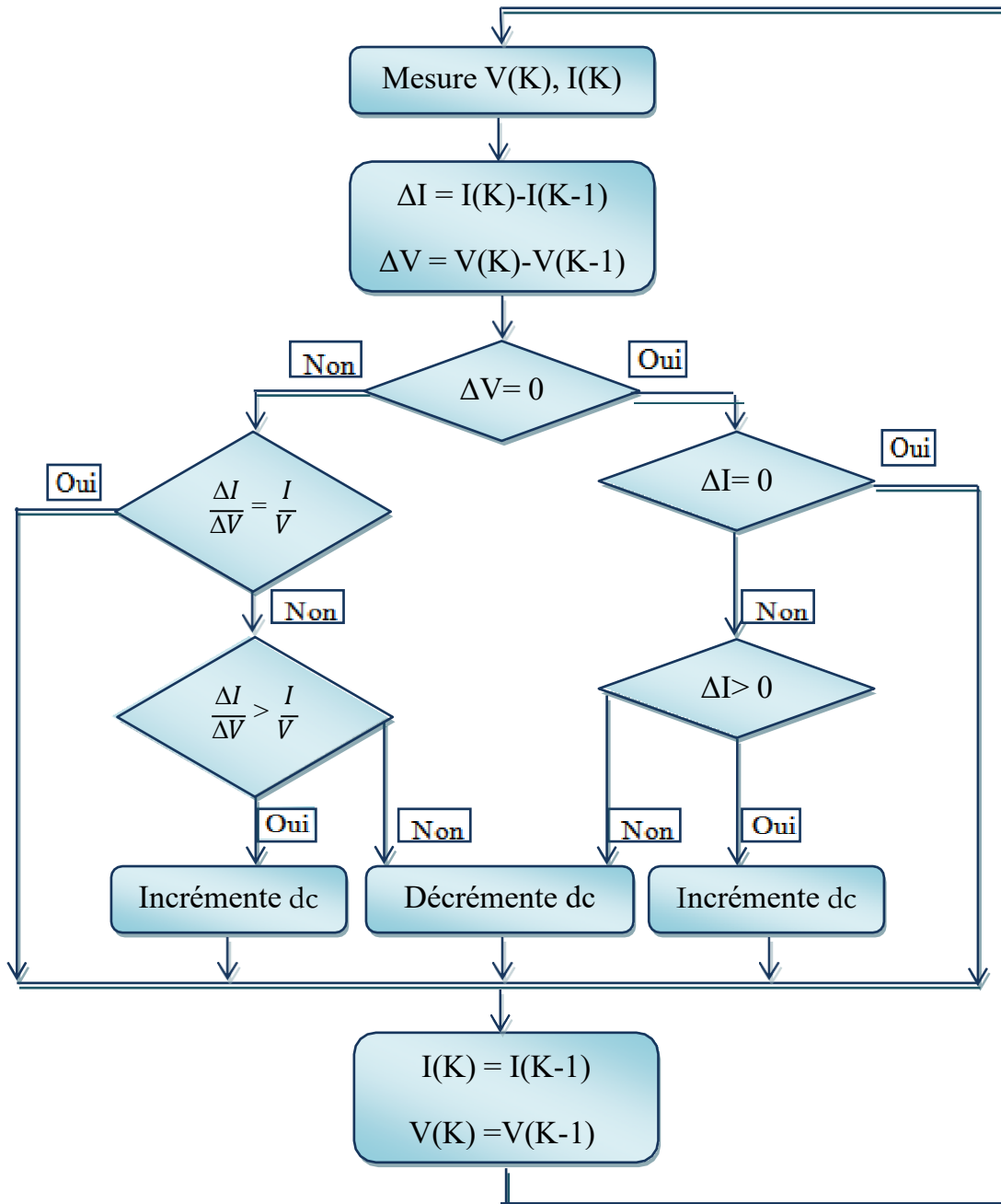


Figure 2.5 : Algorithme de la méthode Incrément de conductance.

2.5. Résultats de simulation et interprétation :

Parameters	Valeur
Courant au point de puissance maximale (I_{mp})	286 A
Tension au point de puissance maximale (V_{mp})	350 V
Puissance maximale (P_{max})	100000 W
Nombre de string parallèle	47
Nombre de module en série	10

Tableau 2.1 : Paramètres du panneau PV de type 1 Soltech 1sth-215-p

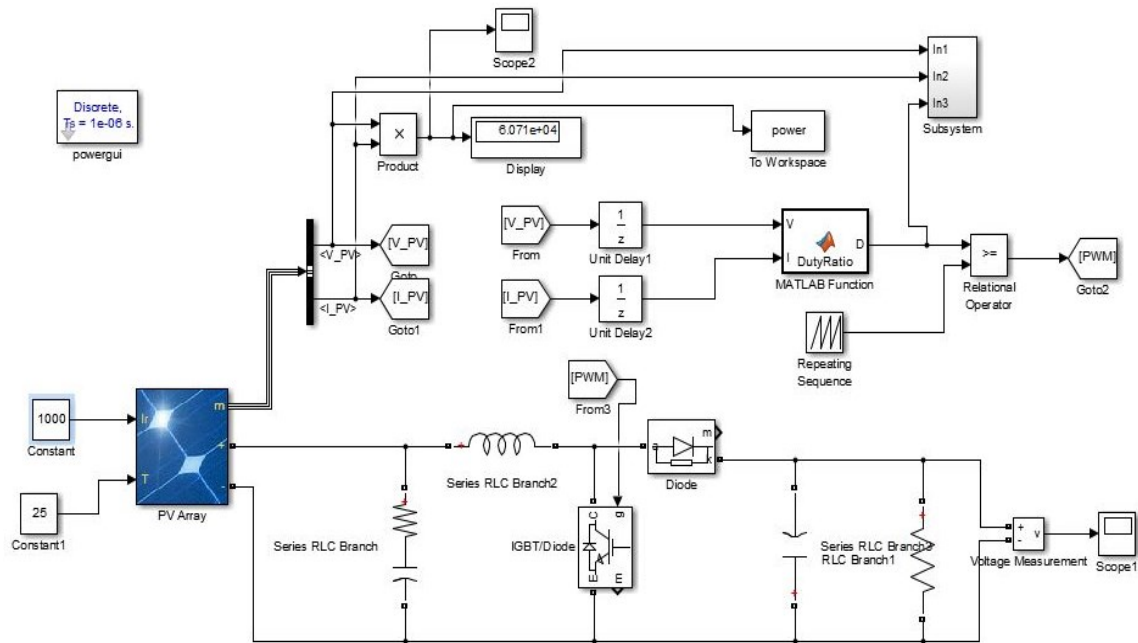


Figure 2.6 : Schéma block de simulation d'un technique P&O.

2.5.1. Pour une température T = 25 C° et pour un éclairement fixé

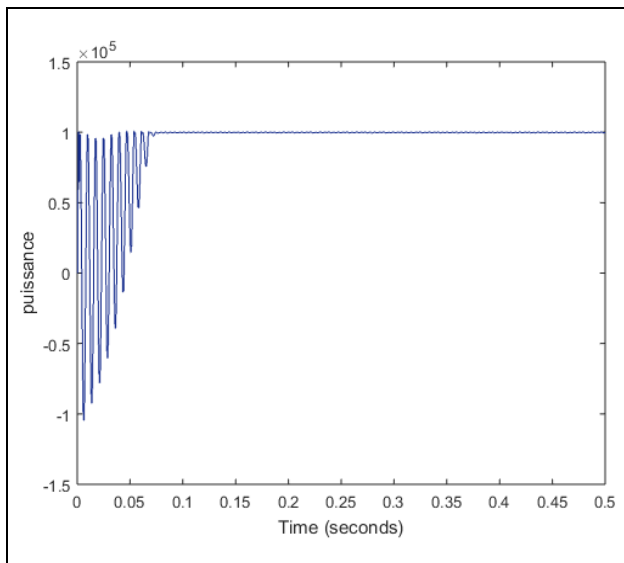


Figure 2.7.a : Graphe de puissance d'un éclairement constant de technique P&O.

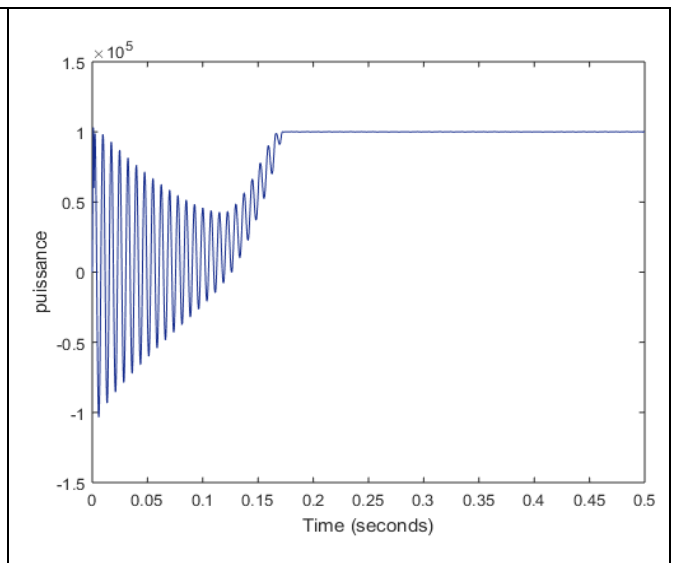


Figure 2.7.b : Graphe de puissance d'un éclairement constant de technique (Inc_cond).

✓ **Interprétation :**

Pour les deux méthodes la puissance à la sortie du convertisseur statique converge rapidement vers le point de puissance maximale, malgré qu'il existe des oscillations lors de démarrage.

2.5.2. Pour une température $T = 25\text{ C}^\circ$ et un éclairement varié :

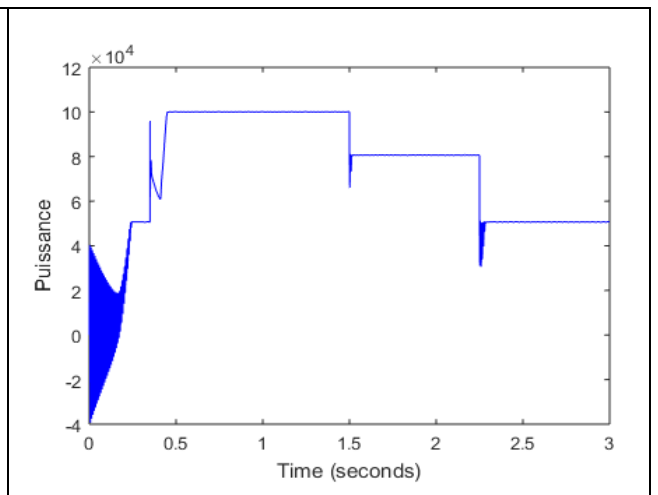
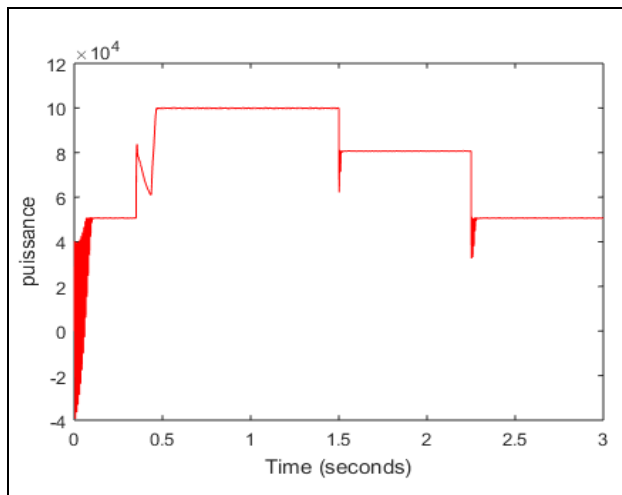


Figure 2.7.c : Graphe de puissance d'un éclairement variable de technique P&O.

Figure 2.7.d : Graphe de puissance d'un éclairement variable de technique (Inc_cond).

✓ **Interprétation :**

Sous une température constante ($T = 25\text{C}^\circ$) on varie la valeur de l'éclairement, Pour les deux méthodes la puissance à la sortie du convertisseur statique est proportionnelle à l'éclairement.

2.5.3. Comparaison entre les deux méthodes à une température fixée $T = 25\text{ C}^\circ$ et un éclairement varié :

Sur la base des résultats de simulation obtenus, cette partie résume les principales spécifications des différents algorithmes MPPT classique « Perturbe & Observe » et « Incrément des conductances ». Qui ont été précédemment étudiés. Nous avons évalué et comparé ces algorithmes en termes de connaissance technique des paramètres, de complexité, de vitesse et de précision des panneaux photovoltaïques.

Algorithmes MPPT.	P&O	Inc_Cond
Type de capteurs utilisés.	1 Tension. 1 Courant.	1 Tension. 1 Courant.
Identification des Paramètres du panneau PV	Non nécessaire.	Non nécessaire.
Complexité.	Basse	Moyenne.
Nombre d'itérations.	45	48
Vitesse de convergence.	Moyenne.	Moyenne.
Précision.	95%	98%

Tableau 2.2: Comparaison des techniques MPPT « P&O » et « In_Cond » [33].

La figure suivante montre la comparaison entre l'application de l'algorithme P&O et l'application de l'algorithme « Inc_cond ».

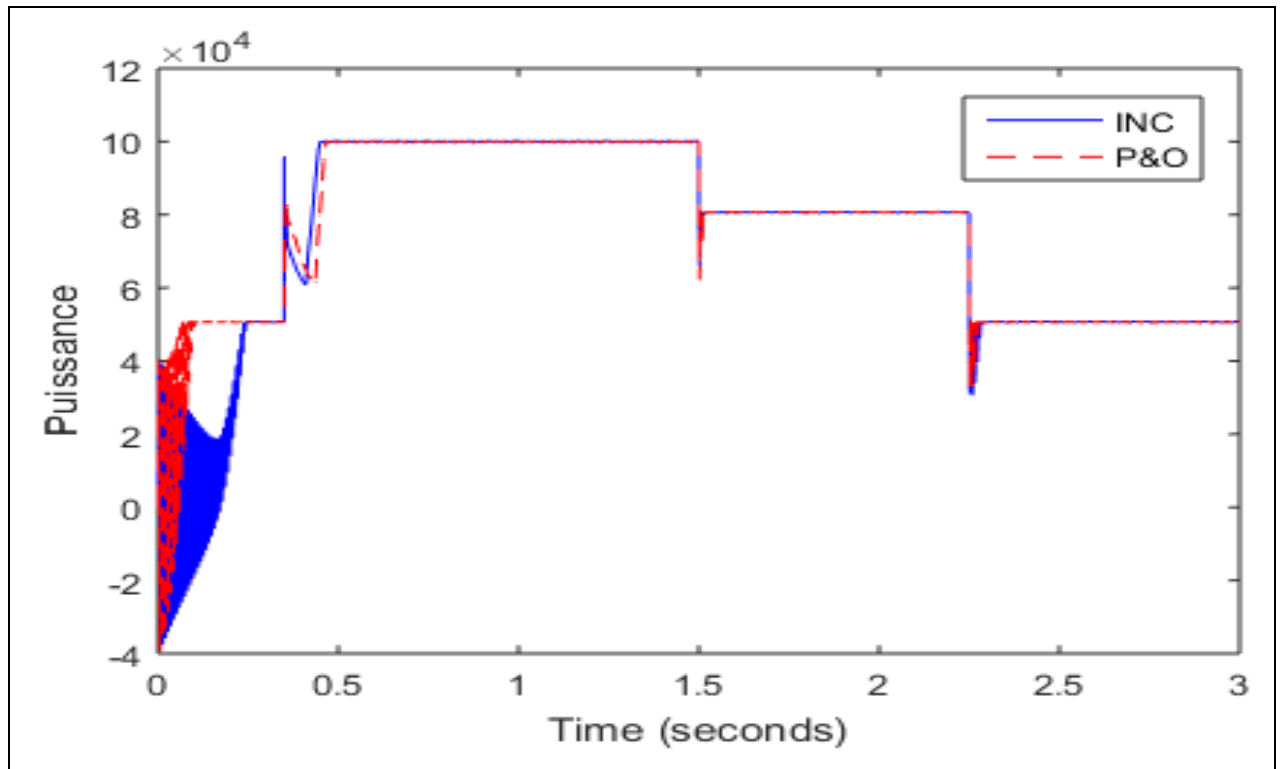


Figure 2.8 : Comparative les résultats des techniques MPPT « P&O » et « INC ».

✓ **Interprétation :**

Pour une température interne fixé à 25°C, on simule une augmentation et une diminution simultanée de l'éclairement, On constate que le temps de réponse du régulateur conductance incrémentale est plus rapide. En régime transitoire de premier temps, les oscillations sont importantes pour le régulateur conductance incrémentale comparé au régulateur P&O.

2.6. Les avantages et les inconvénients :

2.6.1. Avantages :

- Parlant de la méthode P&O, parmi les avantages que l'on peut citer c'est la structure de régulation simple ainsi que le nombre des paramètres mesures réduit.
- On peut dire que l'avantage d'utiliser la méthode P&O est que son algorithme est simple et facile à mettre en œuvre.
- Pour la méthode INC l'avantage principal de cet algorithme est qu'il offre un bon rendement même sous un changement rapide des conditions atmosphériques. En revanche, les rendements de MPPT de la conductance par incrémentation et de l'algorithme P&O sont essentiellement identiques.

2.6.2. Inconvénients :

- Pour la méthode P&O il existe un dépassement du point maximum optimal en cas de changement rapide des conditions atmosphériques.
- Néanmoins, l'inconvénient d'INC est que le circuit de commande est complexe et très couteux [34].

2.7. Conclusion :

Dans ce chapitre Nous avons introduit les technologies de contrôle MPPT qui sont essentielles pour qu'un système photovoltaïque fonctionne à sa capacité maximale, même avec des changements de temps ou de charge.

De nombreuses méthodes traditionnelles ont été développées et utilisées pour surveiller le point de fonctionnement de la puissance dans le système photovoltaïque, et nous intéressons à l'étude des algorithmes basés sur les méthodes de perturbation et d'observation (P&O) et la méthode d'augmentation de la conductivité (Inc_cond) et l'étude la différence entre deux et laquelle des deux méthodes est la meilleure en termes de résultats avec des inconvénients et des avantages chaque méthode.

CHAPITRE 03 : MPPT PAR METHODE INTELLIGENTE 'COMPARAISON AVEC METHODE CLASSIQUE

3.1. Introduction :

Dans le chapitre précédent on a introduit les méthodes MPPT conventionnelles telles que (perturber et surveiller), (augmenter la conduction), souffrent de nombreux inconvénients, en particulier lorsque l'on travaille dans des conditions climatiques différentes. D'où l'utilisation de techniques de renseignement [35].

La première partie est consacrée à un aperçu de la nouvelle technologie de contrôle qui est souvent utilisée et en cours de développement, et de nombreuses recherches sur cette technologie peuvent changer le monde de l'automatisation.

Les réseaux de neurones sont un domaine de recherche encore en développement. Les réseaux de neurones résultent de l'intégration des neuro sciences comme idée de base, de la physique comme domaine d'application, puis des mathématiques et de l'informatique comme moyen d'y parvenir [36], [37].

On présentera une méthode intelligente et innovante, combinant les deux techniques intelligentes (floue et neuronale) avec les différentes architectures, ayant pour objet la poursuite du point de puissance maximale ainsi que l'amélioration des réponses obtenues avec les algorithmes classiques déjà développés, quel que soit la variation des conditions climatiques (ensoleillement, température...etc.)

3.2. Les méthode intelligence :

La plupart des systèmes dynamiques utilisés dans la réalité sont des systèmes non linéaires. Ce type de système est généralement affecté par les changements structurels et non structurels et les incertitudes causés par l'environnement, c'est pourquoi la technologie de l'intelligence artificielle est utilisée pour surmonter ce problème. Ces technologies sont connues pour leur adaptation aux changements environnementaux. En fait, la combinaison entre les réseaux de neurones et la logique floue nous permet de tirer parti de leurs caractéristiques, il existe donc un contrôle neuro-flou adaptatif et robuste [38].

3.3. Définition du système neuro-flou :

Une définition des systèmes neuro-flous est donnée dans selon laquelle : les systèmes neuro-flous sont des systèmes flous formés par un algorithme d'apprentissage inspiré des réseaux de neurones. La technique d'apprentissage opère en fonction d'information locale et produit uniquement des changements locaux dans le système flou d'origine. Les règles floues codées dans le système neuro-flou représentent les échantillons imprécis et peuvent être vues en tant que prototype imprécis des données d'apprentissage. On peut aussi noter que les systèmes neuro-flous peuvent être utilisés comme des approximateurs [39].

Les développements actuels sur ce type de problématiques montrent que les performances des neuro-flous dépassent celles d'autres méthodes aussi bien en termes de précision des résultats que d'efficacité d'apprentissage [40].

Généralement les réseaux neuro-flous remplacent les différentes couches cachées des réseaux de neurones par des règles floues (i.e. règles linguistiques). Ils utilisent ensuite des Algorithmes d'apprentissage pour définir et optimiser ces paramètres. De plus, les règles d'un système neuro-flou sont transparentes ce qui permet la validation et la manipulation par un expert. En fin les systèmes neuro-flous sont très prometteurs dans le cas où les données disponibles sont limitées [41].

3.4. Principe du système Neuro-Flou :

Les réseaux neuro-flou hybrides utilisent des algorithmes d'apprentissage supervisé pour apprendre les relations et les modèles, et l'algorithme vérifie les données d'un ensemble d'apprentissage composé d'échantillons d'entrées et de sorties associées. Dans la phase d'apprentissage, le réseau de neurones hybrides modifie sa structure interne pour refléter la relation entre l'entrée et la sortie dans l'ensemble de la formation (base de connaissances). Une fois le cycle d'apprentissage terminé, un ensemble de validation est appelé à l'aide d'un ensemble séparé d'entrées et de sorties pour vérifier la précision du réseau de neurones flous [42].

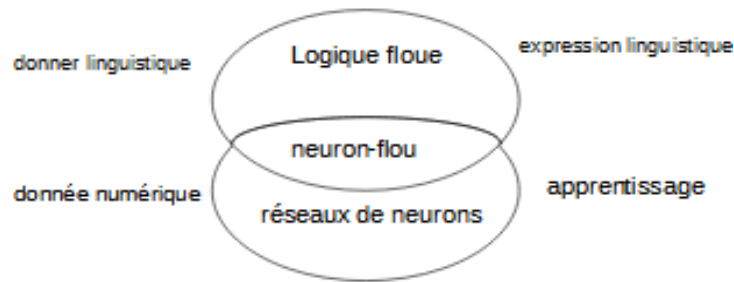
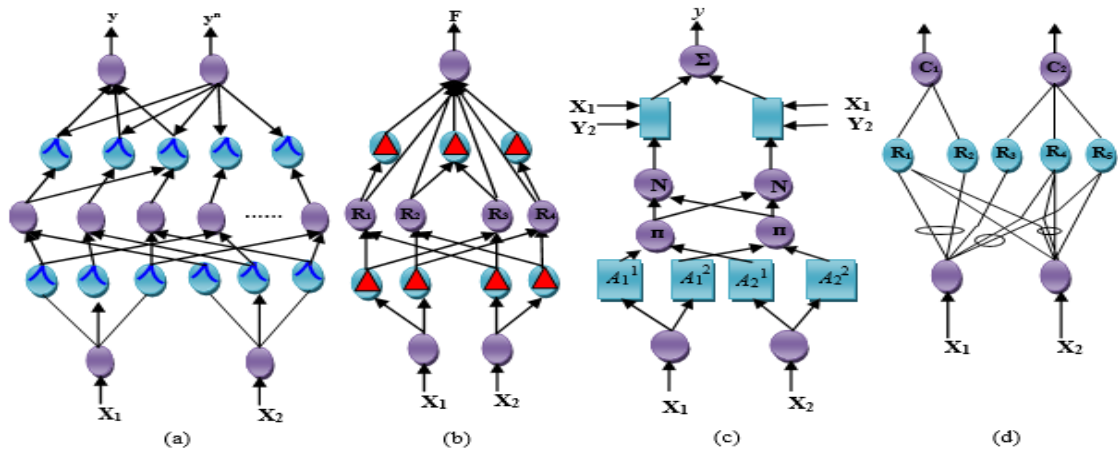


Figure 3.1 : Principe du système neuro-flou [42].

3.5. Architectures neuro-floues :

Plusieurs architectures ont été développées depuis les années quatre-vingt et sont orientées généralement vers la commande des systèmes complexes et les problèmes de classification en conséquence, il existe trois architectures hybrides neuro-floues [43].



3.2 Différents architecteurs des systèmes neuro-flou [44].

3.5.1. Première architecture :

La première méthode neuro-floue consiste au codage du système d'inférence floue sous la forme d'un réseau de neurones multicouches dans lequel les poids de réseau de neurone correspondent aux paramètres du système. L'architecture du réseau dépend du type de règle et des méthodes d'inférences, d'agrégation et de défuzzification choisies.

Par exemple, pour des règles de la forme : si x_1 est A_i et x_2 est B_j alors y est C_k

On fait appel à un réseau de neurones qui admet pour entrées les valeurs x_1 et x_2 prises par les variables X_1 et X_2 et dont les deux couches cachées correspondent respectivement au calcul de la valeur des fonctions d'appartenance A_i pour x_1 et B_j pour x_2 , et à celui de la valeur prise par la conjonction des conditions de chaque règle utilisant un opérateur de conjonction adéquat. Cette situation est schématisée sur la figure suivante [45] :

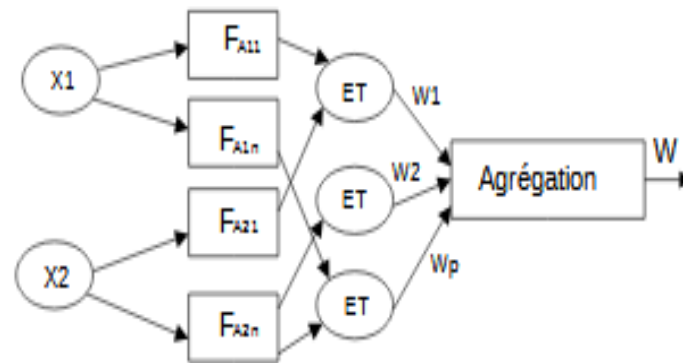


Figure 3.3 : Première architecture Neuro-floue.

3.5.2. Deuxième architecture :

Cette méthode utilise des réseaux de neurones et des systèmes flous associés en série ou en parallèle. Plusieurs variantes sont ainsi possibles : Le réseau de neurones fonctionne en amont du système flou figure (3.4). Les variantes d'entrées du système flou sont déterminées à partir des sorties du réseau de neurones (dans le cas où elles ne sont pas mesurables directement) ou encore un réseau de neurones effectue une tâche de classification ou de reconnaissance de formes, suivie d'un système flou d'aide à la décision [45].

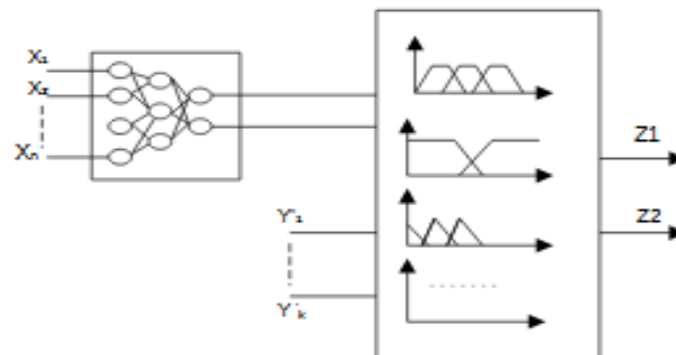


Figure 3.4 : Deuxième architecture des réseaux Neuro-Flou, réalisation en série

Le réseau de neurones fonctionnant en aval du système flou figure (3.5), afin d'ajuster la sortie du système de contrôle flou aux nouvelles connaissances acquises, la variable de sortie est l'erreur de la variable de sortie du système flou.

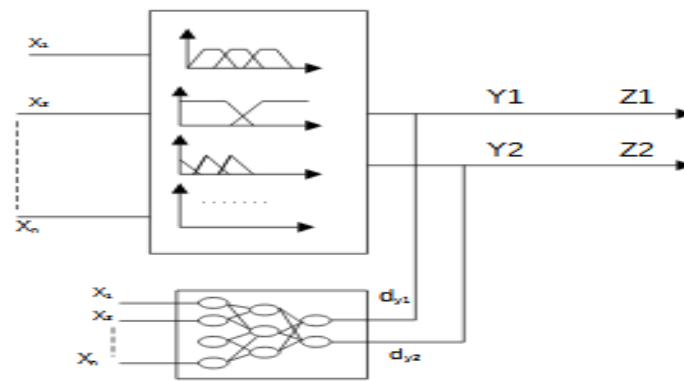


Figure 3.5 : Réseau de neurones fonctionnant en aval d'un système flou.

3.5.3 Troisième architecture :

Cette association entre réseaux de neurones et systèmes flous correspond à l'utilisation de réseaux de neurones pour remplacer tout ou partie des composants du système flou. Ces réseaux sont utilisés pour apprendre des fonctions d'appartenance, calculer des inférences, effectuer des étapes d'agrégation et de défuzzification. Ils peuvent extraire des règles floues en analysant la corrélation entre l'entrée et la sortie du réseau de neurones [42].

Ces méthodes sont très importantes car elles peuvent résoudre des problèmes importants :

- Déterminer et apprendre les fonctions d'appartenances.
- La détermination des règles.
- Adaptation à l'environnement système.

3.6. Commande neuro-flou adaptative (ANFIS : Adaptative Network Fuzzy Inférence System) :

Le système ANFIS est une classe de réseau adaptatif proposé par JANG en 1992. Il peut être vu comme un RN non bouclé (RN statique) pour lequel chaque couche est un composant d'un système neuro-flou. Le modèle ANFIS est le modèle le plus utilisé en pratique, des applications dans le traitement du signal, commande des machines compliquées et le filtrage adaptatif [46].

Considérons un système d'inférence flou de type TAKAGI-SUGENO.

3.6.1. Commande floue de type Takagi-Sugeno :

Les modèles flous de Takagi-Sugeno sont réputés être une technique efficace, pour représenter un système non-linéaire par des ensembles flous et raisonnement flou. Ce type de modèle est, comme celui de Mamdani, construit à partir d'une base de règles de type "Si ... Alors ...", dans laquelle si la prémisse est toujours exprimée linguistiquement, le conséquent utilise des variables numériques plutôt que des variables linguistiques. Le conséquent peut s'exprimer par exemple, sous la forme d'une constante, d'un polynôme ou de manière plus générale sous forme d'une fonction ou d'une équation différentielle dépendant des variables associées à l'antécédent [47].

Nous supposons qu'il y a deux variables linguistiques d'entrées x_1 et x_2 et une sortie y , et supposons que la base des règles contient 2 règles de types :

$$R1 : \text{si } x_1 \text{ est } A1 \text{ et } x_2 \text{ est } B1 \text{ alors } y_1 = p_1x_1 + q_1x_2 + r_1$$

$$R2 : \text{si } x_1 \text{ est } A2 \text{ et } x_2 \text{ est } B2 \text{ alors } y_2 = p_2x_1 + q_2x_2 + r_2$$

Où x_1 et x_2 sont les variables d'entrées.

$A1, A2, B1$ et $B2$ sont des ensembles flous

Y_i les sorties de tous les neurones de défuzzification p_i, q_i et r_i sont des paramètres du conséquent de la règle i .

JANG a proposé de représenter cette base de règle par le réseau adaptatif présenté par la figure :

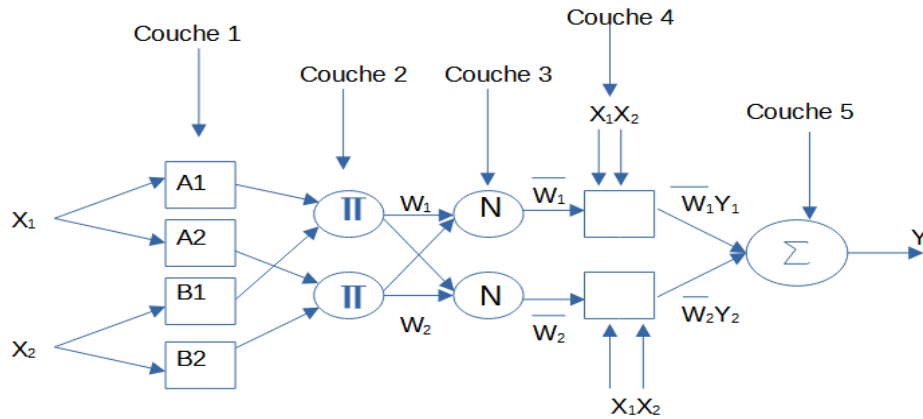


Figure 3.6 : Architecture d'ANFIS.

Le réseau ANFIS est un réseau multicouche et ses connexions ne sont pas pondérées, les poids de toutes les connexions sont égaux à 1. Les nœuds sont de deux types différents selon leur fonctionnalité, ceux qui contiennent des paramètres (nœuds carrés) et ceux qui ne contiennent pas (nœuds circulaires). La sortie O^k du nœuds i de la couche k (appelé nœuds (ik)) dépend des signaux provenant de la couche $k-1$ et des paramètres du nœud (ik) , c'est-à-dire [48] :

$$O_i^k = f (O_i^{k-1} , \dots, O_{n-1}^{k-1} , p, q, r \dots) \tag{3.1}$$

Où n_{k-1} est le nombre de nœud dans la couche $k-1$.

3.6.1.1. Première couche (Fuzzification) :

Chaque nœud de cette couche ait une fonction telle que :

$$O_i^1 = \mu_{A_i}(x_1) \quad \text{pour } i = 1,2 \tag{3.2}$$

$$O_i^1 = \mu_{B_{i-2}}(x_2) \quad \text{pour } i = 3,4 \tag{3.3}$$

Où x_1, x_2 : sont les entrées des nœuds respectifs (1,2) et (3,4) ;

A_i, B_{i-2} les termes linguistiques associées aux fonctions d'appartenance μ_{A_i} et $\mu_{B_{i-2}}$. Les sorties O_i^1 de la première couche représente donc les degrés d'appartenance des variables d'entrée x_1, x_2 aux ensemble flous A_i, B_{i-2} .

Dans le modèle de JANG, les fonctions d'appartenance sont des gaussiennes, données par :

$$\mu_{A_i}(x) \text{ ou } \mu_{B_i}(x) = \exp \left[-\frac{(x_i - c_i)^2}{\alpha_i} \right] \quad 3.4$$

Pour les quelles les paramètres (a_i, b_i, c_i) selon le choix sont désignés par le nom de paramètres de la prémisse (ou paramètres locaux du réseau) et définissent les fonctions d'appartenance correspondantes. En fait, toutes les fonctions continues et dérivables, telles les fonctions triangulaire ou trapézoïdale, peuvent être employées.

3.6.1.2. Deuxième couche (Règles floues) :

La deuxième couche est formée d'un nœud pour chaque règle floue et génère les poids synaptiques. Ces nœuds de type fixe sont notés Π et chacun d'eux engendre en sortie le produit (opérateur ET de la logique floue) de ses entrées, qui ce qui correspond au degré d'appartenance de la règle considérée :

$$O_i^2 = W_i = \mu_{A_i}(x) * \mu_{B_i}(x) \text{ pour } i = 1,2 \quad 3.5$$

3.6.1.3. Troisième couche (Normalisation) :

Les nœuds de cette couche sont également fixes et réalise la normalisation des poids des règles floues selon la relation :

$$O_i^3 = \bar{w}_i = \frac{W_i}{W_1 + W_2} \quad i = 1,2 \quad 3.6$$

Chaque nœud i de cette couche est un nœud circulaire appelé N . La sortie du nœud i est le degré d'activation normalisé de la règle i .

3.6.1.4. Quatrième couche (Conséquence ou Défuzzification) :

Chaque nœud de cette couche est adaptatif et calcule les sorties des règles en réalisant la fonction :

$$O_i^4 = \bar{w}_i f_i = \bar{w}_i (p_i x_1 + q_i x_2 + r_i) \quad i = 1,2 \quad 3.7$$

Les paramètres $\{p, q, r\}$ sont les paramètres de sortie de la règle i .

3.6.1.5. Cinquième couche (Somme) :

La cinquième comprend un seul neurone qui fournit la sortie de ANFIS en calculant la somme des sorties de la couche précédente. Sa sortie qui est également celle du réseau est déterminée par la relation suivante :

$$O_i^5 = y = \sum_{i=1} \bar{w}_i f_i = \frac{\sum_{i=1} w_i f_i}{w_i} \quad i = 1, 2 \quad 3.8$$

L'architecture d'ANFIS montre l'existence de deux couches adaptatives, la Première et la Quatrième. La Première couche présente trois paramètres modifiables $\{a_i, b_i, c_i\}$ liées aux fonctions d'appartenance d'entrées, appelés paramètres des prémisses. La Quatrième couche, contient également trois paramètres modifiables $\{p_i, q_i, r_i\}$ appelés paramètres conséquents.

3.6.2. Principe de type Takagi – Sugeno :

Généralement le modèle de type Takagi-Sugeno est basé sur une collection des règles R_i du type :

$$R_i : \underline{S}_i (E \text{ est } A_i) \text{ Et } (\Delta E \text{ est } B_i) \text{ Alors } y_i = f_i (E, \Delta E) \text{ Pour } i = 1, 2, \dots, n$$

Où R_j dénote la $i^{\text{ème}}$ règle du modèle et n le nombre de règles floues que contient la base de règles. E et ΔE sont les variables d'entrée x , appelées antécédents (ou prémisses) et y est la variable de sortie, nommée conséquent (ou conclusion). A_i et B_i sont les sous-ensembles flous (ou univers de discours) de l'antécédent de la $i^{\text{ème}}$ règle. Ces ensembles flous sont définis par des fonctions d'appartenance $\mu_{A_i}(E)$ ou $\mu_{B_i}(\Delta E)$ appartenant l'intervalle $[0, 1]$. $\mu_{A_i}(E)$ ou $\mu_{B_i}(\Delta E)$ symbolisent respectivement la valeur de la fonction d'appartenance de l'entrée E ou l'entrée ΔE à l'ensemble flou A_i ou B_i . Dans le cas où les conséquents $y_i = f_i (E, \Delta E)$ prennent la forme d'une constante, ce qui correspond à notre cas d'étude ($y_i = \Delta\alpha$), le modèle est appelé singleton ou d'ordre zéro.

Le régulateur "Floue TS" proposé pour l'optimisation du système, est représenté par la Figure 7. Il reçoit comme entrées l'erreur et la variation de l'erreur du système ($E(k), \Delta E(k)$). A la sortie, il y'a génération de la variation du rapport cyclique $\Delta\alpha$ commandant hacheur DC-DC. Ce contrôleur "Floue TS" peut être décomposé en trois principaux modules :

- Celui d'entrée : Fuzzification. Il associe à chacune des entrées réelles un degré d'appartenance compris entre 0 et 1,
- Le moteur d'inférence : il est associé à la base de règles de type : "Si ... Alors ...",
- Celui d'entrée : Défuzzification. Il permet de transformer les degrés d'appartenance des sous-ensembles flous de commande en grandeur numérique.

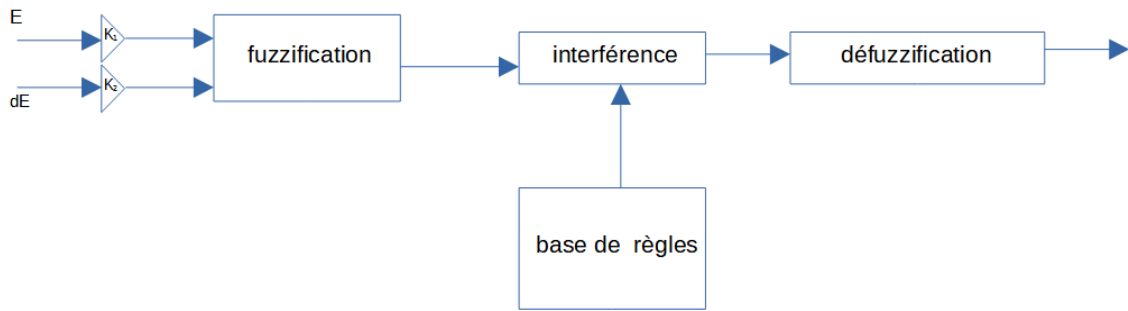


Figure 3.7 : Figure Structure de base du contrôleur flou

3.7. Création du contrôleur neuro-floue :

La création passe par plusieurs étapes sur logiciel Matlab :

1. L'étape d'apprentissage :

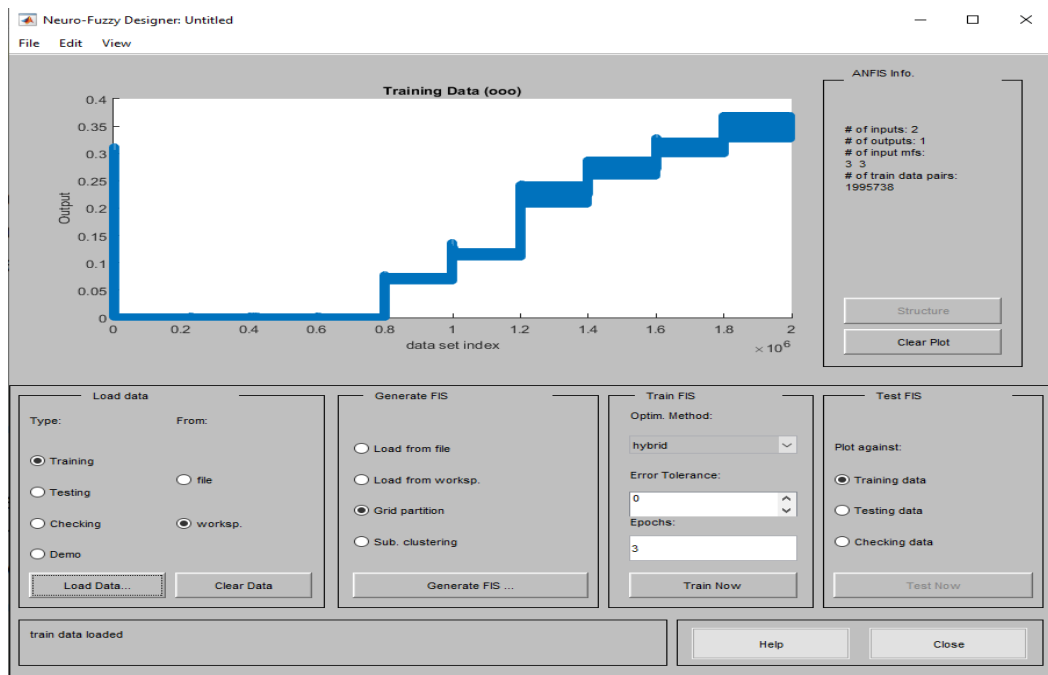
Pour le Neuro-Floue utilisé, par analogie au réseau de neurone les fonctions d'activations des neurones des couches sont pour la première couche les fonctions d'appartenance puis ça sera les règles utilisées pour enfin arriver à la dernière couche ou elle est régie par une défuzzification.

L'entraînement des systèmes se fait de la manière suivante : En premier lieu le calcul des limites des fonctions d'appartenance puis la création et la réduction des règles et ce dans le but de minimiser l'erreur entre la sortie obtenue et celle désirée.

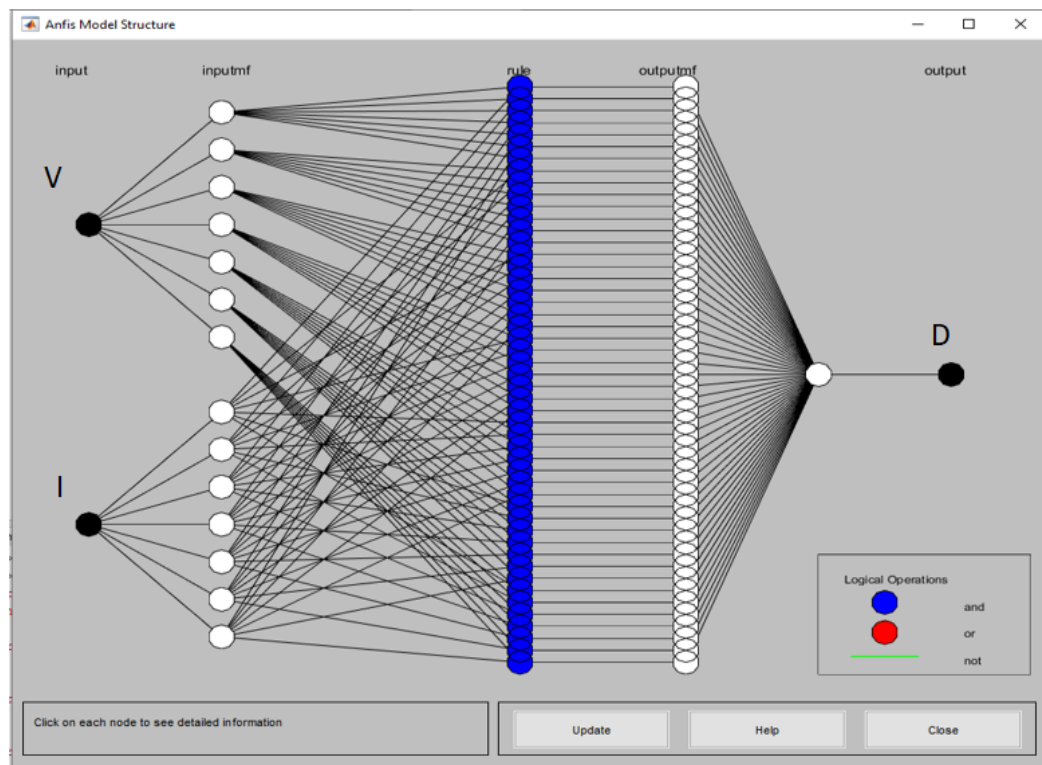
Il est à noter que le choix du nombre des fonctions d'appartenance est choisi préalablement par l'utilisateur.

De point de vue mathématique, la fonction de cout R converge et se stabilise entre deux passages successifs de l'ensemble des données d'entrées et de sorties du système neuro-flou, de telle manière que cette dernière est minimisée avec une erreur tendant vers zéro pour que le système atteigne les sorties désirées.

2. La structure du contrôleur neuro-floue aura inévitablement la figuration suivante :

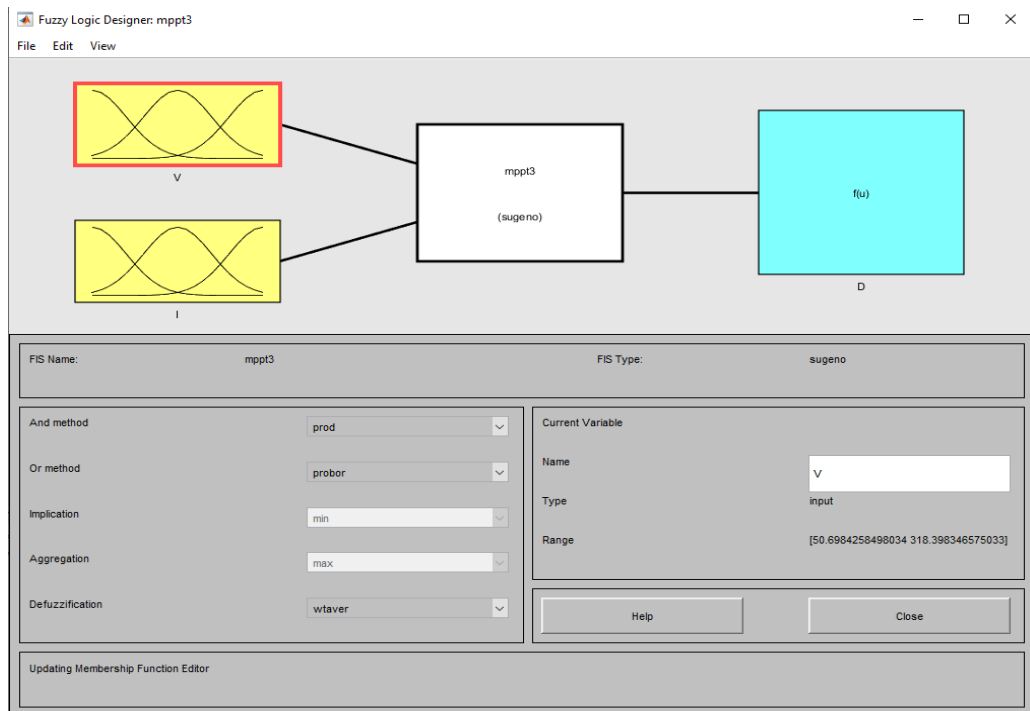


3. La structure du contrôleur neuro-floue aura inévitablement la configuration Suivante :

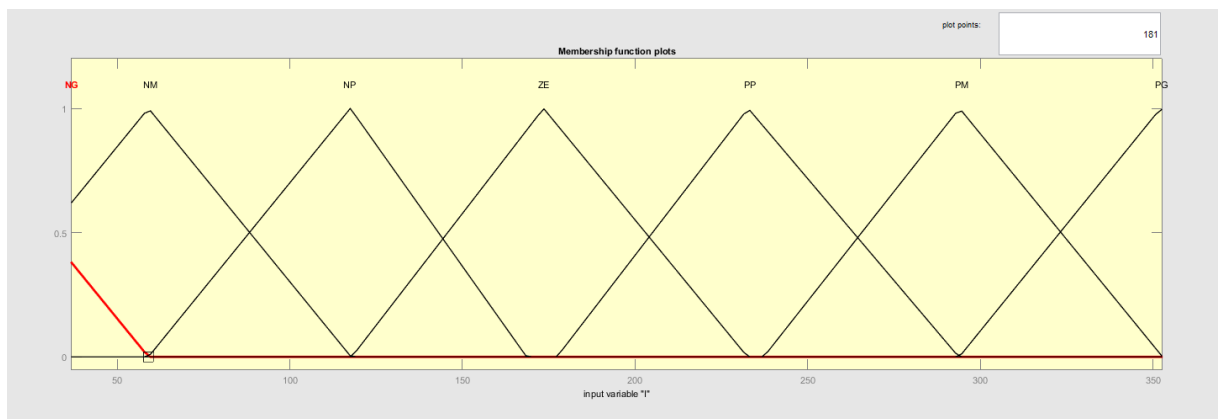
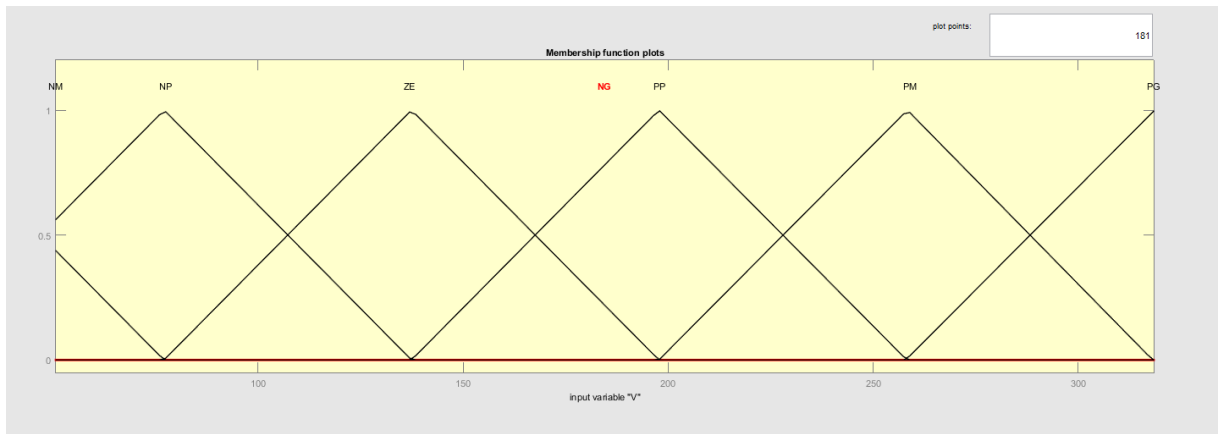


4. Vérification concrète du système créé :

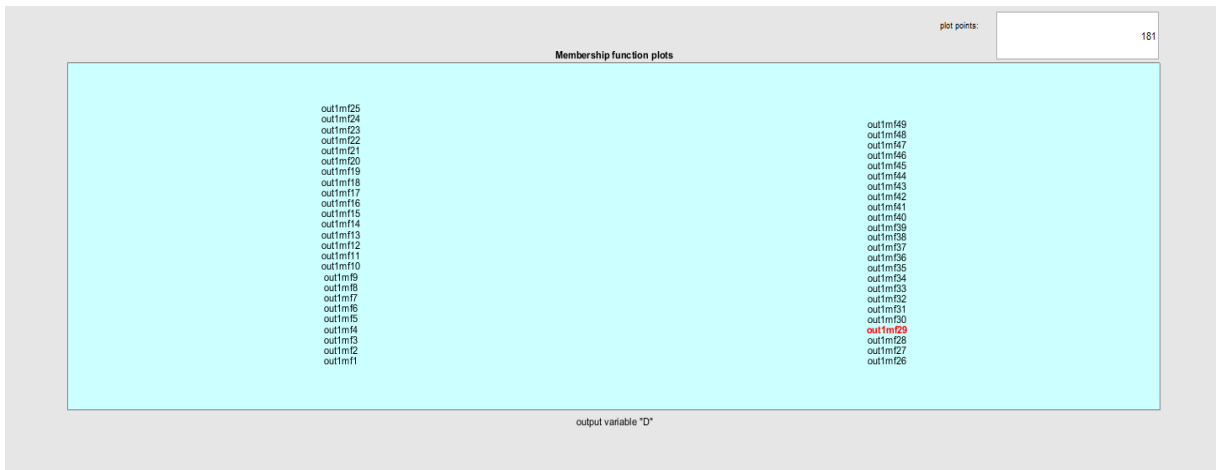
En première étape on fait appel à l'interface graphique floue où on devra charger le Système créé préalablement, on aura le graphique :



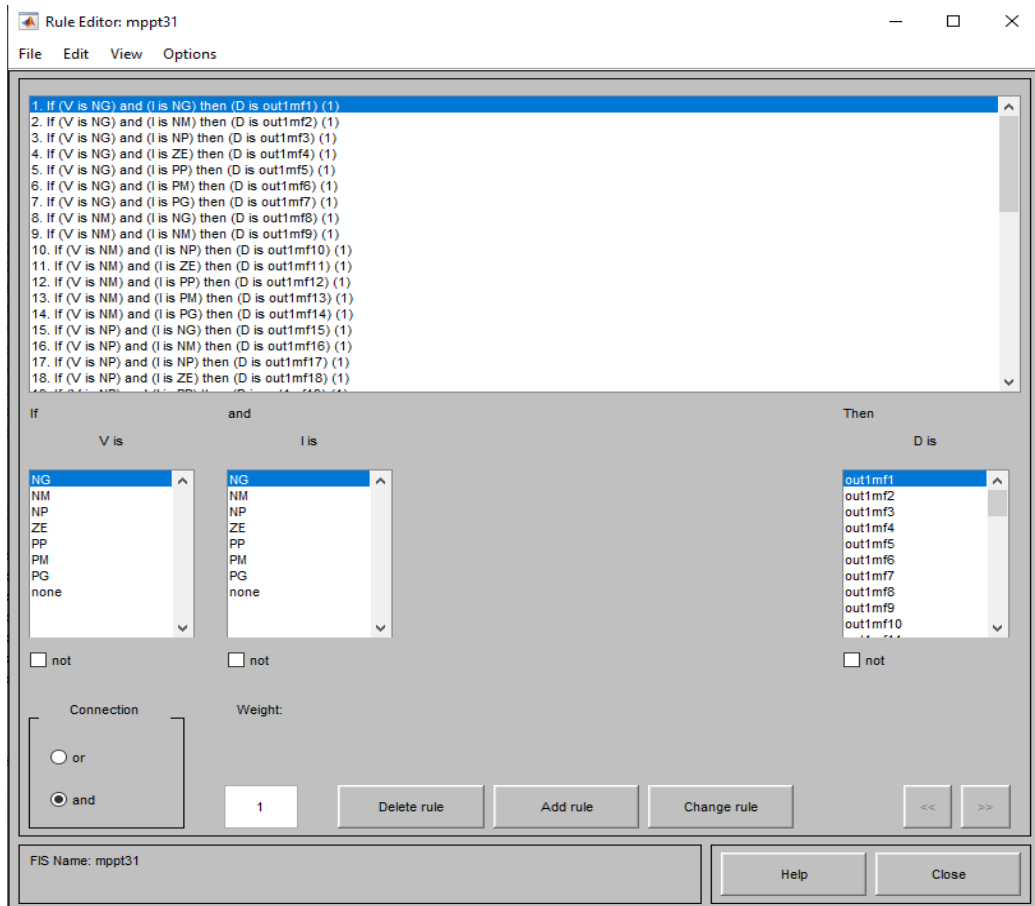
5. La visualisation des deux entrées données par des fonctions d'appartenance triangulaires est montrée sur les deux graphiques suivants :



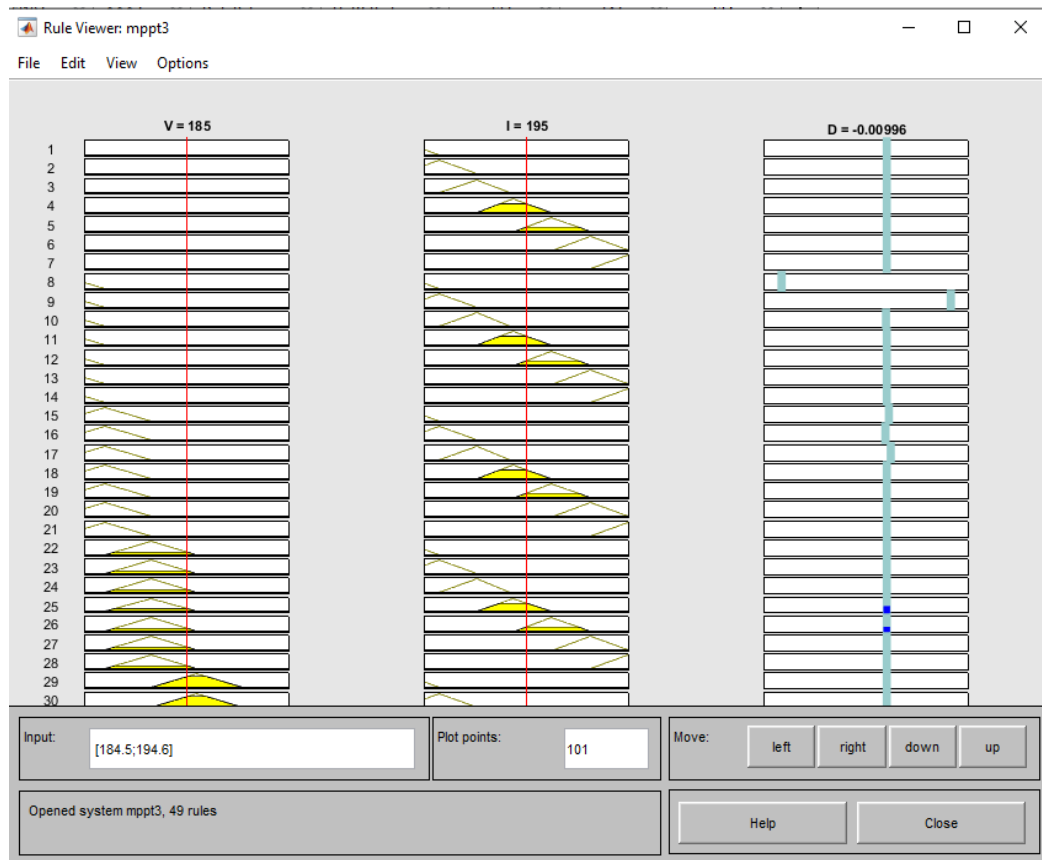
6. La sortie est donnée sur la figure :



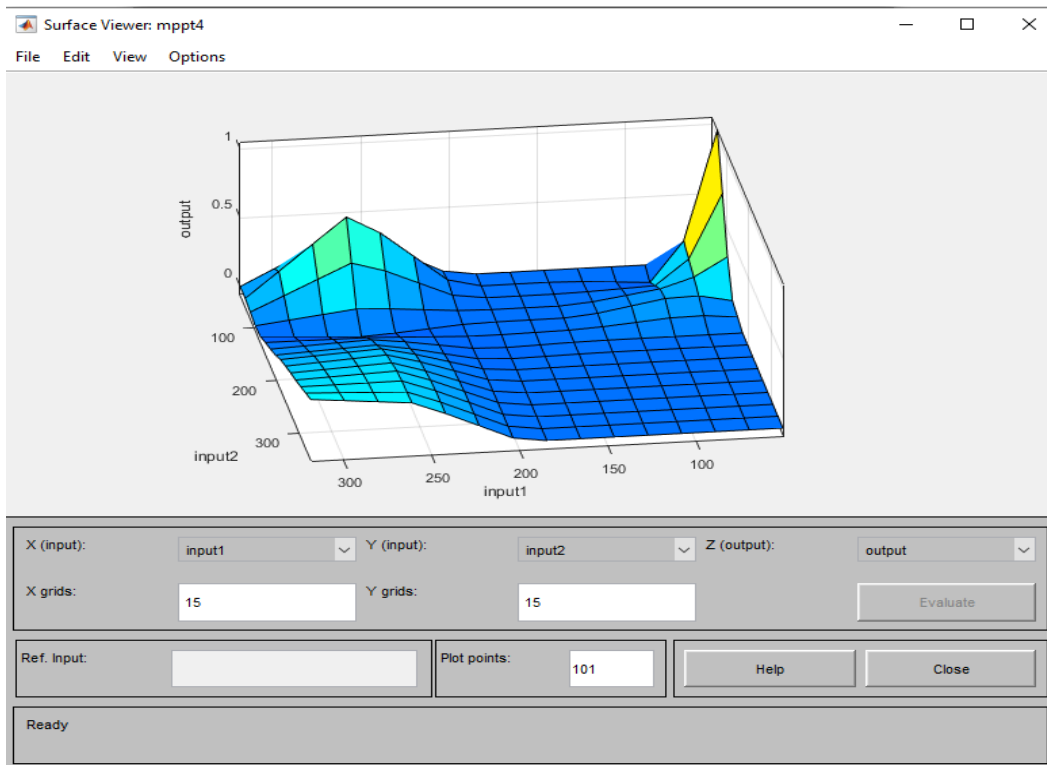
7. Une fois les entrées-sorties sont créés, on passe à la visualisation des règles et leur schéma fonctionnel donné par les deux figures :



I \ V	GTL	GML	GPL	REF	DPL	DML	DGL
GTL	Out1mf1	Out1mf8	Out1mf15	Out1mf22	Out1mf29	Out1mf36	Out1mf43
GML	Out1mf2	Out1mf9	Out1mf16	Out1mf23	Out1mf30	Out1mf37	Out1mf44
GPL	Out1mf3	Out1mf10	Out1mf17	Out1mf24	Out1mf31	Out1mf38	Out1mf45
REF	Out1mf4	Out1mf11	Out1mf18	Out1mf25	Out1mf32	Out1mf39	Out1mf46
DPL	Out1mf5	Out1mf12	Out1mf19	Out1mf26	Out1mf33	Out1mf40	Out1mf47
DML	Out1mf6	Out1mf13	Out1mf20	Out1mf27	Out1mf34	Out1mf41	Out1mf48
DGL	Out1mf7	Out1mf14	Out1mf21	Out1mf28	Out1mf35	Out1mf42	Out1mf49



En dernier nous illustrons le graphe de relation entre les 2 entrées et la sortie appelé « **graphe de surface** », comme sur la figure :



3.8. Résultats de simulation et interprétation :

3.8.1. Pour une température $T = 25\text{ C}^\circ$ et pour un éclairement fixé :

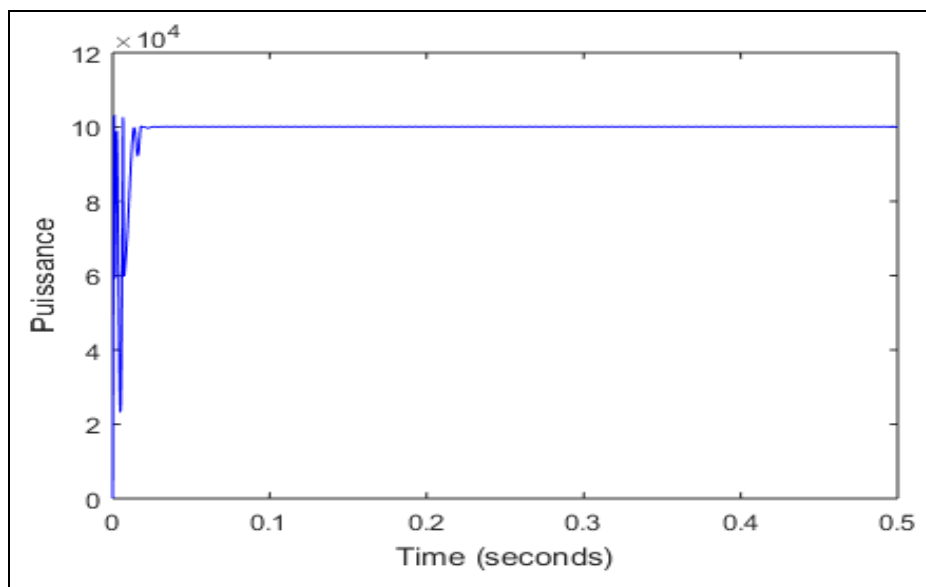


Figure 3.8 : Graphe de puissance d'un éclairement constant de technique neuro-flou.

✓ **Interprétation :**

Sous une température constante ($T = 25C^{\circ}$) et pour un éclairement fixe ($G=1000W/m^2$), en remarque que la puissance à la sortie du convertisseur statique converge très rapidement vers le point de puissance maximale.

3.8.2. Pour une température $T = 25 C^{\circ}$ et un éclairement varié :

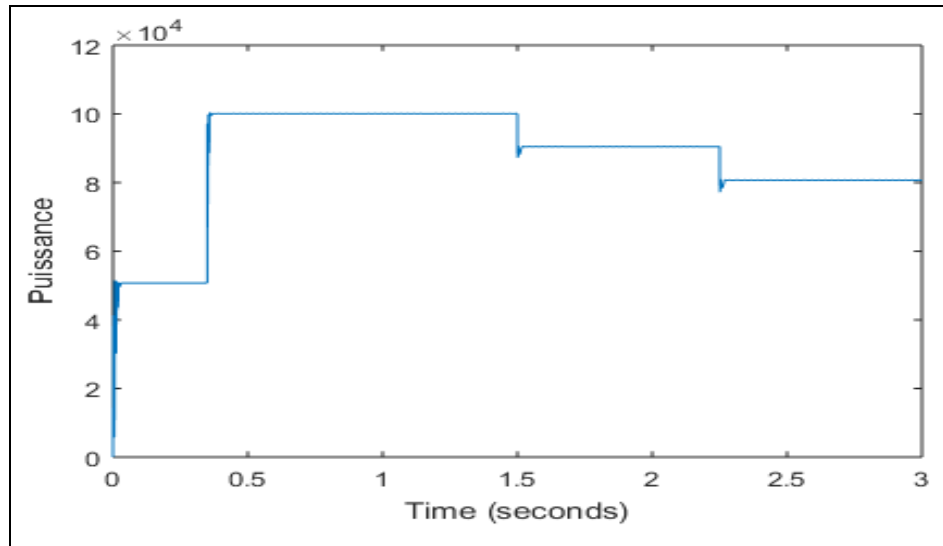


Figure 3.9 : Graphe de puissance d'un éclairement variable de technique neuro-flou.

✓ **Interprétation :**

Sous une température constante ($T = 25 C^{\circ}$) on varie la valeur de l'éclairement, en remarque que la puissance à la sortie du convertisseur statique est proportionnelle à l'éclairement.

3.8.3. Comparaison entre les deux techniques à une température fixée $T = 25 C^{\circ}$ et un éclairement varié :

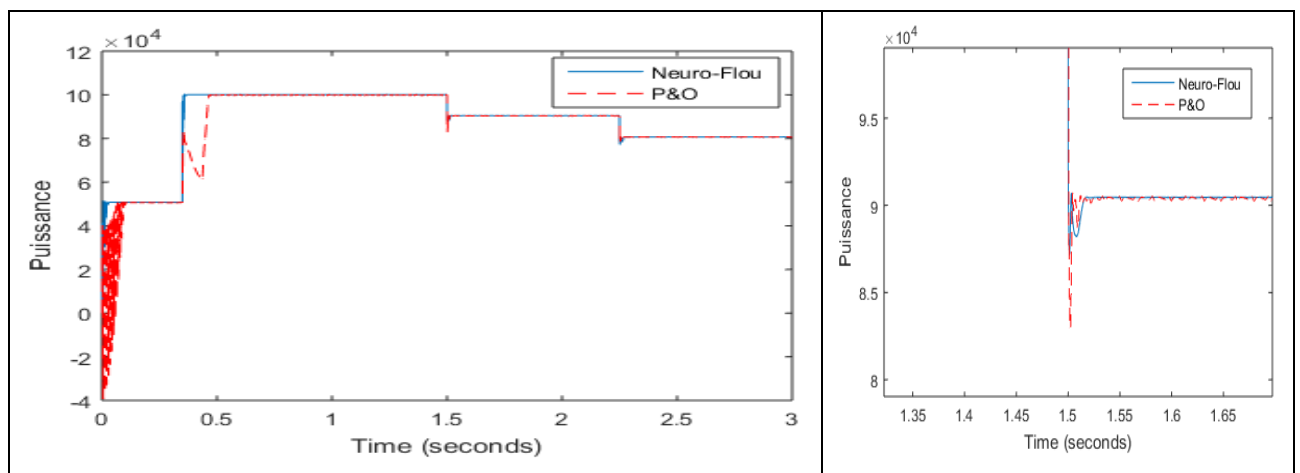


Figure 3.10 : Comparative les résultats entre P&O et neuro-flou.

✓ Interprétation :

Pour une température interne fixée à 25°C, on simule une augmentation et une diminution simultanée de l'éclairement, les résultats de la simulation montrent que la commande neuro-floue et la technique P&O suit parfaitement le point de puissance maximale, en remarque aussi d'après cette comparaison entre les deux techniques que la commande neuro-floue réponde très rapidement aux variations des entrées ou perturbations.

3.9. Conclusion :

Cette partie présente de manière expérimentale les résultats obtenus, nous avons introduit l'application de contrôle MPPT basée sur le conditionnement réduit Neuro-Fuzzy GPV de moyenne puissance (100000KW). Les résultats obtenus par la méthode des neurones-flous (technique non conventionnelle) sont meilleurs que ceux obtenus par les algorithmes de la méthode traditionnelle (P&O et Inc Cond). La simulation a été réalisée là où le système Neuro-Flou simulé a montré une puissance et une efficacité très encourageantes. Par conséquent, la méthode Neuro-Flou peut être considérée comme une étape vers la convergence entre réseau de neurone et de décision humaine. Performances, temps de réponse rapide et très faible erreur en régime permanent. Il est robuste dans différentes conditions météorologiques.

CONCLUSIONS GENERALES

La demande mondiale en énergie évolue rapidement et les ressources naturelles de l'énergie telles que l'Uranium, le pétrole et le gaz diminuent en raison d'une grande diffusion et développement de l'industrie ces dernières années. Pour couvrir les besoins en énergie, des recherches sont conduites à l'énergie renouvelable. Une des énergies renouvelables qui peut accomplir la demande est l'énergie solaire photovoltaïque, c'est une énergie propre, silencieuse, disponible et gratuite. C'est d'ailleurs ce qui explique que son utilisation connaît une croissance significative dans le monde. Cette demande exige des études dans le but d'améliorer le rendement de cette énergie ce qui fait l'objectif de ce travail.

Il y a plusieurs techniques de recherche du point de puissance maximale MPPT pour améliorer ce rendement tel que Perturber et observer (P&O), l'incrémentation de la conductance (Inc Cond), et des nouvelles techniques intelligentes basées sur la logique floue, les réseaux de neurones et neuro-flou. Cette dernière est utilisée avec un grand nombre de règles, il y en a 49.

Le travail de ce mémoire implique la simulation, l'optimisation et la mise en œuvre de systèmes photovoltaïques, qui incluent des générateurs photovoltaïques, des convertisseurs « boost » et des commandes MPPT « neuro-flou ». Dans cette étude, on fait une comparaison entre les méthodes basées sur l'algorithme de hill-climbing (P&O et INC), la réponse générée par la première méthode est rapide mais instable car la méthode est simple, la réponse générée par la deuxième (INC) est lente mais plus stable. Pour cela, on a créé un système contrôlé par un contrôleur neuro-flou pour obtenir une réponse rapide et stable.

Les résultats de simulation prouvent également que ce système peut s'adapter aux incertitudes et donner de meilleures performances, il devient plus rapide, plus robuste et plus précis par rapport aux autres systèmes classiques.

L'objectif de cette étude est réalisé et on peut dire que la stratégie de contrôle proposée peut être considérée comme une solution intéressante dans le domaine de la maîtrise des systèmes photovoltaïques.

D'après les résultats obtenus de la simulation, on peut avancer que :

- ✓ Les résultats obtenus lors de notre travail encouragent la poursuite des recherches dans ce sens, nous pouvons également envisager de les améliorer par une éventuelle hybridation.
- ✓ Proposer d'autres nouvelles techniques de poursuite de la puissance maximale plus robustes.

- ✓ Le convertisseur DC-DC et la commande Neuro-Floue est très effective après la diminution du nombre des règles. Le convertisseur fournit dans les conditions optimales une tension à sa sortie supérieure à celle fournie par le générateur PV.
- ✓ La commande Neuro-Floue réduite à de meilleures performances par rapport à d'autres

Références Bibliographiques

- [1] A. Ould Mohamed Yahya, A. Ould Mahmoud, I. Youm, 'Etude et modélisation d'un générateur photovoltaïque, Revue des Energies Renouvelables, Vol. 11 N°3 473 - 483, 2008.
- [2] B. Flèche - D. Delagnes, « Energie solaire photovoltaïque.doc », juin 2007.
- [3] Zaiem Kamar, « Commande d'un système photovoltaïque par contrôleur Neuro- Flou Réduit » Mémoire de Master, Université Annaba, 2019.
- [4] <http://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/solaire-photovoltaïque>.
- [5] Abbassen. Lyes, « Etude de la connexion au réseau électrique d'une centrale Photovoltaïque » Mémoire de magister, Université de Tizi Ouzou, 2011.
- [6] Cylia. Tigrine, Ourdia Ai t. ouali, « Etude et Simulation des techniques MPPT d'une Système photovoltaïques » Mémoire de Master, Université de Bejaïa ,2018.
- [7] Merabet Abdelhak, « Dimensionnement d'un système d'alimentation en énergie électrique par voie photovoltaïque pour l'alimentation d'une habitation » Mémoire de Master, Université Mohamed Khider de Biskra, 2018.
- [8] T. Fethallah et B. Lamoudi Oussama, « Etude et Réalisation d'un Système Photovoltaïque Optimisé par Logique Floue » Mémoire de Master Académique, Université Kasdi Merbah Ouargla, 2018.
- [9] R. Jimmy et al. Le pompage photovoltaïque, Édition Multi mondes, 1999.
- [10] S. Bensmail, D. Rekioua « Optimisation des systèmes de pompage photovoltaïque » International Congress on Télécommunication and Application, Bejaia, Algeria 11-12 April 2012.
- [11] Pastor. Angel. Cid, « Conception et réalisation de modules photovoltaïques électroniques » thèse de Doctorat, Université Toulouse, 2006.
- [12] K. Mariama et S. Ratiba, « Modélisation et simulation de la commande MPPT d'un système photovoltaïque à base de réseaux neurones artificiels » Mémoire de Master Professionnel, Université de Tizi Ouzou ,2018.
- [13] R. Badreddine et O. Souhila, « Modélisation et command du système photovoltaïques par les réseaux de neurones », Mémoire de Master Académique, Université Mohamad Boudiaf - M'SILA, 2016.

- [14] B. Abdelhalim, « Etude et régulation d'un circuit d'extraction de la puissance maximale d'un panneau solaire » Mémoire magister. Biskra, 2009.
- [15] Dossier Thématique « effet photovoltaïque et fonctionnement des installations solaires isolées » énergies solidaires courrier es n°03 – janvier 2000.
- [16] S. Abouda, « Contribution à la commande des systèmes photovoltaïques : application aux systèmes de pompage » thèse de doctorat, co-tutelle de l'Université de Reims Champagne-Ardenne et de l'Université de Sfax, Avril 2015.
- [17] O. Abderraouf et H. Omar, « Comparaison des différentes techniques de poursuites de point de puissance maximal (MPPT) dans une chaîne de conversion d'énergie photovoltaïques photovoltaïques » Mémoire de Master, Université de Bouira, 2020.
- [18] S. Singer, and A. Braunstein, « A general model of maximum power point tracking » Proceedings of MELECON'85 IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference, Madrid, Spain pp 147-151,1985.
- [19] C. ROMBAUT et G SEGUIER. R. BAUSIERE Les convertisseurs de l'Électronique de Puissance. Tome 2 : La conversion alternatif-alternatif. 2ème édition. TEC-DOC LAVOISIER.
- [20] A. Oi, Design and simulation of photovoltaïque water pumping système, Thèse de Magister de l'université California, USA, Septembre 2005.
- [21] M. Boulkouane.Mourad et M. Djabellah.Nassim, « Influence des générateurs photovoltaïques Sur la stabilité des réseaux électriques » Mémoire de Master Université A. Mira, Bejaia ,2016.
- [22] S. M. Ait-Cheikh, « Etude, Investigation et conception d'algorithmes de commande appliqués aux systèmes photovoltaïques » thèse de Doctorat d'état, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, Algérie, 2007.
- [23] Alain Bilbao Ibarreta '' Réalisation de commandes MPPT Numériques '' Rapport de stage Projet Fin d'Etudes Université Rovira Virgili 2006.
- [24] T. Lyes et KH. Sofiane, « Modélisation et simulation d'un système photovoltaïques connecté au réseau électrique » Mémoire de Master, Université de Tizi Ouzou, 2017.
- [25] F. Hananou, A. Rouabah « Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque » Mémoire de Master, Université Kasdi Merbah–Ouargla, 2014.
- [26] Hussein KH, Muta I, Hoshino T, Osakada M (1995) Maximum photovoltaic power tracking: an algorithm for rapidly changing atmospheric conditions. IEE Proc Gener Trans Distrib 142 (1):59
- [27] Fangrui Liu, Shanxu Duan, Fei Liu, Bangyin Liu, and Yong Kang. A Variable Step Size INC MPPT Method for PV Systems. IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS, VOL.

55, NO.7, JULY 2008

- [28] F. Slama. « Modélisation d'un système multi générateurs photovoltaïques interconnectés au réseau électrique » Mémoire de Magister, Université de Ferhat Abbas – Sétif, 2011.
- [29] Abbes, H., Abid, H., Loukil, K., Toumi, A., & Abid, M. (2014). Etude comparative de cinq algorithmes de commande MPPT pour un système photovoltaïque. *Revue des Energies Renouvelables*, 17(3), 435-445.
- [30] Hadji Slimane, « Optimisation de la conversion énergétique pour les systèmes à énergie » thèse de doctorat, université Farhat Abbas Sétif, 2018.
- [31] L. Ahlam et A. Zouleykha « Application de la Logique Floue pour la Poursuite du point de Puissance Maximale d'un Générateur Photovoltaïque » Mémoire de Fin d'Etudes, 2017.
- [32] M. Belkaid Abdelhakim, « Conception et implémentation d'une commande MPPT de haute performance pour une chaîne de conversion photovoltaïque autonome » Mémoire Pour l'obtention du diplôme de doctorat en sciences, Université Ferhat Abbas-Sétif 1, 2015.
- [33] H. Abbes, H. Abid, K. Loukil, A. Toumi, M. Abid, « Etude comparative de cinq algorithmes de commande MPPT pour un système photovoltaïque » Université de Sfax, Tunisie, 2013.
- [34] Hua, C., Lin, J., & Shen, C. (1998). Implementation of a DSP-controlled photovoltaic system with peak power tracking. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 45(1), 99-107.
- [35] P. Bhatnagar, R.K. Nema, « Maximum power point tracking control techniques: State-of-the-art in photovoltaic applications », *Renwable and Substainable Energy Reviews*, Elsevier, 2013.
- [36] N. Oukacine, « Utilisation des réseaux de neurones pour la reconstitution de défauts en évaluation non destructive », Mémoire de Magister, Université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou, 2012.
- [37] O. Djoudi et R. Aboubekr, « Application des réseaux de neurone pour la caractérisation géométrique d'un défaut 3D par courant de foucault », Mémoire de Master, Université Kasdi Merbah Ouargla, 2015.
- [38] M. Sahraoui, « Contrôle robuste des systèmes non linéaires par les approches de l'intelligence artificielle », Thèse de Doctorat, Université Ahmed Ben Bella, Oran, Algérie,
- [39] D. Racoceanu, « Contribution à la surveillance des systèmes de production en utilisant les techniques de l'intelligence artificielle », Habilitation à diriger des recherches, Université de Franche Comté, 2006.
- [40] A. Taleb, « Contribution des réseaux neuro-flous et algorithmes génétiques à la reconnaissance de la parole », Thèse de Doctorat, Université Mohamed Boudiaf, Oran, Algérie, Mai 2010.
- [41] C. Mahabir, F. Hicks, F.R. Fayek, « neuro-fuzzy river ice breakup forecasting system », *Cold*

Regions Sciences and Technology, vol. 46, pp.100-112, 2006.

[42] Ferhat Lahouazi : 'mise en œuvre d'une stratégie de commande neuro floue', application à un Pendule inversé, mémoire de magister en Automatique, UniversitéMouloud Mammeri, Tizi-Ouzou, 16.03.2011.

[43] R Mellah : 'contribution la commande adaptative neuro-floue, application à la robotique' Thèse de Doctorat, Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene, Alger, Mai 2006.

[44] M. Touafek Mohamed Yaakoub, « Amélioration de la stabilité transitoire des réseaux électriques par un contrôle neuro-flou des systèmes FACTS » Mémoire de Magister, UNIVERSITE FERHAT ABBAS — SETIF,2012.

[45] M. Billel et B. Naima, « Commande par logique floue de type 2 et commandeneuro-floue appliquées à un pendule inversé » Mémoire de Master, Université de Blida 1,2015.

[46] Chekroun Soufiane : 'Commande neuro-floue sans capteur de vitesse d'une machine asynchrone triphasee', mémoire de magister en électrotechnique, Ecole Normale Supérieure d'Enseignement Technologique d'Oran, Octobre 2009.

[47] T. Takagi, M. Sugeno, "Fuzzy identification of systems and its application to modeling and control", IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Vol. SMC-15, No 1, pp. 116-132, January/February 1985.

[48] M Madaoui, « commande floue et neuro-floue d'un convertisseur direct AC/ACmonophasé à structure minimale, Application à l'alimentation d'une machine asynchrone monophasé », Thèse de Magister, ENP Alger, février 2007.

ملخص:

تعتمد الطاقة الناتجة للمولد الكهروضوئي على عدة عوامل مناخية، مثل أشعة الشمس ودرجة الحرارة. ومع ذلك للحصول على أفضل نتيجة ممكنة يجب علينا القيام بتتبع فعلي ومتقن لنقطة التشغيل العظمى، من أجل هذا نقوم بمقارنة بين أنظمة التحكم المبنية على خوارزمية تسلق التل والأخرى المبنية على الأنظمة العصبية الضبابية لهذا الغرض نقوم بنمذجة نظام يدمج بين الألواح الشمسية ومبدل جهد مستمر DC\DC مع أنظمة تحكم MPPT باستخدام Simulink /MATLAB.

كلمات مفتاحية:

خوارزمية تسلق التلة، الأنظمة العصبية الضبابية، مولد الطاقة الضوئية، MPPT، DC/DC

Résumé :

L'énergie générée par un générateur photovoltaïque (GPV) dépend de différents facteurs climatiques tels que la chaleur et le rayonnement, mais pour obtenir le résultat optimal, nous devons suivre le point Mpp comme efficacement que possible dans ce travail, nous étudions la différence entre le MPPT basé sur méthode hill-climbing et la méthode de contrôle neuro-floue en créant un système qui combine GPV un convertisseur DC/DC et un contrôleur MPPT en utilisant MATLAB /Simulink.

Mots clés :

Générateur photovoltaïque GPV, MPPT, hill-climbing, Neuro-floue, DC/DC,

Abstract:

the energy generated by a photovoltaic generator (GPV) depend on different climate factor such as heat and radiance but to get the optimal result we need to track the MPP point as efficiently as possible in this work we study the difference between the hill climbing MPPT based method and Neuro-Fuzzy control method by creating a system that combine GPV a DC/DC converter and a MPPT controller by using MATLAB /Simulink.

Key Words:

Photovoltaic generator GPV, MPPT, hill climbing, Neuro-Fuzzy, DC / DC,