

UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA

Faculté des Sciences Appliquées

Département de Génie Electrique



Mémoire

MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et technologies

Filière : Génie électrique

Spécialité : Electrotechnique Industrielle

Présenté par :

BACHIRI Lakhdar

MIDA Ammar

Thème:

Etude d'un système photovoltaïque optimisé par une technique MPPT intelligente (neurone-floue) ANFIS.

Le jury :

LOUAZENE Lakhdar

MCA

Président

UKM Ouargla

KOURAS Sid-Ali

MAA

Encadreur/rapporteur

UKM Ouargla

TAIBI Djamel

MCA

Examineur

UKM Ouargla

Année universitaire 2020/2021

Dédicace

Je dédie ce modeste travail

A mes très chers parents

Je trouve ici l'occasion de leur exprimer ma gratitude la plus

sincère

A mon frère

A mes sœurs

A mon encadreur

A l'ensemble des enseignants

A tous mes collègues et amis

A tous ceux qui me sont chers

Remerciements

Mes remerciements s'adressent tout d'abord au Dieu tout puissant de m'avoir donné tous ce que je possède et de guider mes pas vers le chemin du savoir.

*Je tiens à exprimer ma haute gratitude, mes profonds respects et mes sincères remerciements et reconnaissances d'abord à Monsieur : **kouras sid-ali** enseignant au Département d' Génie électrique, Université : **KASDI Merbah** qui m'a guidé avec grande patience tout au long de l'élaboration de ce travail.*

*J'adresse mes chaleureux remerciements à Monsieur : **LOUAZENE Lakhdar** Maître de Conférences au Département d' Génie électrique, Université : **KASDI Merbah** pour avoir accepté de présider le Jury de ce mémoire.*

*Mes sincères remerciements sont adressés à Monsieur : **TAIBI Djamel** Maître de Conférences au Département d' Génie électrique, Université de : **KASDI Merbah** qui ma fait l'honneur de s'intéresser à ce travail, pour ses aides précieuses, et pour m'avoir honoré en acceptant d'examiner ce modeste travail.*

Dédicace	I
Remerciements	II
Liste des figures	VI
Liste des tableaux	IX
Introduction générale	1
I.1 Introduction.....	3
I.3 La cellule photovoltaïque :.....	5
a-Les Types de Cellules Photovoltaïques.....	5
b-Matériaux semi-conducteurs :.....	5
c-Structure et Description de la jonction photovoltaïque :.....	6
d-La jonction pn.	6
e-L'élément de base le silicium :	7
1-Cellule en silicium amorphe :	8
2-Cellule en silicium monocristallin :	9
3-Cellule en silicium polycristallin :	9
4-d'autre type de cellules :	10
I.4 Modèle mathématique d'une cellule photovoltaïque :.....	10
1-Cas d'une cellule réelle double diode	10
a-Cas d'une cellule réelle	12
I.5 Association en parallèle série et mixte.....	14
I.6 Protection de la connexion des cellules solaires	15
I.6.1 Caractéristique courant - tension.....	16
I.6.2 Puissance maximale d'une cellule photovoltaïque	17
I.7 Caractéristiques d'un module solaire :.....	19
a) Caractéristique courant-tension I(V) :.....	19
b) Caractéristique puissance-tension P(V) :	19
d) Liaison des cellules photovoltaïque :.....	21

e) Influence de la température et de l'éclairément :	24
I.8 Les différents types d'installation Photovoltaïque :	27
I.9 Conclusion :	28
II.1 Introduction:	29
II.2 Contrôleur de charge (régulateur) :	29
II.3. les types des régulateurs de charge :	29
1-Le régulateur de charge shunt :	30
2-Le régulateur de charge série :	31
3- Regulation PWM (Pulse With Modulation):	31
4-Régulateur MPPT (Maximum Power Point Tracking) :	32
II.4. Caractéristiques du régulateur MPPT:	33
4.2 Partie électronique de puissance :	34
4.2.1 Convertisseurs statiques :	34
4.2.2 Convertisseur Continu Alternatif	35
4.2.3 Convertisseurs continus-continu	35
4.2.4 Convertisseur Boost :	36
4.2.5 Convertisseur Buck	37
4.3 Partie commandes (Technique de la commande MPPT) :	38
II.5 CONCLUSION	51
III.1. Introduction	52
III.2. Système photovoltaïque proposer	52
III.3. Description du système étudié :	53
III.4. Structure de la commande MPPT avec Neuro-Floue	54
III.5. Démarche de Création du contrôleur neuro-floue	54
1-L'appel de l'interface graphique neuro-floue :	55
2-L'étape d'apprentissage	55
3-Configuration de la structure du contrôleur neuro-floue	58

4-Vérification concrète du système crée :	59
5-Visualisation des entrées des fonctions d'appartenance	60
6-visualisation des règles :	62
III.6. Simulation de Système globale: un panneau photovoltaïque avec MPPT et convertisseur DC-DC :	64
III.6. 1 · Schéma bloc :	64
III.6.2 Test ANFIS	64
III.6.3 RESULTATS DE SIMULATION	67
III.6.4 Schéma bloc P&O et ANFIS:.....	69
III.7. Conclusion :.....	73
Conclusion générale	74
Références bibliographiques	42
Résumé	77

Liste des figures

Figure I.1 : gisement solaire dans le monde [1].....	3
Figure I.2 : station solaire d'Ain el Ibel Djelfa d'une capacité de 20 mégawatt et Centrale solaire Ain Skhouna à Saïda d'une capacité 30 MW depuis mai 2016 [1].....	3
Figure I.3 : cellule solaire, module solaire et panneau solaire [2].....	4
Figure I.4 : jonction PN [2].....	6
Figure I.5 : structure et fonctionnement d'une cellule photovoltaïque [2].....	7
Figure I.6 : Diagramme circulaire de l'utilisation du silicium dans les cellules solaires en 2009 [3].....	8
Figure I.7 : cellule en silicium amorphe [4].....	9
Figure I.8 : Cellule en silicium monocristallin [4].....	9
Figure I.9 : Cellule en silicium Polycristallin [4].....	10
Figure I.10 : Cellule tandem et cellule organique [4].....	10
Figure I.11 : Modèle à double diode pour cellule solaire.....	11
Figure I.12 : Modèle à diode unique pour cellule solaire.....	12
Figure I.13 : Courbe caractéristique d'un groupe de cellules solaires symétriques [6].....	14
Figure I.14 : Méthodes d'association de cellules pour obtenir les spécifications requises.....	15
Figure I.15 : Ajout d'une diode de dérivation parallèle [7].....	15
Figure I.16 : Ajout de diode à chaque branche.....	16
Figure I.17 : La caractéristique $I(V)$ d'une cellule photovoltaïque [8].....	17
Figure I.18 : Caractéristique $I(V)$ d'un module solaire, $T=25^{\circ}\text{C}$ [8].....	19
Figure I.19 : Caractéristiques $P(V)$ d'un panneau solaire, $T=25^{\circ}\text{C}$. [8].....	20
Figure I.20 : Les différentes zones de la caractéristique $I(V)$, $T=25^{\circ}\text{C}$ [9].....	21
Figure I.21 : Association des modules en série.....	22
Figure I.22 : Caractéristique résultante d'un groupement en série de ns cellules.....	22
Figure I.23 : Association des modules en parallèle.....	22
Figure I.24 : Caractéristique résultante d'un groupement en parallèle.....	23

Figure I.25 : Association mixte des modules.....	23
Figure I.26 : Caractéristique résultante d'un groupement mixte[10]	24
Figure I.27 : l'influence de l'éclairement sur les caractéristiques courant-tension pour une température constante[11]	25
Figure I.28 : l'influence de la température sur les caractéristiques courant-tension pour une température constante [11]	26
Figure I.29 : Installation photovoltaïque autonome [13]	27
Figure I.30 : Installation photovoltaïque raccordé au réseau [13]	28
Figure II.1 : illustration d'un régulateur solaire	29
Figure II.4 : Conception de Régulateur de charge de type shunt [16]	30
Figure II.5 : principe de fonctionnement d'un régulateur de type shunt.....	31
Figure II.6 : Conception de Régulateur de charge de type série [16]	31
Figure II.7 : Courbe de puissance pour module PV avec MPPT et sans MPPT. [17]	32
Figure II.8 : Schématisation d'une chaîne élémentaire de conversion photovoltaïque. [16] .	32
Figure II.9 : Recherche et recouvrement du Point de Puissance Maximal, a) suite à une variation d'ensoleillement au niveau du GPV, b) suite à une variation de consommation de charge, c) suite à une variation de température au niveau du GPV[18].....	34
Figure II.10 : schéma représentatif d'un hacheur boost [16]	36
Figure II.11 : Convertisseur Boost durant l'état ON[16].....	36
Figure II.12 : Convertisseur Boost durant l'état OFF [16]	37
Figure II.13 : schéma représentatif d'un convertisseur Buck [16]	38
Figure II-14 : Organigramme de la méthode HC [19].....	39
Figure II-15 : Organigramme de la méthode P&O [19].....	39
Figure II-16 : Fonctionnement des méthodes HC et P&O [20]	40
Figure II-17: Schéma fonctionnel de la méthode NN [22].....	43
Figure II-18: Architecture ANFIS [25]	45
Figure II-19 : Système PV avec contrôleur MPPT	50
Figure III.1 : Schéma synoptique du système GPV par Neuro-Floue	52

Figure III.2 :	courbe courant tension et puissance tension avec variation de la température .	53
Figure III.3 :	courbe courant tension et puissance tension avec variation de l'irradiation.....	54
Figure III.4 :	l'interface graphique neuro-floue.....	55
Figure III.5.	le processus d'apprentissage neuro-flou sur MATLAB.....	56
Figure III.6.	La forme de la courbe d'apprentissage	57
Figure III.7 :	Test de la capacité de généralisation après apprentissage.....	58
Figure III.8 :	structure neuro-floue sur ANFIS.....	59
Figure III.9 :	fenêtre de l'interface graphique floue.	60
Figure III.10:	Fonction d'appartenance de l'irradiance solaire.....	61
Figure III.11.	Fonction d'appartenance de la température de la cellule PV	61
Figure III.12.	Fonction d'appartenance de la température de la cellule PV	62
Figure III.13.	Fonction d'appartenance visualisation des règles	62
Figure III.14.:	Base de règles du contrôleur ANFIS.....	63
Figure III.15:	Vue de surface créée par ANFIS.....	63
Figure III.16	Schéma de simulation d'un système PV commandé par un contrôleur MPPT avec ANFIS	64
Figure III.17 :	résultat du panneau solaire avant commande MPPT avec une température de 25° et un irradiation de 1000W/m²	66
Figure III.18:	Puissance optimale du système PV	67
Figure III.19:	Tension optimale du système PV	67
Figure III.20:	Evolution de la température et Evolution de l'éclairement.....	68
Figure III.21	comparaison entre la courbe d'évolution de tension de la charge et des PV	68
Figure III.22:	Puissance optimale du système PV pour des conditions variables de la température et de l'éclairement	69
Figure III.23:	Schéma de simulation P&O	70
Figure III.24:	Schéma de simulation ANFIS	70
Figure III.25	Evolution de l'ensoleillement et température global.....	71
Figure III.26	Evolution de la puissance Ppvdes 2 algorithmes ANFIS P&Oétudiés	72

Figure III.27 : comparaison du temps de réponse entre puissance avec technique ANFIS et P&O..... 72

Liste des tableaux

<i>Tableau II-1</i>	les diffèrent type de convertisseur DC = DC 35
<i>Tableau II-1</i>	Comparaison Des Techniques MPPT51
<i>Tableau III-1</i>	Caractéristiques électriques du module photovoltaïque:1STH _250_WH.....53

Introduction générale

Introduction générale

Durant ces dernières années, la demande en énergie à augmenter de façon exponentielle, cette demande obligent les services publics ou privés à augmenter la production d'électricité, selon l'agence international de l'énergie, la demande en électricité à augmenter de 40% durant cette dernière décennie et devrait augmenter de 60% d'ici 2040. La consommation électrique devrait bondir dans les pays émergents mais aussi dans les pays matures à cause du développement de la voiture électrique.

Cette hausse de besoins en électricité ne se fera pas sans problèmes, car jusqu'au jour d'aujourd'hui la plus grande partie de la production électrique est d'origine fossile bon marché mais aussi très polluantes, les statistiques parle d'une augmentation des émissions de gaz à effet de serre supérieur a 35% par rapport à celle enregistrer aujourd'hui.

La nécessité d'investir dans les réseaux, le stockage ou encore les compteurs intelligents est devenu primordial, mais la part du lion des investissements dans le monde dans le mixe énergétiques actuelle va aux énergies renouvelables qui passerait de 25 % actuellement (grâce surtout à l'hydroélectricité) à 40 % en 2040. Elles représenteraient à elles seules les deux tiers des augmentations de capacités. Le solaire et l'éolien connaîtraient la plus forte croissance, grâce notamment à l'amélioration des rendements et la poursuite et de la baisse des coûts. Dans le solaire, où les prix ont quasiment été divisés par dix en dix ans, ils reculeraient encore de 40 % d'ici à 2040. Une hausse au détriment du charbon principalement qui ne représenterait plus que 25 % de la production d'électricité, contre 40 % aujourd'hui.

Actuellement, l'énergie photovoltaïque connaît une progression encor plus rapide en raison de son potentiel significatif, elle se caractérise par une longue durée de vie, un faible coût de maintenance, un environnement respectueux et il est abondant car il dépend du soleil, l'irradiation que le soleil fait parvenir sur la terre chaque année représente plus 10 000 fois la consommation mondiale actuelle d'énergie primaire, toutes formes et tous usages confondus.

D'autre part, les gouvernements encouragent l'investissement dans les ressources énergétiques renouvelables et facilitent beaucoup l'implantation de ces systèmes. En 2009, le PV dans le monde a généré 23GW. En 2011, plus de 69 GW de puissance photovoltaïque sont installés dans le monde et peuvent générer 85 TWh d'électricité par an. L'Association européenne de l'industrie photovoltaïque (EPIA) s'attend à ce que la capacité photovoltaïque mondiale cumulée atteigne 200 GW d'ici 2020 et 800 GW d'ici 2030 [4]. Pour ces raisons, les chercheurs essaient de développer et de modifier le panneau photovoltaïque de différentes manières, par exemple, le matériau des cellules photovoltaïques, la modélisation du panneau

photovoltaïque, les algorithmes de suivi du point de puissance maximale, le convertisseur électronique de puissance utilisé pour intégrer le générateur photovoltaïque au réseau et son impact sur système d'alimentation, etc.

Ce mémoire s'articulera autour de trois grands axes :

Le premier chapitre est un travail de recherche bibliographique portant sur les panneaux solaire et les dispositifs photovoltaïques, leurs différents types, ainsi que le gisement solaire dans notre pays, la mise en point du modèle mathématique qui détermine les caractéristiques électriques courant-tension et puissance ainsi que l'influence des paramètres (température et ensoleillement)

Dans le deuxième chapitre nous avons étudié essentiellement la technique MPPT, qui nous permet d'optimiser au maximum le potentiel des panneaux ainsi que le principe de fonctionnement de cette technique, ses caractéristiques et sa modélisation avec la méthode neurone floue et les avantages quelle procure.

Finalement, le troisième chapitre viendra clôturer le tout, sous forme d'une simulation de notre système faite grâce au logiciel ANFIS de MATLAB simulink qui résumera les points abordés précédemment.

Nous terminerons notre travail par une conclusion générale et les perspectives éventuelles à la continuation de notre travail de recherche.

Chapitre I :

GENERALITES SUR LE

SOLAIRE

Chapitre I : GENERALITES SUR LE SOLAIRE

I.1 Introduction

L'énergie solaire provient de la fusion nucléaire qui se produit au centre du Soleil. Elle se propage sous forme d'un rayonnement électromagnétique. L'énergie électromagnétique parvient à la surface de la terre une moyenne de 1367 watts atteint chaque mètre carré. Son avantage c'est d'être toujours disponible surtout en Algérie. Les systèmes électriques à panneaux solaires, également appelés cellules solaires photovoltaïques (PV), captent la lumière du soleil et génèrent de l'énergie. Ce processus peut être réalisé par des cellules photovoltaïques. Les cellules convertissent la lumière du soleil en électricité, qui peut être utilisée pour alimenter les appareils ménagers et l'éclairage [1].

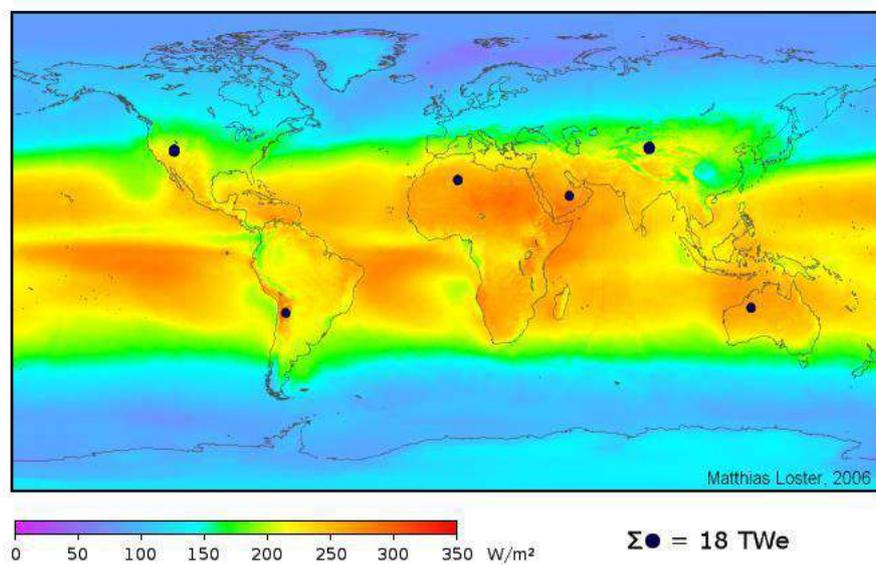


Figure I.1 : gisement solaire dans le monde [1]

Nous pourrions alimenter le monde entier en mettant des de panneaux solaires dans les régions ou les points noire sur la carte .



Figure I.2 : station solaire d'Ain el Ibel Djelfa d'une capacité de 20 mégawatt et Centrale solaire Ain Skhouna à Saïda d'une capacité 30 MW depuis mai 2016 [1]

Chapitre I : GENERALITES SUR LE SOLAIRE

I.2 L'énergie solaire photovoltaïque (EPV) :

En termes très simples, le photovoltaïque peut être défini comme la technologie qui convertit directement l'énergie solaire ou la lumière du soleil en électricité utilisable sans utiliser de moteur mécanique ou thermique. Chaque panneau photovoltaïque se compose de nombreux composants plus petits appelés cellules solaires. Ces cellules sont reliées entre elles physiquement et électriquement au moyen de plusieurs connexions pour former un module. Ensuite, les modules sont liés pour produire un panneau solaire. Lorsque plusieurs panneaux solaires sont connectés les uns aux autres, ils forment un panneau solaire ; La figure 7 explique la relation entre les cellules solaires, les modules, le panneau et le system PV. Celle-ci délivre une tension continue et un courant la traverse dès qu'elle est connectée à une charge électrique (en général un onduleur, parfois une simple batterie électrique). La puissance obtenue est proportionnelle à la puissance lumineuse incidente et dépend du rendement de la cellule [2].

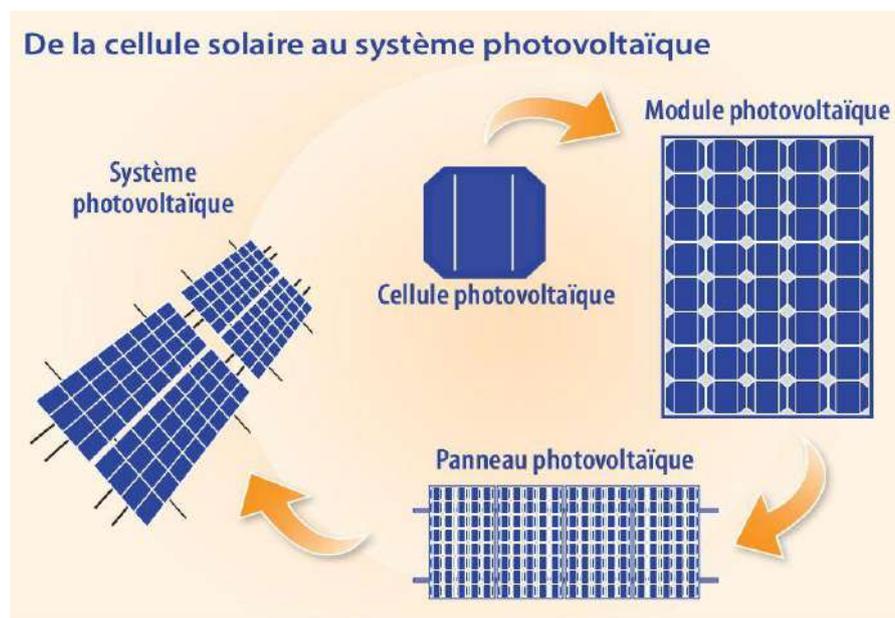


Figure I.3 : cellule solaire, module solaire et panneau solaire [2]

La capacité de chaque module solaire photovoltaïque est estimée en kilowatts de puissance crête (kW) ou en watts (W). La capacité de puissance de crête fait référence à la puissance électrique maximale générée par le module solaire si le système est dans les conditions de test standard :

- L'irradiance solaire est de 1000 W/m²
- La température du module est de 25 C.

Chapitre I : GENERALITES SUR LE SOLAIRE

Habituellement, la puissance réelle générée par un module photovoltaïque est inférieure à sa puissance nominale. Et parfois, cela pourrait être plus grand. En fait, cela dépend de nombreux facteurs tels que l'emplacement géographique, la météo, l'heure de la journée et d'autres raisons.

I.3 La cellule photovoltaïque :

Une cellule solaire est un dispositif semi-conducteur photosensible fabriqué en couches minces. Lorsque les radiations électromagnétiques solaires sont incidentes sur elle, de l'électricité est produite par effet photovoltaïque. Lorsque la cellule PV est exposée au soleil, des porteurs de charge sont produits qui créent un courant électrique si le circuit est fermé. Des charges sont générées lorsque l'énergie incidente du photon est suffisante (ayant une énergie supérieure à l'énergie de la bande interdite de l'électron) pour déplacer l'électron covalent du semi-conducteur. De ce fait, un champ électrique interne est créé. Ce champ électrique interne entraîne la séparation des porteurs de charge de charge opposée. Le mouvement de ces porteurs de charge crée un courant, appelé photocourant. Une cellule PV présente essentiellement des caractéristiques non linéaires, car on peut l'imaginer comme une combinaison d'une source de courant en parallèle avec une diode idéale

a-Les Types de Cellules Photovoltaïques

Les cellules photovoltaïques sont constituées de semi-conducteurs à base de : silicium (Si), de germanium (Ge), de sélénium (Se), de sulfure de cadmium (CdS), de tellure de cadmium (CdTe) ou d'arséniure de gallium (GaAs). Cependant, le silicium est actuellement le matériau le plus utilisé pour fabriquer les cellules photovoltaïques.

b-Matériaux semi-conducteurs :

Un semi-conducteur est un matériau qui a les caractéristiques électriques d'un isolant, mais pour lequel la probabilité qu'un électron puisse contribuer à un courant électrique, quoique faible, est suffisamment importante. Cela est possible grâce à une jonction p-n de grande surface. Cette jonction désigne une zone du cristal où le dopage varie brusquement, passant d'un dopage p à un dopage n dans laquelle les paires électron-trou créées par la lumière sont séparées par le champ électrique de la jonction.

Chapitre I : GENERALITES SUR LE SOLAIRE

Les semi-conducteurs sont primordiaux en électronique, car ils offrent la possibilité de contrôler, par divers moyens, aussi bien la quantité de courant électrique susceptible de les traverser que la direction que peut prendre ce courant.

c-Structure et Description de la jonction photovoltaïque :

Un cristal semi-conducteur dopé P est recouvert d'une zone très mince dopée N et d'épaisseur égale à quelques millièmes de mm. Entre les deux zones se trouve une jonction J.

La zone N est couverte par une grille métallique qui sert de cathode k tandis qu'à l'autre face une plaque métallique joue le rôle d'anode. L'épaisseur totale du cristal est de l'ordre du mm .

Ces cellules étant fragiles, elles sont enveloppées par une couche de verre, résistant aux chocs et aux intempéries et parfois recouvertes d'une couche anti-reflet.

Dans l'architecture classique d'une cellule, des collecteurs de charges sont ajoutés par le biais de techniques sérigraphiques, c'est-à-dire par l'ajout d'une pâte métallique (selon un motif défini) qui est par la suite solidifiée durant un nouveau passage dans un four. On dépose sur la couche p, à l'arrière, une électrode positive généralement en aluminium ou en argent, elle-même déposée sur un substrat. Cette métallisation conclut la fabrication des cellules en tant que telles

d-La jonction pn.

Lorsque ces types de semi-conducteurs p et n sont en contact au niveau de la ligne de jonction, les électrons diffusent du côté n vers le côté p. De plus, ils se combineront avec les trous. Cela créera des ions négatifs fixes du côté p et gardera des ions positifs du côté n. Par conséquent, un équilibre est atteint sans autre diffusion.

La jonction au niveau de la diode est divisée en deux zones : la zone d'appauvrissement et la zone quasi neutre. La figure 1 montre la diffusion et la couche de déplétion où la zone de déplétion contenant la zone de jonction

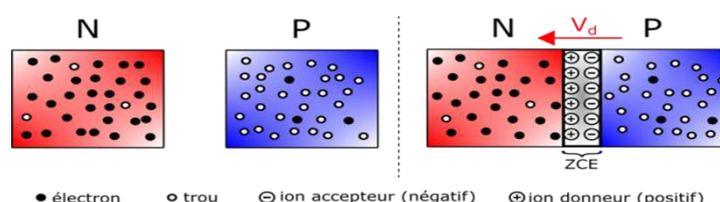


Figure I.4 : jonction PN [2]

Chapitre I : GENERALITES SUR LE SOLAIRE

La strate n est placée au-dessus de la strate p, elle est donc la première à être exposée à la lumière solaire. Lorsqu'un rayon lumineux frappe le dispositif il peut pénétrer dans le cristal au travers de la grille et provoquer l'apparition d'une tension entre la cathode et l'anode. En général le semi-conducteur de base est du silicium monocristallin comme celui qui est utilisé pour la fabrication des transistors mais on rencontre maintenant plus fréquemment du silicium polycristallin moins coûteux à produire.

Lors de collisions avec les atomes, les photons peuvent transférer leur énergie aux électrons, au point de les exciter et ainsi de les forcer à quitter leur bande de valence pour rejoindre la bande de conduction (ce qui est possible grâce à la faible épaisseur de la bande interdite). Ils peuvent alors se déplacer dans la matière, tout en laissant un « trou » derrière eux. Pour rappel, les électrons sont chargés négativement. Les trous ont donc une charge positive. Comme il est bien connu, les charges de signe opposé s'attirent ! Les électrons vont donc aller vers la couche dopée p et les trous vont se déplacer jusqu'à la couche dopée n. Ce mouvement de charges engendre un courant électrique, qui est recueilli dans un circuit conducteur placé sous les cellules et qui relie l'ensemble des cellules d'un panneau

Cette première étape est importante, mais elle ne suffit pas pour générer le courant souhaité. Il faut parvenir à séparer les trous des électrons pour éviter leur recombinaison.

Les panneaux peuvent alors être assemblés en série ou en parallèle, selon les caractéristiques électriques souhaitées puis ils seront encapsulés. Les cellules photovoltaïques au silicium monocristallin sont d'un bleu ou d'un noir uniforme. En revanche, les structures polycristallines sont marquées par des motifs correspondant aux limites des cristaux.

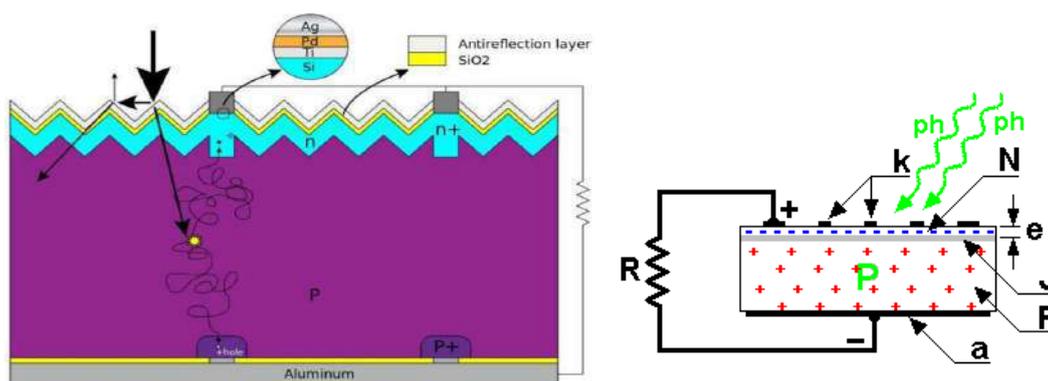


Figure I.5 : structure et fonctionnement d'une cellule photovoltaïque [2]

e-L'élément de base le silicium :

Le Silicium a pour numéro atomique $Z=14$, sa configuration électronique est $(K)2(L)8(M)4$. Un atome de silicium possède donc 4 électrons sur sa couche de valence.

Chapitre I : GENERALITES SUR LE SOLAIRE

Les installations photovoltaïques utilisées dans l'habitat présentent des avantages. En effet, elles sont d'une grande fiabilité (avec une durée de vie d'environ 25 ans), ne nécessitent aucune pièce mobile, pratiquement aucun entretien et n'engendrent aucun coût de fonctionnement. Mais elles présentent aussi quelques inconvénients par rapport à une installation électrique traditionnelle : elles ont des coûts de fabrication élevés, fonctionnent par intermittence (en effet, leur rendement dépend de l'ensoleillement) et ont un rendement qui reste assez faible malgré les grandes améliorations réalisées dans ce domaine depuis leur invention.

Nous allons ici comparer les principaux types de cellules utilisées actuellement, en examinant leurs avantages et leurs inconvénients. Il en existe d'autres actuellement à l'étude, mais leur utilisation est pratiquement négligeable. Elles se distinguent principalement en fonction des technologies de silicium qu'elles utilisent.

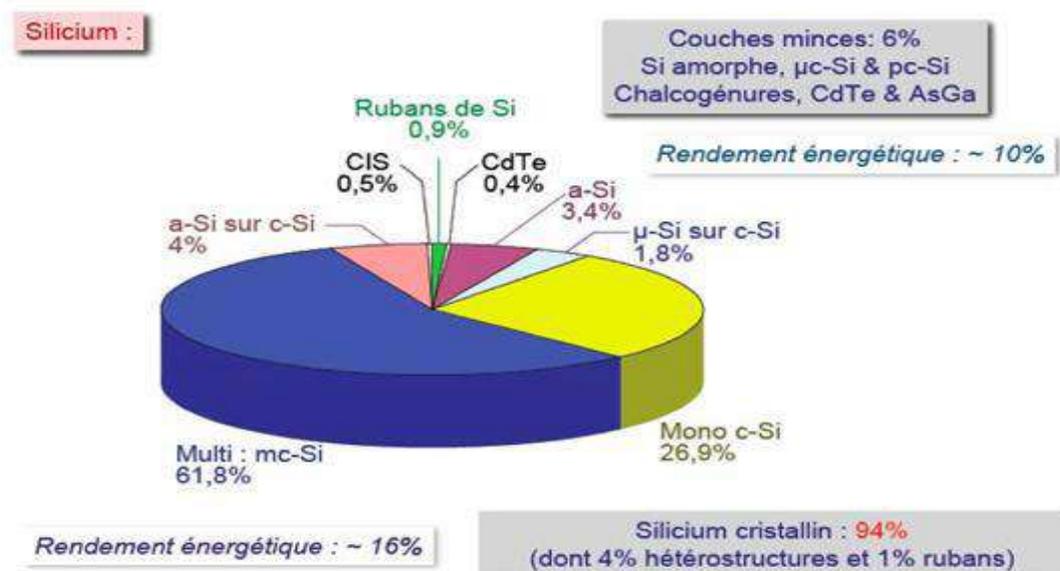


Figure I.6 : Diagramme circulaire de l'utilisation du silicium dans les cellules solaires en 2009 [3]

1-Cellule en silicium amorphe :

Lors de sa transformation, le silicium produit un gaz, qui est projeté sur une feuille de verre. La cellule est grise très foncée. Les cellules amorphes sont utilisées partout où une

Chapitre I : GENERALITES SUR LE SOLAIRE

alternative économique est recherchée, ou, quand très peu d'électricité est nécessaire. C'est la cellule qu'on utilise généralement pour les calculatrices et les montres dites « solaires ».

Remarque : Cellules à silicium cristallin qui peuvent être monocristallin ou polycristalline présentent aujourd'hui plus de 90% du marché des cellules photovoltaïques.



Figure I.7 : cellule en silicium amorphe [4]

2-Cellule en silicium monocristallin :

Lors de son refroidissement, le silicium fondu se solidifie et ne forme qu'un seul cristal de grande dimension. On découpe ensuite le cristal pur en fines lamelles qui donneront les cellules. Ce sont historiquement les premières cellules photopiles élaborées à partir d'un bloc de silicium cristallisé en un seul cristal. Ces cellules sont en général d'un bleu uniforme



Figure I.8 : Cellule en silicium monocristallin [4]

3-Cellule en silicium polycristallin :

Les cellules à silicium polycristallin sont élaborées à partir d'un bloc de silicium cristallisé en forme de cristaux multiples. Le silicium est fortement chauffé puis refroidi dans un moule où les cristaux s'orientent de façon irrégulière. Vue de près, on peut voir les orientations différentes des cristaux (tonalités différentes) qui forment des motifs. Ce type de cellule est également bleu.

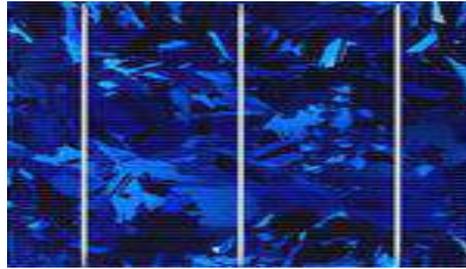


Figure I.9 : Cellule en silicium Polycristallin [4]

4-d'autre type de cellules :

- En combinant deux cellules (de silicium *cellule tandem* amorphe sur du silicium cristallin par exemple) absorbant dans des domaines spectraux se chevauchant, on améliore le rendement théorique par rapport à des cellules simples distinctes, qu'elles soient amorphes ou cristallines ces cellules sont dites "tandem"
- Les matériaux organiques plastiques ou polymères, faciles à mettre en oeuvre, sont en passe de s'imposer à côté du silicium pour la fabrication des cellules solaires, même si des verrous technologiques restent à lever. L'utilisation des matériaux organiques pour des applications photovoltaïques a été étudiée de manière intensive durant les vingt dernières années

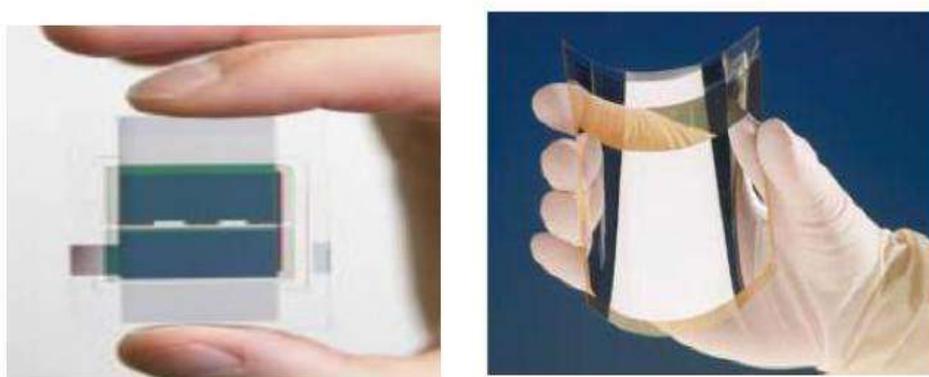


Figure I.10 : Cellule tandem et cellule organique [4]

I.4 Modèle mathématique d'une cellule photovoltaïque :

1-Cas d'une cellule réelle double diode

Dans ce cas le circuit représentant de ce modèle est donné par la **Fig.I-11**

Chapitre I : GENERALITES SUR LE SOLAIRE

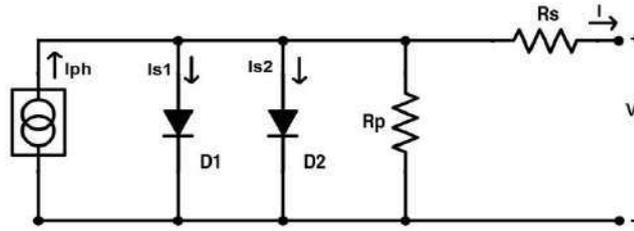


Figure I.11 : Modèle à double diode pour cellule solaire.

Ce modèle a une source de courant I_{ph} , deux diodes, une résistance série et une résistance parallèle comme le montre la figure 2 [5]. Le courant net I est la différence entre le photocourant et la somme du courant de diode normal I_{s1} , I_{s2} , et le courant à travers R_p , l'équation caractéristique (1) de la cellule solaire ci-dessus est mathématiquement donnée comme :

$$I = I_{ph} - I_{s1} \left[e^{\left(\frac{q(V+IR_s)}{KTA_1} \right)} - 1 \right] - I_{s2} \left[e^{\left(\frac{q(V+IR_s)}{KTA_2} \right)} - 1 \right] - \frac{(V+IR_s)}{R_p} \quad (1)$$

$$I = I_{ph}$$

Où:

K = Constante de Boltzmann $1,38 \cdot 10^{-23}$ J/K

A_1 = Facteur idéal pour la première diode.

A_2 = Facteur idéal pour la deuxième diode.

T = Température en fahrenheit.

Cependant, le modèle à double diode peut être encore simplifié en supprimant le courant I_{s2} -le courant de saturation inverse de la diode D2. Cela est dû à la recombinaison

Chapitre I : GENERALITES SUR LE SOLAIRE

des porteurs de charge dans la couche de charge d'espace qui est négligeable. Cette hypothèse est tout à fait acceptable compte tenu des conditions d'essai standard [5].

a-Cas d'une cellule réelle

Par conséquent, le modèle complet de la cellule solaire à diode unique est illustré ci-dessous à la figure 3 et est principalement utilisé à des fins d'analyse et de conception avec une précision acceptable [5]. L'équation du modèle à diode unique est présentée dans l'équation (2).

$$I = I_{ph} - I_{s1} \left[e^{\frac{q(V+IR_s)}{KTA_1}} - 1 \right] - \frac{(V+IR_s)}{R_p} \quad (2)$$

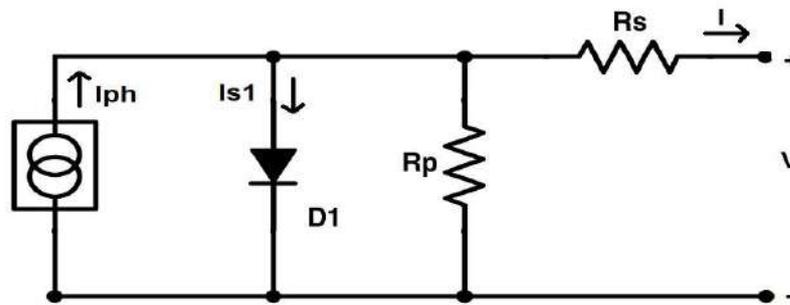


Figure I.12 : Modèle à diode unique pour cellule solaire

Les modèles à diodes doubles et simples pour les cellules solaires dépendent de la température. Les équations (3-8) illustrent les différentes relations avec la température [5], [15-16], [18], [21-22], [25] et [28] :

$$I_{ph}(T) = I_{phn} (1 + K_I (T - T_0)) \quad (3)$$

Chapitre I : GENERALITES SUR LE SOLAIRE

$$V_{oc}(T) = V_{ocn} (1 + K_V (T - T_0)) \quad (4)$$

$$I_s(T) = I_{sn} \left(\frac{T}{T_0} \right)^{\left(\frac{k_1}{A_1} \right)} e^{\left(\frac{E_g(T_0 - 1)}{(A_1 v_t)} \right)} \quad (5)$$

$$I_{sn} = \frac{I_{sc}}{e^{\left(\frac{V_{oc}}{A v_t} \right)} - 1} \quad (6)$$

Où:

$$V_t = \frac{KT}{q}$$

Voc = Tension à vide (tension ouverte)

Icc = Courant de court-circuit.

Vocn = Tension ouverte nominale

Iphn = Courant généré nominal photovoltaïque

Isn = Courant de saturation nominal de la diode

Eg = L'énergie d'activation des cellules solaires

K_I = Coefficient de courant de court-circuit (A/K)

K_V = Coefficient de tension en circuit ouvert (V/K)

T₀ = Température nominale

k₁ = exposant de température pour la première diode

Compte tenu de la variation d'irradiation, l'équation 3 peut être améliorée par les équations suivantes :

$$I_{ph}(T) = I_{ph} (1 + \alpha (T - T_0)) \frac{G}{G_n} \quad (7)$$

Chapitre I : GENERALITES SUR LE SOLAIRE

Comme l' I_s dépend fortement de la température, le courant de saturation dans l'équation 5 peut être amélioré par [20] et [23] :

$$I_s = \frac{I_{sc} + K_I \Delta T}{e^{\left(\frac{V_{oc} + K_V \Delta T}{A V_t}\right) - 1}} \quad (8)$$

I.5 Association en parallèle série et mixte

Les cellules solaires connectées les unes aux autres en association afin d'obtenir certaines spécifications électriques (tension, courant) [6]. Par conséquent, la forme incurvée caractéristique du panneau solaire I-V Curve plie la forme caractéristique des cellules qui le composent, mais avec des spécifications quantitatives différentes. Pour illustrer cela, nous présentons l'exemple suivant: La figure 1-12 montre la courbe caractéristique d'un groupe de cellules solaires identiques. Nous voulons utiliser ces cellules dans la construction d'un panneau solaire de sorte que la tension en circuit ouvert ait trois fois la tension en circuit ouvert de la cellule solaire et de sorte que le courant court soit deux fois le courant court par cellule.

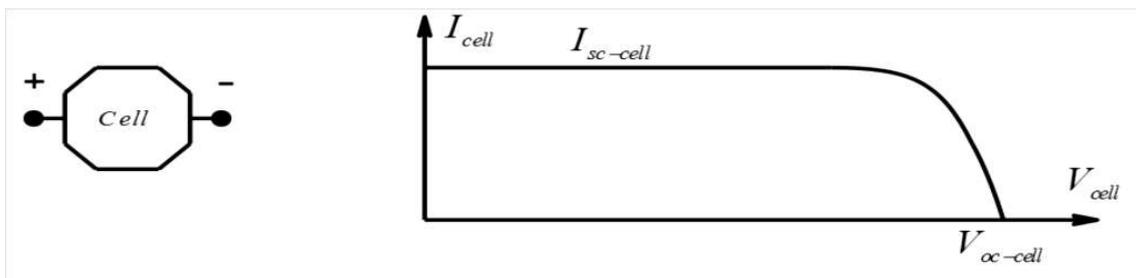


Figure I.13 : Courbe caractéristique d'un groupe de cellules solaires symétriques [6]

Pour obtenir la tension de circuit ouvert requise, nous connectons trois cellules en série, obtenant ainsi un bloc avec la tension de circuit ouvert requise et un courant de court-circuit égal au courant de court-circuit d'une cellule, nous connectons à ce bloc un bloc identique. En branchant avec lui, nous obtenons un courant court égal à deux fois le courant

Chapitre I : GENERALITES SUR LE SOLAIRE

court par cellule. La Figure I-13 montre la méthode de connexion des cellules pour obtenir les spécifications requises.

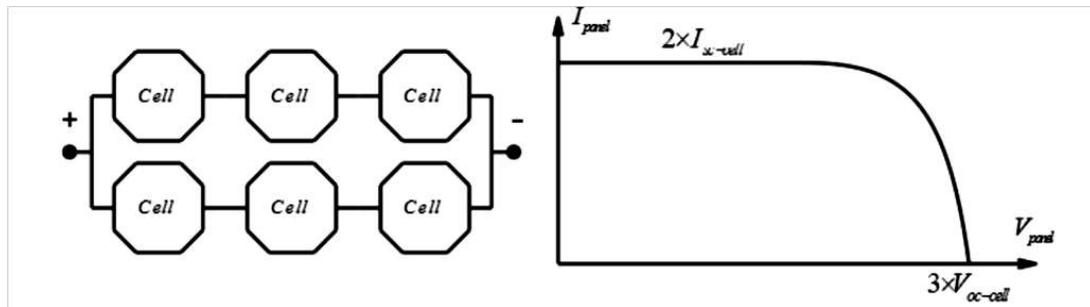


Figure I.14 : Méthodes d'association de cellules pour obtenir les spécifications requises

I.6 Protection de la connexion des cellules solaires

Il y a aussi un point important dans la connexion des cellules solaires, supposons qu'il y ait un groupe de cellules solaires connectées dans la série ombragée l'une d'elles pour une raison quelconque, cela conduit à couper le courant dans toute la chaîne même si le reste des cellules en la chaîne n'est pas grisée. A partir d'elles sur un certain nombre de cellules, une diode est ajoutée sur le branchement

Diode de dérivation parallèle avec chaque ensemble de séries. Dans ce cas, si vous ombrez l'une des cellules de la chaîne, nous ne perdrons pas toute la chaîne, mais uniquement le groupe qui contient cette chaîne, car le courant passera à travers la diode. La Figure 1-14 montre le fonctionnement du processus.

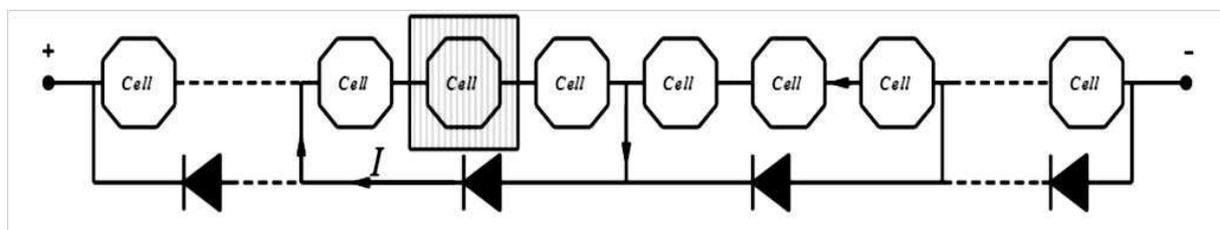


Figure I.15 : Ajout d'une diode de dérivation parallèle [7]

Chapitre I : GENERALITES SUR LE SOLAIRE

De même, dans le cas de la connexion de chaînes de cellules sur la branche, si un groupe de cellules dans une chaîne est ombré, cela conduit à la branche qui contient ces cellules devenant une charge pour le reste des branches, donc une diode est ajoutée à chaque branche pour protéger du flux de courant dans la direction opposée, comme indiqué sur la figure.

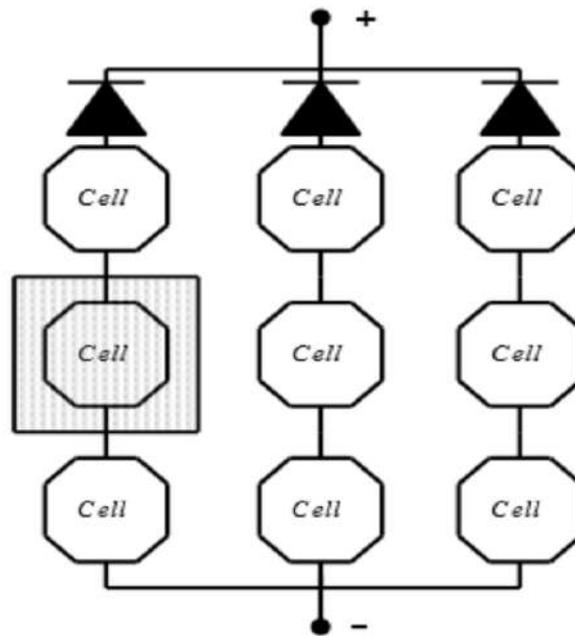


Figure I.16 : Ajout de diode à chaque branche

Nous avons précédemment présenté une brève introduction à la structure de la cellule solaire et à ses propriétés électriques. Les paragraphes suivants contiennent des méthodes d'exploitation de l'énergie solaire à l'aide de panneaux solaires.

I.6.1 Caractéristique courant - tension

La courbe caractéristique d'une cellule PV représente la variation du courant qu'elle produit en fonction de la tension à ses bornes, depuis le court-circuit (tension nulle correspondant au courant maximum produit) jusqu'au circuit ouvert (courant nul pour une tension maximale aux bornes de la cellule) [8].

Cette caractéristique $I = f(V)$ est identique à celle du module photovoltaïque, elle se met sous la forme mathématique à partir des deux équations (I.1) et (I.2) comme suit

Chapitre I : GENERALITES SUR LE SOLAIRE

$$I = I_s \left[\exp \left(q \frac{V + R_s I}{AkT} \right) - 1 \right] - \frac{V + R_s I}{R_{sh}} \quad (9)$$

Si on trace le courant (I) en fonction de la tension (V) en aura une soustraction de deux courbes : (I_{ph}) et (I_D) avec (R_{sh} est très grande).

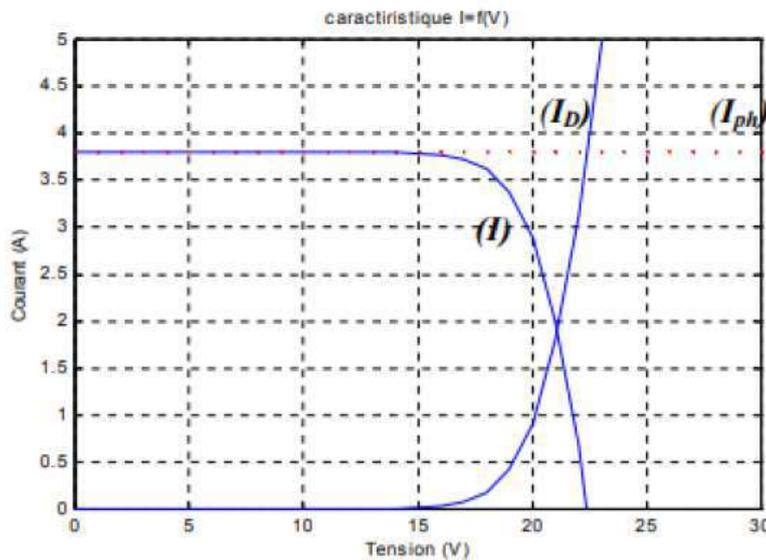


Figure I.17: La caractéristique $I(V)$ d'une cellule photovoltaïque [8]

I.6.2 Puissance maximale d'une cellule photovoltaïque

Dans des conditions ambiantes de fonctionnement fixes (éclairage, température, etc..), la puissance électrique P disponible aux bornes d'une cellule photovoltaïque est égale au produit du courant continu fourni I et la tension continue V

Pour d'une cellule idéal, la puissance maximale $P_{maxid\acute{e}ale}$ correspond à la tension de circuit ouvert V_{co} multiplié par le courant de court circuit I_{cc}

Chapitre I : GENERALITES SUR LE SOLAIRE

$$I_{cc}(V = 0) = I_{ph} ; V_{co}(I = 0) = \frac{A K T}{q} \ln \left(\frac{I_{ph}}{I_s} + 1 \right)$$

$$P_{maxid\acute{e}ale} = V_{co} I_{cc} \quad (10)$$

Où :

$P_{maxid\acute{e}ale}(w)$: Puissance mesurée aux bornes de la cellule photovoltaïque.

$V_{co}(V)$: Tension de circuit ouvert mesurée aux bornes de la cellule photovoltaïque

$I_{cc}(A)$: Intensité de court-circuit mesurée aux bornes de la cellule photovoltaïque.

En pratique, la courbe caractéristique d'une cellule photovoltaïque est plus « arrondie », et la tension au point de puissance maximale est inférieure à la tension de circuit ouvert V_{co} même que le courant fourni est inférieur pour cette même tension, au courant de court-circuit I_{cc}

Donc, avec une résistance série très faible R_S et une résistance shunt très élevée R_{sh} , on peut écrire :

$$P = V \left[I_{ph} - I_s \left[\exp \left(\frac{qV}{A K T} \right) - 1 \right] \right] \quad (11)$$

Cette puissance est donc maximale au point défini par $dP/dV=0$ soit :

$$I_{ph} - I_s \left(\exp \left(\frac{qV}{A K T} \right) - 1 \right) - V I_s \left(\frac{q}{A K T} \right) \exp \left(\frac{qV}{A K T} \right) = 0 \quad (12)$$

La tension V_{max} et le courant I_{max} correspondant au maximum de puissance sont données

alors par :

$$\left(1 + \frac{qV_{max}}{A k T} \right) \exp \left(\frac{qV_{max}}{A k T} \right) = 1 + \left(\frac{I_{ph}}{I_s} \right) \quad (13)$$

Chapitre I : GENERALITES SUR LE SOLAIRE

Donc :

$$I_{max} = (qI_s V_{max}/kT) \exp (qV_{max}/AkT) \quad (14)$$

I_{max} : le courant correspondant au maximum de puissance

V_{max} : la tension correspondante au maximum de puissance

Le produit $V_{max} \cdot I_{max}$ nous donne la puissance maximale qui représente 80% environ de produit $V_{co} \cdot I_{cc}$

I.7 Caractéristiques d'un module solaire :

Ici nous nous proposons de fixer la température à 25°C

a) Caractéristique courant-tension I(V) :

C'est une caractéristique fondamentale du module solaire. Elle est identique à celle d'une jonction P-N avec un sens bloqué, mais décalé le long de l'axe du courant d'une quantité directement proportionnelle à l'éclairement. Elle se trace sous un éclairement fixe et une température constante.

b) Caractéristique puissance-tension P(V) :

La puissance débitée par le module photovoltaïque dépend du point de fonctionnement de cette dernière : c'est le produit de l'intensité de courant et de la tension entre ses bornes.

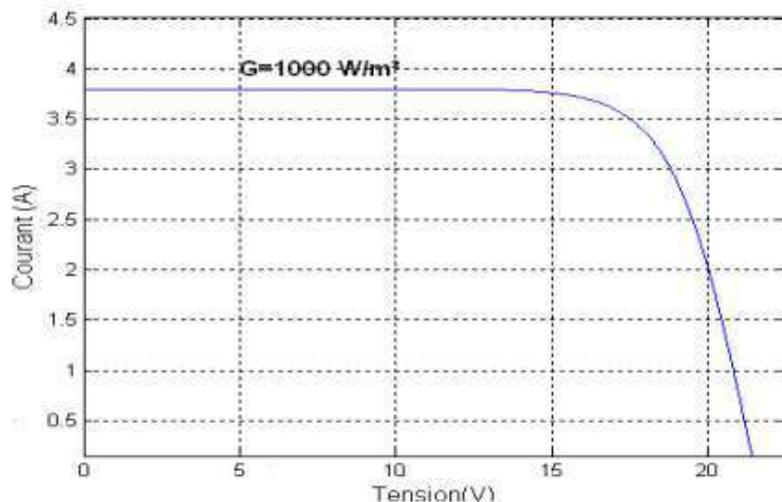


Figure I.18 : Caractéristique I(V) d'un module solaire, T=25°C[8]

Chapitre I : GENERALITES SUR LE SOLAIRE

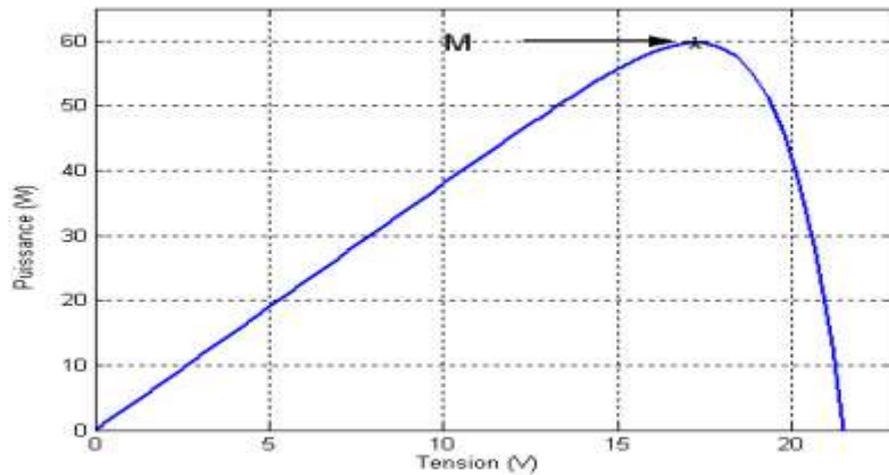


Figure I.19 : Caractéristiques P (V) d'un panneau solaire, $T=25^{\circ}\text{C}$. [8]

La légère baisse de la valeur du courant entre les points M et A est due à une partie du courant traversant la résistance interne de la cellule PV. Et entre les points A et S, la résistance de charge augmente, forçant une partie du courant à traverser la diode, ce qui entraîne une chute rapide du courant vers la charge. Cela continue jusqu'au point S où tout le courant traverse la diode et la résistance interne[8].

1. **La zone (I)** : où le courant reste constant quelle que soit la tension, pour cette région, le générateur photovoltaïque fonctionne comme un générateur de courant.

2. **La zone (II)** : correspondant au coude de la caractéristique, la région intermédiaire entre les deux zones, représente la région préférée pour le fonctionnement du générateur, où le point optimal (caractérisé par une puissance maximale) peut être déterminé.

3. **La zone (III)** : qui se distingue par une variation de courant correspondant à une tension presque constante, dans ce cas le générateur est assimilable à un générateur de tension

Note : Le point « M » représente la puissance maximale débitée par le module.

c) Zones de fonctionnement du module solaire :

La caractéristique fondamentale d'un générateur photovoltaïque donnée pour un éclairement et une température donnée, n'impose ni le courant ni la tension de

Chapitre I : GENERALITES SUR LE SOLAIRE

fonctionnement ; seule la courbe $I(V)$ est fixée. C'est la valeur de la charge aux bornes du générateur qui va déterminer le point de fonctionnement du système photovoltaïque.

Elle est répartie en trois zones essentielles :

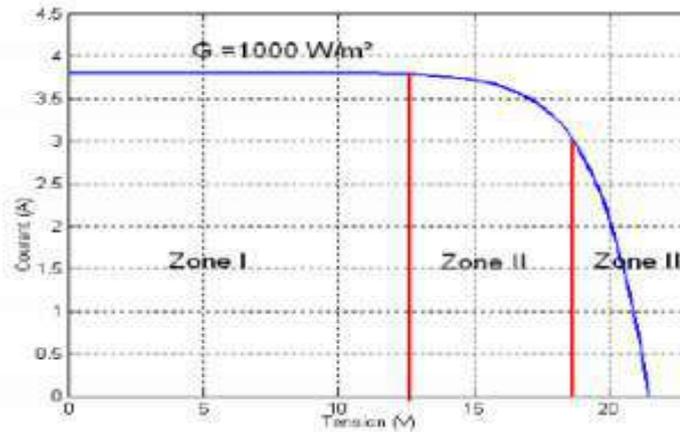


Figure I.20 : Les différentes zones de la caractéristique $I(V)$, $T=25^\circ\text{C}$ [9]

d) Liaison des cellules photovoltaïque :

La puissance générée par une seule cellule photovoltaïque étant très faible, l'association de plusieurs cellules en série ou en parallèle est nécessaire. Dans cette partie nous présenterons l'influence de cette association sur la tension et le courant fournis par le panneau solaire.

➤ Groupement en série :

Dans un groupement en série figure (I-21), les cellules sont traversées par le même courant et la caractéristique résultante du groupement en série est obtenue par l'addition des tensions à courant donné.

La figure (I-22) montre la caractéristique résultante (I_s, V_s) obtenue par l'association en série (indice s) de n_s cellules identiques (I_{cc}, V_{co}).

Avec : $I_{scc} = I_{cc}$: le courant de court-circuit.

$V_{sco} = n_s V_{co}$: la tension de circuit ouvert

Chapitre I : GENERALITES SUR LE SOLAIRE

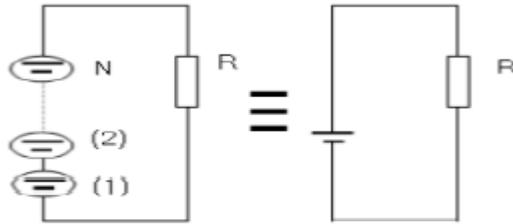


Figure I.21 : Association des modules en série

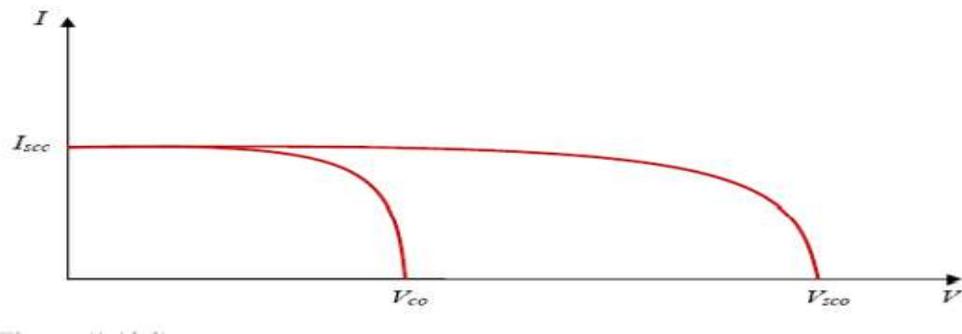


Figure I.22 : Caractéristique résultante d'un groupement en série de ns cellules

➤ Groupement en parallèle :

Dans un groupement de cellules connectées en parallèle figure (I-23), les cellules étant soumises à la même tension, les intensités s'additionnent : la caractéristique résultante est obtenue par addition de courants à tension donnée.

La figure (I-24) montre la caractéristique résultante (I_{pcc} , V_{pco}) obtenue en associant en parallèle (indice p) np cellules identiques (I_{cc} , V_{co}).

Avec : $I_{pcc} = nI_{cc}$: le courant de court-circuit.

$V_{pco} = V_{co}$: la tension de circuit ouvert

➤ Groupement mixte (série-parallèle) :

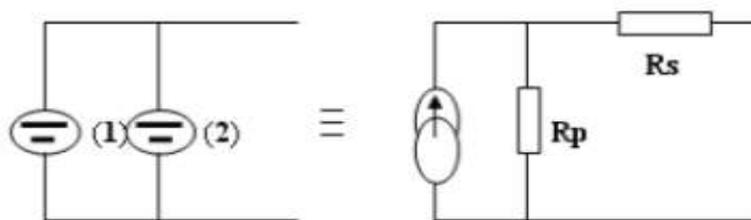


Figure I.23 : Association des modules en parallèle

Chapitre I : GENERALITES SUR LE SOLAIRE

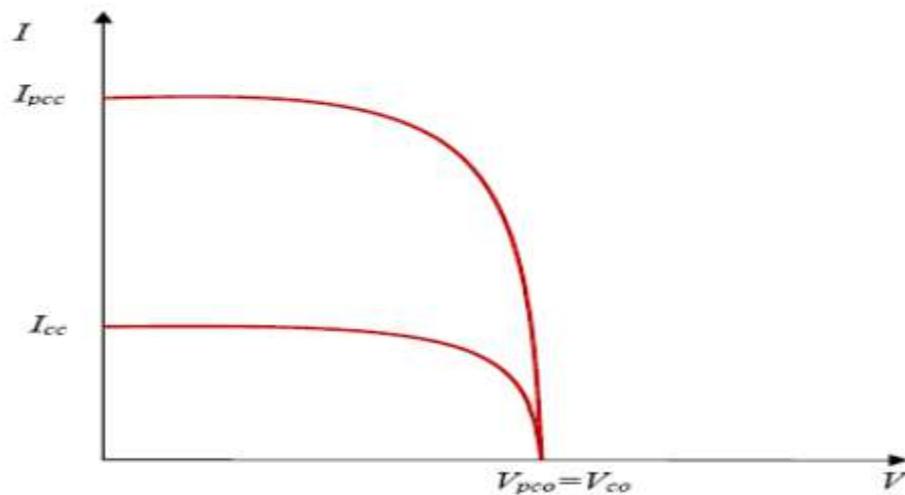


Figure I.24 : Caractéristique résultante d'un groupement en parallèle

Le générateur photovoltaïque est constitué d'un réseau série-parallèle de nombreux modules photovoltaïques regroupés par panneaux photovoltaïques. La caractéristique électrique globale courant/tension du GPV se déduit donc théoriquement de la combinaison des caractéristiques des cellules élémentaires supposées identiques qui le composent par deux affinités de rapport n_s parallèlement à l'axe des tensions et de rapport n_p parallèlement à l'axe des courants, n_s et n_p étant respectivement les nombres totaux de cellules en série et en parallèle.

Avec : $I_{gcc} = n_p \cdot I_{cc}$: courant de court-circuit du module résultant.

$V_{gco} = n_s \cdot V_{co}$: tension du circuit ouvert du module résultant.

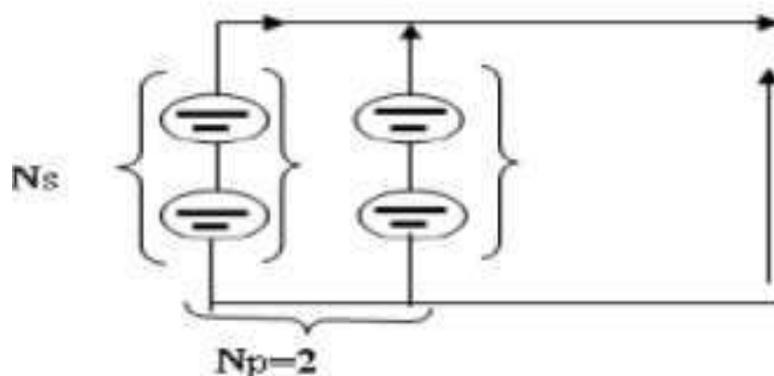


Figure I.25 : Association mixte des modules

Chapitre I : GENERALITES SUR LE SOLAIRE

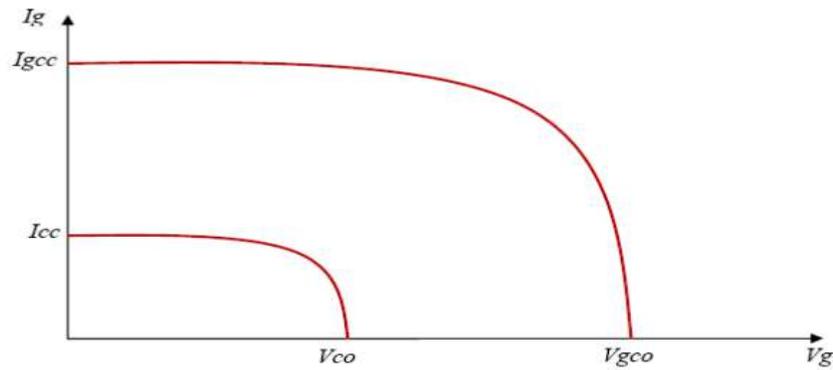


Figure I.26 : Caractéristique résultante d'un groupement mixte[10]

Les générateurs photovoltaïques sont alors réalisés en vue d'augmenter la tension (Groupement en série) ou augmenter le courant (Groupement en parallèle) par l'association d'un grand nombre de cellules élémentaires de même technologie et de caractéristiques identiques. Le câblage série-parallèle est donc utilisé pour obtenir un module PV (ou panneau PV) aux caractéristiques souhaitées (courant et tension suffisants) [10].

e) Influence de la température et de l'éclairement :

Le fonctionnement de la cellule photovoltaïque dépend du niveau d'éclairement solaire et de la température de la cellule. Dans cette partie, nous allons démontrer l'influence du changement des conditions météorologiques sur le courant et la tension générés par le panneau solaire.

- **Influence de l'éclairement :**

La figure (I-9) représente l'influence de l'éclairement sur la caractéristique courant-tension pour une température constante et sur différentes valeurs d'éclairements (200w/m^2 , 400w/m^2 , 600w/m^2 , 800w/m^2 , 1000w/m^2), la courbe des caractéristiques $I(V)$ va présenter cinq allures différentes selon le changement de l'éclairement.

Comme le montre ce graphique, le courant de court-circuit (I_{cc}) croît proportionnellement avec l'éclairement, alors que la tension à vide (V_{co}) varie très peu (environ $0,5\text{ V}$).

Ainsi, plus la couverture nuageuse est importante, plus l'intensité du courant généré sera faible.

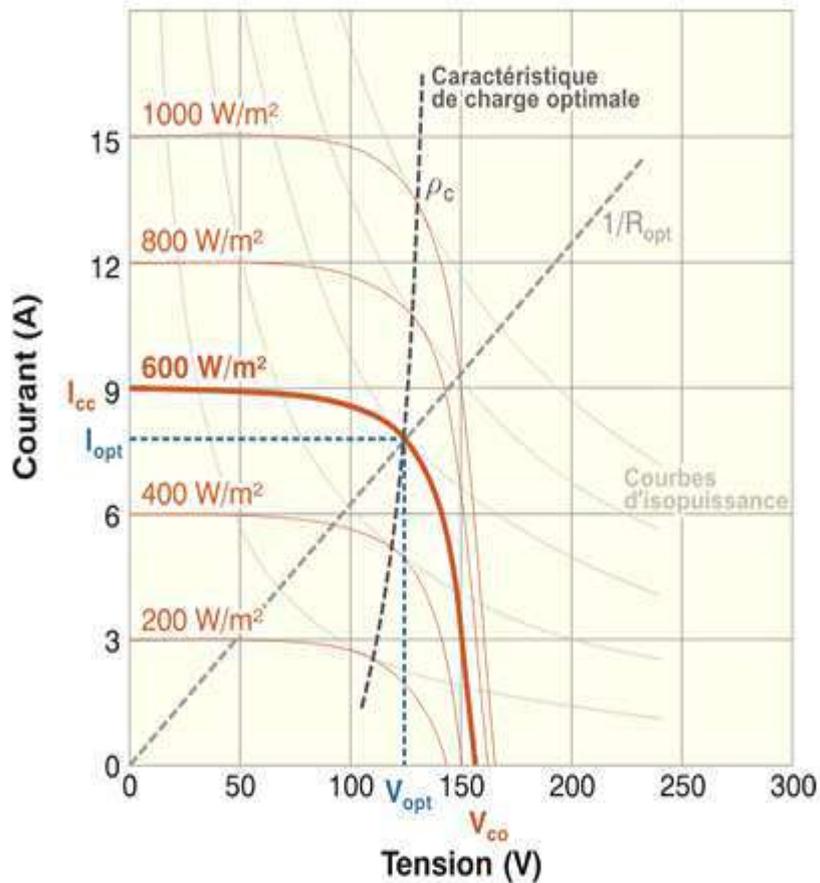


Figure I.27 : l'influence de l'éclairement sur les caractéristiques courant-tension pour une température constante[11]

- **Influence de la température**

La figure (I-9-2) représente l'influence du changement de la température (-75°C , 0°C , 25°C , 50°C , 75°C) sur la caractéristique courant-tension et puissance-tension à un éclairement fixe.

On remarque que lorsque la température augmente la tension de module diminue et lorsqu'elle diminue la tension augmente en outre la relation entre la température et la tension d'un module est inversement proportionnelle, alors que la température a une influence négligeable sur la valeur du courant de module.

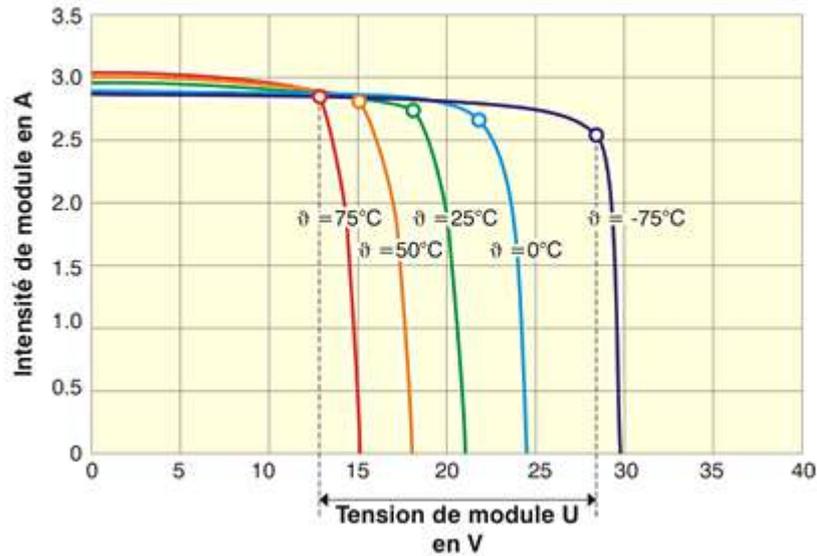


Figure I.28 : l'influence de la température sur les caractéristiques courant-tension pour une température constante [11]

f) Paramètres électriques de la cellule photovoltaïque

On décrit un GPV élémentaire par les paramètres suivants [12] :

- **La puissance crête** : Puissance électrique maximum que peut fournir le module dans les conditions standards (température de 25°C et un éclairement de 1000 W/m²).
- **La tension à vide V_{co}** : Tension aux bornes du module en l'absence de tout courant pour un éclairement « plein soleil ».
- **Le courant de court-circuit I_{cc}** : Courant débité par un module en court -circuit pour un éclairement « plein soleil ».
- **Point de fonctionnement optimal** : (V_{opt} , I_{opt}) : Lorsque la puissance de crête est maximale en plein soleil $P_{opt} = V_{opt} * I_{opt}$.
- **Le rendement η_{pv}** : Rapport de la puissance électrique optimale à la puissance de radiation incidente.
- **Facteur de forme** : Rapport entre la puissance optimale et la puissance maximale que peut avoir la cellule $FF = (V_{opt} * I_{opt}) / (V_{co} * I_{cc})$

Chapitre I : GENERALITES SUR LE SOLAIRE

I.8 Les différents types d'installation Photovoltaïque :

• Les installations autonomes :

Sont des installations non raccordées au réseau, composées de panneaux PV et dont le système de stockage garantit une énergie électrique même en cas de faible éclairage ou d'obscurité, la présence d'un régulateur est nécessaire pour protéger les batteries contre les surcharges et les décharges profondes[13].

Ces installations sont des solutions d'un point de vue technique et financier pour les installations isolées, car elles peuvent remplacer des ensembles moteur-générateur. Par ailleurs, dans une configuration autonome, le champ PV est surdimensionné de sorte que l'alimentation de charge ainsi que la recharge des batteries de stockage puissent être garanties avec une certaine marge de sécurité en prenant compte les jours à faible ensoleillement.

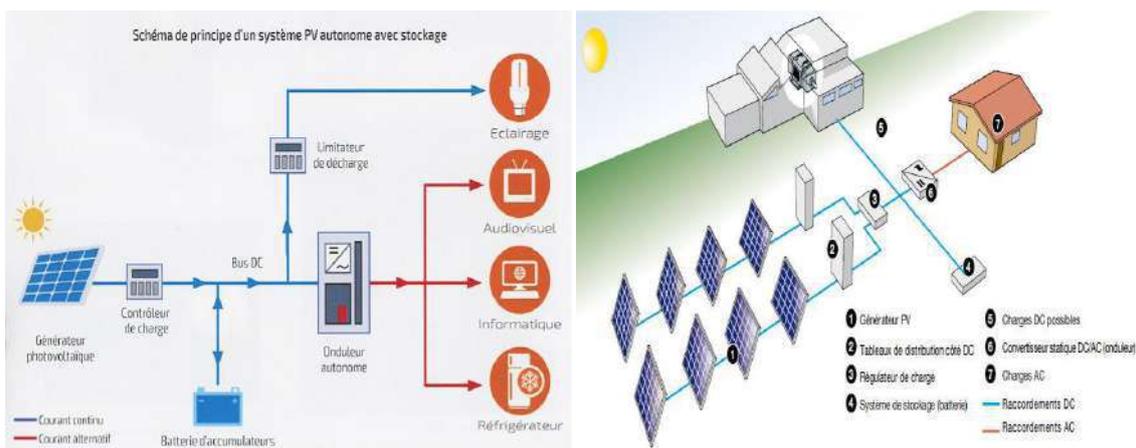


Figure I.29 : Installation photovoltaïque autonome [13]

• Installations raccordées au réseau :

Les installations photovoltaïques sont raccordées au réseau électrique grâce à un onduleur, qui convertit le courant continu d'origine photovoltaïque et courant alternatif. L'électricité produite est directement utilisée par la charge ou injectée dans le réseau électrique. Ce système nécessite un compteur spécial car de l'électricité est réinjectée vers le réseau. On utilise donc des compteurs réversibles.

Chapitre I : GENERALITES SUR LE SOLAIRE

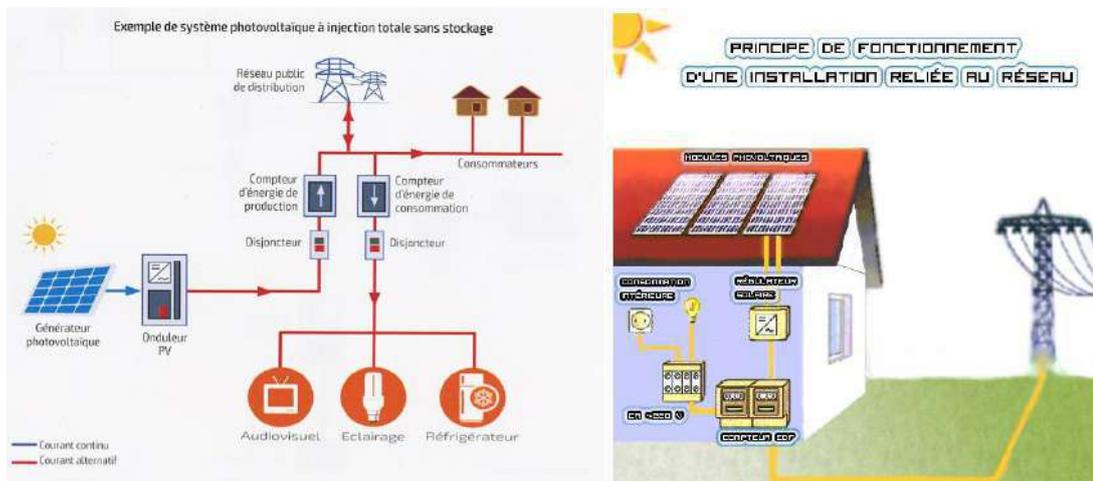


Figure I.30 : Installation photovoltaïque raccordé au réseau [13]

I.9 Conclusion :

L'étude des systèmes photovoltaïques et le principe d'exploitation de l'énergie solaire étant été abordé lors de ce chapitre nous allons nous intéresser à leur optimisation, pour cela nous nous proposons par la suite d'effectuer un programme afin d'assurer une meilleure d'exploitation efficace et très sophistiqué.

Chapitre II :
TECHNIQUE MPPT
AVEC NEURONE-
FLOUE ANFIS

Chapitre II : TECHNIQUE MPPT AVEC NEURONE-FLOUE ANFIS

II.1 Introduction:

Dans un souci de protection du matériel mais aussi d'optimisation de l'apport énergétique, la connexion directe d'un générateur photovoltaïque et la charge n'est pas envisageable, présentant plusieurs inconvénients et n'offre aucun type de limitation ou de réglage de la tension. Généralement on parle d'un écart important entre la puissance potentielle du générateur et celle réellement transférée à la charge

L'introduction d'une interface s'impose en assurant à travers une action de contrôle, pour que la puissance fournie par le générateur soit plus proche de P_{max} Disponible. Cet étage d'adaptation utilisé est un convertisseur statique (convertisseur de puissance DC/DC) commandé afin d'effectuer soit survolteur ou dévolteur en fonction de la charge à alimenter.

Dans ce chapitre nous allons présenter les algorithmes de la commande MPPT la technique que nous avons choisie. [14]

II.2 Contrôleur de charge (régulateur) :

C'est l'élément central du système photovoltaïque, complètement autonome, qui réalise toutes les opérations de mesure correction de la charge de manière automatique, il protège la batterie pour qu'elle ait une durée de vie meilleure, ce qui est important, car cette dernière est très inférieure à celle des panneaux solaires.



Figure II.1 : illustration d'un régulateur solaire

II.3. les types des régulateurs de charge :

Au début de l'usage du photovoltaïque, deux grandes familles de régulateurs étaient utilisées : les modèles « shunts » et les modèles « série », reposant sur le même fondement : les modules photovoltaïques peuvent fonctionner sans que leur électricité soit utilisée, ce qui est pratique lorsque les batteries sont pleines.

Chapitre II : TECHNIQUE MPPT AVEC NEURONE-FLOUE ANFIS

- la méthode shunt (court-circuiter le module)
- la méthode série (ouvrir le circuit)

Grâce aux microprocesseurs de nombreux modèles de régulateurs sont fabriqués. Les plus simples se contentent d'assurer une fonction anti-surcharge (obstacle au courant inverse, protection des modules, contrôle de la température). Ou les plus sophistiqués proposent par exemple d'enregistrer des données, compensation de la température, mesurer la charge de la batterie ou même connexion par fil ou à distance (wifi par exemple) [15].

1-Le régulateur de charge shunt :

La figure (II-4) montre une structure shunt d'un régulateur solaire, le régulateur shunt contrôle la charge de la batterie en court-circuitant le module photovoltaïque sans aucun risque.

Tous les régulateurs shunt exigent la présence d'une diode anti-retour en série entre la batterie et l'élément shunt afin d'empêcher le court-circuit de la batterie.

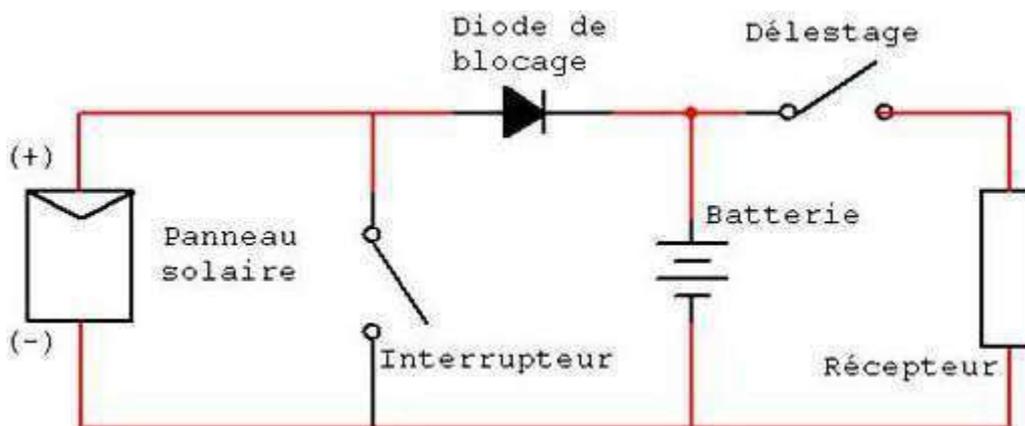


Figure II.4 : Conception de Régulateur de charge de type shunt [16]

Typiquement le régulateur shunt peut fonctionner selon deux techniques de contrôle :

- **La première technique Le régulateur série « tout ou rien » :**

Le courant du panneau solaire est envoyé dans un interrupteur en parallèle avec la batterie lorsque celle-ci atteint sa pleine charge.

- **La deuxième technique Le régulateur shunt linéaire**

Ce type de régulateur maintient une tension constante aux bornes des batteries lorsqu'elles atteignent leur pleine charge, cela garantit la charge totale des batteries, mais c'est que la puissance non utilisée est dissipée par un transistor.

Chapitre II : TECHNIQUE MPPT AVEC NEURONE-FLOUE ANFIS

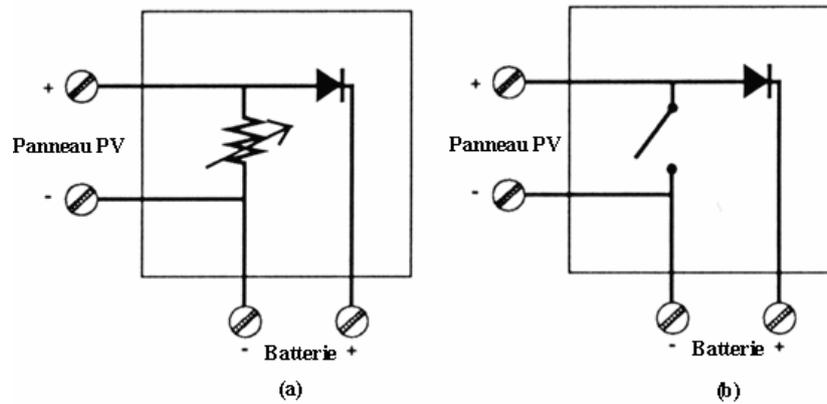


Figure II.5 : principe de fonctionnement d'un régulateur de type shunt

2-Le régulateur de charge série :

La figure (II-6) montre une structure électrique typique d'un contrôleur série.

Ce type de régulateur est très répandu et a supplanté le régulateur shunt. L'interrupteur de charge est ici en série avec les batteries et il s'ouvre lorsque la fin de charge est atteinte, c'est que le relais peut être commutant en laissant passer le courant vers un autre récepteur.

Cette propriété permet d'utiliser la totalité de la puissance solaire en alimentant un récepteur auxiliaire (ventilation, pompage, chauffage en pays froid).

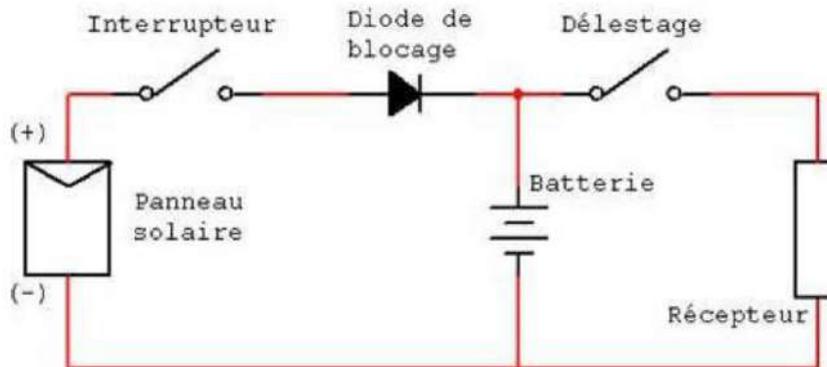


Figure II.6 : Conception de Régulateur de charge de type série [16]

3- Regulation PWM (Pulse With Modulation):

Le régulateur connecte directement le panneau solaire à la batterie, il est composé d'un interrupteur électronique fonctionnant en MLI (Modulation de Largeur d'Impulsion) et d'un dispositif anti-retour (diode).

4-Régulateur MPPT (Maximum Power Point Tracking) :

Cette nouvelle technologie permet de tirer les meilleures performances des panneaux solaires photovoltaïques de 15% à 30 % d'énergie en plus, ainsi il peut adapter la tension délivrée par le panneau à celle que les batteries solaires peuvent absorber.

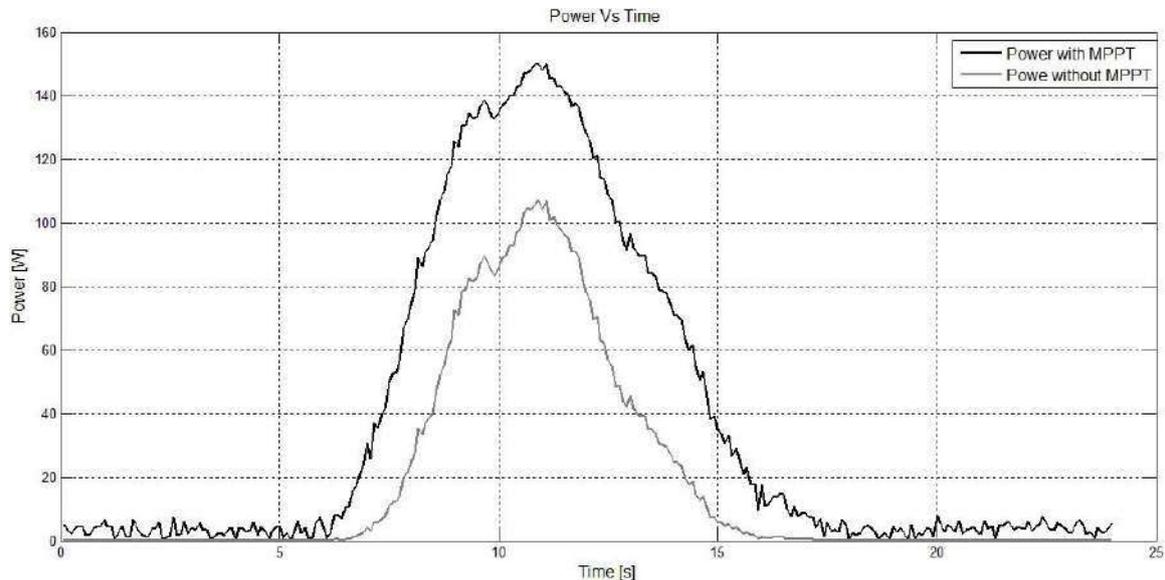


Figure II.7 : Courbe de puissance pour module PV avec MPPT et sans MPPT. [17]

La figure (II-8) représente une chaîne élémentaire typique de conversion photovoltaïque associée à une commande MPPT fournissant une puissance électrique à une charge DC.

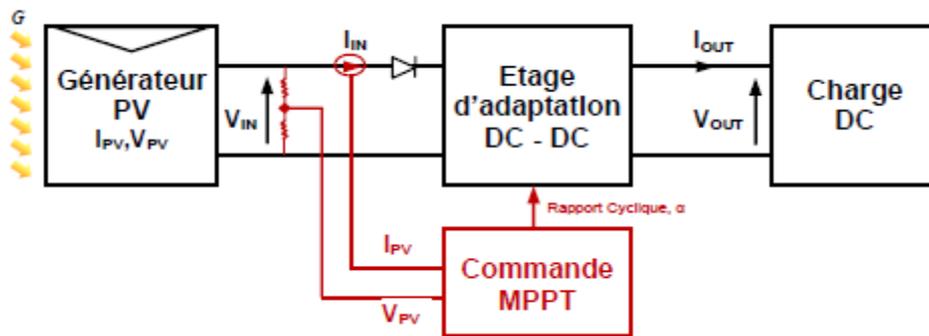


Figure II.8 : Schématisation d'une chaîne élémentaire de conversion photovoltaïque. [16]

Comme le montre cette chaîne, la commande MPPT est nécessairement associée à un quadripôle (convertisseur statique) possédant un à plusieurs degrés de liberté en fonction de sa structure, permettant d'adapter à chaque instant l'impédance du GPV à celle de la charge.

II.4. Caractéristiques du régulateur MPPT:

Le régulateur de charge est composé d'un convertisseur DC/DC à découpage de haut rendement qui assure trois fonctions :

- Détection de la puissance maximale du champ photovoltaïque tant que la batterie n'est pas chargée.
- Conversion DC/DC.
- Régulation de la tension de sortie en fonction de la phase de charge (Buck, Absorption et Floating)
- Lorsque la tension batterie est inférieure à la tension de régulation, le régulateur fait fonctionner le générateur photovoltaïque à puissance maximale et transfère cette puissance à la sortie.

Remarque :

Le convertisseur DC/DC est utilisé comme abaisseur de tension. Ce qui signifie que la tension MPP du générateur photovoltaïque doit toujours être supérieure à la tension batterie.

Suivant le type de perturbation, le point de fonctionnement bascule du point de puissance maximal noté PPM1 vers un nouveau point de fonctionnement noté P'1, plus ou moins éloigné de l'optimum [18].

Pour une variation d'ensoleillement (cas a), il suffit de réajuster la valeur du rapport cyclique pour converger vers le nouveau point de puissance maximum qui correspond à PPM2. Pour une variation de charge (cas b), impliquant une nouvelle caractéristique de la charge, on peut également constater qu'une modification du point de fonctionnement est nécessaire pour rechercher une nouvelle position optimale grâce à la recherche d'un nouveau rapport cyclique.

Un autre cas de variation de point de fonctionnement peut se produire, lié par exemple aux variations de température de fonctionnement du GPV (cas c).

Bien qu'il faille également agir au niveau de la commande en imposant un autre niveau de rapport cyclique, ce dernier n'a pas les mêmes contraintes temporelles que les deux cas précédents et n'implique aucune contrainte de dimensionnement de la commande.

Chapitre II : TECHNIQUE MPPT AVEC NEURONE-FLOUE ANFIS

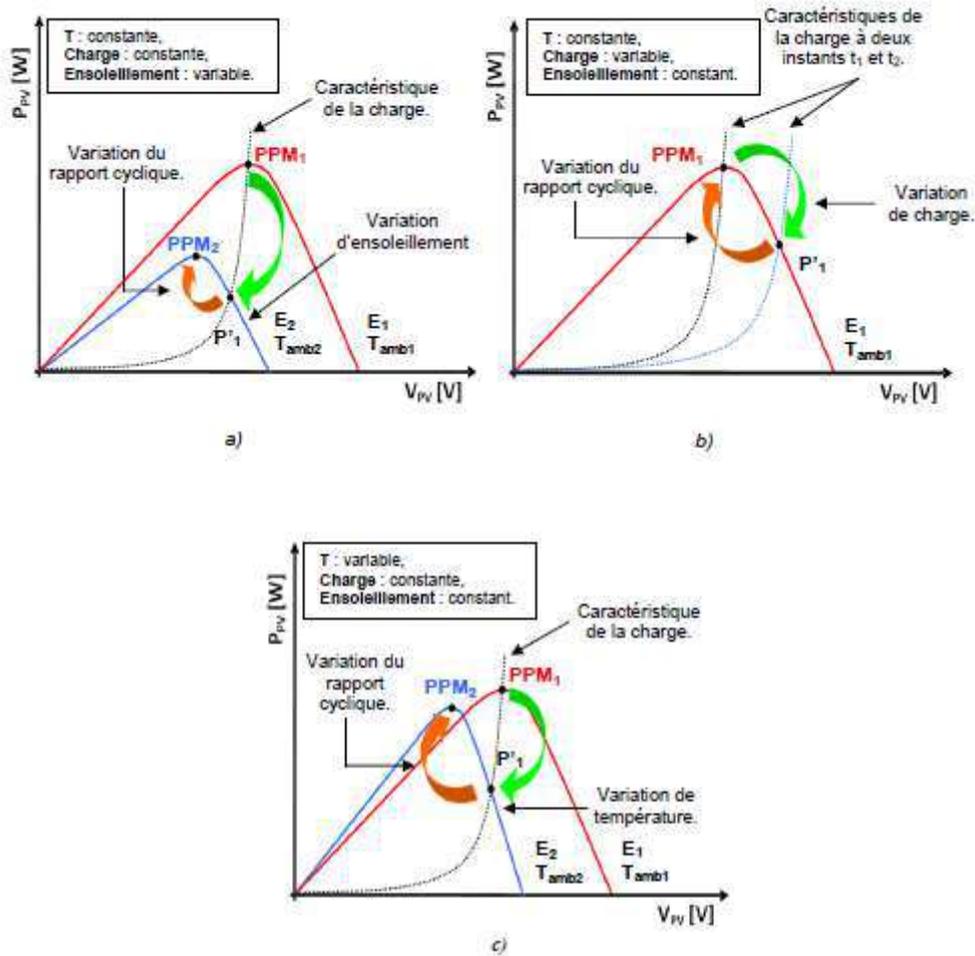


Figure II.9 : Recherche et recouvrement du Point de Puissance Maximal, a) suite à une variation d'ensoleillement au niveau du GPV, b) suite à une variation de consommation de charge, c) suite à une variation de température au niveau du GPV[18].

4.2 Partie électronique de puissance :

4.2.1 Convertisseurs statiques :

Un convertisseur statique est un système permettant d'adapter la source d'énergie électrique à un récepteur donnée, dans les systèmes photovoltaïques on le trouve soit entre le champ photovoltaïque et la charge (sans stockage avec charge en continu, il portera le nom de convertisseur continu/continu ou hacheur), soit entre la batterie et la charge (il sera alors appelé onduleur ou convertisseur continu alternatif).

Chapitre II : TECHNIQUE MPPT AVEC NEURONE-FLOUE ANFIS

4.2.2 Convertisseur Continu Alternatif

Un onduleur est un dispositif d'électronique de puissance permettant de générer des tensions et des courants alternatifs à partir d'une source d'énergie électrique de tension ou de fréquence différente.

4.2.3 Convertisseurs continus-continu

L'hacheur est un dispositif de l'électronique de puissance mettant en oeuvre un ou plusieurs interrupteurs électroniques commandés qui permet d'alimenter une charge sous une tension continue réglable, à partir d'une source de tension continue constante avec un rendement élevé, présentant la partie essentielle dans le dispositif de commande d'un générateur photovoltaïque.

Le tableau (II-1) donne les différents types des convertisseurs DC-DC. Les trois premiers sont les plus fondamentaux, ils sont largement utilisés à cause de leur faible complexité.

Type	Fonction	Inductance	Interrupteur de puissance	Dio de	Transformateur	Complexité
<i>Buck</i>	Abaisseur	Oui	1	1	Non	Faible
<i>Boost</i>	Elévateur	Oui	1	1	Non	Faible
<i>Buck - boost</i>	Elévateur Abaisseur	Oui	1	1	Non	Faible
<i>Flyback</i>	Elévateur Abaisseur	Non	1	1	Oui	Moyenne
<i>Half forward</i>	Elévateur Abaisseur	Oui	1	1	Oui	Moyenne
<i>Push pull</i>	Elévateur Abaisseur	Oui	2	2	Oui	Forte
<i>Demi pont</i>	Elévateur Abaisseur	Oui	2	4	Oui	Forte
<i>pont</i>	Elévateur Abaisseur	Oui	4	4	Oui	Très forte

Tableau (II-1) : les différents types de convertisseurs DC = DC [18]

4.2.4 Convertisseur Boost :

Un convertisseur Boost ou élévateur comme son nom l'indique sert à la conversion d'une tension continue en une autre tension continue de valeur supérieure il se compose essentiellement d'un interrupteur à base de matériau semi-conducteur placé en parallèle avec la source de type continue, d'une diode D, une inductance et un condensateur,

La figure (III-5-2) montre le schéma équivalent d'un hacheur parallèle.

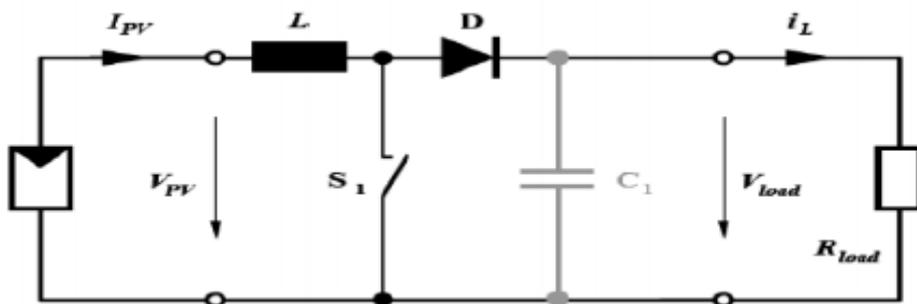


Figure II.10 : schéma représentatif d'un hacheur boost [16]

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{V_e}{L}$$

(15)

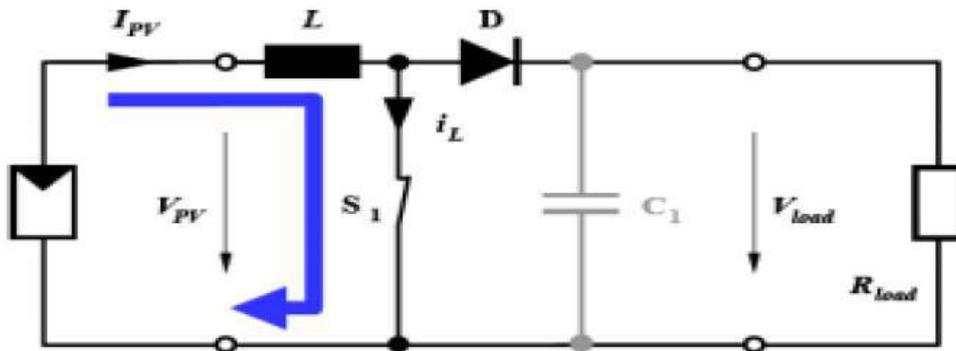


Figure II.11 : Convertisseur Boost durant l'état ON[16]

Phase deux du fonctionnement :

A l'instant $t = \alpha T$

L'interrupteur est ouvert, l'inductance se trouve alors en série avec le générateur, le Courant i_L traversant l'inductance, la diode D, le condensateur C et la charge.

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{V_e - V_s}{L} \quad (16)$$

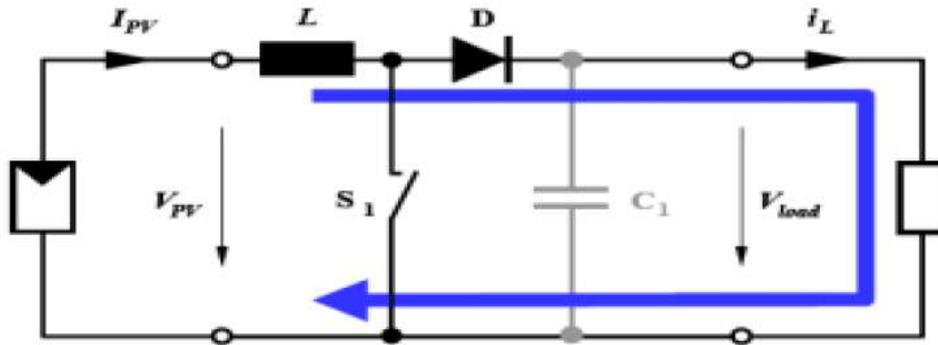


Figure II.12 : Convertisseur Boost durant l'état OFF [16]

La valeur moyenne de la tension de sortie V_s est donnée par l'équation (III.3).

$$V_s = \frac{1}{(1-\alpha)} V_e \quad (17)$$

Le rapport cyclique α est entre 0 et 1 donc la tension de sortie est supérieure à la tension d'entrée.

4.2.5 Convertisseur Buck

Un convertisseur Buck ou dévolteur comme son nom l'indique sert à la conversion d'une tension continue en une autre tension continue de valeur moyenne inférieure. Ce type de convertisseur peut être utilisé comme adaptateur source-charge lorsque le point de fonctionnement en couplage direct est éloigné du MPP. Il est composé essentiellement d'un interrupteur à base de matériau semi-conducteur (IGBT, MOSFET, GTO. etc.) placé en série avec la source de type continue et d'une diode de roue libre pour assurer la continuité du courant en cas d'absence d'alimentation. La figure (II-13.) montre le schéma équivalent d'un hacheur type série.

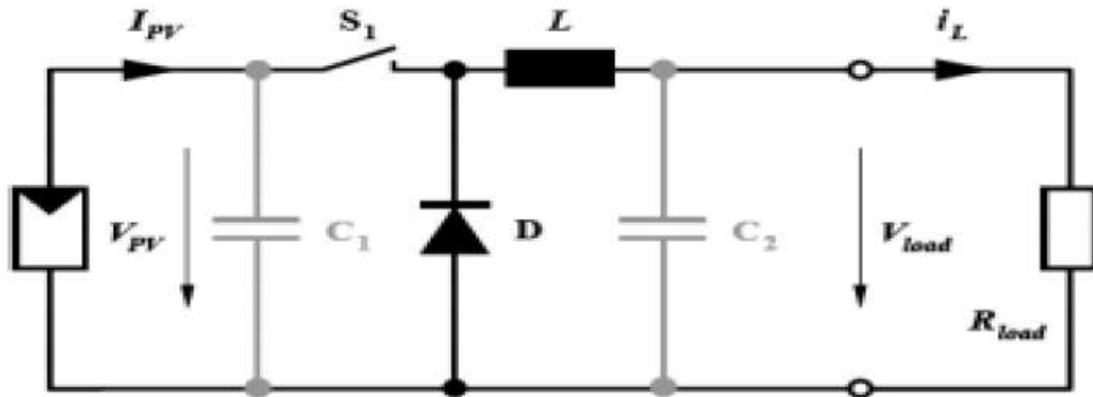


Figure II.13 : schéma représentatif d'un convertisseur Buck [16]

4.3 Partie commandes (Technique de la commande MPPT) :

Le point où l'annulation de la dérivée par rapport à une variable donnée est la définition mathématique de l'optimum d'une fonction, les algorithmes de calcul du point de puissance maximum consultés se basent sur ce principe-là.

Les algorithmes MPPT

- 1- Algorithme perturbation et observation (P&O).
- 2- Algorithme incrémental de la conductance (INC).
- 3- Algorithme à Base de la Mesure d'une Fraction de la Tension Voc (FCO)
- 4- Algorithme à Base de la Mesure d'une Fraction du Courant Icc(FCC)
- 5- Algorithme à Base de la Logique Floue

Les techniques MPPT de base

Les techniques Hill Climbing/Perturb et Observe sont couramment utilisées comme techniques MPPT et disponibles pratiquement en raison de sa simplicité et de ses résultats convaincants [44-49].

Les techniques Hill Climbing

Dans le HC, la valeur de puissance est calculée en mesurant V_{pv} et I_{pv} à intervalles fixes. Après cela, l'incrément de puissance est calculé comme cette équation ($\Delta P = P(K) - P(k-1)$) à chaque instant d'échantillonnage. Ensuite, selon son signe, le rapport cyclique peut

Chapitre II : TECHNIQUE MPPT AVEC NEURONE-FLOUE ANFIS

être incrémenté ou décrémenté avec un pas fixe en fonction des valeurs calculées V_{pv} et P_{pv} jusqu'à atteindre le MPP.

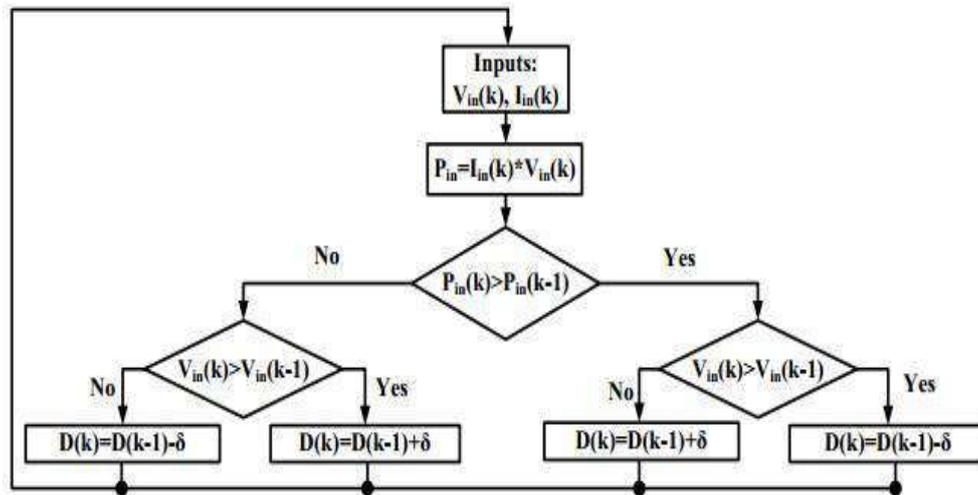


Figure II-14 : Organigramme de la méthode HC [19]

Les techniques Perturb et Observe

Même principe dans la méthode P&O, mais après avoir calculé la puissance du panneau à travers la tension et le courant mesurés du panneau, l'incrément et le décrément se produisent dans la tension de référence. Qui est ensuite converti en une valeur de cycle de service pour atteindre le point de puissance maximal.

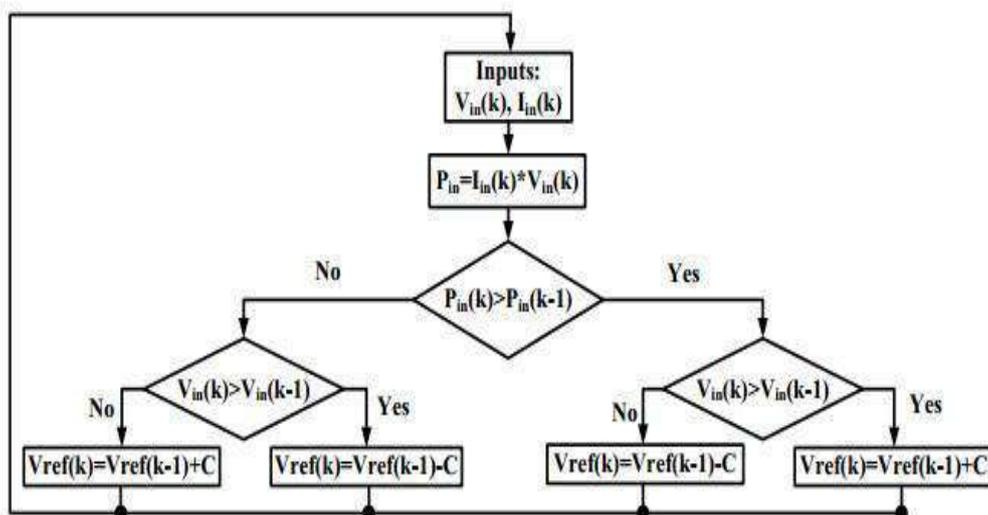


Figure II-15 : Organigramme de la méthode P&O [19]

Fonctionnement des méthodes HC et P&O

Dans Figure.(II-16), si le point de fonctionnement initial était au point 1, alors il est déplacé au point 2. Par conséquent, la puissance au point 2 est supérieure à la puissance au point 1, mais la tension au point 2 est inférieure à la tension au point 1, donc l'action du contrôleur MPPT diminue la tension de référence avec un pas fixe (augmente le rapport cyclique).

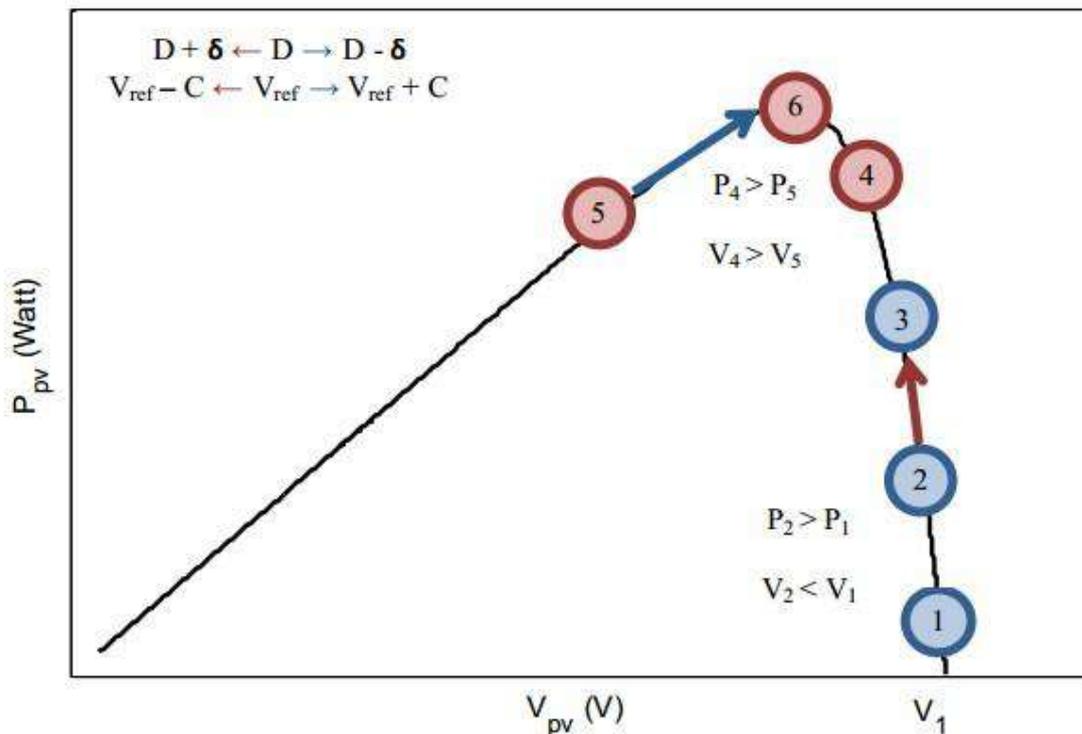


Figure II-16 : Fonctionnement des méthodes HC et P&O [20]

Cette étape amènera le point d'opération à gauche du point maximum. Maintenant, il a atteint le point 4 et continue de diminuer dans la tension de référence. Si la taille du pas est grande, le point de fonctionnement peut dépasser le point maximum jusqu'à atteindre le point 5. Au point 5, la valeur de la puissance est inférieure à la puissance au point 4 et la tension au point 5 est également inférieure à la tension en point 4 donc, la tension de référence est augmentée (le rapport cyclique diminué). Cette action a déplacé le point d'opération sur le

Chapitre II : TECHNIQUE MPPT AVEC NEURONE-FLOUE ANFIS

côté droit de MPP. Ensuite, le processus se répète et le point de fonctionnement oscille autour du MPP. Les inconvénients de ces méthodes sont que l'oscillation de tension autour du MPP qui est considérée comme des pertes de puissance et en cas de changement rapide des conditions météorologiques, la réponse est très lente. [20]

Les techniques conductance incrémentielle (InCond)

Dans une méthode de conductance incrémentielle (InCond) [50], a été présentée. Cette méthode a éliminé l'oscillation autour du point de puissance maximale (MPP) par le changement des conditions environnementales dans la méthode P&O en comparant la conductance instantanée du panneau (courant divisé par la tension) avec la conductance incrémentale du panneau (la dérivée du courant divisée par la dérivée de Tension). Cette méthode est meilleure que les autres car elle est facile à mettre en œuvre, une bonne efficacité et une vitesse de suivi élevée. Les améliorations existantes dans la littérature de cette méthode se concentrent sur la modification de la taille du pas de l'algorithme. Cependant, la grande complexité de la méthode nécessite une précision d'échantillonnage élevée et une vitesse de contrôle rapide, ce qui peut entraîner un système à coût élevé.

Il existe une méthode appelée tension en circuit ouvert et courant de court-circuit [51]. Cette méthode est la plus simple des techniques MPPT. Cela dépend du rapport entre la valeur de puissance maximale et la tension en circuit ouvert ou le courant de court-circuit est approximativement une dépendance linéaire pour le changement du rayonnement solaire et de la température. Ainsi, pour mettre en œuvre la tension en circuit ouvert, vous devez garder à l'esprit que le rapport de la tension de puissance maximale (V_{mp}) et de la tension en circuit ouvert (V_{oc}) est approximativement linéairement proportionnel dans des conditions météorologiques variables.

Chapitre II : TECHNIQUE MPPT AVEC NEURONE-FLOUE ANFIS

Même principe pour le courant de court-circuit le rapport du courant de puissance maximum (I_{mp}) et le courant de court-circuit (I_{sc}) sont linéairement proportionnels. En raison de cette méthode utilise l'approximation, la puissance produite à partir du PV est inférieure à la puissance réelle et un autre inconvénient de la tension en circuit ouvert lorsque mesurée la tension en circuit ouvert, il faut déconnecter la charge et cela provoque la dissipation de puissance.

Les techniques MPPT de base sur intelligence artificiel

Ces dernières années, certains algorithmes évolutifs (EA) [21] et techniques d'intelligence artificielle (AIT) comme le réseau neuronal artificiel (ANN) et la logique floue ont été exposés pour traiter ces problèmes car ils ont la capacité de traiter fonctions objectives non linéaires. Quelques exemples sur l'algorithme évolutionnaire, la recherche Tabou, l'évolution différentielle, la programmation évolutionnaire, l'optimisation de la nage des particules et l'algorithme génétique ont été expliqués. Les résultats de ces techniques montrent qu'elles peuvent améliorer la réponse du MPPT lorsqu'elles sont utilisées avec les méthodes traditionnelles [21].

la technique du réseau de neurones artificiels (ANN)

Dans [22] est proposée la technique du réseau de neurones artificiels (ANN). Cette méthode a la capacité de traiter les équations non linéaires et les paramètres contrôlés par différentes conditions météorologiques. ANN peut mapper les fonctions non linéaires d'entrée-sortie en tant que réseaux de neurones à plusieurs niveaux, c'est donc bien dans le système non linéaire. La Figure.8 explique la technique NN. La tension du panneau photovoltaïque, le courant et un autre paramètre (comme l'irradiation et la température) sont mesurés. Ces valeurs sont l'entrée du contrôleur NN. La sortie du contrôleur NN est une référence de tension qui est convertie en un rapport cyclique. Ensuite, en utilisant ce cycle de

Chapitre II : TECHNIQUE MPPT AVEC NEURONE-FLOUE ANFIS

service pour contrôler le convertisseur DC-DC pour modifier le transfert de puissance et obtenir le point de puissance maximum du panneau PV à ces valeurs mesurées. NN est plus stable que les autres méthodes mais il fonctionne comme une boîte noire qui limite leur utilisation dans MPPT. Étant donné que la caractéristique du générateur photovoltaïque est modifiée avec le temps, un système d'inférence neuro-flou adaptatif (ANFIS) est proposé. L'ANFIS est une technique adaptative, elle peut donc faire face à toute modification des paramètres. C'est une combinaison du modèle flou de Sugeno et de NN [61].

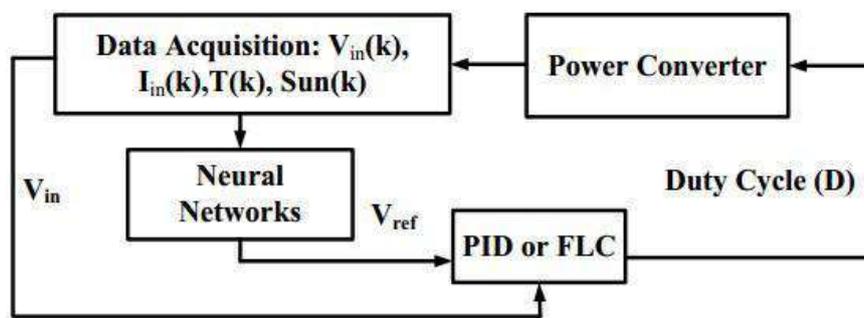


Figure II-17: Schéma fonctionnel de la méthode NN [22]

La technique logique floue

Maintenant, la plupart des recherches parlent du système d'inférence floue (FIS) [23]. La sortie de cette méthode est ajustée au rapport cyclique (dD) et contrôlée. FIS est un algorithme qui corrèle l'entrée pour une sortie spécifique. Dans cette méthode, l'entrée est représentée par une autre formule pour la gérer. Il a donc une variable d'entrée, une fonction d'appartenance et des règles linguistiques pour obtenir la sortie. Les contrôleurs FIS ont une erreur et un changement d'erreur comme variables d'entrée. Ceux-ci représentent la pente et le changement de pente de la courbe P-V. Pour notre système MPPT, la tension et le courant du panneau sont mesurés, puis la puissance est calculée. Après cela, nous pouvons calculer l'erreur (E) et le changement d'erreur (CE) pour devenir une entrée pour notre système flou et la sortie du système flou est le rapport cyclique (dD). Le problème est que le cycle de service

Chapitre II : TECHNIQUE MPPT AVEC NEURONE-FLOUE ANFIS

n'est pas considéré comme une entrée, ce qui signifie que le point de fonctionnement peut s'éloigner du MPP d'origine dans les conditions atmosphériques variables [23].

A partir de la référence [23], des MPPT basés sur des contrôleurs à logique floue ont été présentés. Logique floue utilisée pour modifier les méthodes P&O et Hill Climb. La méthode floue a un avantage car elle n'a pas besoin de modèle mathématique et utilise des entrées inexacts. Dans [24], le flou modifié et l'entrée de la commande floue sont devenus la variation du réseau de tension et de courant (réseau de puissance) et le rapport cyclique (dD). Ici, le comportement dynamique est amélioré dans des conditions ambiantes changeantes, mais cette méthode a ajouté l'oscillation en régime permanent dans la sortie PV qui provoque la perte de puissance. Dans Ref [24], une méthode modifiée a été proposée ; il était composé de l'intégration des deux dernières méthodes dans [24]. Les entrées sont maintenant au nombre de trois ; la dérivée de la puissance sur la dérivée du courant du réseau, le changement de cette dérivée et la variation du rapport cyclique. Un réseau cognitif flou a été présenté dans Ref [24]. Dans cette méthode, le temps nécessaire pour atteindre le MMP est réduit. Mais l'inconvénient, il fallait connecter un interrupteur supplémentaire en parallèle avec le système PV et un capteur de courant pour calculer le courant de court-circuit. Cela rend la mise en œuvre difficile.

Contrôleur MPPT proposé

ANFIS comme Réseau neuronal (NN), il se compose de couches et ces couches sont liées entre elles pour donner les sorties appropriées en apprenant les données. Dans ANFIS, les couches sont liées entre elles à l'aide du système d'inférence floue (FIS). L'ANFIS diffère du réseau de neurones par le nombre d'entrées et de sorties. ANFIS a une limitation aux données d'entrée et de sortie. Il n'y a que deux entrées (X & Y) et une sortie (F). Le système ANFIS utilisant le système d'inférence de Sugeno qui se compose de deux parties, la partie antécédente (partie SI) et la partie conséquente (partie ALORS). La figure 20 illustre une

Chapitre II : TECHNIQUE MPPT AVEC NEURONE-FLOUE ANFIS

architecture ANFIS simple. X&Y sont l'entrée pour l'ANFIS. Ces entrées doivent être floutées en utilisant les fonctions d'appartenance A1, A2 et B1, B2 [76].

Dans le système d'inférence de Sugeno, la règle peut être écrite sous cette forme :

$$\text{Si } X \text{ est à } A1 \text{ et } Y \text{ est à } B1 \text{ alors } f1 = p1x + q1y + r1 \quad (18)$$

$$\text{Si } X \text{ est à } A2 \text{ et } Y \text{ est à } B2 \text{ alors } f2 = p2x + q2y + r2 \quad (19)$$

La structure ANFIS a cinq couches comme le montre la figure 20 et la partie suivante pour parler de chaque couche en détail.

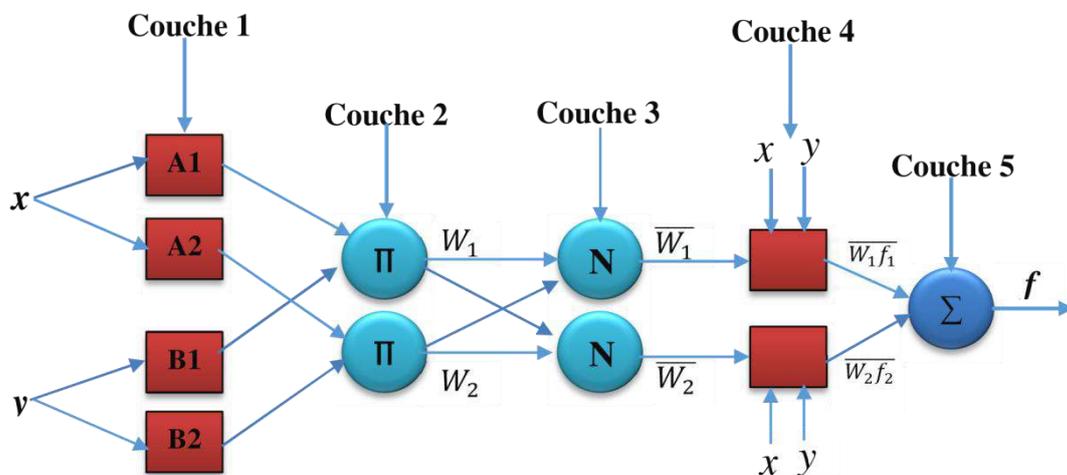


Figure II-18: Architecture ANFIS [25]

Couche 1 (Fuzzification) :

Cette couche est utilisée pour flouter les données d'entrée en utilisant les fonctions d'appartenance. Le nombre de nœuds dépend du nombre de fonctions d'appartenance utilisées. Il peut s'agir de trois, cinq ou sept nœuds. Les nœuds de cette couche peuvent être appelés nœuds adaptatifs car ils peuvent être modifiés. La sortie de ces nœuds peut être donnée comme :

$$O_{1,i} = \mu_{A_i}(x) \quad \text{for } i = 1,2 \quad (20)$$

$$O_{1,i} = \mu_{B_{i-2}}(x) \quad \text{for } i = 3,4 \quad (21)$$

Chapitre II : TECHNIQUE MPPT AVEC NEURONE-FLOUE ANFIS

Où, X représente la valeur d'entrée qui est une valeur nette, μ est la fonction d'appartenance et O_1, i est la valeur d'appartenance pour deux entrées. Les indices 1 et i représentent le numéro de couche et le numéro de nœud. La forme triangulaire la forme trapézoïdale et la forme gaussienne peuvent être utilisées pour représenter les μ (fonctions d'appartenance). Habituellement, la forme de cloche est la célèbre utilisée et peut être donnée par:

$$\mu(x) = \frac{1}{1 + |x - a_{ici}|^{2b_i}} \quad (22)$$

Où a_i, b_i et c_i sont la limite de la fonction d'appartenance et ils sont déterminés par le processus de formation.

Couche 2 (les règles floues) :

Dans cette couche, la sortie de chaque nœud de la couche 1 sera l'entrée du nœud de la couche 2. Ainsi, les nœuds de cette couche peuvent être appelés nœuds fixes. Chaque nœud de la couche 2 multiplie tous les signaux provenant des nœuds de la couche 1 et le produit effectue la sortie du nœud. Cette sortie représente la force d'une règle de Sugeno et cela peut être représenté comme :

$$O_{2,i} = w_i = \mu A_i(x) \mu B_i(y) \quad \text{for } i = 1, 2 \quad (23)$$

Couche 3 (Normalisation):

Dans cette couche, les valeurs provenant de la couche 2 sont normalisées. Chaque sortie de la couche 2 est divisée par la somme de toutes les sorties des nœuds de la couche 2 et nous pouvons décrire le nœud comme un nœud fixe. Il

$$O_{3,i} = \bar{w}_i = \frac{w_i}{w_1 + w_2} \quad \text{for } i = 1, 2 \quad (24)$$

Chapitre II : TECHNIQUE MPPT AVEC NEURONE-FLOUE ANFIS

Couche 4 (conséquence):

Dans cette couche, la valeur des paramètres de la fonction linéaire de sortie est déterminée par le processus d'apprentissage (p,q et r). Le nœud ici décrit comme nœud adaptatif et donné par :

$$O_4 = \bar{w}_i f_i = \bar{w}_i (p_i x + q_i y + r_i) \quad \text{for} \quad i = 1,2 \quad (25)$$

Où p_i , q_i et r_i sont les paramètres conséquents.

Couche 5 (sommation) :

Dans cette couche, il n'y a qu'un seul nœud. Ce nœud additionne toutes les valeurs provenant des nœuds de la couche 4 et donne la sortie finale. Il peut être décrit comme un nœud fixe et donné par :

$$O_5 = \sum w_i f_i = \frac{\sum w_i f_i}{\sum w_i} \quad \text{for} \quad i = 1,2 \quad (26)$$

Processus de formation (algorithme d'apprentissage) :

ANFIS peut prédire la sortie correcte si les paramètres sont optimisés et adaptés de manière correcte. Le processus de formation est donc important. Dans ce processus, l'ANFIS utilise les ensembles de données d'apprentissage pour déterminer ces paramètres et les optimiser pour s'assurer que l'ANFIS peut fonctionner avec une grande précision. La règle du système d'inférence de Sugeno peut être divisée en deux parties, la première est constituée des paramètres non linéaire s'appelés paramètres de prémisse et des paramètres linéaires ou paramètres de règle s'appelés paramètres conséquents [25].

Chapitre II : TECHNIQUE MPPT AVEC NEURONE-FLOUE ANFIS

Ce sont de nombreux algorithmes d'apprentissage qui sont proposés et développés par les chercheurs. Dans ce travail, une méthode d'apprentissage hybride est utilisée. On estime les paramètres ANFIS appropriés en utilisant la méthode de rétro propagation (BP) et la méthode d'estimation des moindres carrés (LSE) [26].

Donc, il y a des paramètres de prémisse et des paramètres conséquents. Ces paramètres doivent être déterminés tout au long du processus d'apprentissage. LSE est appliqué, pendant que les paramètres de prémisse ne sont pas modifiés et les paramètres conséquents sont calculés. Cela peut être appelé la méthode d'apprentissage de la pas seavant. Ensuite, la méthode de rétro propagation est appliquée, pendant laquelle les paramètres conséquents ne sont pas modifiés et les paramètres de prémisse sont calculés. Cela peut être appelé l'algorithme de passe en arrière.

Dans le processus d'apprentissage, il existe deux données de sortie, l'une provenant de l'ensemble de données d'apprentissage et l'autre étant la sortie prévue pendant le processus d'apprentissage. LSE calcule l'erreur entre ces sorties les paramètres de conséquence sont modifiés et adaptés par cette erreur calculée. La même chose est appliquée dans le passage arrière, l'erreur entre les deux sorties est calculée et utilisée dans la méthode de descente de gradient de propagation arrière pour mettre à jour les paramètres de prémisse.

Contrôleur MPPT utilisant ANFIS

Les techniques MPPT peuvent être classées en deux catégories dans la littérature : les techniques MPPT de base et les techniques d'intelligence artificielle. En raison du comportement non linéaire des caractéristiques de sortie du panneau photovoltaïque, les méthodes d'intelligence artificielle sont plus utiles pour améliorer l'efficacité du contrôleur MPPT par rapport aux techniques de base. En logique floue, il est facile de traiter les équations non linéaires. Il convertit les termes linguistiques en valeurs numériques et les

Chapitre II : TECHNIQUE MPPT AVEC NEURONE-FLOUE ANFIS

valeurs numériques en termes linguistiques à l'aide de fonctions d'appartenance. Le réseau de neurone mappe les équations non linéaires d'entrée et de sortie tant que réseaux de neurones à plusieurs niveaux, il est donc bon dans le système non linéaire. Mais cela fonctionne comme une boîte noire et n'a pas la nature heuristique. L'ANFIS vient faire un système hybride combiné à partir du principe de logique floue et de la carte du réseau de neurones pour réduire les inconvénients et la difficulté et intégrer les avantages. Dans le contrôleur ANFIS, il est nécessaire de disposer d'une donnée d'entraînement. Ces données d'entraînement dépendent du système qui est intégré à l'ANFIS. Dans notre système, le contrôleur ANFIS est connecté au panneau photovoltaïque. Ainsi, les données d'entrée de sortie peuvent être obtenues à partir du modèle PV qui est expliqué au début de ce chapitre.

Les paramètres d'entraînement sont :

- N_{MAX} : nombre de points de données d'entraînement.
- T_{MIN} : Température minimale.
- T_{MAX} : Température maximale
- G_{MIN} : Irradiation minimale
- G_{MAX} : Irradiation maximale.

Où, T_{MIN} et T_{MAX} : le minimum et le maximum de la température du panneau PV, G_{MIN} et G_{MAX} : le minimum et le maximum pour les valeurs d'irradiation au même endroit où le PV est installé. La figure 22 montre l'organigramme du processus de génération des données d'apprentissage à l'aide du MPPT basé sur ANFIS [27].

Maintenant, la façon de générer les données d'entraînement est connue. Ces ensembles de données d'entraînement sont générés dans des conditions de fonctionnement aléatoires avec une plage spécifiée. Il contient donc toutes les situations possibles qui peuvent se produire au cours de la journée. Après cela, la tension qui reçoit la puissance maximale dans ces conditions météorologiques est stockée. Cette valeur de tension peut être déterminée en

Chapitre II : TECHNIQUE MPPT AVEC NEURONE-FLOUE ANFIS

résolvant l'équation non linéaire transcendantale Eq.2 et la technique numérique compétente (méthode de Newton-Raphson). Cette opération est répétée jusqu'à ce que les données d'apprentissage saisies soient terminées. Ensuite, le contrôleur MPPT basé sur ANFIS est prêt à être conçu. [28]

Dans le contrôleur MPPT basé sur ANFIS, l'entrée correspond aux conditions météorologiques (dans notre cas, l'irradiation et la température) et la sortie du contrôleur ANFIS est la référence de tension (V_{ref}). Cette valeur de tension de référence est convertie en une impulsion et cette impulsion a commandé le dispositif de commutation dans le convertisseur DC-DC. Ce commutateur contrôlé force le panneau photovoltaïque à travailler sur des points de fonctionnement spécifiques et maintient la valeur de référence pour obtenir la puissance maximale à ces irradiations et températures. [28]

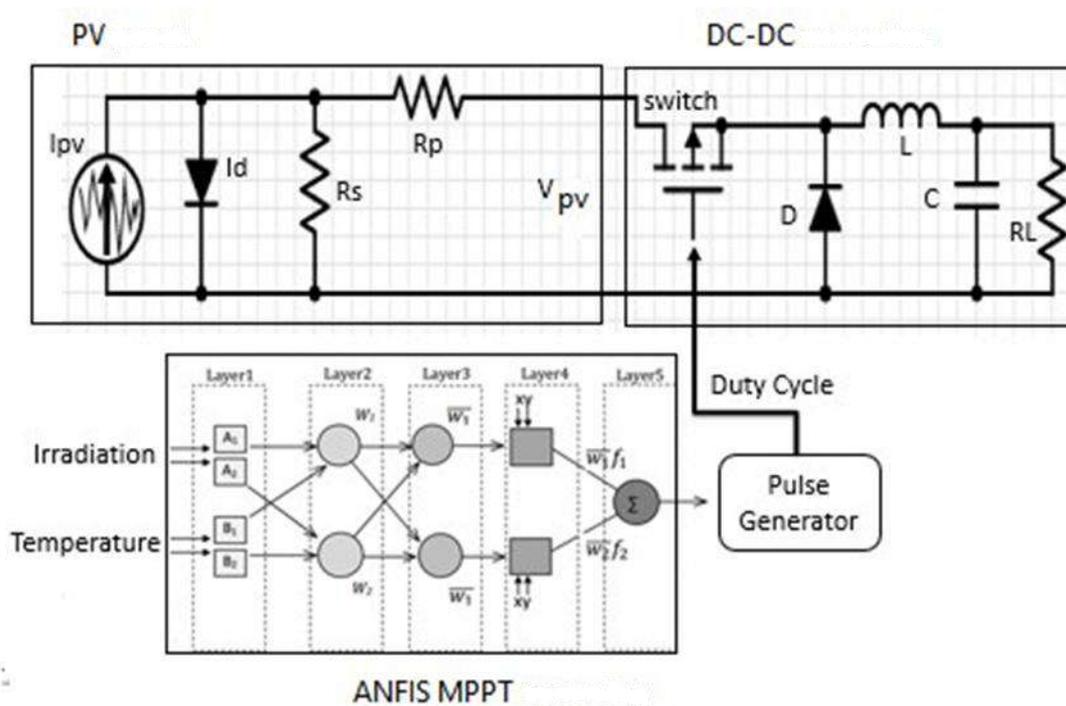


Figure II-19 : Système PV avec contrôleur MPPT

Chapitre II : TECHNIQUE MPPT AVEC NEURONE-FLOUE ANFIS

<i>Algorithmes MPPT</i>	P&O	INC	FCO	FCC	LF
Type de Capteurs utilisés	I Tension I courant	I tension I courant	I tension	I courant	I courant
Identification des paramètres du panneau PV	Non nécessaire	Non nécessaire	Oui nécessaire	Oui nécessaire	Oui nécessaire
Complexité	Basse	Moyenne	Très Basse	Très Basse	Haute
Nombre d'itérations	45	48	35	41	27
Vitesse de convergence	Moyenne	Moyenne	Rapide	Rapide	Très rapide
Précision	95%	98%	94%	94%	99%

Tableau (II -2) : Comparaison Des Techniques MPPT [28]

II.5 CONCLUSION

Dans ce chapitre nous avons mis le point sur la technique MPPT ces différents algorithmes ainsi qu'à leur processus de fonctionnement, nous nous sommes intéressés d'avantage aux convertisseurs régulateurs qui sont indéniablement les pièces maîtresses de notre dispositif.

Chapitre III :
SIMULATION ET
RESULTAT

III.1. Introduction

Nous allons essayer dans ce troisième chapitre de simulé la commande d'un système photovoltaïque, ainsi que le suivi du point de puissance maximale pour une mise en œuvre efficace du système photovoltaïque autonome. Notant que notre contrôleur MPPT est basé sur l'application d'un l'algorithme d'inférence floue neuronale (ANFI). Nous nous proposons de contrôler la commutation d'un convertisseur élévateur DC-DC en utilisant l'approche ANFIS et un contrôleur PI conventionnel. L'ensemble du système proposé a été modélisé et simulé à l'aide du logiciel MATLAB/simulink. Pour finir nous avons comparé les résultats de l'approche proposée à celle de l'approche perturbation et d'observation (P&O) dans des conditions de température et d'irradiation constantes puis variables. [28]

III.2. Système photovoltaïque proposer

Le diagramme de masse totale du système proposé est illustré dans la figure.III.1. Le système proposé se compose d'un générateur photovoltaïque, d'un contrôleur ANFIS et d'un convertisseur survolteur (boost) et de la charge. Notant que le système de production d'énergie photovoltaïque produit différentes tensions pour différentes températures et irradiations. En modifiant la température et la irradiations, un ensemble de données se voie modifier dans la simulation, ces données sont utilisées pour faire l'apprentissage de notre code sur l'ANFIS, à l'aide de la boîte à outils MATLAB, cela dans le but du suivi du point de puissance maximal (MPPT). La tension de sortie du générateur photovoltaïque est amplifiée à l'aide d'un convertisseur survolteur. Cette tension est filtrée à l'aide d'un filtre C pour réduire les tensions harmoniques dans la charge. [29]

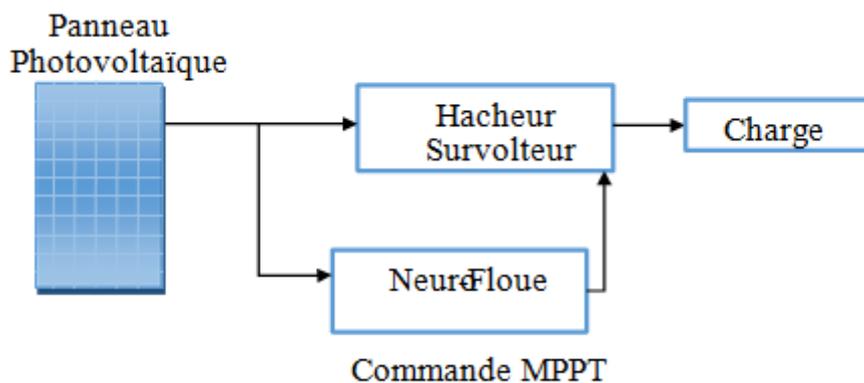


Figure III.1 : Schéma synoptique du système GPV par Neuro-Floue

III.3. Description du système étudié :

Pour réaliser cette simulation, nous avons choisi un groupe des modules photovoltaïques siemens 1STH _250_WH. Les caractéristiques électriques du module photovoltaïque sont données dans le tableau (IV.1):

Puissance maximale P_{max}	250 WC
Courant de court-circuit I_{cc}	8.66 A
Tension de circuit ouvert V_{OC}	37.3 V
Température de coefficient de V_{OC}	-0.36901 V/K
Température de coefficient de I_{CC}	0.086998% A/K
Courant au point de puissance maximum I_{mp} (A)	8.15 A
Tension au point de puissance maximale V_{mp} (V)	30.7 V

Tableau (III.1) : Caractéristiques électriques du module photovoltaïque:

1STH _250_WH[30]

Dans notre cas nous avons utilisé plusieurs modules photovoltaïque, 10 en série et 40 en parallèles a fin d'avoir une puissance globale environs de 100KW, les caractéristiques (P,V) et (V,I) sont montres dans les figures IV.2. et IV.3 suivantes :

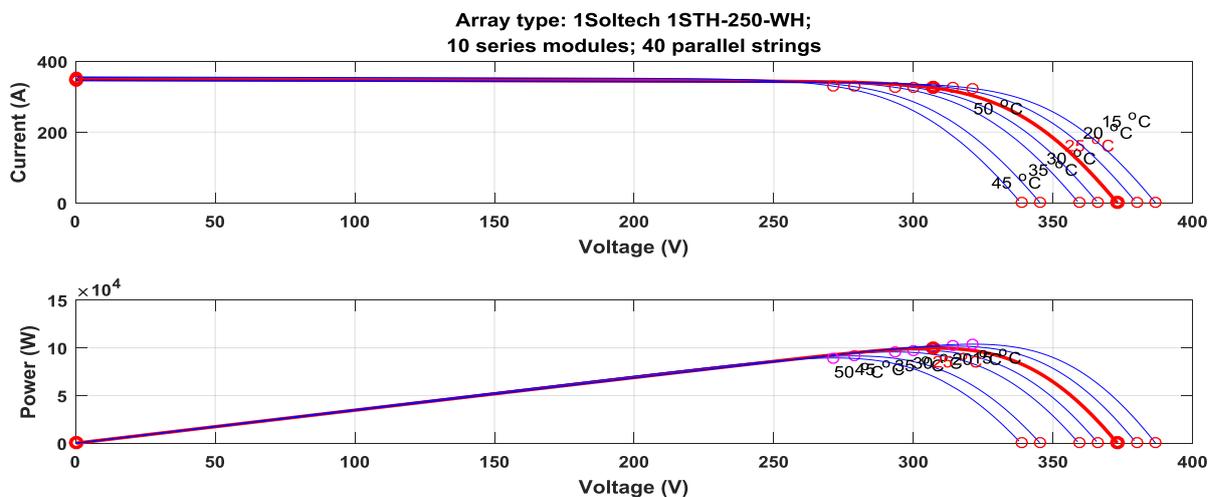


Figure III.2 : courbe courant tension et puissance tension avec variation de la température

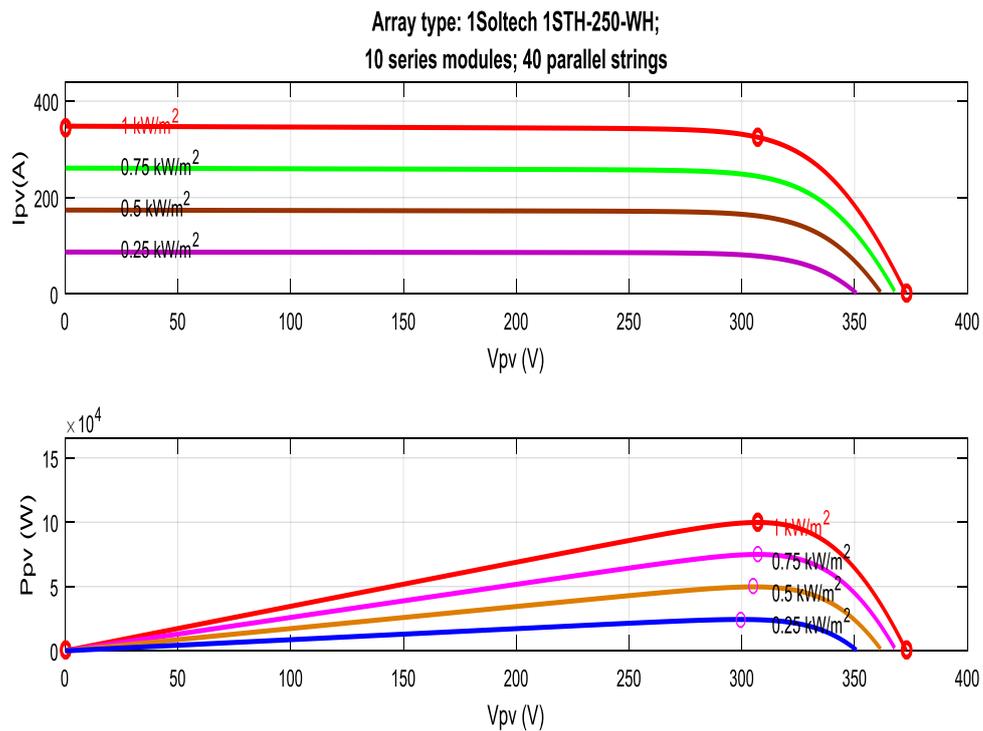


Figure III.3 : courbe courant tension et puissance tension avec variation de l'irradiation

III.4. Structure de la commande MPPT avec Neuro-Floue

Afin d'optimiser l'apport énergétique fournit pas les peaux, plusieurs démarche s'offre a nous, nous avons opté pour une méthode de suivit du point de puissance maximale avec la technique neuro-floue, elle reste parmi les meilleurs systèmes intelligents, elle fait associer la logique floue aux réseaux de neurones cela lui procure une rapidité dans l'exécution et un apprentissage adaptatifs ainsi que la possibilité de vérification instantané.

Cette méthode s'effectue en trois étapes : La création, l'apprentissage et le test, pendant les quelles notre système doit pouvoir évoluer rapidement et efficacement [31].

Les systèmes neuro-floue sont des systèmes dont le raisonnement est le (in-add) est le plus proche de celui de l'être humain, capables de générer des modèles comportementaux à partir des données (règles-entrées) des systèmes dynamique. Dans notre étude nous avons proposé un système réduit à 25 règles.

III.5. Démarche de Création du contrôleur neuro-floue

La création passe par plusieurs étapes sur logiciel Matlab :

1-L'appel de l'interface graphique neuro-floue :

A fin d'appeler le neuro-fuzzy designer nous tapons l'instruction ANFISedit, la fenêtre représenter dans la figure suivante apparaîtra.

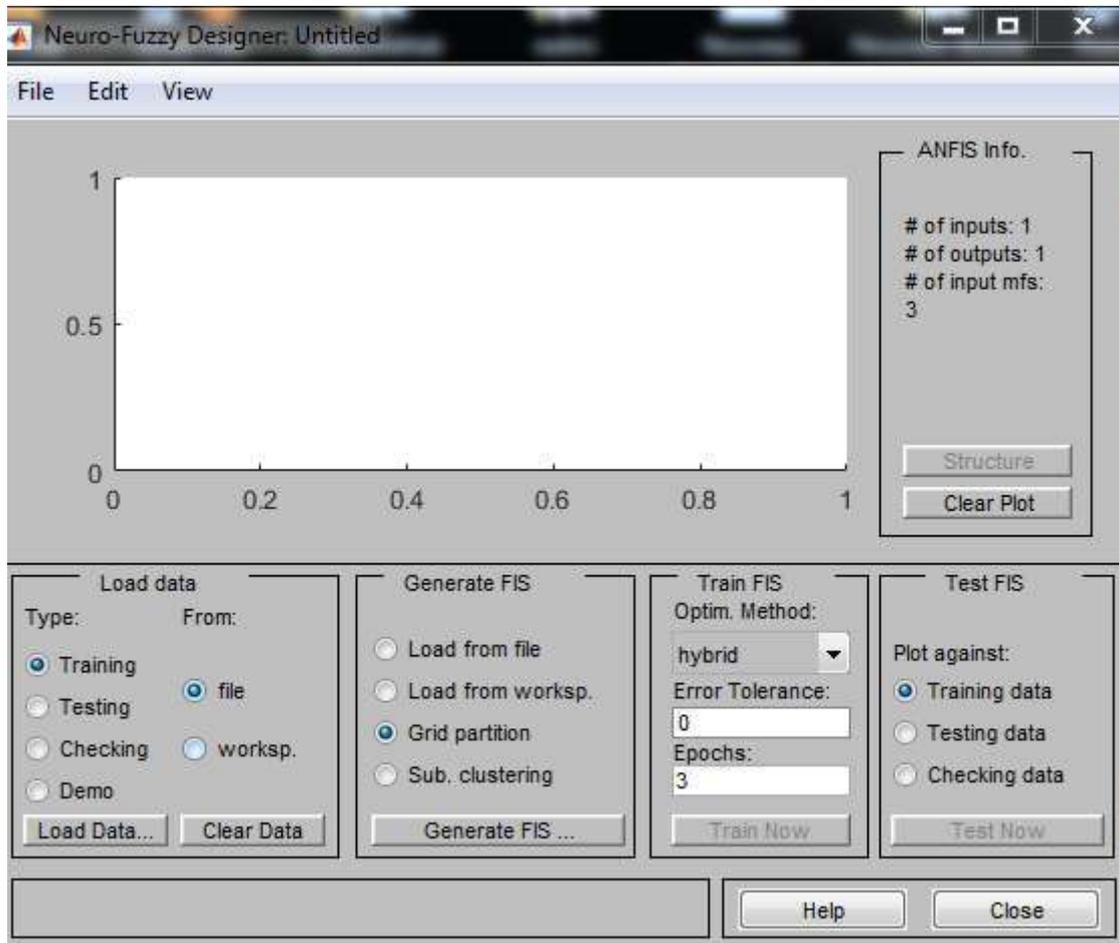


Figure III.4 : l'interface graphique neuro-floue

2-L'étape d'apprentissage

L'apprentissage se fait à l'aide de la boîte à outils Matlab. Le réseau est formé. Dans le processus de formation, les valeurs de ses paramètres pour générer les données sont : $N_{MAX} = 1000$ pour le nombre des itérations, $T_{MAX} = 45^{\circ}C$, $T_{MIN} = 15^{\circ}C$ pour les températures, $G_{MAX} = 1000 W/m^2$ et $G_{MIN} = 0 W/m^2$ pour les radiations. Dans le processus de formation, les données générées doivent couvrir toutes les situations possibles qui peuvent se produire. Après cela, le contrôleur ANFIS est prêt à la conception. Toutes les données

dynamiques requises sont disponibles. Les fonctionnalité de Matlab/Simulink offre la possibilité de développer le contrôleur ANFIS. Comme mentionné précédemment, toutes les données d'entraînement doivent être floues en utilisant les fonctions d'appartenance. Dans notre cas, la fonction en forme de cloche est utilisée et le nombre de fonctions d'appartenance pour chaque entrée est de cinq. Ensuite, la méthode LSE et la méthode de propagation Back [32].

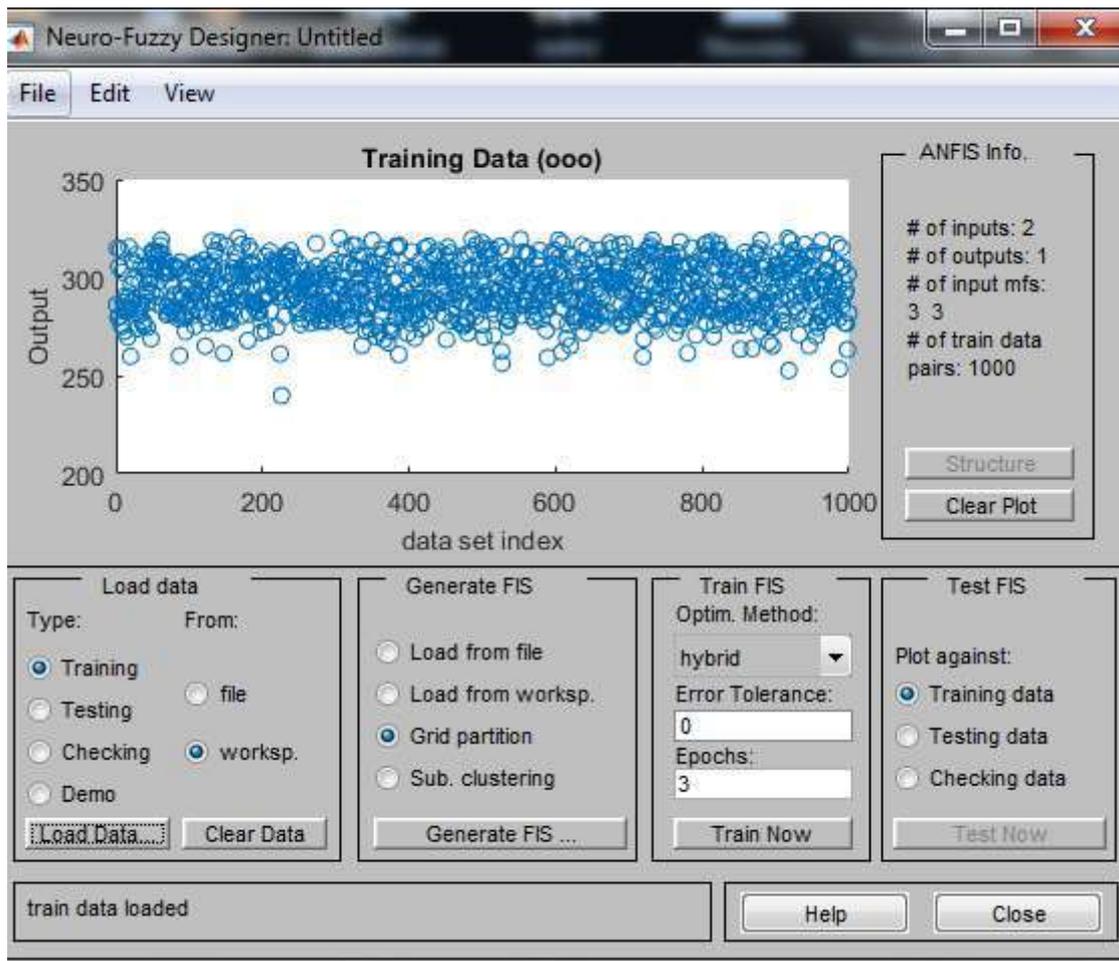


Figure III.5. le processus d'apprentissage neuro-flou sur MATLAB

Nous remarquons qu'ANFIS démarre l'étape de l'entraînement, après avoir fini l'étape de l'apprentissage, aussi nous avons opté pour la méthode des moindres carrés pour estimer les paramètres conséquents et l'algorithme de descente du gradient afin de déterminer les paramètres des prémisses (ajustement des paramètres liés aux fonctions d'appartenances). C'est ce qu'on appelle "apprentissage hybride"

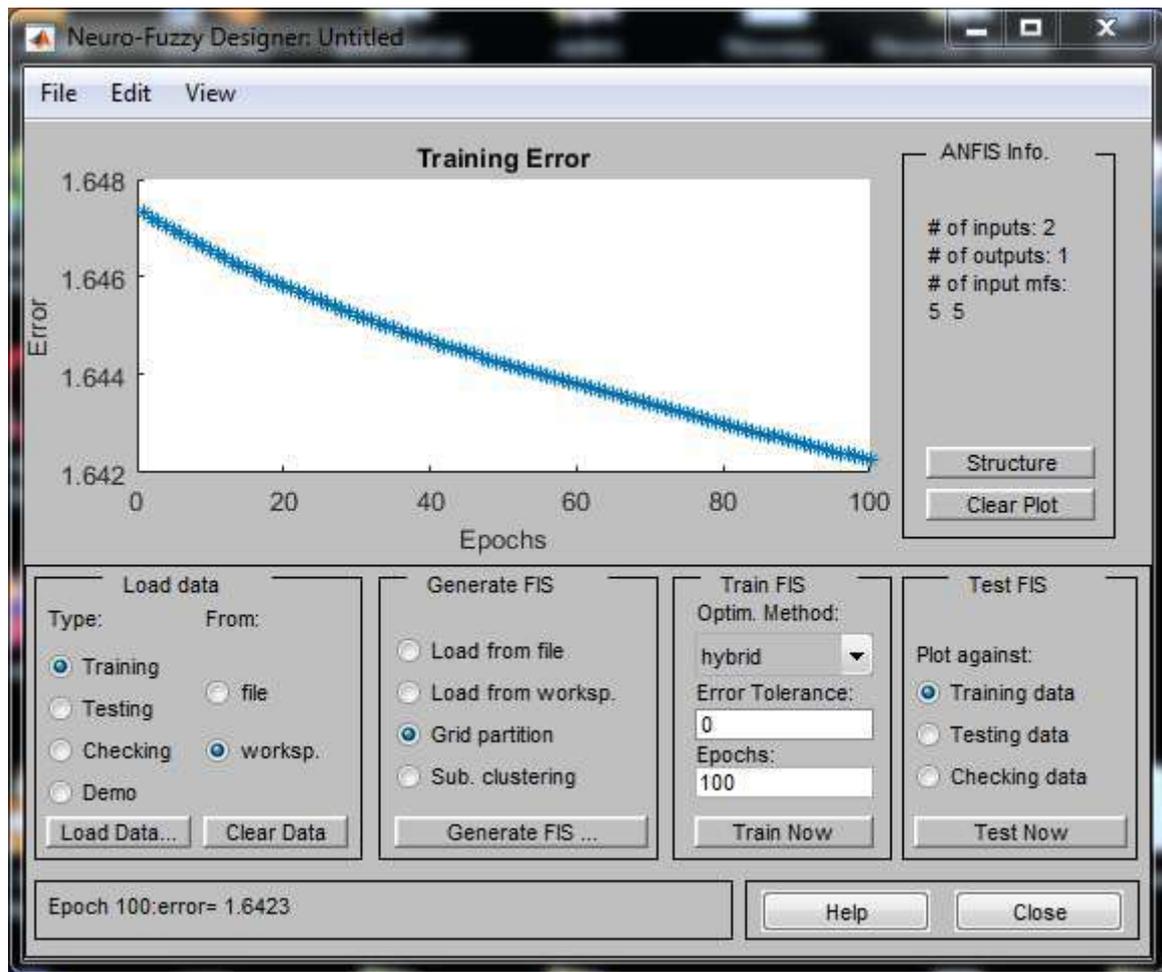


Figure III.6. La forme de la courbe d'apprentissage

Ici ANFIS, test de la capacité de généralisation après apprentissage du système neuro-flou adaptatif (ANFIS), dans notre approche nous nous sommes proposés de tester sa généralisation, en présentant des données de validation (Checking Data).



Figure III.7 : Test de la capacité de généralisation après apprentissage.

3-Configuration de la structure du contrôleur neuro-floue

La structure neuro-floue globale représentée sur la figure III.8 est un réseau à cinq couches. Cette dernière montre deux entrées, l'irradiance solaire et de la température de la cellule, qui sont traduites en fonctions d'appartenance appropriées, cinq fonctions pour l'irradiance solaire et cinq fonctions pour la température. Ces fonctions d'appartenance sont générées par le contrôleur ANFIS sur la base des connaissances préalables obtenues à partir du jeu de données d'apprentissage programme dans notre cas. La forme de la fonction d'appartenance varie au cours de l'étape d'apprentissage et la forme finale obtenue après l'achèvement de l'apprentissage est illustrée sur les Fig III.10 et III.11.

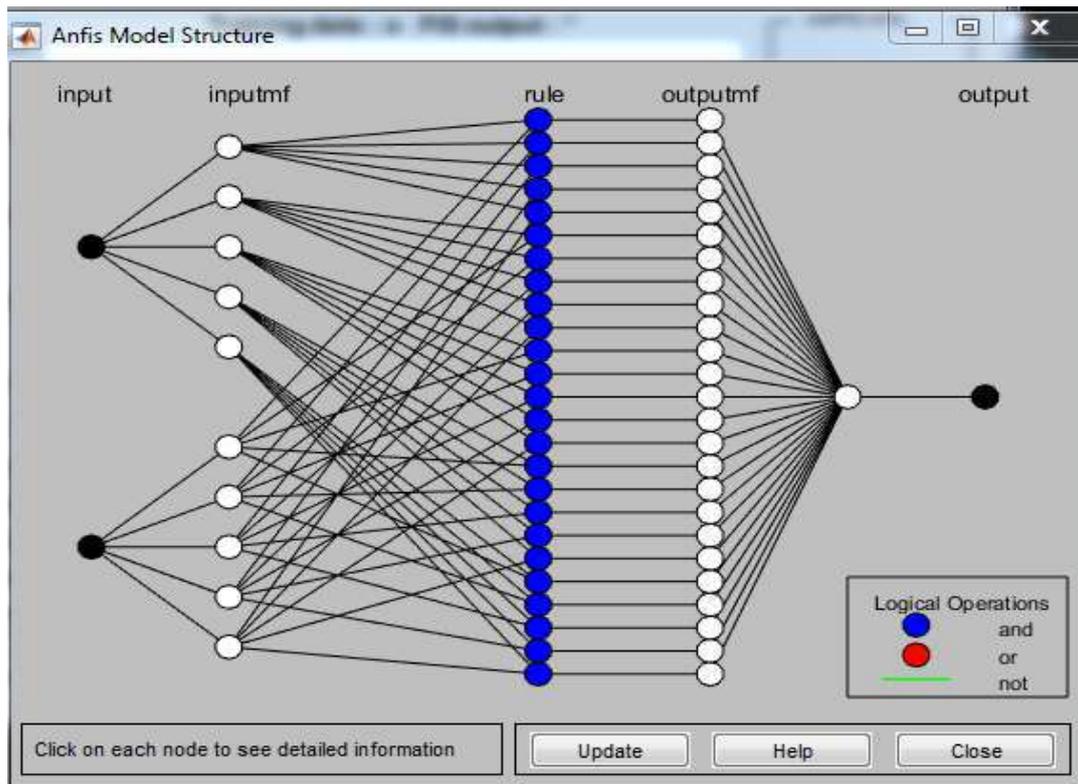


Figure III.8 : structure neuro-floue sur ANFIS.

4-Vérification concrète du système crée :

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

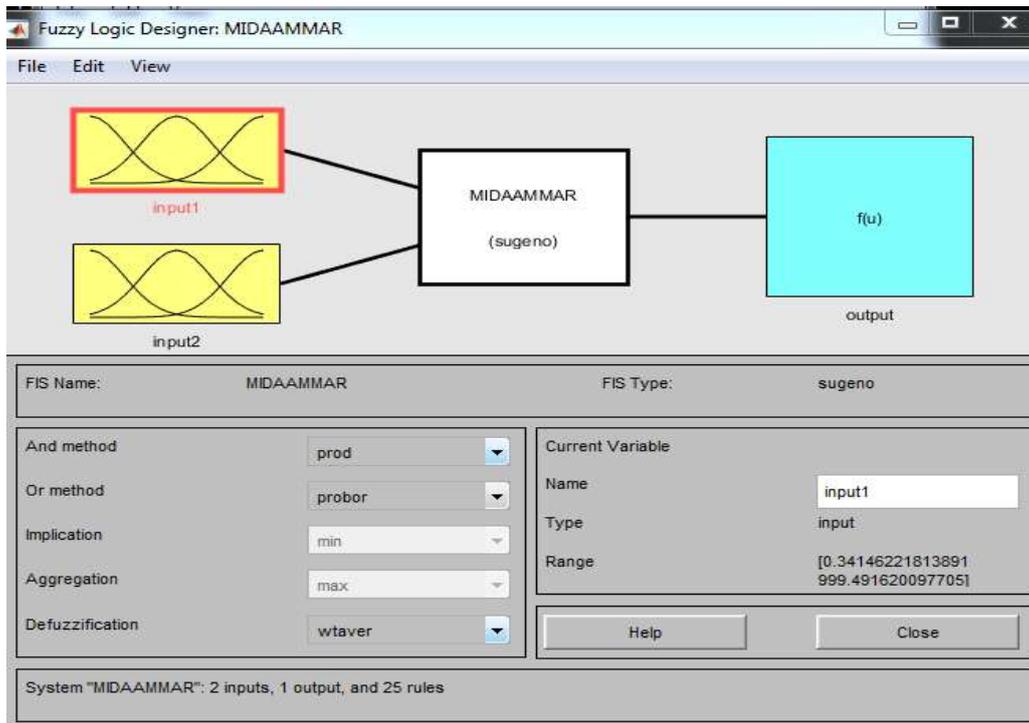


Figure III.9 : fenêtre de l'interface graphique floue.

5-Visualisation des entrées des fonctions d'appartenance

Le plus souvent, on utilise pour les fonctions d'appartenance des formes trapézoïdales ou triangulaires. Ils s'agissent des formes les plus simples, composées par morceaux de droites. L'allure est complètement définie par trois points a , b et c pour la forme triangulaire et quatre points a , b , c et d pour la forme trapézoïdale

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

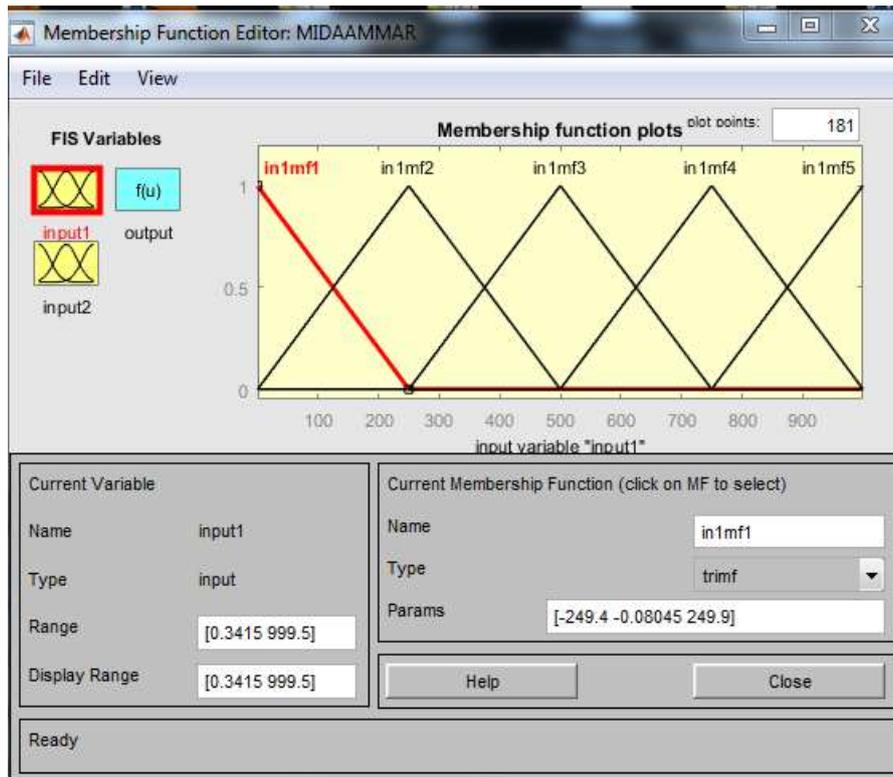


Figure III.10: Fonction d'appartenance de l'irradiance solaire

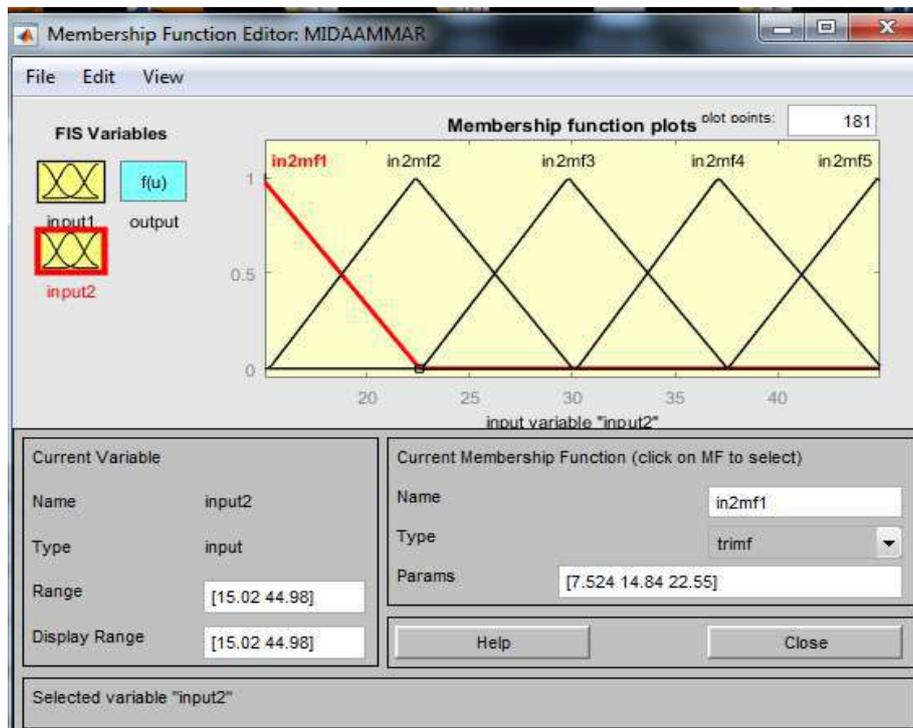


Figure III.11. Fonction d'appartenance de la température de la cellule PV

La sortie est donnée sur la figure :

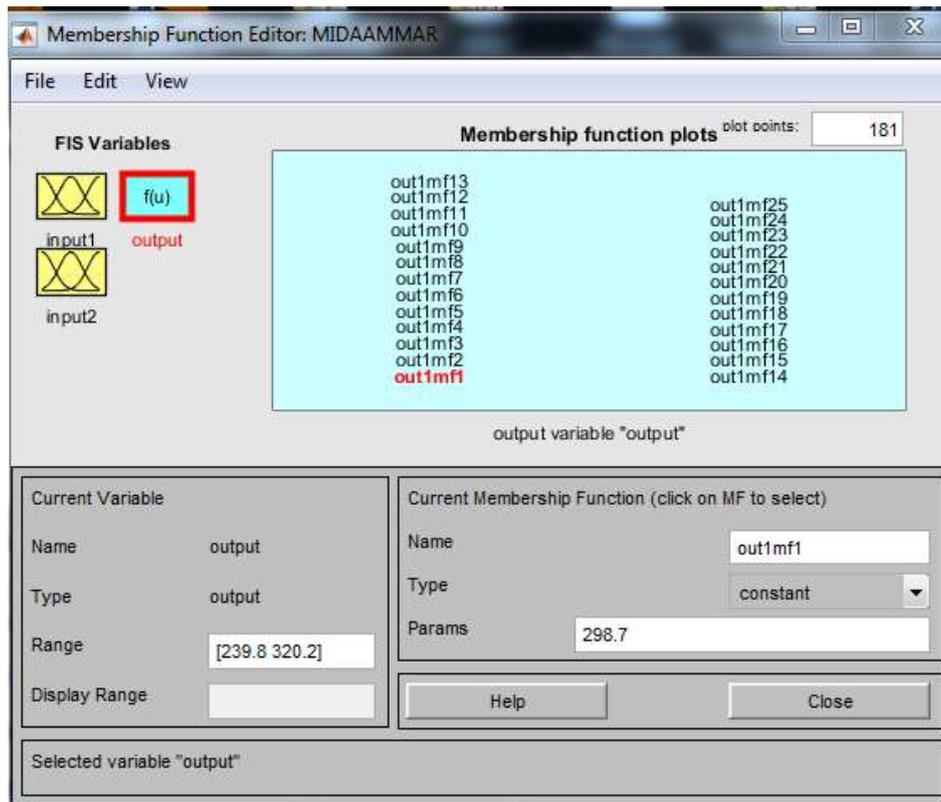


Figure III.12. Fonction d'appartenance de la température de la cellule PV

6-visualisation des règles :

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

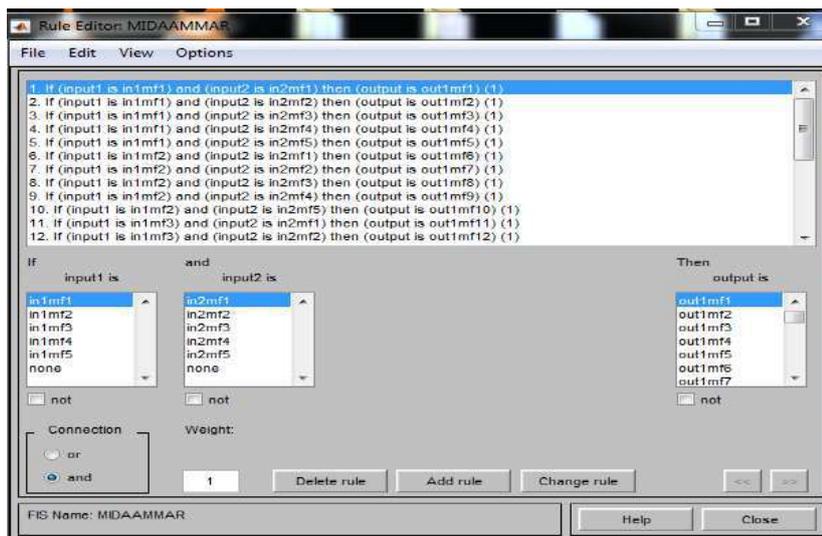


Figure III.13. Fonction d'appartenance visualisation des règles

Chapitre III : REALISATION D'UN ONDULEUR MONOPHASE

Il est à noter qu'on aura 25 règles, et on a 5 mfs pour l'entrée 1 et 5 mfs pour l'entrée 2.



Figure III.14.: Base de règles du contrôleur ANFIS

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

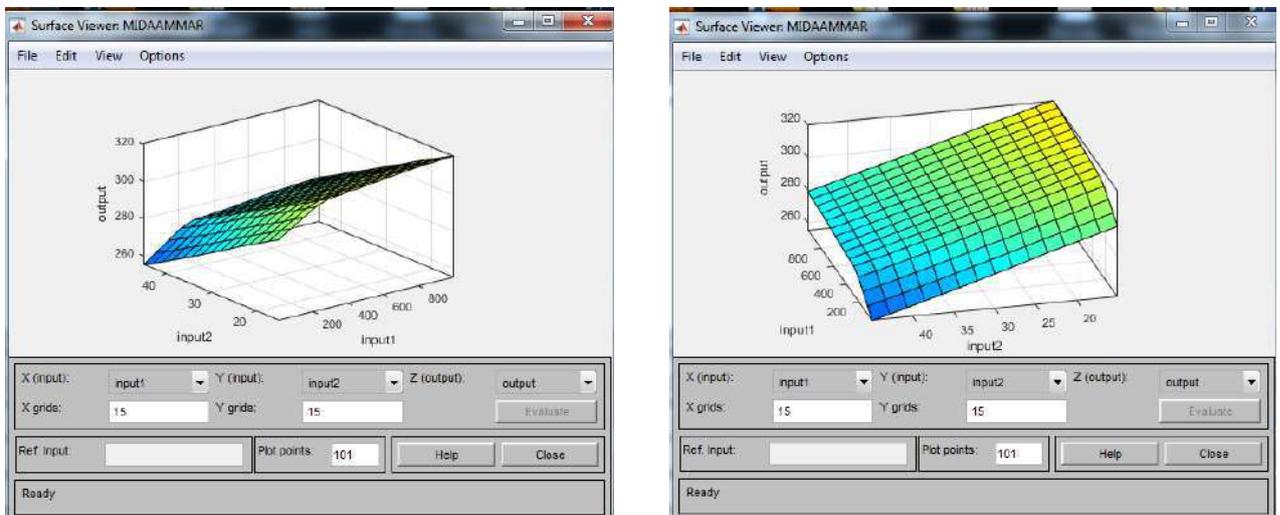


Figure III.15: Vue de surface créée par ANFIS

III.6. Simulation de Système globale: un panneau photovoltaïque avec MPPT et convertisseur DC-DC :

III.6. 1 • Schéma bloc :

La figure IV.1 illustre le bloc schématique de SIMULINK du système photovoltaïque adapté par la commande MPPT

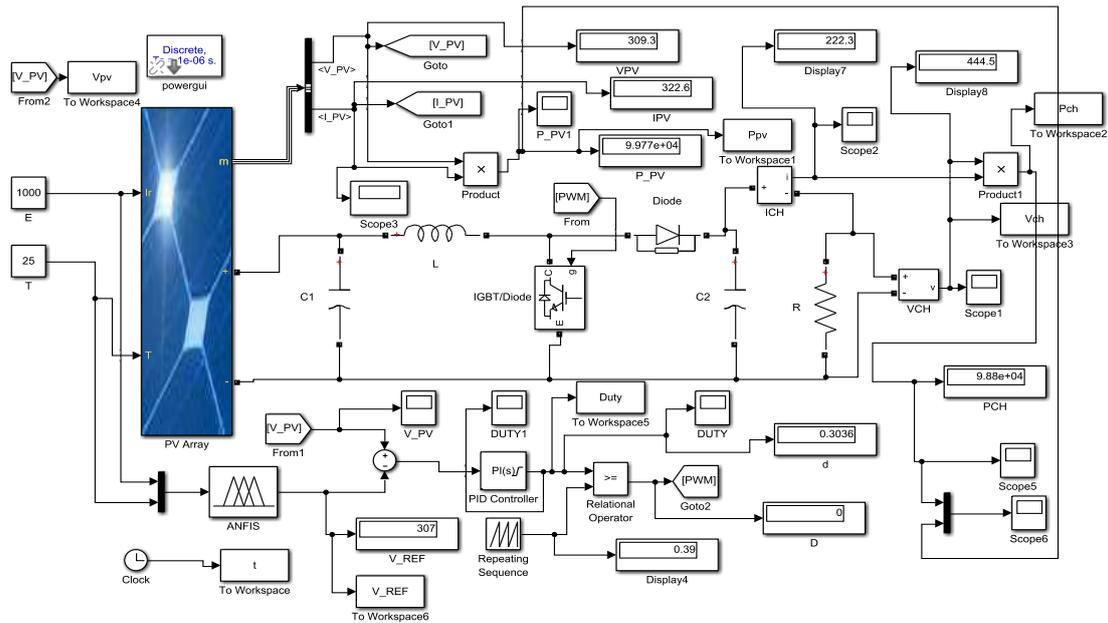


Figure III.16 Schéma de simulation d'un système PV commandé par un contrôleur MPPT avec ANFIS

III.6.2 Test ANFIS

Le contrôleur ANFIS proposé est ensuite testé en se connectant à l'ensemble du système comme il est montré dans la figure III.16

Le système se compose d'un panneau photovoltaïque, d'un convertisseur élévateur DC-DC, d'un contrôleur MPPT et d'une charge. La tension PV en fonction des conditions météorologiques (irradiation & température dans notre cas). Le convertisseur Boost est utilisé pour contrôler la tension et l'élévation ou l'abaissement en fonction de la charge. Le MPPT est contrôlé par le dispositif de commutation dans le convertisseur DC-DC, ce commutateur de contrôle force le panneau photovoltaïque à travailler sur des points de fonctionnement spécifiques et à maintenir la valeur de référence pour obtenir la puissance maximale aux conditions d'irradiations et de température.

Les spécifications et les paramètres des panneaux photovoltaïques sont indiqués dans le tableau III.1.

Les valeurs de l'inductance et du condensateur sont déterminées par des équations connues dans la littérature. Le dimensionnement de ces composants c'est-à-dire les constituant le circuit de puissance à savoir, l'inductance de lissage L , le transistor de commutation, les capacités et la diode. Cette étape de dimensionnement est critique surtout dans l'implémentation d'un Boost commandé par MPPT.

La Bobine : élément délicat à déterminer. Trop faible ne permet pas le fonctionnement de la carte de puissance, trop forte provoque d'importantes pertes de puissance par effet Joule.

Alors, l'inductance du circuit Boost est calculée pour une fréquence de 50Khz et une ondulation du courant de 0.05 A.

La valeur minimale de l'inductance est donnée par :

$$L \geq \frac{V_s}{4 * f_s * \Delta I_L} \quad (27)$$

Où f_s est la fréquence de commutation, et V_s la tension de charge.

On choisit l'ondulation du courant $\Delta I_L = 0.05A$ donc la valeur de l'inductance L est :

$$L \geq \frac{36}{4 * 50000 * 0.05} = 3.6 \text{ mH} \quad (28)$$

Condensateur C_1 et C_2

Les condensateurs chimiques ont la fonction de filtrer les variations des tensions d'entrée et de sortie. Les valeurs des capacités sont calculées en fonction de l'ondulation voulues ainsi que des grandeurs moyennes désirées

Pour respecter la condition sur l'ondulation de la tension de sortie, la capacité du condensateur C_2 doit vérifier l'expression :

$$C_2 \geq \frac{\Delta i_L}{8 * \Delta V_{C2max} * f} \quad (29)$$

Chapitre III : REALISATION D'UN ONDULEUR MONOPHASE

Pour avoir l'ondulation de la tension d'entrée voulue, la capacité du condensateur C_1 doit vérifier l'expression :

$$C_1 \geq \frac{I_{pv}}{\Delta V_{pv,max} * f} \quad (30)$$

Dans notre système, le convertisseur boost est conçu de manière à ce que les valeurs de ses paramètres soit : $C_1 = 100 \mu F$, $L = 1,45 \text{ mH}$, $C_2 = 3227 \mu F$ et la fréquence de commutation est de 5 KHz.

L'ANFIS prend en entrée le niveau d'irradiation et le degré de température, en fonction de ces valeurs, il donne la tension de référence que le panneau PV doit fonctionner à cette valeur. Ensuite, nous avons calculé la différence de tension entre la tension PV et la tension de référence de l'ANFIS. Cette tension calculée est comparée à un signal en dents de scie pour générer le signal de modulation de largeur d'impulsion approprié et le dispositif de commutation dans le convertisseur élévateur peut être activé/désactivé en fonction de ce signal PWM de contrôle. Chaque valeur pour l'irradiation et la température ont un signal PWM différent des autres. On peut prendre deux cas, le premier cas si l'on suppose la valeur d'irradiation autour de 1000 w/m^2 et le degré de température égal à $25^\circ C$.

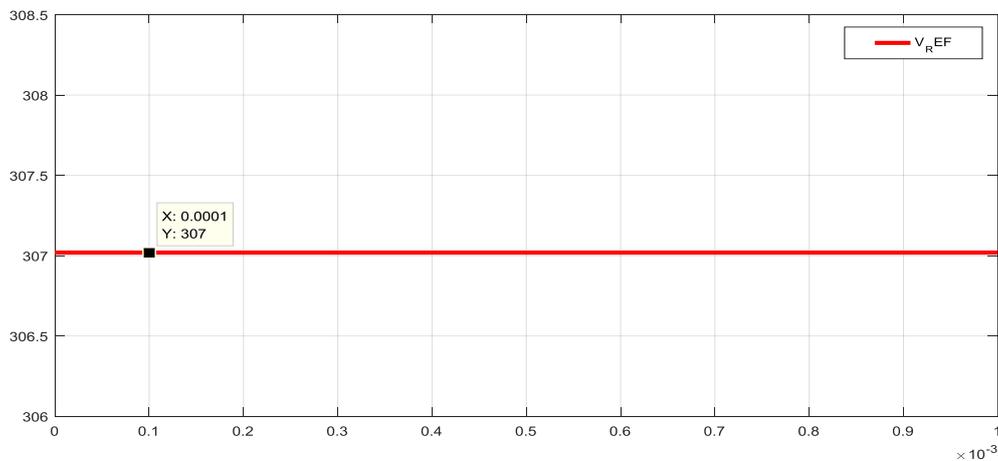


Figure III.17 : résultat du panneau solaire avant commande MPPT avec une température de 25° et un irradiation de 1000 W/m^2

III.6.3 RESULTATS DE SIMULATION

Dans cette section, les résultats de la simulation de l'application de l'approche neuro-fouille à la poursuite du point de puissance maximal, nous allons examiner les effets de cette

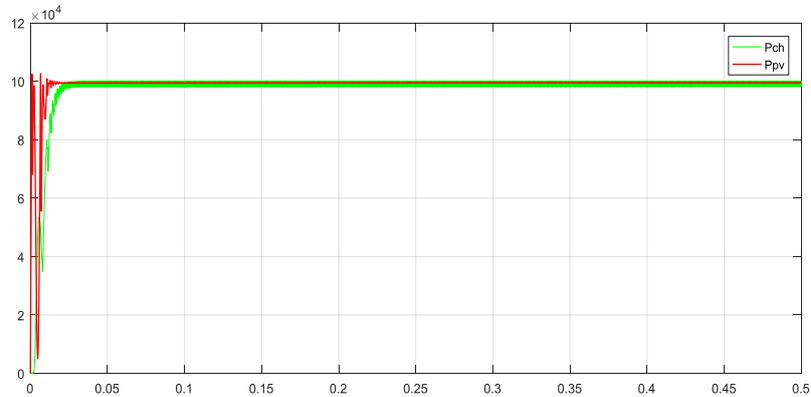


Figure III.18: Puissance optimale du système PV

hybridation, illustrés par les graphiques suivants. Une fois le contrôleur neuro flou conçu et

testé, il est inséré dans le système photovoltaïque. Une simulation numérique est par la suite effectuée.

Les résultats de simulation, sont donnés par les figures 13 et 14. Ces figures montrent les valeurs de sortie de la puissance et de la tension pour une paire de la température et de l'éclairement égale à (25°C, 1000 W/m²).

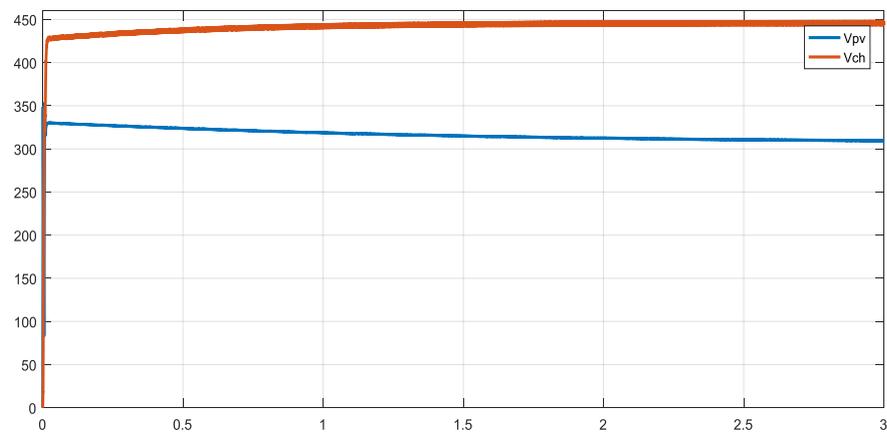


Figure III.19: Tension optimale du système PV

Chapitre III : REALISATION D'UN ONDULEUR MONOPHASE

Les figures de simulation précédentes montrent que le système photovoltaïque converge vers les valeurs optimales.

On considère les variations de la température et de l'éclairement données par les figures 15 et 16. Les figures 17 et 18 illustrent l'évolution de la puissance et de la tension aux bornes du panneau PV, suite à l'évolution de la température et de l'éclairement.

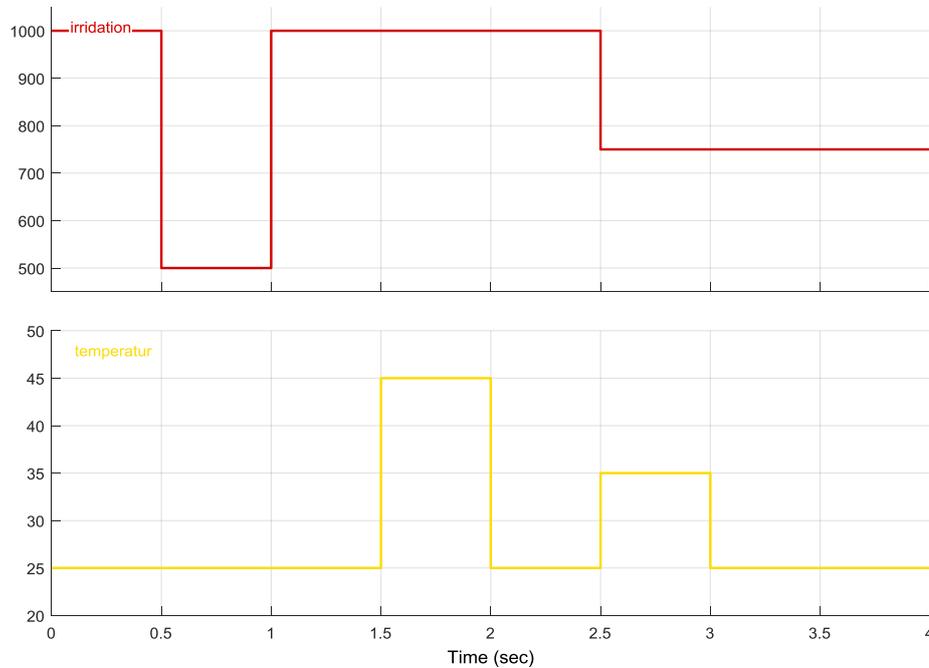


Figure III.20: Evolution de la température et Evolution de l'éclairement

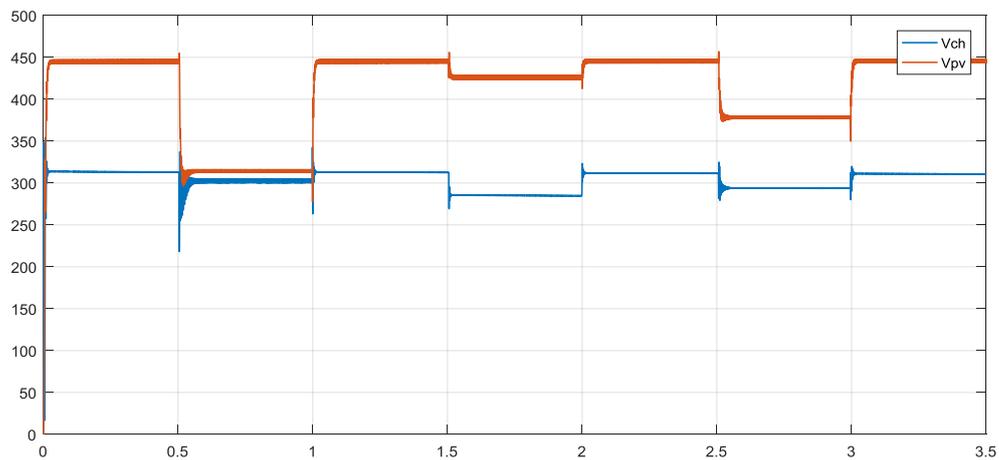


Figure III.21 comparaison entre la courbe d'évolution de tension de la charge et des PV

Tension optimale du système PV pour des conditions variables de la température et de l'éclairement

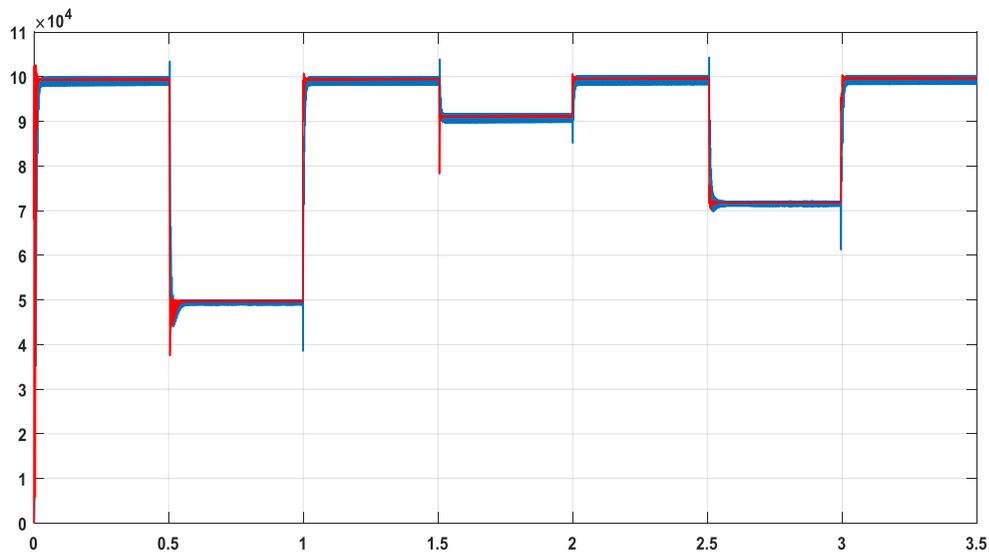


Figure III.22: Puissance optimale du système PV pour des conditions variables de la température et de l'éclairement

Etude comparative entre les 2 algorithmes proposés

Afin d'évaluer les performances et de comparer les deux algorithmes proposés, des simulations P&O et ANFIS pour MPPT.

III.6.4 Schéma bloc P&O et ANFIS:

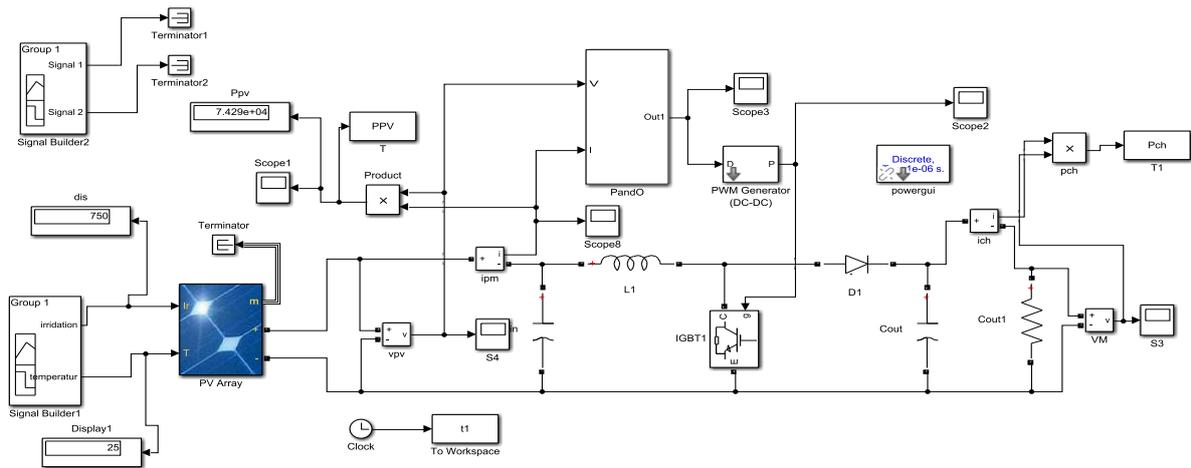


Figure III.23: Schéma de simulation P&O

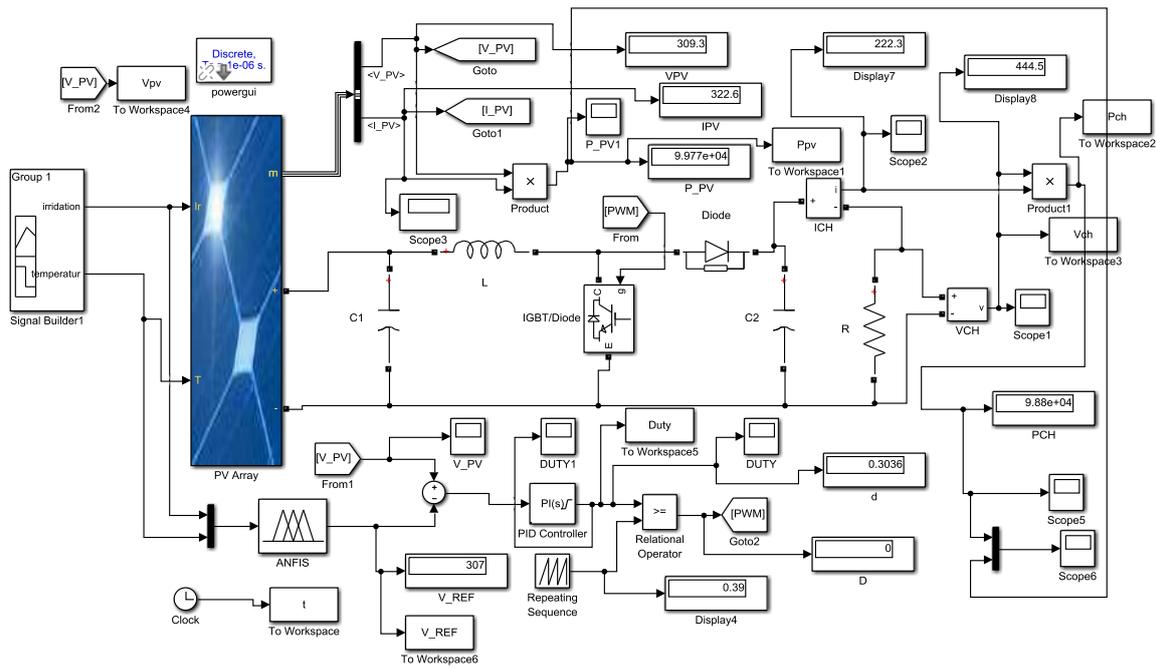


Figure III.24: Schéma de simulation ANFIS

Simulation

Dans cette partie, une analyse de simulation comparative est effectuée pour montrer les performances des algorithmes MPPT basés sur ANFIS et P&O.

L'objectif de cette simulation est de visualiser l'évolution de la puissance du module PV de différentes commandes MPPT basées sur l'algorithme P&O afin de pouvoir évaluer et comparer les performances de chacune.

L'étude comparative prend en compte la vitesse de poursuite du point de puissance maximale et l'oscillation autour du point de fonctionnement. Comparez les performances de l'algorithme ANFIS avec l'algorithme P&O classique dans les deux systèmes (dynamique et statique). À travers quatre phases de conditions météorologiques changeantes :

Premièrement : dans les cas ordinaires

Deuxièmement : les changements dans le rayonnement solaire

Troisièmement, les changements de température des cellules

Quatrièmement : conditions aléatoires

Il est clair que ces changements entraîneront une diminution ou une augmentation de l'énergie. Les nombres suivants représentent les résultats de la simulation

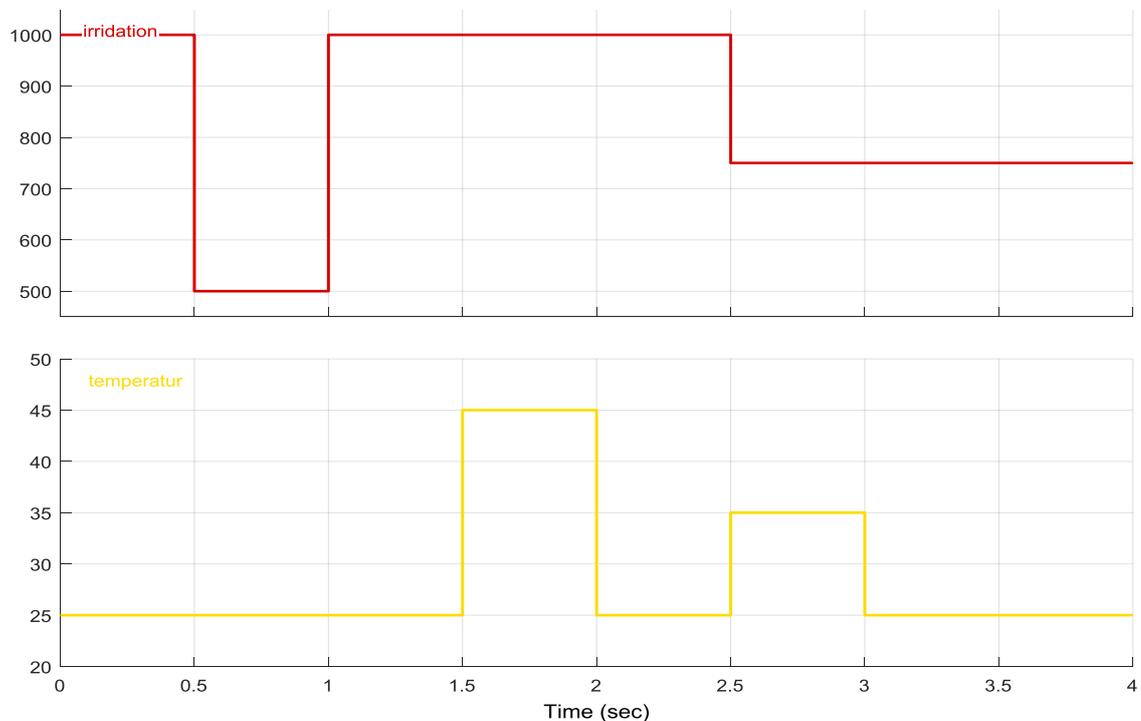


Figure III.25 Evolution de l'ensoleillement et température global

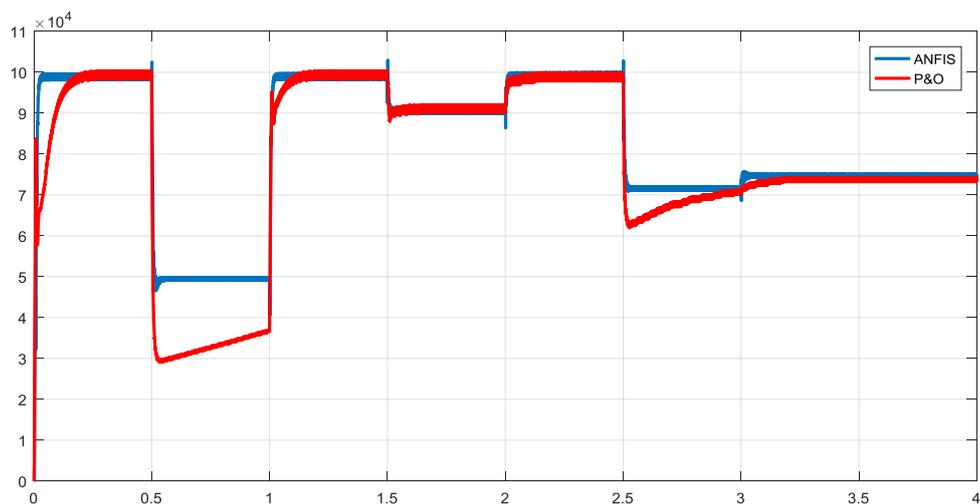


Figure III.26 Evolution de la puissance Ppv des 2 algorithmes ANFIS P&O étudiés

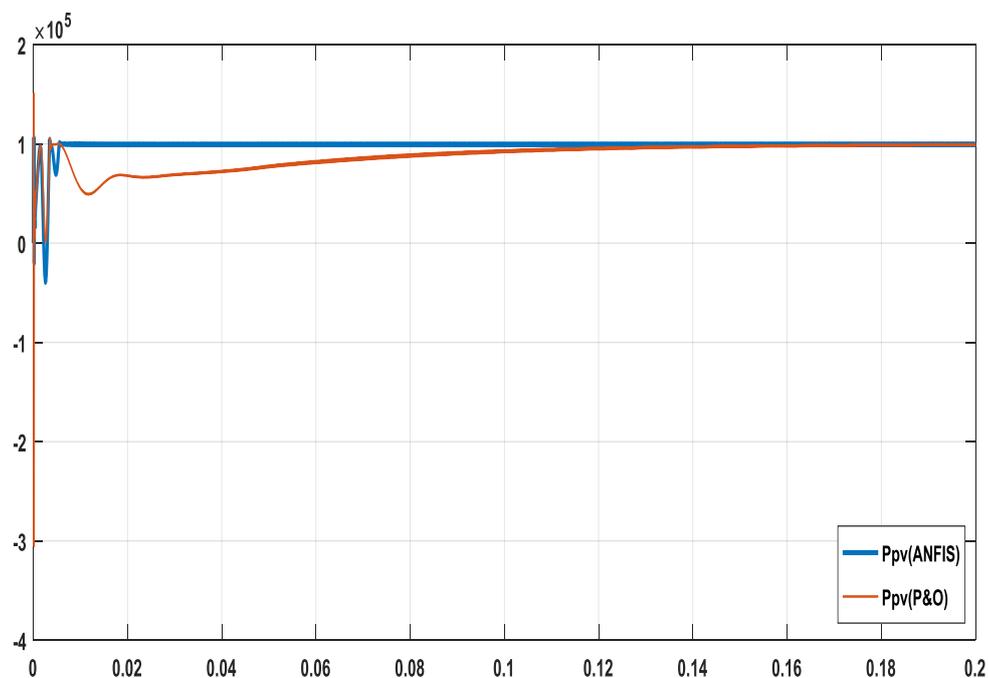


Figure III.27 : comparaison du temps de réponse entre puissance avec technique ANFIS et P&O

Chapitre III : REALISATION D'UN ONDULEUR MONOPHASE

Selon les figures x, le contrôleur MPPT basé sur ANFIS est clairement capable de suivre la puissance maximale avec une grande précision dans diverses conditions météorologiques, et il a approché le point de puissance maximale d'environ 0,01 s. Alors que le contrôleur MPPT basé sur P&O prenait environ 0,14 seconde

D'après les figures ci-dessus, les performances du système PV sont stables lorsque le contrôleur MPPT proposé est appliqué. Le panneau photovoltaïque est intégré au contrôleur MPPT basé sur ANFIS, au convertisseur boost et à la charge. Le contrôleur MPPT suit le changement du niveau d'irradiation et de température. Le contrôleur MPPT force le panneau photovoltaïque à fonctionner à un point de fonctionnement spécifique pour générer la puissance maximale. La température et la présence de nuages dans le ciel provoquent un changement rapide de la valeur de l'irradiation et de la puissance photovoltaïque. Ainsi, la puissance générée par le panneau photovoltaïque change continuellement. Comme nous pouvons le voir sur les graphiques, le contrôleur ANFIS-MPPT a la capacité de suivre ces changements rapides et d'extraire la puissance maximale à n'importe quel point de fonctionnement de manière stable. L'énergie générée par le panneau photovoltaïque avec et sans contrôleur MPPT est très différente.

L'ANFIS-MPPT a montré un haut degré de sensibilité et de stabilité dans ses performances

III.7. Conclusion :

Nous avons présenté à travers ce chapitre, les résultats de simulation du système photovoltaïque optimisé par une technique MPPT intelligente (neurone-floue) ANFIS. Ces résultats confirment les performances correctes du contrôleur P&O mais montrent également de meilleures performances du contrôleur ANFIS. Ce dernier s'est avéré avoir de meilleures performances, un temps de réponse rapide, une très faible erreur de stabilité et est robuste dans diverses conditions météorologiques.

Conclusion générale

Conclusion générale

L'objectif de notre étude était de modéliser et de simuler un système photovoltaïque optimisé par une technique MPPT, il est nécessaire de préciser que le cadre dans lequel s'inscrivait ce mémoire était la commande d'un tel dispositif avec un algorithme utilisant les réseaux de neurones artificiel ainsi que la logique floue, pour cela nous nous sommes fait aider par le logiciel ANFIS de MATLAB simulink.

A travers notre étude, le concept de poursuite du point de fonctionnement optimal MPPT a été présenté, les équations du modèle ainsi que les caractéristiques des trois parties qui composent le système en entier à savoir : les panneaux le régulateur et la charge. Ces contrôleurs sont destinés à la poursuite du point de fonctionnement maximal mais aussi à minimiser l'erreur entre la puissance de fonctionnement et la puissance maximale de référence qui est variable en fonction de la charge et des conditions climatiques.

Dans le même but, plusieurs techniques de contrôle MPPT ont été introduites, dans ce travail, nous avons présenté une stratégie d'hybridation entre deux techniques : les réseaux de neurones, et la logique floue en vue d'élaborer un système de commande et de poursuite du point de puissance maximale afin d'extraire le maximum de puissance.

La poursuite du point de puissance maximale par l'approche ANFIS a montré l'efficacité de cette dernière. L'utilisation de l'approche neuro-flou (ANFIS) a permis une génération automatique des règles floues.

Selon les résultats obtenus, on peut conclure que le système neuro-flou fait apparaître un bon compromis entre la caractérisation et la justesse des calculs. Sa robustesse, sa rapidité et la précision de ses sorties lui permettent de donner des décisions correctes et d'éviter les cas d'indécisions, les réseaux de neurones avec leurs capacités à s'adapter à des situations inconnues par le biais de l'apprentissage, et la logique floue avec sa capacité de modélisation de connaissances imprécises et gestion de l'incertitude.

Les résultats obtenus lors de notre travail encouragent la poursuite des recherches dans ce sens. En perspective nous nous proposons de réaliser ce dispositif avec une carte ARDUINO et un code MATLAB, cela nous permettra d'enrichir la grande famille des méthodes de poursuite du point de puissance maximale.

Références bibliographiques

- [1] <https://www.planete-energies.com/fr/medias/decryptages/les-energies-fossiles>
- [2] <https://www.afrik21.africa/>
- [3] (https://www.wikiwand.com/fr/Cellule_photovoltaique)
- [4] <https://www.algerie1.com/actualite/djelfa-une-centrale-solaire-de-20-megawatt-inaugure>
- [5] A.mefti,H.Mimouni (Evaluation du potentiel énergétique solaire) Bulletin des énergies renouvelables No 2 , Décembre 2002
- [6] Pascal. Pernet (Développement de cellules solaires en Silicium amorphie de type "n.i.p" sur substrats souples) Ecole Polytechnique Fédérale de lausanne (EPFL),Thèse n°:2303
- [7] (Energie Photovoltaïque) Guide des énergies renouvelables 2002
- [8] <https://ni-cd.net/wpnicd/index.php/lhistoire-des-accumulateurs/>
- [9] <https://www.zonetronek.com/definition-dune-batterie-solaire/>
- [10] <http://biblio.univ-annaba.dz/ingeniorat/wp-content/uploads/2019/10/Tarfaya-Yazid-Siad-Heythem.pdf>
- [11] <https://www.lepanneausolaire.net/les-differentes-technologies-contrôleurs-charge.php>
- [12] <https://news.dualsun.com/technologie-solaire/>
- [13] Deilmann, C. and K.-J. Bathe, A holistic method to design an optimized energy scenario and quantitatively evaluate promising technologies for implementation. International Journal of Green Energy, 2009. 6(1): p. 1-21.
- [14] Li, J. and H. Wang. Maximum power point tracking of photovoltaic generation based on the fuzzy control method. in Sustainable Power Generation and Supply, 2009. SUPERGEN'09. International Conference on. 2009. IEEE.
- [15] Celik, A.N. and N. Acikgoz, Modelling and experimental verification of the operating current of mono-crystalline photovoltaic modules using four-and fiveparameter models. Applied energy, 2007. 84(1): p. 1-15.
- [16] Ishaque, K., Z. Salam, and H. Taheri, Modeling and simulation of photovoltaic (PV) system during partial shading based on a two-diode model. Simulation Modelling Practice and Theory, 2011. 19(7): p. 1613-1626.
- [17] Patel, H. and V. Agarwal, MATLAB-based modeling to study the effects of partial shading on PV array characteristics. Energy Conversion, IEEE Transactions on, 2008. 23(1): p. 302-310.
- [18] Zagrouba, M., et al., Identification of PV solar cells and modules parameters using the genetic algorithms: application to maximum power extraction. Solar energy, 2010. 84(5): p. 860-866.
- [19] Kim, W. and W. Choi, A novel parameter extraction method for the one-diode solar cell model. Solar Energy, 2010. 84(6): p. 1008-1019.

- [20] Villalva, M.G. and J.R. Gazoli, Comprehensive approach to modeling and simulation of photovoltaic arrays. *Power Electronics, IEEE Transactions on*, 2009. 24(5): p. 1198-1208.
- [21] Elshatter, T.F., et al. Fuzzy modeling of photovoltaic panel equivalent circuit. in *Photovoltaic Specialists Conference, 2000. Conference Record of the TwentyEighth IEEE. 2000. IEEE.*
- [22] Kottas, T.L., Y.S. Boutalis, and A.D. Karlis, New maximum power point tracker for PV arrays using fuzzy controller in close cooperation with fuzzy cognitive networks. *Energy Conversion, IEEE Transactions on*, 2006. 21(3): p. 793-803.
- [23] Duffie, J.A., William A. Beckman *Solar Engineering of Thermal Processes*. 2006, JOHN WILEY & SONS, INC. NY.
- [24] Nelson, J., *The physics of solar cells*. Vol. 1. 2003: World Scientific.
- [25] Benghanem, M., A.H. Arab, and K. Mukadam, Data acquisition system for photovoltaic water pumps. *Renewable energy*, 1999. 17(3): p. 385-396.
- [26] Blaesser, G., *PV system measurements and monitoring the European experience*. *Solar energy materials and solar cells*, 1997. 47(1): p. 167-176.
- [27] Kim, I.-S., M.-B. Kim, and M.-J. Youn, New maximum power point tracker using sliding-mode observer for estimation of solar array current in the grid-connected photovoltaic system. *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, 2006. 53(4): p. 1027-1035.
- [28] Mellit, A. and S.A. Kalogirou, Artificial intelligence techniques for photovoltaic applications: A review. *Progress in energy and combustion science*, 2008. 34(5): p. 574-632.
- [29] Zadeh, L.A., Fuzzy sets. *Information and control*, 1965. 8(3): p. 338-353.
- [30] Passino, K.M., Stephen Yurkovich. *Fuzzy Control*. 1998, Boston (USA): Addison Wesley Longman.
- [31] Jang, J.-S.R., ANFIS: adaptive-network-based fuzzy inference system. *Systems, Man and Cybernetics, IEEE Transactions on*, 1993. 23(3): p. 665-685.
- [32] Jang, J.-S.R. and C.-T. Sun, Neuro-fuzzy modeling and control. *Proceedings of the IEEE*, 1995. 83(3): p. 378-406.

Résumé

L'intérêt porté aux dispositifs photovoltaïques ne cesse de croître, stimulé par leurs nombreuses applications. Au cours de ce mémoire, nous nous sommes intéressés à l'étude d'une technique en particulier nous permettant d'optimiser le rendement de ces derniers, se basant sur deux grandes familles de codes à savoir les réseaux de neurones artificiels et la logique floue nous permettant ainsi de profiter d'une grande capacité d'adaptation avec le processus d'apprentissage, et aussi une puissance de modélisation de connaissances imprécises et gestion de l'incertitude.

Ainsi les travaux présentés dans ce mémoire ont consisté aux développements d'un modèle décrivant les interactions entre les différentes parties du système panneaux solaires régulateur batterie ainsi que le point optimal d'utilisation du dispositif à savoir le MPPT, pour cela il était nécessaire de coupler entre plusieurs méthodes.

Nous nous proposons par la suite d'étudier l'adaptation d'ARDUINO dans nos dispositifs, l'élaboration des modèles numériques basés sur le logiciel de simulation moyennant ANFIS de simulink MATLAB a permis d'étudier essentiellement la variation du courant tension et puissance ainsi que l'influence de la température et le rayonnement, mais aussi de trouver le point optimal d'utilisation du dispositif (ou le Maximum power point tracking) MPPT.

Abstract

Interest in photovoltaic devices continues to grow, stimulated by their many applications. During this thesis, we are interested in the study of a technique in particular we allow to optimize the performance of the latter, based on two large families of code namely artificial neural networks and fuzzy logic thus allowing us to benefit from a great capacity of adaptation with the learning process, and also a power of modeling of imprecise knowledge and management of uncertainty.

Thus the work presented in this thesis consisted of the development of a model describing the interactions between the different parts of the solar panel battery regulator system as well as the optimal point of use of the device, namely the MPPT, for this it was necessary to couple between several methods.

We then propose to study the adaptation of ARDUINO in our devices, The development of digital models based on simulation software through ANFIS simulink MATLAB has made it possible to study essentially the variation of the current, voltage and power as well as the influence of temperature and radiation, but also to find the optimal point of use of the device (or the Maximum power point tracking) MPPT.